



**SOLOS
FRÁGEIS**

**CARACTERIZAÇÃO, MANEJO E
SUSTENTABILIDADE**

Selma Simões de Castro

Luis Carlos Hernani

Editores Técnicos



Embrapa

**SOLOS FRÁGEIS:
CARACTERIZAÇÃO, MANEJO E
SUSTENTABILIDADE**

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

SOLOS FRÁGEIS: CARACTERIZAÇÃO, MANEJO E SUSTENTABILIDADE

Selma Simões de Castro
Luís Carlos Hernani
Editores Técnicos

Embrapa
Brasília, DF
2015

Exemplares desta obra podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, nº 1.024, Bairro Jardim Botânico,
CEP: 22460-000, Rio de Janeiro, RJ
Tel: (21) 2179-4500
Fax: (21) 2274-5291
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Unidade responsável pelo conteúdo e pela edição

Embrapa Solos

Comitê de Publicações da Embrapa Solos

Presidente

José Carlos Polidoro

Secretário-executivo

Jacqueline Silva Rezende Mattos

Membros

Ademar Barros da Silva

Adriana Vieira de C. de Moraes

Alba Leonor da Silva Martins

Enyomara Lourenço Silva

Evaldo de Paiva Lima

Joyce Maria Guimarães Monteiro

Luciana Sampaio de Araujo

Maria Regina Laforet

Maurício Rizzato Coelho

Moema de Almeida Batista

Supervisão Editorial

Jacqueline Silva Rezende Mattos

Revisão de texto

Márcia Lopes Mensor Lessa

Normalização bibliográfica

Luciana Sampaio de Araujo

Projeto gráfico

Agência 2A Comunicação

Capa

Agência 2A Comunicação

Editoração eletrônica

Agência 2A Comunicação

Fotos de capa

Erosão: *Cláudio Lucas Capeche*

Plantio direto: *Manoel Ricardo de Albuquerque Filho*

Tratamento das ilustrações

Agência 2A Comunicação

1ª edição

1ª impressão (2015): 1.000 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Solos

Solos frágeis : caracterização, manejo e sustentabilidade / Selma Simões de Castro, Luís Carlos Hernani, editores técnicos. – Brasília, DF : Embrapa, 2015.
367 p. : il. color.; 16 cm x 23 cm.

ISBN 978-85-7035-554-6

1. Solo. 2. Manejo do solo. 3. Reconhecimento do solo. 4. Classificação do solo.
5. Agricultura sustentável. I. Castro, Selma Simões de. II. Hernani, Luís Carlos.
III. Embrapa Solos.

CDD (23. ed.) 631.4

© Embrapa 2015

Autores

Ademir Fontana

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia - Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Adoildo da Silva Melo

Engenheiro-agrônomo, técnico da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Alba Leonor da Silva Martins

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Alexandre Ferreira do Nascimento

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências - Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop, MT

Alexandre Martins Abdão dos Passos

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Rondônia, Porto Velho, RO

Alexandre Ortega Gonçalves

Engenheiro-agrônomo, mestre em Engenharia Agrícola, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Alfredo Borges De-Campos

Geólogo, doutor em Ciência do Solo e Meio Ambiente, professor da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, SP

Aline Pacobahyba de Oliveira

Engenheira-agrônoma, doutora em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Álvaro Vilela de Resende

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Ana Luiza Dias Coelho Borin

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Algodão, Campina Grande, PB

Ana Paula Moreira Rovedder

Engenheira florestal, doutora em Ciência do Solo, professora da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS

Ana Paula Dias Turetta

Geógrafa, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

André Júlio do Amaral

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Recife, PE

Cesar da Silva Chagas

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Daniel Vidal Pérez

Engenheiro-agrônomo, doutor em Química Analítica, pesquisador e chefe-geral da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Elaine Cristina Cardoso Fidalgo

Engenheira-agrônoma, doutora em Engenharia Agrícola, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Elizon Dias Nunes

Geógrafo, doutor em Geografia, professor da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-Goiás) e geógrafo do Laboratório de Geomorfologia, Pedologia e Geografia Física (Labogef), da Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, GO

Falberni de Souza Costa

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Acre, Rio Branco, AC

Fernando Ernesto Ucker

Engenheiro ambiental, doutor em Agronomia, professor da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-Goiás), Goiânia, GO

Flávia Cristina dos Santos

Engenheira-agrônoma, doutora em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Flávio Adriano Marques

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Recife, PE

Gustavo de Mattos Vasques

Engenheiro florestal, doutor em Ciência do Solo e da Água, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Heitor Luiz da Costa Coutinho (in memoriam)

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências Biológicas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Hellbia Samara Moreira de Carvalho Rodrigues

Geógrafa, mestre em Geografia, consultora técnica autônoma, Goiânia, GO

Jackson Adriano Albuquerque

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, professor da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), Lajes, SC

Jaime Antonio de Almeida

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, professor da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), Lajes, SC

José Ronaldo de Macedo

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Joyce Maria Guimarães Monteiro

Engenheira-agrônoma, doutora em Planejamento Ambiental, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Laura Milani da Silva Dias

Geógrafa, doutoranda da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, SP

Luciano Colpo Gatiboni

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, professor da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), Lajes, SC

Luís Carlos Hernani

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Luís de França da Silva Neto

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Recife, PE

Manoel Batista de Oliveira Neto

Engenheiro-agrônomo, mestre em Agronomia - Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Recife, PE

Manoel Ricardo de Albuquerque Filho

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Ricardo Marques Coelho

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), Campinas, SP

Selma Simões de Castro

Geógrafa, doutora em Ciências - Geografia Física, professora da Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, GO

Silas Pereira Trindade

Geógrafo, doutor em Ciências Ambientais, Goiânia, GO

Stanley Robson de Medeiros Oliveira

Bacharel em Ciência da computação, Ph.D. em Ciência da Computação, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP

Tony Jarbas Ferreira Cunha

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica (CNPq), que, em parceria com a Embrapa, organizou as Redes Nacionais de Pesquisa em Agrobiodiversidade e Sustentabilidade Agropecuária (Repensa), viabilizando os recursos necessários ao desenvolvimento do projeto “*Novos paradigmas no conhecimento de solos frágeis para a produção agrícola sustentável do Brasil – Fragissolo*” e a organização da Rede Brasileira de Pesquisa em Solos Frágeis. Por meio dessa Rede, foram realizadas pesquisas sobre a caracterização e o comportamento dos solos frágeis em áreas situadas nos estados de Pernambuco, Bahia, Goiás e São Paulo, cujos resultados se consubstanciaram nos vários capítulos desta coletânea, além de serem divulgados em diversos eventos nacionais e internacionais.

Aos colegas e pós-graduandos do Instituto de Estudos Sócio-Ambientais (Iesa) e da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás (UFG), que, mediante recursos do Projeto Sensor (*Sustainability of land use in European Regions*) – convênio União Europeia-Embrapa –, viabilizaram a avaliação de ferramentas como a SIAT (*Sustainability Indicators of Assessment Tools*) e a FOPIA (*Framework for Participatory Impact Assessment*) no Brasil e a realização de visitas técnicas a campo no Sudoeste Goiano, além da “*Oficina de preparação para a avaliação participativa de impactos à sustentabilidade de políticas de expansão canavieira no Sudoeste Goiano*”, que aconteceu em dezembro de 2012 em Goiânia, GO, ocasião em que foram definidos indicadores para a avaliação da sustentabilidade da expansão canavieira naquela região. O Projeto Sensor também apoiou a participação de pesquisadores em eventos internacionais, como o *Planet Under Pressure* (PUP) em Londres no ano de 2013, quando os resultados das pesquisas foram divulgados.

Aos parceiros do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), que assumiram a responsabilidade por atividades de pesquisas dando o melhor de si e testando modelos para atenderem aos desafios da compreensão do comportamento da fertilidade e do mapeamento digital. E aos estudantes do curso de Pós-Graduação IAC de Agricultura Tropical e Subtropical, por auxiliarem na realização de diversas etapas das pesquisas.

Às equipes de ensino e pesquisa das instituições: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho (UNESP-Botucatu) e Faculdade de Agronomia Arnaldo Horácio Ferreira; e à Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (CODEVASF), agradecemos pelo apoio à pesquisa.

Aos proprietários e técnicos das fazendas Xanxerê, em Correntina, BA; Marechal Rondon e Santa Rosa, em Luís Eduardo Magalhães, BA; Boa Esperança, em Petrolina, PE; Araucária, em Mineiros, GO; e da microbacia Águas da Lúcia, em Botucatu, SP, locais onde foram monitorados solos com diferentes usos agrícolas, nosso agradecimento pelo apoio.

À Fundação Bahia e às empresas e organizações não governamentais Oreades, Círculo Verde, Inovação Agrícola e Plantec, pelo apoio incondicional aos trabalhos de campo.

Às unidades da Embrapa Algodão, Cerrados, Milho e Sorgo, Semiárido, Solos – UEP Recife e seus pesquisadores, agradecemos pelo compartilhamento da pesquisa e pelos ricos momentos de discussão de resultados.

E a todos que aceitaram o desafio de buscar novos paradigmas relacionados aos Solos Frágeis, inclusive àqueles que ofereceram seus conhecimentos a esta coletânea, sem os quais o resultado deste trabalho não seria o mesmo, o nosso sincero agradecimento.

In memoriam

Heitor Luiz da Costa Coutinho

Heitor Luiz da Costa Coutinho nasceu em 18 de julho de 1965, no Rio de Janeiro, RJ. Em 1990, obteve o título de Engenheiro-agrônomo pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e, em 1993, o de *Philosophy Doctor* em Ciências Biológicas pela Universidade de Bristol, na Inglaterra. Em 1994, ingressou na Embrapa Meio Ambiente como Pesquisador A e, em 1997, foi lotado na Embrapa Solos no Rio de Janeiro, onde permaneceu até o dia de sua partida.

Durante sua carreira, desenvolveu pesquisas em Ciências do Solo, com ênfase em Ecologia do Solo, principalmente nos temas: impacto ambiental de atividades agropecuárias nos recursos solo, água e biodiversidade; monitoramento da qualidade de solo e água em microbacias hidrográficas; indicadores biológicos de qualidade do solo, com ênfase na diversidade microbiana; análises de mudanças no padrão de uso das terras; indicadores de sustentabilidade e abordagem de serviços ecossistêmicos. Heitor participou brilhantemente como responsável ou como membro de projetos nacionais e internacionais. Publicou diversos trabalhos técnicos e científicos nas mais diversas mídias, tais como jornais científicos, séries Embrapa, capítulos de livros, entre outros.

Especificamente, Heitor esteve à frente, como coordenador no Brasil, do Projeto SENSOR (*Sustainability Impact Assessment: Tools for Environmental, Social and Economic Effects of Multifunctional Land Use in European Regions*), financiado pelo Programa-Quadro 6, da Comissão Europeia. Desenvolvido por um consórcio de 38 instituições de pesquisa de 15 países europeus, o Projeto SENSOR teve início em 2004 para desenvolver ferramentas de avaliação da sustentabilidade de diferentes cenários de uso da terra, integrando os impactos econômicos, sociais e ambientais resultantes de políticas públicas. Em 2007, quatro países externos à União Europeia (Brasil, Argentina, China e Uruguai) foram incorporados a esse projeto na qualidade de “Países Terceiros Alvos” (*Third Targeted Countries – TTC*).

A Embrapa Solos foi a representante do Brasil nesse consórcio. O objetivo brasileiro foi avaliar as condições de adaptação e transferência das

metodologias de análise desenvolvidas pelo componente europeu do projeto. Os estudos de caso tiveram como foco a expansão da cana-de-açúcar em áreas de alta dinâmica de mudança de uso das terras no Bioma Cerrado. Parte desse trabalho é apresentada na Parte 3 deste livro.

Perda irreparável para seus parceiros de trabalho e amigos, Heitor, além de excelente profissional, era um exemplo de ponderação, solidariedade e inclusão. Ficam as lembranças das conversas, das risadas, das reuniões de trabalho, da sua gentileza e do seu bom humor inabaláveis, além de todo o seu legado científico para a sociedade e as futuras gerações.

Este livro é em sua homenagem.

Apresentação

No decorrer da história do mundo, pode-se observar uma sucessão de ascensões e quedas de várias civilizações. Normalmente, os historiadores enfatizam a subordinação desse processo à conjuntura política, social e econômica da época. Contudo, nas últimas décadas, muitos pesquisadores têm apresentado um enfoque mais ecológico em suas interpretações. Em sua concepção, a essência da história está na forma pela qual o homem adaptou sua vida ao ambiente. Dessa maneira, o futuro de uma civilização está relacionado ao tipo de manejo que ela dá aos recursos naturais, principalmente a água e o solo.

O ser humano chegou ao século 21 buscando entender melhor o seu papel nas transformações ambientais ao seu redor e mostrando-se muito preocupado, também, com a sua capacidade tecnológica de influenciar o ambiente global. Essa preocupação crescente por um desenvolvimento sustentável pode ser avaliada pela participação de chefes de Estado e delegados de centenas de países nas conferências ECO-92 e Rio +20, ambas realizadas no Rio de Janeiro.

Nesse contexto de efervescência sobre a sustentabilidade dos sistemas produtivos mundiais, foi lançado o Edital MCT/CNPq/MEC/CAPES/CT AGRO/CT HIDRO/FAPS/EMBRAPA Nº 22/2010, que criou as Redes Nacionais de Pesquisa em Agrobiodiversidade e Sustentabilidade Agropecuária (REPENSA), iniciativa que visa contribuir para o avanço da sustentabilidade da agropecuária nacional mediante a incorporação de uma visão crítica e sistêmica na geração e transferência de conhecimentos para a intensificação da agropecuária com conservação dos recursos naturais.

Em articulação coordenada pelo Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa (DPD), foi desenvolvida, em 2010, uma proposta que visava integrar as diversas informações de solo das regiões do Sudoeste Goiano (Centro Oeste/Cerrado), do Oeste da Bahia, do Semiárido de Pernambuco e da região central do Estado de São Paulo. Seu objetivo geral foi avançar no conhecimento sobre Solos Frágeis de modo a viabilizar o uso agrícola equilibrado e equitativo mediante sistemas de manejo que possibilitassem produtividades e índices econômicos (fator rentabilidade agrícola) aceitáveis e que preservassem os recursos naturais solo, água, ar e biodiversidade.

Esta obra é um dos frutos do trabalho realizado pela Embrapa e seus parceiros por meio do projeto SEG 02.11.05.003.00.00 “*Novos paradigmas no conhecimento de Solos Frágeis para a produção agrícola sustentável do Brasil*” (Fragissolo – Rede de Pesquisa Solos Frágeis), que contou com o apoio financeiro do CNPq através do Processo 562698/2010-8.

Espera-se que esta coletânea de textos, resultantes desse projeto e de outros trabalhos desenvolvidos por instituições científicas externas à Embrapa, contribua para o aprofundamento do conhecimento sobre Solos Frágeis quanto aos métodos de caracterização, como o uso de geotecnologias, com ênfase em mapeamento digital de solos em escala de detalhe; e de avaliação da dinâmica evolutiva e as respectivas consequências de uso, com base em séries históricas de imagens de satélite e de análise de mudanças de atributos e de processos erosivos em diferentes sistemas produtivos e de manejo. Entende-se, no entanto, que este tenha sido apenas um dos primeiros passos nesse sentido.

Daniel Vidal Pérez
Chefe-Geral da Embrapa Solos



Prefácio

Este livro trata da organização de parte dos resultados de pesquisas desenvolvidas no Projeto “*Novos paradigmas no conhecimento de solos frágeis para a produção agrícola sustentável do Brasil*” (denominado simplesmente: Projeto Fragissolo), liderado pela Embrapa Solos. Esse Projeto foi desenvolvido em parceria com diversas outras instituições que compõem a Rede de Pesquisa Brasileira em Solos Frágeis, a qual é constituída por pesquisadores de diversas universidades, institutos de pesquisa e organizações não governamentais, citando-se, entre esses, o Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, da Universidade Federal de Goiás (IESA/UFG); o Instituto Agrônômico de Campinas (IAC); e, também, outras unidades da Embrapa, como a Embrapa Milho e Sorgo e a Embrapa Semiárido. O objetivo maior do projeto foi avançar no conhecimento sobre esses solos de modo a viabilizar o uso agrícola sustentável.

Financiado pelo CNPq e pela Embrapa, via Edital MCT/CNPq/MEC/CAPES/CT AGRO/CT HIDRO/FAPS/Embrapa nº 22/2010, o Projeto Fragissolo foi organizado em quatro temas principais, relativos às características morfológicas, analíticas, comportamentais, ambientais e de uso e manejo dos solos frágeis, na perspectiva de avaliação da sua sustentabilidade. Para tanto, contou, também, com o apoio e recursos complementares do Projeto Sensor-EU (*Sustainability of land use in European regions*), fruto de convênio firmado entre a Comunidade Europeia e a Embrapa cujo objetivo era construir, validar e implementar ferramentas de avaliação de impacto à sustentabilidade através do seu protocolo SIAT (*Sustainability Indicators of Assessment Tools*), aplicado a diferentes cenários de uso da terra por meio da análise integrada dos impactos econômicos, sociais e ambientais resultantes de políticas públicas, testando, assim, a transferibilidade dessas ferramentas para o Brasil.

No Fragissolo, foram considerados como frágeis aqueles solos cujas características intrínsecas e/ou posição na paisagem lhes conferem baixa resiliência e elevada suscetibilidade à degradação física, química e biológica quando submetidos à ação antrópica, sobretudo agrícola e pecuária. Considerou-se, ainda, que: a exploração inadequada está instabilizando e deteriorando rapidamente esses solos, algumas vezes de forma irreversível, mas sempre com algum comprometimento de suas funções e, especialmente, de seu potencial

produtivo; a sucessão histórica do uso tem implicações relevantes sobre as condições atuais da sua vulnerabilidade; e, finalmente, a fragilidade dos sistemas agrícolas produtivos está frequentemente relacionada mais com a atitude humana frente aos recursos naturais do que com a aptidão e a vulnerabilidade desses recursos aos agentes geradores de degradação.

Assumindo a relevância da influência antrópica sobre as mudanças globais, os resultados do Fragissolo demonstraram que as ações humanas podem ser moduladas nas mais diversas escalas, fortalecendo o pressuposto de que o uso do solo é questão chave para a governança de territórios e para assegurar o desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, foi analisada a evolução de uso do solo, sobretudo em áreas de expansão agrícola, de modo a obter indicadores que direcionassem o (re)equilíbrio das funções desses solos e a construção de cenários sustentáveis para o uso e manejo. Além disso, a avaliação do comportamento dos solos frágeis quanto à fertilidade, à dinâmica físico-hídrica e ao processo erosivo, que tanto afetam esses solos, consubstanciaram as principais metas desse projeto, cujos resultados também serão disponibilizados em sítio específico da Embrapa.

Operacionalmente, as pesquisas desenvolvidas pela Rede de Pesquisa Solos Frágeis agregaram ao conhecimento atual da Ciência do Solo as diferentes técnicas disponíveis, tanto em termos do uso de geotecnologias, com ênfase em mapeamento digital de solos em escala de detalhe, como também em desenvolvimento de avaliações em séries históricas de uso com base em imagens de satélite para compreender a dinâmica evolutiva e suas respectivas consequências. Nesse sentido, foram desenvolvidos estudos sobre a expansão da cana-de-açúcar em áreas de intensa e rápida mudança de uso das terras no Bioma Cerrado, avaliando os seus impactos na sustentabilidade global do Sudoeste Goiano em municípios cujas características biofísicas, estruturais e socioeconômicas são bastante distintas e se refletem em diferenças significativas nas taxas dessa expansão.

O livro contém 14 capítulos, organizados em três grandes temas: Caracterização e Critérios de Distinção, Manejo e Avaliação da Sustentabilidade do Uso de Solos Frágeis. A coletânea contendo artigos sobre pesquisas realizadas em diferentes regiões do País inicia-se com uma abordagem conceitual, questão ainda polêmica, da distribuição e ocorrência desses solos no Brasil num texto

liderado por professores da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc). Na sequência, os leitores poderão conhecer os tipos de solos frágeis e seu comportamento, sob diferentes sistemas de manejo e produção agrícola, em estudos realizados em regiões como as de Petrolina e Luís Eduardo Magalhães, no Nordeste Brasileiro; de Botucatu, em São Paulo; e de municípios do Sudoeste Goiano.

Os leitores poderão, ainda, perceber que não apenas os solos arenosos são frágeis, como os Neossolos Quartzarênicos, mas também muitos outros tipos de solos, como os Latossolos Vermelho-Amarelos de textura média. Os que se dispuserem a ler esses textos poderão, por exemplo, melhor compreender a relação entre a distribuição de focos erosivos lineares e os solos frágeis de áreas com pastagem extensiva de Mineiros, GO, e também se surpreenderão com o fato de que o uso e o manejo desses solos podem e devem, sim, ser sustentáveis, tal como, ao final do livro, se demonstra nos estudos sobre a expansão canavieira, baseados em indicadores de caráter holístico e cenários que visualizam melhores condições socioeconômicas e ambientais para as gerações futuras no Sudoeste Goiano.

O assunto é apaixonante e merece continuar sendo objeto de estudos cada vez mais esclarecedores e úteis sobre manejos sustentáveis dos solos frágeis.

Luís Carlos Hernani
Embrapa Solos/Fragissolo/
Rede Solos Frágeis

Selma Simões de Castro
UFG/IESA/Fragissolo/Sensor

Ana Paula Dias Turetta
Embrapa Solos/Fragissolo/Sensor

Sumário

PARTE I — Caracterização e critérios de distinção de solos frágeis

Capítulo 1. Fragilidade de solos: uma análise conceitual, ocorrência e importância agrícola para o Brasil	25
Capítulo 2. Identificação e mapeamento de solos frágeis no Município de Mineiros, GO	51
Capítulo 3. Levantamento e caracterização de solos frágeis no Município de Luís Eduardo Magalhães, BA	73
Capítulo 4. Mapeamento convencional e digital de classes de solos desenvolvidos de arenitos em Microbacia Hidrográfica em Botucatu, SP	89
Capítulo 5. Contribuição ao estudo de solos frágeis na Região Semiárida, Petrolina, PE	111
Capítulo 6. Potencial natural de erosão e geotecnologias para a classificação de capacidade de uso dos solos	135

PARTE II — Manejo de solos frágeis

Capítulo 1. Dinâmica da fertilidade em solos frágeis	161
Capítulo 2. Comportamento de nutrientes em solos frágeis sob cultivo de cana-de-açúcar na região de Mineiros, GO	185
Capítulo 3. Atributos de um Neossolo Quartzarênico sob mangueira irrigada e sob vegetação de Caatinga – estudo comparativo em Petrolina, PE	207

PARTE III — Avaliação de sustentabilidade do uso de solos frágeis

Capítulo 1. Mudanças no uso e impactos da expansão canavieira sobre solos frágeis no Sudoeste Goiano	243
Capítulo 2. Avaliação da expansão recente da cana-de-açúcar em solos frágeis na microrregião Vale do Rio dos Bois, GO	271
Capítulo 3. Compartimentação morfoopedológica aplicada à distribuição de padrões espaciais de processo erosivo em solos frágeis – Município de Mineiros, GO	293
Capítulo 4. Funções de uso e indicadores de sustentabilidade – casos de expansão sucroalcooleira no Sudoeste de Goiás	325
Capítulo 5. Cenários para expansão da cana-de-açúcar no Sudoeste Goiano – estudo de caso de Mineiros	345

PARTE I

Caracterização e critérios de distinção de solos frágeis



Capítulo 1

Fragilidade de solos: uma análise conceitual, ocorrência e importância agrícola para o Brasil

Jackson Adriano Albuquerque; Jaime Antonio de Almeida;
Luciano Colpo Gatiboni; Ana Paula Rovedder;
Falberni de Souza Costa

Introdução

Nas duas últimas décadas, os termos “solos frágeis” e “fragilidade do solo” vêm sendo cada vez mais utilizados em artigos e publicações científicas. Com maior frequência, são empregados para referir-se aos solos de textura superficial arenosa, geralmente mais suscetíveis à erosão hídrica e/ou eólica do que os mais argilosos. Entretanto, também são utilizados para indicar a presença de solos muito intemperizados, com ausência ou baixa reserva de nutrientes; solos com excesso de salinidade; solos situados em encostas íngremes; entre outros. Os termos, no entanto, não têm um significado claro, gerando dúvidas quanto à adequação do seu uso pela ausência de conceito do que seja fragilidade, ou um solo frágil.

Em qualquer sistema, ao nos referirmos a fragilidade, o termo nos remete a ideias de sensibilidade, suscetibilidade a alteração, degradação e distúrbios, mudanças nas condições naturais, bem como tempo de retorno às condições de equilíbrio após perturbação. A tarefa de conceituar, ou definir, o que seja um solo frágil, entretanto, é difícil e talvez nem seja possível. O termo geralmente designa situações de alto risco potencial de degradação do solo.

O solo, e mais especificamente a Pedosfera, é a zona de interação de todos os demais componentes da Geosfera (Atmosfera, Hidrosfera, Litosfera e Biosfera) (GERRARD, 2014). Portanto, é um recurso natural integrado aos demais componentes, sendo importante avaliar seus potenciais de uso bem como suas limitações ou fragilidades frente às ações antrópicas para que possam ser utilizados da melhor forma ou preservados. Essa importância foi relatada na obra de Diamond (2007), onde o autor discorre sobre o sucesso ou o fracasso de algumas civilizações, geralmente relacionados à preservação ou à degradação dos recursos naturais. A degradação é a redução da qualidade do solo e de sua produtividade devido a causas naturais ou induzidas pelo homem, com perda de sustentabilidade e redução da capacidade do solo em produzir em um determinado sistema agropecuário (LAL, 2008).

Em face das dimensões continentais do território brasileiro, da grande variedade de litologias, formas de relevo, vegetação e climas, a interação desses fatores resultou na formação de uma das mais complexas e variadas diversidades de solos do planeta, ainda em processo de identificação e classificação taxonômica, atualmente sistematizados no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (SANTOS et al., 2013). Muitos solos até então identificados no País possuem limitações de ordem química, física, mineralógica ou biológica, as quais têm sido denominadas em alguns estudos como portadoras de fragilidades.

O tema “solos frágeis” foi abordado num seminário apresentado na “Reunião Sul-brasileira de Ciência do Solo”, de 2008, organizado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). Após isso, em 2011, a SBCS publicou *Tópicos em Ciência do Solo*, contendo o capítulo denominado “Atividades agrícolas de produção em solos frágeis” (ALBUQUERQUE et al., 2011). Nessa publicação, os autores relataram a ausência de definição para o termo “solos frágeis” e propuseram alguns conceitos, considerando especialmente o trabalho de Lal (1997).

Neste capítulo, o conteúdo dessas publicações foi reorganizado e atualizado com o objetivo de propor uma discussão sobre o conceito de solos frágeis bem como discorrer sobre a ocorrência e a importância agrícola dos solos frágeis no Brasil. Espera-se que essa discussão possa contribuir para uma melhor distinção e caracterização desses solos e para uma padronização de linguagem quando se

fizer referência aos mesmos. As propostas, no entanto, são abertas, tendo-se como expectativa que possam futuramente incorporar críticas e sugestões dos leitores para melhorá-las.

Solos, resiliência e fragilidade

Solos são sistemas naturais, organizados, frutos da ação combinada do clima e dos organismos atuando sobre um determinado material de origem num dado intervalo de tempo, condicionados pelo relevo, sendo, ainda, influenciados por outros fatores, entre os quais se destaca a ação humana (JENNY, 1941). Sob um ponto de vista mais utilitário, o solo pode ser reconhecido, também, como o material mineral e/ou orgânico não consolidado na superfície da terra que serve como um meio natural para o crescimento e o desenvolvimento de plantas (CURI et al., 1993; SIMONSON, 1959).

Devido às suas distintas naturezas e propriedades, os solos podem apresentar diferentes aptidões, tanto para uso agrícola como para outros usos. Ao considerarmos o conjunto das características e propriedades de um determinado solo, num ambiente e posição geográfica particular, detecta-se, portanto, situações de maior ou menor fragilidade do mesmo para diferentes usos, as quais poderão se refletir sobre alterações no ecossistema como um todo. Quando tratamos especificamente sobre solos frágeis, surgem questionamentos, por exemplo, sobre a natureza dessa fragilidade, a qual pode ser intrínseca (devida aos atributos naturais do solo), induzida por atividades antrópicas, ou, ainda, o efeito combinado de ambas.

A concepção de fragilidade, no entanto, é diferente do conceito de resiliência, o que nos leva à necessidade de distinguir os dois termos.

Resiliência

Pode ser definida como “o tempo necessário para que um sistema retorne a um estado específico de sua condição natural até uma condição de equilíbrio após uma perturbação” (DE ANGELIS et al., 1989), ou “a habilidade do solo em resistir ou recuperar-se de uma perturbação natural ou

antropogênica, ou a habilidade de resistir a mudanças, ou de retornar ao seu estado inicial” (LAL, 1997).

Lal (1997) propôs o emprego de **classes de degradação** de solos, as quais dependem das características inerentes do solo e das condições climáticas, variando desde extremamente resistentes ou muito estáveis até extremamente suscetíveis ou frágeis (Tabela 1). Propôs, também, o emprego de **classes de resiliência**, as quais variam com o potencial de recuperação. Solos com maior resiliência possuem maior capacidade de recuperar-se de uma perturbação, a qual pode ser originada por processos naturais ou antrópicos.

Fragilidade ou alta sensibilidade de solos

Pode se referir ao solo como um todo, a um processo específico (erosão, por exemplo) ou a uma propriedade específica (estrutura do solo, por exemplo) (LAL, 1997). Isso nos leva a reconhecer que a fragilidade do solo é um conceito relativo, que depende não só das características intrínsecas do mesmo, mas também dos fatores externos interferentes, tais como declividade, cobertura vegetal, tipo de uso (agrícola, urbano, industrial) e, principalmente, do manejo que lhe é aplicado.

Tabela 1. Classes de degradação e de resiliência do solo.

Classes	Degradação do solo		Resiliência do solo	
	<i>Suscetibilidade à degradação</i>	<i>Descrição</i>	<i>Resiliência</i>	<i>Descrição</i>
0	Resistente	Extremamente resistente ao estresse e muito estável	Altamente resiliente	Recuperação rápida, altamente tamponado
1	Ligeira	Resistente ao estresse e estável	Resiliente	Recuperação com manejo apropriado
2	Moderada	Suscetível ao estresse e instável	Moderadamente resiliente	Lentamente recuperável, com alta adição de insumos
3	Severa	Altamente suscetível ao estresse e instável	Ligeiramente resiliente	Lentamente recuperável, mesmo com mudança no uso do solo
4	Extrema	Extremamente suscetível e frágil	Não resiliente	Não recuperável, mesmo com mudança no uso do solo

Fonte: adaptado de Lal (1997).

Solos frágeis

Não são encontradas na literatura definições precisas sobre solos frágeis nem um sistema de classificação ou tipologia das diferentes fragilidades. Entretanto, na literatura internacional é comum o uso dos termos *soil fragility* e *fragile soil* para áreas que possuem solos de textura mais arenosa, com teores baixos de matéria orgânica e baixa estabilidade dos agregados, ou, ainda, solos de relevos declivosos e suscetíveis à erosão hídrica (ADEM; TISDAL, 1984; GERARD, 1986; REELEDER et al., 2006).

No Brasil, o termo “solo frágil” com frequência designa solos com elevado risco de degradação, principalmente por ação antrópica em áreas agrícolas, como ocorre nos locais com riscos de salinização, deslizamento de encostas, compactação e erosão hídrica e eólica. Na construção civil, designa solos com baixa capacidade de suporte de carga; na engenharia sanitária e ambiental designa solos com baixa capacidade de suporte de resíduos, com potencial de toxicidade e risco de poluição dos recursos hídricos (OLSON, 1973).

A fragilidade dos solos como conceito relativo

A fragilidade de um solo é um conceito relativo, pois cada solo vai responder de maneira diversa a fatores ou forças externas que promovem a degradação. Portanto, classificar um solo numa escala de fragilidade absoluta é uma tarefa difícil e, provavelmente, não possível, ainda, em face da complexidade de interações que devem ser analisadas para a interpretação da fragilidade. Albuquerque et al. (2011) exemplificaram isso ao comparar dois solos distintos sob vegetação florestal: um arenoso (Neossolo Quartzarênico), desenvolvido a partir da alteração de quartzitos em relevo plano; e um argiloso, com alto teor de matéria orgânica (Nitossolo Vermelho) em relevo forte ondulado. Após a derrubada da mata para introdução de cultivos agrícolas, o solo argiloso seria mais frágil à ação da erosão hídrica devido a sua elevada declividade. Entretanto, ao considerarmos a taxa de decomposição da matéria orgânica, sua estrutura e a intensidade da lixiviação, o arenoso poderia ser considerado mais frágil.

Essa fragilidade relativa está expressa também no Sistema de Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras (RAMALHO FILHO; BEEK, 1995), no qual a classe “6 ff” engloba “áreas de preservação da fauna e flora, em função de sua fragilidade ambiental, decorrente de condições especiais de solo e/ou relevo e/ou clima”. Ou seja, a fragilidade é dependente da interação de vários fatores.

A fragilidade intrínseca e a fragilidade induzida

A fragilidade de um ecossistema não é um conceito quantificável e, portanto, não é simplesmente o oposto de resiliência (MILICH, 1997). A fragilidade se refere apenas à ideia de que alguma parte ou mesmo o todo de um ecossistema pode ser danificado com mais facilidade ou com um alto risco de irreversibilidade. Ao empregarmos essa mesma ideia para o sistema solo, a fragilidade somente pode ser considerada para indicar aspectos, feições ou intensidades de dano que podem ser causadas em atributos específicos do solo e do seu entorno, resultantes das ações externas. Portanto, é necessário distinguir “fragilidade intrínseca” de “fragilidade induzida”: enquanto a intrínseca é inerente a cada tipo de solo em equilíbrio dinâmico no seu ambiente, a induzida pode ser promovida ou potencializar a intrínseca pela ação antrópica.

Como exemplo, os solos de textura superficial arenosa em geral possuem uma fragilidade intrínseca maior do que os argilosos, mas podem estar protegidos pela vegetação natural de campo nativo. Ao modificar o uso do solo para a criação de gado com sobrepastoreio, ou com cultivo de grãos no sistema de preparo convencional, com mobilização intensa do solo, ou, ainda, insuficiente reposição de nutrientes, a fragilidade intrínseca do solo será potencializada. Contrariamente, o uso desses solos com práticas de manejo que mantenham ou aumentem o teor de matéria orgânica, a capacidade de troca de cátions (CTC), a quantidade de nutrientes e a cobertura vegetal pode minimizar a fragilidade intrínseca (AITA et al., 2004; AMADO et al., 1999; LAMARCA, 1996; MAFRA et al., 2008).

Portanto, pode-se constatar que a fragilidade intrínseca do solo pode estar relacionada à textura, sendo os mais arenosos mais frágeis que os siltosos e estes, mais frágeis que os argilosos. Da mesma forma, ao determinar a estrutura dos solos, os menos estruturados são os que apresentam maior fragilidade

intrínseca do que os mais estruturados. Portanto, a fragilidade intrínseca pode ser avaliada comparando um ou mais atributos de solos diferentes entre si.

Com base no exposto, serão apresentados, a seguir, alguns tipos de fragilidade dos solos.

Tipos de fragilidade do solo

A fragilidade do solo pode se manifestar por características intrínsecas ou por características biofísicas do ambiente externo. A fragilidade intrínseca do solo pode estar relacionada a fatores texturais, estruturais, mecânicos, hídricos, químicos e ecológicos.

A **fragilidade textural** está associada à elevada taxa de decomposição da matéria orgânica, à baixa capacidade de troca de cátions (BAYER et al., 2006; MIELNICZUK et al., 2003) e à fraca agregação das partículas (WOHLENBERG et al., 2004). Exemplos de solos com horizonte superficial mais arenoso são: alguns Latossolos Vermelhos de textura média; parcela dos Neossolos Flúvicos, com horizonte A arenoso; Neossolos Quartzarênicos; Argissolos Arênicos e Espessarênicos. Geralmente, esses solos possuem alta suscetibilidade à erosão (AMADO et al., 2002; CASSOL; LIMA, 2003; ROVEDDER; ELTZ, 2008), baixa capacidade de retenção de água e elevada lixiviação dos nutrientes. Solos arenosos com elevado contraste textural, como os Argissolos Abrúpticos e Plintossolos Argilúvicos, em geral apresentam um horizonte subsuperficial com baixa permeabilidade, característica que reduz a infiltração e potencializa a erosão em períodos de chuvas intensas e prolongadas. Outro processo de degradação dos solos é a compactação, que é mais intensa em solos siltosos, com fraco grau de desenvolvimento da estrutura, baixa estabilidade dos agregados e elevado grau de dispersão da argila (LUCIANO et al., 2012).

A **fragilidade estrutural** está relacionada à fragilidade textural combinada com teor de matéria orgânica e à mineralogia da fração argila. Ocorre em solos com elevado teor de areia, baixo teor de matéria orgânica e de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, características que predispõem os solos à baixa estabilidade dos agregados (ALBUQUERQUE et al., 2000). Muitas áreas com essas características, em que a vegetação natural é retirada para o cultivo de

grãos, expõem essa fragilidade estrutural com consequências desastrosas e difícil recuperação.

A **fragilidade mecânica** está associada às características texturais e estruturais. Essa fragilidade se relaciona à capacidade de suporte de cargas e à suscetibilidade à compactação (LUCIANO et al., 2012; SUZUKI et al., 2015). Solos arenosos, por serem mais densos e menos porosos, possuem maior capacidade de suporte, mesmo quando utilizados com máquinas mais pesadas. Entretanto, os argilosos, por serem menos densos e mais porosos, ao serem cultivados com máquinas mais pesadas sofrem reduções na porosidade total, na macroporosidade e na condutividade hidráulica saturada, além de aumento na densidade, no escoamento superficial e na resistência à penetração de raízes. Por sua vez, os solos siltosos possuem baixa estabilidade de agregados e elevado grau de empacotamento de suas partículas (ALBUQUERQUE et al., 2000), e, com isso, têm elevada fragilidade mecânica.

A **fragilidade hídrica** do solo ocorre tanto por deficiência como por excesso de água e também é relacionada à textura, estrutura, relevo e permeabilidade do solo. Solos arenosos possuem predomínio de macroporos, com drenagem excessiva e baixo volume de microporos, resultando em baixa capacidade de armazenamento de água. Em sistemas naturais, períodos de baixa precipitação resultam em déficit hídrico e menor desenvolvimento das plantas. Solos cultivados no sistema de preparo convencional são mais suscetíveis à erosão hídrica e ao déficit hídrico quando comparados aos manejados sob plantio direto (AMADO et al., 1999), suscetibilidade esta que varia com a textura, a mineralogia e o teor de matéria orgânica do solo (COSTA et al., 2003).

Alguns solos, como Planossolos, Gleissolos, Espodossolos, Organossolos e Neossolos Flúvicos, dependendo do relevo e da posição na paisagem, do material originário e dos processos pedogenéticos, podem ser mal drenados, pois possuem, em alguma parte do perfil, baixa condutividade hidráulica. Esses solos, considerados ambientes frágeis, estão situados em várzeas, banhados, charcos e manguezais, entre outros locais que podem ser enquadrados no grupo mais amplo das áreas palustres. Por sua posição na paisagem, estão associados a áreas com serviços ambientais importantes, como estabilização

de margens, filtragem de moléculas e partículas, formação de nascentes, além do abrigo para fauna e flora específicas (MAGALHÃES et al., 2013). Apesar de serem áreas protegidas pela legislação, muitos Planossolos, Organossolos e Gleissolos foram drenados e cultivados, geralmente com a cultura do arroz irrigado e, mais recentemente, com culturas de sequeiro. A drenagem artificial em áreas de Organossolos acelera a decomposição da matéria orgânica e normalmente promove rebaixamento do nível do terreno, fenômeno conhecido como subsidência. Neossolos Flúvicos, com horizonte A sobre sedimentos fluviais, geralmente estão associados a margens de corpos hídricos sob efeito direto da vazante, o que lhes confere fragilidade hídrica. Adicionalmente, nessa posição tais solos integram as áreas de preservação permanente, cuja retirada da cobertura florestal aumenta o grau de fragilidade, intensificando eventos de erosão, solapamento de margens, perda de áreas produtivas e assoreamento.

A **fragilidade química** é observada em solos com baixos teores de matéria orgânica e de argila, os quais resultam em baixa CTC. Podem ser formados a partir de material de origem sedimentar, predominantemente grosseiro, que resulta em solos mais arenosos, ou estar localizados em regiões nas quais o clima e o relevo favorecem o intenso intemperismo. Esses solos podem apresentar elevada saturação por alumínio e elevado potencial de lixiviação de cátions; dessa forma, têm baixa reserva de nutrientes e dificuldade de sustentar o crescimento das plantas. Quando são cultivados, as doses de fertilizantes devem ser pequenas e parceladas para evitar a saturação da CTC com o nutriente adicionado, o que causa desbalanço nutricional para as plantas, lixiviação de outros íons e contaminação do lençol freático.

Outra forma de fragilidade química ocorre em solos formados em ambientes nos quais a precipitação é inferior à evapotranspiração, processo que favorece o acúmulo de sais (solos salinos, sódicos e salino-sódicos) que podem limitar sua utilização por toxidez e/ou desbalanço nutricional e, ainda, por dificultar a absorção de água pelas plantas. Nos solos com excesso de sódio na CTC, ocorre elevada dispersão da argila e redução da estabilidade dos agregados e da permeabilidade do solo.

A **fragilidade ecológica** pode ser entendida como a relacionada ao ambiente em que o solo foi formado. Alguns ecossistemas apresentam complexas interações

durante sua formação, como, por exemplo, as áreas palustres. No entanto, com a ação antrópica, essas interações podem ser rompidas e o ambiente, degradado. Um exemplo clássico é o ambiente da Floresta Amazônica, desenvolvida sobre diversos materiais de origem, geralmente rochas sedimentares, com solos muito intemperizados e com baixo teor de nutrientes (REUNIÃO BRASILEIRA DE CLASSIFICAÇÃO E CORRELAÇÃO DE SOLOS, 2013). A floresta está em equilíbrio e constantemente adicionando e ciclando nutrientes. Sua retirada rompe esse equilíbrio e tende a acelerar os processos erosivos, a decomposição do material orgânico e a perda dos nutrientes por lixiviação, aumentando a fragilidade do solo e do ecossistema (KELLER et al., 2009).

Outro exemplo de fragilidade ecológica é do Bioma Cerrado, onde ocorrem solos muito intemperizados, com níveis tóxicos de alumínio e baixa saturação por bases. Apresenta períodos de seca e de chuva bem definidos e, com isso, a vegetação nativa é adaptada a essas condições edáficas e climáticas. Apesar de ser um ambiente frágil, está ocorrendo contínua expansão da fronteira agrícola nessas áreas, o que pode trazer consequências negativas ao ambiente quando inadequadamente manejados.

A **fragilidade por características biofísicas do ambiente**, como a relacionada ao relevo, pode ocorrer tanto nos solos mais profundos e intemperizados, como os Latossolos, quanto nos mais rasos, como os Neossolos Litólicos. Os solos de regiões mais declivosas são frágeis, independentemente do uso a que estão submetidos, e devem ser utilizados preferencialmente com pastagens perenes ou florestas. Além da declividade, alguns ambientes específicos apresentam maior fragilidade, como as cabeceiras de drenagem, pois nesses locais o fluxo de água é mais concentrado e pode acelerar a erosão hídrica (COELHO NETTO et al., 2003). Nessas e em outras situações, a cobertura superficial do terreno é um dos principais fatores de resistência aos processos erosivos. Em condições naturais e com os demais fatores interferentes considerados constantes, pode-se estabelecer a seguinte sequência de resistência do solo à ação de processos erosivos, em função da cobertura vegetal: Floresta > Campo > Cerrado > Caatinga.

Em todos os exemplos supracitados, percebe-se que a fragilidade deve ser relativizada, integrando a **fragilidade intrínseca** do solo aos aspectos

biofísicos da paisagem e ao histórico de uso e manejo que é dado ao solo, ou seja, a **fragilidade induzida**.

Considerando essa integração, e com o objetivo de mensurar a fragilidade de um ambiente, Ross (1994) descreve uma metodologia baseada nos pressupostos descritos por Tricart (1977), a qual pondera quatro fatores, cada um com graus de fragilidade que variam de um a cinco. Esses fatores são: o solo, a declividade, o uso da terra e a presença de áreas alagadas ou margens de rios. Segundo Kawakubo et al. (2005), solo e declividade compõem a **fragilidade potencial**, que, quando são incluídos os fatores uso da terra e presença de áreas alagadas ou margens de rios, passa a ser denominada de **fragilidade emergente**. Com base nesses conceitos e na metodologia proposta por Ross (1994), análises da fragilidade ambiental foram realizadas para vários locais, como, por exemplo, nos estudos de Spörl e Ross (2004) na divisa entre os estados de Minas Gerais e São Paulo; de Kawakubo et al. (2005) no Município de Atibaia (SP); de Messias et al. (2012) na bacia da hidrelétrica do Funil (MG); e de Corte et al. (2015) na bacia hidrográfica do Rio Iguaçu (PR). Esses estudos reforçam a importância de entender e integrar os vários fatores que atuam num determinado ambiente, além de considerar o uso e o manejo da terra como um fator determinante.

Ocorrência e importância de alguns solos frágeis no Brasil

A partir deste ponto, buscar-se-á relatar a ocorrência de solos frágeis de forma mais generalizada para algumas regiões do Brasil, com o objetivo de exemplificar os que podem ser considerados solos frágeis.

Solos arenosos

Constituem as áreas com predomínio de solos de textura superficial arenosa, desenvolvidos principalmente de arenitos, como: Latossolos Vermelhos de textura média; Argissolos Vermelhos, Amarelos e Vermelho-amarelos Abrúpticos, Arênicos e Espessarênicos; além dos Neossolos Quartzarênicos.

São encontrados em várias regiões do Brasil, sendo os mais arenosos observados no sudoeste do Rio Grande do Sul, no noroeste do Paraná, na Bacia

Amazônica, bem como em quase todo o litoral do Brasil. Em função da textura superficial mais arenosa, que favorece os processos erosivos, e da fragilidade textural e estrutural, o relevo predominante onde ocorrem é suave ondulado ou ondulado. Além disso, possuem fragilidade química devido ao baixo teor de matéria orgânica e baixa CTC. Portanto, o uso intensivo desses solos deve ser evitado e, quando forem utilizados, o manejo deve considerar seu grau elevado de fragilidade intrínseca. Apesar das fragilidades citadas, são solos de grande importância aos sistemas produtivos.

No Rio Grande do Sul, Planossolos Arenosos, como os Planossolos Háplicos Eutróficos da Depressão Central e Campanha, são utilizados para produção de arroz irrigado. Recentemente, tem se intensificado seu uso para culturas de sequeiro, o que requer maior cuidado com as práticas de preparo e com a construção dos canais de drenagem. Nas cotas de maior altitude, Argissolos e Latossolos Arenosos são utilizados para a produção de soja e milho ou para pecuária. No caso dos Argissolos, a relação entre fragilidade intrínseca e aspectos biofísicos do meio pode ser amenizada pelo caráter espessarênico (horizontes A+E superior a 100 cm), que reduz o potencial de saturação por água acima do horizonte B textural, diminuindo um aspecto da fragilidade intrínseca, apesar da textura arenosa dos horizontes superficiais (STRECK et al., 2008).

No noroeste do Paraná, os solos originados de arenito Caiuá têm aproximadamente 3,2 milhões de hectares, com 72% da área ocupada por pastagens (SÁ; CAVIGLIONE, 1999). Nesses solos arenosos, Fidalski e Alves (2015) ressaltam os aspectos da fragilidade intrínseca e recomendam que a *Brachiária* seja mantida com 23 cm de altura para minimizar a degradação induzida pelo pastoreio.

Na região Sudeste, em extensas áreas, os solos têm textura arenosa, sendo que, em muitas áreas de relevo plano e suave ondulado, são utilizados para culturas de soja, entre outras.

Encostas basálticas

Em alguns estados do Sudeste e do Sul do Brasil, é comum a ocorrência de encostas basálticas, e os solos podem ter fragilidade intrínseca devido às condições do ambiente onde se localizam. São áreas fortemente dissecadas pela erosão geológica, formando superfícies erosionais e deposicionais com encostas, patamares e morros. Nas áreas com superfícies declivosas, formam-se Neossolos Litólicos e Cambissolos, e, nas encostas menos declivosas e terraços coluviais, geralmente se formam Nitossolos e Chernossolos. A fragilidade é maior nas áreas mais declivosas.

Nas encostas basálticas do Rebordo do Planalto Meridional no RS, por exemplo, a formação de Neossolos Litólicos e Cambissolos associada a elevadas declividades limita seu uso agrícola. Essas encostas, assim como seus solos, têm mantido sua resiliência pela presença da Floresta Estacional Decidual. Mesmo assim, deslizamentos são comuns durante eventos climáticos extremos, como enxurradas, o que atesta a fragilidade relacionada aos fatores ambientais. O escritório regional do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) em Santa Maria lançou, em agosto de 2015, um alerta sobre a intensificação do desmatamento nessa região, principalmente nas posições de meia encosta, onde os produtores têm derrubado a vegetação para cultivo de tabaco e soja (ANTONELLO; FONTANA, 2015). As consequências futuras desse novo contexto podem ser desastrosas em relação a perdas de solo e água. Nessas áreas, Streck et al. (2008) relatam a transformação de Chernossolos em Cambissolos por perda das porções superiores do horizonte A chernozêmico como consequência da intensificação do uso agrícola.

Apesar da fragilidade, são áreas de solos que sempre fizeram parte do sistema produtivo, principalmente por pequenos agricultores que cultivam frutas, com destaque para as videiras, bem como soja, milho e tabaco.

Solos das serras litorâneas

Nas serras que acompanham a região litorânea do Sul e do Sudeste brasileiro, a maioria dos solos são desenvolvidos a partir da alteração de granitos, migmatitos e gnaisses, além de rochas sedimentares. São regiões com relevo forte ondulado ou montanhoso combinado com clima úmido

e quente, originando solos muito intemperizados das classes Argissolos, Cambissolos e Latossolos.

Pela proximidade com a região litorânea, mais habitada, as atividades agrícolas são intensas nessas áreas, aumentando a fragilidade intrínseca desses solos. É comum a existência de solos cultivados com processos intensos de erosão hídrica, nos quais parte ou todo o horizonte A já foi erodido. Muitos desses solos se desenvolveram sobre espesso saprólito, fator que favorece deslizamentos de terras em períodos de elevada precipitação pluviométrica, tais como os ocorridos em Santa Catarina ao final de 2008 (FARIA et al., 2008) e no Rio de Janeiro no início de 2011.

Vertissolos e Neossolos

Constituem classe de solo de elevada fertilidade química natural, com altos valores de pH, soma e saturação por bases e CTC, e predomínio de argilominerais expansíveis. Entretanto, possuem baixa permeabilidade e excessiva plasticidade, pegajosidade e contração/expansão. Ocorrem principalmente em relevos planos ou suavemente ondulados, porém, nas áreas onde o fluxo de água se concentra (COELHO NETTO et al., 2003), é comum a presença de voçorocas devido à alta dispersão natural das argilas.

No Rio Grande do Sul, Vertissolos ocorrem na Campanha Gaúcha em associação com Neossolos Litólicos e Regolíticos sob vegetação tipicamente campestre, em áreas de relevo plano e suavemente ondulado. Apesar da boa fertilidade química natural, a paisagem dominada por essa associação apresenta fragilidade induzida quando da tentativa de conversão do campo nativo, devido à expansão e contração das argilas nos Vertissolos e à baixa profundidade nos Neossolos (ROVEDDER, 2013).

Em função da elevada fertilidade química, são solos importantes em algumas regiões do Brasil, como, por exemplo, no sul do Rio Grande do Sul, na região central do Acre e no semiárido brasileiro, além de outros locais.

Áreas palustres e restingas

As áreas palustres, em função de características edafo-hidrológicas, processos pedogenéticos e fatores ambientais particulares, englobam ampla variedade de solos (WARMLING, 2013). Apresentam excesso permanente ou temporário de água que causam hidromorfismo, favorecendo os processos de redução, ou oxiredução.

Alguns solos dessas áreas são afetados por tiomorfismo, excesso de sais e de sódio, gleização e paludização. Incluem-se nesses ambientes diversas classes de solo, como Espodossolos, Gleissolos, Organossolos e Planossolos. Em cada ambiente, em função das particularidades, possuem vegetação específica (MAGALHÃES et al., 2013), formando ecossistemas distintos (manguezais, florestas hidrófilas e higrófilas de várzea, restingas, veredas, pantanais ou campos de várzea). São ambientes muito frágeis, geralmente considerados áreas de preservação permanente. Porém, muitos destes ecossistemas são utilizados para exploração agrícola.

Em muitas áreas planas de restinga do Brasil, particularmente as localizadas nas planícies litorâneas, ocorrem Espodossolos Humilúvicos e Ferrihumilúvicos, desenvolvidos sobre sedimentos arenosos marinhos, cuja gênese foi fortemente influenciada pela hidrologia superficial (COELHO, 2008; GOMES, 2005). São solos ácidos, extremamente pobres em nutrientes e com alta fragilidade intrínseca. Devido à proximidade dos centros urbanos, extensas áreas com esses solos vêm sendo drenadas para ocupação humana e industrial, bem como para uso com pastagens, florestamentos e exploração de areias, com conseqüências desastrosas para o ecossistema pela eliminação das restingas.

Modificação da fragilidade intrínseca: exemplos do Acre e do Sudoeste do Rio Grande do Sul

É importante considerar que a fragilidade intrínseca pode ser revertida, ao menos parcialmente, através do uso e manejo do solo, conforme relatado por Costa et al. (2014) para solos frágeis do Estado do Acre, e por Rovedder (2007) para solos frágeis do Rio Grande do Sul. Além desses dois exemplos,

nos demais capítulos deste livro serão relatados, com maior detalhamento, exemplos para outras regiões do país.

Na Região Amazônica, pesquisadores relataram que a geologia e, conseqüentemente, a fertilidade dos solos variam num gradiente crescente de leste para oeste (AMARAL et al., 2013; MALHI et al., 2004; QUESADA et al., 2011; SOMBROEK, 1996). Com isso, nos solos menos férteis, o tempo de uso em atividades com manejo agropecuário ou florestal convencionais diminui e o tempo para revegetação de áreas abandonadas aumenta (DAVIDSON; MARTINELLI, 2009). Ao avaliar o Estado do Acre, Amaral et al. (2013) afirmam que os solos têm fertilidade química de baixa a média nas regiões oriental e ocidental e alta na região central. Predominam Argissolos, Latossolos e Plintossolos na região oriental; Cambissolos, Luvisolos e Vertissolos na região central; e Argissolos e pequenas áreas com Latossolos, Luvisolos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Espodosolos na região ocidental. De maneira geral, são solos com granulometria mais arenosa nos horizontes superficiais, embora algumas classes sejam mais argilosas.

O uso dos solos do Acre não difere muito do resto da Amazônia Brasileira. Envolve o sistema de derrubada e queima da floresta, o cultivo de culturas exigentes em fertilidade química do solo (arroz, feijão e milho nos dois primeiros anos) e depois com mandioca, menos exigente e tolerante à acidez do solo. O fogo é utilizado para limpeza da área. Não são comuns a correção da acidez e a fertilização do solo (COSTA et al., 2014). O período de preparo do solo para os cultivos é de outubro a novembro, que coincide com o início do período de chuvas da região – 2.200 mm ano⁻¹ (AMARAL et al., 2012) – o que favorece os processos erosivos, agravados nas regiões de relevo ondulado.

Em 2006, foi iniciada uma pesquisa na qual um dos tratamentos foi o sistema descrito anteriormente (convencional na região), e outro foi um sistema proposto sem a utilização do fogo, com aplicação de calcário, adubo fosfatado e cultivo de plantas de cobertura do solo. O objetivo foi elevar os teores de matéria orgânica e nitrogênio do solo para os cultivos da mandioca e milho (COSTA et al., 2014). Esses tratamentos foram cultivados em dois sistemas: preparo convencional e plantio direto. Os autores relataram que a produtividade das culturas aumentou sensivelmente com as técnicas agronômicas recomendadas

em comparação com o sistema tradicional de cultivo. Salientaram, também, a importância do plantio direto, mais especificamente para a cultura do milho. Dessa forma, os autores observaram que, mesmo em solo de elevada fragilidade, a mesma pode ser alterada pelo correto manejo do solo, sem uso de queimadas e com o cultivo de plantas de cobertura, o uso de plantio direto, a correção da acidez e a adubação. Técnicas disponíveis, mas que, com frequência, não são comumente empregadas pelos agricultores.

No sudoeste gaúcho, o exemplo de fragilidade intrínseca é dado pelos solos suscetíveis ao processo de arenização, que consiste no retrabalhamento dos sedimentos arenosos por meio de agentes erosivos (SUERTEGARAY, 1998). Incluem-se neste caso os Neossolos Quartzarênicos, alguns Latossolos e Argissolos arenosos dessa região (AB´SABER, 1995; STRECK et al., 2008). O início do processo parece ter ocorrido por causas naturais, favorecido pela fragilidade intrínseca dos solos, o que foi comprovado por registros históricos que fazem referência aos areais em períodos anteriores aos processos de ocupação por pecuária extensiva e agricultura na região (AB´SABER, 1995; SUERTEGARAY, 1998).

A associação entre o tipo de solo e a alternância de períodos pretéritos com clima mais árido favoreceu a manutenção da vegetação campestre com características xeromórficas, em detrimento da florestal (ROVEDDER, 2013). Como consequência, embora o clima atual seja úmido, a cobertura vegetal é insuficiente; assim, a erosão eólica e hídrica forma voçorocas e amplia as áreas arenizadas. A associação entre solos arenosos, relevo plano, precipitação pluviométrica e cobertura vegetal escassa resulta em um sistema praticamente sem resiliência.

Embora tenham fragilidade intrínseca, a pressão das atividades antrópicas sobre esses solos arenosos é o fator de maior importância para a intensificação e a expansão dos areais. Analisando o efeito do pastejo na intensificação da arenização, Trindade et al. (2008) concluíram que campos nativos sob pastejo, mesmo que não intensivo, são mais suscetíveis a se tornarem arenizados do que os campos não pastejados. Além disso, a arenização seleciona espécies que conseguem resistir ao processo e que passam a predominar no entorno dos areais (ROVEDDER et al., 2005), com exclusão de espécies de maior valor

forrageiro e de cobertura, o que significa, na prática, uma menor resistência à continuidade da degradação (TRINDADE et al., 2008).

A associação entre a fragilidade intrínseca dos solos arenosos do sudoeste gaúcho e os fatores externos que propiciam ou intensificam sua degradação pode ser vista na interação entre relevo e local de formação dos areais: enquanto nas encostas e base dos morros de arenito silicificado da região o principal agente da arenização é a erosão hídrica, nos campos da planície predomina a erosão eólica devido à ausência de obstáculos à aceleração do vento (ROVEDDER, 2007). No primeiro caso, apenas a associação entre declividade da encosta e substrato arenoso já bastam para ativar o processo. Já no segundo caso, no relevo plano, os caminhos formados pelo gado ou o uso agrícola são fatores que induzem o início da arenização.

Mesmo com práticas de manejo adequadas, os solos arenizáveis do sudoeste gaúcho são exemplos de fragilidade extrema, muitas vezes não respondendo a práticas conservacionistas clássicas. O incremento em matéria orgânica, por exemplo, quando comparado com outros ambientes, é extremamente difícil devido à baixa recalcitrância química e física do solo. Todavia, mesmo que não se consiga reinserir as áreas atingidas nos processos produtivos, sua recuperação ou, pelo menos, a contenção dos agentes erosivos é fundamental para que o entorno não seja atingido.

Em ambos os casos, para amenizar ou reduzir os processos de arenização que ocorreram pela fragilidade intrínseca ou pela indução antrópica, é fundamental a manutenção de cobertura vegetal viva ou morta sobre esses solos. Rovedder e Eltz (2008) encontraram 93% de redução no processo de arenização com a revegetação de Neossolo Quartzarênico com *Lupinus albus*, tremoço nativo da região. Nesse caso, a eficiência da espécie está relacionada com sua coevolução junto ao meio, favorecendo sua sobrevivência por meio de características adaptativas, como elevada pilosidade foliar e fixação biológica de nitrogênio (ROVEDDER; ELTZ, 2008). Isso demonstra que, apesar da fragilidade intrínseca, o sistema pode expressar reação positiva quando as técnicas de recuperação se mostrarem eficientes.

Considerações finais

A fragilidade foi considerada um conceito relativo, pois um solo tende a ser mais ou menos frágil em relação a algum fator, força ou ação externa sobre o mesmo. Dessa maneira, o uso do termo “solo frágil” deve vir acompanhado sempre do contexto ao qual ele se refere, já que inúmeros podem ser os tipos de fragilidade, incluindo fatores externos, como a intensidade da precipitação.

Além disso, a ação antrópica modifica intensamente o ambiente, principalmente no sentido da degradação; porém, em alguns casos, a fragilidade pode ser amenizada. Sistemas ou áreas com solos frágeis são os que frequentemente já estão danificados ou degradados, ou por processos naturais, ou pela ação antrópica. Dessa forma, mesmo os sistemas com solos frágeis podem fazer parte da cadeia produtiva de alimentos; contudo, as técnicas de manejo do solo devem ser adequadas a cada tipo de fragilidade. Para isso, é necessário resgatar e fazer adaptações do Sistema de Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras para avaliar a situação dos solos frágeis. Além disso, é imprescindível que o solo seja considerado um bem da União e o usuário deva seguir um Código de Uso do Solo, a ser implementado.

A redução da fragilidade passa, portanto, por uma visão sistêmica, considerando-se aspectos inerentes ao solo e sua relação com aspectos da paisagem, como relevo, regime hídrico, cota de altitude, entre outros. Políticas e gestão pública para redução dos riscos de degradação do solo necessitam de uma análise integradora, que não menospreze os diferentes fatores de incidência sobre o aumento de fragilidade do meio, sob pena de, em caso contrário, estarem fadadas ao fracasso.

Referências

AB'SABER, A. N. A revanche dos ventos: derruição de solos areníticos e formação de areais na Campanha gaúcha. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, RS, v. 1, p. 7-31, 1995.

ADEM, H. H.; TISDAL, J. M. Management of tillage and crop residues for double-cropping in fragile soils of south-eastern Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 4, p. 577-589, 1984.

AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; HUBNER, A. P.; CHIAPINOTTO, I. C.; FRIES, M. R. Consorciação de plantas de cobertura no outono/inverno antecedendo o milho em plantio direto: dinâmica do nitrogênio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 739-749, 2004.

ALBUQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, p. 141-151, 2000.

ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A.; GATIBONI, L. C.; ELTZ, F. L. F. Atividades agrícolas de produção em solos frágeis no Sul do Brasil. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7, p. 367-403.

AMADO, T. J.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S. B. V.; BAYER, C. Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total no solo e produtividade de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 679-686, 1999.

AMADO, T. J. C.; PROCHNOW, D.; ELTZ, F. L. F. Perdas de solo e água em períodos de anomalias climáticas: El Niño e La Niña no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, p. 819-827, 2002.

AMARAL, E. F. do; LEAL, M. J. de L. R.; DUARTE, A. F.; DELGADO, R. C.; CALDERA, R. W. da S.; DANTAS, M. V. C.; MENDONZA, E. R. H.; FRANKE, I. L.; MIRANDA, E. M. de. Circunstâncias estaduais. In: COSTA, F. S.; AMARAL, E. F. do; BUTTZKE, A. G.; NASCIMENTO, S. da S. (Ed.). **Inventário de emissões antrópicas e sumidouros de gases de efeito estufa do Estado do Acre**: ano base 2010. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2012. p. 15-37.

AMARAL, E. F. do; ARAÚJO, E. A. de; João Luiz LANI, J. L.; RODRIGUES, T. E.; OLIVEIRA, H. de; MELO, A. W. F. de; SILVA, J. R. T. da; RIBEIRO NETO, M. A.; BARDALES, N. G. Ocorrência e distribuição das principais classes de solos do Estado do Acre. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CLASSIFICAÇÃO E CORRELAÇÃO DE SOLOS, 9., 2010,

Rio Branco, AC. **Solos sedimentares em sistemas amazônicos**: potencialidades e demandas de pesquisa: guia de campo. Brasília, DF: Embrapa, 2013. p. 97-192.

ANTONELLO, L.; FONTANA, M. Cresce o desmatamento de Mata Atlântica no estado. **Diário de Santa Maria**, Santa Maria, RS, 24. ago. 2015. Disponível em: <<http://diariodesantamaria.clicrbs.com.br/rs/geral-policia/noticia/2015/08/cresce-odesmatamento-de-mata-atlantica-no-estado-4832163.html>>. Acesso em: 19 set. 2015.

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

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, p. 117-124, 2003.

COELHO, M. R. **Caracterização e gênese de Espodosolos da Planície Costeira do Estado de São Paulo**. São Paulo. 2008. 270 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

COELHO NETTO, A. L. Evolução de cabeceiras de drenagem no médio vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 4, p. 69-100, 2003.

CORTE, A. P. D.; HENTZ, A. M. K.; DOUBRAWA, B.; SANQUETTA, C. R. Environmental fragility of Iguazu river watershed, Paraná, Brazil. **Bosque**, Valdivia, v. 36, p. 287-297, 2015.

COSTA, F. de S.; CAMPOS FILHO, M. D.; SANTIAGO, A. C. C.; MAGALHÃES, I. B.; CORDEIRO, L. da S.; LIMA, A. P. de; MAIA, G. R.; SILVA, E. P.; KLEIN, M. A.; SILVA, F. de A. C.; BARDALES, N. G.; QUEIROZ, L. R.; BRITO, E. de S. **Agricultura conservacionista na produção familiar de mandioca e milho no Juruá, Estado do Acre**: efeitos da adoção nos resultados de safras de 2006 a 2014. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2014. 10 p. (Embrapa Acre. Comunicado técnico, 186).

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KAMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, L. E. F. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90 p.

- DAVIDSON, E. A.; MARTINELLI, L. A. Nutrient limitations to secondary forest regrowth. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; DIAS, P. S. (Ed.). **Amazonia and global change**. Columbia: American Geophysical Union, 2009. p. 229-309. (Geophysical monograph series, v. 186).
- DE ANGELIS, D. L.; BARTELL, S. M.; BRENKERT, A. L. Effects of nutrient recycling and food-chain length on resilience. **The American Naturalist**, Chicago, v. 134, p. 778-805, 1989.
- DIAMOND, J. **Colapso**: como as sociedades escolhem o fracasso ou o sucesso. 5. ed. Rio de Janeiro: Record, 2007. 685 p.
- FARIA, D. G. M.; SANTORO, J.; TOMINAGA, L. K.; BROLLO, M. J.; SILVA, P. F.; RIBEIRO, R. R. **Relatório do atendimento emergencial realizado pelo Instituto Geológico em Santa Catarina em razão do desastre ocorrido em novembro de 2008**. São Paulo: Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente, 2008. 26 p.
- FIDALSKI, F.; ALVES, S. J. Altura de pastejo de braquiária e carga animal limitada pelos atributos físicos do solo em sistema integração lavoura-pecuária com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, p. 864-870, 2015.
- GERARD, C. J. Laboratory experiments on the effects of antecedent moisture content and residue application on structural properties of a fragile soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 7, p. 63-74, 1986.
- GOMES, F. H. **Gênese e classificação de solos sob vegetação de restinga no Ilha do Cardoso - SP**. 2005. 107 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- JENNY, H. **Factors of soil formation**. New York: McGraw-Hill, 1941. 281 p.
- KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHIARI, A.; ROSS, J. L. S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. 1 CD-ROM.
- KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; DIAS, P. S. **Amazonia and global change**. Washington, DC: American Geophysical Union, 2009. 565 p. (Geophysical monograph, 186).
- LAL, R. Degradation and resilience of soils. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. 352, p. 997-1010, 1997.
- LAL, R. Soils and sustainable agriculture: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 28, p. 57-64, 2008.

LAMARCA, C. C. **Stubble over the soil**. Madison: American Society of Agronomy, 1996. 245 p.

LUCIANO, R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 1733-1744, 2012.

MAFRA, A. L.; GUEDES, S. F. F.; KLAUBERG FILHO, O.; SANTOS, J. C. P.; ALMEIDA, J. A.; DALLA ROSA, J. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, p. 217-224, 2008.

MAGALHÃES, T. L.; BORTOLUZZI, R. L. C.; MANTOVANI, A. Levantamento florístico em três áreas úmidas (banhados) no Planalto de Santa Catarina, Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 11, p. 269-279, 2013.

MALHI, Y.; BAKER, T. R.; PHILLIPS, O. L.; ALMEIDA, S.; ALVAREZ, E.; ARROYO, L.; CHAVE, J.; CZIMCZIK, C. I.; FIORE, A.; HIGUCHI, N.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, S. G.; LAURANCE, W. F.; LEWIS, S. L.; MONTOYA, L. M. M.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; VARGAS, P. N.; PATIÑO, S.; PITMAN, N. C. A.; QUESADA, C. A.; SALOMÃOS, R.; SILVA, J. N. M.; LEZAMA, A. T.; MARTÍNEZ, R. V.; TERBORGH, J.; VINCETI, B.; LLOYD, J. The above-ground coarse wood productivity of 104 neotropical forest plots. **Global Change Biology**, Malden, v. 10, p. 1-29, 2004.

MESSIAS, C. G.; FERREIRA, M. F. M.; RIBEIRO, M. B. P.; MENEZES, M. D. Análise empírica de fragilidade ambiental utilizando técnicas de geoprocessamento: o caso da área de influência da hidrelétrica do Funil – MG. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 2, p. 112-125, 2012.

MIELNICZUK, J.; LOPES, A. A. C.; SOUZA, D. M. G.; MENDES, I. C. Manejo de solos e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 3, p. 209-248, 2003.

MILICH, L. **Characterizing and relating meridional variability in satellite images of the West African Sudano-Sahel to desertification and food security**. 1997. Dissertation (Master of Geography) - University of Arizona.

OLSON, G. W. Improving uses of soils in Latin America. **Geoderma**, Amsterdam, v. 9, p. 257-267, 1973.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; ANDERSON, L. O.; FYLLAS, N. M.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C. I. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences**, Munich, v. 8, p. 1415-1440, 2011.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1995. 65 p.

REELEDER, R.; MILLER, J. J.; BALL COELHO, B. R.; ROY, R. C. Impacts of tillage, cover crop, and nitrogen on populations of earthworms, micro arthropods and soil fungi in a cultivated fragile soil. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 33, p. 243-257, 2006.

REUNIÃO BRASILEIRA DE CLASSIFICAÇÃO E CORRELAÇÃO DE SOLOS, 9., 2010, Rio Branco, AC. **Solos sedimentares em sistemas amazônicos**: potencialidades e demandas de pesquisa: guia de campo. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 204 p. il. color. Editores: Lúcia Helena Cunha dos Anjos, Lucielio Manoel da Silva, Paulo Guilherme Salvador Wadt, José Francisco Lumbreras, Marcos Gervasio Pereira.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 8, p. 64-74, 1994.

ROVEDDER, A. P. M. Bioma Pampa: relações solo-vegetação e experiências de restauração. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 64.; ENCONTRO REGIONAL DE BOTANICOS MG, BA E ES, 23., 2013, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBB, 2013. p. 46-54.

ROVEDDER, A. P. M. **Potencial do *Lupinus albescens* Hook. & Arn. para recuperação de solos arenizados do Bioma Pampa**. 2007. 126 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

ROVEDDER, A. P. M.; ELTZ, F. L. F. Revegetação com plantas de cobertura em solos arenizados sob erosão eólica no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 315-321, 2008.

ROVEDDER, A. P.; ELTZ, F. L. F.; GIRARDI-DEIRO, A. M.; DEBLE, L. Análise da composição florística do campo nativo afetado pelo fenômeno da arenização no Sudoeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 11, p. 501-503, 2005.

SÁ, J. P. G.; CAVIGLIONE, J. H. **Arenito Caiuá**: capacidade de lotação das pastagens. Londrina: Iapar, 1999. (Informe de pesquisa, 132).

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p. il. color.

SIMONSON, R. W. Outline of a generalized theory of soil genesis. **Soil Science Society American Proceedings**, Madison, v. 23, p. 152-156, 1959.

SOMBROEK, W. G. **A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon Region**. Wageningen: Centre for Agricultural Publications and Documentation, 1966. 292 p.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **GEOUSP – Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 5, p. 39-49, 2004.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS- ASCAR, 2008. 222 p.

SUERTEGARAY, D. M. A. **Deserto grande do sul: controvérsia**. Porto Alegre: UFRGS, 1998. 130 p.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977. 91 p.

TRINDADE, P. P.; QUADROS, F. L. F.; PILLAR, V. P. Vegetação campestre de areas do Sudoeste do Rio Grande do Sul sob pastejo e com exclusão do pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, p. 771-779, 2008.

WARMLING, M. T. **Diversidade edáfica em áreas de banhados no Planalto Catarinense**. 2013. 172 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.

WOHLENBERG, E. V.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 5, p. 891-900, set./out. 2004.

Capítulo 2

Identificação e mapeamento de solos frágeis no Município de Mineiros, GO

Alba Leonor da Silva Martins; Cesar da Silva Chagas

Introdução

As áreas do Sudoeste Goiano tornaram-se foco para o estudo de solos frágeis, especialmente em virtude da expansão agrícola. Durante os anos de 1970 e 1980, os padrões de uso e cobertura da terra nessa região apontavam a ocorrência de extensas áreas com pecuária extensiva, arroz de sequeiro, milho, soja e sorgo (GUERRA, 1989). Localizado no Sudoeste Goiano, o município de Mineiros contava, em 2005, com apenas 35 ha com a cultura de cana-de-açúcar; em 2011, essa área passou para 21.000 ha, numa taxa de expansão de 60.188%, principalmente devido à instalação de usinas de etanol e açúcar (COUTINHO et al., 2013).

Na safra 2014/2015, o Estado de Goiás foi o segundo maior produtor de cana-de-açúcar, antecedido apenas por São Paulo, representando 9,5% da produção brasileira, com uma área plantada de 854,2 mil hectares e produtividade de 72,90 t ha⁻¹ (CONAB, 2015).

Entre as diversas formas de incentivo para a expansão da cultura canavieira nessa região destacam-se a demanda bioenergética, a predominância de relevo plano a suave ondulado, facilitando a mecanização, e a ocorrência de solos de alto potencial produtivo, responsivos ao uso de corretivos e fertilizantes e de modernas tecnologias de produção. Porém, o impacto socioeconômico e ambiental negativo dessa expansão não tem sido contabilizado em sua plenitude. Uma das alternativas viáveis seria a disponibilização de informações de solos em nível adequado de detalhe, como os levantamentos em escalas maiores, para subsidiar o planejamento de uso da terra e de manejo do solo otimizando os custos de produção.

De acordo com Guerra (1989), os solos predominantes no Sudoeste e no Noroeste Goiano são os Neossolos Quartzarênicos – enquadrados como solos frágeis para uso com manejo intensivo e sem planejamento –, os quais representam uma fase intermediária para os Latossolos Vermelho-Amarelos, tendo como características a textura areia e areia-franca e a baixa fertilidade natural. Esses solos ocorrem em áreas de relevo plano a ondulado, recobertas por cerrado e manchas de cerradão, e apresentam baixa capacidade de retenção de água, elevada acidez e suscetibilidade à erosão.

Na região do Cerrado, os solos de textura arenosa, que incluem as classes areia e areia franca, apresentam 85% ou mais de soma da fração areia ao longo de, pelo menos, dois metros a partir da superfície. Essas areias são constituídas, essencialmente, de quartzo, que confere a esses solos elevada suscetibilidade à erosão, drenagem excessiva, alta porosidade, baixos valores de retenção de água, elevada permeabilidade e taxa de infiltração, e baixa capacidade de água disponível, ou seja, pequena quantidade de água armazenada no solo e utilizável pelas plantas (SPERA et al., 1999).

Esses solos apresentam capacidade de troca de cátions (CTC) baixa ou muito baixa, sendo pobres em nutrientes para as plantas e, em geral, álicos, ou seja, saturados com alumínio tóxico para as plantas. O pH desses solos indica acidez de elevada a média. Os teores de cálcio, magnésio, potássio e sódio são baixos ou muito baixos e, conseqüentemente, a saturação por base é baixa ou muito baixa. O teores de fósforo são muito baixos (SPERA et al., 1999).

Diante do cenário de expansão agrícola observado no Sudoeste Goiano, foi selecionada uma área de produção de cana-de-açúcar no Município de Mineiros, GO com o objetivo de identificar, caracterizar e mapear os solos frágeis que ocorrem na região e verificar, pela metodologia de amostragem, sua representatividade em apoio às atividades de planejamento agrícola.

Caracterização do meio físico

Área de estudo

A área selecionada para o estudo, com aproximadamente 945 ha, está situada na Fazenda Araucária, no Município de Mineiros (Estado de Goiás), entre as coordenadas UTM 8029536 e 8033161mN e 286331 e 289169mE, zona 22S, a uma altitude de 810 m acima do nível do mar. Essa área está inserida na bacia hidrográfica do Ribeirão Queixada, que, por sua vez, pertence à bacia hidrográfica do Alto Rio Araguaia (Figura 1).

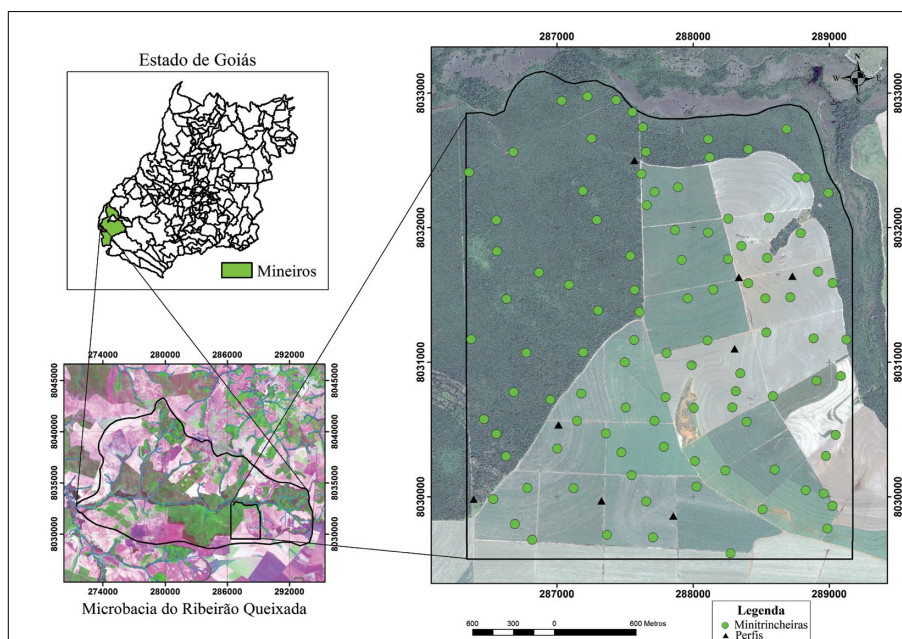


Figura 1. Localização da área de estudo na Fazenda Araucária em Mineiros, GO.

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima tropical chuvoso Aw (quente e úmido, com verão úmido e inverno seco), com temperatura média anual de 18 a 32 °C e precipitação pluvial média anual em torno de 1700 mm, sendo que o período chuvoso se estende de novembro a maio, ocasião em que são registrados mais de 80% do total das chuvas do ano. Veranicos ocorrem em plena estação chuvosa, geralmente nos meses de janeiro a março e normalmente com duração de cerca de 10 a 15 dias, podendo, eventualmente, prolongar-se por um tempo maior (CARNEIRO et al., 2013).

A vegetação natural da área é composta pelo cerrado *stricto sensu* ou cerrado tropical subcaducifólio (Figura 2), substituído, em parte, pela cultura de cana-de-açúcar (Figura 3). A área apresenta altitudes que variam de 742 a 851 m e relevos plano (19,5%), suave ondulado (56,4%) e ondulado (23,9%), onde são encontrados predominantemente Neossolos Quartzarênicos, derivados de Arenitos da Formação Botucatu, e Latossolos Amarelos, Vermelho-Amarelos e Vermelhos, todos desenvolvidos de Coberturas Detrito-Lateríticas do Terciário (PROJETO RADAMBRASIL, 1981). A Formação Botucatu é constituída de arenitos finos a médios comumente silicificados quartzosos, bem classificados e arredondados (MORAES, 2014).



Fotos: Alba L.da S. Martins

Figura 2. Vegetação de Cerrado tropical subcaducifólio na área de estudo – Município de Mineiros, GO.



Fotos: Alba L.da S. Martins

Figura 3. Preparo do solo e plantio de cana-de-açúcar na área de estudo.

Metodologia de amostragem

A amostragem na área de estudo foi realizada em duas campanhas de campo: em junho/2011 e dezembro/2012. O método utilizado foi o cLHS (*Conditioned Latin Hypercube Method for Sampling*), ou hipercubo latino, conforme Minasny e McBratney (2006).

O método cLHS é um procedimento de amostragem aleatória estratificada que fornece uma eficiente forma de selecionar as variáveis a partir de suas distribuições multivariadas. Funciona da seguinte forma: dado K variáveis com X_1, \dots, X_k sendo a faixa de variação de cada uma, X é dividido em n prováveis intervalos iguais (estratos); então, para cada variável, uma amostra aleatória é tomada para cada estrato. As amostras obtidas para cada variável por estrato são confrontadas umas com as outras de forma aleatória ou seguindo alguma regra previamente especificada. A regra, neste caso, é de que a amostragem possa refletir a mesma representação dos estratos para todas as variáveis consideradas. Ao final, tem-se um número de amostras que cobrem os 'n' estratos para todas as variáveis analisadas. Nessa técnica, são necessárias menos amostras para se obter uma distribuição mais representativa das características ambientais da área estudada. O método garante que cada variável estará representada de maneira completa através de seus estratos.

Os dados das covariáveis ambientais – elevação, declividade e índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) – foram convertidos para o formato de arquivo texto e utilizados como dados de entrada no programa cLHS. Uma vez gerada a base para o processo, procedeu-se à seleção dos pontos amostrais utilizando peso dos dados igual a 1,0; peso das correlações igual a 0,5; e número de interações igual a 20.000, conforme especificações do programa proposto por Minasny e McBratney (2006). Como ainda não existem critérios definitivos para estabelecer o número ideal de pontos amostrais, optou-se por selecionar 100 pontos, considerados, a princípio, suficientes para captar toda a variabilidade das covariáveis ambientais e, conseqüentemente, dos solos da área.

Com o auxílio de um Sistema de Posicionamento Global (GPS) foram coletadas amostras de solos nos 100 pontos selecionados pelo método cLHS. Primeiramente, as coletas foram realizadas em minitrincheiras (75), nas

profundidades 0-20 cm e 60-80 cm para caracterização e classificação dos solos. A partir da ocorrência dos solos identificados nas minitrincheiras, foram abertas trincheiras de 1,5 m de largura e até 2 m de profundidade para descrição e classificação dos solos em perfis completos (8). Posteriormente, para validação do mapeamento foram coletadas e analisadas mais 25 minitrincheiras.

As amostras de solos coletadas (minitrincheiras e perfis completos) foram preparadas e analisadas nos laboratórios da Embrapa Solos no Rio de Janeiro. Estas amostras foram destorroadas, peneiradas em malha de 2 mm, e secadas ao ar para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) e a quantificação volumétrica das frações calhaus (2 - 20 cm) e cascalhos (2 - 20 mm); posteriormente, foram submetidas às análises físicas e químicas seguindo os métodos disponíveis em Donagemma et al. (2011), conforme a seguir: análises físicas – composição granulométrica da terra fina, argila dispersa em água (ADA), densidade de partículas (Dp) e retenção de umidade a 10 kPa (capacidade de campo) e 1500 kPa (ponto de murcha permanente); e análises químicas – pH em H₂O e em KCl 1N, bases trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺), acidez extraível, alumínio trocável (Al³⁺), fósforo assimilável, carbono orgânico e nitrogênio total (teste de Kjeldahl).

Os solos foram classificados até o 5º nível categórico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, de acordo com Santos et al. (2013).

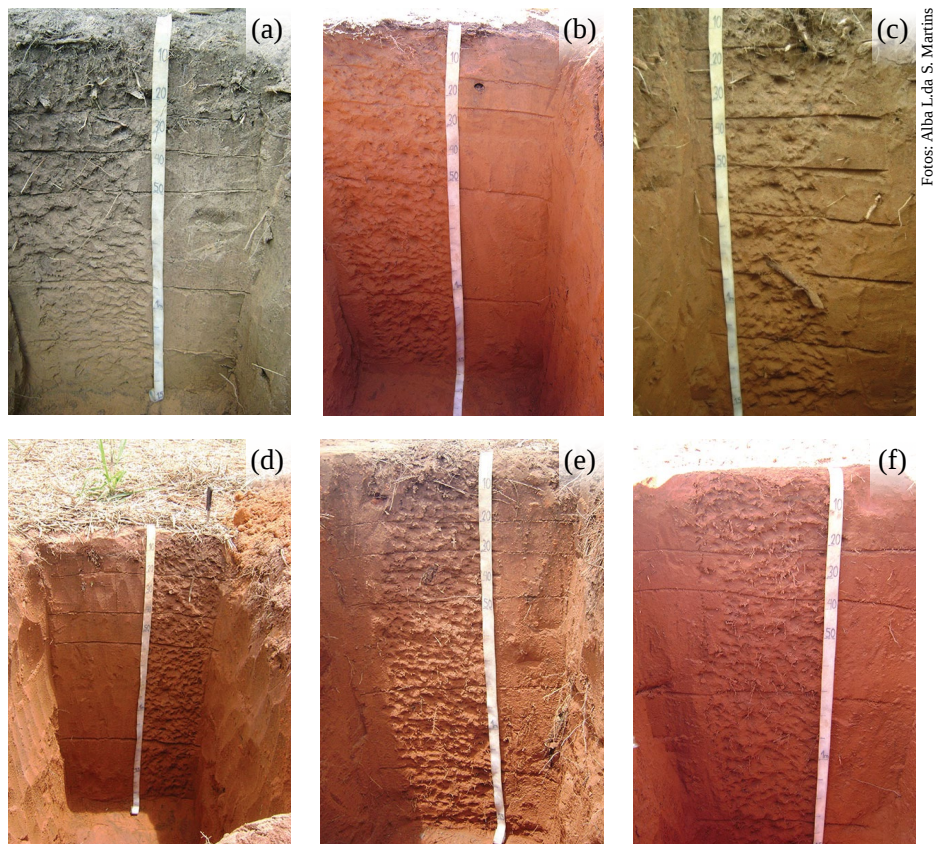
Neste trabalho serão discutidos apenas os resultados dos oito perfis completos.

Os solos da área de estudo

Classes de solos

Na paisagem da área de estudo, representativa do Sudoeste Goiano, predominam os solos muito profundos das classes dos Latossolos (textura média) e dos Neossolos Quartzarênicos, estes derivados de arenitos da Formação Botucatu, distribuídos, em sua maioria, no relevo suave ondulado (56,4%), seguido do relevo plano (19,5%) e do ondulado (23,9%). Também foram encontrados Latossolos de textura argilosa em menor extensão. Os Latossolos apresentam sequência de horizontes do tipo Ap, AB, BA, B_w1 e

B_w2 e os Neossolos Quartzarênicos com sequência do tipo Ap, AC, C1 e C2 (Figura 4). Os horizontes superficiais variaram em profundidades de até 50 cm de espessura (Tabela 2), a maior parte com estrutura em grãos simples.



Fotos: Alba L. da S. Martins

Figura 4. Perfis de solos característicos da área de estudo: (a) Neossolo Quartzarênico Órtico típico; (b) Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico textura média; (c) Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico psamítico; (d) Neossolo Quartzarênico Órtico latossólico (e); Latossolo Vermelho Distrófico típico textura média; (f) Latossolo Vermelho Distrófico típico textura argilosa

Por definição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), a classe dos Latossolos compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico precedido de qualquer tipo de horizonte A dentro de 200 cm da superfície do solo, ou dentro de 300 cm se o horizonte A tem mais

de 150 cm de espessura. Esse grupamento de solos com B latossólico apresenta por base uma evolução muito avançada com atuação expressiva de processo de latolização (ferralitização), resultando em intemperização intensa dos constituintes minerais primários, e mesmo secundários menos resistentes, e concentração relativa de argilominerais e/ou óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, com inexpressiva mobilização ou migração de argila, ferrólise, gleização ou plintização (SANTOS et al., 2013).

A classe dos Neossolos, de acordo com o SiBCS, compreende solos constituídos por material mineral ou orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando horizonte B diagnóstico. São solos sem contato lítico dentro de 50 cm de profundidade, com sequência de horizontes A-C, de textura areia ou areia franca em todos os horizontes até 150 cm de profundidade a partir da superfície ou até um contato lítico. Nessa classe de solos, ocorre uma variação no nível de subgrupo com a presença de horizonte de textura franco-arenosa abaixo de 150 cm, sendo classificados como B latossólicos. São essencialmente quartzosos e praticamente não apresentam minerais primários alteráveis (SANTOS et al., 2013).

Para a geração do mapa de solos em escala de 1:10.000 (levantamento detalhado) foram utilizadas imagens do satélite Landsat 7 de alta resolução. A delimitação/delineamento das unidades de mapeamento (UM), ou manchas de solo, foi elaborada a partir da: (i) análise de padrões diferenciados de cor, textura, relevo; (ii) plotagem da classe de solo e dos atributos químicos e físicos de cada ponto amostrado nas minitrincheiras ou perfil completo.

As classes de solo estão distribuídas na área da seguinte forma, conforme ilustrado na Figura 5: LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico, textura média, A moderado, hipoférrico, relevo plano (P76 - LAd med); LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, textura média, A fraco, hipoférrico, relevo suave ondulado (P77 - LVAd med); LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico psamítico, textura média, A moderado, epiálico, hipoférrico, relevo suave ondulado (P78 - LVAd psam); LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, textura argilosa, A fraco, epieutrófico, hipoférrico, relevo ondulado (P79 - LVd arg); LATOSSOLO VERMELHO

Distrófico típico, textura média, A moderado, epieutrófico, hipoférrico, relevo suave ondulado (P80 - LVd med); LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, textura média, A fraco, epieutrófico, hipoférrico, relevo suave ondulado (P81 - LVd med); NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico, A moderado, distrófico, álico, relevo ondulado (P82 - RQo tip); e NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico latossólico, A fraco, distrófico, relevo suave ondulado (P83 - RQo lato), todos na fase cerrado tropical subcaducifólio.

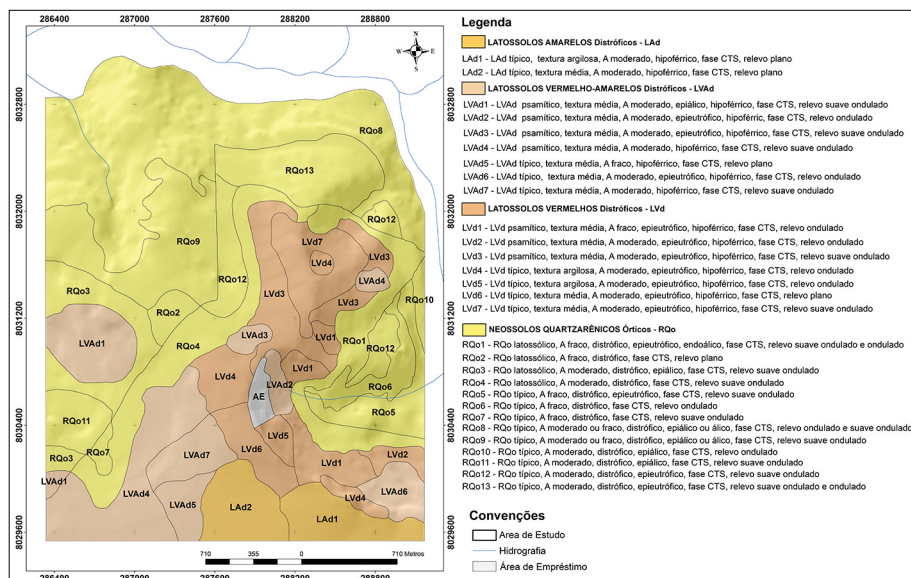


Figura 5. Mapa de solos com a localização e distribuição das classes de solo na área de estudo.

A área ocupada por essas classes de solos é apresentada na Tabela 1. Os RQo tip são a classe dominante na área (44%), seguida dos RQo lato (15,74%) e dos LVAd psam (11,64%). Esses solos ocorrem, principalmente, nos terços médio e inferior da paisagem, em altitudes que variam entre 749 a 843 m, com valores médios de 791,49 m (RQo tip), 815,82 m (RQo lato) e 820,42 m (LVAd psam). Os LVd arg ocupam apenas 2,59% da área e estão relacionados com material da cobertura detrito-laterítica que está em contato com os arenitos da Formação Botucatu. As demais classes (LAd med, LVAd med, LVd psam e LVd med) ocupam 25,25% da área, no terço superior das encostas.

Tabela 1. Distribuição das classes de solo na área estudada.

Classe de solos	Área (ha)	Covariáveis Ambientais*	Covariáveis Ambientais*		
			Elevação (m)	Declividade (%)	Curvatura
Latossolo Amarelo Distrófico típico, textura média – LAd med	59,18	6,26	833,81	4,28	-0,0003
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico psamítico – LVAd psam	110,06	11,64	820,42	4,88	-0,0209
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, textura média –LVAd med	47,36	5,01	827,13	5,89	0,0607
Latossolo Vermelho Distrófico psamítico – LVd psam	76,70	8,11	822,24	5,17	0,0093
Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura média – LVd med	56,45	5,97	818,94	6,86	0,0741
Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura argilosa – LVd arg	24,47	2,59	824,71	13,86	-0,0107
Neossolo Quartzarênico Órtico latossólico – RQo lato	148,87	15,74	815,82	4,35	0,0012
Neossolo Quartzarênico Órtico típico – RQo tip	416,08	44,00	791,49	6,06	-0,0354
Área de empréstimo	6,44	0,68			
Total	945,62	100,00	808,01	5,80	-0,0048

* Valores médios.

Características físicas

Na Tabela 2 são apresentadas as características físicas dos horizontes descritos nos solos analisados, e na Figura 6 são apresentadas a distribuição dos teores de argila e a relação areia grossa/areia fina dos solos estudados.

Tabela 2. Características físicas dos solos.

Perfil	Classe	Horz.	Profundidade	AG	AF	AG/AF	Silte	Argila	ADA	GF	S/A
76	LAd med	Ap	0-18	441	326	1,35	31	202	142	30	0,15
		AB	-37	421	324	1,30	33	222	202	9	0,15
		BA	-52	395	320	1,23	22	263	223	15	0,08
		Bw1	-84	382	283	1,35	32	303	0	100	0,11
		Bw2	-130	362	295	1,23	19	324	0	100	0,06
Bw3	-180	350	305	1,15	19	326	0	100	0,06		
77	LVAd med	Ap	0-15	404	418	0,97	16	162	122	25	0,10
		AB	-25	375	427	0,88	17	181	181	0	0,09
		BA	-54	358	427	0,84	14	201	181	10	0,07
		Bw1	-110	361	410	0,88	7	222	0	100	0,03
		Bw2	-180	345	413	0,84	20	222	0	100	0,09
78	LVAd psam	A1	0-17	539	324	1,66	37	100	100	0	0,37
		A2	-37	478	396	1,21	6	120	120	0	0,05
		AB	-50	524	325	1,61	31	120	120	0	0,26

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Perfil	Classe	Horz.	Profundidade	AG	AF	AG/AF	Silte	Argila	ADA	GF	S/A
78	LVAd psam	BA	-67	490	347	1,41	22	141	141	0	0,16
		Bw1	-88	484	343	1,41	12	161	0	100	0,07
		Bw2	-115	436	392	1,11	31	141	0	100	0,22
		Bw3	-160	480	343	1,40	16	161	0	100	0,10
		Bw4	-200	472	331	1,43	16	181	0	100	0,09
79	LVd arg	Ap	0-22	332	443	0,75	24	201	161	20	0,12
		BA	-39	271	417	0,65	49	263	202	23	0,19
		Bw1	-77	260	373	0,70	65	302	40	87	0,22
79	LVd arg	Bw2	-137	256	351	0,73	28	365	0	100	0,08
		Bw3	-200	246	367	0,67	24	363	0	100	0,07
80	LVd med	Ap	0-16	308	517	0,60	34	141	101	28	0,24
		AB	-26	292	532	0,55	15	161	121	25	0,09
		BA	-44	290	515	0,56	34	161	0	100	0,21
		Bw1	-97	277	488	0,57	34	201	141	30	0,17
		Bw2	-160	258	483	0,53	38	221	0	100	0,17
		Bw3	-200	249	479	0,52	31	241	0	100	0,13
81	LVd med	Ap	0-15	243	579	0,42	37	141	101	28	0,26

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Perfil	Classe	Horz.	Profundidade	AG	AF	AG/AF	Silte	Argila	ADA	GF	S/A
81	LVd med	AB	-29	241	587	0,41	31	141	121	14	0,22
		BA	-47	241	575	0,42	23	161	121	25	0,14
		Bw1	-81	227	539	0,42	33	201	80	60	0,16
		Bw2	-122	211	545	0,39	41	203	0	100	0,20
		Bw3	-180	214	538	0,40	26	222	0	100	0,12
82	RQo típ	A	0-22	462	470	0,98	8	60	40	33	0,13
		AC	-34	422	500	0,84	18	60	40	33	0,30
		CA	-49	433	510	0,85	17	40	40	0	0,42
		C1	-87	403	538	0,75	19	40	40	0	0,47
		C2	-120	475	465	1,02	20	40	40	0	0,50
		C3	-160	414	502	0,82	24	60	40	33	0,40
		C4	-200	408	504	0,81	28	60	0	100	0,47
83	RQo lato	Ap	0-22	570	278	2,05	32	120	120	0	0,27
		AC	-41	616	238	2,59	26	120	120	0	0,22
		CA	-57	618	234	2,64	28	120	100	17	0,23
		C1	-124	608	246	2,47	26	120	0	100	0,22
		C2	-180	602	248	2,43	30	120	0	100	0,25

Legenda: Horz. – horizonte; AG – areia grossa; AF – areia fina; AG/AF – relação entre areia grossa e areia fina; ADA – argila dispersa em água; S/A – relação silte/argila.

As características físicas apresentadas na Tabela 2 indicam que o perfil de LVAd med tem maiores teores de argila ($162-222 \text{ g kg}^{-1}$) do que o perfil de LVAd psam ($100-181 \text{ g kg}^{-1}$) e o perfil de RQo tip ($40-60 \text{ g kg}^{-1}$). Além disso, apresenta uma distribuição ao longo do perfil muito similar à verificada no perfil de LVAd psam; por outro lado, o perfil de RQo tip mostra uma distribuição mais uniforme dessa fração (Figura 6). No entanto, a relação AG/AF do perfil de LVAd med apresenta um comportamento similar ao verificado no perfil do RQo tip e contrastante ao verificado no perfil de LVAd psam, cujos teores de areia grossa são superiores em superfície (acima de 500 g/kg) com maior gradação ao longo do perfil (Tabela 2 e Figura 6).

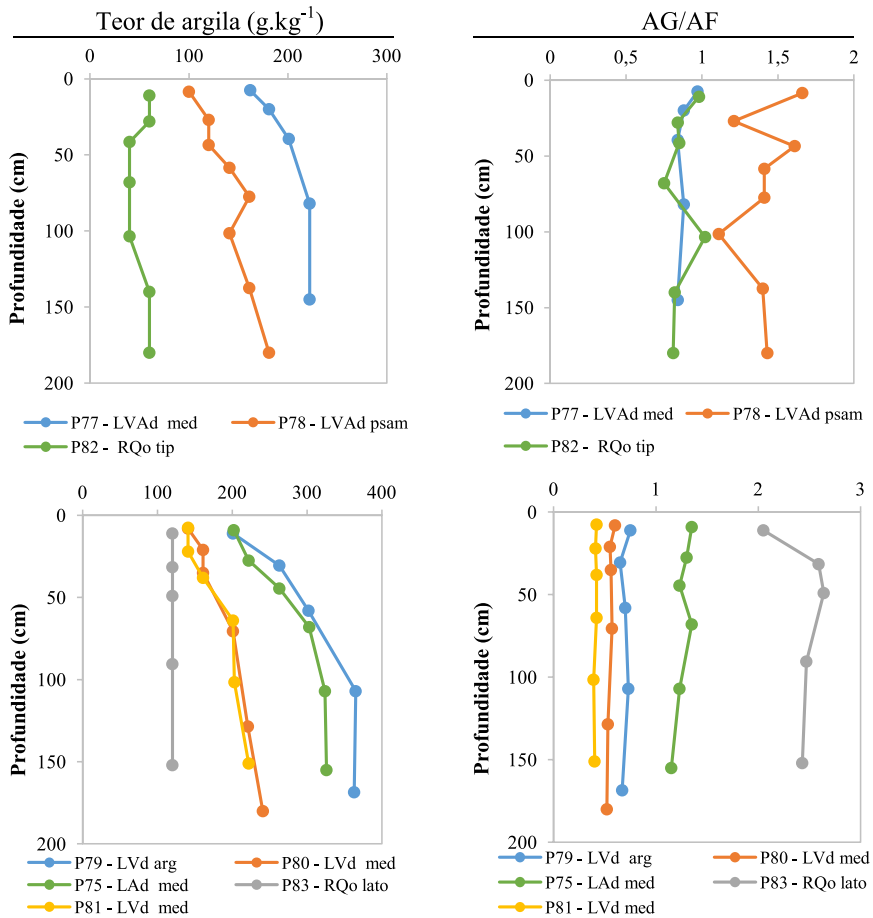


Figura 6. Teores de argila e relação areia grossa/areia fina nos perfis estudados.

Esse comportamento de certa forma errático da relação areia grossa/areia fina reflete as condições de mistura de materiais provenientes das coberturas detrito-lateríticas com materiais oriundos da Formação Botucatu, visto que a área está localizada no contato entre essas duas litologias.

Nos perfis de LVd arg, LVd med e LAd méd, foi observado que os teores de argila tendem a aumentar em profundidade, com os de LAd med e LVd arg apresentando um comportamento similar com relação à distribuição em profundidade. Por sua vez, o LVd med apresenta comportamento intermediário, com variações de argila entre 141 e 241 g kg⁻¹ (Tabela 2 e Figura 6).

O RQo lato apresentou uma distribuição constante e linear em relação ao teor de argila (120 g kg⁻¹) ao longo de todo o perfil, caracterizando sua textura como sendo areia franca. Nos perfis de LVd med predomina a areia fina (538 a 579 g kg⁻¹) sobre a areia grossa (211 a 308 g kg⁻¹), não se constatando gradiente textural. Já o de LAd med apresenta uma distribuição mais equilibrada da relação AG/AF, com valores em torno de 1,23, mais próximos dos RQo tip e inversos aos RQo lato, que apresentam valores de AG/AF em torno de 2,5 (Tabela 2 e Figura 6).

Devido aos baixos teores de argila ao longo do perfil, esses solos apresentam baixa capacidade de agregação de partículas, sendo muito suscetíveis à erosão. Na área de estudo, observou-se erosão superficial pelo carreamento da areia e o uso de mecanização e práticas agrícolas intensivas sem distinção entre as classes de solo, razões pelas quais práticas conservacionistas de manejo do solo devem ser recomendadas.

Características químicas

Na Tabela 3, são apresentadas as características químicas dos perfis de solos analisados.

Tabela 3. Características químicas dos solos estudados.

Perfil	Classe	Horz.	Prof.	pH H2O	pH KCl	S	Al+3	H	T	V	M	P	Corg	N
76	LAd med	Ap	0-18	4,8	4,2	1,7	0,3	4,2	6,2	27	15	10	7,9	0,8
		AB	-37	5,3	4,4	1,3	0,1	2,5	3,9	33	7	7	5,3	0,5
		BA	-52	5,1	4,5	1,4	0,1	2,0	3,5	40	7	<1	3,7	0,4
		Bw1	-84	4,5	4,4	0,8	0,1	1,9	2,8	29	11	<1	2,9	0,4
		Bw2	-130	5,1	4,9	0,8	0	1,7	2,5	32	0	<1	2,5	0,3
		Bw3	-180	5,2	5,1	0,5	0	1,3	1,8	28	0	<1	2,0	0,3
77	LVAd med	Ap	0-15	4,6	4,0	1,3	0,3	2,8	4,4	30	19	4	5,4	0,5
		AB	-25	5,7	4,7	1,4	0	1,5	2,9	48	0	<1	2,7	0,3
		BA	-54	5,9	5,3	1,3	0	1,0	2,3	57	0	<1	2,3	0,3
		Bw1	-110	5,3	5,0	0,8	0	1,2	2,0	40	0	<1	2,0	0,2
		Bw2	-180	5,8	5,6	0,7	0	0,8	1,5	47	0	<1	1,4	0,2
78	LVAd psam	A1	0-17	4,2	3,6	0,3	0,8	3,3	4,4	7	73	3	6,7	0,6
		A2	-37	4,1	4,1	0,4	0,4	1,4	2,2	18	50	<1	2,7	0,4
		AB	-50	4,5	4,2	0,6	0,3	1,4	2,3	26	33	<1	2,4	0,3
		BA	-67	4,8	4,3	0,3	0,2	1,1	1,6	19	40	<1	1,7	0,2

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Perfil	Classe	Horz.	Prof.	pH H2O	pHKCl	S	Al+3	H	T	V	M	P	Corg	N
78	LVA d psam	Bw1	-88	4,8	4,3	0,2	0,2	0,8	1,2	17	50	<1	1,1	0,2
		Bw2	-115	5,1	4,4	0,4	0,2	0,8	1,4	29	33	<1	1,0	0,2
		Bw3	-160	4,8	4,4	0,3	0,1	0,7	1,1	27	25	<1	1,0	0,2
		Bw4	-200	4,9	4,6	0,4	0	0,8	1,2	33	0	<1	0,8	0,2
79	LV d ang	Ap	0-22	6,1	5,5	2,9	0	1,3	4,2	69	0	10	4,4	0,5
		BA	-39	6,9	6,0	1,4	0	1,0	2,4	58	0	<1	3,7	0,4
		Bw1	-77	6,9	6,2	1,2	0	0,7	1,9	63	0	<1	3,1	0,4
		Bw2	-137	5,5	5,7	0,6	0	1,0	1,6	37	0	<1	2,5	0,4
		Bw3	-200	4,7	5,3	0,9	0	1,0	1,9	47	0	<1	2,1	0,3
80	LV d med	Ap	0-16	6,3	5,8	2,6	0	1,5	4,1	63	0	13	6,2	0,5
		AB	-26	5,9	5,0	1,4	0	1,8	3,2	44	0	3	4,1	0,4
		BA	-44	5,2	4,3	0,8	0,2	1,8	2,8	29	20	<1	3,3	0,4
		Bw1	-97	4,8	4,2	0,6	0,2	1,3	2,1	29	25	<1	2,2	0,3
		Bw2	-160	5,2	4,7	0,6	0	1,3	1,9	32	0	<1	1,9	0,2
		Bw3	-200	4,8	5,0	0,2	0	1,5	1,7	12	0	<1	1,5	0,2
81	LV d med	Ap	0-15	6,2	5,5	2,7	0	2,0	4,7	57	0	7	5,4	0,5
		AB	-29	5,8	4,9	1,1	0	2,0	3,1	35	0	1	3,6	0,4

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Perfil	Classe	Horz.	Prof.	pH H2O	pH KCl	S	Al+3	H	T	V	M	P	Corg	N
81	LVd med	BA	-47	5,5	4,5	0,6	0,1	2,0	2,7	22	14	<1	3,1	0,3
		Bw1	-81	4,9	4,3	0,6	0,2	1,5	2,3	26	25	<1	2,5	0,3
		Bw2	-122	5,3	4,6	0,9	0,1	1,6	2,6	35	10	<1	2,0	0,3
		Bw3	-180	5,0	4,7	0,8	0,0	1,5	2,3	35	0	<1	1,9	0,3
82	RQo tip	A	0-22	4,8	3,5	0,5	0,6	3,7	4,8	10	55	2	6,2	0,5
		AC	-34	5,2	4,2	0,6	0,2	1,8	2,6	23	25	1	2,1	0,3
		CA	-49	4,5	4,2	0,3	0,3	1,7	2,3	13	50	<1	1,9	0,3
		C1	-87	4,7	4,3	0,2	0,2	1,6	2,0	10	50	<1	1,7	0,2
		C2	-120	4,9	4,3	0,4	0,2	1,3	1,9	21	33	<1	1,5	0,2
		C3	-160	5,1	4,3	0,2	0,1	1,2	1,5	13	33	<1	1,0	0,2
		C4	-200	5,2	4,4	0,2	0,1	1,1	1,4	14	33	<1	0,8	0,1
		RQo lato	Ap	0-22	4,6	4,1	0,8	0,4	3,1	4,3	19	33	18	4,3
83		AC	-41	4,8	4,2	0,4	0,2	2,1	2,7	15	33	1	2,2	0,3
		CA	-57	4,3	4,1	0,6	0,2	1,5	2,3	26	25	<1	2,0	0,2
		C1	-124	4,3	4,2	0,5	0,2	1,6	2,3	22	29	<1	1,4	0,2
		C2	-180	4,9	4,4	0,6	0,1	1,1	1,8	33	14	<1	1,1	0,2

Legenda: Horz. – horizonte; Prof. – profundidade; pH H2O – pH em água; pH KCl – pH em KCl; S – soma de bases; Al+3 Alúminio trocável; H – Hidrogênio; T – capacidade de troca de cátions (CTC); V – saturação por bases; M – saturação por Alúminio; P – Fósforo assimilável; Corg – Carbono orgânico e N – Nitrogênio total.

De acordo com a Tabela 3, em todas as classes de solos, os valores de pH H₂O variaram de média a elevada acidez, aumentando nas camadas mais profundas. Há predominância de cargas negativas e Al⁺³ variando de 0 a 0,3 cmol_c kg⁻¹, quase nulo na maior parte dos perfis. Foram observados baixos valores, em geral, em todo o complexo sortivo S (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺), P e N; teores de P inferiores a 1 mg kg⁻¹; e valores de N inferiores a 0,5 g kg⁻¹. Esses valores podem estar relacionados ao material de origem derivados de arenitos da formação Botucatu e, conseqüentemente, à elevada permeabilidade desses solos de textura arenosa, que, com o uso intensivo, podem favorecer a lixiviação de N e a rápida decomposição da matéria orgânica e a baixa adsorção de P.

Os Neossolos Quartzarênicos, assim como os Latossolos, apresentaram baixos valores de carbono orgânico (Corg). No perfil de LVAd med, por exemplo, esses teores variaram de 5,4 g kg⁻¹ em superfície a 1,4 g kg⁻¹ em subsuperfície. Os maiores valores de Corg foram encontrados nos perfis de LAd med (7,9 g kg⁻¹) e LVAd psam (6,7 g kg⁻¹) em superfície, que se reduzem drasticamente para valores inferiores a 2 g kg⁻¹ em subsuperfície, o que também ocorre nos RQo. Freitas et al. (2015) observaram um decréscimo no estoque de Corg em diferentes profundidades de solos arenosos com o cultivo de cana-de-açúcar quando comparados à condição de vegetação de floresta natural.

Em geral, os solos são naturalmente pobres em nutrientes. Nas condições de clima tropical (temperaturas elevadas e alta umidade), como na maior parte do Brasil, é grande a produção de biomassa, mas a velocidade de mineralização da matéria orgânica também é muito elevada. Somando-se a isso o incremento da mineralização causado pelo preparo anual do solo agricultado, tem-se conseqüências como essas (TOMÉ JÚNIOR, 1997).

Todas as classes de solos foram descritas como distróficas. Essa caracterização em solos de classe textural areia ou areia franca foram confirmadas por Spera et al. (1999), que detectaram que nesses solos os teores de cálcio, magnésio, potássio e sódio são baixos ou muito baixos. Conseqüentemente, a saturação por base é baixa ou muito baixa e os teores de fósforo são muito baixos.

A avaliação da fertilidade leva a inferir que, apesar do uso de elevados insumos no manejo desses solos, há baixa reserva de nutrientes, conseqüência da degradação pelo uso intensivo, acarretando possíveis aumentos nos custos de produção.

Avaliações sobre o manejo do solo

O manejo dos solos estudados consiste na monocultura de cana com preparo convencional, utilizando arados, grades e/ou subsoladores. Não foi observada uma diferenciação nas práticas e processos de manejo adotado considerando as diferenças em comportamento entre as classes de solo que ocorrem na área, desconsiderando, portanto, sua fragilidade estrutural. Além disso, esses solos ocorrem, em geral, em áreas de recarga de aquíferos, neste caso, do Aquífero Guarani. O manejo inadequado proporciona impactos negativos, como a elevação de riscos de contaminação das águas subterrâneas e da suscetibilidade à erosão e o aumento de custos de produção. Freitas et al. (2015), no estudo de cana-de-açúcar em solos arenosos, relatam que o preparo intensivo e profundo com a utilização de discos (grades pesadas e arados) e hastes subsoladoras, preconizados para romper os impedimentos físicos, são práticas que resultam na degradação acelerada do solo e no conseqüente decréscimo do teor de matéria orgânica, no aumento das perdas por erosão e na redução de sua capacidade produtiva.

Considerações finais

A metodologia de amostragem utilizada contribuiu para separar as classes de solo representativas de ocorrência no Sudoeste Goiano. O nível de detalhamento dessa separação de classes no mapa de solos constitui uma ferramenta para auxiliar no planejamento de uso das terras e de manejo dos solos.

Na área de estudo, predominam os Neossolos Quartzarênicos seguidos dos Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos de textura média; estes, no campo, apresentaram entre si pouca diferenciação.

Este estudo confirmou a caracterização de solos frágeis sob cultivo intensivo pelo predomínio de areia ou areia franca ao longo dos perfis e pelos baixos níveis de fertilidade, razões pelas quais são recomendadas práticas conservacionistas de manejo do solo para a região.

Referências

- CARNEIRO, M. A.; SOUZA, E. D.; PAULINO, H. B.; SALES, L. E. O.; VILELA, L. A. F. Atributos indicadores de qualidade em solos de Cerrado no entorno do Parque Nacional das Emas, GO. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 6, p. 1857- 1868, nov./dez. 2013.
- CONAB (Brasil). **Levantamento da safra de grãos, café, cana-de-açúcar e laranja**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>>. Acesso em: 12 out. 2015.
- COUTINHO, H. L. C.; CASTRO, S.S.; TURETTA, A. P. D.; MONTEIRO, J. M. G.; CORREIO, S. P. T.; PIET RAFES A, J. P.; VILELA, B. P.; CORREIO, E. N.; CORREIO, H. S. R.; NOGUEIRA, A. P. **Oficina de preparação para avaliação participativa de impactos à sustentabilidade de políticas de expansão canavieira no Sudoeste Goiano: relatório executivo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 38 p. (Embrapa Solos. Documentos, 161).
- DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Embrapa Solos. Documentos, 132). Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77712/1/Manual-metodos-analis-solo-2.ed.pdf>> Acesso em: 12 out. 2015.
- FREITAS, P. L.; LUMBRERAS, J. F.; DONAGEMMA, G. K.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G. Comportamento de solos de textura superficial arenosa influenciado pela produção mecanizada de cana-de-açúcar. In: SILVA, F. C. da; ALVES, B. J. R.; FREITAS, P. L. (Ed.). **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- GUERRA, A. J. T. **Um estudo do meio físico com fins de aplicação ao planejamento do uso agrícola da terra no Sudoeste de Goiás**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 212 p.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B. A. conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. **Computational Geosciences**, v. 32, p. 1378-1388, 2006.
- MORAES, J. M. (Org.). **Geodiversidade do Estado de Goiás e Distrito Federal**. Goiânia: CPRM, 2014. 92 p. (Programa Geologia do Brasil. Levantamento de Geodiversidade).
- PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SD 22. Goiás: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, 1981. 640 p.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p. il. color.

SPERA, S. T.; REATTO, A.; MARTINS, E. S.; CORREIA, J. R.; CUNHA, T. J. F. **Solos areno-quartzosos no Cerrado**: problemas, características e limitação ao uso. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 1999. (Embrapa Cerrados. Documentos, 7).

TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.

Capítulo 3

Levantamento e caracterização de solos frágeis no Município de Luís Eduardo Magalhães, BA

Ademir Fontana; Aline Pacobahyba de Oliveira

Introdução

Nos últimos trinta anos, a região Oeste do Estado da Bahia conheceu uma expansão agropecuária traduzida, principalmente, pelo acréscimo significativo no cultivo de grãos e fibras em sistemas de cultivo anuais ou perenes, contando com combinações diversas de manejo e alguns casos envolvendo irrigação. Entre as diversas formas de incentivo para a expansão, destaca-se, em grande parte, o relevo plano a suave ondulado e a ocorrência de solos responsivos às práticas agrícolas e aos resultados da produtividade satisfatórios das culturas plantadas.

Como resultado do avanço da fronteira agrícola nessa região, nos últimos dez anos, a produção registrou um aumento de 70 %. Na safra de 2013/2014, a área cultivada foi de, aproximadamente, 2,3 milhões de hectares e a soma dos produtos agrícolas, de 7,5 milhões de toneladas, tendo à frente soja, algodão, milho e feijão, além da expansão da cafeicultura, de plantios florestais e de sistemas integrados diversos. Ademais, para os próximos dez anos, projeta-se, ainda, dobrar a produção das três principais culturas (ANUÁRIO..., 2014).

Quanto à base de produção agrícola da região, há que se destacar a ocorrência de solos definidos como “frágeis”, quando avaliados do ponto de vista de uso agrícola. Solos frágeis são aqui considerados, os que estão perdendo aceleradamente o potencial produtivo, pela redução da capacidade de suprir em nutrientes, água e oxigênio para as plantas devido ao padrão do manejo e/ou da intensidade de uso aos quais têm sido submetidos. Como características relacionadas a este grupo de solos destaca-se a composição predominantemente arenosa, baixos teores de matéria orgânica e baixa agregação considerando tanto o grau de desenvolvimento da estrutura quanto a estabilidade dos agregados.

Diante do atual cenário agrícola na região, o conhecimento dos solos se torna ainda mais importante, pois poderá subsidiar o planejamento do uso das terras voltado à atividade agrícola e, ainda, fornecer informações a respeito das potencialidades e fragilidades do agroecossistema. Segundo Coelho et al. (2005), o conhecimento dos solos e de sua distribuição na paisagem, é possível e viável extrapolar as avaliações para outras áreas ambientalmente semelhantes, bem como estabelecer correlações e interpretações espaciais relativas às mudanças das características, dos atributos e da qualidade dos solos.

Como parte relevante do conhecimento dos solos, o levantamento mostra a distribuição espacial das diversas classes de solos e fornece informações essenciais sobre os atributos químicos, físicos, mineralógicos e as condições ambientais dos solos, as quais interferem direta ou indiretamente no comportamento e na qualidade do meio ambiente (PALMIERI; LARACH, 1996).

Na região Oeste do Estado da Bahia, a generalização quanto aos atributos, características e classes de solo inúmeras vezes tem como resultado interpretações diferenciadas e conflitantes quanto ao potencial de uso agrícola do solo e sua qualidade sob sistemas agrícolas. Com o objetivo de identificar a ocorrência dos solos na região, o presente trabalho pretende caracterizar, em escala de detalhe as principais classes de solo de uma paisagem representativa no Município de Luís Eduardo Magalhães.

Área de estudo

O estudo está situado entre as coordenadas 376200 e 380500 E e 8636800 e 8641200 S, em uma área total de 1.126,50 ha (Figura 1) no Município de Luís Eduardo Magalhães, no Estado da Bahia. A área de estudo é utilizada, principalmente, para o plantio de algodão no sistema convencional de manejo (730,79 ha – 64,88%) e apresenta vegetação nativa de Cerrado (395,71 ha – 35,12%), conforme se pode ver na Figura 2ab e na Figura 3, respectivamente. Além disso, a área se concentra em uma paisagem composta por relevo plano a suave ondulado, com a ocorrência de inúmeros anfiteatros. O sistema de drenagem é caracterizado pela dissecação pouco pronunciada e está devidamente relacionado ao relevo regional de plataforma aplainada.

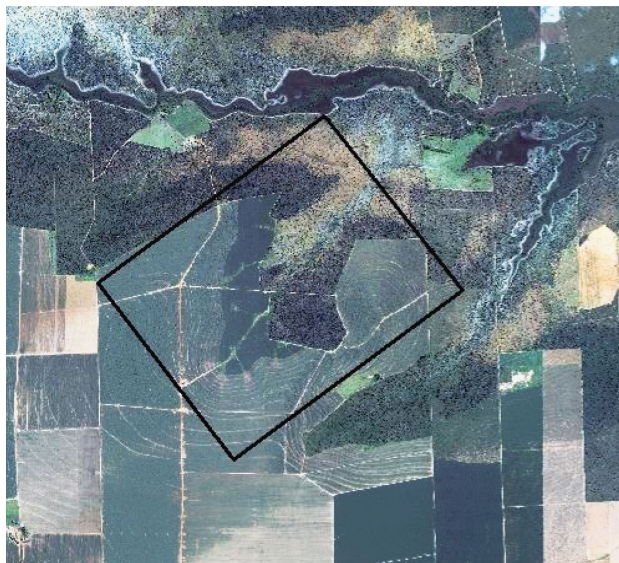
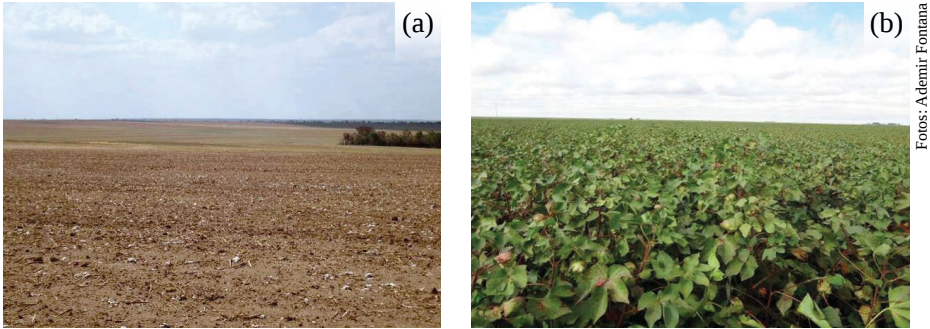


Figura 1. Configuração da área de estudo no Município de Luís Eduardo Magalhães, BA.



Fotos: Ademir Fontana

Figura 2. Aspecto do terreno após o preparo do solo para a semeadura do algodão (a) e em cultivo de algodão (b) na área de estudo.



Fotos: Ademir Fontana

Figura 3. Vegetação nativa de Cerrado na área de estudo.

A região compreende o Chapadão do Alto Rio Grande, na bacia hidrográfica do Rio Grande e Planalto Ocidental da margem esquerda do Rio São Francisco. A topografia é formada pela plataforma aplainada, com altitudes entre 700 e 900 m, e o relevo predominante varia de plano a suave ondulado. A vegetação original (Figura 3) é de Cerrado subcaducifólio (Cerrado *stricto sensu*) e a formação geológica predominante é composta por arenito da Formação Urucuia (EMBRAPA, 1976). O clima é composto por duas estações bem definidas, com a seca e fria (maio a setembro) e a chuvosa e quente (outubro a abril). As temperaturas médias, mínimas e máximas, variam entre 20 e 26 °C. A precipitação pluviométrica anual está entre 1.400 e 1.600 mm, concentrada entre os meses de novembro a março (BATISTELLA et al., 2002).

Métodos

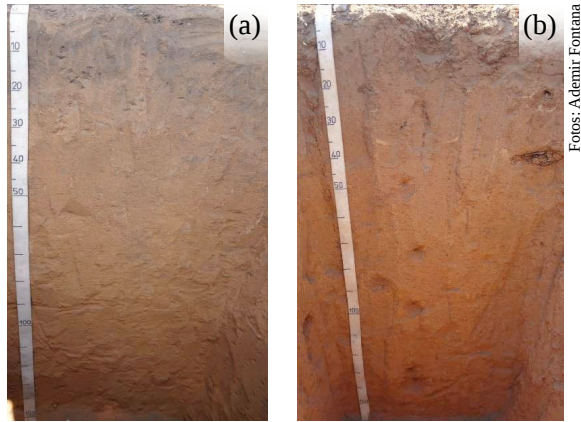
O estudo iniciou com a avaliação de 75 pontos para descrição e coleta de amostras de solo em minitrincheiras de 90 cm de profundidade. Ao final, foram selecionados pontos com as diferentes classes de solo para a abertura de perfis (200 cm de profundidade).

Em cada perfil, os solos foram descritos pelas características morfológicas, tendo sido coletadas amostras nos horizontes segundo as recomendações do Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2005). As amostras de solo coletadas em minitrincheiras e perfis completos foram analisadas em laboratório pelos atributos físicos e químicos segundo os métodos descritos no Manual de métodos de análise de solo (DONAGEMMA et al., 2011).

Os solos avaliados foram classificados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos tendo como base a descrição morfológica e os atributos físicos e químicos (SANTOS et al., 2013).

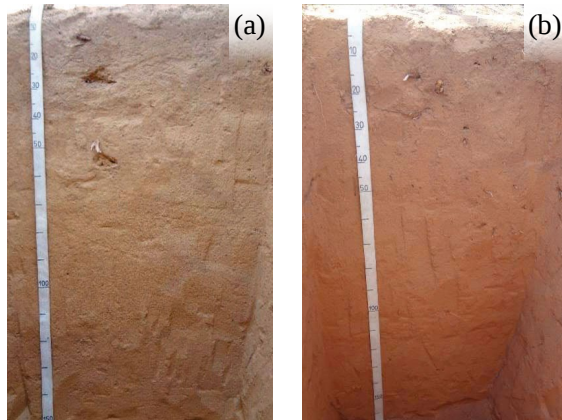
Solos da área de estudo – ocorrência e caracterização

A partir do levantamento dos solos da área de estudo em uma paisagem representativa da região Oeste do Estado da Bahia, observa-se a ocorrência em predomínio absoluto da classe dos Latossolos (Figuras 4ab e 5ab), seguidos pelos Neossolos Quartzarênicos (Figura 6ab). Em pontos mais baixos da paisagem e sem padrão de distribuição, são observados afloramentos rochosos de arenito e da canga laterítica (Figura 7).



Fotos: Ademir Fontana

Figura 4. Perfis de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico de textura média (a) e de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico de textura argilosa (b) sob cultivo de algodão na área de estudo.



Fotos: Ademir Fontana

Figura 5. Perfis de Latossolo Amarelo Distrófico psamítico (a) e de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico psamítico (b) sob Cerrado na área de estudo.

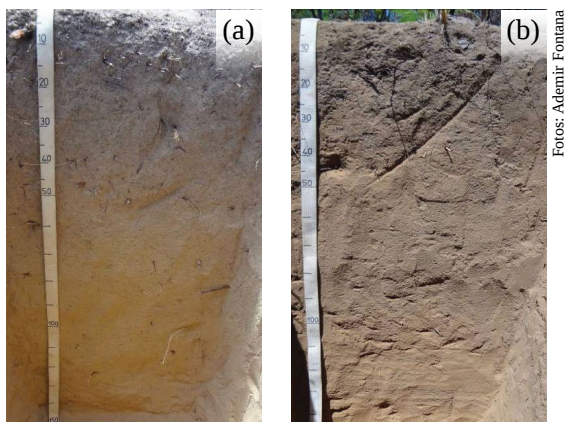


Figura 6. Perfis de Neossolo Quartzarênico Órtico típico (a) e Neossolo Quartzarênico Órtico latossólico (b) sob Cerrado na área de estudo.



Figura 7. Afloramento de arenito e canga laterítica sob Cerrado na área de estudo.

Em uma avaliação geral do cenário quanto às características e aos atributos dos solos, destacam-se as variações significativas entre as classes, principalmente a cor, os atributos químicos (pH, bases trocáveis e fósforo disponível) e físicos (densidade do solo e composição granulométrica).

Em uma avaliação mais detalhada dos solos, na classe dos Latossolos ocorrem os Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos típicos de textura média (LVAd textura média) e os Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos típicos de textura argilosa (LVAd textura argilosa), como visto na Figura 4ab. De maneira geral, no Cerrado, são observados os Latossolos Amarelos ou Vermelho-Amarelos Distróficos psamíticos (LAd ou LVAd psamíticos), como se vê na Figura 5ab.

Como definição, os Latossolos compreendem solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico precedido de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm se o horizonte A apresenta mais de 150 cm de espessura. Apresentam atuação expressiva do processo de ferralitização e são praticamente destituídos de minerais primários em sua composição, com inexpressiva mobilização ou migração de argila, Capacidade de Troca Catiônica (CTC) inferior a $17,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila, baixa saturação por bases (Valor V), e variam de fortemente a bem drenados (SANTOS et al., 2013).

Pelas avaliações realizadas na área de estudo, os LVAd textura média (Figura 4a) representam a maior ocorrência entre todas as classes, ocupando cerca de 70% do total da área de estudo. Esses solos ocorrem desde o topo até o terço inferior da paisagem. Os LVAd textura argilosa ocupam em torno de 8% da área de estudo e ocorrem, principalmente, no topo, assim como grande parte dos LVAd textura média (Figura 4b).

Já os LAd ou LVAd psamíticos (Figura 5ab) ocorrem entremeados aos Neossolos Quartzarênicos e na parte mais baixa da paisagem e ainda nos anfiteatros, apresentando semelhanças quanto ao desenvolvimento morfogenético dos Neossolos Quartzarênicos, com pouca diferenciação em campo e dificuldade de separação em mapas. Para os LAd e LVAd psamíticos, ressalta-se a observação não mapeada e de ocorrência regional em relevo levemente abaciado e grande extensão em posição de topo, como os demais Latossolos.

Dos perfis de solo avaliados sob uso agrícola, destacam-se: a ausência dos horizontes transicionais AB e BA (Figura 8ab); a variação de espessura; a transição, de maneira geral, abrupta dos horizontes superficiais; e a estrutura em grãos simples no horizonte superficial. Uma das possíveis causas é a mecanização para o preparo do solo, com uso de subsolador, grade aradora e niveladora, o que leva à homogeneização da camada superficial do solo.

Além dessas características na camada superficial, observa-se um avanço do processo de compactação do solo no topo do horizonte B (Apx e BAx e/ou Bwx), onde se tem uma camada endurecida, de estrutura maciça (coerente) e consistência muito dura com o solo úmido e muito friável quando seco, que fora denominada pela adição do sufixo “x” (Figura 9). O Manual de Descrição

e Coleta de Solos no Campo (SANTOS et al., 2005) não prevê o uso do sufixo “x” para os horizontes A e transicionais AB; contudo, optou-se por registrar nesses horizontes a ocorrência de grande variação da consistência como forma de qualificar também esses horizontes.

Em relação aos solos sob cultivo, aqueles sob Cerrado apresentam maior espessura dos horizontes superficiais (que podem atingir em torno de 50 cm de profundidade), ausência de camada endurecida com estrutura maciça e de transição clara a gradual entre os horizontes (Figura 8c).

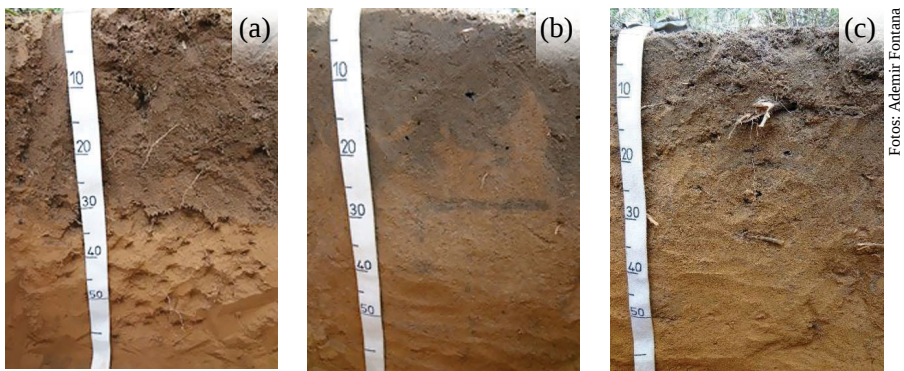


Figura 8. Aspecto do solo sob cultivo na área de estudo.



Figura 9. Aspecto no perfil de solo com a camada endurecida preparado para a semeadura de algodão na área de estudo.

Pela composição granulométrica, nos LVAd textura média os teores de argila tendem a aumentar em profundidade, atingindo o limite superior para o agrupamento de textura média em torno de 350 g kg⁻¹ (Figura 10). Contudo, em alguns pontos abaciados nos anfiteatros, esses solos apresentam textura arenosa na superfície. Já os LVAd textura argilosa apresentam textura média na superfície e argilosa na subsuperfície (Figura 10). Essa última observação sobre textura argilosa confronta a definição de que os solos da região Oeste da Bahia apresentam, predominantemente, as classes arenosa e média leve.

Os LAd e LVAd psamíticos destacam-se na Figura 10 por apresentarem teores de argila inferiores aos demais Latossolos, contendo valores inferiores a 200 g kg⁻¹ na maior parte do perfil de solo e configurando um grupo diferenciado dentro dos Latossolos.

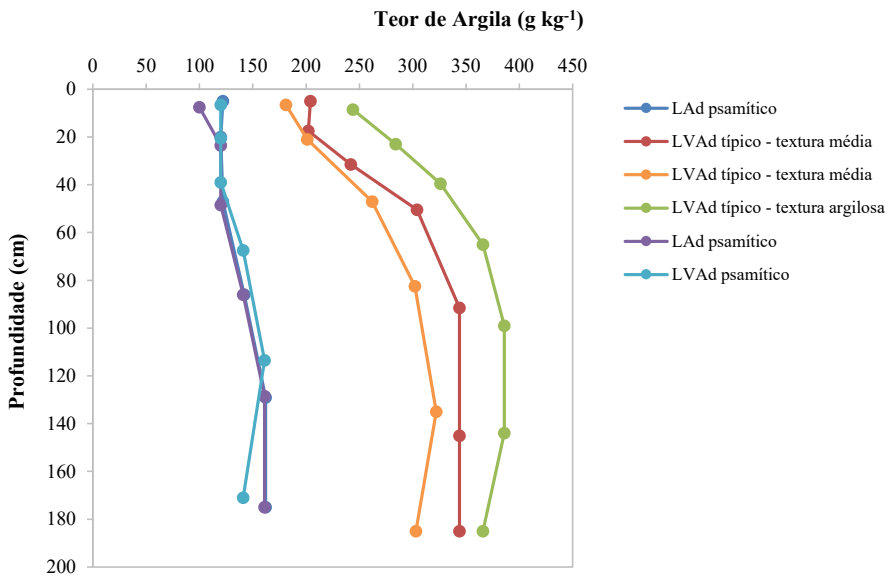


Figura 10. Teores de argila nos perfis de Latossolos da área de estudo.

Em uma avaliação do fracionamento da fração areia, os Latossolos de textura média apresentam o predomínio da Areia Grossa (AG) em detrimento da Areia Fina (AF), como destacado pela relação AG/AF, que pode chegar a 2,0, e, ainda, a pouca variação no perfil de solo (Figura 11). No LAd psamítico e no LVAd textura argilosa, observa-se o equilíbrio entre a AG e a AF em todo o

perfil e valores em torno de 1,0. Contudo, o LAd psamítico apresenta um padrão muito diferenciado em relação aos demais solos, tendo o predomínio absoluto da AG e valores da relação AG/AF em torno de 16,0 na parte superficial do perfil, decrescendo até 5,5 em profundidade.

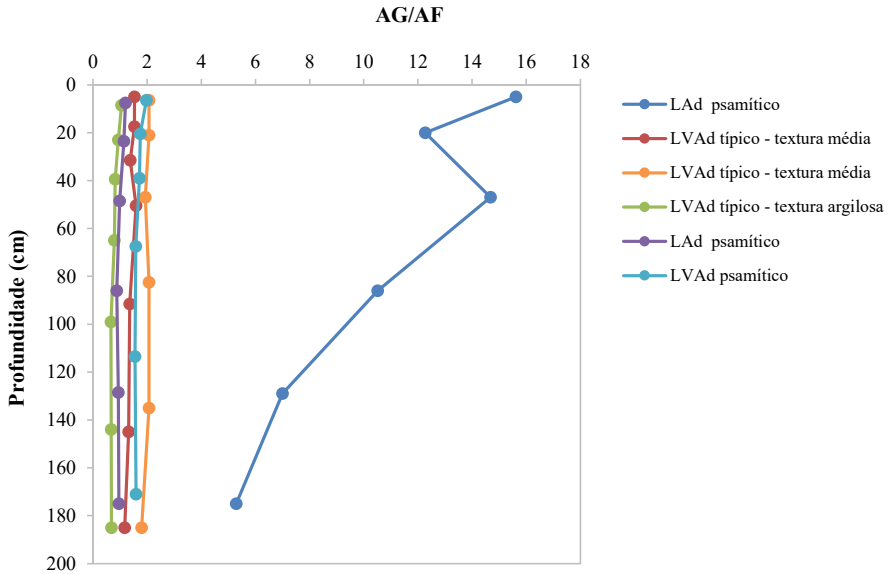


Figura 11. Relação entre Areia Grossa e Areia Fina (AG/AF) nos perfis de Latossolos da área de estudo.

Quanto aos atributos químicos, os LVAd textura média e os de textura argilosa apresentam teores de carbono orgânico (C org) em torno de 10,0 g kg⁻¹ em superfície, que decrescem em profundidade até em torno de 2,0 g kg⁻¹. Para os LAd e LVAd psamíticos, os teores de C org são inferiores em todo o perfil, saindo de 4,0 g kg⁻¹ na superfície até 1,0 g kg⁻¹ em subsuperfície.

Para os solos sob uso agrícola, observa-se a influência da calagem e dos fertilizantes, principalmente nas camadas mais superficiais, com modificações e aumento dos teores de Ca²⁺ + Mg²⁺ e P disponíveis, assim como dos valores de pH. Os teores de Ca²⁺ + Mg²⁺ estão entre 1,1 e 3,2 cmol_c kg⁻¹ e apresentam grande variação (entre 12 e 99 mg kg⁻¹) quanto ao P disponível. Nos solos sob Cerrado, e em profundidade nos solos sob cultivo, os teores de Ca²⁺ + Mg²⁺ estão entre 0,1 e 0,8 cmol_c kg⁻¹ e inferiores a 1 mg kg⁻¹ para o P disponível.

Os valores de Densidade do Solo (Ds) nos perfis dos Latossolos, independentemente do uso, têm um aumento entre 20 e 40 cm de profundidade, chegando a $1,58 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 12), os quais diminuem gradativamente em subsuperfície, com valores inferiores àqueles da superfície na maioria dos solos, sendo esse aumento notadamente de maior expressão no LVAd típico sob uso agrícola, enquanto o LAd psamítico sob Cerrado se destaca com maiores valores da Ds em superfície, e que diminuem em subsuperfície.

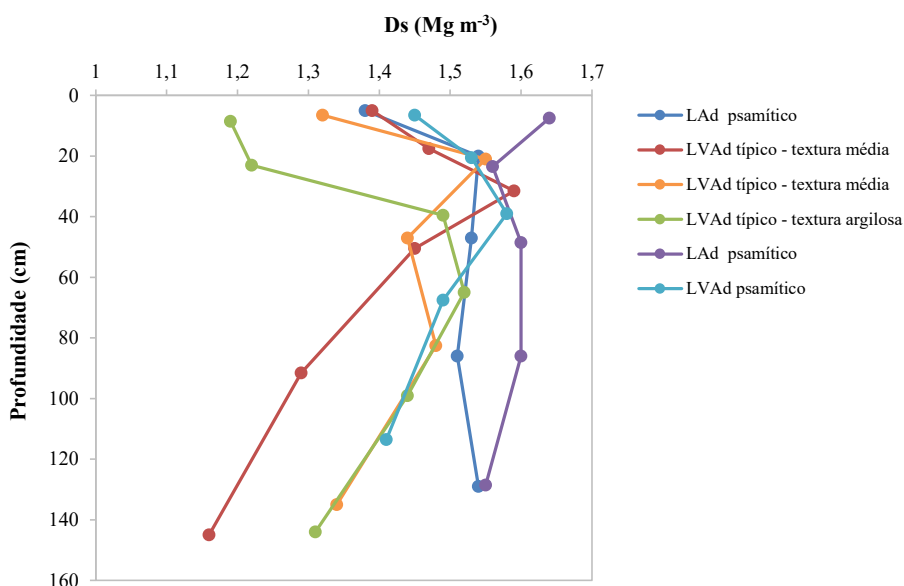


Figura 12. Valores de Densidade do Solo (Ds) nos perfis de Latossolos da área de estudo.

Diante da classe dos Neossolos Quartzarênicos, destaca-se a ocorrência dos Neossolos Quartzarênicos órticos típicos ou latossólicos (RQo típicos ou latossólicos), como mostra a Figura 6ab. Esses solos ocorrem nas partes mais baixas da paisagem, tendo a eles associados os LAd e LVAd psamíticos, conforme já apresentados na discussão sobre os Latossolos.

Para compor a classe dos Neossolos Quartzarênicos, os solos são constituídos por material mineral e que pode conter material orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando horizonte B diagnóstico. São

solos sem contato lítico dentro de 50 cm de profundidade, com seqüência de horizontes A-C, de textura areia ou areia franca em todos os horizontes até 150 cm de profundidade a partir da superfície ou até um contato lítico. São essencialmente quartzosos e praticamente não apresentam minerais primários alteráveis (SANTOS et al., 2013).

Quanto aos Neossolos Quartzarênicos da área de estudo, as diferenças se referem à granulometria e ao fracionamento da fração areia. Os RQo típicos apresentam teores de argila entre 80 e 120 g kg⁻¹ e aumentando em profundidade, enquanto os RQo latossólicos têm pelo menos um horizonte com textura franco-arenosa ou mais fina abaixo de 150 cm da superfície (SANTOS et al., 2013), chegando o teor de argila, neste caso, a 160 g kg⁻¹ (Figura 13).

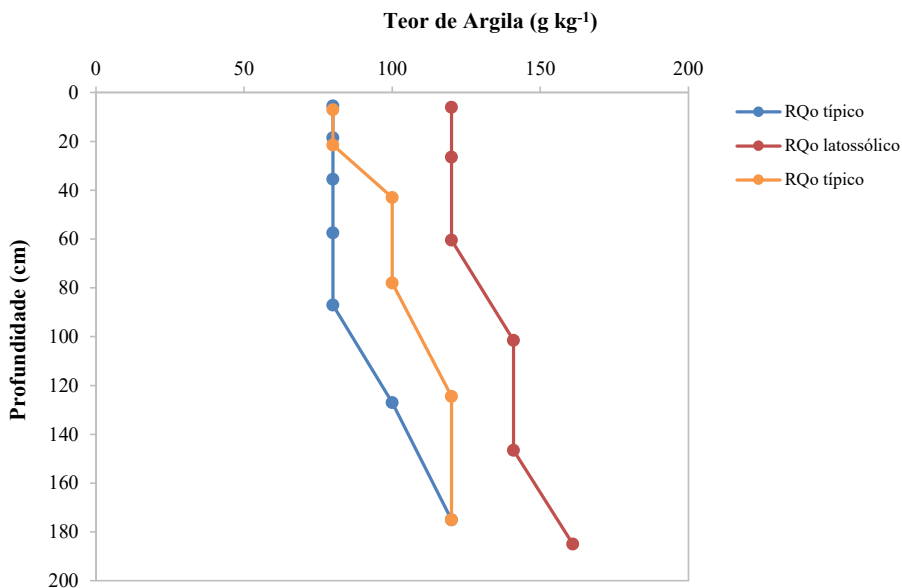


Figura 13. Teores de argila nos perfis de Neossolos Quartzarênicos da área de estudo.

Na fração areia, observa-se o predomínio da AG e os valores da relação AG/AF entre 2 e 6 (Figura 14), com destaque para o RQo latossólico, que tem valores entre 8 e 13 nas profundidades de 40 a 160 cm.

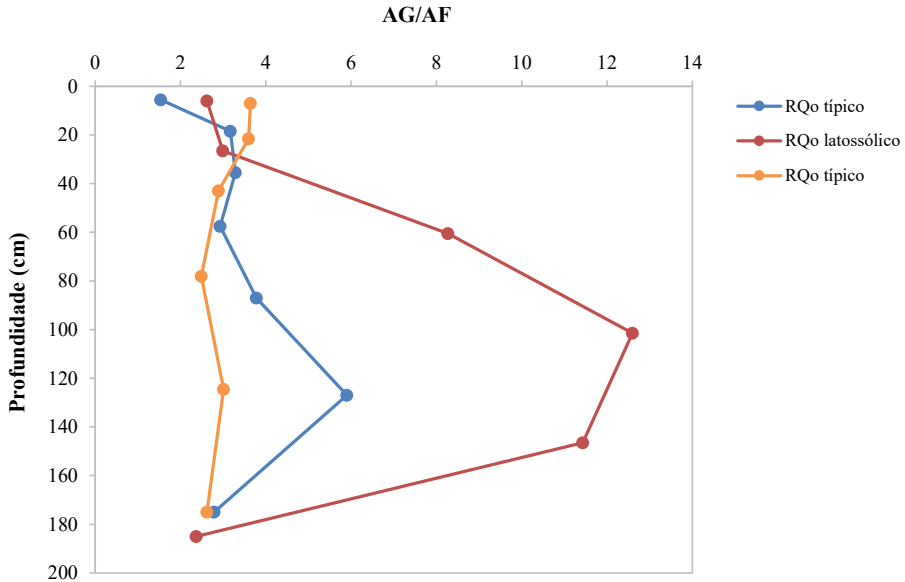


Figura 14. Relação entre Areia Grossa e Areia Fina (AG/AF) nos perfis de Neossolos Quartzarênicos da área de estudo.

No que se refere aos atributos químicos, os Neossolos Quartzarênicos, assim como os Latossolos, quando sob Cerrado, apresentam, tanto na camada superficial quanto na camada subsuperficial, baixos teores de C org, Ca^{2+} , Mg^{2+} e P disponíveis. As variações dos atributos químicos denotam a baixa capacidade do material de origem em fornecer nutrientes, associada à vegetação de Cerrado *stricto sensu*, com baixa capacidade de fornecimento de material orgânico.

Para os valores da Ds, esses solos apresentam padrão semelhante aos Latossolos e valores chegando a $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ na parte intermediária do perfil (20 a 60 cm de profundidade). Um perfil de RQo típico apresenta, no horizonte superficial, valor em torno de $1,11 \text{ Mg m}^{-3}$, e diferente dos demais solos (Figura 15).

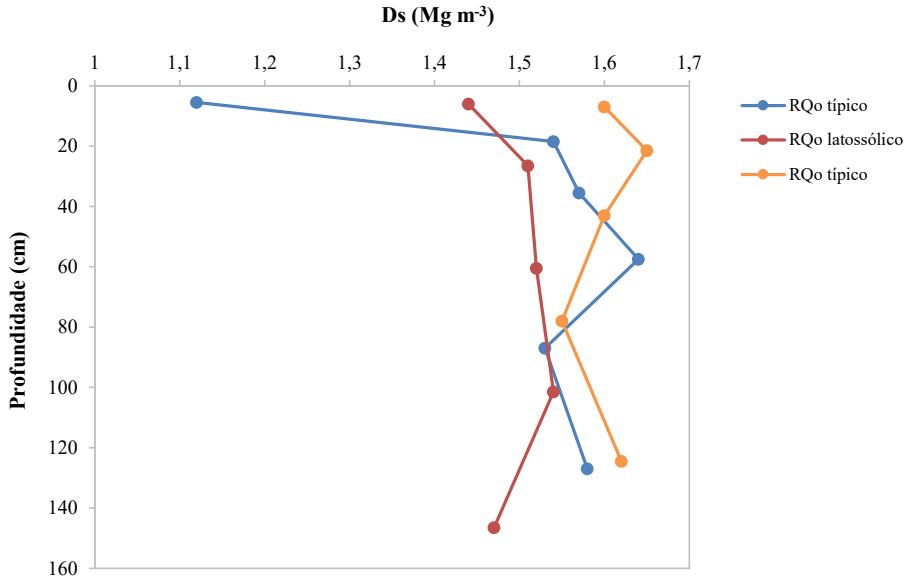


Figura 15. Densidade do Solo (Ds) nos perfis de Neossolos Quartzarênicos da área de estudo.

Considerações finais

O aumento do detalhe do levantamento de solos destaca a heterogeneidade dos solos desenvolvidos na região do Oeste do Estado da Bahia.

A classe predominante é a dos Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos de textura média; contudo, ocorrem os Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos de textura argilosa.

Os Neossolos Quartzarênicos típicos ou latossólicos ocorrem, predominantemente, em local de convergência do fluxo hídrico e em áreas abaciadas e nos anfiteatros, onde ocorrem, concomitantemente, os Latossolos Vermelho-Amarelos e Amarelos psamíticos.

Os solos sob uso agrícola apresentam camadas com consistência seca, que varia de muito dura a extremamente dura, maiores valores da densidade em relação aos demais horizontes e estrutura maciça que configura um torrão quando revolvido.

A composição química da superfície dos solos sob cultivo é influenciada pela aplicação de corretivos e fertilizantes, indicada pelos altos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e P disponíveis, em comparação com os solos sob Cerrado.

Referências

ANUÁRIO DA REGIÃO OESTE DA BAHIA. Santa Cruz do Sul, RS: Gazeta Santa Cruz, 2014. Disponível em: <<http://aiba.org.br/anuario>>. Acesso em: 28 jul. 2015.

BATISTELLA, M.; GUIMARÃES, M.; MIRANDA, E. E.; VIEIRA, H. R.; VALLADARES, G. S.; MANGABEIRA, J. A. C.; ASSIS, M. C. **Monitoramento da expansão agropecuária na região Oeste da Bahia**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2002. 39 p. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 20).

COELHO, M. R.; FIDALGO, E. C. C.; ARAÚJO, F. de O.; SANTOS, H. G dos; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; PÉREZ, D. V.; MOREIRA, F. M. S. **Levantamento pedológico de uma área-piloto relacionada ao Projeto BiosBrasil (Conservation and Sustainable Management of Below-Ground Biodiversity: Phase I), Município de Benjamin Constant (AM)**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. 94 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 68).

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos da margem esquerda do Rio São Francisco, Estado da Bahia**. Recife, 1976. 404 p. (Embrapa – SNLCS. Boletim Técnico, 38).

PALMIERI, F.; LARACH, J. O. I. Pedologia e geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (Org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 59-122.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. rev. e ampl. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. 92 p.

Capítulo 4

Mapeamento convencional e digital de classes de solos desenvolvidos de arenitos em Microbacia Hidrográfica em Botucatu, SP

Ricardo Marques Coelho; Laura Milani da Silva Dias;
José Ronaldo de Macedo; Luís de França da Silva Neto;
Gustavo de Mattos Vasques; Stanley Robson de Medeiros Oliveira

Introdução

Os levantamentos pedológicos fundamentam-se no paradigma do modelo solo-paisagem (HUDSON, 1992), possível de estabelecer devido à associação entre os fatores formadores do solo, descritos por Dokuchaev (JENNY, 1941), e os fatores formadores da paisagem. Nos mapeamentos pedológicos convencionais, o paradigma permite que o conhecimento do volume de solo abaixo de uma pequena porção da superfície, que pode ser adquirido pela caracterização de um ou mais perfis de solo, possibilite delinear corpos de solos muito mais extensos. Esses são os polígonos das unidades de mapeamento, da ordem de 1.000 a 1.000.000 vezes maior que a área observada, a depender do nível de detalhe cartográfico e taxonômico objeto do trabalho (IBGE, 2007).

No mapeamento pedológico convencional, o modelo solo-paisagem depende do conhecimento tácito do pedólogo, adquirido pela experiência, não relatado ou descrito explicitamente em publicações ou outros documentos (BUI, 2004). A interpretação desse modelo, que tem, em geral, muitas peculiaridades locais e regionais, é transferida pelo pedólogo para cartas

topográficas, fotos aéreas ou outras imagens de sensoriamento remoto, que delinea os polígonos que representam as unidades de mapeamento de solo. Essa abordagem, tradicionalmente utilizada nos levantamentos pedológicos, além de depender de conhecimento tácito e, portanto, subjetivo, estabelece limites abruptos entre unidades de mapeamento pedológico e mostra homogeneidade dentro destas, pressupostos nem sempre verdadeiros (MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003).

Os mapeamentos digitais de solo são definidos como

a criação de sistemas de informação espacial de solos por meio de modelos numéricos, visando inferir as variações espaciais de classes e propriedades do solo, a partir de observações, conhecimento prévio e dados de variáveis ambientais correlacionadas (LAGACHERIE; MCBRATNEY, 2007).

Entre as várias modalidades de mapeamento digital de solos, aquelas preocupadas com o mapeamento digital de classes de solos (ou Mapeamento Pedológico Digital - MPD) também se fundamentam no paradigma do modelo solo-paisagem. Nesses casos, em vez de conhecimento tácito, o conhecimento pode ser estruturado por meio de análise lógica e quantitativa por “aprendizagem de máquina” de atributos da paisagem com poder de prever classes de solo (BUI, 2004; BURROUGH, 1993).

Como modalidade de mapeamento ainda com carência de definir metodologias associadas a níveis de precisão e exatidão dos mapas e a equivalência de seus resultados aos dos mapeamentos por métodos convencionais, os Mapeamentos Pedológicos Digitais (MPD) necessitam ser avaliados em diferentes condições.

Solos frágeis são solos com elevado potencial de degradação. Sob o ponto de vista agrícola, solos com muito elevados teores de areia são considerados frágeis (ALBUQUERQUE et al., 2011). Sua fragilidade decorre, principalmente, de baixa capacidade de formar agregados estáveis, baixa capacidade de retenção de água, baixa estabilidade da matéria orgânica do solo e baixa capacidade de troca de cátions (CTC), fatores que podem ser agravados pelo manejo agrícola inadequado. Caracterizando atributos e horizontes diagnósticos do solo e, assim, classificando os solos, os levantamentos

pedológicos podem identificar solos frágeis e conter informações para interpretação do potencial de modificação destes pelo manejo.

Vários fatores contribuem para a melhor caracterização da distribuição dos solos com fragilidade por elevados teores de areia. A ocorrência desses solos está relacionada a materiais de origem com essas características, como os quartzarenitos, de modo que a existência de mapas geológicos que mostrem a distribuição desses materiais de origem contribui para conhecer sua espacialização. Contudo, mesmo com algum conhecimento da distribuição espacial dos materiais de origem, variações faciológicas nesses materiais, baixa disponibilidade de mapas geológicos em escalas grandes e processos pedogenéticos *in situ*, que aumentam a complexidade da distribuição dos solos, tornam necessária a execução de levantamentos pedológicos para detalhar, com maior precisão e exatidão, a distribuição dos solos com fragilidade textural.

Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram: (i) realizar o mapeamento pedológico convencional e digital de uma microbacia hidrográfica; e (ii) conhecer o potencial de metodologia de mapeamento pedológico digital de solos com fragilidade textural.

Área de estudo

A bacia do Córrego Águas da Lúcia localiza-se em Botucatu, SP, tem 1894 ha e é delimitada pelas coordenadas UTM 771.253-776.535 m E e 7.473.291-7.479.874 m N, zona 22 S. O clima da região é do tipo Cwa na classificação de Köppen, tropical de altitude com chuvas no verão e seco no inverno. A temperatura média nos meses mais quentes é superior a 22 °C e a precipitação média anual é 1358 mm (CEPAGRI, 2015). A região está situada na província geomorfológica Depressão Periférica Paulista, em relevo de colinas médias, com interflúvios de 1 a 4 km², topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos, drenagem de média a baixa densidade, com padrão subretangular e planícies aluviais interiores restritas (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981b). A geologia local é constituída por

arenitos de origem flúvio-deltaica, finos a médios, com matriz siltico-argilosa e estratificação cruzada ou plano-paralela da formação Piramboia, Grupo São Bento (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981a).

No mapa pedológico do Estado de São Paulo (OLIVEIRA et al., 1999), em escala 1:500.000, foram identificados, na área da bacia, Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos de textura média, Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos de textura arenosa/média e média e Neossolos Quartzarênicos Órticos. No uso da terra da bacia predominam cana-de-açúcar e floresta plantada de eucalipto nos topos e médias vertentes, e mata nativa no entorno das linhas de drenagem, com alguns fragmentos desta também em vertentes a montante; pequenas áreas com citros e pastagem ainda ocorrem.

Metodologia

A partir das curvas de nível da área da microbacia, equidistantes em 5 metros, foi elaborado um Modelo Digital de Elevação (MDE), com resolução espacial de 30 metros, no programa ArcGIS 10 (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2010). A resolução de 30 m, relativamente baixa, foi adotada para aumentar a razão células classificadas/células não classificadas em relação à variável classe de solo no mapeamento digital. Desse MDE foram derivadas as variáveis geomorfométricas altitude, declividade, orientação das vertentes, curvatura em planta, curvatura em perfil, distância diagonal e índice topográfico de umidade (WILSON; GALLANT, 2000), todas no formato *raster*. A geologia, tida como homogênea para toda a área de estudo, foi desconsiderada como variável preditiva das classes de solo.

As variáveis geomorfométricas foram organizadas em uma planilha de dados que, na resolução adotada, totalizaram 20.772 linhas, cada linha representando um *pixel*. A planilha foi inserida no programa de amostragem aleatório-estratificada por hipercubo latino – cLHS (MINASNY; MCBRATNEY, 2006) como condicionante à seleção de 75 pontos para amostragem de solo no campo, usados no MPD para treinamento dos modelos. Além destes, foram aleatorizados, de forma independente, outros 25 pontos

amostrais, usados no MPD para validação dos mapas. Todos os 100 pontos foram utilizados no mapeamento pedológico convencional da microbacia.

Em cada ponto amostral foi aberta uma minitrincheira de 0,7 x 0,7 x 0,7 m, onde o solo foi caracterizado morfológicamente (SANTOS et al., 2013b) e amostras de 0-20 cm e de 60-80 cm foram coletadas para caracterização granulométrica e química em laboratório (CLAESSEN, 1997). Em cada ponto amostral, o solo foi sondado com trado até 2 m de profundidade, ou até material coeso, para caracterização morfológica em maior profundidade. Essa metodologia de campo foi aplicada a 63 dos 75 pontos aleatorizados no primeiro conjunto. Foram selecionados 12 pontos desse conjunto, representativos dos principais solos da bacia, para caracterização morfológica completa em trincheiras de 2 m de profundidade e coleta de amostras para análises em laboratório. Os solos da bacia foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) no nível de família (5º nível categórico), incluindo os dados de grupamento textural, tipo de horizonte A, saturação por bases e classes de reação do solo (SANTOS et al., 2013a).

Para o mapeamento convencional de solos, as observações de solo classificado foram plotadas em fotografias aéreas ortorretificadas de escala 1:15.000, onde foram traçados os delineamentos das unidades de mapeamento pedológico.

Para o mapeamento pedológico digital, os 75 locais de amostragem aleatorizados no primeiro conjunto, foram utilizados para o treinamento dos algoritmos de mineração de dados para a predição de classes de solo. Os demais 25 pontos aleatorizados de forma independente no cLHS foram utilizados para validar o mapa pedológico obtido pela metodologia digital.

Das 75 observações disponíveis inicialmente para treinamento dos modelos preditivos, foram utilizadas apenas 62. As classes de solo no 5º nível categórico com apenas uma observação foram consideradas inclusões de solo e excluídas do conjunto de treinamento. Exceção se deu com os Gleissolos, cuja observação foi mantida por representar um ambiente distinto e representativo na paisagem de estudo, a planície aluvial. Assim, dos 20.772 *pixels*, 62 possuíam classe de solo identificada e 20.710 não possuíam solo classificado, proporção

pequena (0,3%) de exemplos classificados para o total da base de dados de relevo (CATEN et al., 2013).

Expandiu-se o conjunto de treino pela combinação das variáveis preditivas de relevo, como a seguir: para cada exemplo Y de solo não classificado, com exatamente a mesma combinação de variáveis preditivas (relevo) de um exemplo X com solo classificado, identificou-se Y com a mesma classe de solo de X. Dessa maneira, o conjunto de treino de 62 exemplos foi expandido para 2.455 (12% da base de dados).

O treinamento dos modelos de mapeamento foi realizado no programa *Waikato Environment for Knowledge Analysis* – WEKA (WITTEN; FRANK, 2005). Foram testados três algoritmos classificadores, baseados no aprendizado de máquina, sendo: (i) J48, uma implementação para a técnica de árvores de decisão (HALL et al., 2009); (ii) *Multi-Layer Perceptron* (MLP), que emprega redes neurais (KANELLOPOULUS; WILKINSON, 1997); e (iii) *Random Forest*, uma extensão da técnica de árvores de decisão que combina a predição de diversas árvores (BREIMAN, 2001). Para cada algoritmo foram aplicados procedimentos de pré-processamento com técnicas de discretização, balanceamento de classes e seleção de variáveis/atributos.

A exatidão dos mapas preditos foi avaliada pela acurácia global e pelo índice kappa (LANDIS; KOCH, 1977). Todas as determinações de exatidão foram calculadas a partir de matrizes de erro, nas quais os 25 pontos independentes de validação classificados em campo (verdade de campo) foram confrontados com a classe predita pelos algoritmos.

Mapa pedológico convencional

Na microbacia mapeada predominam solos com baixo teor de argila, que se enquadram nos grupamentos de textura arenosa e média, de baixa fertilidade natural, classificados como distróficos e com pequeno acúmulo de carbono em superfície (A fraco). Pela observação do mapa pedológico (Figura 1) e de sua legenda (Tabela 1), infere-se relativa homogeneidade nos solos da bacia do Córrego Águas da Lúcia, representada pelo predomínio de solos arenosos ou de textura média arenosa (teor de argila < 20%).

Cerca de 70% da área mapeada é composta por unidades de mapeamento em que predominam Neossolos Quartzarênicos Órticos e 23% em que predominam Argissolos (Vermelho-Amarelos, Vermelhos e Amarelos) Distróficos, de textura arenosa/média. No restante da área prevalecem Neossolos Regolíticos e Litólicos, Cambissolos e Gleissolos, predominantemente Distróficos e de textura arenosa e média arenosa (Tabela 1).

A bacia hidrográfica, assim constituída por solos com elevada fragilidade textural, apresenta evidências de degradação moderada, como voçorocamento, perda parcial de horizonte A e assoreamento de planícies fluviais, minimizada, em parte, pela manutenção da vegetação nativa nas posições mais suscetíveis de baixa e média vertente, com solos de elevado gradiente textural (Argissolos) ou rasos e pouco profundos (Neossolos e Cambissolos). Os atributos diagnósticos diferenciais para as classes de solo e unidades de mapeamento identificadas na área até nível de subgrupo (4º nível categórico) foram: grupamento textural, gradiente textural, profundidade de solo, cor de horizonte diagnóstico, espessura de horizontes A+E, e minerais primários alteráveis. No 5º nível categórico (família), foram atributos diferenciais: saturação por bases e saturação por alumínio.

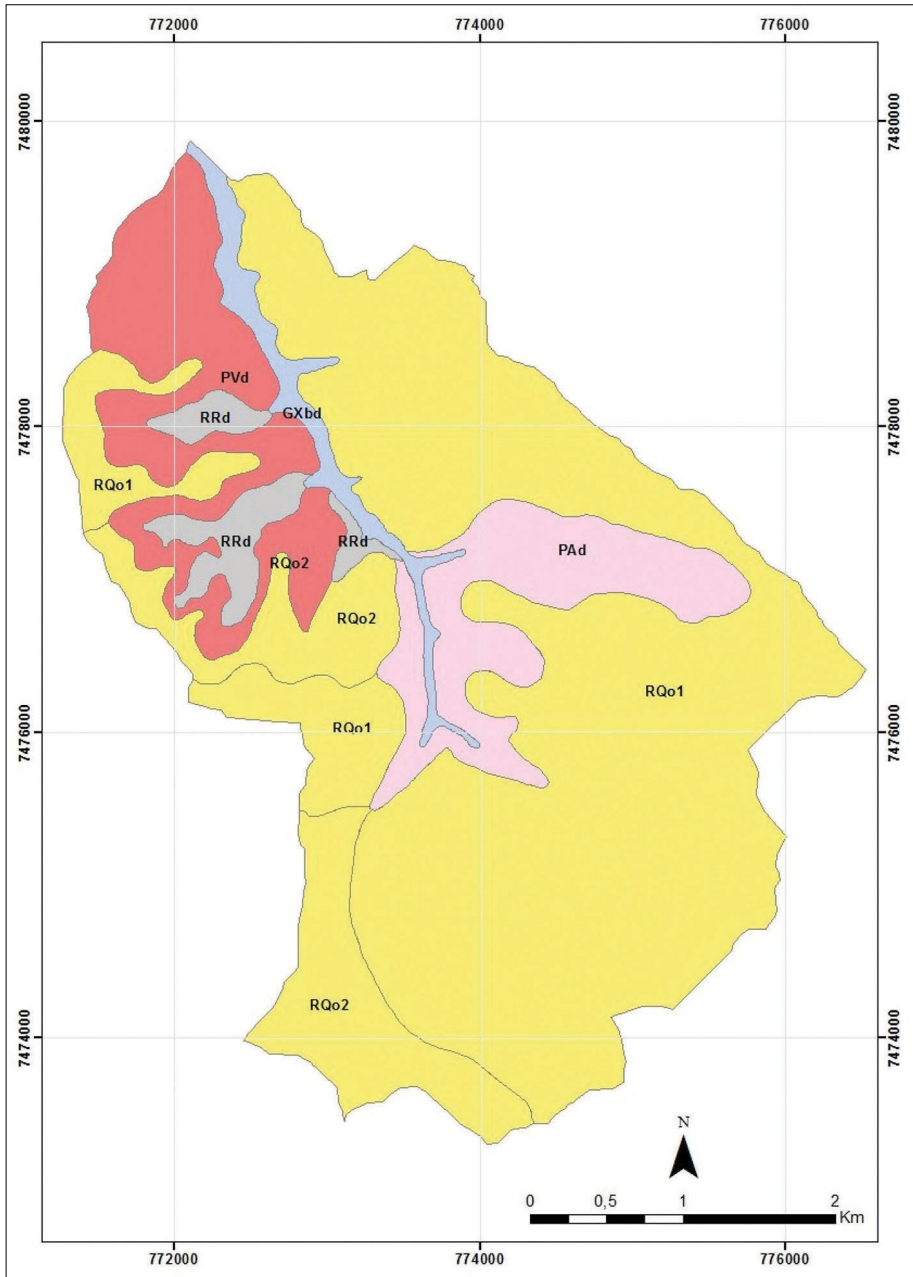


Figura 1. Mapa pedológico convencional da microbacia do Córrego Águas da Lúcia. As unidades de mapeamento estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Unidades de mapeamento pedológico convencional.

Símbolo (% área)	Legenda descritiva
RQo1 (57,8)	Complexo de NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS Órticos típicos – LATOSSOLOS VERMELHOS E VERMELHO-AMARELOS Distróficos típicos, A fraco, textura média, hiperdistróficos, não álicos e álicos, fortemente ácidos.
PVd (13,3)	Associação de ARGISSOLOS VERMELHOS e VERMELHO-AMARELOS Distróficos arênicos abrupticos e abrupticos, A fraco, textura arenosa/média, mesodistróficos e hiperdistróficos, não álicos, fortemente ácidos.
RQo2 (11,4)	Complexo de NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS Órticos típicos, textura arenosa – LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS e VERMELHOS Distróficos típicos, textura média, A fraco, mesodistróficos e mesoeutróficos, não álicos, fortemente ácidos.
PAd (9,9)	Associação de ARGISSOLOS AMARELOS e VERMELHOS Distróficos abrupticos e arênicos abrupticos, A fraco, textura arenosa/média, álicos, fortemente ácidos.
RRd (4,2)	Complexo de NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Distróficos típicos e lépticos, textura arenosa – CAMBISSOLOS HÁPLICOS Tb Distróficos lépticos, textura média – NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos típicos, textura arenosa, A moderado e fraco, mesodistróficos e hiperdistróficos, não álicos e álicos, fortemente ácidos.
GXbd (3,4)	Complexo de GLEISSOLOS HÁPLICOS e MELÂNICOS Tb Distróficos típicos, A moderado e proeminente, textura arenosa e média.

Apesar da homogeneidade dos solos, inferida pelos atributos grupamento textural e saturação por bases, observa-se variabilidade. As duas unidades de mapeamento de Neossolos Quartzarênicos (RQo1 e RQo2) ocorrem em relevo mais suavizado (plano ou suave ondulado) em associação complexa com Latossolos de textura média arenosa. Nessas unidades de mapeamento, os teores de argila do horizonte subsuperficial (C ou B) variaram de 60 g/kg a 180 g/kg. Embora haja predomínio de textura arenosa, as análises e

observações de campo dos pontos amostrais mostraram que a textura média em camadas mais profundas dos perfis está distribuída de forma aparentemente aleatória por toda a área das unidades de mapeamento de Neossolos Quartzarênicos. Assim, essas unidades foram definidas como complexos de Neossolos Quartzarênicos e Latossolos de textura média por não ter sido encontrado padrão de distribuição que permitisse separá-las em unidades de mapeamento distintas.

A variação e a amplitude encontradas na distribuição de tamanho da terra fina do solo (frações < 2 mm) podem ser esperadas em solos desenvolvidos de arenitos que, além de eventual influência da estratificação original do material geológico (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981a), têm atuação de processos pedogenéticos como argiluviação, ferrólise e elutriação (BREEMEN; BUURMAN, 2002; CASTRO, 1989), condicionados, em parte, a processos catenários relativos às feições do relevo, mas com movimentação de água facilitada pela elevada macroporosidade inerente a solos arenosos e friáveis. Os Latossolos de textura média arenosa mapeados, com teores de argila inferiores a 20%, apresentam baixa coesão e, por isso, são bastante erodíveis, têm pequena retenção de água e alta permeabilidade, o que é agravado pela presença comum de volumes arenosos no horizonte A. Os Neossolos Quartzarênicos, por serem muito arenosos, apresentam sérias limitações pela sua elevada erodibilidade e muito baixa capacidade de água disponível para as plantas, além do muito pequeno potencial de reserva de nutrientes. A suscetibilidade erosiva dos solos das unidades RQo1 e RQo2 fica atenuada nas posições de topo, com relevo mais suavizado.

Os Argissolos mapeados das unidades PVd e PAd formam manchas contínuas e distintas, homogêneas em nível de ordem, não apresentando associações com outras ordens de solo. Esses solos são típicos da média a baixa vertente, o que também inclui posições de sopé ou de relevo mais dissecado e em maiores declividades (relevo ondulado e forte ondulado), situações que favorecem formação de B textural (MONIZ; BUOL, 1982). Estas duas unidades de mapeamento se diferenciam pela cor predominante do horizonte B textural e pelo dissecamento do relevo, maior na unidade PVd. A cor e a presença ou não do caráter arênico foram responsáveis pela distinção dos dois subgrupos de Argissolos ocorrendo em associação nas duas unidades de mapeamento.

O horizonte B com acúmulo de argila pode armazenar mais água, o que representa uma reserva para as plantas em períodos secos, mais importante nos Argissolos não arênicos, em cuja a espessura do horizonte A+E arenoso é superior a 50 cm (SANTOS et al., 2013a).

As unidades de mapeamento RRd e GXbd têm sua ocorrência associada a posições bem distintas na paisagem. A unidade RRd é exclusiva do relevo forte ondulado típico da baixa vertente dos trechos de curso médio e inferior da bacia do Córrego Águas da Lúcia, posições dissecadas à jusante dos Argissolos da unidade PVd. Sua ocorrência está relacionada às áreas de maior rejuvenescimento da paisagem promovida pela erosão natural. O atributo espessura do *solum* foi usado na distinção desses solos e, de maneira geral, aumenta dos Neossolos Litólicos para os Regolíticos e destes para os Cambissolos. Essas classes de solo ocorrem em associação complexa na área mapeada, descrita como complexo de Neossolos Regolíticos, Cambissolos e Neossolos Litólicos. A pequena profundidade total e efetiva dos solos dessa unidade restringe o desenvolvimento de plantas e favorece a ocorrência de enxurradas e erosão.

Como os atributos diferenciais dos Gleissolos se relacionam à saturação do solo com água, esses solos estão distribuídos na bacia hidrográfica quase que exclusivamente no leito do curso principal do Córrego Águas da Lúcia, bastante encaixado e, portanto, com nítida distinção das demais unidades de solo adjacentes a montante, mais bem drenadas. Os padrões de distribuição dos Gleissolos Melânicos (horizonte superficial com maior acúmulo de matéria orgânica) e Háplicos (horizonte A moderado) na paisagem não foram identificados, descrevendo-se, assim, um complexo dessas duas subordens de Gleissolos. Os Gleissolos mapeados têm como limitação a baixa reserva de nutrientes para as plantas e o risco de inundação. As condições de relevo plano de agradação denotam baixa suscetibilidade erosiva e elevada disponibilidade de água.

Quimicamente, os solos de toda a área mapeada têm baixa a média saturação por bases e forte acidez. Os atributos químicos saturação por bases e saturação por alumínio em nível de família variaram em toda a área de mapeamento, mas só foram determinantes para distinção da unidade de mapeamento RQo2, de Neossolos Quartzarênicos com menor saturação por

alumínio e moderada saturação por bases – caráter diferencial mesodistrófico e mesoeutrófico (Tabela 1). No restante da área, não foi encontrado padrão de distribuição dos atributos químicos para separação de unidades de mapeamento.

Mapas pedológicos digitais

Quantidade e representatividade das instâncias de treinamento (observações de solo) dos modelos empíricos de mapeamento digital são essenciais para a sua confiabilidade (TESKE et al., 2015). Como neste trabalho o treinamento dos modelos foi feito com observações de solo na própria área de estudo, inicialmente havia poucas instâncias para treinamento, tendo sido necessário expandir o conjunto de treinamento de 62 para 2455, com base na similaridade de variáveis do relevo entre pontos observados e não observados no campo, conforme descrito na metodologia. Após essa etapa, ainda se verificou considerável desproporção do número de observações por classe de solo no conjunto de treino expandido (Tabela 2).

Para aumentar a proporção de observações de treinamento nas classes minoritárias (ocorrência menos frequente na microbacia), foram testados três níveis de balanceamento de classes (0; 0,5; e 1). Com o nível de balanceamento 0,5 (distribuição dos dados com subamostragem das classes com maior número de observações), obteve-se maior acurácia de modelos nos três algoritmos, sendo este usado para a geração dos mapas. Também foram avaliadas as sete variáveis do relevo extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE): altitude, declividade, orientação das vertentes, curvatura em planta, curvatura em perfil, distância diagonal e índice topográfico de umidade. Como o uso de todas as sete variáveis produziu o modelo com maior acurácia nos três classificadores, as sete foram utilizadas para os três mapas.

A classificação dos solos no 5º nível (família), como utilizada para o mapeamento convencional, gerou grande número de classes dos solos do conjunto de treinamento com pequeno número de observações (uma a três observações). Como isso diminuiria a acurácia dos modelos (CATEN et al., 2013) e promoveria grande fragmentação de unidades de mapeamento, dificultando sua leitura, optou-se por utilizar o nível de subgrupo de solo (4º nível) mais agrupamento textural para mapeamento digital. Os mapas pedológicos digitais da microbacia apresentaram um máximo de 12 classes de solo em nível

de subgrupo mais grupamento textural, identificadas nas 62 observações de campo usadas para treinamento dos modelos de mapeamento. Essas classes de solo deram origem às unidades de mapeamento do mapa digital. Esse número de unidades de mapeamento é superior às quatro unidades de mapeamento no mapa convencional (Tabela 1). O mapa convencional trabalha com mais observações, mas apresenta polígonos individualizados que englobam solos dissimilares (componentes secundários na legenda ou inclusões das unidades de mapeamento) que não são individualizados nos mapas. Nos mapas digitais, as ocorrências previstas de solos dissimilares são representadas por *pixels*, cuja informação é mostrada graficamente e pode ser recuperada nas bases de dados.

Tabela 2. Conjunto de treinamento para os algoritmos após expansão da base de dados.

Símbolo	Classe de solo	Observações de solo	%
GXbdt aren	Gleissolo Háplico Tb Distrófico típico, arenosa	2	0,1
LVAdt med	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, média	97	4,0
LVdt med	Latossolo Vermelho Distrófico típico, média	449	18,3
PAadabrup aren/med	Argissolo Amarelo Distrófico abrupto, arenosa/média	9	0,4
PVAdabrup aren/med	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico abrupto, arenosa/média	17	0,7
PVAdarenabrup aren/med	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico abrupto, arenosa/média	8	0,3
PVdabrup aren/med	Argissolo Vermelho Distrófico abrupto, arenosa/ média	73	3,0
PVdarenabrup aren/med	Argissolo Vermelho Distrófico arênico abrupto, arenosa/ média	13	0,5
RLdt, aren	Neossolo Litólico Distrófico típico, arenosa	9	0,4
RQot	Neossolo Quartzarênico Órtico típico	1757	71,6
RRdlep aren	Neossolo Regolítico Distrófico léptico, arenosa	6	0,2
RRret aren	Neossolo Regolítico Eutrófico típico, arenosa	15	0,6
Total	12	2455	100

A locação em campo das observações dos conjuntos de treinamento e de validação foi definida pelo cLHS em duas aleatorizações independentes. Assim, quatro classes de solo (PA_{dt} aren/med, PVA_{dt} aren/med, PVEL_{dt} aren/med e RQ_{ht}), identificadas entre os 25 pontos de validação, não estavam no conjunto de treinamento e, portanto, não poderiam ter sido preditas. Mesmo assim, o desempenho dos algoritmos e a exatidão dos mapas foram moderados. Os mapas gerados a partir dos algoritmos J48 (Figura 2a) e *Random Forest* (Figura 2b) foram capazes de prever a totalidade de classes do conjunto de treinamento. O mapa produzido com o algoritmo MLP (Figura 2c) não classificou nenhuma *pixel* com a classe de Gleissolos (GX_{bd} aren), embora esse classificador tenha apresentado o melhor desempenho (acurácia 60%; Kappa 0,46) (Tabela 3). A não predição da classe de Gleissolos se deve à baixa representatividade da classe no conjunto de treino, com apenas duas observações (Tabela 2). Apesar do melhor desempenho geral, a não predição de uma das classes sugere inferioridade do classificador MLP para mapeamentos de áreas em que haja interesse em classes minoritárias, como em mapas preliminares que visam à seleção de áreas com potencial para maior detalhamento. Os classificadores J48 e *Random Forest* apresentaram igual acurácia global (56%), mas melhor desempenho foi atribuído ao J48 por este apresentar maior kappa (0,42) que o *Random Forest* (0,39).

Tabela 3. Acurácia global e índice kappa dos mapas gerados com os três algoritmos.

Algoritmo	Acurácia (%)	Índice kappa	
		Valor	Concordância
J48	56	0.42	Moderada
Random Forest	56	0.39	Considerável
MLP	60	0.46	Moderada

Diferentemente do mapa produzido pelo método convencional, os mapas digitais gerados com os três algoritmos têm as unidades de mapeamento fragmentadas em até um *pixel*. O MLP produziu mapa com maior fragmentação nas unidades de mapeamento de menor extensão de ocorrência (Figura 2c). O mapa com o *Random Forest* mostrou a menor fragmentação, considerando toda a área de mapeamento (Figura 2b). Os mapas digitais também diferiram pela proporção entre unidades de mapeamento (Tabela 4). O mapa com MLP tem

maior proporção que os dois outros algoritmos de unidades mais extensas em detrimento das menos extensas.

Tabela 4. Área relativa das unidades de mapeamento digital nos três algoritmos e proporção das observações (Obs.) para treinamento dos modelos.

	J48	RF	MLP	Treino
Classes de solo	Área (%)			Obs. (%)
GXbdt	0,2	0,1	0,0	0,1
LVAdt	6,5	2,3	7,6	4,0
LVdt	12,8	9,0	13,9	18,3
PAdabrup	1,2	1,4	1,8	0,4
PVAdabrup	7,2	5,8	3,8	0,7
PVAdarenabrup	0,9	0,4	0,7	0,3
PVdabrup	7,0	9,2	6,6	3,0
PVdarenabrup	2,0	1,3	3,8	0,5
RLdt	3,7	6,5	2,9	0,4
RQot	51,3	59,4	56,4	71,6
RRdlep	3,7	1,2	0,8	0,2
RRet	3,5	3,4	1,7	0,6
Total	100	100	100	100

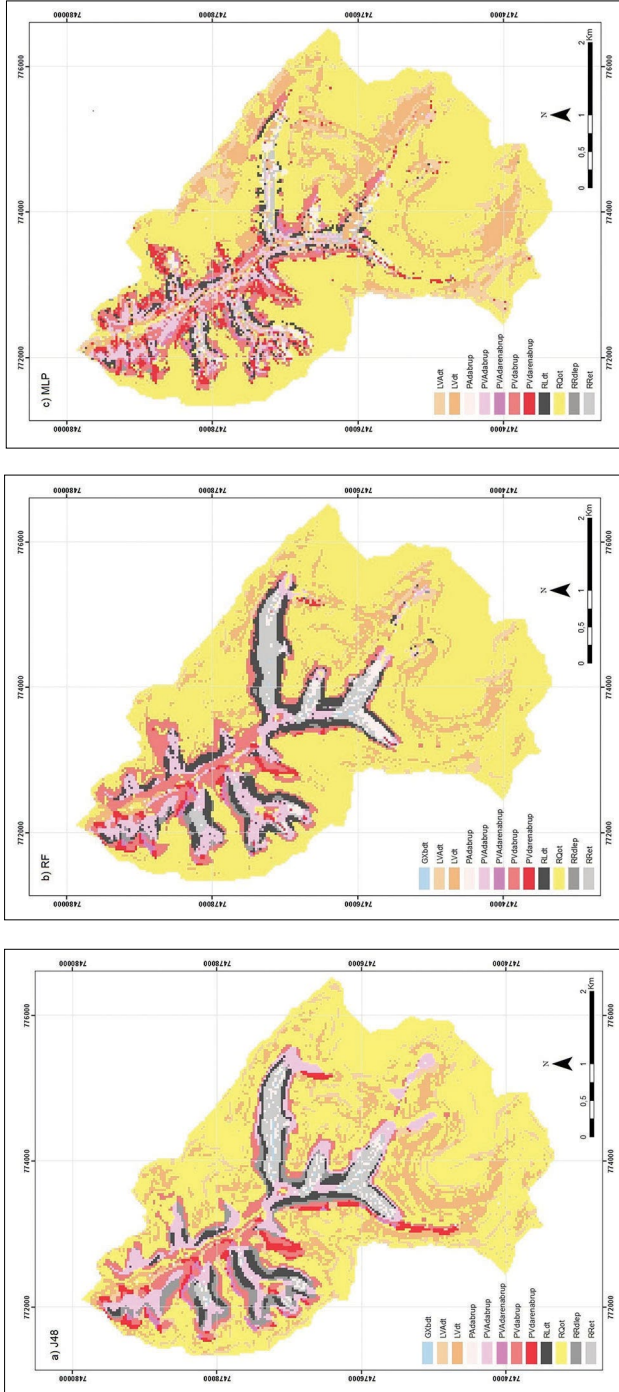


Figura 2. Mapas pedológicos digitais da bacia do Córrego Águas da Lúcia gerados com os algoritmos (a) J48, (b) Random Forest e (c) MLP. As classes de solo estão descritas na Tabela 2.

Para comparação do mapa convencional com os mapas digitais dos três algoritmos, agruparam-se as unidades de mapeamento dos mapas digitais em quatro unidades, correspondentes àquelas do mapa convencional (Tabela 5). Nos três mapas digitais, observa-se que a área predita para cada classe de solo guarda proporcionalidade com o número de observações da classe disponíveis para treinamento do modelo. Isso ressalta a importância de se buscar o maior equilíbrio para o número de observações de treinamento entre as diferentes classes de solo de forma que todas as classes representativas na área tenham grande número dessas observações. Assim, caso seja necessária sua ampliação, a base ampliada deverá guardar proporções de observações para treinamento equilibradas entre as classes.

Tabela 5. Área relativa no mapeamento digital de unidades equivalentes às do mapeamento convencional.

	CONV	J48	RF	RNA	Observações expandidas	Observações originais
	% área mapeada					
GX+GM	3,4	0,2	0,1	0,0	2	1
RQ+LV+LVA	69,2	70,8	70,7	77,9	2303	46
PV+PVA+PA	23,2	18,5	18,2	16,7	120	11
RR+CX+RL	4,2	10,6	11,0	5,4	30	4
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	2455	62

Aparentemente, os mapas digitais produzidos pelo *Random Forest* e pelo J48 guardam maior semelhança com o mapa convencional devido à menor fragmentação das unidades de mapeamento e à melhor reprodução das unidades de mapeamento minoritárias (Figuras 1 e 2). Todavia, nenhum desses algoritmos reproduziu eficientemente o padrão de distribuição dos Gleissolos (GX+GM) do mapa convencional, com apenas uma instância de treinamento (Tabela 5). Para alocação das observações de solo no campo para treinamento, seguiu-se estritamente a seleção de pontos do cLHS, alimentado com a base de dados geomorfométricos (variáveis do relevo classificadas). Isso não garantiu alocação de número suficiente de pontos de amostragem em alguns pedoambientes representativos. Poucos pontos foram alocados nas classes GX+GM e RR+CX+RL (Tabela 5). Uma seleção híbrida, com interferência parcial do especialista, alocando mais pontos em áreas com potencial de

ocorrência de classes de solo minoritárias, neste caso selecionadas pelo relevo peculiar – de planície aluvial do curso principal (Gleissolos) e de terço inferior de vertente em vale encaixado (solos rasos) –, contribuiria com mais instâncias de treinamento nesses ambientes.

Considerações finais

Na microbacia estudada, predominam solos arenosos e de textura média arenosa, com teores de argila inferiores a 18 g/kg, com diferenciação lateral dependente de processos pedogenéticos *in situ*, como os que contribuem para a formação de horizonte B textural, erosão superficial e gleização, dependentes, principalmente, do relevo, que varia de plano a forte ondulado.

Os solos da bacia são complexos de Neossolos Quartzarênicos com Latossolos Vermelhos de textura média; associações de Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos arênicos e abrupáticos ou não, textura arenosa/média; complexo de Neossolos Regolíticos e Neossolos Litólicos de textura arenosa com Cambissolos de textura média; e complexo de Gleissolos Hápticos e Melânicos de textura arenosa e média, todos com baixa saturação por bases.

Quando aplicadas em áreas com elevados teores de areia, as metodologias de mapeamento pedológico digital por mineração de dados geomorfométricos, treinados por observações de campo em quantidade ampliada por associações solo-geomorfometria, produzem mapas com acurácia moderada. Nessa situação, a interferência do especialista para aumentar o tamanho amostral e garantir a representatividade das observações de solo para treinamento do modelo pode aumentar a acurácia dos mapas.

Referências

- ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A.; GATIBONI, L. C.; ELTZ, F. L. F. Atividades agrícolas de produção em solos frágeis no Sul do Brasil. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7, p. 367-403.
- BREEMEN, N.; BUURMAN, P. **Soil formation**. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2002. 408 p.
- BREIMAN, L. Random forest. **Journal of Machine Learning**, v. 45, p. 5-32, 2001.
- BUI, E. N. **Soil survey as a knowledge system**. Geoderma, v. 120, p. 17-26, 2004.
- BURROUGH, P. A. The technologic paradox in soil survey: new methods and techniques of data capture and handling. In: ZINCK, J. A. **Soil survey: perspectives and strategies for the 21st century**. Rome: FAO, 1995. p. 15-23.
- CASTRO, S. S. **Sistemas de transformação pedológica em Marília, SP**: B latossólicos e B texturais. 1989. 274 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CATEN, A. ten; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A. de; RUIZ, L. F. C.; SILVA, C. A. da. An appropriate data set size for digital soil mapping in Erechim, Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 2, p. 359-366, 2013.
- CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas**. Campinas, 2015. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_086.html>. Acesso em: 30 out. 2015.
- CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212 p.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS Desktop**: Version 10. Redlands, 2010.
- HALL, M.; FRANK, E.; HOLMES, G.; PFAHRINGER, B.; REUTEMANN, P.; WITTEN, I. H. The WEKA data mining software: an update. **SIGKDD Explorations**, v. 11, n. 1, p. 10-18, 2009.
- HUDSON, B. D. The soil survey as paradigm-based science. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 836-841, 1992.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2007. 323 p. (Manuais técnicos em geociências, 4).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo**, 1981a. Escala 1:500.000.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo**, 1981b. Escala 1:1000.000.

JENNY, H. **Factors of soil formation**: a system of quantitative pedology. New York: McGraw-Hill, 1941. 281 p.

KANELLOPOULOS, I.; WILKINSON, G.G. Strategies and best practice for neural network image classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 4, p. 711–725, 1997.

LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; VOLTZ, M. **Digital soil mapping**: an introductory perspective. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 3-22.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. **The measurement of observer agreement for categorical data**. Biometrics, v. 33, p. 159-174, 1977.

MENDONÇA-SANTOS, M. L.; SANTOS, H. G. dos. **Mapeamento digital de classes e atributos de solos**: métodos, paradigmas e novas técnicas. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 19 p. (Embrapa Solos. Documentos, 55)

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. A conditional Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. **Computer & Geosciences**, v. 32, p. 1378-1388, 2006.

MONIZ, A. C.; BUOL, S. W. Formation of an Oxisol-Ultisol transition in São Paulo, Brazil: I. Double-water flow model of soil development. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, p. 1228-1233, 1982.

OLIVEIRA, J. B. de; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônômico; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 64 p. 1 mapa, color. Escala 1:500.000.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. T. K.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013a. 353 p. il. color.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. rev. e ampl. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013b. 100 p. il. color.

TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. Comparação de esquemas de amostragem para treinamento dos modelos preditores no mapeamento digital de classes de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 19, p. 14-20, 2015.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Digital terrain analysis. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Ed.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: Wiley & Sons, 2000. p. 1-27.

WITTEN, I. H.; FRANK, E. **Data mining: practical machine learning tools and techniques**. 2nd ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2005.

Capítulo 5

Contribuição ao estudo de solos frágeis na Região Semiárida – Petrolina, PE

Manoel Batista de Oliveira Neto; Alexandre Ferreira do Nascimento;
Flávio Adriano Marques; André Júlio do Amaral;
Luís Carlos Hernani; Tony Jarbas Ferreira Cunha

Introdução

A área de estudos do Projeto Fragissolo, localizada em Petrolina, no Estado de Pernambuco, está inserida na região Semiárida Nordestina, especificamente no Vale do Submédio do Rio São Francisco (Figura 1). Essa região se destaca pelo seu alto potencial produtivo sob condições irrigadas em face de suas características edafoclimáticas. Na região, entre muitas classes de solos ditos como frágeis, os solos arenosos se destacam pela sua localização e relevo plano, favorecendo o manejo de culturas irrigadas, principalmente com o advento dos sistemas de irrigação localizados, como a microaspersão e o gotejamento.

Diante das condições favoráveis de solos do clima semiárido, com insolação o ano todo e a oferta de água de boa qualidade, a região tornou-se o principal polo de desenvolvimento da produção de frutas irrigadas, alavancando a economia da Região Nordeste. Com isso, houve uma procura muito grande por áreas irrigáveis às margens do Rio São Francisco, onde foram implantados grandes projetos de irrigação públicos e privados. Com essa forte demanda, foram surgindo problemas técnicos relacionados ao uso da terra e da água

de irrigação, quais sejam: formação de um lençol freático pelo uso de água em excesso, contaminação dos mananciais por fertilizantes e agrotóxicos, e salinização dos solos, entre outros problemas fitossanitários.

Muitos projetos de irrigação na região semiárida nordestina têm apresentado sérios problemas de salinização, elevação ou formação de lençol freático próximo à superfície, principalmente em decorrência da falta de informações sobre o meio físico e biótico.

No Polo Irrigado de Petrolina/Juazeiro, muitos problemas relacionados ao manejo dos solos e da água foram identificados e vêm se mantendo há várias décadas, necessitando de estudos e pesquisas localizadas que apontem as causas e possíveis providências para minimizar esses problemas, especialmente em relação aos solos arenosos, que detêm características físicas e químicas que lhes são bastante peculiares.

Diante disso, no Projeto Fragissolo, foram propostos pesquisas e estudos de casos em que o levantamento detalhado dos solos de área piloto assume importância fundamental para o incremento do conhecimento relativo ao mapeamento digital e à fragilidade de solos arenosos, contribuindo fundamentalmente para o estabelecimento de parâmetros de avaliação da degradação e da sustentabilidade do manejo agrícola desses solos. Neste capítulo, serão abordados aspectos de solos frágeis cultivados com fruticultura irrigada em uma área de estudo em Petrolina, PE.

Procedimentos

O mapeamento dos solos envolveu, inicialmente, a restituição planialtimétrica de imagens do sensor Ikonos e a elaboração de Modelo Digital de Elevação (MDE) usando o ArcGIS. Com base nesse MDE, derivaram-se: elevação, declividade, curvatura e sombreamento do relevo, conforme Chagas (2006). A partir desses atributos, e utilizando-se o programa *conditioned Latin Hypercube Sampling* – cLHS (MINASNY; MCBRATNEY, 2006), foram definidos pontos georreferenciados para coleta de amostras e avaliações de campo. Esses pontos foram pré-definidos com as seguintes finalidades: 77

minitrincheiras mais 13 perfis de solos para elaboração do mapa de solos; e 10 pontos extras selecionados aleatoriamente para validação das classes de solos resultantes do mapeamento digital.

No campo, os pontos de coleta foram encontrados com auxílio de um GPS de navegação. Em cada ponto, foi aberta uma minitrincheira e se procedeu a uma prospecção com trado pedológico até 2,0 m de profundidade, onde foi procedida a identificação do solo no local, conforme Santos et al. (2006) e Sistema... (1999). Também foram coletadas amostras deformadas e indeformadas (anéis volumétricos de 100 cm³) nas profundidades de 0-20 cm e 60-80 cm, com duas repetições em cada profundidade, as quais foram submetidas às análises físicas e químicas segundo métodos descritos em Claessen (1997).

Após essa etapa, com os pontos georreferenciados e o sol identificado *in loco*, foi elaborado um mapa preliminar dos solos dominantes na área. Também foi utilizada a carta planialtimétrica da Codevasf na escala 1:25.000 (CODEVASF, 1956) e imagens do *Google Earth* de alta resolução, quando a carta não possibilitava a separação das unidades de mapeamento.

Área de estudos

A área selecionada para os estudos de fragilidade dos solos está localizada no Vale do Submédio do Rio São Francisco, no Município de Petrolina, PE, entre as coordenadas geográficas 09°19' / 09°21' S e 40°28' / 40°25' W (Figura 1).

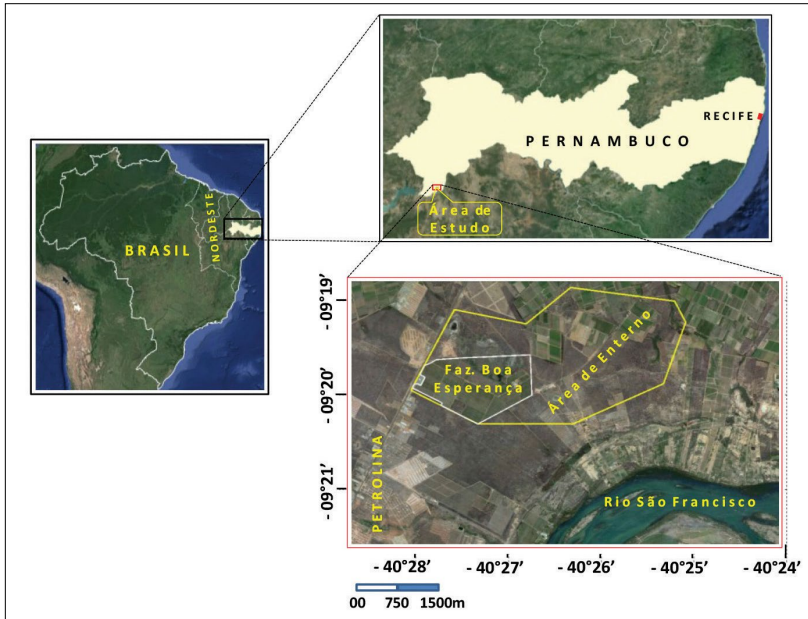


Figura1. Localização da área de estudo do Projeto Fragissolo em Petrolina, PE.

A geologia da área de estudo foi identificada com base nas observações de campo feitas durante os caminhamentos para a execução do trabalho e correlacionada com os trabalhos de Araújo Filho et al. (2000), Beltrão et al. (2005) e Petri e Fúlvaro (1983), o que possibilitou estabelecer uma relação direta entre a geologia local e os principais solos que ocorrem na área.

O clima predominante da região é o semiárido, com temperatura média anual de 27 °C, classificado como BSw_h por Köppen. Em função das características de clima e temperatura associadas à localização geográfica intertropical e à limpidez atmosférica na maior parte do ano, a evapotranspiração potencial é muito alta, sobretudo na parte norte do vale, sendo da ordem de 3.000 mm anuais. Também é alta a insolação, mas é baixa a umidade relativa do ar. O período seco é predominante, com cerca de 6 a 8 meses, podendo atingir até 11 meses nas áreas de maior aridez. A precipitação pluviométrica média anual é da ordem de 400 a 650 mm (CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1989) e ocorre de forma irregular e concentrada nos meses de novembro a abril, podendo haver chuvas intensas (120 a 130 mm) num período de 24 horas.

A vegetação de caatinga, predominante em toda a área de estudo, é constituída por formações xerófilas, lenhosas, decíduais, normalmente espinhosas, com presença de plantas suculentas, tanto com padrão arbóreo como arbustivo, pouco densa a densa e com estrato herbáceo estacional (ANDRADE LIMA, 1981). O porte mais elevado é definido pelas braúnas (*Schinopsis brasiliensis*), que podem alcançar até 20 m de altura. Também podem ser encontradas espécies de porte significativo, como faveleira (*Cnidocolus phyllacanthus*), imbirassu (*Pseudobombax simplicifolium*), aroeira (*Astronium urundeuva*) e imburana-de-cambão (*Bursera leptophloeos*).

A espécie de maior predominância na região é a jurema-preta (*Mimosa hostilis*), seguida por caroá (*Neoglaziovia variegata*), quebra-faca (*Cróton* sp), mororó (*Bauhinia cheilantha*), pinhão-bravo (*Jatropha pohiliana*), entre outras. Entre as cactáceas, são encontradas espécies como xique-xique (*Pilosocereus gounelli*), palmatória-de-espinho (*Opuntia palmadora*), coroa-de-frade (*Melocactus bahiensis*), rabo-de-raposa (*Arrojadoa rhodantha*), mandacarus (*Cereus jamacaru*), facheiros (*Pilosocereus pachycladus*) e quipás (*Opuntia inamoena*). Nos locais onde predomina o jericó (*Selaginella convoluta*), ocorrem solos sem pedregosidade superficial. Em áreas abaciadas e passíveis de alagamento em alguns meses do ano, relacionadas aos Vertissolos Hidromórficos, onde a vegetação é menos densa, ocorrem espécies esparsas, como alagadiço, jurema-preta e unha-de-gato, todas do gênero *Mimosa* (BURGOS; CAVALCANTI, 1990).

As análises de amostras dos solos

As análises físicas e químicas para caracterização dos solos foram realizadas segundo o *Manual de métodos de análise de solo* (CLAESSEN, 1997). Com as análises realizadas, foram quantificadas as frações da amostra total (proporção de calhaus, cascalhos e terra fina); foi analisada a granulometria da terra fina e calculado o grau de flocculação das argilas e a relação silte/argila; e também foram determinadas a densidade do solo, a densidade de partículas e a retenção de umidade. No que diz respeito às análises químicas, foram efetuados os seguintes procedimentos: determinação do pH (em água e em KCl) e dos cátions trocáveis (cálcio, magnésio, potássio e sódio); cálculo dos valores de saturação por bases (valor V%), por alumínio e por sódio; determinação de condutividade

elétrica do extrato de saturação, do fósforo assimilável, do carbono orgânico total e do nitrogênio total; e cálculo da relação carbono/nitrogênio. Quando necessário, foram feitas as determinações de óxidos utilizando o método do ataque sulfúrico (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2) e o cálculo das relações moleculares ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$).

Critérios para a classificação e o mapeamento dos solos

Os critérios utilizados para o estabelecimento, as subdivisões das classes e a organização da legenda de solos constam no *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS* (SANTOS et al., 2006; SISTEMA..., 1999), na *Súmula 10 da Reunião Técnica de Levantamento de Solos* (1979), em *Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidades de mapeamento* (CARVAHO et al., 1988) e nos *Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos* (SANTOS et al., 1995). Os critérios mais importantes para a região estudada, utilizados no presente estudo, foram: atividade da fração argila; saturação por bases (valor V%); saturação por sódio; salinidade; profundidade do contato lítico; horizontes cimentados; características intermediárias entre classes de solos; textura e espessura dos horizontes superficiais; textura de horizontes subsuperficiais dos solos arenoquartzosos; mudança textural abrupta; presença de carbonatos; tipos de horizonte A; agrupamento de classes texturais; e presença de cascalhos.

A distinção de unidades de mapeamento de solos por fases é um recurso utilizado com o objetivo de fornecer subsídios à interpretação para fins de uso agrícola das terras. Neste estudo, foram consideradas as fases: vegetação; relevo; pedregosidade, rochosidade e de substrato.

Caracterização dos Solos da área de estudo

A Geologia dominante e sua relação com os solos mapeados

A área estudada está encravada na Depressão Sertaneja, que, no geral, apresenta uma superfície rebaixada com domínio de rochas cristalinas, solos rasos, relevo plano e suave ondulado, com ocorrência de morros e serrotes

distribuídos esparsamente (ARAÚJO FILHO et al., 2000; SILVA et al., 1993). Nessa região, há o predomínio de rochas cristalinas, mas, devido à ocorrência de muitos eventos geológicos e climáticos, constata-se uma diversificação geológica bastante significativa, que influencia diretamente na variabilidade espacial dos solos.

Durante os trabalhos de campo, foram identificados os seguintes domínios geológicos, conforme a Figura 2:

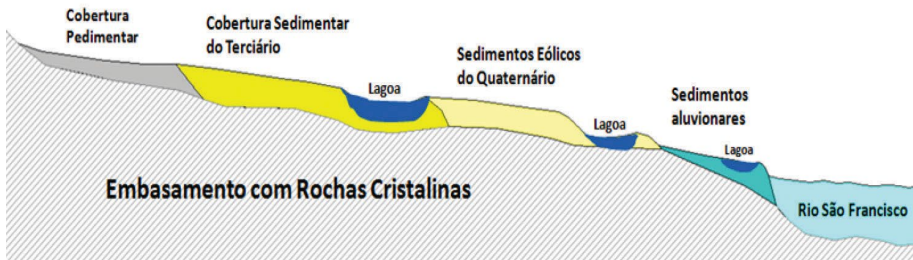


Figura 2. Distribuição espacial da geologia dominante na área de estudo do Projeto Fragissolo em Petrolina, PE.

1. Sedimentos Eólicos do Quaternário, classificados como dunas continentais ou paleodunas, conforme Araújo Filho et al. (2000) e Barreto et al. (2002) – caracterizados por apresentarem um material arenoquartzoso de granulometria fina e uniforme, com grãos arredondados, que evidenciam o transporte pelo vento. Esse manto arenoso, ora mais espesso, ora mais delgado, foi depositado sobre o embasamento cristalino do Pré-Cambriano durante o período Terciário/Quaternário e, por ter sido depositado mais recentemente, sofreu pouca alteração pedogenética, constituindo-se como o principal material de origem dos Neossolos Quartzarênicos, dominantes na área de estudo.

2. Embasamento Cristalino do Pré-Cambriano – representado principalmente pelo Complexo Gnáissico-migmatítico, com litologia bastante diversificada, onde se destacam rochas do tipo granitos, granodioritos, gnaisses, migmatitos, xistos e gabros (DANTAS, 1980; JACOMINE, 1996). Essas rochas constituem o principal material de origem dos solos das classes Luvisolos, Planossolos, Neossolos Litólicos, Cambissolos, Neossolos Regolíticos e Argissolos Vermelho-Amarelos (ARAÚJO FILHO et al., 2000; BRASIL, 1973).

3. Coberturas pedimentares – representadas por sedimentos oriundos da desagregação física de rochas cristalinas que compõem as serras e serrotes e se depositam a curta distância no entorno das referidas elevações.

4. Coberturas Sedimentares do Terciário – são superfícies pouco elevadas constituídas por depósitos colúvio-aluvionares sobre as rochas cristalinas, com espessura média em torno de 15 m e relevo plano e suave ondulado, formando pequenos platôs com bordas dissecadas. Geralmente, apresentam níveis gonglomeráticos formados por pequenos blocos ou concreções ferruginosas isoladas que podem chegar à superfície. Essas superfícies são denominadas de tabuleiros interioranos ou chapadas baixas, constituindo o principal material de origem dos solos das classes dos Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos, dos Argissolos Amarelos e Vermelho-Amarelos e, em menor ocorrência, dos Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos (ARAÚJO FILHO et al., 2000; BRASIL, 1973).

5. Sedimentos Aluvionares ou Aluviões – são representados por depósitos de sedimentos diversos com granulometria e composição heterogênea, podendo variar em um mesmo perfil desde sedimentos argilosos, siltosos, argilo-arenosos e deposições orgânicas até material grosseiro, como seixos e deposições de conchas em algumas várzeas. Ocorrem nas margens dos rios, especialmente do Rio São Francisco, constituindo o principal material de origem dos Neossolos flúvicos, Cambissolos flúvicos e Gleissolos.

Legenda e mapa de solos da área de estudo

A legenda dos solos, que também engloba alguns tipos de terreno, foi organizada por unidades de mapeamento estabelecidas com base nos procedimentos normativos de levantamentos pedológicos (SANTOS et al., 1995). Na concepção das unidades de mapeamento, buscou-se sempre: (a) discriminar padrões de áreas representativas de segmentos da paisagem com o máximo de homogeneidade possível para a escala de trabalho, particularmente levando-se em conta os resultados analíticos e a descrição morfológica dos perfis de solo; (b) individualizar os solos e os ambientes com potencialidades agrícolas ou não-agrícolas relativamente semelhantes. Entretanto, devido à grande variabilidade espacial dos solos no ambiente, algumas unidades de mapeamento foram constituídas com mais de um solo componente devido

à escala de trabalho, que não permitiu a individualização dos mesmos na representação cartográfica.

As unidades de mapeamento são, de fato, os padrões da área mapeada que aparecem individualizados nos mapas de solos e podem ocorrer em uma ou mais manchas de solos cartografadas. Cada uma delas é representada por um código alfanumérico, começando com a simbologia do solo mais dominante. Essa simbologia consta nas especificações vigentes no *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (SANTOS et al., 2006; SISTEMA..., 1999).

Pode-se observar, na Figura 3, o mapa de solos da área estudada com as devidas unidades de mapeamento e suas respectivas simbologias; em seguida, tem-se a legenda de cada unidade, a proporção de ocorrência de cada solo da unidade de mapeamento e a classificação taxonômica desses solos componentes até o quarto nível hierárquico. Na Tabela 1, pode-se avaliar a extensão das unidades de mapeamento e seus percentuais em relação à área total.

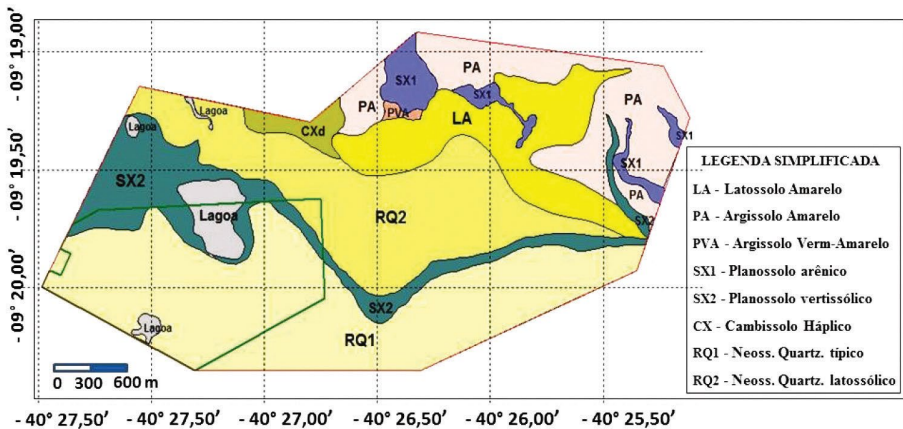


Figura 3. Mapa de solos da área de estudo em Petrolina, PE.

Legenda ampliada dos Solos da Figura 3.

LATOSSOLOS

LA – LATOSSOLO AMARELO Distrófico epieutrófico típico textura média + NEOSSOLO QUARTZARÊNICO órtico latossólico, ambos fase caatinga hiperxerófila relevo plano (55% + 45%).

Inclusões:

LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico epieutrófico típico textura média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico textura arenosa e média/média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

ARGISSOLOS

PA – ARGISSOLO AMARELO Distrófico plíntico e petroplíntico textura arenosa e média/média + LATOSSOLO AMARELO Distrófico e álico epieutrófico típico textura média, ambos fase caatinga hiperxerófila relevo plano (70% + 30%).

Inclusões:

LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico textura média, ambos fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico latossólico fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

ARGISSOLO AMARELO Eutrófico solódico fragipânico textura arenosa/média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

PVA – ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico concrecionário textura média cascalhenta fase caatinga hiperxerófila relevo plano (100%).

Inclusões:

ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico e plíntico textura arenosa e média/média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico textura arenosa e média/média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico arênico e solódico textura arenosa/média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

PLANOSSOLOS

SX1 – PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico típico e Eutrófico arênico solódico sálico textura arenosa/média fase caatinga hiperxerófila relevo plano (100%).

Inclusões:

ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico textura arenosa e média/média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico latossólico fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico vertissólico solódico textura arenosa/média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

SX2 – PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico vertissólico solódico textura arenosa/média fase caatinga hiperxerófila relevo plano (100%).

Inclusões:

ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico textura arenosa e média/média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico latossólico fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

CAMBISSOLOS

CXd – CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico latossólico textura média fase caatinga hiperxerófila relevo plano (100%).

Inclusões:

LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico textura média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico latossólico fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS

RQ1 – NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

Inclusões:

NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico dúrico e latossólico fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

LATOSSOLO AMARELO Distrófico epieutrófico típico textura média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

RQ2 – NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico + NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico latossólico, ambos fase caatinga hiperxerófila relevo plano (70% + 30%).

Inclusões:

NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico e dúrico fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

LATOSSOLO AMARELO Distrófico epieutrófico típico textura média fase caatinga hiperxerófila relevo plano.

Tabela 1. Extensão das unidades de mapeamento e seus percentuais em relação à área total.

Unidade de Mapeamento	Área (ha)	Porcentagem da Unidade de Mapeamento em relação à área total (%)
LA	120,5	12,3
PA	128,4	13,1
PVA	2,8	0,3
SX1	32,0	3,3
SX2	113,8	11,6
CX	15,7	1,6
RQ1	330,0	33,6
RQ2	211,0	21,4
Águas internas	28,2	2,8
Total	982,4	100,0

Descrição das principais classes de solos

As principais classes de solos na área de estudo, em ordem de importância por tamanho de área, são: Neossolos Quartzarênicos (55,0%), Argissolos (13,4%), Planossolos (14,9%), Latossolos (12,3%) e Cambissolos (1,6%). Ocorrem, também, lagoas, que foram consideradas, no mapa de solos, como águas internas (2,8%).

Será apresentada, a seguir, uma descrição sucinta das classes de solos de maior importância que ocorrem na área estudada.

Neossolos Quartzarênicos

A Figura 4 apresenta a paisagem típica, com cultivo de mangueiras irrigado e o perfil do Neossolo Quartzarênico representativo.



Fotos: Alexandre Ferreira do Nascimento

Figura 4. Perfil de Neossolo Quartzarênico e o ambiente representativo de áreas com mangueira irrigada nas Unidades de Mapeamento RQ1 e RQ2.

Trata-se de solos minerais arenosos, bem a fortemente drenados, normalmente profundos a muito profundos, essencialmente quartzosos. Apresentam baixa capacidade de troca, baixa saturação por bases, baixa retenção de água e nutrientes e, portanto, têm baixa fertilidade natural. A textura varia de areia a areia franca até, pelo menos, 2 m de profundidade, com cores variáveis que vão do vermelho ao vermelho-amarelo.

São solos suscetíveis à erosão em profundidade por apresentarem uma constituição arenosa com grãos soltos, o que possibilita o desbarrancamento. O uso inadequado desses solos também pode levar à compactação superficial e contribuir ainda mais com os processos erosivos. Devido as suas péssimas qualidades químicas e a sua textura arenosa que condiciona baixa retenção de umidade e perda de fertilizantes, principalmente de adubos potássicos, apresentam forte limitação ao uso agrícola. São solos que, se forem manejados inadequadamente, podem sofrer fortes processos erosivos, que podem chegar à formação de voçorocas. No entanto, esses solos, por ocorrem próximo ao

Rio São Francisco, em relevo plano e com uso de sistemas de irrigação mais eficientes, como microaspersão e gotejamento, têm demonstrado bom potencial para o uso com culturas irrigadas, principalmente uva e manga.

Esses solos geralmente apresentam, em profundidade, uma camada fortemente cimentada (Figura 5) denominada de “duripã” (ARAÚJO FILHO, 2003; SANTOS et al., 2006; SISTEMA..., 1999), que, se ocorrer em pouca profundidade, constitui forte limitação ao uso agrícola, especialmente para culturas irrigadas, pois essa característica promove a rápida saturação do solo formando um lençol freático suspenso. Esse é um sério problema que ocorre nos perímetros irrigados do Polo Petrolina/Juazeiro. Muitos projetos de irrigação foram implantados sem que, anteriormente, tivesse sido feita uma sondagem da área para verificar a profundidade e a variabilidade da referida camada, cujas informações são básicas para fazer todo o planejamento do uso da água, como turno de rega e drenagem, além do tipo de cultura a ser implantada.



Fotos: Manoel Batista de Oliveira Neto

Figura 5. Perfil de Neossolo Quartzarênico com duripã ocorrendo em maior profundidade ou mesmo próximo à superfície.

Argissolos

A Figura 6 mostra a área sob cultivo irrigado de mangueira e o perfil típico de Argissolo Amarelo de ocorrência na área de estudo.



Fotos: Alexandre Ferreira do Nascimento

Figura 6. Perfil de Argissolo Amarelo e área cultivada com mangueira irrigada, representativos dessa Unidade de Mapeamento.

São solos minerais bem drenados, de profundidade mediana a profundos, apresentando horizonte B textural sob o horizonte A, do tipo fraco ou moderado. O horizonte B textural apresenta gradiente textural. Esses solos apresentam cores no horizonte Bt amareladas ou vermelho-amareladas, geralmente nos matizes 5,5 YR (Argissolos Vermelho-Amarelos), 7,5 YR e 10 YR (Argissolos Amarelos). Suas principais limitações são a baixa fertilidade natural e o alto risco de erosão, que restringem o seu uso agrícola. Os Argissolos, de maneira geral, são bastante suscetíveis à erosão, principalmente quando existe grande diferença textural entre os horizontes A e B, presença de cascalho e relevo movimentado. Em relevo plano, esses solos podem ser utilizados para diversas culturas; entretanto, mesmo em relevo plano, são necessárias práticas de manejo e conservação. Correções são necessárias, principalmente, nos solos distróficos.

O grau de erodibilidade desses solos tem como fator determinante a presença de horizonte B textural, que influencia a erosão superficial. Características como classe textural, gradiente textural, tipo de estrutura e permeabilidade, quando associadas à presença de B textural, favorecem os processos erosivos.

Existe um menor risco de erosão em profundidade nos solos de textura argilosa ou muito argilosa.

Nessa área, também ocorrem os Argissolos Vermelho-Amarelos (Figura 7), com a presença de seixos ralados e concreções ferruginosas petroplintitas (ARAÚJO FILHO, 2003; SANTOS et al., 2006; SISTEMA..., 1999), distribuídas ao longo do perfil, que, quando ocorrem próximo à superfície, podem prejudicar o manejo com máquinas agrícolas, promovendo mais rapidamente o desgaste das lâminas do arado. Muitas vezes, a presença desse material é favorável à irrigação, podendo facilitar a drenagem da água; porém, quando ocorre de forma cimentada, formando blocos, prejudica a infiltração da água.



Fotos: Alexandre Ferreira do Nascimento

Figura 7. Perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico concrecionário e o ambiente representativo da Unidade de Mapeamento PVA.

Quando esses solos ocorrem com pouca profundidade, podem apresentar sodicidade na parte mais profunda do perfil por influência da rocha cristalina subjacente. Os Argissolos ocorrem em áreas significativas da região, apresentando, em geral, bom potencial para o uso com culturas irrigadas.

Planossolos

A Figura 8 apresenta a paisagem típica e um perfil de Planossolo Háplico representativo.

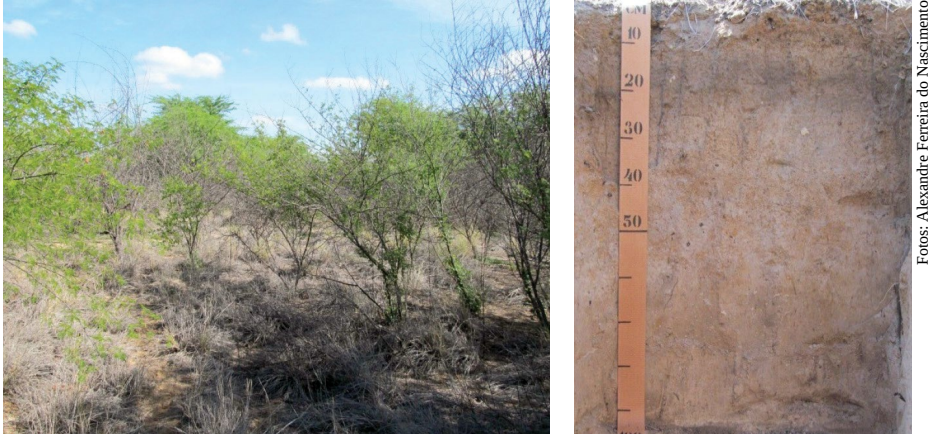


Figura 8. Ambiente representativo das Unidades de Mapeamento SX1 e SX2 e o perfil de um Planossolo Háplico.

São solos minerais hidromórficos que apresentam mudança textural abrupta entre o horizonte A ou E e o horizonte B textural, que apresenta alta densidade aparente, com cores de redução e/ou mosqueados devido à deficiência de drenagem. São rasos ou de profundidade média e ainda apresentam lenta permeabilidade em subsuperfície, pois apresentam uma baixa porosidade total. Por causa da sua situação topográfica, essa baixa permeabilidade favorece o encharcamento temporário, principalmente em áreas onde a água se acumula. Quando secos, são duros ou extremamente duros. Podem apresentar teor de sódio trocável elevado e também variação textural, sendo mais frequente textura arenosa no horizonte A e média no Bt, ou média no A e argilosa no Bt.

A drenagem imperfeita, ou má drenagem, e a alta densidade aparente devido ao caráter adensado ou vértico que geralmente ocorre no Bt propiciam uma lenta permeabilidade no perfil do solo, proporcionando o alto risco de salinidade e erodibilidade, constituindo as principais limitações ao uso agrícola. Além das limitações físicas, também podem ocorrer limitações químicas pela presença de sais de sódio. Devido à ocorrência de seu forte

gradiente textural, que promove uma mudança textural abrupta entre os horizontes A e B, são solos muito propensos aos processos erosivos, principalmente os superficiais. Geralmente, quando ocorrem em relevo plano e abaciado, onde pode ocorrer a acumulação de água e sedimentos, a suscetibilidade aos processos erosivos é atenuada.

Normalmente, esses solos não são utilizados com culturas irrigadas em virtude do baixo potencial de uso e dos riscos à degradação que eles proporcionam ao serem submetidos aos sistemas irrigados.

Latossolos

A Figura 9 apresenta a paisagem e o perfil de um Latossolo Amarelo representativo.



Fotos: Alexandre Ferreira do Nascimento

Figura 9. Perfil de Latossolo Amarelo e o ambiente representativo da Unidade de Mapeamento LA.

São solos minerais, não hidromórficos, profundos ou muito profundos, bem drenados, com ocorrência de horizonte B latossólico, de cores com matiz 7,5 YR ou mais amarelo na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA). Não possuem atração magnética e apresentam boas características físicas para o uso agrícola, como boa drenagem interna, boa aeração e ausência de impedimentos físicos à mecanização e penetração de

raízes. São solos bastante intemperizados, o que se reflete na baixa capacidade de troca de cátions e saturação por bases. As suas boas condições físicas e o relevo plano onde ocorrem favorecem sua utilização para a agricultura. São solos que necessitam de manejo adequado de adução e controle de erosão. Em condições naturais ou quando manejados de forma adequada, apresentam boa resistência aos processos erosivos.

Na área estudada, esses solos ocorrem de forma localizada e têm pouca expressão geográfica. São desenvolvidos de sedimentos arenosos e arenos-argilosos relacionados às coberturas cenozoicas, predominando as cores amarela, vermelho-amarela ou brunada. Em função da natureza do material de origem, apresentam textura média com os horizontes superficiais arenosos.

Esses Latossolos apresentam baixa fertilidade natural, necessitando de adubações ou correções, além de baixa retenção de umidade e baixa capacidade de troca de cátions devido à presença de horizontes superficiais arenosos, sendo necessário o manejo adequado da água de irrigação e o uso de insumos agrícolas, que, se forem usados inadequadamente, poderão salinizar os solos e contaminar o lençol freático com metais pesados. No entanto, em geral apresentam boas características físicas e estão situados em relevo plano, facilitando o manejo com máquinas agrícolas, o que lhes confere alto potencial para o uso com agricultura irrigada.

Cambissolos

São solos não hidromórficos, apresentando horizonte A sobre horizonte B incipiente. São pouco profundos a rasos, com pequena diferenciação entre horizontes, ausência de gradiente textural e cores normalmente amareladas ou brunadas. Devem ser realizadas correções, principalmente nos distróficos. De modo geral, são pouco suscetíveis aos processos erosivos quando em relevo plano; porém os sistemas de manejo devem levar em consideração práticas conservacionistas para que os processos erosivos sejam evitados.

Não foi descrito e coletado perfil desse solo devido a sua pouca ocorrência na região; no entanto, foi mapeada uma pequena área, representada pela Unidade de Mapeamento CXd, com base em análises físicas e químicas coletadas em

três profundidades. O Cambissolo foi representado no mapa para dar uma ideia de ocorrência e da localização desse solo na área de estudo.

Considerações finais

A área de estudo apresenta grande variabilidade de solos, diferenciados na paisagem principalmente pela diversificação da geologia local, que se constitui no principal fator de formação dos solos mapeados. Predominam, pela ordem, os Neossolos Quartzarênicos, os Argissolos e os Latossolos.

Assim como na área de estudo, tais solos são também os de maior ocorrência nas áreas irrigadas do Polo de Desenvolvimento de Petrolina/Juazeiro, constituindo um conjunto edáfico de grande importância econômica para a fruticultura irrigada, promotora do desenvolvimento regional. Porém, de modo geral, todos apresentam fragilidades em graus distintos, sendo que os Neossolos Quartzarênicos são os mais frágeis, seguidos dos Argissolos.

Os Neossolos Quartzarênicos situados nas partes mais baixas, cultivados com mangueira sob manejo irrigado, vêm sofrendo influência direta da água aplicada na irrigação ao longo de dezenas de anos, embora essas áreas naturalmente já tenham problemas com saturação hídrica devido à camada impermeável duripã situada a pouca profundidade. Tais solos devem ser mais bem estudados não só para que seja definida com maior precisão a quantidade de água a ser usada, mas também para que se obtenha maior eficiência dos sistemas de drenagem.

As áreas rebaixadas não possuem aptidão e potencial para serem irrigadas, pois são bastante frágeis e suscetíveis à degradação ambiental devido a suas características físicas e químicas, desfavoráveis ao uso agrícola.

Referências

ANDRADE LIMA, D. The caatinga dominium. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 149-153, 1981.

ARAÚJO FILHO, J. C. **Horizontes cimentados em Argissolos e Espodosolos dos tabuleiros costeiros e em Neossolos Regolíticos e Planossolos da depressão sertaneja no Nordeste do Brasil**. 2003. 223 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ARAÚJO FILHO, J. C. de; BURGOS, N.; LOPES, O. F.; SILVA, F. H. B. B. da; MEDEIROS, L. A. R.; MELO FILHO, H. F. R. de; PARAHYBA, R. da B. V.; CAVALCANTI, A. C.; OLIVEIRA NETO, M. B. de; SILVA, F. B. R. e; LEITE, A. P.; SANTOS, J. C. P. dos; SOUSA NETO, N. C. de; SILVA, A. B. da; LUZ, L. R. Q. P. da; LIMA, P. C. de; REIS, R. M. G.; BARROS, A. H. C. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 381 p. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa, 11).

BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, P. E.; TATUMI, S. H. Campo de dunas inativas do médio Rio São Francisco, BA - Marcante registro de ambiente desértico do Quaternário brasileiro. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; QUEIROZ, E. T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M. L. C. (Ed.). **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**. 1. ed. Brasília, DF: DNPM/CPRM, Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, 2002. v. 1, p. 223-231.

BELTRÃO, B. A.; MASCARENHAS, J. de C.; MIRANDA, J. L. F. de; SOUZA JUNIOR, L. C. de; GALVÃO, M. J. da T. G.; PEREIRA, S. N. (Org.). **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: diagnóstico do Município de Petrolina, Estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Recife, 1973. 2 v. (DNPEA. Boletim técnico, 26; SUDENE. DRN. Série pedologia, 14).

BURGOS, N.; CAVALCANTI, A. C. **Levantamento detalhado dos solos da área de sequeiro do CPATSA, Petrolina-PE**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS; Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1990. 2 v. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim de pesquisa, 38. EMBRAPA-CPATSA. Boletim de pesquisa).

CARVALHO, A. P. de; LARACH, J. O. I.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N.

Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidade de mapeamento:

normas em uso pelo SNLCS. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1988. 67 p.
(EMBRAPA-SNLCS. Documentos, 11).

CHAGAS, C. da S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica de domínio de mar de morros.** 2006. 239 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).

CODEVASF. **Inventário dos projetos privados de irrigação do Submédio São Francisco:** Carta Topográfica do Vale do São Francisco. Seção inferior do médio São Francisco. Folha 16. Brasília, DF, 1956. Escala 1:25.000.

CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 22., 1989, Recife. **Guia de excursão.** Recife: SBCS: EMBRAPA-SNLCS-Frente Regional Nordeste, 1989. 72 p. Editado por Paulo Klingner T. Jacomine, Luiz Bezerra de Oliveira, Antonio Cabral Cavalcanti.

DANTAS, J. R. A. **Mapa geológico do Estado de Pernambuco:** texto explicativo. Recife: DNPM, 1980. 112 p. il. 2 mapas. Escala 1:500.000.

GOOGLE. **Google earth:** image digital globe. 2015. Escala variável. Disponível em: <<https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/download/ge/agree.html>>. Acesso em: 10 set. 2015.

JACOMINE, P. K. T. Solos sob caatingas: características e uso agrícola. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentável.** Viçosa, MG: SBCS: UFV, 1996. 930 p.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. A conditioned latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. **Computers & Geoscience**, v. 32, n. 9, p. 1378-1388, Nov. 2006.

PETRI, S.; FÚLFARO, V. J. **Geologia do Brasil.** São Paulo: EDUSP, 1983. 631 p.

REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 1979, Rio de Janeiro. **Súmula...** Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1979. 83 p. (Embrapa-SNLCS. Série Miscelânea, 1).

SANTOS, H. G. dos; HOCHMÜLLER, D. P.; CAVALCANTI, A. C.; RÊGO, R. S.; KER, J. C.; PANOSO, L. A.; AMARAL, J. A. M. do. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI; Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 108 p.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p. il.

SILVA, F. B. R.; RICHÉ, G. R.; TONNEAU, J. P.; SOUZA NETO, N. C.; BRITO, L. T. L.; CORREIA, R. C.; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, F. H. B. B.; SILVA, A. B.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LEITE, A. P. **Zoneamento agroecológico do Nordeste**: diagnóstico do quadro natural e agrossocioeconômico. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA; Recife: EMBRAPA-CNPS, Coordenadoria Regional Nordeste. 1993. 2 v. (EMBRAPA-CPATSA. Documentos, 80).

SISTEMA Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

Capítulo 6

Potencial natural de erosão e geotecnologias para a classificação de capacidade de uso dos solos

Luís Carlos Hernani; Cesar da Silva Chagas;
Alexandre Ortega Gonçalves; Adoildo da Silva Melo

Introdução

O significativo desenvolvimento tecnológico agrícola no Brasil tem incrementado continuamente a produção e a produtividade de alimentos, fibras e bioenergia. No entanto, a ocupação, o uso e o manejo dos recursos naturais mais frágeis têm gerado, ao longo do tempo, diferentes níveis de deterioração ambiental.

Em agrossistemas onde os atributos dos recursos naturais apresentam diferentes níveis de limitação ao uso, a gestão não racional do solo, da água e da biodiversidade pode promover, em poucos anos, degradação e queda na produtividade agrícola e impactos negativos ambientais. Entre as formas de degradação, a erosão dos solos pela água é uma das principais ameaças, com impactos negativos sobre o ecossistema em geral, a produção agrícola, a qualidade da água e o estoque de carbono (PANAGOS et al., 2015).

Solos Frágeis são os que apresentam características intrínsecas e/ou ocupam posição na paisagem que lhes conferem baixa resiliência e elevada suscetibilidade à degradação física, química e biológica quando submetidos à ação antrópica. Esses solos precisam, portanto, de especial atenção por parte dos agentes agrícolas, usuários e técnicos por exigirem extremo cuidado e estratégias especiais para o seu uso e manejo sustentável.

O geoprocessamento tem sido importante no auxílio da caracterização de recursos naturais ao facilitar e agilizar as técnicas de mapeamento. Essa ferramenta também tem sido utilizada para estudos de classificação da aptidão de terras a partir de mapeamentos em escalas de menor detalhe. Em escalas maiores para definição e espacialização da capacidade de uso de terras ao nível de propriedades agrícolas, tem sido usado o cruzamento do mapa de solos com a declividade (LEPSCH et al., 2015). No entanto, considera-se que o Potencial Natural de Erosão (PNE) é um fator que pode definir maior rigidez ao processo de classificação da capacidade de uso em pequenas bacias hidrográficas e em propriedades agrícolas onde o levantamento de dados se deu em escala de detalhe. A razão disso é que, para o cálculo do PNE, além da declividade, também se leva em consideração a erodibilidade do solo, a erosividade e o comprimento de rampa.

Este trabalho tem por objetivo comparar o uso do Potencial Natural de Erosão (PNE) ao método convencional como critério de levantamento de informações em escala de mapeamento detalhada e definição de classes de capacidade de uso de solos em áreas ambientalmente frágeis.

Área de estudo

Para desenvolvimento da pesquisa, foi selecionada, em 2011, uma área da Fazenda Araucária, no município de Mineiros, GO, com aproximadamente 965 ha. Essa área, que é parte da microbacia do Ribeirão Queixada, afluente do Rio Araguaia, encontra-se a 810 m de altitude, entre as coordenadas UTM 8029536 e 8033161mN e 286331 e 289169mE, zona 22S (Figura 1).

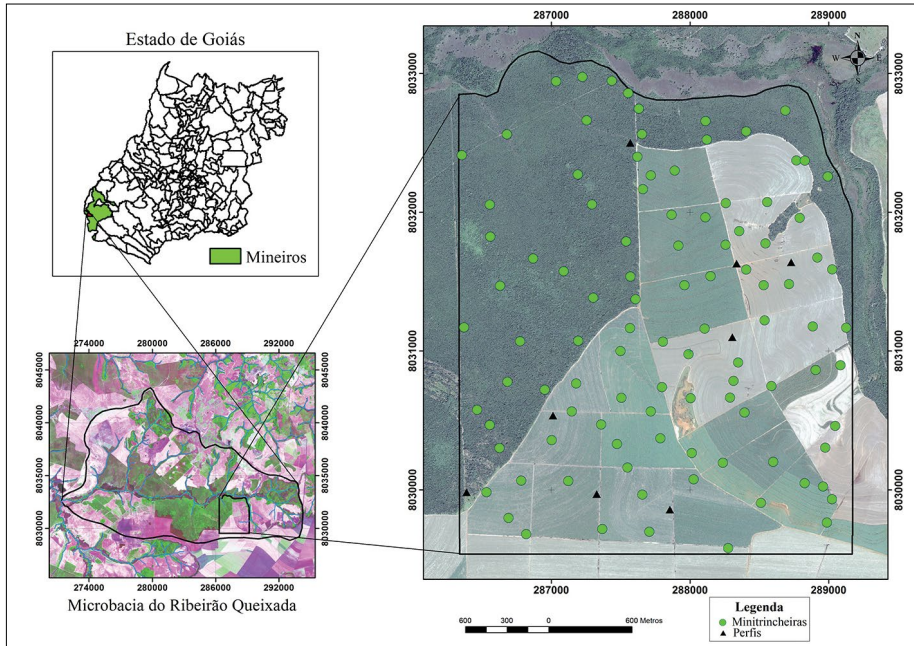


Figura 1. Localização da área de estudo na Fazenda Araucária, em Mineiros, GO, com indicação dos pontos de coleta das amostras de solos.

Fonte: Martins e Chagas (2015).

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima tropical Aw, chuvoso (quente e úmido, com verão úmido e inverno seco), com temperatura média anual de 18 a 32° C e precipitação pluvial média anual em torno de 1700 mm, sendo que o período chuvoso se estende de novembro a maio, ocasião em que são registradas mais de 80% do total das chuvas do ano. Veranicos ocorrem em plena estação chuvosa, geralmente nos meses de janeiro a março, normalmente com duração de cerca de 10 a 15 dias, podendo, eventualmente, prolongar-se por um tempo maior (CARNEIRO et al., 2009).

A região apresenta relevo variando de plano a suave ondulado, onde são encontrados predominantemente Neossolos Quartzarênicos, derivados de Arenitos da Formação Botucatu e Latossolos Amarelos, Vermelho-Amarelos e Vermelhos, todos desenvolvidos de Coberturas Detrito-Lateríticas do Terciário (PROJETO RADAMBRASIL, 1983).

Base de dados de solos

Inicialmente, foi elaborado um Modelo Digital de Elevação (MDE) da área, com resolução espacial de 5 m, com base nas curvas de nível e equidistância vertical de 1 m, obtidas a partir da restituição planialtimétrica de imagens do sensor Ikonos. Nesse procedimento, foi utilizada a opção *Topo to Raster* do programa ArcGIS Desktop 10.1 (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2010). Esse MDE, sem depressões espúrias, foi utilizado para derivar os atributos topográficos: elevação, declividade, curvatura e sombreamento do relevo, conforme Chagas (2006).

Em seguida, esses atributos foram utilizados para auxiliar na determinação dos locais para a coleta das amostras de solos através do programa *conditioned Latin Hypercube Sampling* - cLHS (MINASNY; MCBRATNEY, 2006). Esse método, além de ser uma técnica de redução de variância, também pode ser usado como uma técnica de seleção amostral, na qual menos amostras são necessárias para se obter uma distribuição mais representativa das características ambientais da área estudada (SALIBY, 1997). Nessa técnica, o número de sorteios é diretamente proporcional à probabilidade de cada faixa (MINASNY; MCBRATNEY, 2002). Dessa maneira, as informações inseridas no cLHS foram a elevação, a declividade e a curvatura do terreno. Além destas, foi considerado também o uso e a cobertura do solo por meio do Índice de Vegetação Normalizada (NDVI), obtido a partir de uma imagem do sensor ETM+ do LANDSAT 5, do ano de 2011.

A fase seguinte consistiu da descrição e coleta das amostras de solos nos 100 locais selecionados pela técnica do cLHS (Figura 1). O total de pontos estipulados (100) foi dividido aleatoriamente em amostras de calibração (75) e amostras de validação (25), nas quais os solos foram coletados em minitrincheiras nas profundidades 0-20 cm e 60-80 cm. Adicionalmente, para caracterizar e classificar os diferentes solos identificados na área, também foram descritos morfologicamente e coletados oito perfis completos, de acordo com Santos et al. (2005). Todas as amostras coletadas foram encaminhadas para o laboratório da Embrapa Solos, onde foram destorroadas, peneiradas em malha de 2 mm e secas ao ar para a obtenção da chamada Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) e a quantificação volumétrica das frações calhaus (2 - 20 cm)

e cascalhos (2 - 20 mm), e, posteriormente, submetidas às análises, seguindo procedimentos constantes em CLAESSEN (1997). Foram determinados: composição granulométrica da terra fina, Argila Dispersa em Água (ADA), grau de floculação, relação silte/argila, densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp) e porosidade; pH em H₂O e em KCl 1N, bases trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺), soma de bases (valor S), percentagem de saturação por bases (valor V), acidez extraível, alumínio (Al³⁺) trocável, capacidade de troca de cátions (valor T), percentagem de saturação por alumínio (m%), fósforo assimilável, carbono orgânico, nitrogênio total (Kjeldahl), ataque sulfúrico (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MnO).

Com base nas descrições morfológicas e nos resultados das análises químicas e físicas de amostras dos perfis e minitrincheiras, foi elaborado o levantamento de solos da área na escala 1:10.000, com o uso de geoprocessamento (Figura 2).

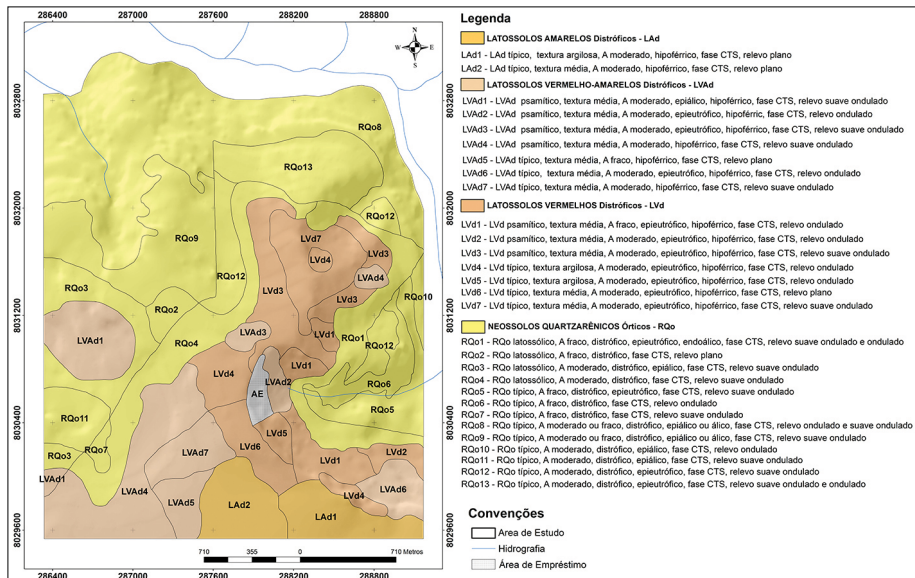


Figura 2. Mapa de solos na escala 1:10.000, de parte da Fazenda Araucária, em Mineiros, GO.

Fonte: Martins e Chagas (2015).

Classificação da capacidade de uso do solo

Para a determinação das classes de capacidade de uso do solo, foram utilizados dois procedimentos:

1) uso da base de dados sobre o levantamento detalhado de solos do projeto “Novos paradigmas no conhecimento de solos frágeis para a produção agrícola sustentável do Brasil – Fragissolo” e de geotecnologias para estimar o Potencial Natural de Erosão (PNE); e

2) uso do método tradicional com adaptações.

O PNE, que do modelo da RUSLE considera apenas os parâmetros do meio físico para estimar perdas de solo em áreas sem qualquer intervenção antrópica, foi estimado com base na Equação 1:

$$PNE = K * R * LS \quad (1)$$

Onde:

- PNE = Potencial Natural de Erosão, em $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$;
- K= fator erodibilidade do solo, em $t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$;
- R= fator erosividade, dado em $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; e
- LS = fator comprimento de rampa e declividade, adimensional.

O fator K foi obtido a partir dos resultados analíticos de amostras da profundidade 0-20 cm do solo, coletadas em 100 pontos georreferenciados e em oito perfis com descrição completa da área de estudo (Figura 1), utilizando a Equação 2, proposta por Denardin (1990):

$$K = 7,48 \cdot 10^{-6} \times M + 4,48059 \cdot 10^{-3} \times P - 6,3117 \cdot 10^{-2} \times DMP + 1,039567 \cdot 10^{-2} \times R \quad (2)$$

Onde:

- K = erodibilidade do solo;
- M = $\{(\text{areia fina} + \text{silte}) \times [(\text{areia fina} + \text{silte}) + \text{areia grossa}]\}$, em %;

• P = inferido a partir da permeabilidade média obtida em campo para cada perfil (8), adotando-se os valores dos códigos definidos, conforme Tabela 1;

• $DMP = [(0,65 \times \text{areia grossa}) + (0,15 \times \text{areia fina}) + (0,0117 \times \text{silte}) + (0,00024 \times \text{argila})] / 100$; e

• $R = [\text{areia grossa} \times (\text{teor de MOS}/100)]$.

A permeabilidade do perfil solo (P) foi baseada em valores médios (duas repetições) obtidos para a Taxa de Infiltração Básica (TIB), avaliada com anéis concêntricos, no entorno dos perfis descritos. Para a definição de códigos e classes de Permeabilidade (P), foram utilizados os dados da Tabela 1.

Tabela 1. Classes de permeabilidade do solo (Ksat)

Permeabilidade	Classe	Limite (mm h ⁻¹)
1	Muito Baixa	<5,0
2	Baixa	5,0-20,0
3	Baixa a Moderada	20,0-63,5
4	Moderada a Alta	63,5-127,0
5	Alta	127,0-254,0
6	Muito Alta	≥ 254,0

Fonte: adaptado de Beutler et al. (2001) e Soil Survey Staff (1975).

Após a determinação dos valores de K para cada um dos pontos amostrais, foi realizada a espacialização deste parâmetro para toda a área em estudo. Nesse procedimento, foi utilizada a cokrigagem (CK). Para tanto, do total de amostras consideradas (108), 83 foram utilizadas para a calibração do modelo e 25 para a validação.

A CK é um procedimento geoestatístico segundo o qual diversas variáveis regionalizadas podem ser estimadas em conjunto, com base na correlação espacial entre si. É uma extensão multivariada do método da krigagem quando, para cada local amostrado, obtém-se um vetor de valores em lugar de um único valor (LANDIM et al., 2002). Assim, segundo Carvalho Junior et al. (2014), a CK permite a predição de uma variável Z (fator K) a partir de um conjunto de dados conhecidos através da correlação com outra(s) variável(is).

A CK foi implementada no R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013) e o desempenho do modelo, calculado a partir das amostras de validação, foi obtido pelo cálculo da correlação entre os valores observados e os valores estimados através do coeficiente de determinação (R^2).

O fator R foi estimado com base em Foster et al. (1978) e Wischmeier e Smith (1978), utilizando a somatória da média mensal do índice de erosividade EI_{30} , mediante a Equação 3.

$$R = \sum_1^{12} EI_{30} \quad (3)$$

Onde:

- R = erosividade, em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹; e
- EI_{30} = média mensal do índice de erosividade de chuvas, em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, determinado com base na Equação 4.

$$EI_{30} = 67,355 \times (r^2/p) \times e^{0,85} \quad (4)$$

Onde:

- r = precipitação média mensal (mm);
- p = precipitação média anual (mm).

Os dados de precipitação são da fonte Hidroweb/ANA para o Município de Mineiros, GO e para o período 1969-2006.

O fator LS foi determinado a partir do modelo digital de elevação da área com 5 m de resolução espacial, utilizando o método proposto por Moore et al. (1991) no *software* SAGA GIS.

O mapa do Potencial Natural de Erosão (PNE) da área de estudo foi gerado com base na equação 1 através de uma álgebra de mapas, utilizando o módulo *Raster Calculator* do ArcGIS Desktop 10.1 (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2010). O mapa final do PNE da área foi reclassificado e, posteriormente, relacionado às classes de capacidade de uso. Para isso, utilizou-se a proposição estabelecida conforme a Tabela 2. Tal proposição resultou de adaptações baseadas em Bertoni e Lombardi Neto

(1999), Corrêa e Ferreira Pinto (2012) e Nascimento (1998), sendo que as classes de PNE e as de capacidade de uso do solo foram ajustadas visando estabelecer critérios mais rígidos para a classificação da capacidade de uso.

De modo a permitir uma comparação com o procedimento baseado no PNE, também foi realizado o levantamento de dados a campo para a classificação da capacidade de uso dos solos da área de estudo. Foram utilizadas observações visuais de campo sobre fatores da fórmula mínima (profundidade efetiva, textura, permeabilidade, erosão aparente e declividade) mediante adaptação de procedimentos propostos por Lepsch et al. (1991).

Tabela 2. Correspondência entre Classes de PNE e Classes de Capacidade de Uso do Solo.

PNE (t ha⁻¹ ano⁻¹)	0-5	5-10	10-100	100-200	200-600	600-1000	>1000
Capacidade de Uso	I	II	III	IV	VI	VII	VIII

Obs.: a classe de PNE 0-5 t ha⁻¹ ano⁻¹ em declive 0-3% define a classe de Capacidade de Uso V.

Para definir correlações entre a capacidade de uso e os atributos observáveis a campo, foram adotadas adaptações baseadas em Fujihara (2002) e Ribeiro e Campos (1999). A área de estudo apresenta variabilidade mínima quanto à profundidade efetiva (solos com > 100 cm de profundidade) e quanto à textura dos perfis (Latosolos de textura média e argilosa e Neossolos Quartzarênicos). Para a permeabilidade, foram utilizadas apenas as classes de ocorrência na área – Moderada, Boa e Excessiva –, correspondendo, respectivamente, às classes de capacidade de uso II, I e II. Para a erosão, foram adotadas as correspondências: Não Aparente – I, Ligeira – II, Ligeira a Moderada – III, Moderada – IV, Moderada a Severa – VI, Severa – VII e Extremamente Severa – VIII. Nesse caso, para a ponderação da definição da classe de capacidade, o uso atual da terra da área de estudo também foi considerado.

Capacidade de uso dos solos e sua relação com o potencial natural de erosão

Fatores K, R e LS

O fator K foi influenciado pela textura, pela permeabilidade de perfis (Ksat) e pelo uso e manejo dos solos. Em apenas um desses perfis foi verificada textura argilosa; nos demais, a textura variou de média a muito arenosa. Os resultados do Ksat obtidos para os perfis representativos encontram-se na Tabela 3. A TIB variou de muito baixa ($4,5 \text{ mm h}^{-1}$) no perfil P77 (LVA Distrófico Típico, textura média) a muito alta ($1.097,1 \text{ mm h}^{-1}$) no perfil P82 (RQ Órtico Típico). Esses resultados foram bastante influenciados pelo tipo de uso da terra, com os perfis localizados na mata (P78 e P82) apresentando valores muito elevados, condizentes com o tipo de solo e a textura. Os valores inferiores da TIB verificados nos demais perfis estão relacionados, possivelmente, com a compactação do solo nas áreas de cana-de-açúcar, causada pelo uso intenso de mecanização, e que foi constatada durante a coleta das amostras no campo.

A erodibilidade calculada nos pontos amostrais variou de 0,040 no perfil P08 (Latossolo Vermelho Distrófico Típico, de textura média) a 0,189 t ha h $\text{ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, no perfil P69 (Neossolo Quartzarênico Órtico Típico). A média geral foi de 0,083, com desvio padrão de 0,023 e coeficiente de variação igual a 27,5%.

Os resultados obtidos neste trabalho são semelhantes aos de Farinasso et al. (2006), que, na região do Alto Parnaíba (PI/MA), obtiveram valores de 0,014 a 0,048 t ha h $\text{ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ para Latossolos Vermelhos Distróficos. Estes resultados foram superiores aos encontrados por Lombardi Neto e Bertoni (1975) para horizontes superficiais de Latossolos do Estado de São Paulo, que variaram entre 0,011 e 0,022; também foram superiores aos de Fujihara (2002), que obteve 0,0175 para Latossolos, e aos de Demarchi (2012), que obteve 0,034 para um Latossolo Vermelho Distrófico. E foram muito superiores aos de Hernani et al. (1997) e Carvalho e Hernani (2001), que obtiveram, respectivamente, 0,0045 e 0,0037 t ha h $\text{ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ para um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, com declive de 3%, em Dourados (MS).

No caso dos Neossolos, os resultados foram superiores aos de Demarchi (2012), que obteve $0,018 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ para um Neossolo Litólico Eutrófico do Município de Santa Cruz do Rio Pardo, SP; Farinasso et al. (2006) e Corrêa (2011), que trabalharam com Neossolos Litólicos Eutróficos (RLe), obtiveram, respectivamente, $0,036$ e $0,053 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

Tabela 3. Taxa de Infiltração Básica (TIB), valores e classes de Permeabilidade (fator P da Equação 2), obtida no entorno dos oito perfis representativos dos solos da área de estudo.

Perfil	Solos	Uso	TIB (mm h ⁻¹)	Valores de P	Classe de P
P76	LAd típico, textura média	Cana	7,5	2	Baixa
P77	LVAd típico, textura média	Cana	4,5	1	Muito Baixa
P78	LVAd psamítico, textura média	Mata	683,0	6	Muito Alta
P79	LVd típico, textura argilosa	Cana	9,0	2	Baixa
P80	LVd típico, textura média	Cana	33,5	3	Baixa a Moderada
P81	LVd psamítico, textura média	Cana	181,5	5	Alta
P82	RQo típico	Mata	1097,1	6	Muito Alta
P83	RQo latossólico	Cana	35,5	3	Baixa a Moderada

LA = Latossolo Amarelo; LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo; LV = Latossolo Vermelho;
RQ = Neossolo Quartzarênico; d = distrófico; o = órtico.

Esses resultados evidenciam a expressiva erodibilidade dos solos da área, que está associada à natureza bastante arenosa dos solos e à permeabilidade reduzida nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Santana et al. (2007), estudando a erodibilidade dos solos da Alta Bacia do Rio Araguaia, verificaram que aproximadamente 75% da área total da bacia está enquadrada nas classes de erodibilidade moderada (30%) e alta (45%).

O mapa do fator K gerado pela cokrigagem é apresentado na Figura 3. O desempenho dessa previsão, medida a partir da utilização do conjunto de amostras de validação independente através do coeficiente de determinação R^2 , mostrou-se bastante satisfatório, com R^2 de 0,63.

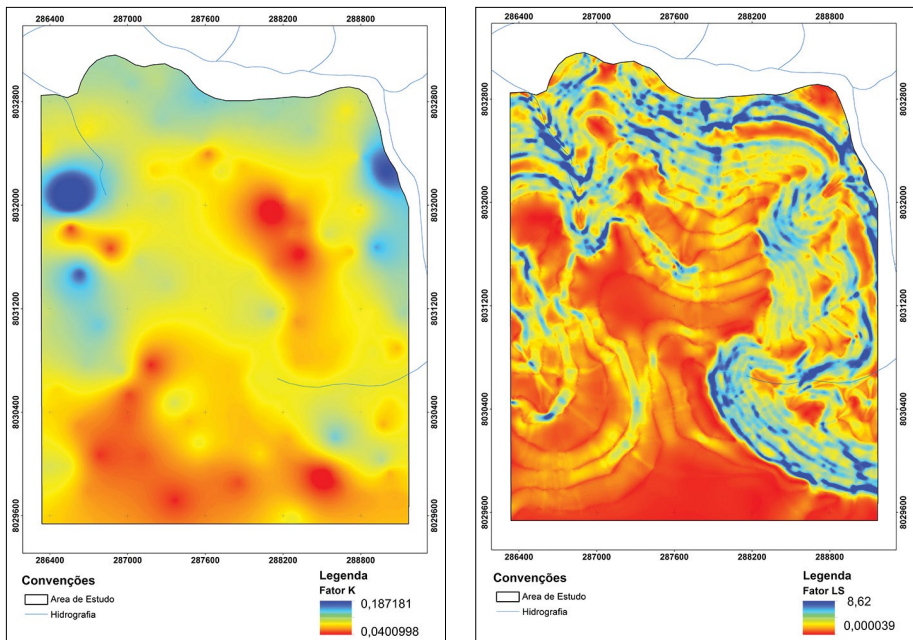


Figura 3. Espacialização dos fatores K e LS para a área de estudo.

Conforme já mencionado, os valores do fator K obtidos variaram, nos perfis utilizados, de 0,040 a 0,189 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹, enquanto que os valores preditos variaram entre 0,040 a 0,187 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹. Dessa maneira, a cokrigagem produziu valores de distribuição espacial bastante próximos dos valores originais dos perfis (Figura 3). Os valores mais elevados são encontrados na parte norte da área, associados a solos de textura arenosa (Neossolos

Quartzarênicos), onde o relevo varia de suave ondulado a ondulado. Por sua vez, os menores valores estão associados com os Latossolos de textura média ou argilosa. Esses resultados são bastante coerentes com as características dos solos da área.

Os Neossolos Quartzarênicos e os Latossolos de textura média apresentam elevada permeabilidade, baixíssima agregação e baixos teores de matéria orgânica, o que os torna pouco coesos e altamente suscetíveis à erosão, principalmente quando ocorrem em condições de relevo ondulado, baixa cobertura vegetal (áreas com cana-de-açúcar em estágio inicial ou pós-colheita com queima) e sob clima com chuvas intensas e de alta erosividade (SCOPEL; SILVA, 2001). De acordo com Santana et al. (2007), essas condições são plenamente encontradas na região onde o estudo foi realizado.

A erosividade anual média obtida para a área em avaliação foi de 8.527 MJ ha mm⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Conforme Santana et al. (2007), a erosividade anual média para a Alta Bacia do Rio Araguaia, onde a área do presente estudo está inserida, varia entre 7.812,33 e 9.654,68, com média de 8.803,85 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, o que caracteriza erosividade forte ou muito alta. Resultados semelhantes, de 8.353,0 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, foram obtidos por Silva et al. (1997) para a região de Goiânia, GO, e por Cabral et al. (2005b), que encontraram média de 8.342 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ para a região englobada pela carta topográfica de Morrinhos, GO. Em estudo realizado no Quênia, em condições tropicais com média anual de chuva de 1.500 mm, Angima et al. (2003) também encontraram valores semelhantes aos do presente estudo.

O mapa do fator LS, apresentado na Figura 3, mostra que, na área de estudo, esse índice variou de 0,000039 a 8,62, com valor médio de 0,645 e desvio padrão de 0,537, sendo que 97,8% dos pontos georreferenciados apresentam valores inferiores a 2. Os valores mais elevados ocorrem nas porções norte e leste da área, associados com relevo que varia de suave ondulado a ondulado (6 a 12%) e, em sua maioria, com solos da classe dos Neossolos Quartzarênicos.

Os resultados obtidos por Cabral et al. (2005a) para a bacia hidrográfica do Reservatório de Cachoeira Dourada (GO/MG) mostram que 76,68% da área possui fator LS entre 0 e 2, sendo que 23,32% estão inseridos em áreas potencialmente críticas quando correlacionadas com o fator erodibilidade.

Potencial Natural de Erosão (PNE) e Classes de capacidade de uso

O valor médio para o PNE obtido na área de estudo foi de 458,05 t ha⁻¹ ano⁻¹, mas os valores desse parâmetro variaram entre 5 a >1000 t ha⁻¹ ano⁻¹. Em 33,3% da área, esse valor variou de 200 a 600; em 26,0%, ficou entre 600 e 1000; e, em 10% da área de estudo, foi maior do que 1000 t ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4).

Tabela 4. Classes de PNE, de capacidade de uso e respectivas áreas.

PNE (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Capacidade de Uso	Área (ha)	Área (%)
0-5	I	0,00	0,00
5-10	II	3,23	0,34
10-100	III	159,54	16,87
100-200	IV	119,38	12,62
200-600	VI	314,76	33,29
600-1000	VII	247,47	26,17
>1000	VIII	94,80	10,03
Área de Empréstimo	-	6,44	0,68
Total	-	945,62	100,00

Os resultados da ocorrência das classes de capacidade de uso obtidos com base no PNE estão na Tabela 4 e o mapa encontra-se na Figura 4. Com base nesse critério, verifica-se que não há terras próprias para cultivos intensivos que não necessitem de práticas intensivas de conservação de solo para seu uso (classe I) na área de estudo. Do mesmo modo, apenas 17,2% da área pode ser cultivada com lavouras, sob certos cuidados e critérios, sendo que, dessas, 16,9% são da classe III, ou seja, terras apropriadas para cultivo de lavouras, mas que exigem a adoção de práticas intensivas de conservação de solo. Nessas áreas ocorrem Latossolos com relevo plano a suave ondulado. A maior parte (776,4 ha, ou 82,1%) da área de estudo foi classificada nas classes de capacidade de uso IV, VI, VII e VIII.

Por essa metodologia, as terras com limitações severas, geralmente inadequadas para cultivos e de uso limitado para pastagens e florestas cultivadas (classe VI), foram as de maior ocorrência na área de estudo (314,8 ha; 33,3%). Além disso, esse método definiu que 94,8 ha (10% da área) apresentam limitações tais que seu uso deve se restringir apenas à proteção da flora e fauna silvestres (classe VIII). Nessas áreas, são encontrados Latossolos Psamíticos e Neossolos

Quartzarênicos, estes últimos ocupando o terço inferior das vertentes. A distribuição das classes de capacidade de uso obtidas a partir das classes de PNE, portanto, se correlaciona positivamente com os níveis de erodibilidade e PNE dos solos e com as feições do meio físico existentes na área de estudo (Figura 4).

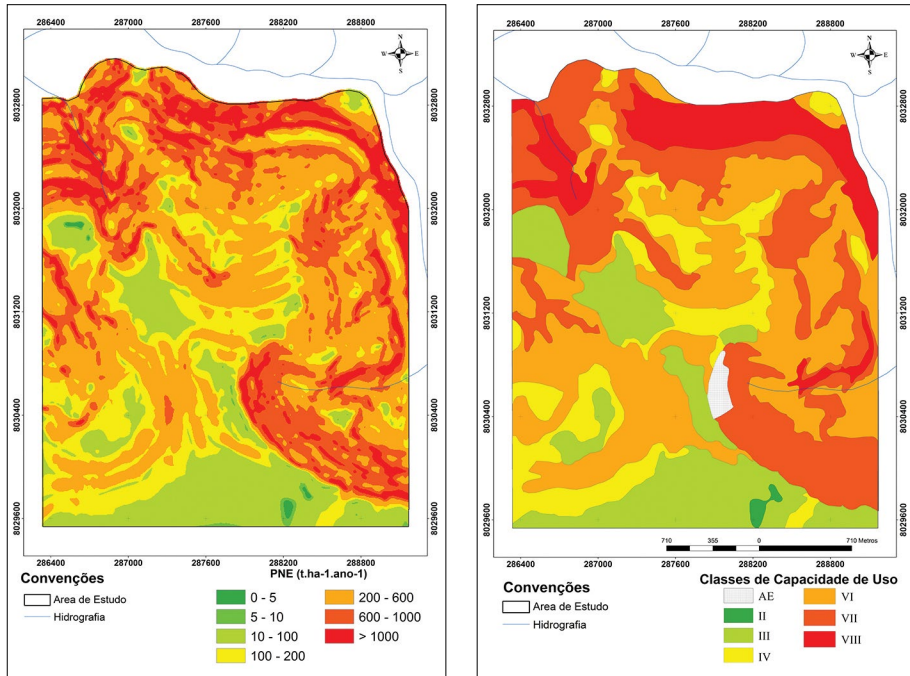


Figura 4. Mapa do Potencial Natural de Erosão (PNE) e Mapa da Distribuição Espacial das Classes de Capacidade de Uso do Solo da área de estudo com base no PNE.

Classes de capacidade de uso do solo – método convencional

A área de estudo apresenta pouca variabilidade quanto à profundidade efetiva (todos os solos têm profundidade > 100 cm) e quanto à textura dos perfis (Latosolos de textura média e argilosa e Neossolos Quartzarênicos arenosos a muito arenosos).

Se a declividade fosse utilizada como base para a classificação da capacidade de uso da área em estudo, indicaria que cerca de 97% do total da área seria de

classes de capacidade de uso menos restritivas: 24,7% na classe I, 31,6% classe II e 41,1% classe III. Em que pesem limitações crescentes definidas para essas classes, a maior parte da área de estudo, nesse caso, poderia ser explorada com qualquer tipo de uso agrícola. Risco semelhante pode ter ocorrido com Atanásio (2004), que obteve a carta de classes de capacidade de uso para a Microbacia do Ribeirão São João em Tietê (SP) mediante o cruzamento dos dados contidos nos planos de informação de solos e de declividade.

Quando se considerou os demais fatores da fórmula mínima e observações visuais de campo, próprios do método convencional, os resultados foram os descritos na Tabela 5 e os apresentados no mapa da Figura 5. Verifica-se que 37,6% das terras da área de estudo foram classificadas como próprias para culturas anuais, sendo que 9% da área de estudo (cerca de 89 ha) foi classificada como classe I (terras próprias para cultivos intensivos sem necessidade de práticas de conservação de solo), e 24,4% (230,7 ha) seriam terras recomendadas para culturas com práticas intensivas de conservação de solo (classe III). Cerca de 29% da área de estudo pertenceria à classe IV, com terras próprias para culturas anuais ocasionais, cultivos perenes limitados e culturas em rotação com pastagens, florestas e proteção da fauna e flora silvestre. Cerca de 32% apresentariam limitações severas, sendo inadequadas para cultivos, e restrições severas para uso com pastagens e florestas (classe VI). Ressalta-se, ainda, que apenas 0,7% da extensão da área seria da classe VII e que não haveria terras da classe VIII.

Tabela 5. Classes de Capacidade de Uso definidas pela metodologia convencional (uso dos fatores da fórmula mínima, com adaptações).

Classes de Capacidade de Uso	Área (ha)	%
I	88,91	9,40
II	35,62	3,77
III	230,68	24,39
IV	277,57	29,35
VI	299,68	31,69
VII	6,72	0,71
VIII	0,00	0,00
Área de Empréstimo	6,44	0,68
Total	945,62	100,00

Esses resultados são menos consistentes com o padrão de tolerância à erosão do que ocorrem na significativa maioria dos solos da área de estudo, quando comparados ao uso do PNE para definição das classes de capacidade de uso.

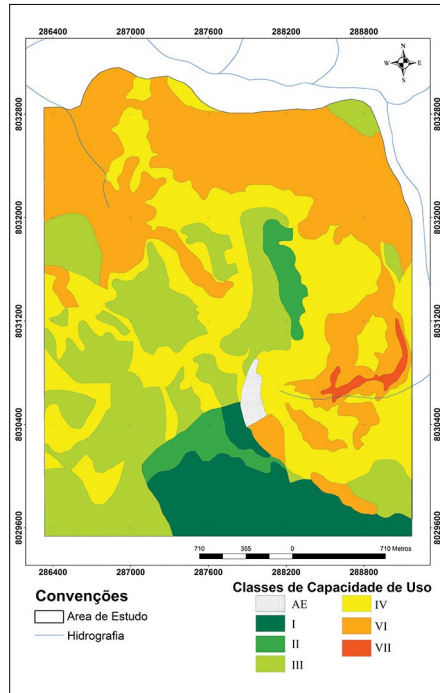


Figura 5. Mapa da distribuição espacial das classes de capacidade de uso do solo da área de estudo obtido com base na metodologia convencional adaptada.

As classes de capacidade de uso definidas pelo PNE, determinado com base em um número razoável de pontos amostrais de campo (1 ponto cada 9,0 ha) e no levantamento detalhado de solos (escala 1:10.000), levam em consideração todos os fatores de observação visual de campo que compõem a fórmula mínima utilizada atualmente nos trabalhos convencionais de avaliação das classes de capacidade de uso do solo, além de acrescentar informações fundamentais ao posterior uso e manejo das terras.

Há que ressaltar, conforme Lepsch et al. (2015), que a determinação da capacidade da terra constitui poderosa ferramenta para o planejamento de uso, pois encerra uma coleção lógica e sistemática de dados de uso direto pelo planejador. Mas, por si só, esse procedimento não fornece todos os elementos necessários ao planejamento das atividades agrícolas a serem desenvolvidas, pois ainda há que se considerar as esferas econômicas, políticas e sociais envolvidas.

Ao analisar os resultados definidos para as classes de capacidade de uso obtidos com base no PNE em relação aos determinados com base no método convencional, verifica-se que o primeiro critério gera resultados finais com maior congruência com as feições e atributos do meio físico do que o segundo, pois distribui melhor as classes de capacidade de uso e indica de forma mais objetiva as limitações ao uso das terras, cujos dados são obtidos com alto nível de detalhe e intensidade de observações no campo. Dessa forma, quando se tem esse nível de detalhamento na obtenção de dados, o método baseado no PNE se caracteriza como uma ferramenta mais poderosa, fornecendo informações mais criteriosas que auxiliam na tomada de decisão quanto à forma de exploração das terras e, assim, pode auxiliar a minimizar os processos de degradação de solo, água e outros recursos naturais.

Considerando que a condição ambiental natural tem de ser conservada o máximo possível visando proporcionar à futura geração humana condições ambientais semelhantes às existentes atualmente, parece razoável induzir que o método usado neste trabalho – baseado no PNE como indicador de classes de capacidade de uso do solo e em procedimentos geotecnológicos – se adéqua muito bem a tais propósitos, gerando melhor qualidade de classificação de terras quanto à sua capacidade de uso.

Considerações finais

A erodibilidade (fator K) da área de estudo foi, em média, $0,083 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, evidenciando a elevada susceptibilidade à erosão hídrica dos solos dessa área; o fator R foi $8.292,45 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, o que indica a forte erosividade à qual a região é exposta; e o fator LS, com média de 0,645, expressa o relevo suavizado da área em estudo. Conseqüentemente, o potencial natural de erosão

médio obtido foi de 458,05 t ha⁻¹ ano⁻¹, mas valores entre 200 e 1000 t ha⁻¹ ano⁻¹ foram muito frequentes, definindo um elevado potencial natural de perda de solo por erosão hídrica.

Pela metodologia baseada no potencial natural de erosão dos solos, 82% da área de estudo foi enquadrada nas classes de capacidade de uso IV, VI, VII e VIII, enquanto a metodologia convencional enquadrou a maior parte da área (61%) nas classes IV e VI, mostrando que a classificação da capacidade de uso de terras com base no potencial natural de erosão de solos foi mais coerente e consistente com as condições do meio físico do que o resultado obtido com a utilização da metodologia convencional.

Quando se tem informações de campo em escala detalhada, o método baseado no PNE se caracteriza como uma ferramenta mais poderosa, fornecendo informações mais criteriosas que auxiliam a tomada de decisão quanto à definição de classes de capacidade de uso, tipos de práticas conservacionistas e formas de exploração das terras.

O uso de geotecnologias para delineamento de classes de capacidade de uso de terras como base para planejamento conservacionista no âmbito de pequenas bacias hidrográficas e ou empreendimentos agrícolas é racional e promissor.

Referências

ANGIMA, S. D.; STOTT, D. E.; O'NEILL, M. K.; ONG, C. K.; WEESIES, G. A. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 97, p. 295-308, 2003.

ATTANASIO, C. M. **Planos de manejo integrado de microbacias hidrográficas com uso agrícola**: uma abordagem hidrológica na busca da sustentabilidade. 2004. 193 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4. ed. Campinas: Ícone, 1999. 355 p.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.

CABRAL, J. B. P.; BECEGATO, V. A.; SCOPEL, I.; LOPES, R. M. Estudo da erosividade e espacialização dos dados com técnicas de geoprocessamento na carta topográfica de Morrinhos-Goiás/Brasil para o período de 1971 a 2000. **GeoFocus**, v. 5, p. 1-18, 2005a.

CABRAL, J. B. P.; BECEGATO, V. A.; SCOPEL, I.; LOPES, R. M. Uso de técnicas de geoprocessamento para mapear o potencial natural de erosão da chuva na bacia hidrográfica do reservatório de Cachoeira Dourada – GO/MG. **Revista RA'E GA**, Curitiba, v. 10, p. 107-116, 2005b.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 147-157, 2009.

CARVALHO, M. P.; HERNANI, L. C. Parâmetros de erosividade da chuva e da enxurrada correlacionados com perdas de solo e erodibilidade de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, p. 137-146, 2001.

CARVALHO JUNIOR, W.; LAGACHERIE, P.; CHAGAS, C. S.; CALDERANO FILHO, B.; BHERING, S. B. A regional-scale assessment of digital mapping of soil attributes in a tropical hillslope environment. **Geoderma**, v. 232, p. 479-486, 2014.

CHAGAS, C. da S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica de domínio de mar de morros**. 2006. 239 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise do solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212 p. (Embrapa-CNPS. Documentos, 1).

CORRÊA, E. A. **Caracterização da cobertura vegetal na Equação Universal de Perda de Solos (fator C) por meio de geotecnologias**. 2011. 167 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

CORRÊA, E. A.; FERREIRA PINTO, S. A. Avaliação do potencial natural de erosão da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande (Ipeuna-SP). **Revista Geonorte**, Manaus, v. 2, n. 4, p. 1356-1367, 2012. Edição especial.

DEMARCHI, J. C. **Geotecnologias aplicadas à estimativa de perdas de solo por erosão hídrica na Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas, município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP**.

2012. 150 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. 81 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS Desktop**. Version 10. Redlands, CA, 2010.

FARINASSO, M.; CARVALHO JUNIOR, O. A. de; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perdas de Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba – PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Uberlândia, v. 7, n. 2, p. 73-85, 2006. Disponível em: <http://ugb.org.br/home/artigos/SEPARATAS_RBG_Ano_7_n_2_2006/RBG_Ano_7_n_2_2006_73_85.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2015.

FOSTER, G. R.; McCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 36, p. 355-359, 1981.

FUJIHARA, A. K. **Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste Paulista com suporte de geoprocessamento**. 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

HERNANI, L. C.; SALTON, J. C.; FABRICIO, A. C.; DEDECEK, R.; ALVES Jr., M. Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, p. 667-676, 1997.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R.; MONTEIRO, R. C. **Exemplos de aplicação da cokrigagem**. Rio Claro, SP: Unesp, 2002. 18 p. (Texto didático, 9). Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 1 out. 2015.

LEPSCH, I. F.; BELLINAZZI JR., R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso: 4ª aproximação**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. 175 p.

LEPSCH, I. F.; ESPINDOLA, C. R.; VISCHI FILHO, O.; HERNANI, L. C.; SIQUEIRA, D. S. **Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Viçosa, MG: SBCS, 2015. 170 p.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Erodibilidade de solos paulistas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1975. 12 p. (Boletim técnico, 27).

MARTINS, A. L. da S.; CHAGAS, C. da S. Identificação e mapeamento de solos frágeis no Município de Mineiros, GO. In: CASTRO, S. S. de; HERNANI, L. C. (Ed.). **Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. pt. 1, cap. 2, p. 51-72.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B. Uncertainty analysis for pedotransfer functions. **European Journal of Soil Science**, v. 53, p. 417–430, 2002.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. **Computer and Geoscience**, v. 32, p. 1378-1388, 2006.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30, 1991.

NASCIMENTO, M. A. L. S. **Bacia do rio João Leite: influência das condições ambientais naturais e antrópicas na perda de terra por erosão laminar**. 1998. 176 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; POESEN, J.; BALLABIO, C. LUGATO, E.; MEUSBURGER, K.; MONTANARELLA, L.; ALEWELL, C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. **Environmental Science & Policy**, v.54, p. 438-447, 2015.

PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SE.22 - Goiânia: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, 1983. 768 p. (Levantamento de recursos minerais, 31).

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <<http://www.r-project.org/isbn 3-900051-07-0>>. Acesso em: 8 maio 2013.

RIBEIRO, F. L.; CAMPOS, S. Capacidade de uso da terra no alto Rio Pardo, Botucatu, SP, através do Sistema de Informação Geográfica. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 14, n. 1, p. 48-60, 1999.

SALIBY, E. Descriptive Sampling: an improvement over Latin hypercube sampling. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1997, Atlanta. **Proceedings...** New York: Institute of Electrical and electronics Engineers, 1997. p. 230-233.

SANTANA, M. P.; CASTRO, S. S.; STONE, L. F.; SILVA, S. C. Chuvas, erosividade, erodibilidade, uso do solo e suas relações com focos erosivos lineares na alta bacia do rio Araguaia. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 19, n. 2, p. 103-121, 2007.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. rev. e ampl. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.

SCOPEL, I.; SILVA, M. R. Erodibilidade no Estado de Goiás. **Uniciência**, Anápolis, v. 8, n. 1/2, p. 123-132, 2001.

SILVA, M. L. N.; DE FREITAS, P. L.; BLANCANEUX, P.; CURI, N. Índices de erosividade das chuvas da região de Goiânia, GO. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 32, p. 977-985, 1997.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil taxonomy**: a basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. Washington, DC: USDA, 1975. 930 p. (Agriculture handbook, 436). Disponível em: <ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil_Taxonomy/keys/1975tax.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2015.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA, 1978. 58 p. (Agriculture handbook, 537).

Capítulo 1

Dinâmica da fertilidade em solos frágeis

Flávia Cristina dos Santos; Álvaro Vilela de Resende;
Manoel Ricardo de Albuquerque Filho; Ana Luiza Dias Coelho Borin;
Alexandre Martins Abdão dos Passos

Introdução

A recente incorporação ao processo produtivo de solos frágeis, como os de textura leve, com proporções expressivas de areia na sua composição granulométrica, e que são o tema deste capítulo, impôs a toda comunidade científica a necessidade de desenvolvimento de pesquisas que pudessem contemplar a dinâmica da fertilidade do solo, uma vez que, nesses solos, os aspectos relacionados à acidez, pobreza em nutrientes e matéria orgânica e baixa retenção de água, são mais críticos para o manejo agrícola sustentável. Mais especificamente, esses solos apresentam baixa capacidade de troca de cátions (CTC) e, conseqüentemente, menor retenção de elementos como o nitrogênio (N) e potássio (K) adicionados na adubação. Por outro lado, apresentam também baixo poder tampão em relação ao fósforo (P), devido à menor adsorção, e ao pH, o que, em princípio, implicaria na necessidade de menores quantidades de adubo fosfatado e de calcário para manter condições ideais ao desenvolvimento das culturas.

Essas características demandam, portanto, um manejo específico da fertilidade, de forma a permitir o uso sustentável desses solos para a prática

agrícola, conciliando maior rentabilidade ao agricultor e menor risco de impactos ambientais negativos.

Reação do solo e resposta à calagem

Sabe-se que a acidificação do solo é um processo natural e sua intensidade depende de fatores intrínsecos do solo e das perturbações a que o sistema é submetido (KAMINSKI; RHEINHEIMER, 2000). Os solos de textura leve apresentam maior permeabilidade e menor retenção de água e cátions, sendo assim mais lixiviáveis e, portanto, mais pobres em nutrientes e, conseqüentemente, ácidos. Aliado ao seu pequeno poder tampão, tanto devido ao baixo teor de matéria orgânica, quanto ao baixo teor de argila, espera-se que com pequenas quantidades de calcário haja uma expressiva elevação do pH do solo, atingindo os níveis adequados para o cultivo, que se situam entre 5,5 e 6,5 (pH em água).

Em experimento de Gatiboni et al. (2003), em solo arenoso, a aplicação superficial de calcário ($3,6 \text{ t ha}^{-1}$) elevou o $\text{pH-H}_2\text{O}$ a, no máximo, 5,8 na camada de 2-3 cm, e na camada de 0-1 cm o pH foi de 5,7, ou seja, dentro da faixa adequada.

Em 2013, no Município de Chapada Gaúcha, MG, foi realizado um experimento com calagem em solo de textura arenosa (130 g kg^{-1} de argila), com doses de calcário variando de 0 a 10 t ha^{-1} aplicadas superficialmente e incorporadas a 20 cm de profundidade, com plantio de soja no primeiro ano de cultivo em sistema convencional. Os resultados do primeiro ano mostraram que a calagem aumentou o valor de $\text{pH-H}_2\text{O}$ inicial do solo de 4,5 para o valor de 5,3 com aplicação de 2 t ha^{-1} de calcário, e para 6,3 com a aplicação de 10 t ha^{-1} de calcário (em fase de elaboração).

Estes resultados confirmam que, considerando apenas a reação do solo, pequenas doses de calcário aplicadas em solos de textura leve já são suficientes para a elevação do pH em patamares adequados ao cultivo, e também demonstram que doses mais altas não acarretam elevação acima da faixa de alcalinidade, possivelmente porque, devido ao pequeno poder tampão destes solos, uma parte da dose aplicada fique sem reagir. Conforme Martins (2008), em solos com textura arenosa, o calcário que permanece sem dissolução no

solo, próximo à raiz, neutraliza o hidrogênio (H^+) e libera cálcio e magnésio para complementar a nutrição da planta, mantendo o solo com pH adequado para o crescimento das raízes.

Dinâmica da matéria orgânica

A matéria orgânica do solo (MOS) é um dos atributos de maior importância por ser um dos principais indicadores de sua qualidade. Em se tratando de solos de textura leve, pode-se afirmar que esta importância é ainda maior, pois a capacidade de troca de cátions (CTC) desses solos frágeis é quase que totalmente proveniente do seu teor de MOS. Para exemplificar, em trabalho de Pavan et al. (1985), com caracterização química e mineralógica de sete solos ácidos do Paraná, mostrou que em solos com texturas arenosa e média 80 % da CTC do solo eram provenientes da MOS e Silva et al. (1994) mostraram que cerca de 78 % da CTC de solos de textura média e arenosa do Oeste da Bahia também provinham da MOS.

Desta forma, conhecer a dinâmica da MOS assume relevância, pois uma das principais preocupações que se deve ter ao manejar ou cultivar o solo é a manutenção ou mesmo o aumento da MOS, visando a sustentabilidade agrícola. Todavia há que se considerar que a dinâmica de MOS sofre influência de uma série de fatores, bióticos e abióticos, destacando-se a matriz mineral do solo, que tem grande interferência sobre a quantidade e a qualidade da fração orgânica. Estudos mostram que os teores de MOS são geralmente proporcionais aos teores de argila em diversos ambientes, com destaque para os solos das regiões tropicais (TELLES et al., 2003; TOGNON et al., 1998). Neste sentido, a textura do solo está diretamente relacionada à dinâmica da MOS, uma vez que a adsorção de componentes orgânicos às superfícies minerais os protege da decomposição microbiana (LADD et al., 1993).

Sendo essas reações de superfície, a área superficial disponível para interação é um fator importante e, considerando-se as frações granulométricas do solo (areia, silte e argila), a fração argila possui área superficial 50 a 100 vezes maior do que a soma equivalente em massa de areia e silte (STOTZKY, 1986), ou seja, é muito mais reativa. Por isso, os argilominerais e os óxidos são os principais minerais responsáveis pela interação com a MOS e, dentre

os argilominerais, os que apresentam expansividade são os mais efetivos na proteção (BAYER; MIELNICZUK, 2008).

Para melhor explicitar esta dinâmica, estudo de Feller (1999), com análise do fracionamento por tamanho de partículas minerais para a identificação de compartimentos funcionais em solos tropicais com argila de atividade baixa, considerando a divisão das partículas do solo em três diferentes frações (areia, silte e argila), mostrou que a fração grossa, a areia (< 2 e $> 0,05\text{mm}$) apresentou uma importante função biológica na mineralização de C de curto prazo em solos arenosos, mas não em solos argilosos. Já o complexo silte-MOS ($< 0,05$ e $> 0,002$ mm) foi importante no processo de sorção, particularmente para solos arenosos, embora não o seja para argilosos, e o compartimento argila-MOS ($< 0,002$ mm) foi importante para todas as funções estudadas em solos argilosos e, para a CTC, em solos arenosos.

A partir desta interação da MOS com a matriz coloidal pode-se interpretar os acúmulos ou perdas desse componente em solos com uma matriz arenosa ou argilosa. Num solo arenoso, o arranjo das partículas primárias resulta numa distribuição de poros de maior tamanho, o que facilita o acesso microbiano à MOS. Os agentes ligantes orgânicos são oxidados mais facilmente e a estabilidade dos agregados é extremamente dependente da contínua adição de resíduos vegetais e da atividade da fauna. O revolvimento do solo resulta em rápido declínio da MOS e da estabilidade de agregados. Nestes solos, atingir altos níveis de MOS é mais difícil, devido à maior acessibilidade dos decompositores aos componentes orgânicos. Entretanto, os aumentos no teor de MOS podem ser proporcionalmente maiores se comparados aos solos de textura mais fina. Em solos argilosos, especialmente aqueles ricos em óxidos de Fe e Al, a MOS pode ser mantida em altos níveis, principalmente por sua ligação com a fração mineral, a qual oferece a mencionada proteção à MOS contra a decomposição microbiana. O grande número de microporos, cujo diâmetro torna boa parte da MOS inacessível aos decompositores, contribuiu para sua maior estabilidade nesses solos, e assim, o revolvimento do solo resulta em menores perdas da MOS (BAYER, 1996; SILVA et al., 1994). Desta forma, as consequências do manejo do solo dependerão também desta relação MOS-coloides minerais.

Comparando dois solos do Rio Grande do Sul, um Latossolo Vermelho com 680 g kg^{-1} de argila e um Argissolo Vermelho com 220 g kg^{-1} de argila, Bayer

(1996) mostrou que o revolvimento contínuo do solo teve efeitos diferentes sobre a taxa de decomposição da MOS. Enquanto no solo argiloso as taxas de decomposição sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) foram 1,4 % e 1,2 % ao ano, respectivamente, no solo franco, a diferença foi mais acentuada (5,4 % no PC e 2,9 % no PD ao ano). Um estudo de Silva et al. (1994) no Oeste da Bahia, que abrangeu uma área de cerca de 47.000 ha e grupos de solos arenosos, textura média e argilosos, nos quais se avaliou as perdas de MOS ao longo de cinco anos de monocultivo de soja, verificou-se perda do seu estoque inicial na camada de 0-15 cm, de 80, 76 e 41 % nos solos arenosos, de textura média e argilosos, respectivamente. As taxas anuais de perdas de MOS de 0,32; 0,30 e 0,24 % para os arenosos, os de textura média e os argilosos, respectivamente, não diferiram estatisticamente entre si, mas como o teor inicial no solo arenoso é menor, há maior impacto da redução da MOS para a sustentabilidade agrícola nesse ambiente. Como nestes solos a maior contribuição da CTC vem da parte orgânica, sua redução com o tempo de cultivo seguiu a mesma tendência da perda de MOS, com diminuição da CTC em 61, 53 e 29 % nos solos de textura arenosa, média e argilosa, respectivamente, ao longo dos cinco anos de cultivo.

O aporte de resíduos orgânicos e esterco auxilia na manutenção ou incremento da MOS nos sistemas agrícolas (GALVÃO et al., 2008; MITCHELL; SILVA et al., 2007; TU, 2006). Oliveira et al. (2011) amostraram áreas de produção de batata em solos arenosos que receberam esterco durante 15 a 40 anos, totalizando de 4 a 28 t ha⁻¹, e também áreas sob pastagem que não haviam recebido adubação durante 10 anos. Foi verificado que o carbono total (C_{tot}) e o nitrogênio total (N_{tot}) do solo na camada de 0 a 20 cm tiveram acréscimo de mais de 100 % em algumas áreas que vinham recebendo esterco, comparadas às áreas de pastagem sem uso de esterco.

Em pesquisa de Bayer et al. (2000) em dois solos de textura contrastante (Argissolo Vermelho com 220 g kg⁻¹ de argila e Latossolo Vermelho com 620 g kg⁻¹ de argila), submetidos aos sistemas de preparo convencional e plantio direto (PD), observaram-se taxas de perda da MOS bem maiores no Argissolo (4,9 e 2,5 %) do que no Latossolo (1,4 e 1,2 %), sendo o efeito do preparo do solo sobre a perda de MOS mais intenso no primeiro caso. Consequentemente, a taxa de acúmulo líquido de carbono sob PD foi bem maior no Argissolo (0,71 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) do que no Latossolo (0,37 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹).

Assim, como as taxas de perda de matéria orgânica são maiores em solos mais arenosos, sistemas conservacionistas (como o PD) promovem maior acúmulo líquido de carbono nesses solos do que nos solos mais argilosos, ou seja, o benefício do PD é mais evidente e mais impactante nos solos de textura leve.

Dinâmica do nitrogênio

O nitrogênio (N) possui um ciclo complexo envolvendo o sistema solo-planta-atmosfera, e se apresenta em seis estados de valência ou níveis de oxidação (TRIVELIN; FRANCO, 2011). No entanto, as principais formas de N encontradas no solo e absorvidas pelas plantas são o nitrato (NO_3^-) e o amônio (NH_4^+), sendo a primeira a mais frequente. As particularidades de cada uma dessas formas é que, sendo um cátion, o amônio fica ligado eletrostaticamente a superfícies negativamente carregadas dos minerais de argila e grupos funcionais da matéria orgânica do solo, o que limita sua perda por lixiviação. O mesmo não ocorre com o nitrato, que é altamente móvel no solo, e por isso mais sujeito a perdas por lixiviação (CANTARELLA, 2007).

No solo ocorrem várias reações envolvendo o N e umas delas, o processo de nitrificação, converte o N de uma forma pouco móvel a uma forma altamente móvel no solo, e isto interfere na eficiência do uso do N e na qualidade ambiental. Assim, manter o N na forma de NH_4^+ estende seu tempo de permanência na zona radicular, favorecendo sua absorção pelas plantas (SUBBARAO et al., 2006). A nitrificação ocorre rapidamente na maioria dos solos agrícolas com pH adequado, sendo a maior parte do NH_4^+ aplicado nitrificado dentro de quatro semanas. A nitrificação também aumenta o potencial de perda de N por emissões de óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO) e gás nitrogênio (N_2). Em condições de menor umidade a nitrificação é a maior fonte de N_2O do solo (MOSIER, 1998).

Logo, a textura do solo também afeta diretamente a dinâmica de N, tendo em vista: seus diferentes estados de oxidação, que dependem das condições aeróbicas ou anaeróbicas do solo e do pH, suas diferentes associações com os coloides do solo e sua relação com os compostos orgânicos. Assim, em solos de textura leve, que apresentam menor CTC, maior aeração e são mais drenáveis, espera-se um predomínio do N-NO_3^- e uma maior possibilidade de lixiviação

do N. Além disso, como a MOS está menos protegida nos solos de textura leve, espera-se maior mineralização da mesma e liberação de N nestes solos, conforme mostrado em Hassink et al. (1993).

Para exemplificar o efeito da textura nas reações de N no solo, em trabalho de Paulo (2012), em casa de vegetação e com solos de texturas 5, 30 e 45 dag kg⁻¹ de argila, cultivo do algodão e fontes de N, com ou sem inibidor da nitrificação, foi verificado que com a aplicação de ureia (300 kg ha⁻¹ de N) e utilização de inibidor da nitrificação (DMPP), no solo arenoso, o N permaneceu na forma amoniacal até os 40 dias de incubação. Enquanto sem o inibidor a porcentagem de N amoniacal não superou a de N nítrico em nenhum momento da incubação, evidenciando a rápida nitrificação do N proveniente da ureia. Logo, ficou evidente que o uso de inibidor da nitrificação teve mais efeito no solo arenoso, seguido do de textura média e argiloso, e com a fonte ureia.

Além dessa influência, a textura do solo está intimamente relacionada com a lixiviação de N no solo. Estudo de Andrade et al. (2009) em área irrigada do Ceará com a cultura do coco em solo de textura leve (19 dag kg⁻¹ de argila) e aplicações anuais de N de 510 kg ha⁻¹ (envolvendo N mineral, esterco bovino e de galinha) mostrou movimentação de nitrato até cerca de 7 m de profundidade e presença do mesmo íon na água subterrânea em valores superiores aos permitidos para consumo humano.

Entretanto, estudo de lixiviação com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N no algodão cultivado em casa de vegetação e em solos com diferentes texturas, mostrou que a quantidade de N lixiviada (N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺) não diferiu entre os solos. Entretanto, proporcionalmente, foi verificado que no solo arenoso houve uma maior lixiviação de N-NH₄⁺ para as camadas mais profundas (35-55 cm de solo) em relação aos solos de textura média e argilosos. A razão para isso está na menor CTC do solo arenoso que favoreceu a descida do N-NH₄⁺ para as camadas mais profundas do solo. Em todos os solos, houve maior concentração do N-NO₃⁻ nas camadas mais profundas, o que era esperado pelo predomínio de cargas negativas nas camadas mais superficiais do solo.

Corroborando estes dados, experimento de Oliveira et al. (2002) conduzido com cana-de-açúcar em solo arenoso (10 dag kg⁻¹ de argila), sob precipitação de

janeiro a março de 542 mm e de setembro a dezembro de 615 mm e aplicações de doses de N de 0 a 90 kg ha⁻¹, mostrou que não houve perdas significativas de N no solo por lixiviação. As perdas de N foram de 6 % para a adição mineral e como resíduos vegetais. Trabalhos de Fernandes e Libard (2009), Ghiberto et al. (2009), Oliveira et al. (2002), com as culturas do milho em rotação com braquiária e com a cultura da cana-de-açúcar, em solos arenosos e de textura média, com doses de N de até 180 kg ha⁻¹, mostraram baixa lixiviação de N, em torno de 15 %.

A principal informação a ser resgatada destes resultados é que em solos de textura leve o manejo de N merece maior atenção para se evitar as perdas do nutriente, bem como prejuízos ao meio ambiente, como eutrofização dos aquíferos. Entretanto, para avaliar a dinâmica de N nestes solos é preciso considerar outros fatores, além da textura, uma vez que as perdas por lixiviação estão relacionadas, também, ao fornecimento de N ao sistema, à fertilização excessiva, à interação entre as transformações sofridas pelo N, ao balanço hídrico, às propriedades químicas do solo e às características da cultura, como a marcha de absorção do N. Logo, grandes quantidades de N podem ser aplicadas no solo sem que ocorra lixiviação, basta que não haja quantidade suficiente de água para causar drenagem (STEEGE et al., 2001). Assim, a lixiviação de N parece ser um problema sério em anos mais chuvosos, para solos arenosos e em culturas nas quais se aplica nitrogênio em excesso.

Dinâmica do fósforo

O fósforo (P), um dos nutrientes mais limitantes à produção agrícola, é também um dos que tem sua disponibilidade, ou dinâmica no solo, mais relacionada com a textura, bastando ressaltar inclusive que, para a interpretação de sua disponibilidade no solo para as plantas, faz-se necessário considerar esta propriedade física ou mesmo o P remanescente.

Dada a associação do P com os coloides do solo, em que prevalecem ligações covalentes, ou seja, de maior força, o P é um nutriente que é adsorvido ao solo e esta adsorção é tanto maior quanto maior o teor de argila do solo (NOVAIS et al., 2007).

Corrêa et al. (2011) avaliando a adsorção de P em dez solos de Pernambuco, desde textura arenosa ($6,5 \text{ dag kg}^{-1}$ de argila) até argilosa (48 dag kg^{-1} de argila) verificaram que, de maneira geral, em termos de capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), os solos mais argilosos apresentaram os maiores valores (média de 784 mg kg^{-1}) em relação aos de texturas leves (média de CMAP igual a 121 mg kg^{-1}). Verificaram ainda uma correlação significativa entre a CMAP e a argila do solo (0,92). Outros autores também obtiveram resultados semelhantes: Falcão e Silva (2004), Ranno et al. (2007) e indicaram que a correlação positiva e significativa entre o teor de argila e a CMAP demonstra a dependência do processo de adsorção de P e da dinâmica deste elemento com a presença de coloides no solo, ou seja, a magnitude da sorção depende da quantidade de constituintes com capacidade de sorver moléculas de fosfato. Desse modo, a concentração de argila e os atributos a ela associados se correlacionam com a CMAP, ressaltando que a consideração do tipo de argila é muito importante, pois há grande variação na CMAP entre as diferentes argilas do solo.

Diante desta relação, em solos de textura arenosa a dose de P a ser aplicada pode ser menor, como mostram resultados de diversos experimentos relacionando a dose aplicada e o aumento do P disponível no solo. Como exemplo, experimento de campo com feijão em solo arenoso (10 dag kg^{-1} de argila) de Silva et al. (2001) mostrou inclinação da reta para aumento de P de $0,15 \text{ mg dm}^{-3}$ para cada kg de P_2O_5 aplicado (extrator Mehlich 1), sendo a dose de máxima eficiência física (MEF) de 104 kg ha^{-1} de P_2O_5 e a de máxima eficiência econômica (DMEE) de 98 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Outro experimento de campo com feijão vagem em solo arenoso (7 dag kg^{-1} de argila) resultou em mesmo valor de inclinação da reta que o trabalho anterior, com dose MEF de 252 kg ha^{-1} de P_2O_5 e dose de MEE de 231 kg ha^{-1} de P_2O_5 (OLIVEIRA et al., 2005). Já o experimento de Fidalski (1999) com mandioca em solo arenoso do Noroeste do Paraná (13 dag kg^{-1} de argila) mostrou aumento de P de $0,09 \text{ mg dm}^{-3}$ no solo para cada kg de P_2O_5 aplicado (extrator Mehlich 1).

Além disso, o P se movimenta no solo por difusão e a curtas distâncias, em média de $0,5 \text{ mm}$ (BARBER, 1977). Uma série de fatores interfere nesta movimentação, com destaque para a textura, quantidade de água no solo, dose e forma de P aplicado (BAR-YOSEF; SHEIKHOLSLAMI, 1976; LOGAN; MCLEAN, 1973; SHARMA et al., 1985). Alguns autores destacaram que em

solos de textura leve o movimento do P é muito influenciado pelo fluxo de água (LOGAN; MCLEAN, 1973; SHARMA et al., 1985).

Avaliações de laboratório em um solo argiloso (40 dag kg⁻¹ de argila) e quatro de textura leve (entre 7 e 19 dag kg⁻¹ de argila) mostraram que o P se movimentou até a camada de 4-6 cm e 6-8 cm de profundidade no solo mais argiloso que recebeu 150 e 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente, e nos arenosos atingiu até 14-16 cm de profundidade, nas duas doses (FARIA; PEREIRA, 1993). Bar-Yosef e Sheikholslami (1976) verificaram que o P aplicado num solo argiloso se movimentou no sentido horizontal até um raio de 4 e 6 cm, após uma e três irrigações, respectivamente, e no sentido vertical até 5 e 9 cm de profundidade; enquanto no solo arenoso, a migração do P atingiu uma distância duas vezes maior no sentido horizontal e três vezes maior no sentido vertical.

Outro estudo de Bernardi et al. (2007) em cultivo de melão por dois anos consecutivos em Neossolo Quartzarênico com 76 g kg⁻¹ de argila e aplicação de 14 fetirrigações durante o ciclo fenológico de 65 dias, mostraram que houve diferenças significativas entre os teores de P na superfície e na sub-superfície, indicando um aumento do teor do nutriente ao longo do perfil. Foram observados inclusive valores elevados nas camadas inferiores, mesmo com a aplicação do adubo fosfatado no sulco de plantio. Outro efeito a se destacar foram os aumentos dos teores deste macronutriente, do primeiro para o segundo ano de cultivo. Esta migração do P, para camadas mais profundas nos solos arenosos, quando aplicados em doses elevadas também foi observado por Faria e Pereira (1993). Mikkelsen (1989) já havia observado movimentação do P em sistemas com irrigação por gotejamento. A explicação para isto está no fato de que, sob irrigação, em solos de textura mais leve, o P permanece predominantemente em solução e se moverá com a água de irrigação, sendo assim transportado ao longo do bulbo molhado (MIKKELSEN, 1989).

Portanto, se para nutrientes como o N e K há necessidade de maior atenção no manejo em solos de textura leve em condições tropicais, principalmente pela maior possibilidade de perdas por lixiviação, para o P o fato se reverte, sendo que nestes solos a menor adsorção e maior movimentação do nutriente no solo favorecem o fornecimento do mesmo às plantas, resultando em menores doses a serem aplicadas e economia para o produtor.

Dinâmica do potássio

O potássio (K) é um cátion monovalente, sendo retido na matriz coloidal dos solos por ligações eletrostáticas fracas, podendo ocorrer, principalmente em solos de textura leve e com baixa CTC, perda por lixiviação para camadas mais profundas do solo. Assim como o P, o K é transportado por difusão até a zona de absorção, no entanto, o teor de potássio na solução do solo atinge concentrações mais elevadas, conferindo-lhe, assim, maior mobilidade em relação ao fósforo (COSTA et al., 2009).

O coeficiente de difusão de K varia com o conteúdo volumétrico de água e, quanto mais seco estiver o solo mais tortuoso será o caminho da difusão; assim, sempre que o solo seca, diminui a difusão do K (OLIVEIRA et al., 2002). Em água pura o fator de impedância é igual a 1. Mehta et al. (1995) consideram a impedância unitária no caso de solos arenosos com elevada umidade, em que a influência das partículas de argila é muito pequena. Assim, a mobilidade do K em solo arenoso é bem maior que no argiloso.

Experimento de Costa et al. (2009), em casa de vegetação, com três solos, arenoso, argiloso e muito argiloso, oito condições de umidade e dois níveis de compactação para avaliar o fluxo difusivo (FD) de K mostrou que o FD foi menor no solo arenoso em comparação ao argiloso e muito argiloso, o que pode ser explicado pela menor dose de K aplicada no primeiro. Entretanto, embora o solo arenoso tenha apresentado menores valores de fluxo difusivo que os outros dois solos, o acréscimo entre o maior e menor nível de umidade foi maior naquele solo, ou seja, o FD de K seria mais afetado em solo mais arenoso quando secos do que nos argilosos. Além disso, verificou-se que o conteúdo de água teve maior influência no FD do que a compactação.

Devido a maior movimentação do K em solos de textura leve e à sua menor retenção, a preocupação mais comum em relação ao K nestes solos envolve a lixiviação. Entretanto, em experimento conduzido com cana-de-açúcar em solo arenoso (10 dag kg⁻¹ de argila), com precipitação de janeiro a março de 542 mm e de setembro a dezembro de 615 mm, e aplicação de dose de 72 kg ha⁻¹ de K₂O, não mostrou perdas significativas de K no solo por lixiviação. As perdas de K foram de 8 e 4 % para a adição mineral e como resíduos vegetais, respectivamente (OLIVEIRA et al., 2002).

Em um estudo de longo prazo realizado na região Oeste da Bahia em solo de textura leve, entre 2006 – 2013, em sistema de produção de soja/milho em rotação (dados não publicados), no qual se avaliou o modo de aplicação de K (dose única de K aplicada, a lanço, sem incorporação, no plantio ou antecipada a este, ou aplicação de parte da dose no sulco de plantio e parte em cobertura), verificou-se que a forma de aplicação do cloreto de potássio (KCl) nas lavouras de grãos cultivadas nos solos da região Oeste da Bahia poderia ser alterada para a aplicação de toda a dose antecipada ao plantio em superfície e à lanço. Desta forma, nenhum K precisa ser aplicado no sulco de semeadura, o que otimiza a operação de plantio e maximiza a eficiência agronômica do fertilizante potássico. Nesse manejo, a eficiência agronômica e econômica do cloreto de potássio foi aumentada de forma significativa, principalmente para a cultura do milho. Ainda, este trabalho mostrou que a lixiviação de potássio nesse solo foi praticamente nula, pois os teores de potássio disponíveis no solo na camada de 40-60 cm foram praticamente iguais aos do tratamento controle, sem aplicação de potássio. No entanto, conforme Werle et al. (2008), é preciso precaução com a aplicação antecipada do adubo potássico em pré-semeadura em épocas com elevados índices pluviométricos ou na ausência de cultivo, pois poderia levar a perdas de K, porque o nutriente estaria disponível muito cedo e não haveria sincronismo entre a disponibilidade de K e a exigência nutricional da cultura anual.

Outros estudos, entretanto, indicam que há maior risco de perdas por lixiviação de K e contaminação de águas subterrâneas, o que foi observado em trabalhos em colunas com Latossolos de textura média (DONAGEMMA et al., 2008; WERLE et al., 2008) e em campo, com Neossolo Regolítico (GALVÃO et al., 2008). Além disso, em áreas de solos arenosos de Luís Eduardo Magalhães, BA, com uso intenso de fertilizantes potássicos, é comum encontrar teores de K disponível acima de 50 mg dm^{-3} em profundidades superiores a 1,8 m e com pouca chance de recuperação pelas culturas nos sistemas de produção predominantes na região.

No entanto, assim como para o N, a lixiviação de K em solos de textura leve dependerá de uma série de fatores, com destaque para o regime de chuva, a dose aplicada, a cultura, ou sistema de cultivo estabelecido, além da textura do solo.

De qualquer forma, esse nutriente deve ser manejado com cautela, buscando minimizar tais problemas, o que pode ser obtido com boas práticas conservacionistas, como cobertura do solo e rotação de culturas.

Respostas à adubação NPK em solo de textura leve

Foi instalado um experimento em área comercial da Fazenda Xanxerê, em Correntina, BA, nas safras 2010/2011, com cultura do milho, e 2011/2012 e 2012/2013 com cultivo do algodão, em sistema PD, sob sequeiro. O solo foi classificado como Latossolo Amarelo distroférico típico, com as seguintes características químicas e físicas antes da instalação do experimento: pH H_2O = 6,63, Al = 0,01; Ca = 1,47; Mg = 0,42; T = 3,54 ($cmol_c\ dm^{-3}$); P = 20,23; K = 51,74 ($mg\ dm^{-3}$); V = 65,36 %; teor de argila e matéria orgânica = 22,0 e 0,9 ($dag\ kg^{-1}$), respectivamente.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso em parcelas subdivididas, com três repetições. Os tratamentos consistiram de um fatorial 4x3, envolvendo quatro níveis de $P_2O_5-K_2O$ aplicadas antecipadamente ao plantio (0; 0,5; 1 e 1,5 vezes a dose aplicada pelo produtor) nas parcelas e três combinações de doses de N aplicadas em cobertura (0; 0,5 e 1 vez a dose aplicada pelo produtor) nas subparcelas. Para o milho, o nível 1 de N- $P_2O_5-K_2O$ foi igual a 140-75-145 e para o algodão, 200-100-180 $kg\ ha^{-1}$. Cabe ressaltar que os tratamentos foram aplicados anualmente.

As cultivares utilizadas foram milho Pioneer 30F53 na safra 2010/2011, algodão Bayer Fibermax 993 na safra 2011/2012 e Bayer Fibermax 910 na safra 2012/2013. O plantio do milho foi realizado em outubro de 2010 e a colheita, em março de 2011; o algodão foi plantado em novembro de 2011 e 2012 e colhido em junho de 2012 e 2013, respectivamente. As fontes dos insumos utilizados foram: sulfato de amônio, fosfato monoamônico (MAP) e cloreto de potássio (KCl). As doses de N foram aplicadas em cobertura, a lanço, aos 25 dias após a semeadura do milho e aos 10 e 50 dias após a semeadura do algodão. As parcelas foram constituídas de 11 linhas de 40 m de comprimento e espaçadas em 0,76 m; as subparcelas foram constituídas por 11 linhas de 10 m de comprimento. A parcela útil foi composta pelas quatro linhas centrais de 4 m de comprimento.

As variáveis avaliadas foram: produtividade e produtividade acumulada das três safras e análise química do solo, com amostras de solo coletadas após a colheita do milho da safra 2010/2011 e do algodão da safra 2011/2012 na profundidade de 0-20 cm, para avaliar os nutrientes disponíveis no solo para a safra subsequente. Nestas avaliações foram coletadas três amostras de solo na linha de plantio e seis na entrelinha para formar uma amostra composta de cada parcela útil do experimento.

Os dados de produtividade de cada safra, bem como o valor acumulado de produtividade das três safras, e os teores disponíveis de P e K no solo foram submetidos à análise de variância ($p < 0,05$) e testes de média (Scott-Knott, $p < 0,05$), para avaliar os efeitos da adubação NPK, utilizando o programa estatístico SISVAR.

Inicialmente, cabe ressaltar que, como a área era de produção comercial e tinha histórico de uso de vários anos, o solo estava com a fertilidade corrigida antes da instalação do experimento e os teores de P e K se encontravam em níveis adequados (SOUSA; LOBATO, 2004). Os dados de produtividade (Tabelas 1 a 4) mostram que as respostas aos fertilizantes variaram de acordo com a cultura e safra. Na primeira safra, a produtividade de milho foi maior com as doses de P_2O_5 - K_2O antecipadas ao plantio de 75-145 e de N em cobertura de 140 kg ha⁻¹, que correspondem às doses aplicadas pelo produtor na fazenda. A produtividade média geral alcançada do milho (9.055 kg ha⁻¹) foi superior à média da região (8.700 kg ha⁻¹), como se pode ver na Tabela 1 (ANUÁRIO..., 2014).

Tabela 1. Dados de produtividade do experimento de adubação sementeira x cobertura 1ª safra – Milho.

Adubação N-P ₂ O ₅ -K ₂ O na sementeira (kg ha ⁻¹)	Adubação N em cobertura (kg ha ⁻¹)			
	00	70	140	Média
00-00-00	8.092 cB	8.748 bA	9.552 aB	8.797 B
00-38-73	8.158 cB	8.918 bA	9.638 aB	8.905 B
00-75-145	8.410 cA	8.856 bA	10.346 aA	9.204 A
00-90-174	8.556 cA	8.874 bA	10.514 aA	9.315 A
Média	8.304 c	8.849 b	10.013 a	9.055
CV1 (%) = 1,52	CV2 (%) = 1,43			

Médias seguidas por mesma letra minúscula na linha ou maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Na segunda safra, o algodão respondeu somente ao N aplicado em cobertura (Tabela 2), e na terceira safra a produtividade do algodão nas maiores doses aplicadas de P e K foi superior às demais (Tabela 3). É importante relatar que na segunda e terceira safras houve problema de infestação de plantas daninhas na área, o que pode ter prejudicado a produtividade da cultura, conforme se vê pela baixa média geral (3.035 e 3.766 kg ha⁻¹ de algodão em caroço, tabelas 2 e 3) e abaixo da média de produtividade da região (4.050 kg ha⁻¹ de algodão em caroço) (ANUÁRIO..., 2014).

Tabela 2. Dados de produtividade do experimento de adubação sementeira x cobertura 2ª safra – Algodão.

Adubação N-P ₂ O ₅ -K ₂ O na sementeira (kg ha ⁻¹)	Adubação N em cobertura (kg ha ⁻¹)			
	00	95	190	Média
00-00-00	2.988	3.211	3.617	3.272
00-50-90	2.251	3.045	4.411	3.236
00-100-180	1.877	3.133	3.218	2.743
00-150-270	2.238	3.339	3.088	2.888
Média	2.339 b	3.182 a	3.584 a	3.035
CV1 (%) = 21,12	CV2 (%) = 19,05			

Médias seguidas por mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Tabela 3. Dados de produtividade do experimento de adubação semeadura x cobertura 3ª safra – Algodão.

Adubação N-P ₂ O ₅ -K ₂ O na semeadura (kg ha ⁻¹)	Adubação N em cobertura (kg ha ⁻¹)			
	00	100	200	Média
00-00-00	3.399	3.465	3.268	3.377 B
00-50-90	3.355	3.706	3.684	3.582 B
00-100-180	3.509	3.662	4.167	3.779 B
00-150-270	4.211	4.561	4.211	4.327 A
Média	3.618	3.849	3.832	3.766
CV1 (%) = 6,30	CV2 (%) = 14,78			

Médias seguidas por mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Na avaliação das três safras acumuladas (Tabela 4) observa-se apenas resposta das culturas ao N em cobertura, com o somatório de 530 kg ha⁻¹ de N resultando em maior produtividade acumulada. Esse resultado está coerente com o fato de que sendo um solo de textura leve e com baixo teor de matéria orgânica (0,9 dag kg⁻¹) espera-se uma alta resposta ao N aplicado, devido ao baixo fornecimento do mesmo pela MOS, bem como pelo baixo efeito residual, dada a baixa CTC (3,54 cmol_c dm⁻³), entre outros. A falta de resposta ao P e K possivelmente se deve ao fato dos teores no solo se encontrarem nos níveis adequados. Neste sentido, pode-se propor uma redução nas doses aplicadas nestes solos, sob estas condições, o que irá impactar positivamente na renda do produtor e no meio ambiente (RESENDE et al., 2012).

Tabela 4. Dados de produtividade do experimento de adubação semeadura x cobertura Sistema – Milho/Algodão/Algodão.

Adubação N-P ₂ O ₅ -K ₂ O na semeadura (kg ha ⁻¹)	Adubação N em cobertura (kg ha ⁻¹)			
	00	265	530	Média
00-00-00	14.479	15.423	16.437	15.446
00-138-253	13.764	15.669	17.733	15.722
00-275-505	13.796	15.651	17.731	15.726
00-390-714	15.004	16.774	17.812	16.530
Média	14.261 c	15.879 b	17.428 a	15.856
CV1 (%) = 5,45	CV2 (%) = 5,04			

Médias seguidas por mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Os valores médios de P disponível na camada de 0-20 cm de solo, após a colheita da primeira safra (Tabela 5) mostram que não houve efeito dos tratamentos. Entretanto, a falta de efeito pode ter sido consequência dos altos valores de coeficiente de variação apresentados no experimento. De qualquer forma, a média geral de 17,79 mg dm⁻³ de P após a colheita da primeira safra (Tabela 5) mostra que o P se manteve praticamente o mesmo de antes da instalação do experimento (20,23 mg dm⁻³).

Tabela 5. Teores disponíveis de P após a 1ª safra (milho) no experimento de semeadura x cobertura.

Adubação N-P ₂ O ₅ -K ₂ O na semeadura (kg ha ⁻¹)	Adubação N em cobertura (kg ha ⁻¹)			
	00	70	140	Média
00-00-00	17.91	21.68	24.25	21.28
00-38-73	16.08	11.92	8.95	12.32
00-75-145	21.76	23.40	25.45	23.54
00-90-174	19.52	11.42	11.11	14.02
Média	18.82	17.10	17.44	17.79
CV1 (%) = 112,52 CV2 (%) = 94,76				

Os teores de P disponível no solo após a colheita da segunda safra, em que havia sido cultivado o algodão, só apresentaram diferença estatística para a interação PK semeadura x N cobertura, sendo que o desdobramento desta análise mostrou que o teor de P disponível foi maior na dose de 190 kg ha⁻¹ de N e com adubação de P₂O₅-K₂O na base de 100-180 kg ha⁻¹ (Tabela 6). A média geral do P disponível ao final da segunda safra avaliada superou o teor de P inicial no solo, antes da instalação do experimento (Tabela 6).

Tabela 6. Teores disponíveis de P após a 2ª safra (algodão) no experimento de semeadura x cobertura.

Adubação N-P ₂ O ₅ -K ₂ O na semeadura (kg ha ⁻¹)	Adubação N em cobertura (kg ha ⁻¹)			
	00	95	190	Média
00-00-00	26,44	31,62	23,57	27,21
00-50-90	16,56	22,15	18,67	19,12
00-100-180	29,32 b	18,58 b	41,04 a	29,65
00-150-270	20,63	29,43	17,71	22,59
Média	23,24	25,44	25,25	24,64
CV1 (%) = 30,12 CV2 (%) = 32,58				

Médias seguidas por mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

O potássio disponível no solo após a colheita da primeira safra (Tabela 7) não sofreu efeito da adubação e seu teor médio geral ($47,28 \text{ mg dm}^{-3}$) ficou um pouco abaixo do inicial ($51,74 \text{ mg dm}^{-3}$). Já após a colheita da segunda safra (Tabela 8) os teores de K disponível no solo foram reduzidos com a adubação nitrogenada. Este resultado pode ser explicado pela competição existente entre os nutrientes N e K (RAIJ, 2011). O teor médio geral de $63,51 \text{ mg dm}^{-3}$ (Tabela 8) superou o inicial, mostrando que a fertilidade do solo foi mantida, ou mesmo melhorada ao longo dos cultivos.

Tabela 7. Teores disponíveis de K após a 1ª safra (milho) no experimento de semeadura x cobertura.

Adubação N-P ₂ O ₅ -K ₂ O na semeadura (kg ha ⁻¹)	Adubação N em cobertura (kg ha ⁻¹)			
	00	70	140	Média
00-00-00	47,33	59,00	49,67	52,00
00-38-73	48,67	49,33	48,67	48,89
00-75-145	35,00	37,33	54,00	42,11
00-90-174	52,67	49,67	36,00	46,11
Média	45,92	48,83	47,08	47,28
CV1 (%) = 39,42	CV2 (%) = 322,70			

Tabela 8. Teores disponíveis de K após a 2ª safra (algodão) no experimento de semeadura x cobertura.

Adubação N-P ₂ O ₅ -K ₂ O na semeadura (kg ha ⁻¹)	Adubação N em cobertura (kg ha ⁻¹)			
	00	95	190	Média
00-00-00	69,02	58,09	48,76	58,63
00-50-90	78,57	57,05	51,41	62,34
00-100-180	71,66	50,76	70,56	64,33
00-150-270	92,46	62,20	51,53	68,73
Média	77,93 a	57,03 b	55,57 b	63,51
CV1 (%) = 22,21	CV2 (%) = 24,08			

Médias seguidas por mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

De maneira geral, este experimento mostrou, como esperado, que em solos de textura leve, com baixa CTC e baixo teor de matéria orgânica, o N é um dos nutrientes mais críticos e mais relacionado ao aumento de produtividade das culturas. Os nutrientes P e K, por apresentarem maior efeito residual em

comparação ao N, principalmente o P, foram se acumulando no solo, o que permite a redução das doses aplicadas ao longo dos cultivos.

Considerações finais

Em solos de textura leve, diversos fatores extrínsecos às suas propriedades, como manejo, intensificação de cultivos com diferentes sistemas radiculares, doses de corretivos e fertilizantes, exercem grande influência na dinâmica de nutrientes. Sendo assim, o planejamento da produção nestes solos frágeis deve priorizar sistemas conservacionistas, com rotação de culturas, estratégias de fertilização que proporcionem maior exploração do perfil de solo pelas raízes das plantas, com menor movimentação mecânica do solo, aporte de resíduos que favoreçam o acúmulo de MOS, entre outros. Ou seja, em solos de textura leve, o manejo, mais que suas fragilidades ou limitações, será determinante para o sucesso e custo da exploração agrícola.

Referências

- ANDRADE, E. M.; AQUINO, D. N.; CRISÓSTOMO, L. A.; RODRIGUES, J. O.; LOPES, F. B. Nitrogen and chloride impacto on water table under irrigated condition. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 39, p. 88-95, 2009.
- ANUÁRIO DA REGIÃO OESTE DA BAHIA. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2014. 112 p.
- BARBER, S. A. Application of phosphate fertilizers: methods, rates and time of application in relation to the phosphorus status of soils. **Phosphorus in Agriculture**, v. 13, p. 109-115, 1977.
- BAR-YOSEF, B.; SHEIKHOLSLAMI, M. R. Distribution of water and ions in soils irrigated and fertilized from a trickle source. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, p. 575-582, 1976.
- BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 240 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. rev. atual. Porto Alegre: Metrópole, RS, 2008. p. 7-18.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; LOVATO, T. Potencial de sistemas de manejo para incrementar matéria orgânica na região Sul do Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO, 1., 2000, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Potafos, 2000.

BERNARDI, A. C. C.; TAVARES, S. R. L.; CRISÓSTOMO, L. A. Alteração da fertilidade de um Neossolo Quartzarênico em função da lixiviação de nutrientes. **Irriga**, Botucatu, v. 12, p. 429-438, 2007.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 153-159, 2011.

COSTA, J. P. V.; BARROS, N. F.; BASTOS, A. L.; ALBUQUERQUE, A. W. Fluzo difusivo de potássio em solos sob diferentes níveis de umidade e de compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 56-62, 2009.

DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; ALVAREZ, V. H.; FERREIRA, P. A.; CANTARUTTI, R. B.; SILVA, A. T.; FIGUEIREDO, G. C. Distribuição do amônio, nitrato, potássio e fósforo em colunas de Latossolos fertirrigadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2493-2504, 2008.

FALCÃO, N. P. S.; SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 34, p. 337-342, 2004.

FARIA, C. M. B.; PEREIRA, J. R. Movimento do fósforo no solo e seu modo de aplicação no tomateiro rasteiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 28, p. 1363-1370, 1993.

FELLER, C. Organo-mineral interactions in tropical soils. In search of “functional” organic matter pools: the particle-size fractionation approach. In: ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS, 3., 1999, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria, RS: UFSM, 1999. p. 104-124.

FERNANDES, F. C. S.; LIBARDI, P. L. Drenagem interna e lixiviação de nitrato em um Latossolo sob sucessão milho-braquiária-milho, com diferentes doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 1163-1173, 2009.

- FIDALSKI, J. Respostas da mandioca à adubação NPK e calagem em solos arenosos do Noroeste do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, p. 1353-1359, 1999.
- GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; OLIVEIRA, F. F. Acumulação de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, p. 99-105, 2008.
- GATIBONI, L. C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; CASSOL, J. P. F.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 33, p. 283-290, 2003.
- GHIBERTO, P. J.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; TRIVELIN, P. C. O. Leaching of nutrients from a sugarcane growing on an Ultisol in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1443-1448, 2009.
- HASSINK, J.; BOUWMAN, L. A.; ZWART, K. B.; BLOEM, J.; BRUSSAARD, L. Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. **Geoderma**, v. 57, p. 105-128, 1993.
- KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S. A acidez do solo e a nutrição mineral de plantas. In: KAMINSKI, J. (Ed.). **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: SBRS/NRS, 2000. p. 21-39.
- LADD, J. N.; FOSTER, R. C.; SKJEMSTAD, J. O. Soil structure: carbon and nitrogen metabolism. **Geoderma**, v. 56, p. 401-434, 1993.
- LOGAN, T. J.; McLEAN, E. O. Effects of phosphorus application rate, soil properties, and leaching mode on ³²P movement in soils columns. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 37, p. 371-374, 1973.
- MARTINS, O. C. Construção da fertilidade do solo em solos arenosos. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 122, p. 21-23, 2008.
- MEHTA, B. K.; SHIOZAWA, S.; NAKANO, M. Measurement of molecular diffusion of salt in unsaturated soils. **Soil Science**, v. 159, p. 115-121, 1995.
- MIKKELSEN, R. L. Phosphorus fertilization through drip irrigation. **Journal of Production Agriculture**, v. 2, p. 279-286, 1989.

- MITCHELL, C. C.; TU, S. Nutrient accumulation and movement from poultry litter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 146-2153, 2006.
- MOSIER, A. Soil processes and global change. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, p. 221-229, 1998.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-550.
- OLIVEIRA, A. P.; CARDOSO, M. O.; BARBOSA, L. J. N.; SILVA, J. E. L.; MORAIS, M. S. Resposta do feijão-vagem a P₂O₅ em solo arenoso com baixo teor de fósforo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 23, p. 128-132, 2005.
- OLIVEIRA, F. F.; SALCEDO, I. H.; GALVÃO, S. R. S. Adubação orgânica e inorgânica de batatinha em solos arenosos: Produtividade, nutrientes na planta e lixiviação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, p. 1228-1234, 2011.
- OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. C. O.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; MORTATTI, J. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a sandy soil cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, p. 861-868. 2002.
- PAULO, E. N. **Avaliação do inibidor de nitrificação fosfato de 3,4-dimetilpirazol (DMPP) em três solos com gradiente textural, absorção e uso de nitrogênio em plantas de algodão**. 2012. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Chemical and mineralogical characteristics of selected acid soils of the State of Parana, Brazil. **Turrialba**, San José, v. 35, p. 131-139, 1985.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.
- RANNO, S. K.; SILVA, L. S.; GATIBONI, L. C.; RHODEN, A. C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 21-28, 2007.
- RESENDE, A. V.; COELHO, A. M.; SANTOS, F. C.; LACERDA, J. J. J. **Fertilidade do solo e manejo da adubação NPK para alta produtividade de milho no Brasil Central**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 181).

- SHARMA, P. K.; SINHA, A. K.; CHAUDHARY, T. N. Movement of surface and deep-placed phosphorus in a Sandy loam soil in relation to initial soil wetness, amount of water applied, and evaporation potentials. **Soil Science**, v. 140, p. 256-263, 1985.
- SILVA, E. B.; RESENDE, J. C. F.; CINTRA, W. B. R. Resposta do feijoeiro a doses de fósforo em solo arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 31, n. 6, p. 973-977, 2001.
- SILVA, J. E.; LEMANSKI, 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, MG, v. 18, p. 541-547, 1994.
- SILVA, T. O.; MENEZES, R. S. C.; TIESSEN, H.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H.; SILVEIRA, L. M. Adubação orgânica da batata com esterco e/ou *Crotalaria juncea*. I – Produtividade vegetal e estoque de nutrientes no solo em longo prazo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 39-49, 2007.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, L. **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF, Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.
- STEEGE, M. W.; STULEN, I.; MARY, B. Nitrogen in the environment. In: LEA, P. J.; MOROT-GAUDRY, J. F. (Ed.) **Plant nitrogen**. New York: Springer, 2001. p. 379-397.
- STOTZKY, G. Influence of soil mineral colloids on metabolic process, growth, adhesion, and ecology of microbes and viruses. In: HUANG, P. M.; SCHNITZER, M. (Ed.) **Interactions of soils minerals with natural organics and microbes**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p. 305-428. (Special publication, 17).
- SUBBARAO, G. V.; ITO, O.; SAHRAWAT, K. L.; BERRY, W. L.; NAKAHARA, K.; ISHIKAWA, T.; WATANABE, T.; SUENAGA, K.; RONDON, M.; RAO, I. M. Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems. Challenges and opportunities. **Critical Reviews in Plant Science**, v. 25, p. 1-33, 2006.
- TELLES, E. C. C.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; TRUMBORE, S. E.; COSTA, E. S.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N.; OLIVEIRA JR., R. C. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia, **Global Biogeochemistry Cycles**, v. 17, p. 1-12, 2003.
- TOGNON, A. A.; DEMATTÊ, J. L. I.; DEMATTÊ, J. A. M. Teor e distribuição da matéria orgânica em Latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil central. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 343-354, 1998.

TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J. Adubação nitrogenada e a sustentabilidade de agrossistemas. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.).

Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7, p. 193-219.

WERLE, R.; GARCIA, A. R.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2297-2305, 2008.

Capítulo 2

Comportamento de nutrientes em solos frágeis sob cultivo de cana-de-açúcar na região de Mineiros, GO

Fernando Ernesto Ucker; Alfredo Borges De-Campos;
Daniel Vidal Pérez; Luís Carlos Hernani;
José Ronaldo de Macedo; Adoildo da Silva Melo

Introdução

Áreas cultivadas com cana-de-açúcar têm se expandido na região do Bioma Cerrado nos últimos anos (CASTRO et al., 2010). Nesse bioma, ocorre área significativa com solos de texturas média e arenosa, os quais, quando não são muito bem manejados, tendem a sofrer perdas significativas em seus atributos físicos, químicos e biológicos, com diminuição de sua qualidade e capacidade produtiva. Sabe-se que o cultivo contínuo e o preparo do solo para o plantio podem provocar diversas alterações nas propriedades físicas e químicas do solo (CERRI et al., 1991; GOVES et al., 1994), e isso pode estar ocorrendo nos solos dessa região, que estão sendo cultivados com cana-de-açúcar.

O termo “solo frágil” tem sido empregado no Brasil para designar grupos de solos com alto potencial ou forte risco de degradação, associada principalmente à ação antrópica (ALBUQUERQUE et al., 2011). De acordo com essa definição, Neossolos Quartzarênicos (RQ) são considerados solos frágeis por apresentarem baixa capacidade de retenção de água e fornecimento

de nutrientes para as plantas, além de elevada erodibilidade (ZUO et al., 2008). De acordo com Sousa et al. (2006), os Neossolos Quartzarênicos são originados de substratos arenosos, apresentando textura areia ou areia franca ao longo de pelo menos 2 metros de profundidade, com quantidade de argila menor que 15%. Com isso, naturalmente, os RQ apresentam baixa capacidade de agregação de partículas, alta lixiviação de nutrientes e rápida decomposição de matéria orgânica (CORREIA et al., 2004).

No Estado de Goiás, esse tipo de solo também está sendo utilizado para o plantio de cana-de-açúcar. Embora se saiba que os RQ são solos frágeis e que aspectos gerais relativos a sua dinâmica podem ser previstos, ainda não se conhece os efeitos que o manejo da cultura da cana-de-açúcar pode provocar no transporte de nutrientes ao longo do perfil desses solos. Por exemplo, a aplicação contínua de nutrientes a partir da fertilização utilizada nessa cultura pode exceder a capacidade de adsorção dos nutrientes pelos solos e plantas, tornando-os potenciais fontes poluidoras de solos e águas (CUNHA et al., 1981; GLOEDEN et al., 1991; LYRA et al., 2003; MEURER et al., 2000; SILVA et al., 2007). Outros nutrientes, como Zn e Cu, quando aplicados ao solo, podem se tornar potenciais fontes de contaminação dos ecossistemas terrestres e aquáticos (HEEBINK; HASSETT, 2001; KAMON; KATSUMI, 1999). Também há implicações econômicas decorrentes da perda de nutrientes no perfil dos solos frágeis que devem ser consideradas nesse novo ciclo de expansão do cultivo da cana-de-açúcar no Cerrado.

Portanto, o uso dos Neossolos Quartzarênicos para fins agrícolas sem a adoção de técnicas de manejo adequadas pode aumentar o risco de contaminação do lençol freático por nutrientes e diminuir a sua disponibilidade para as plantas, incorrendo, assim, em danos ambientais e econômicos.

Embora relevante sob o ponto de vista do manejo de solo, o tema da movimentação de nutrientes em solos frágeis sob cultivo com cana-de-açúcar ainda é pouco explorado. O objetivo deste trabalho foi determinar o comportamento de alguns nutrientes em perfil de Neossolo Quartzarênico sob vegetação nativa de Cerrado e comparar os resultados com áreas de Neossolo Quartzarênico e de Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média sob cultivo de cana-de-açúcar.

Área de estudo

O estudo foi realizado em parte da área de uma propriedade rural localizada no Município de Mineiros, GO, nas coordenadas 17°47'31.15''S e 53°00'10.04''O (Figura 1a). A área estudada assenta-se sobre rochas areníticas pertencentes à Formação Botucatu. O relevo é caracterizado por colinas médias com declividade <10° e os solos dominantes são Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média e Neossolo Quartzarênico.

O clima, classificado de acordo com Köppen, é Tropical Chuvoso (Aw), com seis meses de período chuvoso (novembro a abril) e seis meses sem quantidades expressivas de precipitação (maio a outubro). Dados pluviométricos foram coletados na área de estudo e indicaram que a precipitação hídrica média local no ano de 2012 foi de 1.266 mm e a temperatura média foi de 28,5 °C.

Os dois tipos de solos encontram-se com uso de cana-de-açúcar e há uma área de preservação com vegetação de Cerrado no Neossolo Quartzarênico (Figura 1b).

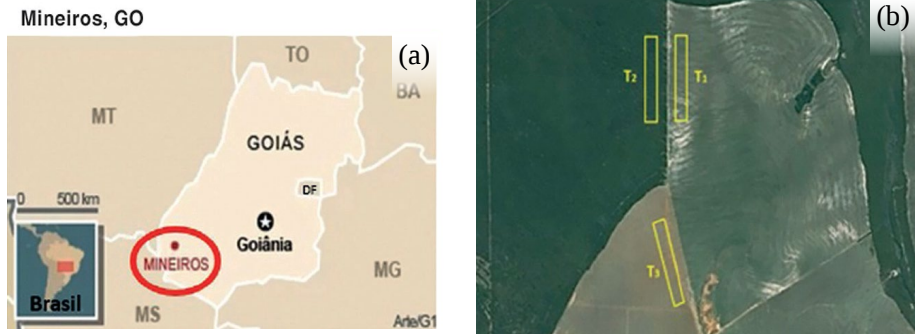


Figura 1. (a) Localização do Município de Mineiros; (b) Vista da área de estudo, com as faixas: T1 = Neossolo Quartzarênico com o cultivo de cana-de-açúcar; T2 = Neossolo Quartzarênico sob vegetação de Cerrado; e T3 = Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média com cultivo de cana-de-açúcar.

Métodos

Como tratamentos, foram consideradas duas faixas adjacentes de um Neossolo Quartzarênico dispostas ao longo do comprimento de rampa, sendo uma com vegetação nativa de Cerrado (RQ Cerrado) e outra com cultivo tradicional de cana-de-açúcar (RQ Lavoura). Em cada uma das faixas, foi estabelecido um transecto com dez pontos (T_1 e T_2) georreferenciados no sentido da vertente e espaçados em 30 m entre si. Em outra área sob Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média e cultivada com cana (LV Lavoura), repetiu-se a coleta de amostras em semelhante transecto (T_3) disposto ao longo do comprimento de rampa (Figura 1b).

Amostras compostas foram coletadas, nas três áreas estudadas, com trado holandês nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 100-120 e 160-180 cm. Após a coleta, as amostras, devidamente identificadas, foram encaminhadas para análise no Laboratório da Embrapa Solos. Foram realizadas coletas em duas épocas, sendo a primeira em novembro de 2011, ou seja, no início da estação chuvosa, e a segunda, em abril de 2012, período correspondente ao final da estação chuvosa da região de estudo.

Em laboratório, as amostras foram submetidas às análises granulométrica (fração argila), de pH (em água), de carbono orgânico (Tabela 1) e para determinação dos elementos cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), fósforo (P) e alumínio (Al), conforme Claessen (1997) e Silva (2009). Cu, Zn e Fe foram extraídos com solução Mehlich 1 e relação solo:extrator de 1:5, e suas concentrações foram determinadas por espectrometria de absorção atômica. O fósforo disponível para plantas foi determinado por método colorimétrico, e o alumínio, por titulação alcalimétrica.

Seguindo os mesmos procedimentos, também foram determinados o pH em água, a saturação por bases (V%) e a capacidade de troca de cátions (CTC) para amostras obtidas nas profundidades 0-10, 10-20 e 0-20 cm.

Tabela 1. Atributos de amostras das profundidades 0-20, 20-40, 40-60, 100-120 e 160-180 cm de Latossolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Quartzarênico cultivados com cana-de-açúcar e de Neossolo Quartzarênico sob cerrado.

Camada (cm)	Lavoura						Cerrado		
	Latossolo			Neossolo			Neossolo		
	Fração Argila (%)	pH	C ¹ (g/kg)	Fração Argila (%)	pH	C (g/kg)	Fração Argila (%)	pH	C (g/kg)
0-20	9,4	5,9	5,1	6,6	6,3	5,2	6,4	4,5	6,0
20-40	10,2	5,6	3,1	7,4	5,7	3,3	6,4	4,4	3,6
40-60	12,2	5,1	2,6	7,2	5,2	2,5	6,8	4,5	2,9
100-120	15,2	5,1	1,9	10,4	4,9	1,3	8,6	5,2	1,8
160-180	16,4	5,0	1,5	10,6	5,0	2,4	8,2	5,3	1,2

¹C: Carbono orgânico.

Foram comparados os efeitos de manejo do solo (RQ Lavoura x RQ Cerrado), o tipo de solo sob um mesmo manejo (Neossolo Quartzarênico x Latossolo Vermelho-Amarelo) e a época de amostragem (novembro/2011 x abril/2012). As médias foram comparadas pelo Teste de Tukey ao nível de significância de 1% e 5%. Também foram estabelecidas correlações entre os atributos carbono orgânico, pH, V% e a CTC.

Comportamento de nutrientes em solos frágeis

Comparação entre épocas de amostragem

Os valores das concentrações dos nutrientes analisados nas épocas de amostragem (novembro de 2011 e abril de 2012) estão apresentados na Tabela 2. Os elementos avaliados apresentaram comportamento semelhante, com maiores concentrações na camada 0-20 cm e menores teores em camadas mais profundas, com destaque para o fósforo disponível na camada superior dos solos cultivados com cana-de-açúcar. O teor de Al refletiu práticas adequadas de correção de acidez dos solos sob cultivado, sem apresentar diferenças significativas entre as épocas de amostragem.

Para os elementos que mostraram diferença significativa entre as épocas de coleta (Cu, Fe, Zn e P), observa-se que, com exceção do fósforo, houve tendência de decréscimo nos valores de concentração entre as amostragens realizadas em novembro/2011 (após o período seco) e as de abril/2012 (após o período chuvoso). Isso é um indicativo de que os elementos Cu e Zn no RQ Cerrado, e Cu, Zn e P no RQ Lavoura e no LV Lavoura podem ter se translocado no perfil do solo para camadas mais profundas durante o período chuvoso, fato que não pode ser devidamente comprovado neste trabalho. Isso pode ser explicado pelos baixos teores e qualidade de argila presentes nos solos estudados. Ressalta-se, ainda, que o Neossolo Quartzarênico apresenta teores de argila muito baixos (Tabela 1), o que diminui a capacidade de retenção de nutrientes e pode favorecer o transporte de elementos químicos ao longo do perfil.

As tendências de variação nas concentrações observadas para esses elementos foram coerentes com o tipo de uso do solo, visto que, no período de novembro a abril, a cultura da cana-de-açúcar estava em fase de crescimento vegetativo e a vegetação do cerrado, em fase de rebrota. Adorna et al. (2013), ao avaliarem a aplicação de micronutrientes com e sem adubação de torta de filtro, observaram tendência semelhante de decréscimo no teor de micronutrientes no perfil de Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho; contudo, esses autores não estudaram diferentes épocas de amostragem. Sendo assim, no caso em estudo, as diferenças encontradas entre as épocas de avaliação são atribuídas à extração realizada pela planta e ao fluxo hídrico vertical durante o período das chuvas.

O P apresentou comportamento distinto dos demais elementos avaliados para os solos sob cultivo com cana-de-açúcar. Observa-se aumento dos teores após o período chuvoso, especialmente para as camadas 20-40 cm e 40-60 cm. O enriquecimento em P dessas camadas após a estação chuvosa também é um indicativo de mobilidade desse elemento no perfil do solo. As maiores concentrações na camada de 0-20 cm nos solos sob cultivo agrícola estão associadas às aplicações de fertilizantes fosfatados.

De modo geral, as maiores concentrações de nutrientes observadas na camada de 0-20 cm do RQ Cerrado (Tabela 2) podem ser explicadas pela

decomposição de material orgânico da vegetação de cerrado e sua incorporação no solo. Segundo Rodrigues et al. (2003), a decomposição da matéria orgânica proveniente, principalmente, das folhas, permite o retorno ao solo dos nutrientes absorvidos pela planta que não sofreram lixiviação, mantendo a funcionalidade do sistema. Ainda segundo os autores, a velocidade da ciclagem está ligada às condições físico-químicas do solo, as quais refletem, principalmente, o clima. Durante a estação chuvosa, as condições para crescimento da comunidade de micro-organismos decompositores de substratos orgânicos melhoram, favorecendo a decomposição e a transferência de nutrientes para o solo.

Tabela 2. Valores médios das concentrações dos nutrientes nos dez pontos de amostragem, avaliados em cinco profundidades dos Neossolos Quartzarênicos, sob cerrado e com cultivo de cana-de-açúcar, e do Latossolo Vermelho-Amarelo, cultivado com cana-de-açúcar, em duas épocas (novembro de 2011 e abril de 2012) em Mineiros, GO.

Neossolo Quartzarênico sob cerrado															
AT ¹	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		100-120 cm		160-180 cm						
	1 ²	2 ³	1	2	1	2	1	2	1	2					
Cu	0,14	0,13	ns	0,04	**	0,09	0,03	**	0,06	0,02	**	**			
Fe	56,65	75,41	ns	44,36	30,50	*4	25,57	21,91	ns	12,91	12,03	ns	8,65	7,64	ns
Zn	0,17	0,21	ns	0,10	0,05	**	0,08	0,02	**	0,07	0,03	**	0,10	0,03	ns
Al	0,61	0,59	ns	0,44	0,33	ns	0,35	0,31	ns	0,19	0,21	ns	0,16	0,12	ns
P	1,30	3,23	ns	0,80	1,17	ns	0,55	0,63	ns	0,27	0,34	ns	0,25	0,30	ns

Neossolo Quartzarênico sob cultivo de cana-de-açúcar															
AT ¹	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		100-120 cm		160-180 cm						
	1 ²	2 ³	1	2	1	2	1	2	1	2					
Cu	0,49	0,54	ns	0,15	0,12	ns	0,08	0,05	*	0,04	0,03	**	0,04	0,02	*
Fe	24,70	26,67	ns	35,33	21,09	**	25,4	18,9	*	10,2	8,83	ns	6,71	6,04	ns
Zn	0,57	0,50	ns	0,12	0,11	ns	0,07	0,04	**	0,05	0,04	ns	0,05	0,11	ns
Al	0,00	0,06	ns	0,08	0,04	ns	0,25	0,12	**	0,20	0,10	**	0,10	0,04	*
P	10,92	12,33	ns	1,78	6,23	*	0,52	1,39	*	0,15	0,73	ns	0,23	0,85	ns

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Latosolo sob cultivo de cana-de-açúcar															
AT1	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		100-120 cm		160-180 cm						
	1 ²	2 ³	1	2	1	2	1	2	1	2					
Cu	0,95	1,04	ns	0,16	0,15	ns	0,12	0,08	**	0,09	0,06	*	0,08	0,05	**
Fe	23,8	22,3	ns	18,8	17,9	ns	13,76	10,9	*	5,02	5,26	ns	3,81	3,69	ns
Zn	1,30	1,5	ns	0,12	0,15	ns	0,07	0,06	ns	0,05	0,06	ns	0,05	0,06	ns
Al	0,09	0,02	ns	0,11	0,07	ns	0,19	0,14	ns	0,14	0,06	ns	0,06	0,01	ns
P	12,9	12,9	ns	0,80	1,56	*	0,29	0,75	**	0,22	0,66	**	0,24	0,63	**

¹ AT: Atributos – Cu: cobre (mg/dm³); Fe: ferro (mg/dm³); Zn: zinco (mg/dm³); Al: alumínio (cmolc/dm³) e P: fósforo (mg/dm³);

² 1: Amostragem em novembro de 2011;

³ 2: Amostragem em abril de 2012;

⁴ ns, * e **: diferença não significativa, significativa a 5%, e significativa a 1%, respectivamente, pelo Teste Tukey.

Teor de fósforo ao longo da vertente

As variações no teor de P nas duas épocas de amostragem (novembro/2011 e abril/2012) e em três pontos georreferenciados, localizados na cota mais elevada (P1), no intermédio (P5) e na parte mais baixa da vertente (P10), estão na Figura 2. Observa-se comportamento semelhante para o P quando se compara o mesmo tipo de manejo do solo, ou seja: tanto o RQ Lavoura como o LV Lavoura apresentam concentrações mais elevadas nas primeiras camadas quando comparados ao RQ Cerrado, refletindo exatamente o uso diferenciado do solo. Quando os diferentes pontos ao longo da vertente são comparados a solos com o mesmo tipo de manejo, verifica-se que há algumas diferenças importantes ocorrendo no ponto 5 (situado em posição intermediária na vertente). Após o período de chuvas, os teores de P nessa região da vertente tendem a ser maiores desde a superfície e até 60 cm de profundidade no RQ Lavoura em comparação com o LV Lavoura. Esses resultados sugerem que pode estar havendo, no RQ Lavoura, tanto a movimentação de P de áreas mais elevadas do terreno para áreas localizadas em cotas mais baixas (diferença de teores de uma mesma camada entre P1 e P5) por escoamento superficial, como a movimentação em profundidade por percolação, evidenciada em relação ao LV Lavoura.

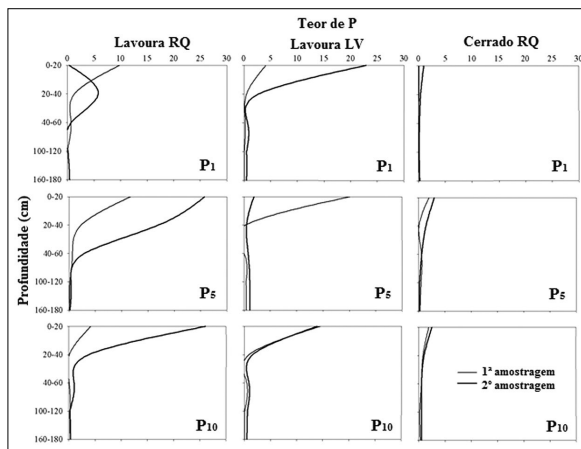


Figura 2. Teor de fósforo (P) nos pontos georreferenciados de amostragem 1 (P1), 5 (P5) e 10 (P10) de cada tratamento para as profundidades de 0 até 180 cm e para as épocas de amostragem (novembro de 2011 e abril de 2012). Mineiros, GO.

Esses resultados são corroborados por Duiker e Beegle (2006), que atribuem a distribuição do P no solo a diversos fatores, entre eles o tipo de solo e o sistema de cultivo. Por outro lado, Nunes et al. (2008) afirmam que, no cultivo da cana-de-açúcar, o P, geralmente, encontra-se limitado à camada de 0-20 cm, sendo que, dentro dessa camada, o manejo passa a afetar profundamente a distribuição do nutriente. Os resultados aqui apresentados indicam que a afirmação desses últimos autores nem sempre será verdadeira, pois o P pode estar distribuído em camadas mais profundas, dependendo do tipo de solo e da posição no relevo considerados.

Efeito do manejo no Neossolo Quartzarênico

A Tabela 3 apresenta as médias dos valores de nutrientes na primeira e na segunda amostragem (novembro de 2011 e abril de 2012, respectivamente) das diferentes camadas de Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e sob cerrado.

Na primeira amostragem, para os elementos Cu na camada de 0-20 cm e P na de até 40 cm, as concentrações em RQ Lavoura foram bem superiores às encontradas em RQ Cerrado, refletindo a adubação da cana, tendência não observada nas camadas inferiores. Segundo Panou-Filothou et al. (2001), adições frequentes de Cu nas camadas superficiais do solo podem aumentar a quantidade de formas solúveis desse elemento, potencializando a toxidez às plantas e favorecendo uma possível contaminação do lençol freático em caso de movimentação vertical. Aparentemente, tal movimentação não está ocorrendo no caso em estudo, uma vez que não se observou diferença significativa na concentração de Cu entre os dois tipos de manejo nas profundidades do solo abaixo de 20 cm. Surpreendentemente, a concentração de Zn foi maior no RQ Cerrado até a profundidade de 60 cm. Esse é um resultado interessante que necessita de maior investigação, já que não pode ser explicado por este estudo.

Tabela 3. Valores médios de nutrientes em cinco camadas de Neossolo Quartzarênico com cultivo de cana-de-açúcar e com fitofisionomia do Cerrado – em novembro de 2011 e abril de 2012. Mineiros/GO.

Novembro de 2011															
AT ¹	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		100-120 cm		160-180 cm		Cer	Cer			
	Lav ²	Cer ³	Lav	Cer	Lav	Cer	Lav	Cer	Lav	Cer					
Cu	0,49	0,14	*	0,15	0,10	ns	0,08	0,09	ns	0,04	0,06	*	0,04	0,06	ns
Fe	24,7	56,6	*	35,3	44,3	ns	25,4	25,5	ns	10,2	12,9	ns	6,71	8,65	**
Zn	0,00	0,61	*	0,08	0,44	**	0,25	0,35	**	0,20	0,19	ns	0,10	0,16	*
Al	0,57	0,17	*	0,12	0,10	ns	0,07	0,08	ns	0,05	0,07	*	0,05	0,10	ns
P	10,9	1,30	**	1,78	0,80	*	0,52	0,55	ns	0,15	0,27	**	0,23	0,25	ns
Abril de 2012															
AT ¹	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		100-120 cm		160-180 cm		Cer	Cer			
	Lav ²	Cer ³	Lav	Cer	Lav	Cer	Lav	Cer	Lav	Cer					
Cu	0,54	0,13	*	0,12	0,04	ns	0,05	0,03	ns	0,03	0,02	ns	0,02	0,02	ns
Fe	26,67	75,41	**	21,09	30,50	*	18,99	21,91	*	8,83	12,03	**	6,04	7,64	ns
Zn	0,50	0,21	**	0,11	0,05	ns	0,04	0,02	**	0,04	0,03	ns	0,11	0,03	ns
Al	0,06	0,59	**	0,04	0,33	**	0,12	0,31	**	0,10	0,21	**	0,04	0,12	**
P	12,33	3,23	*	6,23	1,17	*	1,39	0,63	ns	0,73	0,34	ns	0,85	0,30	ns

¹ AT: Atributos – Cu: cobre (mg/dm³); Fe: ferro (mg/dm³); Zn: zinco (mg/dm³); Al: alumínio (cmolc/dm³) e P: fósforo (mg/dm³);² Lav: Neossolo Quartzarênico com cultivo da cana-de-açúcar;³ Cer: Neossolo Quartzarênico sob cerrado.

Na segunda amostragem, ressalta-se o aumento do teor de Fe chegando até 75,41 mg/dm³ no RQ Cerrado. De acordo com Raij et al. (1996), esses valores encontrados no RQ Cerrado podem ser considerados altos. Observa-se, também, que, na segunda amostragem, o teor de Zn foi maior para o RQ Lavoura em relação ao RQ Cerrado, indicando que, ao longo do período chuvoso, Zn foi adicionado ao solo sob lavoura. Por outro lado, o teor de Al foi maior para o RQ Lavoura em relação ao RQ Cerrado, consequência de ações de correção de acidez que, no RQ Lavoura, insolubilizou o Al e incrementou o pH, conforme se observa na Tabela 1. Comparando-se o Neossolo sob cultivo de cana-de-açúcar e sob Cerrado (Tabela 3), constata-se que os teores significativamente mais elevados de P ocorreram nas camadas de 0-20 e 20-40 cm no RQ Lavoura e estão associados à adubação da cultura da cana. Nessa profundidade, o fósforo ainda pode ser assimilado pelas raízes da planta da cana, diminuindo o risco de contaminação de águas subsuperficiais por P nas condições em que o estudo foi realizado. Embora não se observe, nas camadas mais profundas do que 40 cm, diferenças significativas para o P entre os tipos de manejo quando se compara os dados obtidos para os tratamentos da primeira com a segunda amostragem, percebe-se um comportamento interessante. Após o período seco (amostragem de novembro de 2011), os teores médios de P no RQ Lavoura tenderam a ser menores do que no RQ Cerrado para as três camadas mais profundas estudadas, havendo, inclusive, diferença significativa na profundidade de 100-120cm. Mas, após as chuvas (amostragem de abril de 2012), o teor de P no RQ Lavoura tende, em média, a ser mais elevado (chegando a ser duas vezes maior) do que no RQ Cerrado, para todas as camadas mais profundas do que 40 cm. Embora não haja confirmação estatística, pode-se inferir que há possibilidade de estar havendo um processo de percolação desse elemento para camadas mais profundas, com risco de contaminação de lençol freático e eutrofização de mananciais, fato que merece estudos mais aprofundados.

Oliveira et al. (2001) concordam que o manejo tem se tornado um dos principais fatores que interferem na produtividade dos sistemas atuais de cultivo, sendo comum o desbalanceamento nutricional do solo, principalmente dos micronutrientes. Comparando-se o Neossolo com cultivo da cana e o Neossolo com Cerrado, é notório e já esperado o aumento de alguns elementos no primeiro tipo de manejo do solo (Cu, Zn e P), visto que o cultivo da cana-de-açúcar necessita de aporte nutricional para obtenção de produtividade e rentabilidade aceitáveis.

Comparação entre diferentes tipos de solos sob o mesmo manejo

Ao se comparar o mesmo cultivo (cana-de-açúcar) em Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média, observa-se tendência parecida nesses solos, principalmente a partir da profundidade 20-40 cm (Tabela 4). Há exceção quanto ao Fe disponível, cuja concentração aumenta em profundidade para o RQ Lavoura. Entretanto, não ficou claro, tendo em vista os dados obtidos neste trabalho, qual a real causa desse comportamento do Fe disponível em profundidade, visto que condições de solubilização desse elemento em meio redutor não devem ter ocorrido no RQ Lavoura, que é bastante permeável e poroso.

Os teores de P disponível diferiram entre os solos cultivados, como pode ser observado na Tabela 4. Os valores das concentrações de fósforo para a profundidade 20-40 cm foram maiores para o RQ Lavoura e as diferenças foram ainda maiores na segunda coleta, ou seja, após a estação chuvosa. Esse dado reforça a hipótese de que o P sofreu transporte ao longo do perfil do RQ Lavoura, migrando das camadas superiores para as camadas inferiores do solo. Também sugere que essa migração depende ou, pelo menos, é influenciada pelo tipo de solo. Neste estudo, solos com textura arenosa (RQ Lavoura) tendem a facilitar mais o transporte de P do que solos com teores de argila mais elevados, como o LV Lavoura. Isso pode estar relacionado à disponibilidade de cargas positivas no solo capazes de reter P na forma de fosfato, as quais devem ser maiores no LV Lavoura devido à presença de minerais na fração argila. Assim, o Neossolo favoreceu o transporte de P ao longo do perfil em relação ao Latossolo.

Pesquisa realizada nas proximidades da área de estudo em Neossolo Quartzarênico sob pastagem também reporta aumento nas concentrações de P disponível até a profundidade de 60 cm e associa os altos teores encontrados à presença de matéria orgânica relacionada à fitomassa das raízes da pastagem (PESSOA-DE-SOUSA et al., 2015). Esses resultados corroboram o que foi encontrado no presente estudo quanto à profundidade em que se encontram as maiores concentrações de P. Entretanto, não encontramos correlação entre os teores de carbono orgânico e o aumento da concentração de P em profundidade. Tanto o RQ como o LV, quando cultivados, mostraram tendência semelhante de variação nos teores de carbono orgânico (Tabela 1), mas o mesmo não ocorreu para as variações nos teores de P. É provável que outras variáveis não investigadas neste estudo, talvez de natureza física, tenham controlado a mobilidade do P no perfil do RQ Lavoura.

Tabela 4. Valores médios de nutrientes para um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo de textura média, ambos com cultivo de cana-de-açúcar, avaliados em novembro de 2011 e abril de 2012. Mineiros/GO.

Novembro de 2011															
AT ¹	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		100-120 cm		160-180 cm		LV	RQ			
	RQ ²	LV ³	RQ	LV	RQ	LV	RQ	LV	RQ	LV					
Cu	0,49	0,95	0,15	0,16	0,08	0,12	ns	0,04	0,09	**	0,04	0,08	**		
Fe	24,7	23,8	ns	18,8	**	13,7	**	10,2	5,02	**	6,71	3,81	**		
Zn	0,00	0,09	*	0,08	0,11	0,19	ns	0,20	0,14	ns	0,10	0,06	ns		
Al	0,57	1,30	*	0,12	0,12	0,07	ns	0,05	0,05	ns	0,05	0,05	ns		
P	10,9	12,9	ns	1,78	0,80	0,52	0,29	ns	0,15	0,22	ns	0,23	0,24	ns	
Abril de 2012															
AT ¹	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		100-120 cm		160-180 cm		LV	RQ	LV	RQ	
	RQ	LV	RQ	LV	RQ	LV	RQ	LV	RQ	LV					
Cu	0,54	1,04	ns	0,12	0,15	ns	0,05	0,08	**	0,03	0,06	**	0,02	0,05	**
Fe	26,6	22,3	ns	21,0	17,9	ns	18,9	10,9	**	8,83	5,26	**	6,04	3,69	**
Zn	0,50	1,54	**	0,11	0,15	ns	0,04	0,06	ns	0,04	0,06	ns	0,11	0,06	ns
Al	0,06	0,02	ns	0,04	0,07	ns	0,12	0,14	ns	0,10	0,06	ns	0,04	0,01	ns
P	12,3	12,9	ns	6,23	1,56	*	1,39	0,75	ns	0,73	0,66	ns	0,85	0,63	ns

¹AT: Atributos – Cu: cobre (mg/dm³); Fe: ferro (mg/dm³); Zn: zinco (mg/dm³); Al: alumínio (cmolc/dm³) e P: fósforo (mg/dm³);

² RQ: Neossolo Quartzarênico com cultivo de cana-de-açúcar;

³ LV: Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média com cultivo de cana-de-açúcar.

A matéria orgânica presente nas camadas superficiais também pode ter retido os elementos estudados, explicando, assim, as maiores concentrações de Zn e Cu no LV Lavoura (Tabela 1). Franzluebbbers e Hans (1996) reportam que as maiores acumulações de Zn ocorreram na profundidade de 0-10 cm devido à presença da matéria orgânica, corroborando, assim os resultados obtidos neste estudo.

Correlações da saturação por bases (V%), pH (em água), matéria orgânica e capacidade de troca catiônica (CTC)

A Figura 3 mostra a relação entre pH em água e a porcentagem de saturação por bases (V%) das amostras superficiais (0-10 cm, 10-20 cm e 0-20 cm) coletadas em Mineiros, GO. A equação ajustada é linear, sendo que 85% da variação dos valores de pH são explicados pelos valores de V%. O modelo linear encontrado (Tabela 5) está de acordo com resultados encontrados por Sousa et al. (1989), também em solos do Bioma Cerrado. Nesse contexto, vale a pena enfatizar a necessidade de estudos regionais para evitar problemas do uso de dados e correlações generalizadas. Para aqueles estados que usam a saturação por bases como parâmetro para recomendação de calagem, a Tabela 5 indica que, para um mesmo valor de V%, no caso de 50%, os valores de pH diferiram, razoavelmente, entre as equações. E é bem sabido o efeito do pH na absorção de nutrientes pelas plantas (RAIJ, 1981; SANCHEZ, 1981).

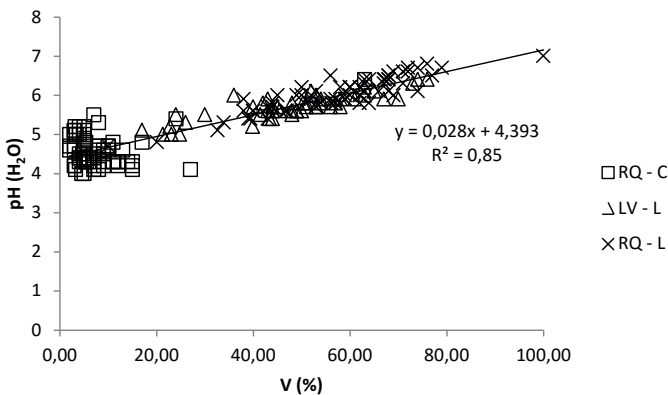


Figura 3. Relação entre a saturação por bases (V%) e pH (em água) para 190 amostras das camadas 0-10 cm, 10-20 cm e 0-20 cm do Município de Mineiros, GO. RQ-C: RQ Cerrado; RQ-L: RQ Lavoura; e LV-L: LV Lavoura.

Tabela 5. Alguns resultados de regressão linear entre pH em água (Y) e saturação por bases, ou V% (X), para solos do Brasil, incluindo os do estudo atual.

Coefficiente angular	Coefficiente linear	Fonte	pH a 50% ¹	Origem
0,031	4,288	Catani e Gallo (1955)	5,8	85 amostras de horizonte A – solos de São Paulo
0,023	4,43	Castro et al. (1972)	5,6	158 amostras de horizonte A e B – solos de vários Estados
0,037	3,345	Kiehl (1979)	5,2	Amostra de horizonte B textural – solos de São Paulo
0,029	3,973	Kiehl (1979)	5,4	Amostra de horizonte B latossólico – solos de São Paulo
0,025	4,5	Raij (1981)	5,7	Geral
0,023	4,387	Nascimento (1989)	5,5	140 amostras de horizonte A – Latossolo Vermelho-Amarelo de vários Estados
0,026	3,65	Nachtigall e Vahl (1989)	4,9	44 amostras da camada arável – solos do Rio Grande do Sul
0,030	4,50	Sousa et al. (1989)	6,0	65 amostras da camada arável – solos do Cerrado
0,028	4,393	Resultados deste trabalho (Ucker et al.)	5,8	190 amostras de camadas 0-10, 10-20 cm – Neossolos Quartzarênicos e Latossolo Vermelho-Amarelo de Goiás

¹ Corresponde ao pH calculado pelas diversas equações considerando V% = 50.

A contribuição da matéria orgânica no incremento da capacidade de troca catiônica (CTC) em solos tropicais é bem conhecida (BOHN et al., 1985) em função da baixa CTC dos argilominerais encontrados na assembleia mineralógica desses solos, a exemplo da caulinita e dos oxi-hidróxidos de ferro e alumínio (COCHRANE et al., 1985). As amostras superficiais (0-10 cm, 10-20 cm, 0-20 cm) da região de Mineiros, GO, quando analisadas em conjunto (Figura 4), mostram uma correlação muito baixa. No entanto, ao separar por classe de solo e, principalmente, por tipo de uso do solo, fica claro que os dados derivados da coleta no Cerrado propriamente dito demonstram, nitidamente, a correlação esperada. Ao contrário, os dados coletados em solo cultivado, independentemente do tipo de solo, são os que não apresentam tal correlação. É provável que isso esteja relacionado ao fato de que o manejo agrícola do solo, mesmo o conservacionista, baixe a concentração de matéria orgânica (SYERS, 1997) e, conseqüentemente, também diminua sua contribuição para a CTC, o que torna a correlação menos significativa. Esse é o caso do presente trabalho.

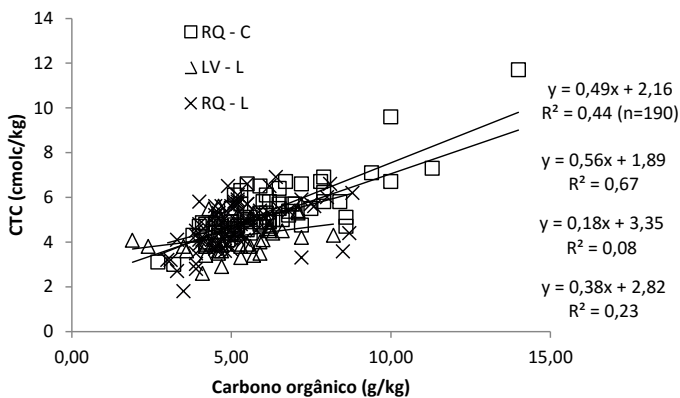


Figura 4. Relação entre a CTC e o carbono orgânico para 190 amostras superficiais coletadas em Mineiros, GO.

Considerações finais

O tipo de manejo do solo altera suas características químicas, especialmente as concentrações de elementos químicos associados à fertilização, como P, Zn e Cu.

O fenômeno de transporte de nutrientes pode ocorrer ao longo do perfil de Neossolos Quartzarênicos e Latossolos cultivados com cana-de-açúcar. Isso é evidente para o elemento P, que, no presente estudo, apresentou maior aumento de sua concentração em profundidade para o Neossolo Quartzarênico sob lavoura, o que indica movimentação desse elemento ao longo do perfil do solo.

Os efeitos da adubação prolongada da cultura da cana-de-açúcar em solos frágeis do Cerrado devem ser mais bem avaliados, visto que quantidades de nutrientes não aproveitados pelas raízes dessa cultura podem ser translocadas ao longo do perfil ou serem carregadas pela enxurrada, se concentrando em regiões que os tornem indisponíveis para as plantas.

Referências

- ADORNA, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C.; ROSSATO, O. B. Fertilization with filter cake and micronutrients in plant cane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, p. 649-657, 2013.
- ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A.; GATIBONI, L. C.; ELTZ, F. L. F. Atividades agrícolas de produção em solos frágeis no Sul do Brasil. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7, p. 367-403.
- BOHN, H. L.; MCNEAL, B. L.; O'CONNOR, G. A. **Soil chemistry**. New York: J. Wiley & Sons, 1985. 329 p.
- CASTRO, A. F. de; BARRETO, W. de O.; ANASTÁCIO, M. de L. A. Correlação entre pH e saturação de bases de alguns solos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 7, p. 9-17, 1972.
- CASTRO, S. S.; ABDALA, K.; APARECIDA SILVA, A.; BORGES, V. A expansão da cana-de-açúcar no Cerrado e no Estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, p. 171-191, 2010.

- CATANI, R. A.; GALLO, J. R. Avaliação da exigência de calcário dos solos do Estado de São Paulo mediante correlação entre pH e a porcentagem de saturação de bases. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 30, p. 49-60, 1955.
- CERRI, C. C.; FELLER, C.; CHAUVEL, A. Evolução das principais propriedades de um Latossolo Vermelho Escuro após desmatamento e cultivo por 12 e 50 anos com cana-de-açúcar. **Chaier ORSTOM. Série Pédologie**, v. 26, n. 1, p. 37-50, 1991.
- CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPQ, 1997. 212 p.
- COCHRANE, T. T.; SANCHEZ, L. G.; PORRAS, J. A.; AZEVEDO, L. G. de; GARVER, C. L. **Land in tropical America**. Cali: CIAT; Planaltina: Embrapa-CPAC, 1985. 146 p. v. 1.
- CORREIA, J. R.; REATTO, A.; SPERA, S. T. Solo e suas relações com o uso e o manejo. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (Org.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 29-61.
- CUNHA, R. C. A.; COSTA, A. C. S.; MASET FILHO, B.; CASARINI, D. C. P. Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I - physical and chemical aspects. **Water Science et Technology**, v. 19, n. 8, p. 155-165, 1981.
- DUIKER, S. W.; BEEGLE, D. B. Soil fertility distributions in long-term no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 88, p. 30-41, 2006.
- FRANZLUEBBERS, S.; HANS, F. M. Soil-profile distribution of primary and secondary plant available nutrients under conventional and no tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 39, p. 229-39, 1996.
- GLOEDEN, E.; CUNHA, R. C. A.; FRACCAROLI, M. J. B.; CLEARY, R. W. The behaviour of vinasse constituents in the unsaturated and saturated zones in the Botucatu aquifer recharge area. **Water Science et Technology**, v. 24, n. 11, p. 147-157, 1991.
- GOVES, G.; VANDAELE, K.; DESMET, P.; CAVALCANTI, A. C.; PESSOA, S. C. P.; SILVEIRA, C. O. The role of tillage in soil redistribution on hillslopes. **European Journal of Soil Science**, v. 45, p. 469-478, 1994.
- HEEBINK, L. V.; HASSETT, D. J. Coal fly ash trace elements mobility in soil stabilization. In: INTERNATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM, 2001, Kentucky, **Proceedings...** Kentucky: Centre for Applied Energy Research: University of Kentucky, 2001. Paper n. 64.
- KAMON, M.; KATSUMI, T. Evaluating environmental impact on stabilised soil containing heavy metal. In: ASIAN REGIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 11., 1999, Seoul. **Proceedings...** Balkema, 1999. p. 469-472.

- KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**. São Paulo: Ceres, 1979. 264 p.
- LYRA, M. R. C. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A. Topossequência de solos fertirrigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 525-532, 2003.
- MEURER, E. J.; BISSANI, C. A.; SELBACH, P. A. Poluentes do solo e do ambiente. In: MEURER, E. J. (Org.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2000. v. 1, p. 151-168.
- NACHTIGALL, G. R.; VAHL, L. C. Parâmetros relacionados à acidez em solos da região Sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 13, n. 2, p. 139-143, 1989.
- NASCIMENTO, R. A. de M. **Correlação entre o valor ki e outras variáveis em latossolos**. 1989. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí.
- NUNES, R. S.; SOUSA, D. M. G.; GOEDERT, W. J.; SOARES, J. R. R. Impacto dos sistemas de plantio direto e preparo convencional nas interações entre matéria orgânica e fertilidade do solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL CERRADO, 9.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL SAVANAS TROPICAIS, Brasília, DF. **Anais...** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. 1 CD-ROM.
- OLIVEIRA, I. P. de; KLUTHCOUSKI, J.; SANTOS, R. S. M; FANCELLI, A. L.; NETO, D. D.; FARIA, C. D. Concentrações residuais de cobre, ferro, manganês e zinco em latossolo roxo eutrófico sob diferentes tipos de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 31, n. 2, p. 97-103, 2001.
- PANOU-FILOTHEOU, H.; BOSABALIDIS, A. M.; KARATAGLIS, S. Effects of copper toxicity on leaves of oregano (*Origanum vulgare* subsp. *hirtum*). **Annals of Botany**, v. 88, p. 207-214, 2001.
- PESSOA-DE-SOUZA, M. A.; ALMEIDA, R. T. S.; NEVES, C. M. N.; CASTRO, J. P. V.; CASTRO, S. S. Comportamento químico de Neossolos Quartzarênicos em Mineiros, Sudoeste Goiano. **Geociências**, Rio Claro, SP, v. 34, p. 335-347, 2015.
- RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: POTAFOS, 1981. 142 p.
- RAIJ, V. B. van; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. 285 p. (IAC. Boletim técnico, 100).
- RODRIGUES, A. C. G.; BARROS, N. F.; SANTO S, M. L. Decomposição e liberação de nutrientes do folheto de espécies florestais nativas em plantios puros e mistos no Sudeste da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, p. 1021-1031, 2003.

SÁNCHEZ, P. A. **Suelos del trópico**: características y manejo. San José: IICA, 1981. 634 p.

SILVA, F. C. da (Ed.) **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627 p.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; LOBATO, E.; CASTRO, L. H. R. Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos de cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 13, n. 2, p. 193-198, 1989.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; SILVA, C. A.; BUZETTI, S. Alterações nas frações do carbono em um neossolo quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 3, p. 305-311, 2006.

SYERS, J. K. Managing soils for long-term productivity. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 352, p. 1011-1021, 1997.

ZUO, X.; ZHAO, H.; ZHAO, X.; ZHANG, T.; GUO, Y.; WANG, S.; DRAKE, S. Spatial pattern and heterogeneity of soil properties in sand dunes under grazing and restoration in Horqin Sandy Land, Northern China. **Soil and Tillage Research**, v. 99, p. 202-212, 2008.

Capítulo 3

Atributos de um Neossolo Quartzarênico sob mangueira irrigada e sob vegetação de Caatinga – estudo comparativo em Petrolina, PE

André Júlio do Amaral; Daniel Vidal Pérez;
Manoel Batista de Oliveira Neto; Luís Carlos Hernani;
Tony Jarbas Ferreira Cunha; Adoildo da Silva Melo

Introdução

No Bioma Caatinga, em virtude da grande restrição hídrica e da distribuição irregular das chuvas, a prática da irrigação é fundamental para garantir a produção agrícola, mas exige manejo adequado para evitar a salinização do solo (QUEIROZ et al., 2010).

Nesse ambiente semiárido, ocorre elevada variabilidade espacial de solos, predominando grandes extensões de solos rasos (p. ex. Neossolos litólicos e Planossolos com caráter nátrico ou solódico), sendo alguns de alta fertilidade natural (como Vertissolos e Luvisolos, também rasos); os solos profundos ficam restritos às áreas de coberturas sedimentares, como é o caso dos Neossolos de textura essencialmente arenosa (Quartzarênicos ou Regolíticos), dos Argissolos e dos Latossolos, estes últimos, em geral, com textura franco arenosa e de coloração amarelo ou vermelho-amarelo (CUNHA et al., 2010; JACOMINE, 1996). Esses solos, na sua grande maioria, podem ser considerados frágeis por apresentarem características intrínsecas que lhes conferem elevada

susceptibilidade à degradação física, química e/ou biológica e requererem estratégias especiais de manejo e conservação para o uso sustentável.

Os solos arenosos são caracterizados como frágeis devido a suas características intrínsecas: textura arenosa, baixa disponibilidade de nutrientes, alta drenabilidade, reação ácida e estrutura em grãos simples (ALBUQUERQUE et al., 2011). Tais características limitam o seu uso para fins agrícolas, principalmente em agricultura de sequeiro, devendo ser destinados para preservação permanente. No entanto, com a adoção de sistemas de irrigação associados ao uso simultâneo de fertilizantes (fertirrigação) e outras boas práticas agrícolas, esses solos vêm sendo amplamente utilizados para a produção de fruteiras de alto valor comercial, com destaque para a mangueira (*Mangifera indica* L.), que, em Petrolina, PE, atinge produtividade média de 20 t ha⁻¹, o que impulsiona a economia da região. Nesses agrossistemas irrigados, contudo, se utiliza mecanização e aplicação de insumos que podem superar a capacidade de adsorção do solo e, assim, promover perdas por lixiviação, aumentando os custos de produção e os riscos de contaminação de águas subsuperficiais. O acompanhamento “in loco” desses sistemas de produção é importante para subsidiar estratégias de manejo de forma integrada em função da sua fragilidade estrutural e textural. O monitoramento de atributos que determinam a qualidade e o pleno exercício das funções do solo é essencial em propriedades agrícolas para a adequada gestão de recursos naturais e o aperfeiçoamento dos sistemas de produção. Na literatura, existem diversos posicionamentos sobre a qualidade do solo (DORAN; PARKIN, 1994; KARLEN et al., 1996; LAL, 1993; LARSON; PIERCE, 1994). Schojonning et al. (2004) definem qualidade do solo como sendo

a capacidade de um solo exercer suas funções dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado para sustentar a produtividade de plantas e de animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos seres humanos.

As propriedades físicas, químicas e biológicas do solo são consideradas elementos-chave e influenciam diretamente a qualidade do solo. Essas propriedades variam em função do tipo de solo, do uso e, principalmente, do manejo adotado (LAL, 1997). Vezzani et al. (2008) ressaltam que a matéria

orgânica do solo é um fator determinante da qualidade edáfica, pois as funções que ela exerce estão intimamente associadas aos atributos de caráter físico (estrutura, volume total de poros, relação entre macro e microporos, densidade, resistência do solo à penetração de raízes e condutividade, infiltração, retenção e armazenamento de água), químico (pH, alumínio trocável, disponibilidade de nutrientes, capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases) e biológico (biodiversidade e carbono da biomassa microbiana). A interação desses atributos em conjunto promove a Qualidade do Solo.

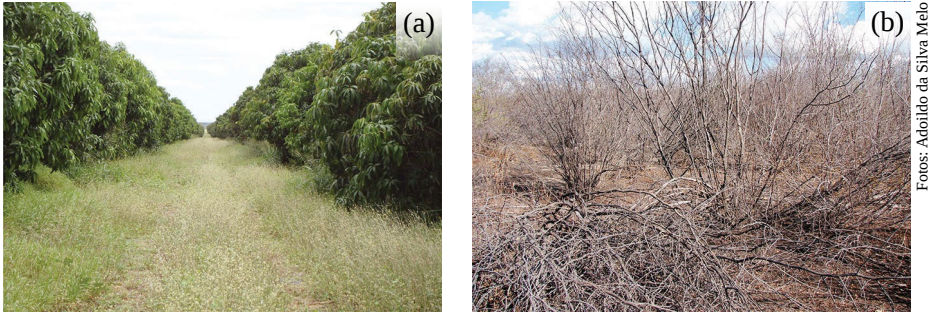
Neste trabalho, foram avaliados alguns indicadores físicos e químicos de qualidade em um Neossolo Quartzarênico em área de vegetação de Caatinga e em área contígua cultivada com manga (*Mangifera indica* L.) irrigada há 20 anos em Petrolina, PE para verificar, ao longo do tempo, o grau de alteração nesses atributos em função do padrão de manejo. Espera-se construir uma metodologia participativa de avaliação de indicadores e de estratégias de manejo para aumentar a competitividade e a sustentabilidade dos sistemas de produção em áreas que apresentem condições edafoclimáticas similares às deste estudo.

Área de Estudo

O estudo foi realizado em área da Fazenda Agropecuária Boa Esperança, no Município de Petrolina, Estado de Pernambuco, nas coordenadas 9° 23' 39" S e 40° 30' 35" W; a área se insere no perímetro de irrigação Nilo Coelho (N-10).

A vegetação nativa é a Caatinga hiperxerófila em relevo plano. O clima é o semiárido (Bsh, segundo Köppen), com precipitação média anual de 570 mm e chuvas concentradas no período de novembro a abril. A fruticultura é a principal atividade econômica, sendo a maior parte da produção exportada. A irrigação é feita de forma pressurizada por microaspersão e a água é proveniente do Rio São Francisco.

A produção de manga (*Mangifera indica* L.) iniciou-se em 1992 e é um dos principais produtos desta fazenda. Um aspecto geral das duas áreas de estudo pode ser visualizado na Figura 1.

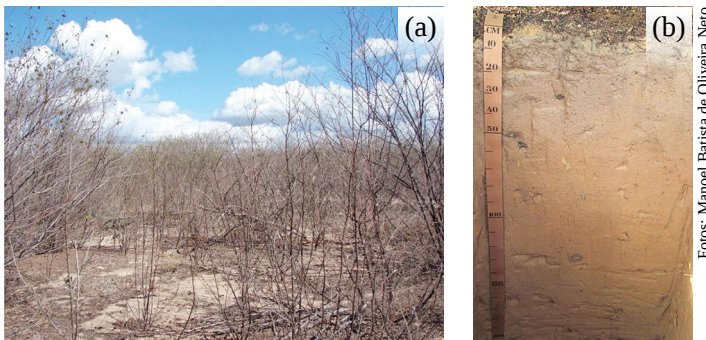


Fotos: Adoído da Silva Melo

Figura 1. Pomar de mangueira irrigada (a) e área adjacente com vegetação de Caatinga (b) em Petrolina, PE.

A geologia da região de estudo é caracterizada pela presença predominante de rochas cristalinas, recobertas por sedimentos arenosos do terciário e quaternário, conforme Brasil (1974) e Jacomine (1996). Por essa razão, nas áreas do perímetro irrigado, na abrangência do lote N10 em Petrolina, observa-se a ocorrência de Neossolos Quartzarênicos (em alguns casos, com o caráter latossólico), amplamente utilizados com fruticultura e, nas áreas de menor cota, associados à presença de sedimentos do Holoceno, encontram-se Planossolos Háplicos, atualmente em pousio em função do seu baixo potencial agrícola (baixa profundidade efetiva e risco de salinização).

Na área deste estudo, ocorre um Neossolo Quartzarênico órtico típico (Figura 2).



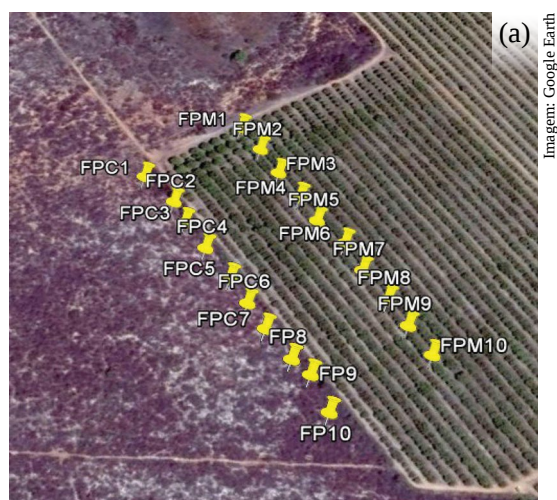
Fotos: Manoel Batista de Oliveira Nero

Figura 2. Paisagem de ocorrência, vegetação de Caatinga hiperxerófila (a) e perfil de solo Neossolo Quartzarênico órtico típico (b) em Petrolina, PE.

Neossolos Quartzarênicos são profundos, de textura arenosa, quartzosos, tendo nas frações areia grossa e areia fina, 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala e, praticamente, ausência de minerais primários alteráveis (menos resistentes ao intemperismo); são excessivamente drenados, apresentam cores claras e baixa fertilidade natural. Normalmente, ocorrem em relevo plano e são desenvolvidos de materiais de origem sedimentar. Em consequência da textura grosseira, são muito porosos e têm elevada permeabilidade (CUNHA et al., 2010). Esses solos ocupam maiores extensões nos estados do Piauí, da Bahia, de Pernambuco, do Rio Grande do Norte e do Ceará. As áreas onde predominam esses solos perfazem um total de 69.625 km² e constituem 9,3% da região semiárida (JACOMINE, 1996).

Procedimentos

De posse de imagens de satélite e a partir do conhecimento das linhas de drenagem, foram pré-estabelecidos dois transectos: um em cada área, com dez pontos, espaçados em 30 m, dispostos de forma pareada, distando cerca de 150 m um do outro. Na Figura 3, podem ser visualizados os transectos e os pontos de amostragem (a), a vegetação de Caatinga (b, d) e o pomar comercial de mangueira (c, e), respectivamente antes (novembro) e após (abril) o período das chuvas.



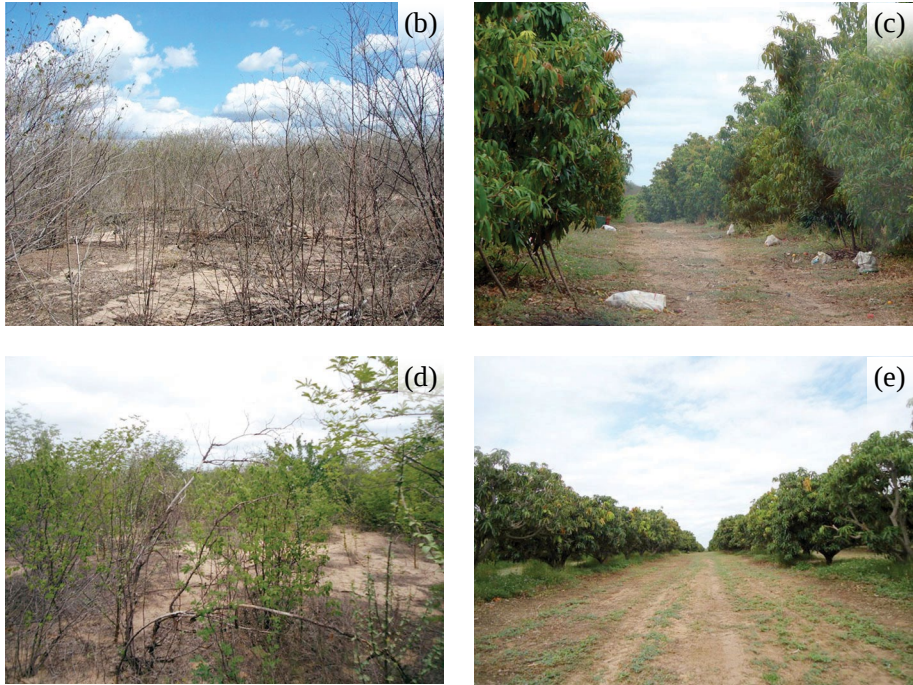


Figura 3. Distribuição dos dez pontos georreferenciados nos transectos (a) na vegetação de Caatinga (esquerda) e no pomar de manga irrigada (direita); aspectos da vegetação de Caatinga em novembro de 2011 (b) e em abril de 2013 (d), e de manga irrigada (c, e), respectivamente nas mesmas épocas, em Petrolina, PE.

No período entre novembro de 2011 a abril de 2013, no início e ao final do período chuvoso, foram realizadas amostragens para avaliação de atributos químicos do solo com base em Silva (2009). Com trado de caneco, foram obtidas amostras compostas (três repetições no entorno dos pontos georreferenciados) nas camadas 0-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60 m; 1,00-1,20 m; e 1,60-1,80 m, em cada um dos pontos georreferenciados nas duas áreas estudadas. Na manga, as amostras foram coletadas na área de projeção da copa das plantas.

As amostras compostas foram secadas ao ar livre, homogêneas e passadas em peneira de 2,0 mm para obtenção da terra fina secada ao ar livre. Em seguida, procedeu-se às seguintes análises: pH-H₂O (relação solo:

água de 1:2,5); cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+}) foram extraídos com solução KCl 1 mol L^{-1} , sendo que o Ca^{2+} e o Mg^{2+} foram determinados por espectrofotômetro de absorção atômica e o Al^{3+} por titulação com hidróxido de sódio; fósforo disponível (P-disp.) e potássio trocável (K^{+}) foram extraídos com solução de Mehlich 1 e quantificados por espectrofotometria e espectrometria de chama, respectivamente; o teor de carbono orgânico total foi determinado em amostras moídas a 100 mesh via oxidação úmida por dicromato em meio fortemente ácido. A saturação por bases (V%) foi calculada com base na relação $100 \times \text{soma de bases/CTC a pH 7,0}$.

A qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) nas duas áreas foi caracterizada por meio do fracionamento químico das substâncias húmicas (CARDOSO, 2014; CARDOSO et al., 2015), segundo o método sugerido pela *International Humic Substances Society* (SWIFT, 1996) e adaptado de Benites et al. (2003). Desse fracionamento, foram obtidas as frações de ácidos fúlvicos (FAF), ácidos húmicos (FAH) e huminas (FH), baseando-se na solubilidade em soluções ácidas ou alcalinas. O teor de C em cada fração húmica foi determinado pelo método de oxidação via úmida com aquecimento externo (YEOMANS; BREMNER, 1988). Também foi realizado o fracionamento físico, segundo metodologia proposta por Demolinari et al. (2008). Os estoques de C nas frações da MOS foram determinados considerando o conceito de camada equivalente (BAYER et al., 2000). Para isso, foram calculados os estoques de C do solo sob mangueira para cada camada e multiplicados os resultados pelo fator obtido pela divisão da densidade do solo (D_s) sob a caatinga pela D_s com o cultivo da mangueira. Esse fator foi aplicado somente para os dados de C no solo sob mangueira. Os estoques de C, em cada profundidade do solo, foram calculados pelo uso da seguinte fórmula: estoque de C (t ha^{-1}) = teor de C (g kg^{-1}) $\times D_s \times e/10$, em que D_s = densidade do solo na profundidade (kg dm^{-3}), e = espessura da camada de solo (cm).

Para determinação dos atributos físicos, em novembro de 2011 foram coletadas amostras indeformadas, anéis volumétricos (100 cm^3) das profundidades 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, e as determinações foram conforme (CLAESSEN, 1997). No laboratório, essas amostras foram submetidas à saturação lenta por capilaridade e, posteriormente, pesadas e colocadas na mesa de tensão (0,01 MPa); após equilíbrio, foram determinados o teor de

água volumétrica na capacidade de campo (Θ_{cc}) e o volume de macro e de microporos; após serem submetidas à tensão de 1,5 MPa, em extrator de Richards, foi obtido o teor de água volumétrica no ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}). A água disponível foi calculada pela diferença entre Θ_{cc} e Θ_{pmp} . Ao final, determinou-se a densidade do solo e de partículas e o volume de poros totais. As determinações dos parâmetros físicos e químicos do solo foram realizadas no Laboratório de Análises de Solo e Planta (LASP) da Embrapa Solos.

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi determinada de forma eletrônica, com equipamento PenetroLOG® PLG1020 Medidor Eletrônico de Compactação do Solo (FALKER, 2013). O medidor segue as recomendações da norma internacional ASAE S.313.3 (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 1999). As medidas foram tomadas até a profundidade de 0,60 m do solo, utilizando o cone tipo 2 com diâmetro de 12,83 mm. O equipamento foi programado para fornecer dados no intervalo de 10 mm, totalizando 10 medidas por camada de solo. Após a coleta, os dados foram descarregados em *software* específico e transportados para planilhas eletrônicas com a finalidade de posterior realização das análises por camadas: 0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m; 0,30-0,40 m; 0,40-0,50 m; e 0,50-0,60 m. As determinações foram feitas após o período chuvoso, entre os dias 27 e 28/04/2014, com volume acumulado de aproximadamente 140 mm, e imediatamente após uma chuva de 9,0 mm. A distribuição mensal das chuvas durante o período experimental compreendido entre novembro de 2011 e abril 2014 é apresentada na Figura 4.

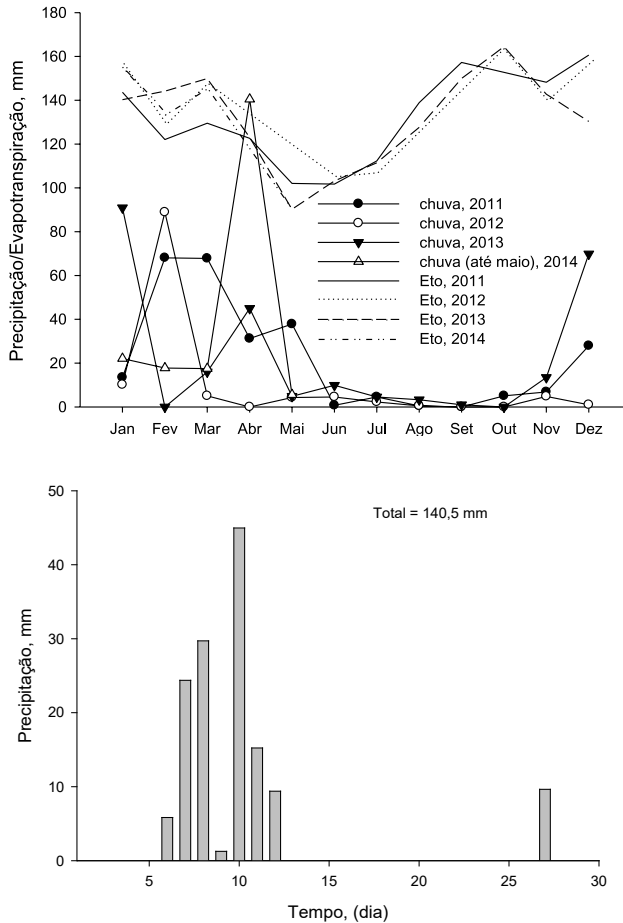


Figura 4. Variação mensal da precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (Eto) na área de estudo, no período de novembro de 2011 a abril 2014 (a) e variação diária da precipitação no mês de abril de 2014 (b), antes da determinação da resistência mecânica do solo à penetração.

Fonte: Boletim... (2014).

Em abril de 2014, foram estabelecidos pontos de amostragem na linha e na entrelinha da cultura da mangueira para caracterizar a resistência mecânica do solo à penetração (RP), conforme segue: a) na linha – área de projeção da

copa das plantas a 2 m da planta de referência; b) na entrelinha – faixa distante de 4 m a 6 m da planta de referência ao longo do transecto; c) na área adjacente com vegetação de Caatinga (pontos georreferenciados, Figura 3). Para verificar o grau de alteração na RP, foi calculado o índice de sensibilidade, proposto por Bolinder et al. (1999), por meio da expressão: $Is = RP_t/RP_c$, em que Is = índice de sensibilidade; RP = resistência à penetração; t = tratamento (manga:posição); c = controle (vegetação de Caatinga).

Depreende-se dessa condição (conforme Figura 4) que as diferenças encontradas para a RP entre os tratamentos, no momento de avaliação, se devem às ações de uso e manejo do solo, com pouca influência da umidade, uma vez que o solo do local se encontrava com teor de água próximo à capacidade de campo, aproximadamente $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (AMARAL et al., 2011).

Os resultados envolvendo épocas de coleta e sistemas de produção foram submetidos à análise estatística descritiva e as médias foram comparadas pelo Teste t ($p < 0,05$). Para a RP e o Is , foi utilizado o intervalo de confiança da média ($IC_{95\%} = M \pm DP (t_{95\%})$) (MASSON; LOFTUS, 2003).

Caracterização de atributos do solo

Atributos químicos

Os teores de carbono orgânico (CO) apresentaram distribuição semelhante a outros solos característicos de clima semiárido e de textura arenosa, com teores maiores em superfície e decréscimo com o aumento da profundidade (BERNARDI et al., 2007; CORINGA et al., 2010; GUIMARÃES et al., 2014). Na área cultivada com mangueira, a média geral dessa variável, envolvendo todas as épocas de amostragem, para a profundidade de 0-20 cm ($3,5 \text{ g kg}^{-1}$) foi significativamente maior ($p < 0,05$) do que na mesma profundidade do solo sob a caatinga ($2,4 \text{ g kg}^{-1}$). Embora tenham ocorrido diferenças significativas entre as áreas de estudo no teor de CO para a profundidade 0,40-0,60 m, principalmente a partir das avaliações de abril de 2012, nas demais profundidades os teores foram similares entre as duas áreas em todas as épocas de amostragem (Figura 5).

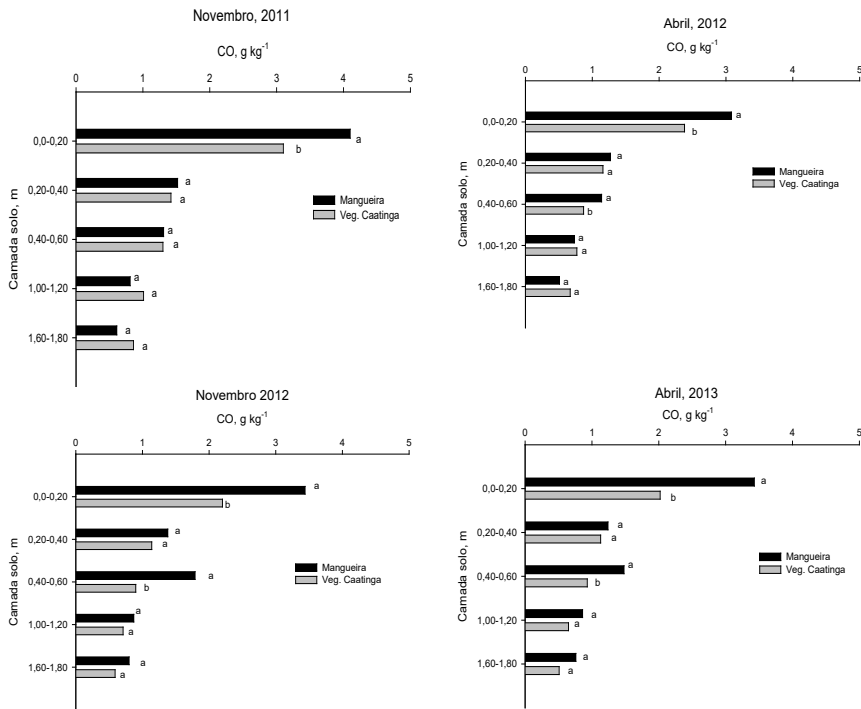


Figura 5. Teor de carbono orgânico total em cinco profundidades do Neossolo nos sistemas de produção com mangueira irrigada e vegetação de Caatinga no período de novembro de 2011 a abril de 2013 em Petrolina, PE. Médias seguidas da mesma letra minúscula para cada profundidade não diferem entre si pelo Teste t $p < 0,05$ ($n=10$).

As diferenças nos teores de CO encontrados entre as duas formas de uso na camada de 0-0,20 m podem ser atribuídas ao tipo e ao tempo de uso do solo e à forma de manejo do solo e dos resíduos culturais. Isso porque, nas áreas de vegetação de Caatinga, o aporte de matéria orgânica é bastante reduzido devido, principalmente, à grande restrição hídrica (MARIN et al., 2006). Por outro lado, nos pomares irrigados, essa restrição não ocorre e as plantas perenes (mangueira) não sofrem tal limitação. Com isso, o aporte de material orgânico (folhas, raízes, restos de poda, espécies espontâneas), ao longo do tempo, ocorre com maior frequência e em maior quantidade, sendo deixado na superfície do solo, o que favorece o incremento de carbono orgânico e a

formação e estabilização de agregados. Resultados semelhantes foram obtidos por Bernardi et al. (2007), Giongo et al. (2011), Guimarães et al. (2014) e Marin et al. (2006) em sistemas agroflorestais com leguminosas arbóreas e solos cultivados com fruteiras de clima tropical. Há que se ressaltar, no entanto, que, mesmo no sistema de mangueira irrigada, o teor de matéria orgânica da camada superficial ainda está abaixo de 1,0%, indicando ser este um dos fatores que ainda devem ser significativamente melhorados e mais estudados. Outros estudos mais detalhados precisam ser conduzidos para identificar as razões que levaram ao aumento dos teores de CO na camada 0,40-0,60 m na área de mangueira irrigada.

Os valores de pH-H₂O variaram de 4,9 a 5,1 e de 5,5 a 6,1, considerando a camada de 0,00-0,60 m nas áreas de vegetação de Caatinga e de mangueira irrigada, respectivamente. Os maiores valores foram encontrados na superfície com decréscimo em profundidade, e superiores ($p < 0,05$) na área de mangueira, considerando a média de dois anos de estudo (Tabela 1). A partir dessa camada, os valores tenderam à redução, com valores médios, em geral, abaixo de 5,5 na área cultivada e abaixo de 5,0 na vegetação de Caatinga.

Tabela 1. Valores de pH-H₂O (1:2,5) em diferentes camadas de um solo frágil em pomar de mangueira irrigada de longo prazo e vegetação de Caatinga no período de novembro de 2011 a abril de 2013 (n=10).

Sistema de Produção	Camada m	Época da coleta				Média*
		Nov 2011	Abr 2012	Nov 2012	Abr 2013	
Mangueira	0,00–0,20	6,2 (±0,3) a	6,3 (±0,2) a	5,9 (±0,4) a	6,2 (±0,3) a	6,1 (±0,2)
Caatinga		5,2 (±0,4) b	5,0 (±0,5) b	5,1 (±0,2) b	5,2 (±0,3) b	5,1 (±0,1)
CV (%)		9,0	8,8	8,0	7,0	
DMS		0,50	0,47	0,40	0,37	
Mangueira	0,20–0,40	5,7 (±0,3) a	5,5 (±0,3) a	5,8 (±0,4) a	6,2 (±0,3) a	5,8 (±0,2)
Caatinga		5,0 (±0,2) b	4,7 (±0,1) b	5,1 (±0,1) b	5,1 (±0,2) b	5,0 (±0,1)
CV (%)		7,0	7,0	8,0	6,0	
DMS		0,30	0,35	0,40	0,30	
Mangueira	0,40–0,60	5,3 (±0,2) a	4,9 (±0,1) a	5,8 (±0,4) a	6,1 (±0,1) a	5,5 (±0,2)
Caatinga		4,9 (±0,1) a	4,6 (±0,1) b	4,9 (±0,1) b	5,1 (±0,2) b	4,9 (±0,1)
CV (%)		5,0	4,0	7,0	4,5	
DMS		0,20	0,15	0,35	0,20	
Mangueira	1,00–1,20	5,1 (±0,3) a	4,6 (±0,1) a	5,5 (±0,3) a	5,7 (±0,2) a	5,2 (±0,2)
Caatinga		4,8 (±0,1) b	4,5 (±0,1) a	5,0 (±0,31) b	5,0 (±0,1) b	4,8 (±0,1)
CV (%)		6,0	3,0	6,0	4,0	
DMS		0,28	0,15	0,29	0,22	
Mangueira	1,60–1,80	4,8 (±0,1) a	4,5 (±0,1) a	5,4 (±0,4) a	5,4 (±0,3) a	5,0 (±0,2)
Caatinga		4,8 (±0,2) a	4,5 (±0,1) a	5,0 (±0,1) a	5,1 (±0,3) a	4,8 (±0,1)
CV (%)		4,0	3,0	7,3	7,5	
DMS		0,21	0,14	0,45	0,42	

* Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, em cada camada de solo, não diferem entre si si pelo Teste t, p <0,05. Valores entre parênteses representam o intervalo de confiança da média (p<0,05).

Na camada de 1,60-1,80 m, os valores de pH-H₂O não apresentaram diferenças significativas entre as duas áreas em qualquer uma das épocas avaliadas. Os valores de pH-H₂O estão dentro da faixa esperada para Neossolos Quartzarênicos de clima semiárido, tanto para vegetação de Caatinga quanto para área cultivada com fruteiras de longo prazo (CUNHA et al., 2010; FARIA et al., 2007; SILVA; ARAÚJO, 2005).

Por se tratar de uma cultura comercial, em que se adotam corretivos de solo e conforme recomendação, os valores de pH encontrados na área com mangueira até a profundidade de 0,60 m, zona de maior concentração de crescimento radicular para essa cultura, se encontravam, em média, na faixa ideal (5,5 a 6,1). Na área de vegetação nativa, por outro lado, os valores de pH-H₂O apresentam reação fortemente ácida em todas as camadas avaliadas, conforme Santos et al. (2013). Em função disso, os valores de alumínio trocável na camada de 0,00-0,60 m no solo da área sob a caatinga foram superiores ($p < 0,05$) em relação à área com mangueira, com amplitudes de 0,1 a 0,4 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e de 0,0 a 0,2 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, tendendo a aumentar em profundidade.

Portanto, percebe-se que, para o Neossolo Quartzarênico sob cultivo de mangueira irrigada, a camada de 0,00-0,60 m foi a que mais sofreu alterações na reação do solo decorrentes do padrão de manejo adotado em função da maior amplitude entre os valores médios de pH-H₂O observados neste estudo, sendo mais evidente para a camada de 0,00-0,20 m (Tabela 1).

Os teores de Ca²⁺ indicaram, por razões óbvias, comportamento semelhante em relação ao pH, ou seja, foram maiores na área cultivada do que na vegetação de Caatinga, variando de 0,42 a 2,23 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e de 0,35 a 1,39 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente para mangueira e caatinga (Figura 6a), considerando a camada de 0,00-0,60 m do solo. Na média dos dois anos, os teores foram, respectivamente para a mangueira e para a caatinga, de 1,83 e 0,85 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; 0,78 e 0,46 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; e 0,69 e 0,41 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para as camadas de 0,0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Para cada uma dessas camadas, o incremento de Ca²⁺ com o manejo do solo foi da ordem, respectivamente, de 2,1; 1,7; e 1,7 vezes maior na área cultivada do que na caatinga. Em geral, os teores de Ca²⁺ no solo tenderam a reduzir com o passar do tempo, sendo esse comportamento mais evidente na camada de 0,20-0,40 m na área cultivada,

muito provavelmente pela extração para a produção de frutos, fato que não pode ser devidamente comprovado neste trabalho.

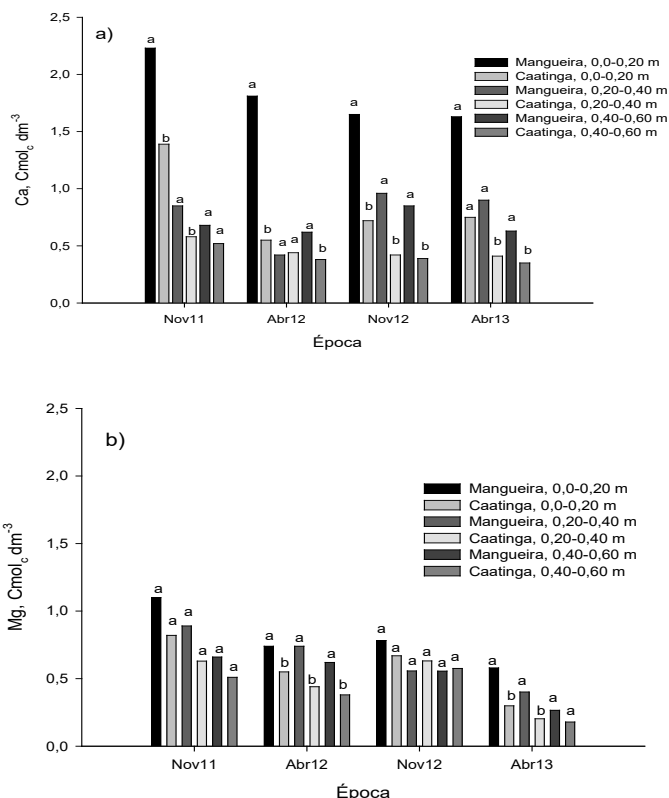


Figura 6. Teores de Ca²⁺ (a) e Mg²⁺ (b) em diferentes camadas do Neossolo Quartzarênico no sistema de produção com mangueira irrigada e vegetação de caatinga no período de novembro de 2011 a abril de 2013 em Petrolina, PE. Médias seguidas da mesma letra no topo da coluna não diferem entre si pelo Teste t p < 0,05 (n=10).

Os teores de Mg²⁺ variaram de 0,27 a 1,1 cmol_c dm⁻³ e de 0,18 a 0,82 cmol_c dm⁻³ para mangueira e caatinga, respectivamente (Figura 6b). Na média dos dois anos, os teores foram, em cmol_c dm⁻³, para a área cultivada e a área de caatinga, respectivamente, de 0,80 e 0,58; 0,65 e 0,48; e 0,53 e 0,41 para as camadas de 0,0-0,20 m; 0,20-0,40 m; e 0,40-0,60 m; ou seja, houve um

incremento de Mg^{2+} de 1,4; 1,3; e 1,3 vezes maior na área cultivada para aquelas camadas do solo. Os teores de Mg^{2+} mostraram tendência à redução ao longo do tempo em maior magnitude do que para o Ca^{2+} . Portanto, o monitoramento desses elementos deve ser criterioso e frequente a fim de otimizar a aplicação de fertilizantes e corretivos, essenciais para a cultura da mangueira.

Os teores de P-disp., considerando a camada de 0,00-0,60 m do solo, variaram de 2,3 a 19 $mg\ dm^{-3}$ e de 0,8 a 8 $mg\ dm^{-3}$ para mangueira e caatinga, respectivamente (Figura 7a). Na média dos dois anos, os teores, nessas formas de uso, foram de 17 e 6,5 $mg\ dm^{-3}$; 5,8 e 1,8 $mg\ dm^{-3}$; e 4,6 e 1,1 $mg\ dm^{-3}$ para as camadas de 0,0-0,20 m; 0,20-0,40 m; e 0,40-0,60 m, com os maiores valores sempre observados na área cultivada. O incremento de P no solo na área cultivada em relação à vegetação de Caatinga foi de 2,6; 3,2; e 4,2 vezes para as camadas especificadas anteriormente. Ao contrário do que foi observado para o Ca^{2+} e o Mg^{2+} , os teores de P no solo, na área cultivada, apresentaram maior variação e tenderam a aumentar com o passar do tempo, com valores significativamente maiores na camada de 0,0-0,20 m, mas com incremento significativo também até a profundidade de 0,60 m. Faria e Pereira (1993) e Soares e Nascimento (1997) também encontraram movimentação de fósforo em profundidade em solo Neossolo Quartzarênico (94% de areia). Segundo Silva e Araújo (2005) o aumento da mobilidade se deve à taxa de aplicação, à pequena área de molhamento em sistemas de irrigação pressurizados e à saturação dos sítios de adsorção em solos arenosos. No entanto, os níveis observados são considerados de médio a baixo, conforme Faria et al. (2007).

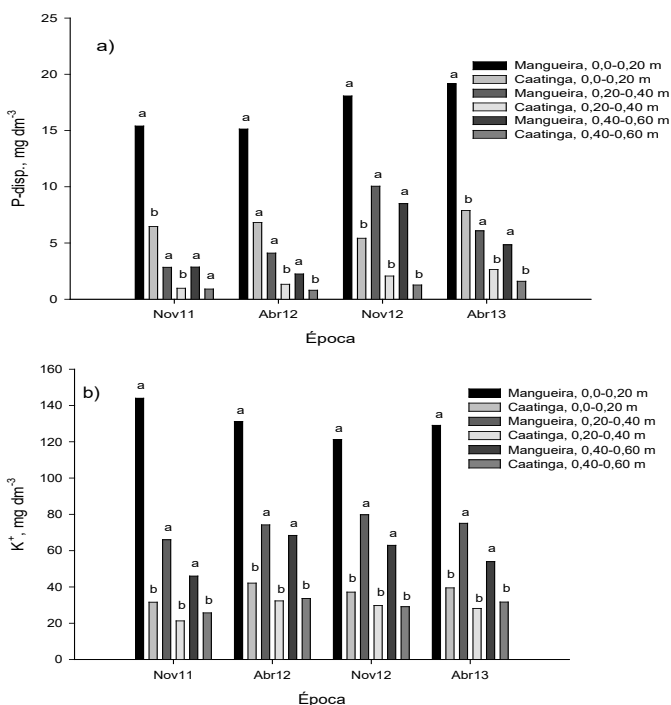


Figura 7. Teores de fósforo – P-disp. (a) e potássio – K⁺ (b) em diferentes camadas do Neossolo Quartzarênico no sistema de produção com mangueira irrigada e na vegetação de Caatinga no período de novembro de 2011 a abril de 2013 em Petrolina, PE. Médias seguidas da mesma letra no topo da coluna não diferem entre si pelo Teste t p < 0,05 (n=10).

Os teores de K⁺ foram mais elevados na camada do solo de 0,00-0,20 m e, considerando a profundidade de 0,00-0,60 m, variaram de 46 a 144 mg dm⁻³ e de 21 a 42 mg dm⁻³, respectivamente para mangueira e caatinga (Figura 7b). Os valores de K⁺ tenderam a se manter estáveis na camada de 0,00-0,20 m, variando de 121 a 144 mg dm⁻³ no solo da área cultivada e de 32 a 42 mg dm⁻³ sob a vegetação de Caatinga no período de novembro de 2011 a abril de 2013. Na camada de 0,20-0,40 m, os valores ficaram entre 66 e 80 mg dm⁻³, tendendo a aumentar ao longo do tempo na área cultivada. Na área com caatinga, os teores variaram de 21 a 32 mg dm⁻³ no período especificado, sem tendência clara de aumento ao longo do tempo. Na camada de 0,40-0,60 m, essa amplitude

foi de 46 a 68 mg dm⁻³ e de 26 a 34 mg dm⁻³ para mangueira e caatinga, respectivamente, com maior incremento entre as épocas de novembro de 2011 e abril de 2012. Na média dos dois anos, os teores foram, para mangueira e caatinga, respectivamente, de 131 e 38 mg dm⁻³; 74 e 28 mg dm⁻³; e 58 e 30 mg dm⁻³ para as camadas de 0,0-0,20 m; 0,20-0,40 m; e 0,40-0,60 m, com os maiores valores sempre observados na área cultivada, considerados alto, médio e baixo nas camadas especificadas (FARIA et al., 2007; SILVA, 2008). O incremento de K⁺ no solo da área cultivada em relação ao da vegetação de Caatinga nas respectivas camadas estudadas foi de 3,4; 2,6; e 1,9 vezes, tendo sido menores do que os observados para o P-disp, porém, com tendência de apresentarem translocação em profundidade, provavelmente devido a sua maior mobilidade no solo, à textura essencialmente arenosa e à baixa CTC do solo em questão.

Valores mais elevados de pH determinaram maior disponibilidade de nutrientes, enquanto o aumento nos teores de P-disp, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ foi devido à fertilização e à correção do solo ocorrida no sistema com mangueira. Tais efeitos, associados aos incrementos em CO, se refletiram em maiores valores na saturação por bases (V%) na área de mangueira em relação à de caatinga. Tais diferenças foram mais acentuadas na camada de 0-0,20 m, sendo verificadas até a camada 0,40-0,60 m do solo (Figura 8).

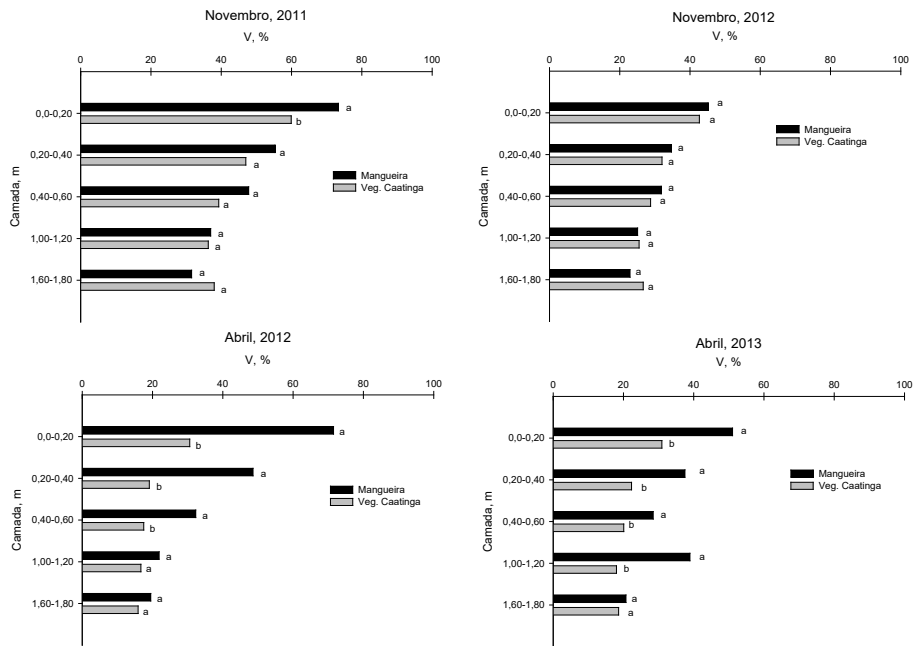


Figura 8. Saturação por bases (V%) em diferentes camadas do Neossolo Quartzarênico no sistema de produção com mangueira irrigada e na vegetação de Caatinga no período de novembro de 2011 a abril de 2013 em Petrolina, PE. Médias seguidas da mesma letra minúscula no topo da barra não diferem entre si pelo Teste t $p < 0,05$ ($n=10$).

Outros trabalhos também encontraram maiores teores de nutrientes (P-disp., K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) e V% nas camadas superficiais correlacionados com os teores de matéria orgânica do solo, fato atribuído à ciclagem de nutrientes com a decomposição dos resíduos culturais na superfície do solo (FARIA et al., 2007; GUIMARÃES et al., 2014; SIQUEIRA NETO et al., 2009). Há que se ressaltar que os teores de K^+ e de P-disp foram significativamente maiores na manga do que na caatinga em todas as camadas estudadas, refletindo os efeitos da fertilização e indicando haver evidente translocação desses nutrientes para camadas mais profundas do solo. Além de cuidados imediatos no uso desses nutrientes, verifica-se a urgente necessidade de mais estudos dos processos associados ao manejo da nutrição nas áreas produtoras de manga, no sentido de se ter maior eficiência do uso e menores riscos de contaminação de águas subsuperficiais devido à fertilização com esses nutrientes em cultivos irrigados.

O solo sob cultivo de mangueira apresentou maiores estoques de C nas frações ácidos fúlvicos - FAF (1,32 t ha⁻¹), ácidos húmicos - FAH (1,82 t ha⁻¹) e huminas - FH (9,64 t ha⁻¹), e nas substâncias húmicas - SH (12,79 t ha⁻¹) quando comparado ao solo sob caatinga nativa (FAF = 1,16 t ha⁻¹; FAH = 1,50 t ha⁻¹; FH = 6,09 t ha⁻¹; SH = 8,75 t ha⁻¹) na camada de 0-10 cm de profundidade (Figura 9), conforme demonstraram Cardoso et al. (2015).

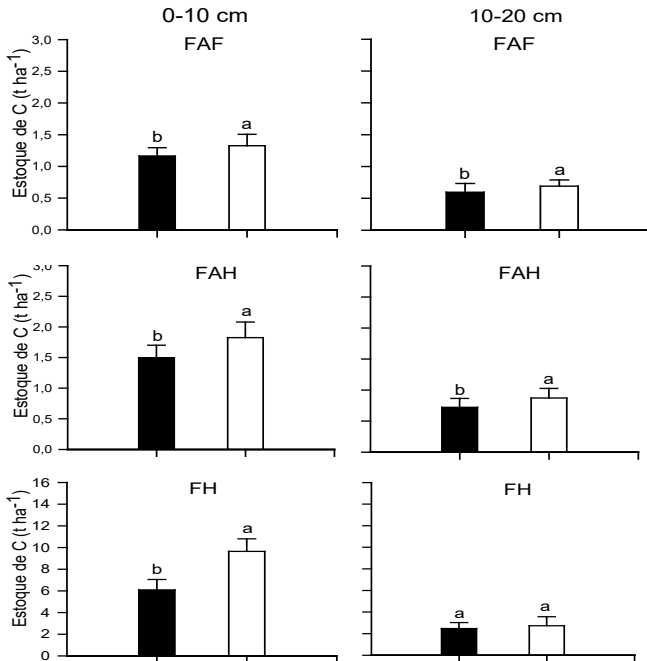


Figura 9. Estoques de C na fração ácidos fúlvicos (FAF), fração ácidos húmicos (FAH), fração huminas (FH) e substâncias húmicas (SH) nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm dos solos sob cultivo de mangueira irrigada e sob caatinga nativa. Colunas seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste t de Student ($\alpha = 5\%$ de probabilidade de erro). As barras de desvios verticais representam o desvio-padrão da média.

Comportamento semelhante foi observado para FAF, FAH e SH na camada de 10-20 cm de profundidade (Figura 9). Conforme afirmado anteriormente,

a deposição de resíduos orgânicos durante 20 anos de cultivo de mangueira favoreceu o incremento dos estoques de C nas substâncias húmicas do solo. Em áreas sob mangueira irrigada, como no Vale do Rio São Francisco, especialmente em solos com baixos teores de nutrientes, a fertilização para repor os nutrientes extraídos pela colheita pode levar a um incremento da produtividade primária, fazendo com que maiores quantidades de material vegetal possam retornar ao solo e aumentar os estoques de C das frações húmicas. Embora resultados de experimentos sejam escassos para mangueira irrigada, ao analisar informações de vários experimentos, Johnson e Curtis (2001) observaram que, no geral, culturas perenes (florestas plantadas) com aplicação de fertilizantes apresentavam maiores teores de C orgânico no solo.

Os estoques de C nas frações húmicas do solo seguiram a ordem decrescente: FH>FAH>FAF. Resultados semelhantes foram observados por Piccolo (2002), que afirma que o estoque de C na FAH normalmente é superior ao estoque de C na FAF. Em estudo realizado sob cerrado nativo, plantio convencional e plantio direto no Sudoeste Piauiense sob Latossolo Amarelo distrófico, Campos et al. (2013) também observaram que o estoque de C da FH foi predominante em relação ao estoque de C das demais frações húmicas na camada 0-5 cm.

Atributos físicos

A distribuição granulométrica do solo, nas duas áreas estudadas, é apresentada na Tabela 2. Verifica-se que os teores de argila variam de 44 a 60 g kg⁻¹ e de 40 a 53 g kg⁻¹; os de silte, de 20 a 40 g kg⁻¹ e de 35 a 52 g kg⁻¹; e os de areia, de 900 a 936 g kg⁻¹ e de 900 a 922 g kg⁻¹, nas áreas sob caatinga e sob mangueira, respectivamente. Constata-se o predomínio da fração areia, que é característica dos Neossolos Quartzarênicos, o que lhes confere alta taxa de infiltração e, conseqüentemente, rápida drenagem, com estrutura em grãos simples (AMARAL et al., 2011; CUNHA et al., 2010; HILLEL, 1999). Verifica-se que o tipo de uso do solo não influenciou significativamente essa variável (Tabela 2).

Tabela 2. Distribuição granulométrica do solo para as diferentes camadas em área de vegetação de Caatinga e fruticultura (manga) em Petrolina, PE.

Área	Camada	Granulometria*		
		Argila	Silte	Areia
	m		g kg ⁻¹	
Caatinga	0 - 0,20	44	20	936
	0,20 - 0,40	46	22	932
	0,40 - 0,60	48	29	923
	1,00 - 1,20	58	31	911
	1,60 - 1,80	60	40	900
Mangueira	0 - 0,20	40	38	922
	0,20 - 0,40	42	35	923
	0,40 - 0,60	42	43	915
	1,00 - 1,20	53	45	902
	1,60 - 1,80	53	52	900

* Valores médios (n=10).

O teor de água na capacidade de campo (Θ_{cc}) não diferiu entre os dois tipos de uso do solo avaliados, embora tenha apresentado maior valor numérico na área de mangueira (Tabela 3). Essa ausência de diferença significativa pode ser atribuída ao alto coeficiente de variação encontrado para esta variável, independentemente da camada de solo avaliada. O valor maior de Θ_{cc} no tratamento mangueira pode ser devido ao acréscimo de microporos e CO na camada 0-0,10 m, que favorecem a maior retenção de água. Por outro lado, o teor de água no ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) foi maior na área de mangueira do que na caatinga nas duas camadas de solo avaliadas ($p < 0,05$). Isso pode ser um indicativo de que o manejo do solo adotado na mangueira irrigada está contribuindo para aumentar a retenção de água com maior energia no solo, possivelmente em função de maior aporte de matéria orgânica e incremento de microagregados (Tabela 3). Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Mamede et al. (2014), que, nos mesmos pontos de amostragem deste estudo, verificaram que, na camada de 0-0,10 m do Neossolo Quartzarênico, a formação e a estabilização de agregados foram mais elevadas na área de mangueira irrigada do que na de caatinga. Cardoso et al. (2015), nas mesmas condições deste estudo, concluíram que, após 20 anos, o cultivo de mangueira irrigada aumenta o estoque de carbono orgânico nas frações de maior peso molecular, o que confere presença de matéria orgânica de maior estabilidade em relação à vegetação de Caatinga, sendo este efeito, porém, restrito à camada de 0,00-0,10 m do solo.

Tabela 3. Valores médios (n=10) do teor de água na capacidade de campo (Θ_{cc}) e no ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}); do volume total de poros (VTP), macroporos (Ma) e microporos (Mi); e de densidade do solo (Ds) e de partícula (Dp) para diferentes camadas do solo em área de caatinga e de mangueira irrigada em Petrolina, PE.

Uso do Solo	Θ_{cc} 0,01 MPa	Θ_{pmp} 1,5 MPa	AD	VTP	Ma	Mi	Ds	Dp
	%	%	%		%			g cm ⁻³
	0-0,10 m							
Caatinga	5,3a	0,96b	4,3a	43a	28a	15b	1,50a	2,63a
Mangueira	7,5a	1,74a	5,8a	45a	17b	28a	1,47a	2,66a
DMS	4,4	0,26	4,2	2,2	5,5	4,3	0,07	0,08
CV (%)	68	19	83	5,0	25	20	4,4	4,2
	0,10-0,20 m							
Caatinga	6,50a	0,95b	5,5a	41a	26a	15b	1,55a	2,66a
Mangueira	5,40a	1,43a	4,0a	42a	17b	25a	1,56a	2,70a
DMS	4,3	0,17	4,2	3,3	4,8	4,5	0,06	0,05
CV (%)	72	14	88	7,8	22	23	4,1	5,1

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna entre os tratamentos, em cada profundidade e para cada uma das variáveis não diferem entre si pelo Teste t p < 0,05.

DMS= diferença mínima significativa.

CV= coeficiente de variação.

O volume total de poros (VTP) foi de 43% e 45% e de 41% e 42% nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m nas áreas com caatinga e com mangueira, respectivamente (Tabela 3). Esses resultados são condizentes com os encontrados para solos de textura arenosa, que tendem a ser menos porosos e ter maior densidade do que os solos argilosos, que apresentam partículas arranjadas em forma de agregados, com predominância de vazios na amostra de solo (HILLEL, 1999; REICHARDT, 1990; RIBEIRO et al., 2007). O VTP não foi afetado pelo uso do solo com fruticultura irrigada com mangueira por longo prazo em relação à área de vegetação com caatinga, embora, em média, os valores tenham sido ligeiramente superiores na área cultivada nas duas camadas de solo avaliadas (Tabela 3). No entanto, ao avaliar o volume de macroporos, verifica-se que os valores variaram de 26% a 28%, com maior valor na camada de 0-0,10 m na área de caatinga, e permaneceu constante em 17% na área de mangueira, tendo sido superior na área de caatinga ($p < 0,05$) para as duas camadas estudadas (Tabela 3). Esse resultado indica que houve modificação do arranjo poroso do solo, demonstrando que o uso do solo com mangueira irrigada reduziu em aproximadamente 10% o volume de macroporos em relação à área de caatinga, fato que pode ser atribuído ao tráfego de máquinas nas áreas de cultivo. Embora isso tenha ocorrido, constata-se que as duas áreas estudadas apresentaram volume de macroporos maior do que 10%, o que é considerado adequado para permitir a drenagem rápida da água gravitacional, as trocas gasosas e o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas (DEXTER, 1988; REYNOLDS et al., 2002; RIBEIRO et al., 2007).

Os resultados de resistência mecânica do solo à penetração (RP) são apresentados na Figura 10. Constatou-se que os valores de RP foram maiores ($p < 0,05$) na entrelinha, em praticamente todas as camadas de solo avaliadas, exceto na de 0,50-0,60 m, onde os valores não diferiram ($p > 0,05$) entre si. Na linha das mangueiras, os valores foram iguais aos encontrados na caatinga, exceto na camada de 0,20-0,30 m, onde, embora superiores, ficaram abaixo do valor de 2.000 kPa, indicando pouca alteração na RP na área cultivada, considerando a avaliação logo após o período chuvoso. Os valores médios de RP na camada de 0,0-0,10 m ficaram, em média, abaixo de 1.000 kPa em todas as posições avaliadas.

Na camada de 0,10-0,20 m, as diferenças na RP entre os locais de amostragem ocorreram em maior grau. Na entrelinha, observaram-se maiores valores do que na linha e na área de referência (caatinga). Na entrelinha, os valores de RP superaram 2.000 kPa, considerado limitante para o adequado crescimento e desenvolvimento de raízes das plantas (KAISER et al., 2009; TAYLOR et al., 1966; TORMENA et al., 2004). No entanto, na linha das mangueiras (embora tenham superado os valores observados na caatinga), a RP ficou abaixo de 2.000 kPa, coincidindo com os dados obtidos por Freitas et al. (2010). Esse mesmo comportamento se repetiu até a camada de 0,20-0,30 m, onde a RP na entrelinha da cultura da mangueira superou, em média, o valor de 3.000 kPa, com decréscimo em profundidade a partir dessa camada (Figura 10).

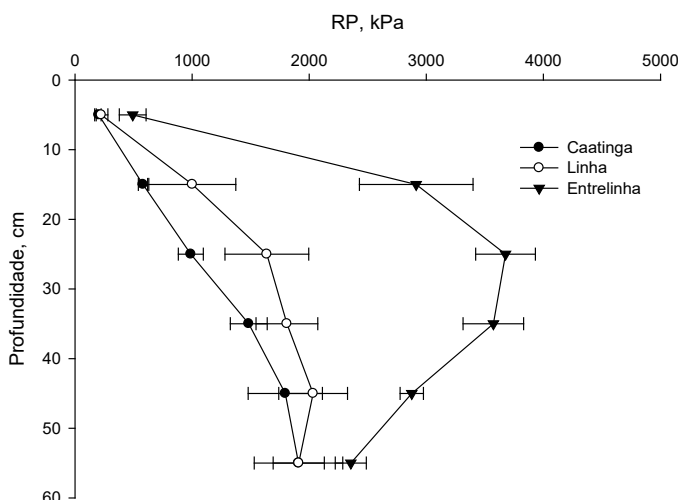


Figura 10. Valores médios de resistência mecânica do solo à penetração (RP) em área de fruticultura irrigada na linha e na entrelinha do pomar de manga e em área de vegetação de Caatinga (referência), em diferentes camadas de um Neossolo Quartzarênico em Petrolina, PE. Barras horizontais representam o intervalo de confiança da média ($p < 0,05$).

Coelho et al. (2012) encontraram valores médios de RP na área de projeção da copa das plantas acima de 2.000 kPa nas camadas de 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m em um Vertissolo com textura muito argilosa, cultivado com mangueira em Juazeiro, BA. Isso evidencia que a RP responde ao uso e manejo do solo e a

atributos intrínsecos ao tipo de solo, tendo forte relação com a classe textural e com o teor de água no solo no momento de sua determinação.

Os resultados referentes ao índice de sensibilidade (I_s), que representa a relação entre o valor observado da RP para as regiões da linha e da entrelinha da cultura da mangueira com os encontrados na vegetação de Caatinga (área de referência) são apresentados na Figura 11. Em relação à qualidade do solo, do ponto de vista agrônômico, espera-se que o uso e o manejo proporcionem valores de RP próximos ou abaixo da unidade, quando comparados a uma área de referência (condições naturais, sem intervenção antrópica), indicando baixo grau de alteração nesse atributo.

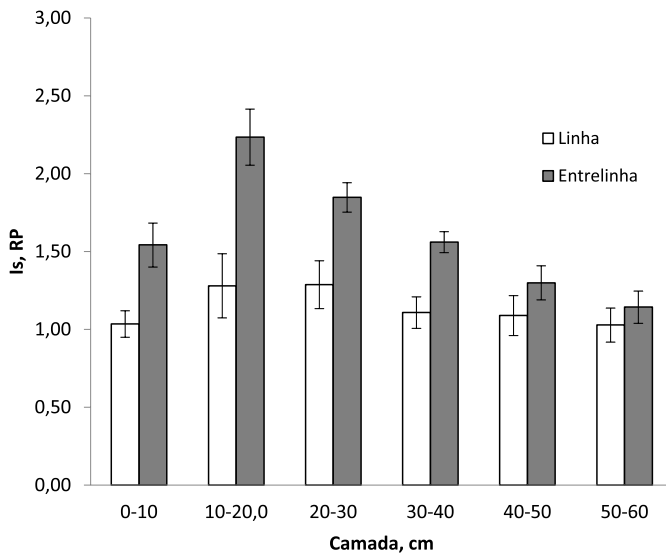


Figura 11. Índice de sensibilidade para resistência mecânica à penetração (I_s -RP) na linha e na entrelinha em diferentes camadas de um Neossolo Quartzarênico após 20 anos sob cultivo de mangueira irrigada em Petrolina, PE. Barras representam o intervalo de confiança da média ($p \leq 0,05$).

Na área de projeção da copa das plantas (linha), o I_s variou de 1,03 a 1,29, com os maiores valores encontrados nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m do solo. Nas demais camadas, os valores foram muito próximos

da unidade, indicando pouca alteração da área cultivada em relação à caatinga (Figura 11). Por outro lado, na entrelinha, os valores de I_s foram maiores e variaram de 1,14 a 2,23. O maior valor foi encontrado para a camada de 0,10-0,20 m, com $I_s > 2,0$, indicando um grau acentuado de alteração na RP. Esses valores permaneceram altos ($> 1,5$) até a profundidade de 0,40 m, a partir da qual diminuíram, não diferindo estatisticamente entre as posições linha e entrelinha.

Esses resultados indicam que, na área cultivada, a RP no Neossolo Quartzarênico foi alterada em maior grau na entrelinha da cultura, especialmente nas camadas subsuperficiais, com destaque para aquela compreendida entre 0,10-0,40 m. O uso da entrelinha da cultura em sistemas de produção integrados é promissor, uma vez que a entrelinha representa 60% da área, considerando o espaçamento de 5 m x 10 m.

No entanto, estudos sobre manejos conservacionistas do solo precisam ser desenvolvidos, tanto para definir valores de referência de RP, quanto para verificar a eficácia e a necessidade de mobilização mecânica ou biológica na camada de 0,10-0,40 m por meio de implementos agrícolas associados ao uso e ao manejo de plantas de cobertura adequadas às condições edafoclimáticas do local de estudo.

Considerações finais

Após 20 anos de cultivo do solo com mangueira irrigada, constata-se que houve alterações nos atributos químicos e físicos do solo em relação à vegetação de Caatinga.

As alterações nos atributos químicos podem ser consideradas positivas, principalmente em função do aporte de carbono orgânico na camada de 0,00-0,20 m do solo, associado à elevação do pH- H_2O e ao aumento da disponibilidade de Ca^{2+} , Mg^{2+} , P-disp, K^+ e V%.

P-disp e K^+ tenderam a se acumular na superfície e apresentaram incrementos significativos na camada abaixo de 0,0-0,20 m, o que exige atenção quanto ao manejo da fertilização com esses elementos em função da textura arenosa do solo.

Quando comparado à caatinga nativa, o cultivo de mangueira irrigada aumentou os estoques de carbono das frações ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina, e das substâncias húmicas. Comportamento semelhante foi observado para o estoque de carbono da fração pesada e para o carbono da fração leve.

O volume de macroporos é reduzido na área com mangueira irrigada, e os valores de RP são maiores na camada de 0,20-0,30 m, porém, não o suficiente para indicar déficit de aeração ou compactação excessiva; no entanto, na entrelinha da cultura de mangueira na camada de 0,10-0,40 m do solo, os valores de RP superaram, em média, o valor de 2.000 kPa.

Embora o manejo sob cultivo irrigado de mangueira tenha trazido efeitos positivos para o solo sob a copa das plantas, faz-se necessário realizar, nas entrelinhas, novos estudos que busquem melhorar a cobertura vegetal e os atributos do solo e incrementar rendimentos econômicos.

Referências

ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A.; GATIBONI, L. C.; ELTZ, F. L. F. Atividades agrícolas de produção em solos frágeis no sul do Brasil. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7, p. 368-403.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **S313.3**: soil cone penetrometer. St. Joseph, 1999. 834 p.

AMARAL, F. C. S do (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de terras para irrigação**: enfoque na região semiárida. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 164 p. il.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. A. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 54, n. 1/2, p. 101-109, Mar. 2000.

BENITES, V. M.; MÁDARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo**: um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 7 p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 16).

BERNARDI, A. C. C.; MACHADO, P. L. O.; MADARI, B. E.; TAVARES, S. R. L.; CAMPOS, D. V. B.; CRISÓSTOMO, L. A. Carbon and nitrogen stocks of an Arenosol under irrigated fruit orchards in semiarid Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 169-175, 2007.

BOLETIM DO CLIMA: síntese climática. Recife: Agência Pernambucana de Águas e Clima, v. 2, n. 1, jan. jun. 2014. 46 p. il. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/>>. Acesso em: 16 out. 2014.

BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. The response of soil quality indicators to conservation management. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 79, p. 37-45, 1999.

BRASIL. Ministério do Interior. **Mapa geológico**. Recife: Sudene, Divisão de Solo-DRN, 1974. 1 mapa. Escala 1:25.000.000

CAMPOS, L. P.; LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; BRASIL, E. L.; IWATA, B. F. Estoques e frações de carbono orgânico em Latossolo Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, p. 304-312, 2013.

CARDOSO, J. A. F. **Atributos químicos e físicos do solo e matéria orgânica do solo sob mangueira irrigada e caatinga nativa na região do Vale do submédio São Francisco**. 2014. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro.

CARDOSO J. A. F.; LIMA A. M. N.; CUNHA T. J. F.; RODRIGUES M. S.; HERNANI L. C.; AMARAL, A. J.; OLIVEIRA NETO, M.B. Organic matter fractions in a Quartz ipsamment under cultivation of irrigated mango in the lower São Francisco Valley Region, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, p. 1068-1078, 2015.

CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).

COELHO, D. S.; CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em Vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 755-763, 2012.

CORINGA, E. A. O.; MENDES, C. R. J.; OLIVEIRA, T. S.; FELFILI, D. M. C. Determinação do carbono orgânico total e das frações húmicas de um Neossolo sob diferentes coberturas vegetais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 50., 2010, Cuiabá. **Agroindústria, qualidade de vida e biomas brasileiros**: anais Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Química, 2010. Disponível em: <<http://www.abq.org.br/cbq/2010/trabalhos/5/5-468-8191.htm>>. Acesso em: 11 set. 2013.

CUNHA, T. J. F.; GIONGO, V.; SILVA, D. J.; MENDES, A. M. S.; MELO, R. F. de; OLIVEIRA NETO, M. B. de; SILVA, M. S. L. da; ALVAREZ, I. A. Principais solos do semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. In: SÁ, I. B.; SILVA,

P. C. G. (Ed.). **Semiárido brasileiro**: pesquisa, desenvolvimento e inovação. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p. 49-87.

DEMOLINARI, M. S. M.; SILVA, I. R.; LIMA, A. M. N.; VERGUTZ, L.; MENDONÇA, E. S. Efeito da solução de separação densimétrica na quantidade e qualidade da matéria orgânica leve e na quantificação do carbono orgânico da fração pesada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 871-879, 2008.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**. v. 11, p. 199-238, 1988.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA: American Society of Agronomy, 1994. p. 3-22. (SSSA especial publication, n. 35).

FALKER. **Penetro LOG PLG1020**: medidor eletrônico de compactação do solo. Disponível em: <<http://www.falker.com.br/download.php>>. Acesso em: 14 fev. 2013.

FARIA, C. M. B. de; SILVA, M. S. L. da; SILVA, D. J. **Alterações em características de solos do Submédio São Francisco sob diferentes sistemas de cultivo**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007. 36 p. (Embrapa Semi-Árido. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 74).

FARIA, C. M. B.; PEREIRA, J. R. Movimento de fósforo no solo e seu modo de aplicação no tomateiro rasteiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 28, n. 12, p. 1363-1370, 1993.

FREITAS, C. A. S. de; BEZERRA, F. M. L.; SILVA, A. R. A. da; PEREIRA FILHO, J. V.; FEITOSA, D. R. C. Comportamento de cultivares de mamona em níveis de irrigação por gotejamento em Pentecoste, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 1059-1066, 2010.

GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. S. M.; GAVA, C. A. T. Carbono no sistema solo-planta no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 4, n. 6, p. 1233-1253, 2011.

GUIMARÃES, D. V.; GONZAGA, M. E.; MELO NETO, J. O. Manejo da matéria orgânica do solo e estoques de carbono em cultivos de frutas tropicais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 301-6, 2014.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1999. 771 p. il.

JACOMINE, P. K. T. Solos sob caatinga: características e uso agrícola. In: ALVAREZ, V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: SBCS: UFV, 1996. p. 95-133.

JOHNSON, D. W.; CURTIS, P. S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. **Forest Ecology Management**, v. 140, p. 227-238, 2001.

KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; COLLARES G. L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 845-855, 2009.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 4-10, 1996.

LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. **Soil and Tillage Research**, v. 27, p. 1-8, 1993.

LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWART, B. A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRC Press, 1997. 576 p.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 37-51. (SSSA special publication, n. 35).

MAMEDE, L. S.; ALMEIDA, A. C. D.; SANTOS, P. M.; PINTO, L. B. C.; HERNANI, L. C.; AMARAL A. J.; MELO, A. S. Agregação de Neossolo Quartzarênico em cultivo de manga irrigada. In: REUNIÃO NORDESTINA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2., 2014, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: SBCS: UESC: UFRB, 2014.

MARIN, A. M. P.; MENEZES, R. S. C.; SILVA, E. D.; SAMPAIO, E. V. S. Efeito da *Gliricidia sepium* sobre nutrientes do solo, microclima e produtividade do milho em sistema agroflorestal no agreste paraibano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, p. 555-564, 2006.

MASSON, M. E. J.; LOFTUS, G. R. Using confidence intervals for graphically based data interpretation. **Canadian Journal of Experimental Psychology**, v. 57, p. 203-220, 2003.

PICCOLO, A. The supramolecular structure of humic substances: a novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. **Advances in Agronomy**, v. 75, p. 57-134, 2002.

- QUEIROZ, J. E.; GONÇALVES, A. C. A.; SOUTO, J. S.; FOLEGATTI, M. V. Avaliação e monitoramento da salinidade do solo. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. das.; ACERDA, C. F. de. (Ed.). **Manejo da salinidade na agricultura**: estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal, 2010. p. 63-81. 472 p. il.
- REICHARDT, K. **Água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.
- REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. F.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n. 1/2, p. 131-146, 2002.
- RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de F.; SAMPAIO, F. de M. T. Propriedades físicas do solo influenciadas pela distribuição de poros de seis classes de solo da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. DOS; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBREIRAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A DE; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. DE. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p. il. color.
- SCHOJONNING, P.; ELMHOLT, S.; CHRISTENSEN, B. T. **Managing soil quality**: challenges in modern agriculture. Wallingford: Cabi Publishing, 2004. 323 p.
- SILVA, D. J.; ARAÚJO, C. A. S. Agricultura irrigada: a importância da adubação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: SBCS: Embrapa Solos: UFRPE, 2005. 1 CD-ROM.
- SILVA, D. J. **Nutrição e adubação da mangueira em sistema de produção integrada**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2008. 11 p. (Embrapa Semiárido. Circular técnica, 88)
- SILVA, F. C. da (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.
- SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. de C.; SCOPEL, E.; COSTA JUNIOR, C.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, p. 709-717, 2009.
- SOARES, J. M.; NASCIMENTO, T. Comportamento do sistema radicular da mangueira em Podzólico Bruno Vermelho-Amarelo Distrófico sob irrigação por sulco na região do Submédio São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, Campina Grande. **Resumos**. Campina Grande: SBEA: UFPB, 1997. 1 CD-ROM.
- SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.;

SUMNER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 1996. p. 1011-1020.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium-to-coarse textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1966.

VEZZANI, F. M.; CONCEIÇÃO, P. C.; MELLO, N. A.; DIECKOW, J. Matéria orgânica e qualidade do solo. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. de O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 654 p.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication of Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

PARTE III

Avaliação da sustentabilidade do uso de solos frágeis



Capítulo 1

Mudanças no uso e impactos da expansão canavieira sobre solos frágeis no Sudoeste Goiano

Silas Pereira Trindade; Selma Simões de Castro

Introdução

O Bioma Cerrado passou por grandes mudanças de uso e ocupação das suas terras nos últimos 40 anos, em consequência do avanço da fronteira agrícola na sua porção Centro-Sul, desde a década de 1970, quando, influenciadas pela Revolução Verde, a agricultura e a pecuária foram modernizadas e intensificadas, especializando-se no binômio carne-grãos (GOMES; TEIXEIRA NETO, 1993; KAGEYAMA, 1990) e promovendo uma profunda mudança na paisagem regional. Tal processo baseou-se num modelo agroexportador de *commodities*, ancorado numa notável concentração fundiária e de capital no campo, com formação de grandes complexos agroindustriais (CAIs), tornando-se referência do agronegócio no País (SILVA, 1999a, 1999b). A Região de Planejamento do Sudoeste Goiano, no estado de Goiás, doravante denominada RPSG, é representativa desse processo, favorecida pela ocorrência de grandes áreas com solos aptos à agricultura intensiva e à pecuária extensiva e uma infraestrutura e logística que foram se consolidando.

Desde 2000, uma nova mudança vem ocorrendo nessa mesma porção Centro-Sul do Cerrado, sobretudo nos estados de Mato Grosso do Sul e Goiás,

devido à recente expansão da cana-de-açúcar, visando a produção do etanol. Vários estudos têm demonstrado que esse fenômeno vem ocorrendo justamente nas áreas consolidadas em atividades do agronegócio baseado em carne e grãos, como na mesorregião do Sul Goiano, em particular na sua RPSG, sobretudo a partir de 2004 (CASTRO et al., 2010; FISCHER et al., 2008; NASSAR et al., 2008). A produção canavieira, como uma alternativa energética, está em consonância com a demanda por uma nova matriz energética mundial, substitutiva da matriz dos combustíveis fósseis. Tal expansão contou ainda com uma infraestrutura e uma logística consolidada, necessitando apenas de ampliação e manutenção (CAMELINI; CASTILHO, 2012).

Alguns estudos também mostraram que os efeitos da modernização da agricultura através da expansão da fronteira agrícola, anterior ao recente avanço da cana, promoveram grande impacto econômico, considerado positivo, mas também impactos considerados negativos, como os ambientais, sociais e outros, devido o modelo adotado. Destacam-se a grande perda de biodiversidade, a fragmentação dos remanescentes e suas consequências (HOGAN et al., 2002; PROBIO, 2002). No caso da recente expansão da cana, os estudos também revelam impactos, dentre os quais os relacionados à disputa de terras (ABDALA; RIBEIRO, 2011) e ao deslocamento dos produtos que cederam lugar à cana, como grãos, sobretudo soja, e a pecuária bovina de corte, que se deslocaram para áreas menos aptas, podendo comprometer a sustentabilidade dessa nova matriz energética (BARBALHO et al., 2013; FERRAZ et al., 2013; FISCHER et al., 2008; NASSAR et al., 2008; PIETRAFESA et al., 2012; TRINDADE, 2015).

Contudo, os principais indutores de mudanças de uso do solo são frequentemente os avanços tecnológicos na produção agrícola, que conduzem a um aumento da produtividade, em sintonia com as exigências de mercado e não necessariamente as políticas públicas, que, no caso da cana referem-se ao Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011/PNA (OLIVEIRA; RAMALHO, 2006), por meio do Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar/ZAE-Cana (MANZATTO et al., 2009). Este mapeou as áreas com maior potencial para produção canavieira no País, o qual juntamente com o PNA, tornaram-se instrumentos reguladores do novo processo de expansão canavieira a partir de 2006 e 2009, mas, o fato é que esta já havia começado em 2000, sem um marco

regulatório ou política pública específica. Na maioria dos casos o exigido era apenas o Licenciamento Ambiental para a unidade industrial. Portanto, quando as políticas reguladoras surgiram o setor já implementara sua própria política. Nesse caso, a expansão veio como resposta do setor à conjuntura internacional favorável, fruto da pressão para mudar a matriz energética mundial para fontes mais limpas e do seu *status* tecnológico e político alcançado, construído pouco a pouco desde Proálcool (1975-79) (PIETRAFESA et al., 2012). Favorecerem também essa expansão as suas vantagens competitivas (FERRAZ et al., 2013), relacionadas à mecanização e modernização de todas as fases da sua produção, e o fato dela se expandir a partir de uma unidade produtora - a usina, não raro, logo em seguida associada a um CAI, à cogeração de energia e outros desdobramentos em cadeia, ao contrário de outras culturas, como a soja, cuja comercialização se dá prioritariamente *in natura* e os CAIs vieram depois (TRINDADE, 2015).

Estudos sobre essa expansão recente da cana revelaram ainda que sua trajetória inicial se deu, preferencialmente, sobre solos com maior aptidão agrícola, em geral argilosos, dominantes nas extensas chapadas e chapadões, tipicamente de baixos declives e ocupados com a cultura de grãos, em particular soja (BARBALHO et al., 2013; CASTRO et al., 2010; NASSAR et al., 2008). Só a partir de 2008, vem avançando sobre solos com menor aptidão agrícola e mais aptos a pastagens, em geral já ocupados com essa atividade, ou de áreas destinadas à preservação da vida silvestre (TRINDADE, 2015). Este autor observou que a cana ao se dirigir rumo ao extremo oeste da RPSG, incorporava solos frágeis, como os Neossolos Quartzarênicos (RQ), solos esses arenosos, de elevada erodibilidade, além de Argissolos e Latossolos Vermelho Amarelos de textura média, ambos de moderada erodibilidade e requerendo práticas de manejo mais severas.

Na RPSG, segundo Trindade (2015), a cana substituiu culturas de grãos, sobretudo soja, consolidadas nos Latossolos Vermelhos de maior aptidão agrícola, e em seguida substituiu pastagens estabelecidas nos demais solos, porém não necessariamente degradadas, contrariando o estabelecido no PNA, que defende o uso prioritário destas, de modo melhor aproveitá-las (CASTRO et al., 2010). É importante espacializar esse fenômeno da expansão canavieira, suas relações com usos anteriores e suas consequências, em escalas mais

adequadas de modo a compreender como se deu a expansão e, em particular, qual a importância de incorporação de áreas com solos frágeis.

Neste capítulo é analisada a dinâmica espacial da expansão canavieira na RPSG, tomada como representativa da dinâmica observada no Centro Sul do Cerrado, no período de 1985 a 2013, respectivamente associados à influência do Proálcool e à recente expansão, considerando a sucessão de uso dos solos e o seu avanço sobre áreas com solos frágeis.

Área de estudo

A RPSG, tal como definida pela Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento do Estado de Goiás (SEPLAN-GO), ocupa aproximadamente 18% do território estadual (61.498,463 Km²) e abriga 26 municípios (Figura 1). A partir de 2004, essa região tem sido alvo preferencial de expansão canavieira, consolidando-se como a mais importante produtora de etanol e de açúcar do Estado, por iniciativa do próprio setor e favorecida pelo ZAE-Cana que a indicou com predomínio de moderada a elevada aptidão a esse cultivo (MACEDO, 2007). Até o final de 2013, a região contava com 14 usinas em operação, concentradas nos municípios que se situam de nordeste a sudeste da região. A primeira usina da região data de 1946, no final da década de 1980, já no período do Proálcool, contava com três usinas e depois de 2003, com os investimentos na expansão sucroalcooleira, implantou mais dez usinas em operação, totalizando 14 unidades (Figura 1).

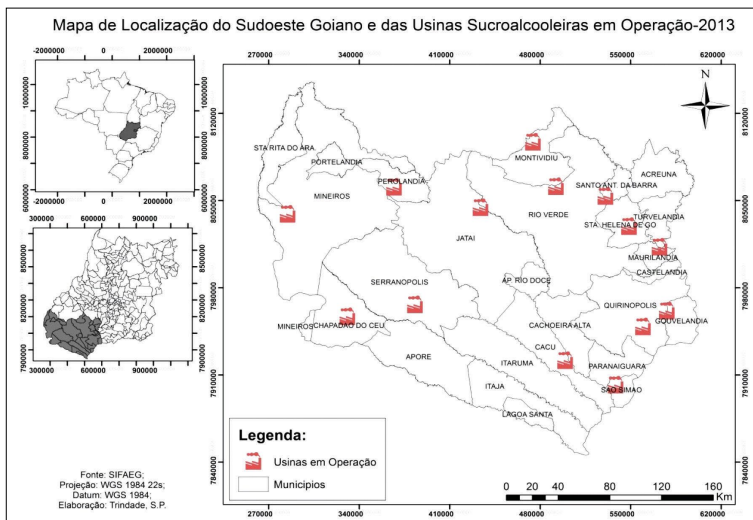


Figura 1. Localização do Sudoeste Goiano em Goiás e as Usinas em Operação-2013.

Fonte: Trindade (2015).

A eficiência da produção canavieira, como qualquer outra, é produto de maior e melhor integração do ambiente físico com o sistema de produção, os chamados *ambientes de produção*, visando obter as máximas produção e produtividade, e para tanto dependendo das práticas de manejo que envolvem um intenso controle e monitoramento do solo e plantas, bem como do mercado atual e futuro, dentre outras variáveis dos sistemas. Em consequência, o avanço da cana na RPSG sobre as terras com melhor aptidão agrícola, reproduzindo a mesma trajetória dos grãos, como exposto, justifica-se pelos fatores naturais de produção como as condições edafoclimáticas e de relevo (CASTRO et al., 2010). Nesse sentido, declividade favorável, fertilidade potencial, forte sazonalidade climática e abundância de recursos hídricos foram determinantes para o sucesso da recente expansão da cana rumo ao centro do Cerrado (FERRAZ et al., 2013).

Segundo Prado (2005), a RPSG reúne esses fatores favoráveis. Nesse sentido, o mapa de solos (Figura 2) da região mostra predomínio dos Latossolos, que cobrem 85% do total da área, considerados altamente aptos à cultura da cana-de-açúcar, tendo sido os preferidos pelos projetos canavieiros instalados de 1970 a 1990 como revela a concentração das manchas contínuas.

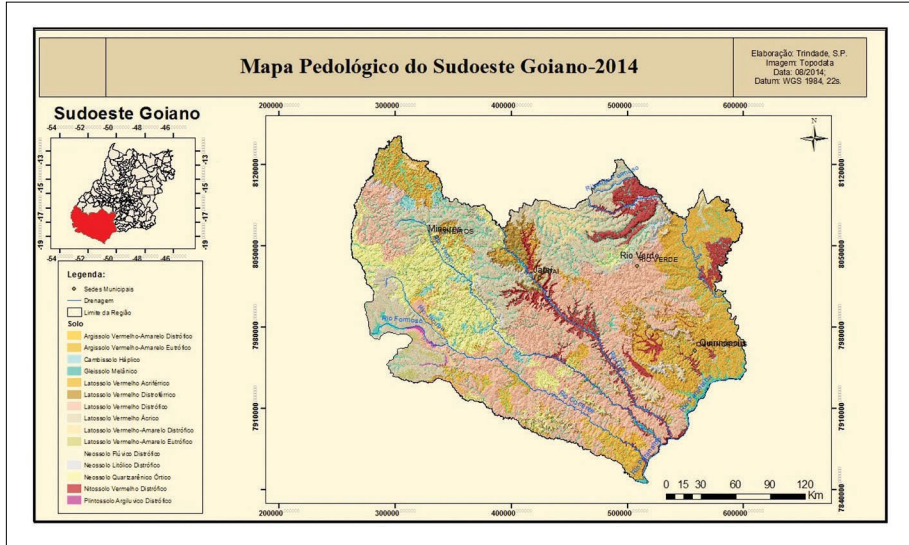


Figura 2. Mapa Pedológico do Sudoeste Goiano, representando os solos da área de estudo.

Fonte: Trindade (2015).

Entretanto, observa-se a existência de áreas não desprezíveis de solos que requerem maiores cuidados no seu uso e manejo, como os Neossolos Quartzarênicos, a noroeste e sudoeste da região, desenvolvidos sobre os arenitos da Formação Botucatu (que abriga o Aquífero Guarani), além de Gleissolos que se encontram nas baixadas fluviais (Tabela 1). Tais solos somados aos Argissolos e Latossolos, somam quase 6 Mha da região ou seja, quase sua área total (Tabela 1), e embora sejam bem menos aptos à cana, apresentam profundidade efetiva satisfatória e, sobretudo, relevo favorável, o que os torna uma segunda opção em caso de esgotamento da oferta dos solos mais aptos.

Tabela 1. Distribuição dos solos e das áreas plantadas com cana-de-açúcar da região do Sudoeste Goiano (em negrito os solos de maior expressão espacial).

Classes de Solos	Área	%
Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico	22.093,26	0,38
Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico	6.104,50	2,16
Cambissolo Háptico argila de atividade baixa	78.063,53	0,43
Gleissolo Háptico argila de baixa atividade	15.026,64	0,00
Gleissolo Melânico argila de baixa atividade	27.921,24	4,18
Latossolo Vermelho ácrico	1.104.319,07	2,88
Latossolo Vermelho acriférico	782.332,42	6,07
Latossolo Vermelho distroférico	415.567,8	0,87
Latossolo Vermelho distrófico	2.305.088,08	2,01
Latossolo Vermelho eutroférico	9.398,43	2,60
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	504.209,42	0,54
Neossolo Litólico distrófico	147.829,95	2,01
Neossolo Litólico eutrófico	8.973,43	1,61
Neossolo Quartzarênico órtico	566.645,57	1,06
Organossolo Háptico sáprico	13.189,64	4,76
Planossolo Háptico distrófico	2.974,35	1,34
Plintossolo Argilúvico distrófico	8.813,40	33,79
Plintossolo Pétrico concrecionário	2.390,74	6,06
Total	6.020.941,47	100,00

Fonte: Trindade (2015).

Ainda observando a Tabela 1, na coluna direita, percebe-se, todavia, que apesar de dominantes em termos absolutos, em termos relativos, os Latossolos não representam as maiores percentagens de área plantada. Por outro lado, pode-se também constatar que nem todos os Latossolos foram amplamente cultivados, dada a opção pelos Latossolos Vermelhos, relegando os demais, os Latossolos Vermelho Amarelos aos pastos, devido textura tendente a média, maior erodibilidade, maior potencial de compactação, acidez elevada, dentre outros aspectos, o que os tornou também uma segunda opção, além do que estavam com pastos.

Em suma, a expansão canvieira a partir da década de 2000, ocorreu majoritariamente sobre Latossolos Vermelhos, mais aptos e antes ocupados para a produção de grãos, áreas de produção agrícola consolidada, aproveitando o seu potencial produtivo, e, secundariamente, sobre áreas de pastagens praticadas nos Latossolos Vermelho Amarelos, nos Neossolos Quartzarênicos e nos Argissolos Vermelho Amarelos, e, por último sobre áreas de vegetação natural, sobretudo próxima aos canais de drenagem onde dominam os Gleissolos (TRINDADE, 2015), como se verá a seguir.

Dinâmica do uso do solo no Sudoeste Goiano

A RPSG revelou diferentes padrões espaciais de distribuição de usos do solo no período considerado, e que facilitam a compreensão da dinâmica regional da expansão canvieira. Com base na interpretação de imagens de satélites identificou-se as seguintes classes de usos indicadas na Figura 3 e detalhadas na Tabela 2.

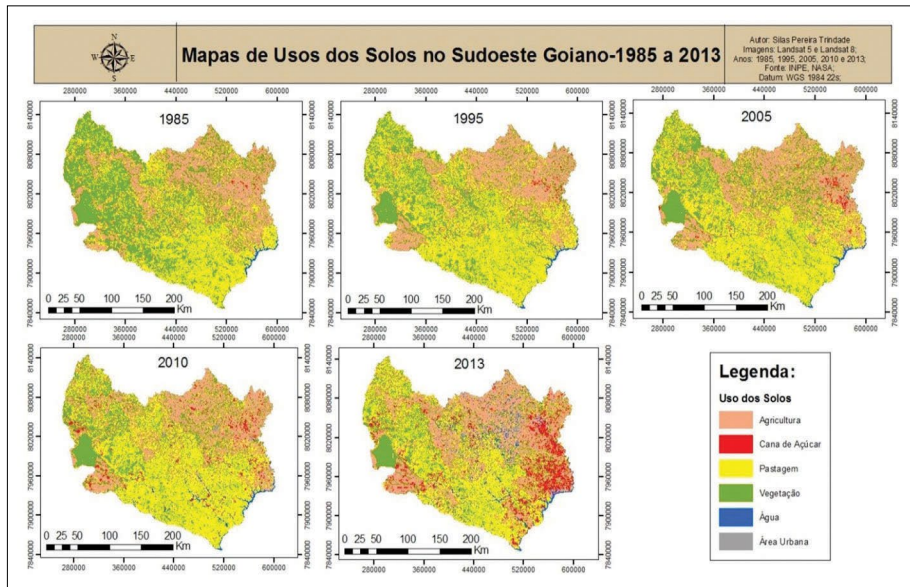


Figura 3. Mapas de uso do solo e da expansão da cana-de-açúcar na RPSG contemplando a dinâmica da cana-de-açúcar nos anos de 1985, 1995, 2005, 2010 e 2013. (1) Culturas de ciclo curto (anuais).

Fonte: Trindade (2015).

A Tabela 2 quantifica os mapeamentos apresentados na Figura 3, ao apresentar os valores dos usos dos solos nos anos selecionados. Note-se que em 1985 predominava a classe de vegetação nativa (42% da área total), seguida da agricultura (30%), constituída por culturas de grãos, e as pastagens (27%) da RPSG. Os usos agropecuários somavam 57% da área total e a cana-de-açúcar e as áreas urbanas eram pouco expressivas, com 0,13% cada. Nesse ano constata-se concentração das culturas anuais na porção leste da região, ficando as pastagens mais ao Sul e as áreas contínuas com vegetação nativa na porção oeste. A cana-de-açúcar ocupava pequenas áreas a Nordeste da região, nos municípios de Santa Helena de Goiás e Turvelândia, onde se encontram as usinas criadas no período do Proálcool.

No ano de 1995, apesar da semelhança com o mapa do ano anterior, observa-se a ampliação do uso agropecuário em detrimento da vegetação nativa. Registrou-se predominância das pastagens (37% da área total), seguida pela vegetação nativa (33%), e uma já considerável área de agricultura (29,5%), além de pequeno aumento da cana-de-açúcar (0,41%). Este aumento se deu, basicamente, por difusão das áreas dos municípios já consolidados, como Santa Helena de Goiás e municípios limítrofes, porém já adentrando os municípios vizinhos de Maurilândia e Castelândia, a leste e nordeste, além de pequenas áreas no Município de Serranópolis, no Centro-Oeste da RPSG.

Até a metade da década de 1990, as usinas existentes e em operação haviam sido criadas sob forte influência do Proálcool, mas logo depois por influência da nova expansão incentivada pelo PNA e o ZAE-Cana, assim, pode-se dizer que se trata de um período de transição entre o Proálcool e o PNA, ao considerar que já se evidenciam os primeiros sinais de avanço da cana associado à produção de etanol, pois a maioria das usinas instaladas destina-se ou prioriza esse produto.

Tabela 2. Sucessão histórica de uso e ocupação do Sudoeste Goiano – 1985-2013.

Uso	1985		1995		2005		2010		2013	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Agricultura	1.835.555,15	29,88	1.812.589,49	29,51	2.040.221,72	33,22	1.951.659,00	31,77	2.460.597,17	40,06
Drenagem	32.309,10	0,53	35.745,82	0,58	41.790,27	0,68	59.325,11	0,97	59.484,53	0,97
Área Urbana	8.053,95	0,13	9.157,83	0,15	9.562,19	0,16	13.753,30	0,22	15.231,25	0,25
Cana-de-Açúcar	7.677,88	0,13	25.356,45	0,41	50.838,37	0,83	143.729,53	2,34	340.832,82	5,55
Pastagem	1.664.491,28	27,10	2.261.631,78	36,82	2.045.402,40	33,30	2.260.286,49	36,80	1.659.564,66	27,02
Vegetação	2.594.061,05	42,23	1.997.667,04	32,52	1.954.333,47	31,82	1.713.394,99	27,90	1.606.437,98	26,15
Total	6.142.148,41	100,00	6.142.148,41	100,00	6.142.148,41	100,00	6.142.148,41	100,00	6.142.148,41	100,00

Em 2005 repete-se esse mesmo padrão, porém já se torna bastante visível uma grande área de cana a leste da RPSG, resultante da coalescência das manchas identificadas a leste do ano anterior, por difusão, embora predominem as pastagens (33,30%), seguidas da agricultura (33,22%) e destas a área ocupada com vegetação nativa (31,82%). Mas, as novas áreas surgiram onde antes não se praticava essa cultura, como nos municípios de Quirinópolis, Gouvelândia, Rio Verde, Acreúna e mais ao Oeste, Aporé, Chapadão do Céu e Mineiros. Assim, em 2005 a cana-de-açúcar já é cultivada em quase a metade dos municípios da RPSG.

No ano de 2010 as pastagens ainda dominam, mas aumentaram para cerca de 38%, seguidas pela agricultura (32%), e a redução da vegetação (28%) da região. Nesse ano pode-se afirmar que a cana já se consolidou na RPSG, corroborada pelo importante número de usinas instaladas, totalizando 12 destilarias, o que equivale a cerca de 1/3 do total de usinas em operação no Estado (GOIÁS, 2007) e a produção canavieira já ocupe 2,35% da RPSG (143.729,53 ha). Chama a atenção ainda o fato da cana, ao contrário da fase anterior, passar a ocupar áreas de pastagens (Figura 3), onde os solos não apresentam aptidão agrícola ideal para tanto e envolvem maior custo de produção, embora haja outras vantagens competitivas (ABDALA; RIBEIRO, 2011), dentre elas a logística (CAMELINI; CASTILHO, 2012). Trata-se de solos conhecidos como solos frágeis (XAVIER et al., 2010), ocupados anteriormente pelas pastagens extensivas, como já exposto, todavia com muitas áreas de pastos degradados na porção mais a oeste.

O último ano analisado, 2013, marca a hegemonia da agricultura, cobrindo 40% da área total da região, relacionando-se à queda das áreas de pastagens (27%) e de vegetação natural (\approx 26%). As drenagens e as áreas urbanas apresentam ligeiro aumento, refletindo o aumento da demanda de irrigação e da economia, respectivamente. Esse ano mostra um aumento vigoroso da área de cana na RPSG. O crescimento em área plantada de cana-de-açúcar deu-se em *ondas*, isto é, substituindo culturas a leste e depois de lá consolidada, de pastos a oeste, evidenciando um eixo preferencial de avanço de direção Leste-Oeste. Nesse processo a cana se deslocou para áreas novas (para a cana, mas não para outras atividades), evidenciando os seguintes padrões de sucessão: sobre áreas de culturas anuais *empurrando-as* para os pastos e depois sobre

pastos *empurrando-os* para áreas de cobertura vegetal remanescente e assim sucessivamente, como observado por Trindade (2015).

A dinâmica da expansão canavieira mostra evolução concomitantemente ao desenvolvimento agroindustrial na RPSG com os CAIs, como sistemas integradores estruturantes das políticas públicas, que se somaram ao potencial de uso dos solos e ao desenvolvimento dos sistemas logísticos e de infraestrutura. Assim, as citadas políticas públicas apenas criaram um cenário inicial de integração comercial na RPSG, na perspectiva de uma agricultura de grande escala, dado que a região apresentava atributos físico-ambientais favoráveis (FERRAZ, 2012), garantindo um elevado potencial produtivo e a excelência que vem se mantendo desde que lá chegou à fronteira agrícola nos anos 1970. Portanto, a cana não muda o modelo econômico, ao contrário.

A Figura 3 e a Tabela 2 ainda permitem deduzir três estágios de expansão na RPSG, correspondentes a três padrões espaciais: o primeiro, a partir de 1985, onde se constata concentração a Nordeste, associada aos incentivos do Proálcool quando ocupa as terras mais aptas, mas então ainda não ocupadas pelas culturas anuais. O segundo, a partir da década de 1985, que obedece a um padrão de expansão radial (por difusão), a partir da área core da cana da fase anterior, deslocando-se para oeste, mas ainda sobre áreas de melhor aptidão agrícola, e já substituindo áreas agrícolas e pastagens. E o terceiro, deslocando-se para o extremo oeste da RPSG, sobre pastagens ou remanescentes de Cerrado, de reconhecida menor aptidão agrícola (solos frágeis), o que pode estar associado a outras vantagens competitivas como a forte influência da integração logística, como já exposto, em rede conectando-a por dutos, ferrovias, hidrovias, estradas de rodagem, nós modais e outras (BORGES, 2011). Isto explicaria a incorporação dos solos frágeis, na medida em que a oferta dos mais aptos diminui e apesar do aumento do custo de produção, embora de menor preço e maior oferta de sistemas de escoamento da produção.

Assim, ao ocupar preferencialmente os melhores solos, já preparados e prontos para o cultivo, e contando com os benefícios consolidados na RPSG, corrobora a consolidação do modelo capitalista de produção quanto ao setor primário da economia, através de sua segunda grande fase, a Renda Diferencial da Terra II, como já assinalado, mas ao ocupar os solos frágeis, a questão torna-se mais complexa, pois, ao mesmo tempo em que se instala sobre solos já

manejados, causa reconfiguração de usos em áreas contínuas e contíguas, representando impactos diretos, quando substitui áreas agrícolas ou remanescentes da cobertura nativa, e indiretos quando empurra as culturas e pastos para novas áreas, devido ter ocupado as áreas onde estavam.

Padrões complexos das mudanças de uso dos solos no Sudoeste Goiano

Os dois primeiros estágios acima citados podem ser entendidos como produtos das condições edafoclimáticas, ainda que a logística contribuísse para o escoamento da produção. Mas o terceiro, e bem recente, obedece mais aos fatores locacionais e, sobretudo à logística, já que o seu avanço se dá em direção aos solos frágeis. As taxas de crescimento agrupadas em 1985/1995, 1995/2005, 2005/2010 e 2010/2013 (Tabela 3) ilustram melhor essa dinâmica.

A taxa de crescimento do uso do solo na RPSG, entre 1985/1995 indica perdas de áreas naturais e avanço de cana sobre culturas anuais, embora as maiores taxas de crescimento sejam as pastagens, para as quais há grande aptidão edafoclimática o que faz supor que o desmatamento teria induzido pela abertura de pastos. Este fenômeno retrata o processo de expansão da agricultura no Cerrado que, para Miziara e Ferreira (2008), corresponde a uma das etapas do processo de abertura de novas áreas agrícolas, incluindo nestas a cana-de-açúcar. Estas conversões de áreas naturais em pastagem dão suporte à expansão da fronteira agrícola em decorrência dos baixos investimentos antecedendo os períodos de maiores investimentos em tecnologia e infraestrutura relacionadas com as culturas anuais.

Tabela 3. Taxa de crescimento do uso do solo – 1985/1995, 1995/2005, 2005/2010 e 2010/2013.

Uso do Solo	1985/1995		1995/2005		2005/2010		2010/2013	
	Área	%	Área	%	Área	%	Área	%
Agricultura ¹	- 22.965,67	-1,27	227.632,23	11,16	- 88.562,72	- 4,54	508.938,16	20,68
Água	3.436,72	9,61	6.044,45	14,46	17.534,85	29,56	159,42	0,27
Área Urbana	1.103,88	12,05	404,36	4,23	4.191,11	30,47	1.477,94	9,70
Cana-de-Açúcar	17.678,57	193,04	25.481,92	50,12	92.891,16	64,63	197.103,29	57,83
Pastagem	597.140,50	26,40	- 216.229,38	-10,57	214.884,09	9,51	- 600.721,83	-36,20
Vegetação	- 596.394,01	-29,85	- 43.333,57	-2,22	- 240.938,49	- 14,06	- 106.957,00	-6,66

¹ Culturas de ciclo curto (anuais).

Fonte: Trindade (2015).

O período entre 1995/2005 foi marcado pelo avanço das maiores taxas de crescimento da área plantada com cana-de-açúcar, da drenagem (massa d'água) e das culturas anuais, contrapondo-se à redução das taxas de crescimento das pastagens e da vegetação nativa. Pietrafesa et al. (2012) afirma que essa recente expansão canavieira é induzida pelo aumento da produção para fins bioenergéticos, como biodiesel, cogeração de energia, dentre outros, acarretando a duplicação da área plantada. Mas, esse fenômeno pode ser explicado também pela ausência de políticas públicas para a regulação da produção de etanol e melhores preços dos produtos agrícolas, incentivando as mudanças de uso do solo em função do mercado.

No período de 2005/2010, ocorreu uma completa transformação na dinâmica do uso das terras na RPSG. A cana-de-açúcar, a drenagem, as áreas urbanas e as pastagens mantiveram um crescimento gradual, ao contrário das culturas anuais e a vegetação nativa, sugerindo que o crescimento das demais classes ocorreu sobre áreas de vegetação natural e áreas de culturas anuais. Também nesse mesmo período, verificou-se o grande crescimento na produção energética compreendida pelo avanço da cana-de-açúcar e da massa d'água, relacionado ao grande aumento das hidroelétricas na RPSG.

Finalmente, no último período, de 2010/2013, evidenciando-se ganhos das áreas de cultivos anuais, de cana-de-açúcar e, desta vez, acompanhado de expansão urbana. A taxa de crescimento nesse triênio mostra a evolução dessas categorias de uso do solo, contrapondo-se à redução da vegetação e das pastagens. Estas, diferenciando-se da vegetação nativa, que decresce continuamente desde o início do período analisado, as passam por ciclos de avanço e pequenos retrocessos, como nos anos 1985/1995 e 2005/2010, de aumento, e de 1995/2005 e 2010/2013, de redução de sua área. Tal dinâmica leva a pensar que os remanescentes de áreas naturais são áreas diretamente convertidas após o desmatamento e, por outro lado, que as pastagens mostram uma clara integração com o processo de expansão da fronteira agrícola, oferecendo as primeiras condições de ocupação para reconversão posterior em atividades agrícolas.

Observou-se ainda que o avanço do setor sucroalcooleiro se deu sobre diversos usos, incluindo áreas de agricultura comercial e áreas naturais, sugerindo a que o PNA não interferiu no completo direcionamento da expansão canavieira para as áreas de pastagens, cabendo a explicação a fenômenos já estudados no

contexto da modernização da agricultura no Cerrado, decorrentes do avanço da Fronteira Agrícola.

Em síntese, o crescimento acumulado da área cultivada com cana no período analisado evidencia um nítido aumento, não se constatando nenhuma queda em área plantada, mesmo em momentos de oscilações de preço do etanol no mercado nacional e internacional. Portanto, a cana-de-açúcar liderou e ainda lidera as últimas mudanças de uso do solo na região. Essas observações corroboram as interpretações de Barbalho et al. (2013), Castro et al. (2010), Miziara (2009) e Silva e Castro (2011), que mostraram que a abertura das áreas produtivas pela pecuária em razão do seu baixo custo é seguida pela implantação da agricultura tecnificada que se instala em medida da diminuição dos custos para produção das terras e ampliação da infraestrutura e logística, representando, portanto, a chave de sucessão regional. Essa inserção e importância da expansão canavieira mostra a dinâmica da fronteira agrícola diante do seu avanço em relação aos padrões tecnológicos utilizados, se tornando a protagonista das mudanças espaciais regionais (Figura 4).

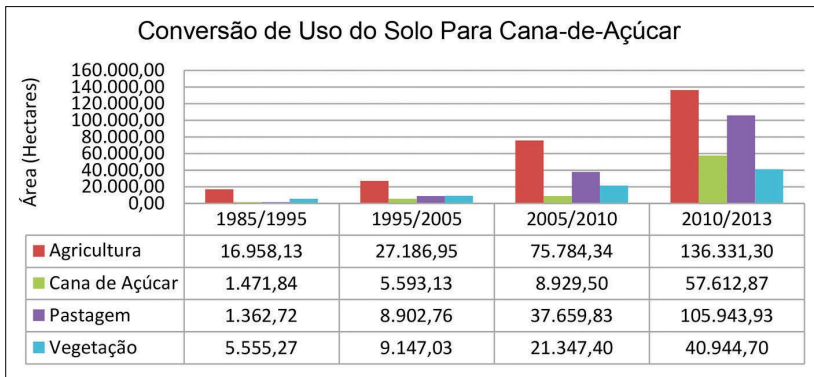


Figura 4. Área da progressão do uso do solo em relação à conversão para a cana-de-açúcar na RPSG nos períodos 1985/1995, 1995/2005, 2005/2010 e 2010/2013.

Fonte: Trindade (2015).

Em síntese, os padrões da sucessão de usos do solo em relação com a substituição por cana-de-açúcar são: 1) Cana-de-Açúcar/Cana-de-Açúcar; 2) Cultura Anual /Cana-de-Açúcar; 3) Pastagem/Cana-de-Açúcar; 4) Vegetação Natural/Cana-de-Açúcar;

Relacionando essa dinâmica com os programas de incentivos à produção energética, os cenários desenvolvidos nos dois períodos (Proálcool e PNA) permitem deduzir a predominância da sucessão Culturas Anuais/Cana-de-Açúcar e secundariamente Vegetação Natural/Cana-de-Açúcar no período de vigência do Proálcool e de Culturas Anuais/Cana-de-Açúcar seguida de Pastagem/Cana-de-Açúcar no período de vigência do PNA.

No período correspondente à 1985/1995 a cana substituiu 16.958,13 hectares de culturas anuais, seguida pela substituição das áreas de vegetação, que cederam 5.555,27 ha para a cana. Por fim, percebe-se que a cana-de-açúcar invadiu, neste período, em menor proporção as áreas de pastagens (1.363,72 ha).

No segmento 1995/2005 apresentou comportamento semelhante ao anterior. A cana substituiu 27.186,95 ha de áreas agrícolas e 9.147,03 ha de vegetação nativa, seguida da substituição de 8.902,76 ha da pastagem. No segmento 2005/2010, o avanço da cana-de-açúcar voltou a predominar sobre as áreas agrícolas, porém, é interessante observar que houve queda da substituição cana/vegetação, dando lugar ao avanço da cana-de-açúcar para áreas de pastagens. A substituição foi de 37.659,83 ha de patos, seguida pela de cana/vegetação em 21.347,50 ha. Esta queda do avanço do setor canavieiro para as áreas de Cerrado pode ser explicada por meio dos possíveis resultados do PNA que criou diretrizes para o avanço do setor.

Por fim, há que se destacar o último segmento (2010/2013), além de revelar a consolidação da cana iniciada em 1985 e, sobretudo de 2010 em diante, sua expansão prossegue, mas mudando o padrão espacial para novamente substituir áreas de agricultura, que cederam 136.331,30 ha, seguida pelas pastagens, que cedeu 105.943,93 hectares para a cana, desta feita compatibilizando-se com a orientação do PNA. Nesse sentido, apesar do significativo avanço direto para as áreas de vegetação nativa, o aumento da substituição das pastagens age como elemento indutor da abertura de novas áreas agrícolas sobre as áreas naturais, considerado de impacto indireto da cana.

As áreas substituídas pela cana mantém, então, uma relação dual entre o tipo de cobertura e o período. Nessa perspectiva, as análises sobre a sucessão de uso dos solos, perante o avanço da cana e sobre outras culturas foram significativas. A Figura 5, construída com base na análise fatorial ANOVA, ilustra o processo e corrobora a ideia de difusão aqui defendida.

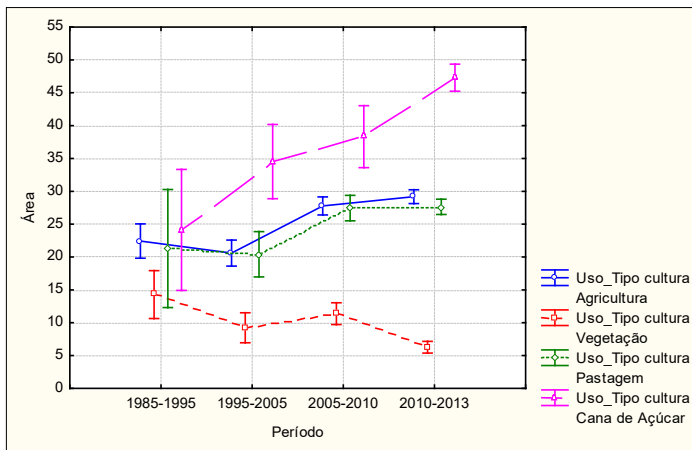


Figura 5. Dinâmica da substituição da cana-de-açúcar nas sucessões.

Assim, a expansão canaveira recente revela, em síntese, dois momentos. O primeiro baseado no critério de aptidão agrícola, quando disputa terras com as culturas anuais e induz o deslocamento de culturas e pastos para outras áreas, inclusive de cobertura nativa de Cerrado, consolidando-se no cenário regional e sendo a protagonista responsável pela mudança substancial da paisagem, embora não do modelo econômico. O segundo quando avança sobre solos frágeis desta feita com base não mais na aptidão agrícola, nem nos custos da produção, mas em outras vantagens competitivas, sobretudo a logística e provavelmente o preço da terra, que compensariam o investimento nessas áreas, como será melhor discutido a seguir.

A expansão canaveira sobre os solos frágeis

O mapa da Aptidão Agrícola do Uso das Terras (AAUT), elaborado para a RPSG e sua relação com a expansão canaveira (Figura 6, Tabela 3) mostra que no ano de 1985, ainda em plena vigência dos efeitos do Proálcool, a cana-de-açúcar ocupou, predominantemente, as classes de aptidão 2bC, 2bc e 1ABC, confirmando sua melhor aptidão agrícola. Convém lembrar que estas classes são resumidamente: 1) Terras boas para lavouras no nível de manejo C, restritas

no nível de manejo b e inaptas ao nível de manejo A; 2) Terras médias para lavouras no nível de manejo B e C e inaptas ao nível de manejo A; 3) Terras boas para lavouras nos níveis de manejo A, B e C. Ainda pela mesma Tabela 3, em menor proporção, identificou-se cana em áreas de classe de aptidão 6, correspondente a terras sem aptidão para uso agrícola e restrição ambiental

Analisando-se ano a ano, 1985 permite identificar que a cana ocupou, majoritariamente, as áreas de melhor aptidão agrícola, e, em menor escala, as áreas com restrições de uso do ponto de vista da aptidão e/ou serviços ambientais. O ano de 1995 mostrou um comportamento semelhante, ambos podendo ser atribuídos à influência dos desdobramentos do Proálcool, embora a predominância de ocupação tenha ocorrido em áreas de aptidão 2bC, 2bc e 1ABC com um ligeiro aumento na classe de aptidão 6. Curiosamente, neste ano foi o pequeno aumento de área de cana nas demais classes consideradas boas para lavouras mecanizadas, como o caso da 1bC (Terras de aptidão boa para lavouras no nível de manejo C, e regular no nível B e inapta no nível A). A cana permanece nas melhores classes de aptidão agrícola, porém já se nota pequenas manchas nas classes dos demais grupos de aptidões.

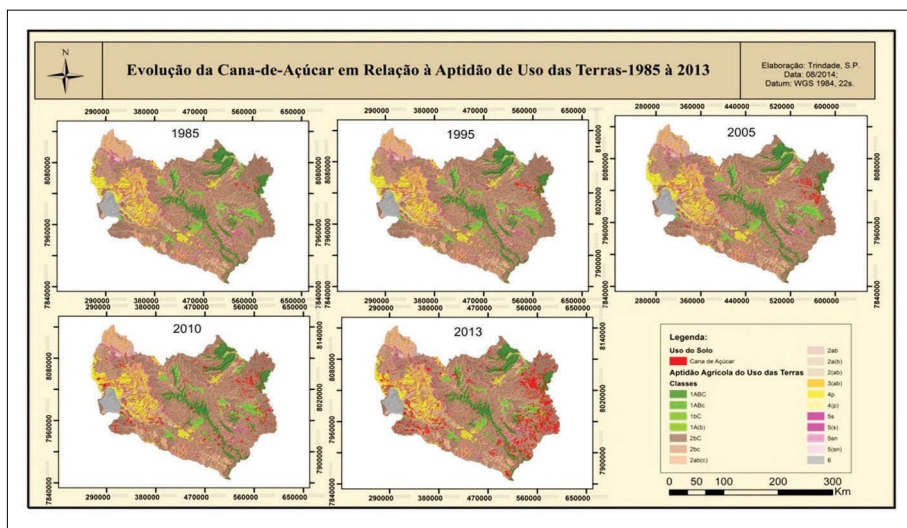


Figura 6. Mapa de Aptidão do Uso das Terras e a expansão sucroalcooleira no Sudoeste Goiano-1985-2013.

Fonte: Trindade (2015).

Tabela 5. Aptidão do uso das terras de relação e uso com a cana (cinza em destaque) – 1985-2013.

Classe Aptidão	1985 (Ha)	%	1995 (Ha)	%	2005 (Ha)	%	2010 (Ha)	%	2013 (Ha)	%
1 ABC	916,70	11,96	3356,97	13,26	4299,41	8,46	7144,97	4,97	20909,44	6,13
1 ABCc	0,082	0,00	48,71	0,19	129,96	0,26	201,59	0,14	955,90	0,28
1 bC	0,00	0,00	586,41	2,32	752,43	1,48	6682,37	4,65	17968,93	5,27
1 A(b)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,48	0,00	38,61	0,01
2 bC	4495,73	58,67	11717,96	46,29	27043,81	53,20	65857,53	45,83	152990,02	44,88
2 bc	2003,94	26,15	7439,59	29,39	15836,75	31,15	40986,96	28,53	99657,06	29,24
2 ab(c)	31,30	0,41	388,79	1,54	770,51	1,52	5541,84	3,86	13456,23	3,95
2 ab	0,00	0,00	8,09	0,03	0,00	0,00	8,90	0,01	21,69	0,01
2 a(b)	0,00	0,00	84,22	0,33	97,78	0,19	1022,62	0,71	888,77	0,26
2 (ab)	0,00	0,00	6,52	0,03	1,67	0,00	74,70	0,05	33,06	0,01
3 (ab)	0,00	0,00	16,28	0,06	55,18	0,11	740,37	0,52	1279,95	0,38
4 p	0,00	0,00	273,37	1,08	419,76	0,83	8189,01	5,70	17501,46	5,13
4 (p)	0,00	0,00	137,84	0,54	151,30	0,30	1628,60	1,13	2627,31	0,77
5 s	0,00	0,00	123,26	0,49	45,17	0,09	648,83	0,45	2055,42	0,60
5 (s)	0,00	0,00	209,40	0,83	122,15	0,24	1756,87	1,22	2390,55	0,70
5 sn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	62,24	0,04	246,90	0,07
5 (sn)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,42	0,01	81,59	0,02
6	215,22	2,81	919,57	3,63	1109,48	2,18	3117,35	2,17	7777,96	2,28
Total	7662,98	100,00	25316,96	100,00	50835,34	100,00	143684,65	100,00	340880,82	100

Legenda: **1 ABC** - Terras pertencentes à classe de aptidão boa para lavouras; **1 Abc** - Terras pertencentes à classe de aptidão boa para lavouras nos níveis de manejo A e B e regular no nível C; **1bC** - Terras pertencentes à classe de aptidão boa para lavouras no nível de manejo C, e regular no nível B e inapta no nível A; **1A(b)** - Terras pertencentes à classe de aptidão boa para lavouras no nível de manejo A, restrita no nível de manejo B e inapta no nível C; **2bC** - Terras pertencentes à classe de aptidão boa para lavouras no nível de manejo C, restrita no nível de manejo b e inapta ao nível de manejo A; **2bc** - Terras pertencentes à classe de aptidão média para lavouras no nível de manejo B e C, inaptas ao nível de manejo A; **2ab(c)** - Terras pertencentes à aptidão média para lavouras nos níveis de manejo A e B, restritas ao nível de manejo C; **2ab** - Terras pertencentes à aptidão média para lavouras nos níveis de manejo A e B e inapta no nível de manejo C; **2a(b)** - Terras pertencentes à aptidão média para lavouras, nos níveis de manejos A restritas nos níveis de manejo B e inaptas no nível de manejo A; **2(ab)** - Terras pertencentes à aptidão regular para lavouras nos níveis de manejo A e B, inapta para o nível de manejo C; **3(ab)** - Terras pertencentes à aptidão restrita para lavouras nos níveis de manejo A e B, e inapta no nível de manejo C; **4p** - Terras pertencentes à classe de aptidão média para pastagens plantadas; **4(p)** - Terras pertencentes à classe de aptidão restrita para pastagens plantadas; **5s** - Terras pertencentes à classe média para silvicultura; **5(s)** - Terras pertencentes à classe restrita para silvicultura; **5sn** - Terras pertencentes à classe média para silvicultura e pastagem natural; **5(sn)** - Terras pertencentes à classe restrita para silvicultura e pastagem natural; **6** - Terras sem aptidão para uso agrícola e restrição ambiental;

No ano de 2005 que marca o início da nova fase de expansão, a recente, a cana acompanha a mesma tendência anterior de ocupar áreas com melhor aptidão agrícola da terra, a 2bC, porém, já se nota que além dessas, avança sobre áreas inaptas para uso agrícola ou com restrições ambientais. Assim como em 1995, apresentam-se pequenas faixas cultivadas com cana em áreas de aptidão para pastagem e silvicultura situadas fora das áreas de relevos suaves. Já o ano de 2010 foi marcado pela retomada de preferência pelas classes de aptidão para lavouras, boa e média, ainda que tenha se registrado pequenos avanços sobre as áreas nas classes de aptidão destinadas a pastagens e silvicultura e concomitantemente aumento em áreas com classe de aptidão inapta ou com restrição ambiental. E no último ano analisado, 2013, o fenômeno se repete, porém, nota-se que a cana avança sobre áreas de aptidão boa e média para lavouras seguidas pelas áreas com aptidão para pastagens plantadas e mesmo inaptas ou aptas para silvicultura ou com restrição ambiental para uso agrícola.

Em síntese, é possível observar que a trajetória da cana na RPSG, desde 1985, se caracteriza pela mesma fórmula: preferência pelas melhores classes de aptidão agrícola disponíveis e que não levassem a novos desmatamentos, mas sem grandes custos para conversão, materializando-se na porção leste da região. O problema é que posteriormente projetou-se para oeste sobre áreas com restrições ambientais e para áreas inaptas para agricultura podendo ser aptas à

silvicultura e pastagens. Em 2013 a substituição preferencial recaiu sobre áreas com solos mais frágeis, com menor aptidão agrícola ou mesmo com restrição, portanto é a mais recente e diversa forma de substituição. Isto pode ser explicado por meio de uma possível redução de oferta das áreas aptas para lavouras, elevando o nível de máximo aproveitamento das terras e forçando expansão para outras áreas, mesmo que piores, como também foi observado nos anos de 2005, 2010 e 2013, embora em bem menor escala. Borges (2011) relata que o plantio nessas áreas mais a oeste começaram sobre áreas de pastagem em 2008.

A Figura 7 mostra o resultado da análise de componentes principais (PCA) para a distribuição espacial da cultura canvieira sobre as classes de aptidão, da qual foi realizada por meio da ordenação das aptidões do uso da terra para o plantio da cana-de-açúcar, que corrobora o exposto, ou seja, predomínio do uso das classes 1ABC e 2bC.

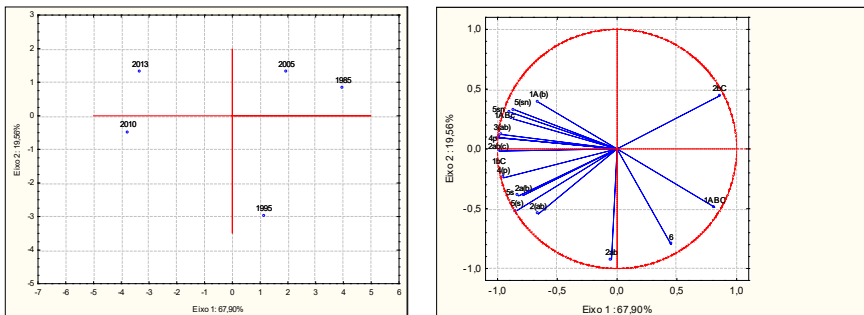


Figura 7. Análise das Componentes Principais e a Relação entre as Classes de Aptidão Agrícola de Uso do Solo (cana-de-açúcar) com os anos de 1985, 1995, 2005, 2010 e 2013.

Fonte: Trindade (2015).

Entretanto, o ano de 1995 permitiu uma interessante análise sobre o comportamento da expansão canvieira, pois apesar de ter se repetido o mesmo padrão do ano anterior, já mostra claramente a tendência de avanço da cana sobre áreas com menor aptidão para lavouras (2ab) e para áreas com restrições de uso agrícola/ambiental (6). Esta tendência pode ser interpretada como uma busca máxima pelos melhores solos dentro das áreas de entorno da viabilidade logística das usinas (raio de 40 km ao redor das unidades processadoras). Interpre-

ta-se que houve uma maximização da produção para buscar as melhores áreas que atingissem melhores aptidões agrícolas, mesmo com restrições ambientais. No ano de 2005, já correspondente à recente expansão canavieira, evidenciou-se um comportamento que reflete ainda a mesma busca pelos melhores solos. Observou-se que a produção canavieira deu-se sobre solos de aptidão boa para lavouras mecanizadas. A expansão correspondente a este período deu-se em áreas aptas à produção canavieira com grande adequabilidade ao uso de maquinários (aptidão 2bC).

Os anos de 2010 e 2013 retomam a mesma tendência de ocupação dos melhores solos pela cana (1bC). Mas, o interessante desse período foi a convergência de crescimento para as áreas menos aptas para agricultura mecanizada, como áreas com orientação para agricultura com uso de tecnologia menos avançada e, até, áreas recomendadas para uso de pastagens e silvicultura. Neste sentido, considera-se como evidência de que o avanço da cana-de-açúcar ocorre para áreas e solos com maior fragilidade. Uma possível explicação para este processo é que a alta concentração de usinas sucroalcooleiras na região, principalmente a leste da RPSG, que desencadeia uma competição e da saturação de áreas produtivas que entram em disputas com as novas unidades processadoras, buscando assim, áreas menos aptas a produção, como assinalado por Abdala e Ribeiro (2011).

Em síntese, o avanço do setor sucroalcooleiro na RPSG materializa o mesmo padrão de conversão agrícola amplamente utilizado pelo setor agroexportador brasileiro, baseado em *commodities* agrícolas, fato confirmado pela lógica da dinâmica da expansão canavieira, a qual não apenas reafirma os mesmos padrões espaciais desde o Proálcool, como também já revela mudança recente de padrão espacial devido incorporação de áreas de solos frágeis, entrando em claro conflito com o discurso conservacionista do setor sucroalcooleiro que declara compartilhar dos preceitos do desenvolvimento sustentável, como da energia limpa e outros.

Acrescente-se que a falta de regulamentação estadual sobre os efeitos dessas externalidades da expansão canavieira, delegam o controle aos estados, deixando-o à livre iniciativa privada, que terá no mercado o eventual controle, o que revela uma política neoliberal, inclusive quanto à conversão de áreas de

remanescentes naturais em cana. Tais interpretações sugerem a continuidade do modelo de economia neoliberal adotada claramente no país desde o final da década de 1980.

Considerações finais

A análise das mudanças de uso do solo com ênfase na expansão da cultura canvieira na RPSG permitiu concluir que:

1. As mudanças de uso do solo na RPSG podem ser agrupadas em três classes de sucessão: culturas anuais/cana, pastagens/cana e vegetação nativa/cana. A primeira caracteriza o início da expansão de 1985 a 1995, correlacionável aos efeitos do Proálcool, e as duas outras caracterizam a dinâmica atual propriamente dita, entre 2005 e 2013, correlacionáveis ao PNA e ao ZAE-Cana;
2. A expansão canvieira ocorreu inicialmente sobre áreas de culturas anuais, no entanto, nos últimos anos avançou sobre as áreas de pastagens e de vegetação natural. A sucessão da cana sobre áreas de pecuária favorece impactos indiretos sobre a vegetação remanescente, que passa a ser convertida em pastos ou em culturas anuais, favorecendo a degradação ambiental do Cerrado;
3. Os efeitos da substituição das pastagens pela cana, em princípio atenderia às políticas públicas e instruções normativas vigentes, entretanto, o surgimento de pastagens à custa da conversão de áreas com vegetação natural, dado que a cana substituiu as pastagens, evidencia uma pressão direta sobre as áreas remanescentes de Cerrado, paralelamente ao avanço sobre as de culturas anuais; o que se constata é que isto contraria claramente a política governamental federal e a instrução normativa nº 001/2007 de Goiás, além de se traduzir como impacto indireto da cana e direto das culturas anuais e pastos sobre essas áreas, ambos negativos da referida expansão;
4. A conversão recente de áreas com culturas anuais em cana iniciou-se antes das políticas públicas recentes para o setor (PNA e ZAE-Cana),

logo o Estado não induziu a recente expansão e sim o próprio setor, delegando aos estados o controle dos impactos do processo, que elabora marcos regulatórios, caracterizando uma política Neoliberal para o setor, de alto risco para os ecossistemas afetados.

5. Os padrões de substituição de outros usos por cana mostrou que o seu avanço se deu por difusão de áreas já estabelecidas desde o Proálcool para áreas de culturas anuais próximas, apontada como uma tendência que entra em confronto com as diretrizes ambientais que discutem a sustentabilidade da cana em relação à segurança alimentar e aos biocombustíveis. Este avanço é dividido pelos períodos aqui trabalhados, o Proálcool (1985/1995) e o PNA (1995/2005, 2005/2010 e 2010/2013). No primeiro, a cana-de-açúcar substituiu, majoritariamente, áreas de culturas anuais e de vegetação nativa. No segundo, houve alterações nas quais a cana-de-açúcar teve a sua substituição primordial sobre áreas de culturas anuais e pastagens.
6. Observou-se que as análises estatísticas corroboraram o avanço da cana sobre áreas de vegetação nativa (Cerrado), que apresenta redução a partir da sucessão de 2005/2010. Esta característica se relaciona ao período do PNA, e mostra queda da substituição da vegetação pelo setor sucroalcooleiro.
7. A trajetória iniciou-se sobre os Latossolos Vermelhos, dominantes a leste da região com aptidão agrícola regular a alta (classes 1, 2 e 3), ideais para a cultura da cana-de-açúcar, mas, desde 2010, avança sobre solos frágeis, de baixa aptidão e com algum tipo de restrição (classes 4, 5 e mesmo 6), as quais representam deficiências como alto potencial erosivo ou por serem Áreas de Preservação Permanente/ Unidades de Conservação, o que é muito preocupante. Tal avanço ocorreu, predominantemente, no período que se esgotam os efeitos herdados do Proálcool, mas, que antecedem o PNA, quando houve um enfraquecimento das políticas ambientais do setor, possibilitando a ocupação de áreas restritas.

8. O uso de solos frágeis pode induzir uma série de impactos ambientais negativos para a região, dentre eles, a erosão (solos menos aptos e de elevada erodibilidade) e a consequente degradação de ecossistemas naturais, pois não são áreas com aptidão para uso agrícola intensivo e tampouco o canavieiro.

Referências

- ABDALA, K.; RIBEIRO, F. L. Análise dos impactos da competição pelo uso do solo no Estado de Goiás durante o período 2000 a 2009 provenientes da expansão do complexo sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 65, n. 4, p. 373-400, out./dez. 2011.
- BARBALHO, M. G. S; SILVA, A. A; CASTRO, S. S. A expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar na região sul do estado de Goiás de 2001 a 2011. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, v. 1, n. 29, p. 98-110, set. 2013. Disponível em: <http://www.rbciamb.com.br/images/online/Materia_8_artigos365.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2014.
- BORGES, V. M. S. **Formação de uma nova centralidade do Setor Energético em Goiás: o caso de Quirinópolis**, Estado de Goiás. 2011. 238 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- CAMELINI, J. H; CASTILHO, R. Etanol e o uso corporativo. **Revista Mercator**, Fortaleza, v. 11, n. 25, p. 7-18, maio/ago. 2012. Disponível em: <<http://www.mercator.ufc.br/index.php/mercator/article/viewArticle/722>>. Acesso em: 24 ago. 2012.
- CASTRO, S. S. de; ADBALA, K.; SILVA, A. A.; BORGES, V. M. S. A expansão da cana-de-açúcar no cerrado e no estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, n. 1, p. 171-191, jan./jun. 2010. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/bitstream/ri/1444/1/11203-47034-1-PB.pdf>>. Acesso em: 2 jun. 2013.
- FERRAZ, R. P. D. **Sistema de indicadores para a avaliação do potencial de sustentabilidade hídrica e monitoramento da cultura da cana-de-açúcar**: contribuição metodológica para o planejamento da expansão da atividade canavieira. 2012. 323 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- FERRAZ, R. P. D; SIMÕES, M.; DUBREUIL, V. Avaliação da sustentabilidade hídrica da cultura canavieira através do uso de indicadores extraídos de modelos espaciais. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, v. 30, n. 29, set. 2013. Disponível em: <<http://www.rbciamb.com.br/publicacoes3.asp>>. Acesso em: 13 set. 2014.

FISCHER, G.; TEIXEIRA, E. T. H.; HIZSNYIK, E. T.; VELTHUIZEN, H. van. Land use dynamics and sugarcane production. In: ZUURBIER, P.; VOOREN, J. van (Ed.). **Sugarcane ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment**. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2008. cap. 2, p. 29-62.

GOIÁS (Estado). Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Agência Goiana do Meio Ambiente. Instrução Normativa nº 001/2007, de 14 de junho de 2007. **Diário Oficial/GO**, Goiânia, 21 jun. 2007.

GOMES, H.; TEIXEIRA NETO, A. **Geografia: Goiás/Tocantins**. Goiânia: UFG, Centro Editorial e Gráfica, 1993. 227 p.

HOGAN, D. J.; AZEVEDO, A. M. M.; CARMO, R. L. do; GAMA, I.; DARCIE, C.; DELGADO, C. C. Um breve perfil ambiental da Região Centro-Oeste. In: HOGAN, D. J.; CARMO, R. L. do; CUNHA, J. M. P. da; BAENINGER, R. (Org.). **Migração e ambiente no Centro-Oeste**. Campinas: MPC Artes Gráficas em Papel, 2002. p. 175-276.

KAGEYAMA, A. O novo padrão agrícola brasileiro: do complexo rural aos cais. In: DELGADO, G. C. (Org.). **Agricultura e políticas públicas**. Brasília, DF: IPEA, v. 1, p. 113-223.

MACEDO, I. de C. (Org.) **A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade**. 2. ed. São Paulo: Berlendis & Vertecchia, 2007. 235 p.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. (Org.). **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar: expandir a produção, preservar a vida e garantir o futuro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p. (Embrapa Solos. Documentos, 110).

MIZIARA, F. Expansão da lavoura de cana em Goiás e impactos ambientais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOCIOLOGIA, 14., 2009, Rio de Janeiro. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Sociologia, 2009. Disponível em: <http://www.sbsociologia.com.br/portal/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=3503&Itemid=171>. Acesso em: 20 dez. 2015.

MIZIARA, F.; FERREIRA, N. C. Expansão da fronteira agrícola e evolução da ocupação e uso do espaço no Estado de Goiás: subsídios à política ambiental. In: FERREIRA JUNIOR, L. G. (Org.). **A encruzilhada socioambiental: biodiversidade, economia e sustentabilidade no cerrado**. Goiânia: Editora da UFG, 2008. p. 101.

NASSAR, A. M.; RUDORFF, L. B. A.; AGUIAR, D. A.; BACCHI, M. R. P.; ADAMI, M. Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. In: ZUURBIER, P.; VOOREN, J. V. (Ed.). **Sugarcane ethanol: contributions to climate change**

mitigation and the environment. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2008. cap. 3, p. 63-93.

OLIVEIRA, A. J.; RAMALHO, J. (Coord.). **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011**. 2. ed. rev. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 110 p.

PIETRAFESA, J. P.; CASTRO, S. S.; TRINDADE, S. P. A crescente produção sucoalcooleira em áreas de Cerrado e o Estado de Goiás: contribuição ao estudo de indicadores de sustentabilidade. In: FRANCO, J. L. de A.; DUTRA e SILVA, S.; DRUMOND, J. A.; TAVARES, G. G. (Org.). **História ambiental: fronteiras, recursos naturais e conservação da natureza**. Rio de Janeiro: Garamond, 2012. p. 311-332.

PRADO, H. do. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil. **Encarte de Informações Agronômicas**, n. 110, jun. 2005.

PROBIO. **Relatório de atividades: 1996-2002**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2002. 73 p. il.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, T. A. J.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. (Org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999, p. 229-265.

SILVA, J. F. G. **A nova dinâmica da agricultura brasileira**. 2. ed. Campinas: Unicamp, 1999a. v. 1.

SILVA, J. F. G. **O novo rural brasileiro**. 2. ed. Campinas: Unicamp, 1999b. v. 1.

SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. Dinâmica de uso da terra e expansão da cana-de-açúcar entre os anos de 2004 a 2010, na microrregião de Quirinópolis, Goiás. In: PIETRAFESA, J. P.; SILVA, S. D. (Org.). **Transformações no Cerrado: processo, consumo e natureza**. Goiânia: PUC, 2011. p. 155-188.

TRINDADE, S. P. **Aptidão agrícola, mudanças de usos dos solos, conflitos e impactos diretos e indiretos da expansão da cana-de-açúcar na Região Sudoeste Goiano**. 2015. 187 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

XAVIER, F. V. ; CUNHA, K. L. ; SILVEIRA, A. ; SALOMÃO, F. X. T. Análise da suscetibilidade à erosão laminar na bacia do Rio Manso, Chapada dos Guimarães, MT, utilizando sistemas de informações geográficas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 2, p. 51-60, 2010.

Capítulo 2

Avaliação da expansão recente da cana-de-açúcar em solos frágeis na microrregião Vale do Rio dos Bois, GO

Hellbia Samara M. de Carvalho Rodrigues; Selma Simões de Castro

Introdução

O aquecimento global causado pelas emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE), originados da queima de combustíveis fósseis derivados do petróleo, vem sendo mais reconhecido desde a segunda metade do século passado e trouxe à tona a necessidade de substituição da matriz energética mundial por novas fontes consideradas limpas e renováveis, como os biocombustíveis, em especial o etanol derivado da cana-de-açúcar e do milho. Assim, desde o final do século XX, vem ocorrendo uma grande expansão do setor sucroalcooleiro no Brasil rumo ao Centro-Sul do Cerrado, na região Centro-Oeste do País, visando à produção de etanol.

Nesse contexto, os estados de Goiás e Mato Grosso do Sul se tornaram o alvo preferencial da expansão canavieira devido não só às condições edafoclimáticas e de relevo favoráveis e à infraestrutura e logística já existentes, mas também a sua intensa ocupação agropecuária. No início, a cana-de-açúcar substituiu os grãos, sobretudo a soja, nos locais onde se encontravam os solos com melhor aptidão ao seu cultivo; posteriormente, substituiu as pastagens, que

se tornaram, em sua maioria, área convertida em cana (BARBALHO et al., 2013; CASTRO et al., 2010; FISCHER et al., 2008; MIZIARA; FERREIRA, 2008; NASSAR et al., 2008; PIETRAFESA et al., 2011, 2012; SILVA; MIZIARA, 2012; WAACK; NEVES, 1998).

Convém lembrar que, em decorrência da primeira grande crise global do petróleo, do início dos anos 1970, o Brasil já havia passado por grande expansão da cana e desenvolvido tecnologia para a produção do etanol originado da cana-de-açúcar, com fortes subsídios do Estado associados ao Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que vigorou de 1975 a 1979 e promoveu uma concentração notável de usinas e de área plantada no Sudeste e no Sul do país, em especial São Paulo, Paraná e Minas Gerais. Porém, mudanças no cenário do mercado do petróleo, crises de abastecimento de álcool e problemas técnicos com os motores levaram ao encerramento do programa, no estágio conhecido como de desregulamentação do setor, e a um longo período de crescimento lento (CASTRO et al., 2010), no qual o setor sucroalcooleiro se manteve, principalmente, com a produção de açúcar, se fortaleceu e se preparou para uma reconquista futura do mercado energético, que se concretizou com a pressão para a substituição do petróleo por fontes renováveis e com os recentes veículos *flexfuel*, entre outros aspectos.

O Brasil é um dos maiores produtores de açúcar e álcool do mundo e detém uma das maiores frotas de veículos *flex*, tendo um mercado interno forte, favorecido pela adição obrigatória de 25% de etanol à gasolina. Por sua expressiva e crescente produção de cana-de-açúcar, o País é bastante visado no cenário internacional, principalmente pela produção de etanol, para a qual conta com 387 unidades produtoras cadastradas, até 2013, no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), sendo que 14 usinas se dedicam somente à produção de açúcar e 96, à produção de álcool; a maioria (245) é de produção mista (álcool e açúcar); e havia (em 2013) 32 em construção. Essa recente expansão canavieira, intensificada a partir de 2004, promoveu a ampliação não só da área cultivada, mas também do número de usinas – cerca de 40 novas unidades até 2012 (BRASIL, 2012).

A área alvo para a expansão da cana no Brasil é o Centro-Sul do Bioma Cerrado, que, desde a segunda metade do século passado, foi convertido

maciçamente em usos agropecuários, estruturando o agronegócio baseado no binômio carne x grãos e em grandes complexos agroindustriais que mudaram completamente a paisagem, a economia e as dinâmicas territoriais. Tal fato decorreu da expansão da fronteira agrícola nos anos 1970, favorecida pela Revolução Verde, voltada à produção de *commodities* em consonância com um modelo agroexportador, sobretudo para o mercado externo, estruturado com base em grandes propriedades rurais monocultoras e elevada concentração fundiária e de renda da terra (KAGEYAMA, 1990; SILVA et al., 1999a, 1999b). Entretanto, essa reorganização socioeconômica também gerou impactos ambientais, principalmente derivados do desmatamento intensivo e, muitas vezes, indiscriminado (HOGAN et al., 2002). É justamente nesse cenário do Centro-Sul do Cerrado, já ocupado e estruturado com base no agronegócio, que a recente expansão canavieira avança de modo acelerado, principalmente no Estado de Goiás, em particular na sua porção sul.

O Governo Federal criou novas políticas de subsídio à recente expansão canavieira, como o Plano Nacional de Agroenergia – PNA e o Zoneamento Agroecológico para a Expansão da Cana-de-açúcar – ZAE Cana (MANZATTO et al., 2009), que levaram em conta o elevado potencial de produção de cana dessa porção do Cerrado com base em seus atributos como localização, relevo suave, clima tropical e solos de média a alta aptidão agrícola – que somam 12 Mha apenas no estado de Goiás, quase metade de sua área total, de pouco mais de 30 Mha –, além da infraestrutura e da logística existentes. O PNA foi proposto como instrumento regulador da produção canavieira e reflete claramente uma política favorável à expansão do agronegócio voltado à produção de biocombustíveis, principalmente o etanol, como alternativa aos combustíveis fósseis derivados do petróleo, principal indutor dessa recente expansão da monocultura de cana-de-açúcar.

Em consequência, ocorreram novas mudanças de uso do solo no Centro-Sul do Cerrado, bastante aceleradas desde 2000, o que traz preocupações quanto aos possíveis impactos, que já começam a ser alvo de estudos voltados, por exemplo, para a compactação dos solos (SILVA; CASTRO, 2013), o potencial de abastecimento e contaminação dos recursos hídricos (FERRAZ et al., 2013) e dos solos (BARBALHO; CAMPOS, 2010), e a disputa por terras (CAMELINI; CASTILHO, 2012), entre outros. Castro et al. (2010) chamam

a atenção para a necessidade de estudos em nível microrregional, portanto, em escalas de detalhe, para poder avaliar melhor essa dinâmica e os impactos decorrentes, mesmo que já se saiba que são usuais em expansão de Fronteira Agrícola (MIZIARA, 2006), e mesmo, também, que alguns estudos recentes assinalem a sua forte relação com a formação de novos e grandes complexos agroindustriais e o aproveitamento de uma logística pré-existente e preparada para escoar a produção do etanol, mediante algumas ações, além de presença de áreas disponíveis (MACEDO, 2005; MANZATTO et al., 2009). Por essa razão, alguns autores até interpretam esse tipo de dinâmica como Renda Diferencial da Terra II (MIZIARA; FERREIRA, 2008; SILVA; MIZIARA, 2012) ou a chamam de Terceira Marcha para o Oeste (PIETRAFESA et al., 2011).

No Estado de Goiás, a Mesorregião do Sul Goiano, em especial, se destacou nesse processo devido aos atributos já citados, e, nela, três microrregiões se revelaram como as preferidas para a expansão do setor: a de Quirinópolis, a do Meia Ponte e a do Vale do Rio dos Bois. A primeira vem se destacando como principal, sendo reconhecida como a nova centralidade da cana em Goiás, sem que tivesse produção de cana antes (BORGES; CASTRO, 2010). As outras duas já contavam com usinas na época do Proálcool e retomaram a expansão do setor, sendo que a Microrregião do Vale do Rio dos Bois (MRVRB) é a única priorizada pelo Proálcool com notável potencial para tal cultivo.

Convém destacar que a Microrregião do Meia Ponte teve o processo de expansão analisado por Castro et al. (2010), que detectaram a substituição das áreas de soja por cana-de-açúcar, que, por sua vez, substituíram as áreas de pastagem. Borges e Castro (2010), ao analisarem a Microrregião de Quirinópolis, averiguaram processo similar e afirmaram que esse processo gerou impactos nas áreas agrícolas convertidas em cana-de-açúcar: os diretos, pelas mudanças de culturas e pastos em cana; e, também, os indiretos nas áreas ocupadas pelas culturas deslocadas pela cana, sobretudo grãos para as áreas de pastagens e estas para áreas de remanescentes (TRINDADE, 2015).

Castro (2010) levanta a questão da insustentabilidade dos sistemas agrícolas quando se constata sua relação com os conflitos entre aptidão agrícola e uso, o que os fragiliza, tornando-os vulneráveis, e enfatiza a questão dos solos frágeis, considerados pela autora como solos que estão perdendo aceleradamente

o potencial produtivo, ou seja, a capacidade de suprir nutrientes, água e oxigênio para as plantas. Nesse sentido, apesar de as condições favoráveis do Sul Goiano dominarem em área, há setores com solos frágeis que vêm sendo incorporados à expansão canavieira, a qual já alcançou o extremo sudoeste do Estado de Goiás, onde há ocorrência expressiva desses solos, como estudado por Trindade (2015) e mapeado por Barbalho et al. (2013).

A recente expansão da monocultura da cana-de-açúcar na MRVRB, diante da diversidade dos atributos favoráveis da área ao cultivo da cana, traz à tona a necessidade de se obter um conhecimento da evolução da área de cultivo de cana-de-açúcar de 1985 a 2013 e dos impactos decorrentes, sobretudo identificando em quais solos está sendo inserida e que atividade lá existia antes. Assim, tem-se por objetivo avaliar a expansão recente da cana-de-açúcar na MRVRB, com ênfase em solos frágeis.

Área de estudo

A Microrregião do Vale do Rio dos Bois (MRVRB) possui área de aproximadamente 13.592,6 km² e está localizada nas coordenadas 16° 35' 25" / 18° 7' 28" S e 51° 7' 18" / 51° 7' 5" W. A MRVRB está na porção central da Mesorregião Sul de Goiás; quanto às microrregiões fronteiriças, a leste está a Microrregião do Meia Ponte e a oeste, a Microrregião do Sudoeste de Goiás.

Treze são os municípios que compõem a microrregião: Acreúna, Campestre de Goiás, Cezarina, Edealina, Edeia, Indiara, Jandaia, Palmeiras de Goiás, Palminópolis, Paraúna, São João da Paraúna, Turvelândia e Varjão, como se observa na Figura 1.

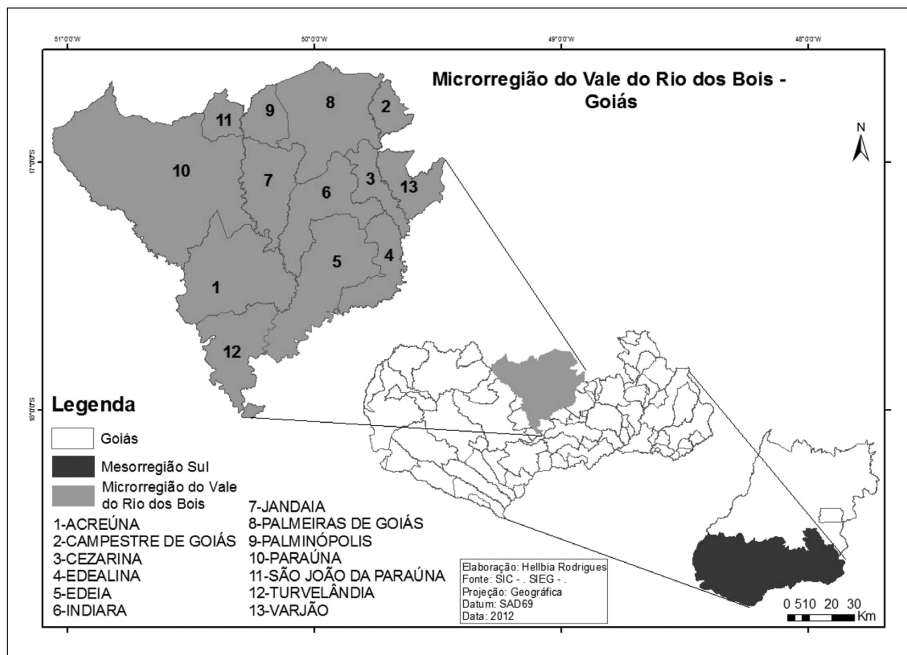


Figura 1. Localização da Microrregião do Vale do Rio dos Bois.

A MRVRB tem uma localização privilegiada por estar próxima à região de Goiânia, capital do Estado de Goiás, e de Brasília, capital federal, sendo beneficiada por uma ampla logística para escoamento dos produtos. Está localizada na porção sul do estado, onde dominam as melhores condições físicas para uso e ocupação por atividades agropecuárias, pois possui o clima tropical subúmido, com duas estações bem definidas, do tipo Aw, sendo chuvas de verão de outubro a março e inverno seco de junho a setembro, segundo tipologia climática estabelecida por Köppen.

Sua rede hidrográfica é densa e subdividida em duas regiões hidrográficas: a do Rio Araguaia, a montante da foz do Rio das Mortes no extremo noroeste, onde se localizam os rios Claro e São Domingos; e outra localizada na área de maior densidade de drenagens da região – a do Rio Paraná. A região hidrográfica do Rio Paraná contém o Sistema do Aquífero Guarani, uma das maiores reservas de água doce do planeta, muito importante para o futuro planejamento territorial.

A geologia da MRVRB apresenta um mosaico litológico bem diversificado. A unidade litoestratigráfica com maior expressão espacial é a Formação Serra Geral, pertencente ao Grupo São Bento, integrante da unidade estrutural Bacia Sedimentar, localizada a sudoeste e oeste. Quanto às áreas localizadas ao sul, os solos que se formaram dessas rochas foram predominantemente os Latossolos Vermelhos de textura argilosa, que apresentam a melhor aptidão agrícola devido a sua maior fertilidade em função da rocha matriz, o que contribuiu positivamente para o uso e a ocupação agrícola da região.

Quanto ao relevo, ao norte e a sudeste predomina a Superfície Regional de Aplainamento V (SRA V), a mais baixa do Estado, e a noroeste há trechos das Superfícies Regionais de Aplainamento II e III (SRA II e III), ambas mais elevadas, seguidas de uma Zona de Erosão Recuante (ZER), que diseca as SRA (LATRUBESSE; CARVALHO, 2006). As SRA são áreas suaves, aplainadas, de topos amplos, associadas a solos espessos como os Latossolos, favoráveis à agricultura mecanizada. Os Latossolos Vermelhos distroféricos predominam na região, concentrando-se a nordeste, oeste, sul e sudeste. São solos de caráter álico que necessitam de correção de acidez para se tornarem favoráveis à agricultura intensiva (SANTOS et al., 2006). A noroeste, ocorrem Neossolos Quartzarênicos (RQ) e pequenos setores com Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) e Gleissolo Háptico (GX); a norte, há manchas de Cambissolo Háptico (CX) e Neossolo Litólico (RL), adaptado do Projeto RADAMBRASIL (1981).

Metodologia do estudo de caso

A principal ferramenta para o desenvolvimento da pesquisa foi o Sistema de Informação Geográfica (SIG), associado às imagens de satélite. Na caracterização dos atributos do meio físico, foram compilados os *shapefiles* de forma gratuita da base de dados do Sistema Estadual de Estatística e de Informações Geográficas (SIEG). Os dados de Geologia, Geomorfologia, Recursos Hídricos e Pedologia foram organizados no *software* ARCGIS. Foram elaborados mapas de Declividade e Hipsometria utilizando imagem do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) extraída da base de dados do Topodata do INPE e trabalhada com auxílio dos *softwares* ENVI e ARCGIS.

A erodibilidade da área foi elaborada com base no mapa de solos aplicando-se os Índices de Erodibilidade adaptados de Salomão (2010), conforme a Tabela 1, e adaptando-se a nomenclatura ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2006). Em seguida, as classes de erodibilidade foram correlacionadas com as classes de solos, sendo atribuídas categorias que variaram de muito alta a muito baixa erodibilidade, numeradas de I a V, respectivamente.

Tabela 1. Classes de Erodibilidade.

Classes de Erodibilidade	Índices Relativos de Erodibilidade	Unidades Pedológicas
I	10,0 a 8,1	Cambissolos, Neossolos Litólicos, Nitossolos, Argissolos com textura arenosa média e Neossolos
II	8,0 a 6,1	Nitossolos, Argissolos não abruptos, textura média/argilosa, e textura média
III	6,0 a 4,1	Argissolos de textura argilosa
IV	4,0 a 2,1	Latossolos de textura média e argilosa
V	2,1 a 0	Gleissolos

Fonte: adaptado de Salomão (2010).

A erosão hídrica, um impacto comum nas áreas de cultura canavieira, é o processo de desagregação e remoção de partículas do solo, ou fragmentos e partículas de rochas, pela ação combinada da gravidade com a água, principalmente da chuva, gerando enxurrada (SALOMÃO, 2010). A erodibilidade depende dos atributos do solo, sendo a textura um atributo muito importante por promover a agregação do solo e maior resistência aos processos de erosão. O potencial de erosão é obtido com base nos atributos do solo e da paisagem.

Os mapas de uso e ocupação do solo e de cobertura da microrregião foram confeccionados a partir de imagens do satélite Landsat TM5, disponibilizadas gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para os anos de 1985, de órbita/ponto 222/72 e 223/72 do mês de junho, por permitir uma boa identificação das áreas de cana, assim como feito pelo CANASAT do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2013). As imagens foram trabalhadas

na composição colorida tipo R(5), G(4), B(3). Uma segunda imagem, de 2013, também do mês de junho, foi obtida pelo satélite Landsat-8 OLI/TRIS, na órbita/ponto 222/72 e 223/72, com resolução espacial de 30 m, nas bandas de composição colorida RGB – 654, que corresponde à mesma composição colorida da Landsat TM5.

Com o banco de dados das imagens montado, procedeu-se ao registro da imagem por georreferenciamento com base em imagens Geocover no *software* ENVI. Praticamente todo o processo de confecção dos mapas foi executado no *software* SPRING, com a segmentação das imagens pelo método de Crescimento de Regiões, no qual se divide a imagem em regiões que devem corresponder às áreas de interesse da aplicação. Entende-se região como um conjunto de *pixels* contíguos, que se espalham bidirecionalmente e apresentam uniformidade. A primeira etapa de classificação da imagem em classes distintas foi realizada no mesmo *software* (SPRING), e a segunda etapa, no ARCGIS, tendo os mapas sido exportados do SPRING em formato *shapefile*. Essa segunda etapa é uma classificação visual propriamente dita, na qual cada polígono é sobreposto conforme a imagem ao fundo da qual eles foram extraídos no processamento. Para tanto, foi utilizada chave de classificação com base em Ribeiro e Walter (2008), conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Chave de interpretação adotada para classificação da imagem.

Classes de Formações	Classes de Uso	Características			
		Textura	Tonalidade	Porte	Aspectos Associados
Formação Campestre	Campo Limpo	lisa, homogênea	arroxeado / preto	baixo	curso d'água
	Campo Sujo	finas com grânulos	verde médio / rosa	baixo	formas irregulares, árvores irregulares
	Cerrado Ralo	grossa	verde claro	baixo	árvores isoladas
Formação Savânica	Cerrado Denso	homogênea	verde médio	médio/ alto	formas irregulares
	Cerradão	grossa	verde escuro	Alto	formas irregulares
Formação Florestal	Mata Ciliar	homogênea	verde médio	Alto	fundo de vale; curso d'água
-	Agricultura	finas / aveludada / granular	rosa, verde claro	rasteiro	formas geométricas, pivôs
-	Pastagem	finas / homogênea / aveludada	clara com algumas variações	baixo	geométricos / trilhas / áreas isoladas / áreas rebaixadas e fundos de vale
-	Área Urbana	grossa	cinza claro / médio		formas geométricas / arruamentos

Fonte: adaptado de Ribeiro e Walter (2008).

Na classificação dos polígonos com cana-de-açúcar, foi utilizada a metodologia do CANASAT, elaborada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2013), que também utilizou imagens Landsat TM5 para o mapeamento, com o método de classificação supervisionada e fotointerpretação talhão por talhão.

Procedeu-se à validação em campo e, após a finalização dos mapas de uso do solo e remanescentes do Cerrado de 2013, a imagem pode apresentar alguma confusão espectral, ocorrência de uso cobertura que possui mesma refletância, seja pela densidade, estágio fenológico e outros fatores. A validação realizada em 2013 foi correlacionada às classificações, confirmando e reclassificando com a verdade terrestre quando classificado incorretamente. Foram amostrados 98 pontos bem distribuídos na área da MRVRB, adotando como principal referência as usinas de cana; além da acessibilidade, contemplou-se todas as classes mapeadas.

A relação entre a expansão da cana-de-açúcar e os solos

Na MRVRB, há o predomínio da classe Latossolo Vermelho distrófico, seguida de Cambissolo Háplico distrófico, Cambissolo Álico, Neossolo Litólico, Neossolo Quartzarênico, Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico e Gleissolo Háplico eutrófico (Tabela 3).

Tabela 3. Distribuição das Classes de Solos na Microrregião do Vale do Rio dos Bois.

Classes de Solos	Área	
	ha	%
RQa – Neossolo Quartzarênico	1.981,40	14,54
CHa – Cambissolo Álico	386,10	2,83
CHd – Cambissolo Háplico distrófico	2.346,40	17,22
GXd – Gleissolo Háplico distrófico	219,30	1,61
GXe – Gleissolo Háplico eutrófico	291,80	2,14
LVd – Latossolo Vermelho distrófico	6.851,40	50,29
PVAd – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico	554,60	4,07
PVAe – Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico	784,60	5,67
RL – Neossolo Litólico	203,60	1,49
Total	13.619,91	100

O Latossolo Vermelho distrófico é a classe predominante, com 50,29% da área total, e se concentra na porção centro-sul, ocorrendo seções fragmentadas de Latossolo nas porções norte e nordeste; toda a área de ocorrência desta classe é drenada pela Bacia do Paraná. Três usinas existentes na MRVRB estão localizadas na classe de Latossolos, conforme a Figura 2, sendo válido observar que os plantios das quatro usinas indicadas no mapa possuem sua área de cultivo predominantemente em área de Latossolos.

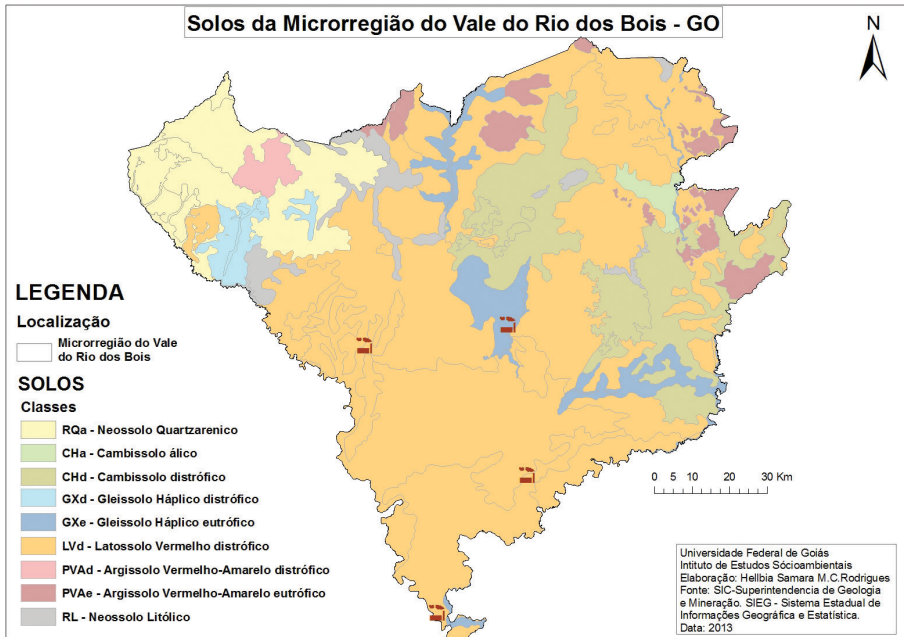


Figura 2. Solos da Microrregião do Vale do Rio dos Bois.

A erodibilidade da área permitiu constatar que 66,45% da área se encontram nas classes de baixa a muito baixa erodibilidade, correspondendo a uma grande extensão do centro-sul, com ocorrência até o norte e o nordeste. Segue-se a classe de muito alta erodibilidade, com 28,24%, distribuída em fragmentos situados na porção nordeste, centro-norte e noroeste, como se pode observar na Figura 3 e na Tabela 4.

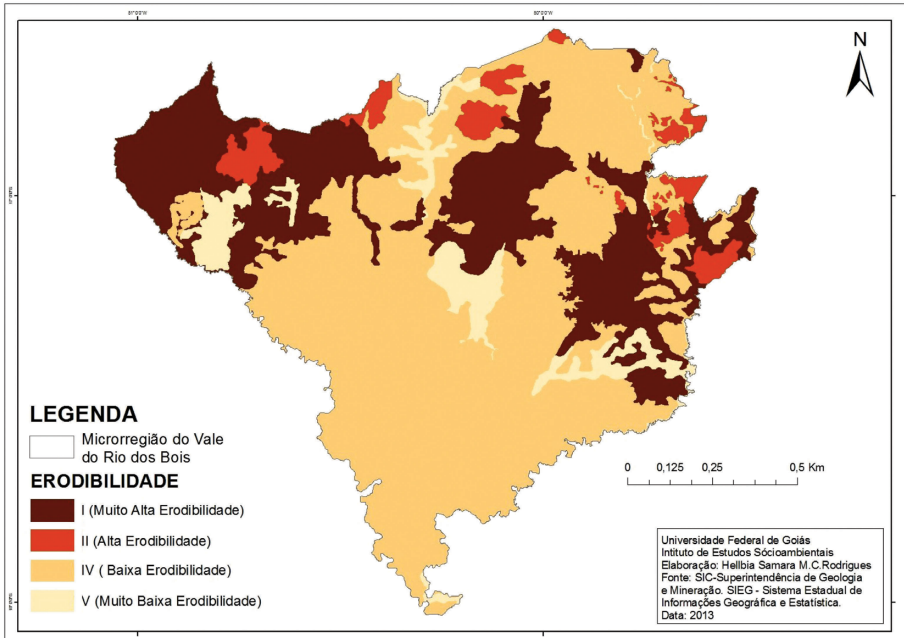


Figura 3. Classes de erodibilidade dos solos da Microrregião do Vale do Rio dos Bois.

Tabela 4. Erodibilidade da Microrregião do Vale do Rio dos Bois.

Erodibilidade	Área km ²	Área relativa (%)
I	3.842,67	28,24
II	720,51	5,29
IV	8.057,81	59,22
V	984,10	7,23
Área Total	13.605,09	100

O Estado de Goiás apresenta uma ampla produção de grãos e de bovinocultura, não sendo diferente na MRVRB. Esta, por sua vez, apresenta solo propício à produção em larga escala e boa oferta hídrica. Assim, o uso do solo e o estado dos remanescentes do Cerrado da MRVRB já configuraram uma paisagem bem antropizada, visto que, em 1985, já predominava a agricultura seguida de pastagem na região. No entanto, havia mais fragmentos de Cerrado, sobretudo nas áreas consideradas de preservação permanente, como as áreas de fundo de vale, topo de morro, bordas de canais de drenagens e nascentes, como se pode observar na Figura 4 e na Tabela 5.

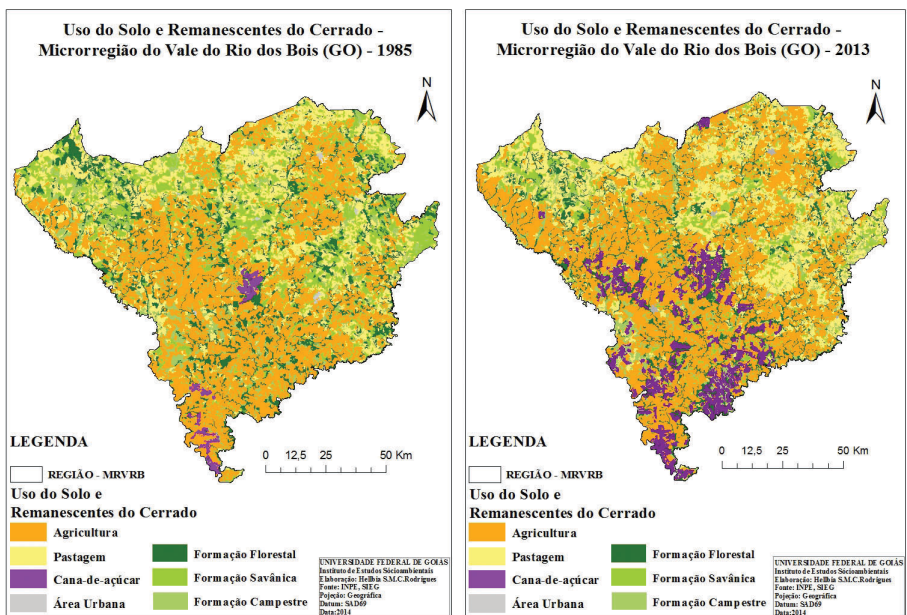


Figura 4. Uso do solo e remanescentes do Cerrado da Microrregião do Vale do Rio dos Bois.

Tabela 5. Uso do solo e remanescentes do Cerrado da Microrregião do Vale do Rio dos Bois.

Classes	1985		2013	
	Área		Área	
	ha	%	ha	%
Agricultura	548.143,06	40,34	596.630,81	43,9
Cana-de-açúcar	14.687,79	1,08	110.136,64	8,1
Formação Campestre	127.579,60	9,38	110.816,61	8,15
Formação Florestal	175.237,62	12,89	149.226,91	10,98
Formação Savânica	200.132,76	14,72	88.574,724	6,51
Pastagem	290.159,40	21,35	299.996,94	22,07
Área Urbana	2.877,88	0,21	3.631,58	0,26
Total	1.359.014,22	100	1.359.014,22	100

A MRVRB apresenta diferenças quanto às classes de solos, embora predomine a classe de Latossolo Vermelho distrófico (LVd) por toda a porção sul, conforme já exposto, associado ao substrato basáltico e ao relevo suave da Superfície Regional de Aplainamento (SRA-IVB), com prolongamento também para o centro, favorecendo a ideia de que essa área apresenta as melhores condições de cultivo da cana, ao contrário das áreas menores e descontínuas no norte, no nordeste, além de pequenos setores no oeste. Em 1985, essas áreas de Latossolos Vermelhos distróficos da porção sul já possuíam atividade agrícola quando a região, em sua área total, já possuía 40,34% de área ocupada pela agricultura e a principal produção era de grãos, sobretudo soja, sorgo e milho.

A produção de cana-de-açúcar, em 1985, já se concentrava no extremo sul da MRVRB, projetando-se para a porção central, contava com duas usinas construídas no período do Proálcool. Em 2004, iniciou-se a recente expansão, e em 2007 a MRVRB passa a possuir quatro usinas, nesse período a cana-de-açúcar passa a ocupar área considerável, e em 2013, as usinas mantêm a área de cultivo em contínua ampliação, sempre na mesma região onde predominam os Latossolos Vermelhos, apresentando área em expansão.

A cana-de-açúcar avança na MRVRB substituindo grãos, que, em 2013 ocupavam 43,9% da área total da região. Mas, se comparada à área agrícola de 1985, na de 2013, o crescimento é discreto: de 3,56%. No entanto, a classe de cana-de-açúcar, que, em 1985, representava 1,08%, em 2013 passa a representar 8,1%. Ainda que possa ser considerado um valor baixo em termos da área total da região, seu crescimento é notável, com expansão sobre áreas que se encontravam consolidadas com a soja.

Na MRVRB, a cana-de-açúcar está em áreas de baixa erodibilidade, revelando ausência virtual de conflitos de uso (discrepâncias). Os Latossolos Vermelhos distróficos (LVd) são solos de baixa erodibilidade, ainda que Vitte e Mello (2007) afirmem que a erodibilidade pode mudar ao longo do tempo, pois os solos apresentam propriedades que podem ser alteradas diante de diferentes usos e, sobretudo, manejos. São solos suscetíveis a impactos, como erosão, porém, resultantes mais do manejo do que do uso, o que deve ser observado mesmo para essa classe de solo. Há, também, outros impactos, que podem ocorrer diante do manejo inadequado (como a compactação desses solos em consequência do uso de máquinas pesadas, visando a alta produção), logo dependente de elevada tecnificação, como é o caso da cana-de-açúcar.

Barbalho e Campos (2010) salientam, ainda, o problema da aplicação descontrolada da vinhaça, utilizada na fertirrigação, e assinalam uma elevada vulnerabilidade dos solos do estado a uma situação de risco à contaminação, tanto dos solos quanto dos corpos d'água superficiais e subsuperficiais. Isso pode se tornar um impacto que pode trazer à classe de solo uma fragilidade, ou seja, sua exposição à contaminação. Na MRVRB, as áreas de cultivo de cana-de-açúcar também utilizam a vinhaça para fertirrigação, em alguns casos construindo canais para o escoamento da mesma, mas sem a membrana de proteção para evitar o contato com o solo, o que evitaria a contaminação do mesmo e também do lençol freático, como dispõe a normativa 001/2007 (GOIÁS, 2007).

A MRVRB revela uso agrícola há mais de 40 anos, segundo análise multitemporal realizada por Miziara e Ferreira (2008), e a área que é alvo da expansão da cana-de-açúcar corresponde justamente à área de maior grau de antropização, com relevo plano a suave ondulado, predomínio de Latossolos Vermelhos e boa disponibilidade hídrica (FERRAZ et al., 2013), onde a

vegetação remanescente de Cerrado existe apenas nas Áreas de Preservação Permanente e de Reserva Legal.

Nessa avaliação do uso e da ocupação da MRVRB, observou-se que as Formações Savânicas e Florestais foram as que mais perderam área nos anos analisados (1985 a 2013). No entanto, pode-se observar que essas formações ainda compõem grandes fragmentos em praticamente toda a metade norte da região, onde se encontram associados a Cambissolos em condição de relevo mais movimentado, composto por morros e colinas médias. Ocorrem, também, em áreas mais suaves, mas com Neossolos Quartzarênicos, que requerem atenção especial no manejo.

Os Cambissolos distróficos (CHd) ocorrem no centro e no oeste da área, e os Cambissolos álicos (CHa) ocorrem em uma pequena mancha a oeste. São solos que podem ser ocasionalmente cultivados, a depender dos declives, pois são considerados de muito alta erodibilidade, assim como os Neossolos Quartzarênicos, que também ocorrem na porção noroeste, classificados como Neossolos Quartzarênicos háplicos (RQa), e pequenos setores de Neossolos litólicos (RL). No conjunto, são solos de baixa aptidão agrícola. Em geral, são solos frágeis.

Nessas áreas, sobretudo nas de Neossolos Quartzarênicos, diminuiu consideravelmente o número e o tamanho dos remanescentes do Cerrado no período analisado, posto que foram convertidos em pastagem. Esses solos, por sua textura arenosa e estrutura de grãos simples, de baixa coesão, baixa fertilidade, baixa retenção de umidade e elevada erodibilidade, demandam cuidados no trato agrícola e maior investimento de capital para conseguir que sejam produtivos. Dentre todos, são os solos mais frágeis.

Os Argissolos também fazem parte do mosaico de solos dessa porção norte da região, distribuídos em manchas de Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), situadas no noroeste, e de Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe), em porções no norte e no oeste. Os Argissolos correlacionam-se a manchas cobertas com Formação Savânica e Florestal; no entanto, em sua grande maioria, estão sendo manejados com pastagem e agricultura. São solos favoráveis à cana, porém, demandam práticas conservacionistas severas para controle de erosão, dada a elevada erodibilidade dos seus horizontes superficiais.

E, por fim, somem-se a esses solos os Gleissolos Háplicos distróficos (GXd), que ocorrem apenas no noroeste, e os Gleissolos Háplicos eutróficos, que ocorrem nas porções central e oeste, com baixa participação na área. São solos de áreas úmidas, como planícies de inundação, veredas e similares, desfavoráveis ao cultivo da cana devido à saturação permanente.

Na dinâmica de uso e ocupação do solo da MRVRB, o saldo para a vegetação remanescente do Cerrado é negativo, pois, no período analisado, que revela um intervalo de 28 anos, o uso do solo cresceu 11,46% e a perda de remanescentes foi de 11,84%. Observando-se as manchas de cana-de-açúcar, pode-se constatar que se repete o mesmo padrão das demais áreas do estado, ou seja: a cultura ocupou, preferencialmente, as áreas de Latossolos, antes ocupadas por grãos, contrariando o proposto no PNA, que estabelece as pastagens degradadas como áreas prioritárias para a expansão com o objetivo de promoção do desenvolvimento sustentável em benefício da sociedade brasileira. Acrescenta-se que a cana-de-açúcar, ao substituir áreas de agricultura, as obriga a migrar para áreas de pastagens, e as pastagens, a migrar para áreas de remanescentes, promovendo, também, uma intensa pressão sob os fragmentos de Cerrado.

Quanto aos solos frágeis da MRVRB, concentrados, sobretudo, na porção norte da região, eles não estão sendo convertidos em cana-de-açúcar como em outras áreas do estado, o que, certamente, se explicaria por sua baixa aptidão agrícola.

Considerações finais

A MRVRB mostra uso intensivo há quase 30 anos, concentrado, sobretudo, na sua porção sul, onde ocorrem os melhores solo e relevos, amplamente favoráveis à mecanização intensiva. Some-se a isso a baixa erodibilidade dos solos, principalmente a dos Latossolos Vermelhos predominantes. A cana-de-açúcar vem se expandindo, justamente, nessa porção sul sobre regiões antes cultivadas, principalmente, com grãos, ampliando a área implantada na época do Proálcool.

Não se trataria, nessa porção, propriamente de solos frágeis, mas é necessário levar em consideração o elevado comprimento da rampa e a baixa

densidade da cobertura natural, que podem favorecer processos erosivos laminares e até em sulcos. Além disso, apresentam elevado potencial de compactação, devido à textura argilosa, quando submetidos a manejo altamente tecnificado, como é o caso da cana-de-açúcar, bem como de contaminação, em particular pela fertirrigação com vinhaça.

No que se refere aos solos frágeis, foi possível constatar que eles se concentram na porção norte da região, onde dominam Cambissolos, Argissolos, Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos, considerados frágeis, principalmente, em virtude de ocorrerem em relevos mais movimentados de morros e colinas médias, que, embora apresentem rampas mais curtas, seus declives são mais acentuados, o que, juntamente com o seu potencial erosivo, condiciona baixa aptidão e mesmo restrição ao manejo intensamente tecnificado, como o da cana-de-açúcar.

Em síntese, os solos considerados frágeis na MRVRB não vêm sendo alvo de expansão da cana-de-açúcar, como acontece em outras regiões do estado, devido a fortes restrições ao manejo da cana-de-açúcar, altamente tecnificado.

Referências

- BARBALHO, M. G. da S.; CAMPOS, A. B. de. Vulnerabilidade natural dos solos e águas do Estado de Goiás à contaminação por vinhaça utilizada na fertirrigação da cultura de cana-de-açúcar. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, n. 1, p. 155-170, jan./jun. 2010.
- BARBALHO, M. G. da S.; SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. de. A expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar na região Sul do Estado de Goiás de 2001 a 2011. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, n. 29, p. 98-110, set. 2013. Disponível em: <http://www.rbciamb.com.br/images/online/Materia_8_artigos365.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2014.
- BORGES, V. M. S.; CASTRO, S. S. de. Dinâmica da expansão da cultura da cana-de-açúcar na Microrregião de Quirinópolis, GO: subsídios para avaliação da competitividade com culturas de grãos e pastos. In: SEMINÁRIO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFG, 7., 2010, Goiânia. **Anais...** Goiânia: UFG, 2010.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Balanco nacional de cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília, DF: Secretaria de Produção e Agroenergia, 2012.

CAMELINI, J. H.; CASTILHO, R. Etanol e o uso corporativo. **Revista Mercator**, Fortaleza, v. 11, n. 25, p. 7-18, maio/ago. 2012. Disponível em: <<http://www.mercator.ufc.br/index.php/mercator/article/viewArticle/722>>. Acesso em: 24 ago. 2012.

CASTRO, S. S. de; ABDALA, K; SILVA, A. A.; BORGES, V. M. S. A expansão da cana-de-açúcar no Cerrado e no Estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, n. 1, p. 171-191, jan./jun. 2010. Disponível em: <<http://www.revistas.ufg.br/index.php/bgg>>. Acesso em: 2 jun. 2013.

FERRAZ, R. P. D.; SIMÕES, M.; DUBREUIL, V. Avaliação da sustentabilidade hídrica da cultura canavieira através do uso de indicadores extraídos de modelos espaciais. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, n. 29, p. 63-75, set. 2013. Disponível em: <<http://www.rbciamb.com.br/publicacoes3.asp>>. Acesso em: 13 set. 2014.

FISCHER, G.; TEIXEIRA, E.; HIZSNYIK, E. T.; VELTHUIZEN, H. van. Land use dynamics and sugarcane production. In: ZUURBIER, P.; VOOREN, J. van de. (Ed.). **Sugarcane ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment**. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2008. cap. 2, p. 29-62.

GOIÁS (Estado). Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Agência Goiana do Meio Ambiente. Instrução Normativa nº001/2007. **Diário Oficial/GO**, Goiânia, 21 jun. 2007.

HOGAN, D. J.; CARMO, R. L. do; AZEVEDO, A. M. M. de; GAMA, I.; DARCIE, C.; DELGADO, C. C. Um breve perfil ambiental da Região Centro-Oeste. In: HOGAN, D. J.; CARMO, R. L. do; CUNHA, J. M. P. da; BAENINGER, R. (Org.). **Migração e ambiente no Centro-Oeste**. Campinas: Unicamp, Núcleo de Estudos de População, 2002. p. 175-276.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (BRASIL). **Canasat**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

KAGEYAMA, A. O novo padrão agrícola brasileiro: do complexo rural aos cais. In: DELGADO, G. C.; GASQUES, J. G.; VILLAVERDE, C. M. (Org.). **Agricultura e Políticas Públicas**. Brasília, DF: IPEA, 1990. p. 113-223.

LATRUBESSE, E. M; CARVALHO, T. M. de. **Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal**. Goiânia: Secretaria de Indústria e Comércio, Superintendência de Geologia e Mineração, 2006. 127 p. (Série geologia e mineração, 2).

MACEDO, I. de C. (Org). **A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria de cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade**. São Paulo: Berlendis e Vertecchia: ÚNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2005.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. (Org). **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**: expandir a produção, preservar a vida e garantir o futuro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p.

MIZIARA, F. Expansão de fronteiras e ocupação do espaço no Cerrado: o caso de Goiás. In: GUIMARÃES, L. D. A.; SILVA, M. A. D. da; ANACLETO, T. C. (Org.). **Natureza viva cerrado**: caracterização e conservação. Goiânia: UCG, 2006. cap. 7.

MIZIARA, F.; FERREIRA, N. C. Expansão da fronteira agrícola e evolução da ocupação e uso do espaço no Estado de Goiás: subsídios à Política Ambiental. In: FERREIRA JUNIOR, L. G. (Org.). **A encruzilhada socioambiental**: biodiversidade, economia e sustentabilidade no Cerrado. Goiânia: Cãnone / CEGRAF-UFG, 2008.

NASSAR, A. M.; RUDORFF, L. B. A.; AGUIAR, D. A.; BACCHI, M. R. P.; ADAMI, M. Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. In: ZUURBIER, P.; VOOREN, J. van de (Ed.). **Sugarcane ethanol**: contributions to climate change mitigation and the environment. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2008. cap. 3, p. 63-64.

PIETRAFESA, J. P.; CASTRO, S. S.; TRINDADE, S. P. A crescente produção sucroalcooleira em áreas de Cerrado e o Estado de Goiás: contribuição ao estudo de indicadores de sustentabilidade. In: FRANCO, J. L. de A.; SILVA, S. D. e; DRUMOND, J. A.; TAVARES, G. G. (Org). **História Ambiental**: fronteiras, recursos naturais e conservação da natureza. Rio de Janeiro: Garamond, 2012. p. 311-332.

PIETRAFESA, J. P.; SAUER, S.; SANTOS, A. E. A. Políticas de recursos públicos na expansão dos agrocombustíveis em Goiás: ocupação de novos espaços em áreas de Cerrado. In: PIETRAFESA, J. P.; SILVA, S. D. e (Org). **Transformações no Cerrado**: progresso, consumo e natureza. Goiânia: PUC, 2011. p. 93-122.

PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SD.22 Goiás**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1981. 632 p. (Levantamento de recursos naturais, 25).

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de.; RIBEIRO, J. F. (Ed.). **Cerrado**: ecologia e flora. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. v. 1, p. 151-212.

SALOMÃO, F. X. D. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (Org). **Erosão e conservação dos solos**: conceitos, temas e aplicações. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 229-265.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, J. B. DE; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SILVA, J. F. G. da. **A nova dinâmica da agricultura brasileira**. 2. ed. Campinas: Unicamp, 1999a. 217 p.

SILVA, J. F. G. da. **O novo rural brasileiro**. 2. ed. Campinas: Unicamp, 1999b. 147 p.

SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. de. Potencial e risco à compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Sudeste do Estado de Goiás. **Revista Territorial**, Goiânia, v. 2, n. 1, p. 106-127, jan./jun. 2013.

SILVA, A. A.; MIZIARA, F. **Avanço do setor sucroalcooleiro e sindicato da indústria de fabricação de etanol do estado de Goiás – SIFAEG**. Disponível em: <<http://www.sifaeg.com.br/>>. Acesso em: 28 maio 2012.

TRINDADE, S. P. **Aptidão agrícola, mudanças de uso dos solos, conflitos e impactos diretos e indiretos da expansão da cana-de-açúcar na região Sudeste Goiano**. 2015. 187 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

VITTE, A. C.; MELLO, J. P. de. Considerações sobre a erodibilidade dos solos e a erosividade das chuvas e suas consequências na morfogênese das vertentes: um balanço bibliográfico. **Climatologia e Estudos da Paisagem**, Rio Claro, SP, v. 2, n. 2, p. 107-131, jul./dez. 2007.

WAACK, R. S.; NEVES, M. F. Competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar. In: FARINA, E. M. M. Q.; ZILBERSZTAJN, D. (Coord.). **Competitividade no agribusiness brasileiro**. São Paulo: IPEA/PENSA/USP, 1998. v. 5.

Capítulo 3

Compartimentação morfológica aplicada à distribuição de padrões espaciais de processos erosivos em solos frágeis - Município de Mineiros, GO

Elizon Dias Nunes; Selma Simões de Castro

Introdução

Nas últimas quatro décadas, os ambientes tropicais subúmidos na região Centro-Oeste do Brasil vêm passando por consideráveis transformações devido à conversão de cobertura natural em uso agropecuário do solo (BARBOSA et al., 2004). Tais mudanças se intensificaram a partir da implantação de programas governamentais, principalmente no contexto do II Plano Nacional de Desenvolvimento, válido para 1975-1979, com seus programas específicos, como o POLOCENTRO, cujo intuito era promover a integração e o desenvolvimento econômico da região (ESTEVAM, 2004).

Esses programas foram implementados à custa de desmatamentos intensos e indiscriminados de extensas áreas, sobretudo nos planaltos cobertos por Latossolos Vermelhos argilosos ou de textura média e profundos, ou ainda por Latossolos Vermelho-Amarelos de textura média. O processo de desmatamento se iniciou concomitantemente à obtenção de lenha para a produção de carvão vegetal e cercas de divisa, entre outros usos, e, posteriormente, se acentuou

com a prática da agricultura intensiva, além da abertura de rodovias para o escoamento da produção, como lembra Castro (2005).

Esse processo implicou em notável remoção da cobertura vegetal, que antes revestia e protegia um espesso manto de materiais predominantemente latossolizados (CASTRO, 2005; CASTRO; QUEIROZ NETO, 2009; SANO et al., 2007), proporcionando sua subsequente exposição aos agentes erosivos. Assim, esses ambientes foram sendo expostos à ação da energia potencial da chuva e da energia cinética do escoamento superficial que, associadas à dissecação do relevo, resultaram em processos de ravinamentos e até mesmo voçorocamentos. Tais processos foram potencializados pela compactação do solo, associada ao pisoteio animal e à maquinaria agrícola, sobretudo dos topos planálticos e áreas mais rebaixadas recobertas por Latossolos argilosos e de textura média, respectivamente. A compactação impossibilita ou dificulta a infiltração das águas pluviais e de irrigação, favorecendo a dissecação erosiva hídrica acelerada, que, ao atuar em solos profundos e de textura média, pode resultar em focos erosivos de grandes dimensões.

Na região em estudo existem situações mais degradantes, especialmente em solos de textura arenosa, dispostos em manchas associadas aos materiais da Bacia Sedimentar do Paraná, como os arenitos eólicos da Formação Botucatu, os quais deram origem aos Neossolos Quartzarênicos órticos, muito comuns em topos e encostas suaves, que passam lateralmente aos Neossolos Quartzarênicos hidromórficos nos fundos de vale, margeando os canais fluviais. Tais solos apresentam elevada erodibilidade devido às características texturais e estruturais: são quartzosos, com grãos simples e soltos e baixa coesão. Por vezes, possuem elevada espessura, porém, são pedogeneticamente pouco desenvolvidos. Isso se reflete na fertilidade, geralmente baixa, devido às baixas somas de bases, de capacidade de troca catiônica e valor de saturação. Embora possuam baixo teor de matéria orgânica e baixa aptidão agrícola, podem ser indicados para pastagens, desde que manejados adequadamente. Esses solos são interpretados como *solos frágeis* e, por muitas vezes, são submetidos ao uso intensivo e sem práticas conservacionistas, o que induz à sua degradação (CASTRO, 2005).

É importante ressaltar que grande parte dessas mudanças de uso, de modo geral, aconteceu sem estudos específicos acerca da aptidão agrícola das terras, principalmente em nível municipal e microrregional, de modo a subsidiar a elaboração de planos de ocupação e de manejo adequados a fim de garantir uma

boa conservação e a continuidade do desempenho das funções do solo (CASTRO, 2005). Como consequência, o que se verifica, inclusive até os dias atuais, é a ocorrência de alta a moderada discrepância entre o uso e a aptidão agrícola das terras em setores mais sensíveis da paisagem associados a solos mais frágeis, como os Neossolos Quartzarênicos órticos, resultando, na maioria das vezes, em processos erosivos lineares de origem hídrica (BARBALHO, 2010).

Estudos anteriores na Alta Bacia do Rio Araguaia, relatados por Castro (2005), revelaram que a maioria dos grandes focos erosivos, especialmente voçorocas, foi deflagrada ainda no início dos anos 1980. Os processos se iniciaram no começo da estação chuvosa em áreas rebaixadas com o predomínio de solos arenosos que já haviam passado por recente desmatamento intenso e indiscriminado para conversão ao plantio de arroz, soja, milho e pastagens. Indicaram, ainda, que grandes volumes de solo foram retirados dos maiores focos erosivos, diminuindo áreas agricultáveis e causando o assoreamento de planícies de inundação e dos vários rios, inclusive do próprio Araguaia, em segmentos onde o canal apresenta baixo gradiente altimétrico.

Marinho et al. (2006) indicam que a sucessão lateral de solos do topo à base dos interflúvios (sistemas pedológicos), contornando os chapadões e dominantes nas zonas rebaixadas, compõe Compartimentos Morfopedológicos (CMP) típicos, a exemplo da compartimentação proposta por Barbalho (2002). Estes resultam da relação entre o substrato geológico, o relevo (ou topografia) e os solos (CASTRO; SALOMÃO, 2000). No presente caso, os CMPs mais suscetíveis são constituídos, predominantemente, por Neossolo Quartzarênico órtico dos topos até os terços médios, onde passam a Neossolos Quartzarênicos hidromórficos nos terços inferiores e, estes, aos Gleissolos nos fundos de vale, compondo os sistemas pedológicos mais suscetíveis à instalação de voçorocas, que resultam de fluxos hídricos superficiais potencializados pelos fluxos subsuperficiais e do nível freático raso ou aflorante no sopé das encostas e que se desenvolvem a partir dessa posição e remontam nas vertentes (MARINHO et al., 2006). Os focos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) presentes nesses CMPs dominados por tais sistemas pedológicos podem atingir grandes dimensões, como relatado por Barbalho e Castro (2002), Barbalho et al. (2003), Boulet (2001), Castro (2005), Marinho e Castro (2003) e Resende (2003). Incluem-se nessa lista o *Atlas Geoambiental das Nascentes dos rios Araguaia e Araguainha* e o *Plano de Controle de Erosão Linear das nascentes dos rios Araguaia e Araguainha* (CASTRO et al., 2004).

Trata-se de ambientes com espessa cobertura pedológica, predominantemente arenosa e associada a substratos areníticos (sobretudo a Formação Botucatu), que se desenvolveram a partir da ação de índices pluviométricos crescentes no Quaternário associados à umidificação progressiva típica do clima tropical subúmido em relevos em processo de arrasamento (aplainamento) e dissecação (dos relevos aplainados pela rede de canais de drenagem), em um contexto tectônico relativamente estável. Com maior estabilidade há as denominadas chapadas que configuraram relevos tabulares ou de *cuesta*, ambos com bordas ou *fronts* na forma de escarpas erosivas e contornadas por relevos rebaixados (até 100 m de desnível), colinosos, arenosos e com baixa densidade de drenagem, caracterizando o que comumente se denomina de colinas amplas e médias (CASTRO, 2005).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivos: (i) definir, mapear e caracterizar os compartimentos morfopedológicos e avaliar quais variáveis são mais correlatas à distribuição dos focos erosivos lineares e sua respectiva área de contribuição; e (ii) analisar a influência das condições de cobertura e uso do solo de modo a entender a ocorrência desse fenômeno, em escala de semidetalhe, para o ano de 2012.

Área de estudo

A área de estudo compreende o Município de Mineiros, acrescida das áreas dos municípios limítrofes de Santa Rita do Araguaia, Perolândia e Portelândia, localizados na microrregião Sudoeste do Estado de Goiás, na região Centro-Oeste do País. Essas localidades somam 12.002,35 km², o que corresponde a 4% da área do estado. Embora pertença somente à unidade geotectônica Bacia Sedimentar do Paraná, em princípio, a área pode ser subdividida em quatro conjuntos distintos em virtude da influência das diversas litologias e do clima no relevo (Figura 1). A geologia é composta por rochas sedimentares diversas, sobretudo areníticas, de suscetibilidades erosivas variáveis devido aos diversos graus de cimentação, e por rochas intrusivas básicas intercaladas e mesmo aflorantes, tais como basaltos, nas quais o processo de erosão diferenciada resultou em diversos níveis altimétricos, relativamente escalonados.

Assim, no extremo norte da área predominam coberturas sedimentares fanerozóicas constituídas por arenitos, folhelhos e siltitos do Grupo Itararé/Formação Aquidauana, as quais sustentam altitudes de até 590 metros e presença de canais de grande porte separados por interflúvios mais dissecados e, conseqüentemente, mais rebaixados (IANHEZ et al., 1983; LACERDA FILHO; FRASCA, 2008; NOVAES et al., 1983). Especificamente na sub-bacia do Rio do Peixe, predominam arenitos vermelhos e siltitos em altitudes de até 607 metros e declividades que pouco ultrapassam 16%, onde predominam o Argissolo Vermelho de textura média e o Cambissolo Háplico de textura arenosa a cascalhenta. O uso é predominantemente de pastagens e, por vezes, ocorre solo exposto.

Separando a porção norte da porção central da área, ocorrem diversas formações geológicas, nas quais a diversidade de resistência condiciona a formação de diversos patamares escalonados, correspondendo a uma faixa cujo desnível pode chegar a 400 metros. Nessa zona de transição, conhecida como Zona de Erosão Recuante, predominam declividades mais acentuadas e, conseqüentemente, solos menos desenvolvidos, tais como Cambissolo e Neossolo Litólico. Em decorrência da baixa aptidão para o plantio, o uso se dá, principalmente, por pastagem. Já a porção central é sustentada por coberturas sedimentares fanerozóicas compostas por argilitos, arenitos e depósitos de areia pertencentes à Formação Cachoeirinha (DRAGO et al., 1981; LACERDA FILHO; FRASCA, 2008); corresponde à Superfície Regional de Aplainamento II B (LATRUBESSE; CARVALHO, 2006), podendo atingir até 1009 metros de altitude, cujas declividades variam de 5 a 8%. Nas porções mais elevadas, predomina o Latossolo Vermelho de textura argilosa a muito argilosa, ao passo que, nas porções mais rebaixadas e acompanhando os poucos canais de drenagem, predomina o Gleissolo Háplico de textura também argilosa. Trata-se da porção com ocupação mais antiga e intensa, com o plantio de milho, soja e algodão.

A porção sul apresenta características geológicas e pedológicas semelhantes àquelas da porção central, em que a principal diferença está na altitude, pois o relevo suave e com baixa densidade de drenagem encontra-se com caimento topográfico na direção N-S (MAMEDE et al., 1983). Nessa porção sul ainda predominam fitofisionomias de formações savânicas, como

cerrado ralo e, principalmente, de formações campestres, como campo limpo e campo sujo, quadro favorecido pela presença do Parque Nacional das Emas.

Nas porções oeste e sudeste, predominam arenitos eólicos pertencentes ao Grupo São Bento/Formação Botucatu em altitudes que, em geral, não ultrapassam os 850 metros, com declividades variando entre 4 e 26% e predomínio de Latossolos Vermelhos de textura média nas porções mais elevadas, de Argissolos Vermelhos de textura média em áreas mais rebaixadas e de Neossolos Quartzarênicos nas porções mais baixas, com declives mais suaves. Segundo a revisão de Castro et al. (1999), o substrato geológico predominante é constituído por arenitos eólicos róseos e avermelhados, finos a muito finos, com estratificações planas e cruzadas, curtas a longas e silicatados. Consequentemente, dão origem a solos arenosos igualmente finos, maciços, portanto, potencialmente instáveis, ácidos e, não raro, álicos, isto é, de baixa fertilidade natural.

O clima é do tipo Aw (tropical quente subúmido), segundo a classificação de Köppen, com duas estações bem distintas: uma com temperaturas elevadas e chuvas concentradas no período setembro-maio, com o máximo pluviométrico de 300 mm no mês de janeiro; e outra marcada pela estiagem no período junho-agosto, com a precipitação acumulada ficando em torno de 20 mm, e predomínio de temperaturas amenas (SILVA et al., 2006).

Com base na observação de fotografias aéreas em nível de cinza e resolução espacial de 10 m, foi possível constatar que, em 1966, não existiam evidências de grandes focos erosivos lineares na área, conforme pode ser observado na Figura 2a. Pode-se verificar, também, que essa área ainda não estava desmatada, tendo em vista a homogeneidade da imagem e a ausência de contornos retos, os quais são característicos de processo de desmatamento. As maiores mudanças ocorreram na década de 1980, como pode ser observado na imagem colorida com resolução espacial de 30 m do sensor TM Landsat 5, do ano de 1985 (Figura 2b), na qual pode-se perceber que, embora boa parte estivesse preservada, havia passado por recente processo de queimada, preparo da área para pasto ou cultivo, o que era muito comum na época, sobretudo em áreas de cerrado ralo.

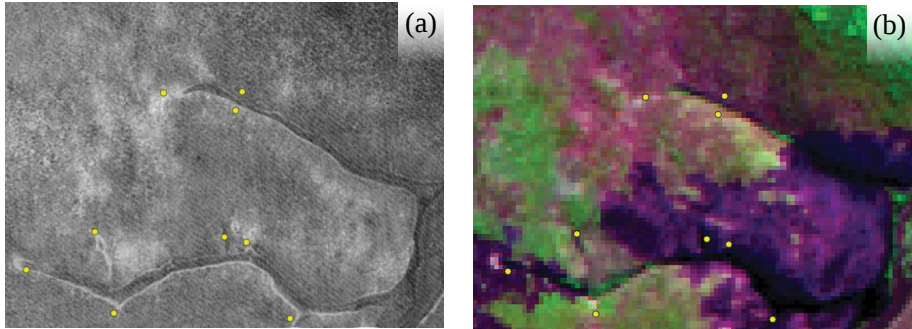


Figura 2. (a) Fotografia aérea de 1966 representando a ocorrência de poucas e pequenas erosões; (b) imagem TM Landsat 5 de 1985, da mesma área com queimadas.

Metodologia da pesquisa

No desenvolvimento do presente trabalho, buscou-se contemplar o segundo nível de abordagem proposto por Ab'Saber (1969), o qual corresponde à análise da estrutura superficial da paisagem. Nessa escala, procurou-se o entendimento dos padrões de distribuição espacial dos focos erosivos na presença de seus condicionantes (fatores do meio físico) na conformação de áreas homogêneas quanto às formações geológicas e respectivas litologias, ao relevo e seus padrões de dissecação e à ocorrência das diversas classes de solos e seus atributos texturais (BARBALHO, 2010; CASTRO; SALOMÃO, 2000; RIBEIRO; SALOMÃO, 2003; TRICART; KILIAN, 1979).

Para o reconhecimento e a delimitação dos Compartimentos Morfopedológicos (CMP) adotou-se a proposta de Castro e Salomão (2000), a qual recomenda proceder a aproximações sucessivas. Inicialmente, procedeu-se à análise da geologia e à distribuição das litologias predominantes, avaliando-se suas diversas resistências à ação dos processos de intemperismo e influência na esculturação do relevo. Posteriormente, associou-se à geologia as características do relevo, com destaque para a hipsometria, a declividade, bem como o estado da dissecação avaliada pela dimensão interfluvial e o grau de entalhamento dos canais de drenagem. Prosseguiu-se com a análise dos solos, levando-se em conta suas diferentes classes, assim como suas texturas, obtendo-se as unidades que exibem formas distintas e respectivos comportamentos. Uma síntese da metodologia encontra-se ilustrada na Figura 3.

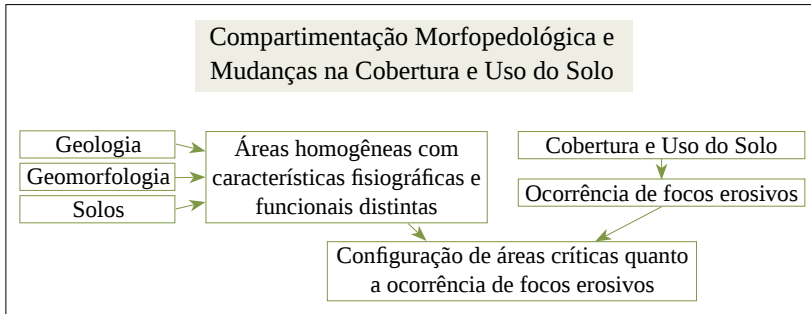


Figura 3. Síntese da metodologia para compartimentação morfológica e definição de áreas críticas.

Para avaliação das características geológicas da área, utilizou-se de vários produtos e respectivos relatórios disponíveis, bem como de técnicas de refinamento cartográfico, a fim de se obter um produto mais detalhado em termos de dados e informações, além de uma melhor precisão e acurácia. Entre eles, destacam-se os dados reconhecidos e levantados no âmbito do Projeto RADAMBRASIL, disponibilizados em recortes cartográficos na escala 1:1.000.000, mas produzidos com base na interpretação de imagens de radar na escala 1:250.000 (IANHEZ et al., 1983; NOVAES et al., 1983). Adicionalmente, foram utilizados os dados levantados por Marinho e Castro (2003), Martins (2000) e Resende (2003), que realizaram levantamentos mais detalhados de diversos setores da área, em especial a Alta Bacia do Rio Araguaia. Com a finalidade de melhorar o detalhamento e os limites entre as unidades geológicas, procedeu-se ao refinamento dos dados até então existentes com o uso do Modelo Digital de Elevação (MDE), com resolução espacial de 30 metros, proveniente do projeto TOPODATA-INPE (VALERIANO; ROSSETTI, 2008), a fim de reduzir as distorções do mapeamento causadas pelo menor detalhamento das imagens de radar disponíveis na década de 1980.

Para o mapeamento das classes de fitofisionomias da cobertura vegetal, foi aplicada a nomenclatura fitogeográfica proposta por Ribeiro e Walter (1998), ao passo que, para as classes de uso, buscou-se identificar as áreas de agricultura e, principalmente, pastagem e solo exposto. Para a interpretação das classes de fitofisionomias e de uso e ocupação do solo, foram utilizadas imagens do sensor TM do Satélite Landsat 5, com resolução espacial de 30 metros, todas correspondentes aos meses de junho ou julho, na composição colorida RGB

543. Já para o ano de 2014, optou-se por trabalhar com as imagens do sensor OLI, do satélite Landsat 8, também com resolução espacial de 30 metros, na composição colorida RGB 654.

Para a elaboração do mapa de solos com melhor nível de detalhamento, especialmente quanto ao número e aos limites das classes levantadas, obedeceu-se aos princípios gerais da pedometria: o primeiro passo foi reunir os materiais cartográficos e os respectivos relatórios já existentes em diversas escalas e atualizar a nomenclatura das classes mapeadas de acordo com o mais recente Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (SANTOS et al., 2013). Entre os mapeamentos existentes, destaca-se aquele realizado na década de 1980, no âmbito do Projeto RADAMBRASIL. Outro se refere ao levantamento realizado para o Plano Diretor da Bacia do Rio Paranaíba, originalmente na escala 1:250.000, que abrange toda a porção sul da área de estudos. Destacam-se, também, os trabalhos realizados por Barbalho (2002), Marinho e Castro (2003) e Resende (2003), os quais focaram o setor sul da Alta Bacia do Rio Araguaia na escala 1:100.000, cujas classes de solos contemplam até o terceiro nível categórico. Posteriormente, esses dados foram sobrepostos aos mapas de hipsometria, de declividade e de curvatura plana e do perfil das vertentes, elaborados com base no MDE, com resolução espacial de 30 metros, resultando em um reajuste dos limites das classes de solos constantes no mapa original por meio da observação das classes de declividade estabelecidas no SiBCS (SANTOS et al., 2013).

Em consequência desses procedimentos, houve um considerável ajuste dos limites de cada classe de solo identificada nos mapeamentos anteriormente citados com base nas variáveis morfométricas e morfográficas derivadas do referido MDE e dentro dos limites aceitáveis adaptados de Embrapa (1989) e Lacerda et al. (2008). O uso de produtos para observação indireta, como aqueles derivados de MDE e imagens diversas para essa finalidade, é bastante conhecido, e, com o uso de geotecnologia, atualmente tornou-se mais rápido e razoavelmente preciso, como consideraram Caten et al. (2009) e demonstraram Caten et al. (2011). Essa metodologia também foi testada por Silveira (2010), com bons resultados, especialmente quando comparou a classificação supervisionada - interpretação conjunta das variáveis morfométricas e morfográficas e validação em campo.

Por outro lado, dada a necessidade de obtenção de um produto cartográfico mais preciso e de melhor acurácia com o terreno, procedeu-se ao levantamento e à análise dos sistemas pedológicos, adotando para tanto a metodologia de Boulet (2001), que consiste na avaliação da ocorrência dos solos organizados em contínuo, partindo do topo dos interflúvios até a borda dos canais de drenagem, cujos horizontes tendem a acompanhar a topografia da vertente se estiverem relacionados com a evolução desta. Convém observar que alguns sistemas foram compilados de trabalhos anteriores na região acrescidos de novos levantamentos.

Os levantamentos foram realizados ao longo de topossequências que seguem a seção longitudinal perpendicular às curvas de nível do topo à base dos interflúvios. Ao longo destas, procedeu-se à abertura de trincheiras e, entre elas, de sondagens a trado a fim de confirmar e evidenciar a continuidade ou a variação na distribuição dos horizontes detectados na descrição da trincheira. Quando da detecção de mudanças, outra trincheira foi aberta a fim de melhor identificar e reconstituir a geometria e a distribuição dos horizontes dos solos. Todo o levantamento pedológico foi devidamente georreferenciado; as descrições morfológicas dos perfis de solos e a coleta de amostras seguiram as recomendações de Santos et al. (2005), e a representação gráfica do perfil topográfico, tendo abaixo os horizontes dos solos, utilizou de três escalas: duas topográficas usuais (X,Y) e uma para o solo (S), com exageros verticais de até cinco vezes a escala horizontal para os primeiros e de até dez vezes a escala vertical para o solo (BARROS, 1986; BARROS et al., 1983; RUELLAN, 2005; RUELLAN; DOSSO, 1993).

O processo de interpretação e mapeamento das feições erosivas lineares foi realizado em duas etapas. A primeira consistiu na identificação e localização precisa dos focos erosivos lineares por meio da varredura e avaliação de imagens do satélite *GeosEye* coloridas e com resolução espacial de 0,5 m, sendo uma menor parte referente ao segundo semestre de 2011 e outra, maior, ao primeiro semestre de 2012. Com a finalidade de garantir uma padronização do processo de visualização e interpretação das imagens para as diversas partes da área, esta foi dividida em uma malha com retângulos de dimensões de 3 x 4 km, o que permitiu que toda a região fosse visualizada numa mesma escala e no nível de detalhamento proporcionado pela resolução da imagem. A segunda etapa

consistiu na inspeção visual da continuidade de ocorrência das feições erosivas por meio de imagens do satélite Landsat 8 pancromáticas, com resolução espacial de 15 metros, referentes ao mês de julho de 2014. Nessa etapa, é importante ressaltar que, embora se tenha fortes evidências do crescimento de muitos focos erosivos no intervalo entre 2012 e 2014, o mapeamento em polígono continuou sendo aquele realizado com base nas imagens coloridas e com resolução espacial de 0,5 metros, pois o uso de imagens com resolução de 15 metros no mapeamento de algumas feições erosivas, especialmente aquelas com área inferior a 0,5 ha, ficaria prejudicado. Em relação à interpretação e à identificação das feições erosivas assim executadas, alguns aspectos importantes devem ser considerados a fim de que a existência da erosão seja confirmada. O primeiro diz respeito à projeção de sombra das laterais no fundo da feição erosiva. Outro aspecto refere-se às bordas íngremes, evidenciando que há uma quebra na forma de talude separando a superfície intacta da superfície erodida. Um terceiro diz respeito à aparência linear da referida feição, uma vez que a mesma decorre do processo de convergência do escoamento superficial ou fluxo. O quarto aspecto diz respeito ao fundo achatado e por vezes com coloração esbranquiçada devido à presença de areia. No geral, uma feição erosiva, especialmente linear, tende a apresentar aspecto contrastado, evidenciando uma rápida diferenciação com o entorno devido à degradação. Essa análise, bem como a comprovação da permanência de várias feições erosivas, é ilustrada na Figura 4.

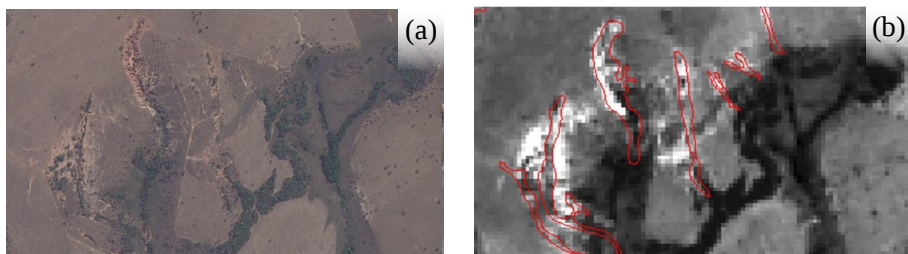


Figura 4. (a) Feições erosivas observadas em imagens *Geoeye* de 0,5 m, de 2012; e (b) permanência comprovada em 2014, com base em imagens *Landsat* de 15 m.

Após essa etapa, os CMPs foram, de início, correlacionados espacialmente ao mapa dos focos erosivos lineares e, posteriormente, ao mapa de cobertura e uso do solo, construindo-se a matriz de correlação espacial que permitiu

detectar os CMPs mais afetados pelos processos erosivos e as respectivas variáveis condicionantes (rochas, solos, relevo) em média escala.

Os compartimentos morfopedológicos

Foram definidos sete Compartimentos Morfopedológicos (CMP) na área de pesquisa, cuja nomenclatura foi estabelecida levando-se em conta a posição geográfica de cada um, tendo como referência espacial a porção central da área de pesquisa. A Figura 5 apresenta os mapas de solos (a) e de compartimentos morfopedológicos (b) associados ao modelo de sombreado do terreno.

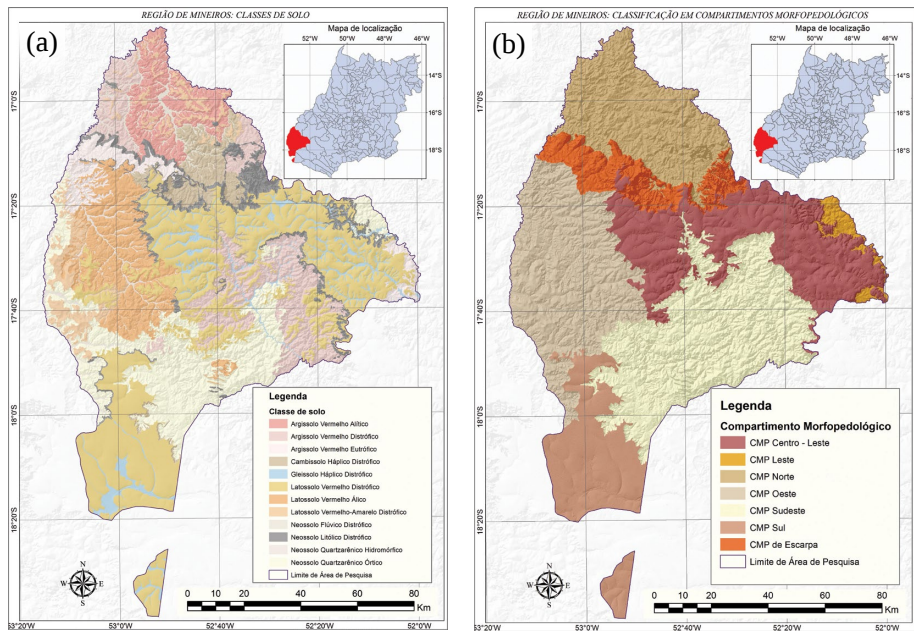


Figura 5. Mapas de solos (a) e de compartimentos morfopedológicos (b) elaborados para o Município de Mineiros e arredores.

A interpretação da Geologia, da Geomorfologia e da Pedologia na definição de unidades fisiográficas e funcionais distintas resultou, em alguns casos, em CMPs com características semelhantes. Mas, considerando o estágio de dissecação e a morfodinâmica de cada um, foi possível constatar aspectos que permitiram diferenciá-los. Tendo em vista o objetivo deste trabalho, destacam-

se os CMPs Centro-Leste e Sul, os quais ocorrem quase que totalmente sobre a Formação Cachoeirinha, a qual é composta por argilitos, arenitos e depósitos de areia, com o predomínio de Latossolo Vermelho argiloso nas porções mais elevadas e planas e de Gleissolo Háplico argiloso a muito argiloso nas porções de baixadas, com baixo declive e que acompanham os poucos canais de drenagem que ocorrem na área.

O CMP Centro-Leste corresponde ao compartimento mais elevado (779 a 1009 metros), com declividades de até 5% e superfícies retilíneas, podendo chegar a 8% em segmentos de convexidade mais pronunciada. O elevado gradiente altimétrico, associado ao contato com litologias mais friáveis, tais como arenitos eólicos da Formação Botucatu, implica em frequentes movimentos de massa, configurando Zonas de Erosão Recuante. Já o CMP Sul, de formas retilíneas e mais preservado, encontra-se em altitude menor (776 a 894 metros) e com declividades de, no máximo, 5%. Nesses CMPs, a topossequência estudada revelou a presença de Latossolo Vermelho no topo, Latossolo Vermelho-Amarelo no terço superior, Argissolo Vermelho-Amarelo no terço médio, Neossolo Quartzarênico no terço inferior e Gleissolo Háplico no fundo de vale. Contudo, essa área não revelou presença expressiva de focos erosivos e nem de solos frágeis.

Outra situação envolve os CMPs Oeste e Sudeste, os quais se desenvolvem sobre os arenitos eólicos do Grupo São Bento/Formação Botucatu. A dissecação do CMP Sudeste se desenvolve no mesmo sentido do caimento topográfico e litológico (N-S), que, associado a uma maior incisão dos canais principais, proporciona elevado gradiente altimétrico. Nas superfícies mais elevadas e preservadas, com declividades de até 8%, predomina o Latossolo Vermelho Distrófico de textura média. Em superfícies mais rebaixadas, de maior dissecação e com declives em torno de 16% predomina o Argissolo Vermelho Distrófico de textura média. Já nas porções mais rebaixadas, que abrangem grande parte da área, o predomínio é de solos arenosos da classe dos Neossolos Quartzarênicos. A Figura 6 ilustra a topossequência do CMP Sudeste, onde há grande concentração de focos erosivos e predomínio desses solos.

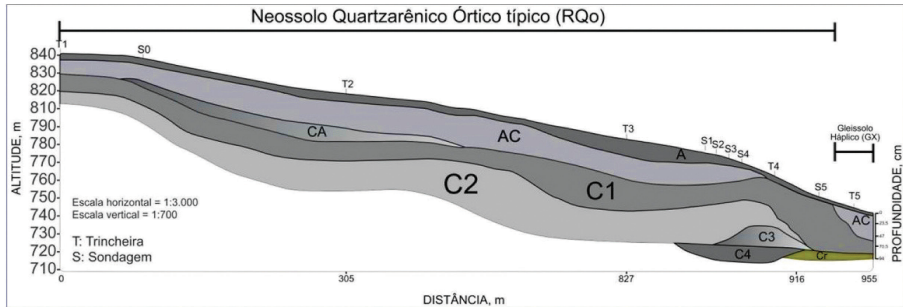


Figura 6. Toposequência com o sistema pedológico representativo do CMP Sudeste.

Fonte: Sousa et al. (2015).

Na Figura 6, pode-se observar que, no topo do interflúvio, com declive de até 3%, tem-se o horizonte A com espessura variando de +0 a 10 cm. Em campo, constatou-se a cor 5YR 4/4 (Bruno avermelhado), textura arenosa e estrutura maciça. Esse horizonte se estende por toda a vertente, com aumento de espessura no terço médio (T3) e voltando a ser menos espesso na porção final da vertente (T4 e T5). Em seguida, tem-se o horizonte AC com profundidade entre 10 e 54 cm, que, em campo, apresentou cor 2,5YR 4/4 (vermelho), textura arenosa e estrutura maciça, que se estende até o terço inferior (T4). Entre a sondagem S0 e a Trincheira 2 (T2), surge o horizonte CA, com profundidade entre 50 e 69 cm, cor 5YR 5/8 (vermelho-amarelo), textura arenosa e estrutura maciça e coerente. Em profundidade, segue-se o horizonte C1, variando de 69 a 93 cm, com cor 2,5 YR 4/8 (vermelho), textura arenosa, estrutura maciça e coerente, que se estende do topo do interflúvio até próximo ao canal de drenagem. Abaixo de 93 cm, o C2 aparece com cor 2,5 YR 5/8, um pouco mais claro que o anterior, com textura arenosa e estrutura maciça e coerente. Esse horizonte ocorre até a T4, quando tem início o horizonte CR (rocha alterada ou saprolito).

Essa toposequência não só revela a presença de solos frágeis, mas também de uma sucessão lateral que compõe um sistema pedológico igualmente frágil. Ressalta-se, ainda, a surgência do lençol freático a jusante em decorrência do arenito inalterado a pouca profundidade nas porções mais baixas das vertentes. Assim, nessa zona dá-se a convergência entre os fluxos superficiais e subsuperficiais, frequentemente potencializada pelo pisoteio do gado, resultando na instalação de focos erosivos, os quais apresentam área de até

25,2 ha, tornando esse compartimento o mais comprometido na concentração e, principalmente, na dimensão dos focos.

Já a dissecação do CMP Oeste se desenvolve no sentido contrário ao caimento topográfico e litológico que se encontra no sentido N-S. Nas porções mais elevadas e preservadas, predominam declividades variando de 0 a 8% em interflúvios amplos e de bordas convexas, com o predomínio de Latossolo Vermelho de textura média nas porções mais elevadas. Entretanto, na maior parte desse CMP, o predomínio é de Neossolo Quartzarênico Órtico de textura arenosa fina, muito porosa, friável, de coloração acinzentada na superfície e Bruno amarelado, Bruno forte e vermelho-amarelado em profundidade. Nas porções mais rebaixadas, ao longo dos canais de baixo gradiente altimétrico, dominam os Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos de textura arenosa ou, por vezes, Gleissolos Háplicos de textura argilosa associados a declividades que variam de 0 a 3%. A ocorrência de solos arenosos e hidromórficos próximos aos canais de drenagem, associados ao uso por pastagens e submetidos ao pisoteio do gado tem se mostrado muito propícia à ocorrência de focos erosivos lineares de grandes dimensões, que tendem a surgir nos sopés das vertentes e a remontá-las até chegar, por vezes, às porções mais elevadas, resultando em erosões com área de contribuição de até 18,5 ha.

Uma topossequência com o sistema pedológico representativo do CMP Oeste foi estudada por Marinho et al. (2006) e é apresentada na Figura 7. De certo modo, essa topossequência é similar à anterior.

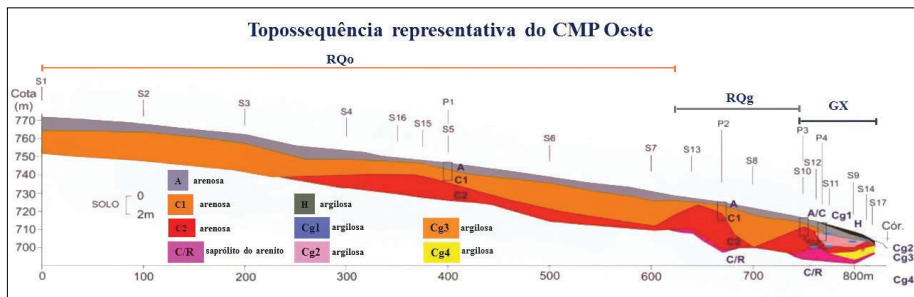


Figura 7. Topossequência com o sistema pedológico representativo do CMP Oeste.

Fonte: adaptado de Marinho et al. (2006).

A maior diferença entre as duas toposequências reside no fato de que, nesta última, o Neossolo Quartzarênico hidromórfico já ocorre em posição um pouco mais alta na vertente e o horizonte C mantém a mesma litoestrutura cruzada do arenito eólico (projeção em cunhas das dunas no terço inferior), enquanto o Neossolo Quartzarênico hidromórfico (Figura 6) ocorre em uma faixa ainda bem estreita antes do Gleissolo, coroando-o, e a geometria dos horizontes mais superficiais revela a possibilidade de serem produto de coluvionamento, dado o seu aspecto lenticular, indicando que o sistema representado na Figura 7 é pedogeneticamente mais evoluído do que aquele da Figura 6, sem aparentes coluvionamentos.

O CMP Norte corresponde ao terceiro mais suscetível a processos erosivos, embora de menor porte. Para as partes mais elevadas, as declividades variam de 0 a 8%, associadas ao topo de interflúvios amplos de bordas convexizadas com a ocorrência de Latossolo Vermelho Amarelo de textura média, onde é muito frequente a ocorrência de focos erosivos com até 2 ha. Em seguida, ocorrem setores das vertentes mais alongados, com declividades que variam de 5 a 12% e voltando a 5% já quase no final da vertente, com a ocorrência de Argissolo Vermelho de textura média. Em decorrência do rebaixamento quase por igual da superfície, ao longo dos rios principais ocorrem extensas planícies de inundação, de baixo gradiente fluvial, com larguras de até 925 metros e declividades que não ultrapassam os 3%, sendo muito comum a ocorrência de Neossolo Flúvico de textura média.

O CMP de Escarpa compreende uma pronunciada zona de transição de elevado desnível altimétrico, configurando um leve arco que se posiciona da porção central ao norte da área, separando o CMP Norte e o CMP Centro-Leste. Envolve, pelo menos, quatro formações geológicas, as quais resultam em erosão diferenciada, compreendendo uma variação total de 400 metros de gradiente distribuídos em cinco patamares altimétricos. Quando apoiada em uma só formação, a declividade varia de 0 a 8% nas porções mais elevadas no reverso do planalto, formando vertentes de topos convexos com a ocorrência de Latossolo Vermelho de textura média e em declives mais acentuados formando Cambissolo Háplico de textura média. Passando por desníveis e em posições mais rebaixadas, a declividade volta a variar de 0 a 5%, com a ocorrência de Argissolo Vermelho de textura argilosa a média. Finalmente, quando se aproxima da superfície mais rebaixada, a declividade alcança seu valor máximo para a área – 19% –, com a predominância de Neossolo Litólico, perfazendo uma linha de escarpa.

No CMP Leste, em sua porção mais rebaixada, ocorrem arenitos vermelhos, folhelhos e siltitos pertencentes ao Grupo Itararé e à Formação Aquidauana. Nas porções mais elevadas dos interflúvios, ocorrem declividades que variam de 0 a 5%, com predomínio de Neossolo Quartzarênico Órtico, seguido de um aumento para 12% nas porções intermediárias, com convexidades já bem acentuadas e, por vezes, seguidas por pequenas escarpas erosivas, nas quais predomina Neossolo Litólico de textura cascalhenta. Ao longo dos canais principais com baixo gradiente, predomina o Neossolo Flúvico de textura média.

A Tabela 1 traz uma síntese das características ambientais de cada um dos sete compartimentos morfopedológicos.

Verifica-se que os CMPs Oeste e Sudeste apresentam solos frágeis – os Neossolos Quartzarênicos Órticos – dispostos em sistemas pedológicos também frágeis em seu conjunto, constituídos por uma sucessão lateral destes, seguidos pelos Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos, a partir dos quais se dá a convergência de fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais, inclusive com o lençol freático raso, potencializando a erosão hídrica linear remontante. Consequentemente, correspondem aos CMPs concentradores de focos erosivos lineares, como se verá a seguir.

Tabela 1. Compartimentos Morfopedológicos e síntese de suas respectivas características geológicas, geomorfológicas, pedológicas, cobertura e uso do solo e processos erosivos.

CMP / Características	Geologia: Formação e Litologia	Altitude m	Declividade %	Comprimento de luxo (m)	Forma da vertente
CMP Centro-Leste	Formação Cachoeirinha: argilitos, siltitos e areia	779 a 1009	5 a 8 para os menores; 0 a 5 para os maiores.	0 a 218 para os menores; 218 a 393 para os maiores.	Retilínea a Côncava.
CMP Leste	Grupo Passa Dois / Formação Irati: arenitos, folhelhos e siltitos	705 a 861	5 a 8 para os menores; 3 a 8 para os maiores.	0 a 218 para os menores; 87 a 393 para os maiores.	Convexa a Retilínea para os menores; Retilínea a Côncava para os maiores.
CMP Norte	Formação Aquidauana: diamictitos, folhelhos, arenitos, siltitos	414 a 570	5 a 12 para os menores; 5 a 8 para os maiores.	0 a 393 para os menores; 0 a 218 para os maiores.	Convexa a Retilínea para os maiores; Retilínea a Côncava para os menores.
CMP Oeste	Grupo São Bento / Formação Botucatu: arenitos eólicos	615 a 943	3 a 12 para os menores; 3 a 8 para os maiores.	0 a 393 para os menores; 0 a 638 para os maiores.	Convexa a Retilínea para os menores; Retilínea a Côncava para os maiores.
CMP Sudeste	Grupo São Bento / Formação Botucatu: arenitos eólicos	614 a 892	0 a 12, principalmente para os maiores.	0 a 393 para os menores; 0 a 638 para os maiores.	Convexa a Retilínea para os menores; Retilínea a Côncava para os maiores.
CMP Sul	Formação Cachoeirinha: argilitos, arenitos e areia	772 a 902	5 a 8, todos menores.	87 a 393, todos menores.	Retilínea a Côncava.
CMP Escarpa	Várias formações geológicas escalonadas	532 a 896	5 a 12 para todos.	0 a 393 para os menores; 0 a 638 para os maiores.	Convexa a Retilínea e Retilínea a Côncava.

Continua..

Tabela 1. Continuação.

CMP / Características	Geologia: Formação e Litologia	Solos predominantes	Cobertura e Uso	Concentração de focos / Km ²	Dimensão dos focos (ha)
CMP Centro-Leste	Formação Cachoeirinha: argilitos, siltitos e areia	LVd e GXd de textura argilosa a muito argilosa.	Soja, milho, algodão e cana-de-açúcar.	0,2	Até 2
CMP Leste	Grupo Passa Dois / Formação Irati: arenitos, folhelhos e siltitos	RQo de textura arenosa.	Pastagem e solo exposto.	0,5	Até 5
CMP Norte	Formação Aquidauana: diamictitos, folhelhos, arenitos, siltitos	LVAd e PVd, ambos de textura média; RYd de textura arenosa.	Pastagem e solo exposto.	2,46	Até 2
CMP Oeste	Grupo São Bento / Formação Botucatu: arenitos eólicos	LVd de textura média; RQo e RQg, ambos de textura arenosa; e GX de textura argilosa.	Pastagem e solo exposto.	1,5	Até 18,3
CMP Sudeste	Grupo São Bento / Formação Botucatu: arenitos eólicos	PVd de textura média; RQo e RQg de textura arenosa; e GXd de textura argilosa.	Pastagem, solo exposto e remanescentes de Cerrado.	2,46	Até 25,2
CMP Sul	Formação Cachoeirinha: argilitos, arenitos e areia				
CMP Escarpa	Várias formações geológicas escalonadas				
Área total: 1200235,00 ha		Número de focos: 5678			

Legenda da tabela: LVd = Latossolo Vermelho Distrófico; GXd = Gleissolo Háplico Distrófico; RQo = Neossolo Quartzarênico Ótrico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico; RYd = Neossolo Flúvico Distrófico; RQg = Neossolo Quartzarênico Hidromórfico; RLd = Neossolo Litólico Distrófico; CXd = Cambissolo Háplico Distrófico.

Erosão nos compartimentos morfopedológicos

Foram identificados e mapeados 5.678 focos erosivos visíveis na escala de ultradetalhe, com auxílio do *Google Earth*, os quais compreendem desde pequenas ravinas até voçorocas de grande porte, com área de contribuição podendo chegar a 25,2 ha. A dimensão do impacto causado pela erosão hídrica linear na área pode ser percebida pelos 2.658,24 ha de área atingida por erosões, que contribuem diretamente na degradação dos solos e no assoreamento de canais fluviais. Do total de focos, 77% possuem área afetada entre 0,0005 e 0,5 ha, respondendo por cerca de 30% da superfície erodida. Partindo para erosões maiores que 0,5 ha, ocorre uma inversão nessa relação, de forma que os focos da ordem de 2 a 5 ha, embora em menor número, tendem a causar grande impacto.

Do total de focos erosivos, os compartimentos Centro-Leste, Sul, Leste e Escarpa, ainda que juntos somem 39,4% da área da pesquisa, comportam apenas 9,25% do total de focos e 7% da área de contribuição erosiva. Logo, considerando a área como um todo, entende-se que as áreas mais ativas, tanto da ocorrência de focos como de área de contribuição, encontram-se nos CMPs Norte, Oeste e Sudeste. Observando a Figura 8, percebe-se que o CMP Norte responde por mais de 33% do total de focos, ao passo que o CMP Oeste responde por 28,69% de toda a área atingida por erosão linear. Já o CMP Sudeste é um caso que desperta mais a atenção, pois o mesmo não somente concentra grande parte dos focos – 37,81% do total –, como também compreende 43,88% de toda a área de contribuição erosiva. A Figura 8 representa a distribuição constatada.

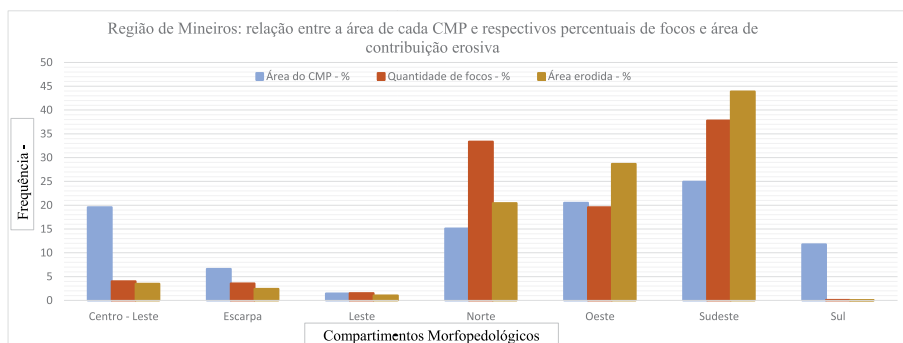


Figura 8. Relação (%) entre a área de cada compartimento morfopedológico, a quantidade de focos erosivos e a área de contribuição erosiva.

Uma visão conjunta da distribuição relativa do número de focos, bem como da área de contribuição erosiva em cada classe de erosão e para cada compartimento morfopedológico é apresentada na Figura 9.

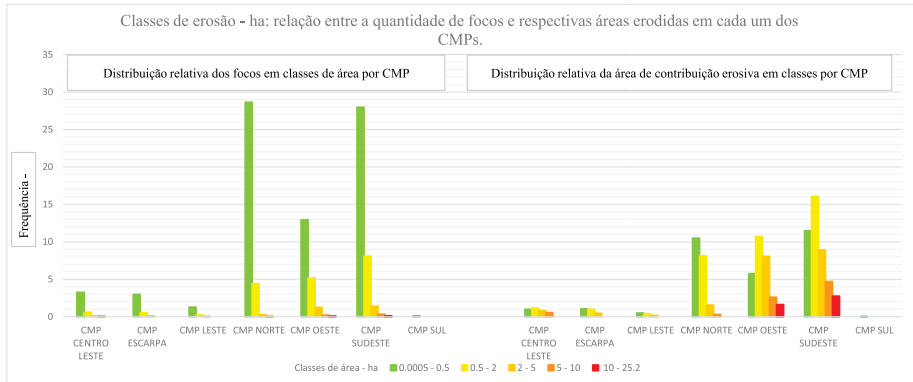


Figura 9. Relação entre a quantidade de focos e a área de contribuição erosiva em cada compartimento morfopedológico.

O efeito dos dados apresentados pode ser visualizado na Figura 10, na qual é notável a concentração ou, ainda, o número de focos a cada km² e o impacto causado, principalmente, pelos grandes focos nos três compartimentos morfopedológicos mais afetados. Nestes, o elevado percentual de ocorrência de focos, de área de contribuição ou da associação desses dois aspectos evidencia a ocorrência de áreas críticas.

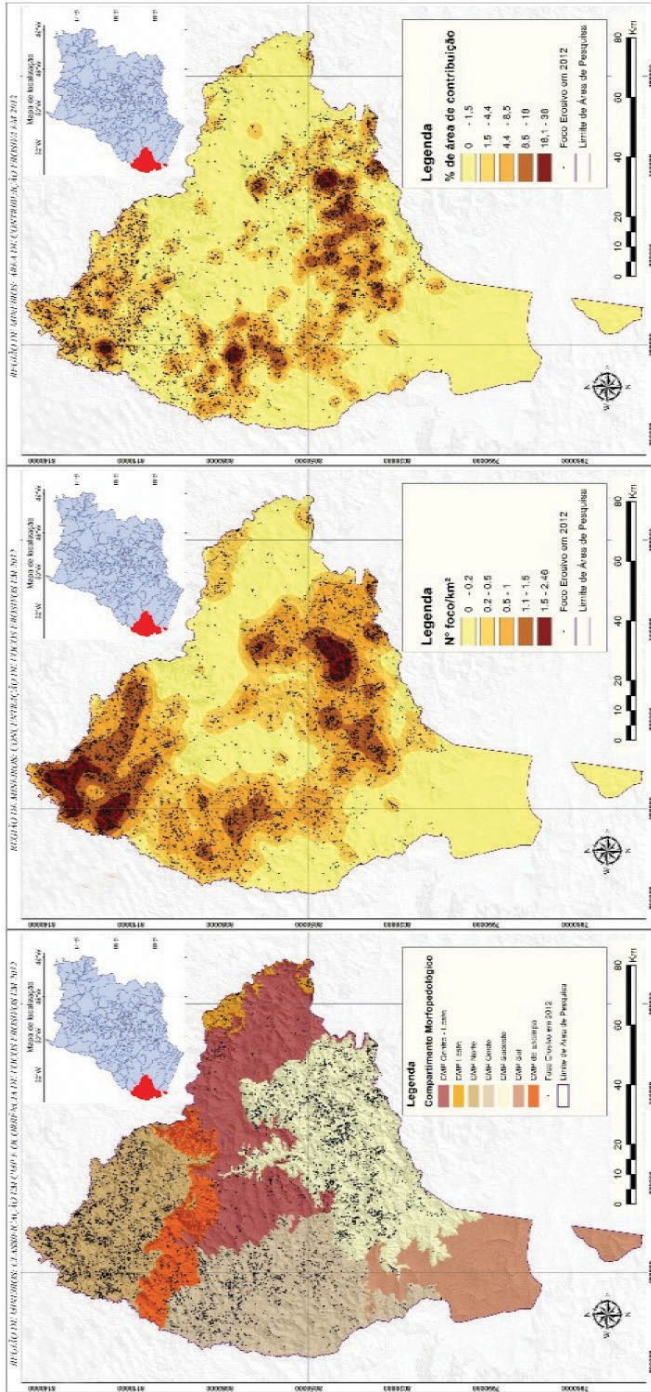


Figura 10. (a) Mapa de compartimentos morfopedológicos da concentração; (b) mapa da densidade de focos erosivos; e (c) mapa de área de contribuição erosiva.

Em número de ocorrências, bem como de concentração, os focos erosivos revelam estreita relação com a compartimentação morfopedológica proposta para a área. Sem ainda levar em conta as características morfométricas e morfográficas da área, e, principalmente, as condições de cobertura e uso do solo, percebe-se que os compartimentos Norte, Oeste e Sudeste se mostram mais suscetíveis à ocorrência de focos erosivos. A associação dos mapas de concentração de focos e de área de contribuição erosiva permite perceber uma distribuição espacial mais completa do impacto causado pelos focos erosivos, sejam eles de pequena ou grande dimensão.

Dessa forma, é possível perceber que ocorre, no CMP Norte, uma elevada concentração de focos distribuídos por quase todo o compartimento. Entretanto, sua degradação é menos intensa se comparada aos CMPs mais afetados (Sudeste e Oeste). Nesse mesmo CMP, tendo em vista que a maior parte dos focos possui área menor do que 2 ha, as áreas críticas correspondem àquelas cuja ocorrência varia de 1 a 1,5 foco a cada km². Isso porque esse padrão de concentração tende a ser correlativo a um percentual de até 8,5% de área totalmente degradada por erosão. Ocorrem, ainda, áreas nas quais a concentração de focos chega a ser de até 2,48 focos por km². Entretanto, o elevado percentual de área totalmente degradada só se confirma em três áreas situadas a norte e a noroeste do compartimento, onde o percentual de área totalmente comprometida atinge 18%.

Para o CMP Oeste, a concentração de focos da ordem de 1 a 1,5 foco por km² ocorre em três áreas de forma mais isolada, se comparadas àquelas do CMP Norte. Entretanto, pelo fato de este CMP possuir mais focos com área variando de 2 a 5 ha e de 5 a 10 ha, as áreas críticas são formadas por concentrações da ordem de 0,5 a 1 foco por km², o que permite identificar cinco áreas, sendo duas mais alongadas e alargadas, que resultam em até 18% de área totalmente comprometida. Destaca-se, ainda, que, em áreas com concentração de até 2,48 focos por km², o comprometimento total atinge 36%. Portanto, a elevada ocorrência e a concentração de focos com área superior a 2 ha se mostram determinantes para um estágio de degradação mais avançado.

Já em relação ao CMP Sudeste, a concentração de focos é da ordem de 1 a 1,5 foco por km² e ocorre em pelo menos sete áreas, que se mostram mais

abrangentes se comparadas àquelas do CMP Oeste. Ocorrem pelo menos 13 áreas críticas com até 18% de comprometimento, que resultam de concentrações que variam de 1 a 1,5 foco por km². Portanto, trata-se de um compartimento marcado pela elevada ocorrência e concentração de focos, com área variando de 2 a 5 e de 5 a 10 ha, o que lhe confere o mais elevado estágio de degradação encontrado em toda a região de pesquisa. Essa é a razão pela qual vários outros autores desenvolveram trabalhos nessa área, entre eles Sousa et al. (2015) e Ucker (2015), este último com artigo publicado nesta coletânea.

Em relação às mudanças na cobertura e no uso do solo em cada CMP e sua influência na ocorrência e na distribuição de processos erosivos, a Figura 11 permite duas importantes deduções: a primeira ressalta o predomínio de agricultura e solo exposto no CMP Centro-Leste, ao passo que no CMP Sul, mais preservado, além de agricultura predomina o campo sujo. Já nos demais compartimentos, especialmente o Sudeste, predomina o uso por pastagem e, por vezes, solo exposto, ao passo que a agricultura e as fitofisionomias ocorrem em uma proporção bem menor e, em geral, associada aos Latossolos dos topos maiores.

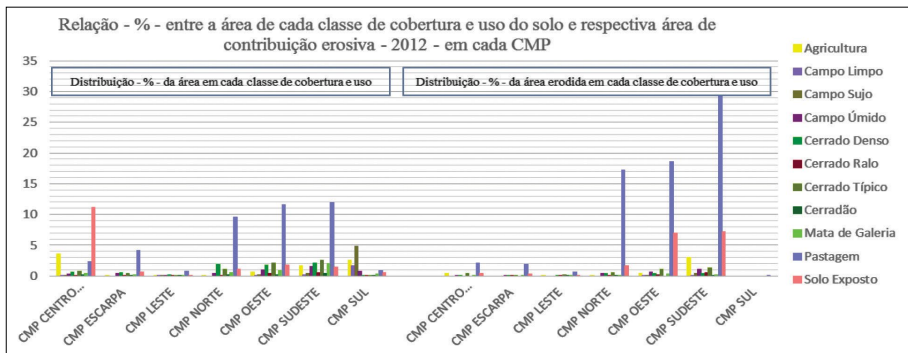


Figura 11. Relação entre a área de cada classe de cobertura e uso do solo e a área de contribuição erosiva em cada CMP em 2012.

Portanto, percebe-se que as feições erosivas se localizam, quase que totalmente, nos CMPs Norte, Oeste e Sudeste, sendo mais importantes nestes dois últimos, e estão associadas ao uso por pastagem e, em menor parte, solo exposto. Some-se a isso o fato de os solos e sistemas pedológicos serem dominados por Neossolos Quartzarênicos.

Considerações finais

A correlação espacial dos mapas de geologia, geomorfologia e de solos, ressaltando a variação espacial das características de cada um, permitiu a elaboração do mapa de unidades ambientais com características fisiográficas e funcionais distintas. Dos sete compartimentos morfopedológicos propostos para a área, todos apresentam comportamento erosivo característico dos condicionantes geológicos, geomorfológicos e pedológicos em face dos tipos de uso e ocupação. Tal comportamento se mostrou mais evidente quando da análise de cada compartimento morfopedológico por meio da sucessão lateral de solos em contínuo ao longo da vertente. Essa situação implica na convergência de fluxos superficiais e subsuperficiais condicionada, por vezes, pelo substrato geológico aflorante próximo aos canais de drenagem, resultando no surgimento e na evolução de erosões remontantes.

Nesse sentido, três compartimentos morfopedológicos se revelaram como principais em termos de concentração de focos erosivos hídricos lineares associados aos solos frágeis e potencializados pelo uso: o Norte, o Oeste e, principalmente, o Sudeste.

O CMP Norte, desenvolvido sobre o Grupo Aquidauana, é composto por arenitos vermelhos e siltitos, por vezes cortados por diques e soleiras de diabásio, e também apresenta formas indicadoras de um estágio avançado de dissecação, porém, menor que o anterior e denunciado, principalmente, pela tendência de rebaixamento geral da superfície geomórfica. A ocorrência de vertentes com Latossolos Vermelho-Amarelos nos topos seguidos de Argissolos Vermelhos de textura média e uso por pastagens mostrou elevada fragilidade, ainda que menor do que nos solos do CMP Sudeste, devido à formação de lençóis suspensos acima do horizonte B dos Argissolos que, a jusante, podem exfiltrar e promover voçorocamento, fato comprovado pela ocorrência de um elevado número de focos erosivos hídricos lineares, ainda que de pequenas dimensões.

O CMP Oeste ocorre sobre arenitos eólicos da Formação Botucatu, sendo que, para algumas áreas, a fraca dissecação ainda condiciona a ocorrência de Latossolo Vermelho de textura média associado a interflúvios mais preservados e de bordas com convexidade crescente. Em outras áreas, a dissecação mais pronunciada proporcionou a exposição de arenitos eólicos com a ocorrência

de Neossolos Quartzarênicos Órticos, que são seguidos por Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos, ambos de textura arenosa e que passam a Gleissolos Háplicos, para os quais a maior proximidade com o lençol freático condiciona a surgência do lençol freático. Em face do uso por pastagens, são ambientes propícios ao surgimento e à evolução de focos erosivos para as porções mais elevadas e convexizadas das vertentes, o que, por vezes, resulta em elevada área de contribuição erosiva.

O CMP Sudeste, assentado sobre os arenitos da Formação Botucatu, orientado no sentido do caimento topográfico e litológico e amplamente dominado por Neossolos Quartzarênicos Órticos, sucedidos lateralmente pelos Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos, considerados frágeis, se revelou como o compartimento no qual o estágio de dissecação é o mais avançado da área e onde o uso por pastagens mal manejadas potencializa sua fragilidade, fato corroborado pela ocorrência de focos erosivos de grandes dimensões em que os fluxos hídricos superficiais se unem aos subsuperficiais e ao afloramento do nível freático a jusante, promovendo intenso voçorocamento remontante e acelerado.

Em síntese, é importante destacar que um determinado compartimento pode, muitas vezes, representar estágios diferentes de um mesmo processo que afeta os demais, desde que mantidas as variáveis solo, relevo associado, e uso e manejo. Nesse sentido, para o Município de Mineiros e arredores, os Neossolos Quartzarênicos Órticos e Hidromórficos, compondo sistemas pedológicos em colinas amplas cobertas por pastos, se revelaram a formação do sistema mais vulnerável à erosão hídrica linear, fato corroborado pela elevada concentração de focos erosivos, sobretudo de médio a grande porte.

A dinâmica do fenômeno foi interpretada há cerca de uma década através de monitoramento piezométrico, pluviométrico e pluviográfico, os quais indicaram a convergência de fluxos superficiais, subsuperficiais e de afloramento do nível freático a jusante, onde domina o Neossolo Quartzarênico Hidromórfico seguido pelo Gleissolo Háplico. As vertentes, apesar de possuírem topo com declives suaves e pouco convexos, são longas e tendem a apresentar convexidade crescente até os segmentos intermediários, quando se tornam retilíneas. A partir desse segmento, e nas áreas mais rebaixadas, apresentam concavidade associada à ocorrência de solos hidromórficos em locais de lençol freático aflorante. O uso

por pastagens extensivas e mal manejadas tem se mostrado determinante para o surgimento de focos erosivos com comportamento remontante, que, por vezes, resultam em grandes voçorocas. Portanto, o comportamento físico-hídrico da associação de solos, desde o topo até os canais de drenagem, evidencia a fragilidade dos solos e, conseqüentemente, dos CMPs Oeste e Sudeste. Isso se deve às características intrínsecas dos sistemas pedológicos que se mostram pouco resilientes aos tipos de uso e manejo inadequados.

Referências

AB'SABER, A. N. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 18, 1969.

BARBALHO, M. G. da S. **Morfopedologia aplicada ao diagnóstico e diretrizes para o controle dos processos erosivos lineares na Alta Bacia do Rio Araguaia (GO/MT)**. 2002. 146 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

_____. **Processos erosivos lineares nas bacias dos rios Claro e dos Bois, afluentes do Rio Araguaia no Estado de Goiás: relações com a cobertura vegetal e o uso da terra**. 2010. 194 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

BARBALHO, M. G. S.; CASTRO, S. S. Morfologia aplicada ao diagnóstico e diretrizes para o controle dos processos erosivos lineares na Alta Bacia do Rio Araguaia (GO/MT). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 4., 2002, São Luís. **Anais...** São Luís: UFMA, 2002. p. 14-15.

BARBALHO, M. G. S.; CASTRO, S. S. de; CAMPOS, A.; MEDEIROS, C. M. de B. Morfologia do relevo e ocorrências erosivas lineares na Alta Bacia do Rio Araguaia (GO/MT). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UERJ, 2003. p. 202-203.

BARBOSA, A. S.; GOMES, H.; TEIXEIRA NETO, A. **Geografia: Goiás-Tocantins**. 2. ed. Goiânia: UFG, 2004. 268 p.

BARROS, O. N. F. Procedimento de campo e gabinete no levantamento de topossequências. **Boletim Paulista de Geografia**, São Paulo, v. 63, n. 1, p. 5-12, 1986.

BARROS, O. N. F.; CASTRO, S. S.; MANFREDINI, S.; PELLERIN, J.; TOLEDO, G. S.; QUEIROZ NETO, J. P. de. Caracterização e representação de volumes pedológicos em Marília -

SP. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 2, p. 73-80, 1983.

BOULET, R. **Relatório de consultoria referente à primeira fase dos estudos realizados para a recuperação da voçoroca Chitolina, Município de Mineiros - GO**. Jaguariúna: Fundação EMAS, 2001. 34 p.

CASTRO, S. S. Erosão hídrica na Alta Bacia do Rio Araguaia: distribuição, condicionantes, origem e dinâmica atual. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 17, p. 38-60, 2005.

CASTRO, S. S. de; CAMPOS, A. B. de; OLIVEIRA, C. J.; SILVA, A. A. The upper Araguaia Basin and the effects of human-induced erosion. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 19, n. 1, p. 128-139, 1999.

CASTRO, S. S. de; QUEIROZ NETO, J. P. de. Soil erosion in Brazil, from coffee to the present-day soy bean production. In: SHRODER, J. F.; LATRUBESSE, E. M. (Ed.). **Natural hazards and human-exacerbated disasters in Latin America**. Amsterdam: Elsevier, 2009. p. 195-221. (Developments in Earth surface processes, v. 13).

CASTRO, S. S. de; SALOMÃO, F. X. de T. Compartimentação morfopedológica e sua aplicação: considerações metodológicas. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 7, p. 27-37, 2000.

CASTRO, S. S.; XAVIER, L. S.; BARBALHO, M. G. S. **Atlas geoambiental das nascentes dos rios Araguaia e Araguaíha**: condicionantes dos processos erosivos lineares. Goiânia: SEMARH-GO, 2004. 76 p.

CATEN, A. ten; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. Regressões logísticas múltiplas: fatores que influenciam sua aplicação na predição de classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 53-62, 2011.

CATEN, A. ten; DALMOLIN, R. S. D.; RUIZ, L. F. C.; SEBEM, E.; PEREIRA, R. S. Pedometria aplicada à predição de classes de solos utilizando de regressões logísticas múltiplas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 7685-7692.

DRAGO, V. A.; PRADO, P.; BEZERRA, P. E. L.; SIMOES, M. A.; PINTO, A. C.; MONTALVAO, R. M. G.; TASSINARI, C. C. G. Contribuição ao estudo geológico do vale do Rio Araguaia. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, 1., 1981, Goiânia. **Ata...** Goiânia: SBG, 1981. p. 404-421.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Normas e critérios para levantamentos pedológicos**. Rio de Janeiro, 1989. 93 p.

ESTEVAM, L. **O tempo da transformação:** estrutura e dinâmica da formação econômica de Goiás. 2. ed. Goiânia: Ed. da UCG, 2004. 275 p.

IANHEZ, A. C.; PITTHAN, J. H. L.; SIMÕES, M. A.; DEL'ARCO, J. O.; TRINDADE, C. A. H.; LUZ, D. S. da; FERNANDES, C. A. C.; TASSINARI, C. C. G.; SOUS JÚNIOR, J. J. de; FREIRE, F. de A.; OLIVEIRA, F. C.; SILVA, R. H. da; BONOW, C. de W.; MOREIRA, H. L. Geologia. In: PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SE.22 Goiânia:** geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1983. p. 23-348. (Levantamento de recursos naturais, v. 31).

LACERDA FILHO, J. V. de; FRASCA, A. A. S. Compartimentação geotectônica. In: MOREIRA, M. L. O.; MORETON, L. C.; ARAÚJO, V. A.; LACERDA FILHO, J. V.; COSTA, H. F. (Org.). **Geologia do Estado de Goiás e do Distrito Federal.** Goiânia: CPRM/SIC-FUNMINERAL, 2008. 143 p.

LACERDA, M. P. C.; QUEMÉNÉUR, J. J. G.; ANDRADE, H.; ALVES, H. M. R.; VIEIRA, T. G. C. Estudo da relação pedomorfogeológica na distribuição de solos com horizontes B textural e B nítico na paisagem de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 271-284, jan./fev. 2008.

LATRUBESSE, E. M.; CARVALHO, T. M. **Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal.** Goiânia: Secretaria de Indústria e Comércio, 2006. 128 p.

MAMEDE, L.; ROSS, J. L. S.; SANTOS, L. M. dos; NASCIMENTO, M. A. L. S. do. Geomorfologia. In: PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SE.22 Goiânia:** geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1983. p. 349-412. (Levantamento de recursos naturais, v. 31).

MARINHO, G. V.; CASTRO, S. S. de; CAMPOS, A. B. de. Hydrology and gully processes in the Upper Araguaia River Basin, Central Brazil. **Zeitschrift für Geomorphologie**, Berlin, v. 145, p. 119-145, 2006. Suplemento.

MARINHO, G. V.; CASTRO, S. S. Estudo de piezometria com ênfase aos processos de voçorocamento na alta bacia do Rio Araguaia/GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SBSCS, 2003.

MARTINS, M. S. **Substrato geológico e sua relação com as ocorrências erosivas lineares na bacia do Rio Araguaia e Rio Babilônia.** 2000. 134 f. Monografia (Graduação em Geografia) - Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

NOVAES, A. S. S.; AMARAL FILHO, Z. P. do; VIEIRA, P. C.; FRAGA, A. G. C. Levantamento exploratório dos solos. In: PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SE.22 Goiânia:**

geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1983. p. 413-576. (Levantamento de recursos naturais, v. 31).

RESENDE, A. de. **Estudo do processo de voçorocamento na bacia do Córrego Capivara - Alta Bacia do Rio Araguaia, em Mineiros (GO)**. 2003. 148 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

RIBEIRO, J. C.; SALOMÃO, F. X. de T. Abordagem morfopedológica aplicada ao diagnóstico e prevenção de processos erosivos na bacia hidrográfica do alto Rio da Casca, MT. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 83-95, 2003.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de. (Ed.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, 1998. p. 89-166.

RUELLAN, A. Classification of pedological systems: a challenge for the future of soil science. **Annals of Agrarian Science**, Georgia, v. 3, n. 3, p. 24-28, 2005.

RUELLAN, A.; DOSSO, M. **Regards sur le sol**. Paris: Foucher-AUPELF, 1993. 192 p. (Collection Universités Francophones).

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. **Mapeamento de cobertura vegetal do Bioma Cerrado: estratégias e resultados**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 33 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 190).

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p. il. color.

SANTOS, R. D. dos; LEMOS, R. C. de; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. rev. e ampl. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 2005. 92 p. il.

SILVA, S. C. da; SANTANA, N. M. P. de; PELEGRINI, J. C. **Caracterização climática do Estado de Goiás**. Goiânia: Secretaria de Indústria e Comércio, Superintendência de Geologia e Mineração, 2006. 133 p.

SILVEIRA, C. T. da. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: integração de atributos topográficos em sistemas de informações geográficas e redes neurais artificiais**. 2010. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SOUZA, M. A. P. de; ALMEIDA, R. T. S.; NEVES, C. M. N. das; CASTRO, J. P. V. de; CASTRO, S. S. de. Comportamento químico de Neossolos Quartzarênicos em Mineiros, Sudoeste Goiano. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 335-347, 2015.

TRICART, J.; KILIAN, J. **L'éco-géographie et l'aménagement du milieu naturel**. Paris: F. Maspero, 1979. 325 p.

UCKER, F. E. **Movimentação de potássio em solo frágil sob manejo com cana-de-açúcar e cerrado nativo**. 2015. 115 f. Tese (Dourado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

VALERIANO, M. de M.; ROSSETTI, D. de F. **TOPODATA**: seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2008. 50 p.

Capítulo 4

Funções de uso e indicadores de sustentabilidade – casos de expansão sucroalcooleira no Sudoeste de Goiás

Ana Paula Dias Turetta; Heitor Luiz da Costa Coutinho

Introdução

A preocupação com as metas do Protocolo de Kyoto, a matriz energética atual e as estratégias para o desenvolvimento econômico sustentável tem sido o centro das discussões de especialistas e autoridades globais e, como consequência, têm colocado a produção da cana-de-açúcar em agendas e políticas em países como os Estados Unidos (EUA), membros da União Europeia (UE) e o Brasil.

Albuquerque (2012) destaca que o Brasil confirmou, no Acordo de Copenhague e na COP16 em Cancun, as suas metas nacionais voluntárias de redução de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE), com reduções entre 36,1% e 38,9% das suas emissões projetadas até 2020. Essas metas foram definidas na Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), aprovada pelo Congresso Nacional (BRASIL, 2009). Em dezembro de 2010, foi editado o Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010, que regulamenta os artigos 6, 11 e 12 da Lei nº 12.187/2009 que instituiu a PNMC e deu outras providências. Entre elas, estabeleceu, em consonância com a PNMC, planos setoriais de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas visando à consolidação de uma economia de baixo consumo em carbono (BRASIL, 2010).

Esse decreto permitiu esclarecer e definir vários aspectos regulatórios do texto legal quanto à mensuração das metas e à formulação dos planos setoriais (ALBUQUERQUE, 2012). O Decreto nº 7.390 contou com uma lista de ações de mitigação das emissões, entre as quais se destaca o item III: “expansão da oferta hidroelétrica, da oferta de fontes alternativas renováveis, notadamente centrais eólicas, pequenas centrais hidroelétricas e bioeletricidade, da oferta de biocombustíveis, e incremento da eficiência energética” (BRASIL, 2010).

A Figura 1 apresenta a expansão da área plantada com cana-de-açúcar no Brasil desde 1975. Observa-se uma constante expansão, que teve como importantes *drivers* o aumento do consumo interno de álcool combustível e também a exportação desse produto em função dos altos preços internacionais do petróleo em 2008 (SOARES et al., 2009).

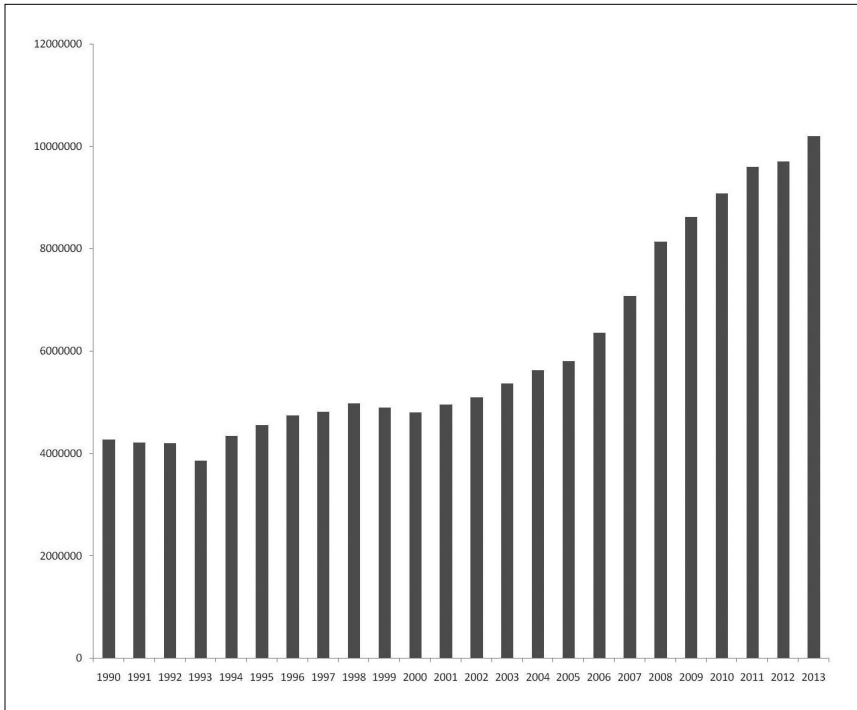


Figura 1. Expansão da área plantada com cana-de-açúcar no Brasil a partir de 1990.

Fonte: IBGE (2014).

De acordo com Soares et al. (2009), apesar do potencial do etanol em mitigar emissões de gases de efeito estufa em substituição à gasolina, existe forte preocupação relacionada à forma como a expansão dessa cultura se manifesta. Nesse contexto, estudos que gerem propostas para a avaliação da sustentabilidade da expansão da cana-de-açúcar representam uma oportunidade de conhecer os potenciais impactos dessa atividade de uma maneira ampla, considerando sua dimensão ambiental, econômica e social, propiciando, assim, subsídios para o seu melhor planejamento e execução.

Avaliação da sustentabilidade, funções de uso da terra e indicadores

Os meios acadêmicos para publicação de artigos científicos demonstram um aumento de publicações no tema, como observado na Figura 2. Tal comportamento demonstra a expansão dessa abordagem, possivelmente devido à crescente demanda por ferramentas capazes de integrar informações ambientais, sociais e econômicas.

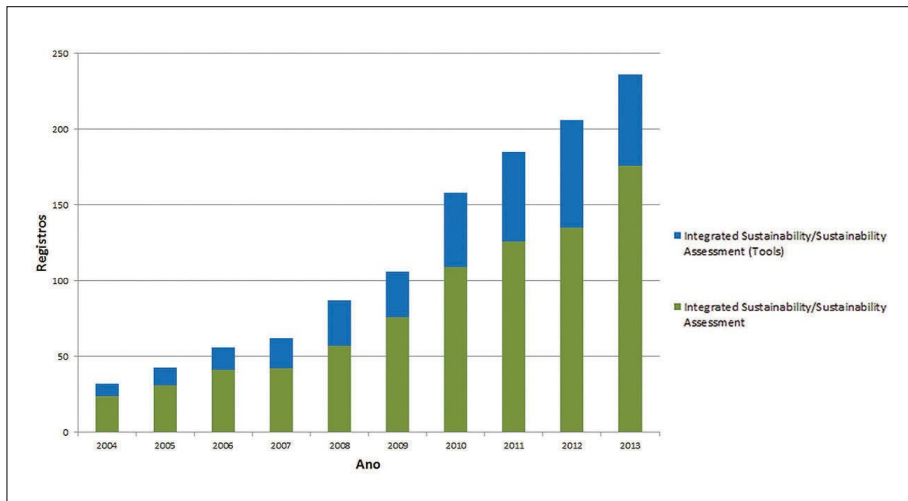


Figura 2. Número de artigos publicados sobre o tema sustentabilidade por ano, de 2004 a 2013.

Fonte: Scopus (2013).

Segundo Kates et al. (2001), um dos principais objetivos da avaliação integrada da sustentabilidade é oferecer aos tomadores de decisão uma avaliação global de determinada questão (atividade, área, bacia de drenagem, etc.) sobre a integração sociedade (aspectos socioeconômicos e institucionais) e natureza, em diferentes recortes temporais, a fim de auxiliá-los a determinar quais ações devem ou não devem ser tomadas na tentativa de tornar a sociedade sustentável.

Lancker e Nijkamp (2000) destacam que, individualmente, um determinado indicador não apresenta uma análise sobre a sustentabilidade. Ele é apenas um valor de referência sobre determinado item. Graymore et al. (2009) acrescentam que avaliações de indicadores de sustentabilidade (pressão-estado-resposta) (ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 1994), apresentam interações entre os indicadores, mas não incorporam essas interações na ferramenta de avaliação. Assim, esse modelo não leva em consideração as interações entre os indicadores e seus diferentes impactos sobre a sustentabilidade. Os autores destacam, ainda, que é mais eficiente focar a análise em pequenos conjuntos de indicadores e em escalas mais finas para aumentar a confiabilidade, ao contrário de avaliações focadas num grande conjunto de indicadores desenvolvidos em escala nacional, e que, muitas vezes, os dados não são disponíveis em escalas maiores (GRAYMORE, 2005; GRAYMORE et al., 2008).

A partir da necessidade de uma estrutura conceitual que (i) definisse adequadamente os bens e serviços econômicos, ambientais e sociais fornecidos pelo uso múltiplo da terra; (ii) ajudasse a identificar os limiares de sustentabilidade; e (iii) investigasse o impacto que as políticas públicas possam ter sobre o uso da terra e o impacto à sustentabilidade de determinada área, Pérez-Soba et al. (2008) propuseram uma abordagem chamada Funções de Uso da Terra (FUTs), capaz de integrar informações de um conjunto de indicadores econômicos, ambientais e socioculturais em nove de Funções de Uso da Terra, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Funções de Uso da Terra (FUT) propostas para a União Europeia

Dimensão da Sustentabilidade	Funções de Uso da Terra
Social	Oferta de trabalho
	Qualidade de vida
	Cultural
Econômica	Produção independente da terra e residencial
	Produção dependente da terra
	Transporte
Ambiental	Provisão de recursos abióticos
	Provisão de recursos bióticos
	Manutenção de processos ecossistêmicos

Fonte: Pérez-Soba et al. (2008).

O conceito de FUTs fundamenta-se nos conceitos da multifuncionalidade da agricultura, dos bens e serviços do ecossistema, e das funções da paisagem. As FUTs propõem uma análise funcional sobre como as mudanças, como aquelas induzidas por políticas públicas, por exemplo, podem ter impacto sobre o desempenho de múltiplas funções relacionadas ao uso da terra, pois avalia simultaneamente os impactos econômicos, ambientais e sociais a partir de um conjunto de indicadores a elas associados. Dessa forma, o conceito de FUTs responde à crescente demanda por métodos para avaliar o impacto à sustentabilidade, refletido nas múltiplas dimensões inerentes ao conceito (KATES et al., 2001).

Nas últimas décadas, o uso de indicadores e índices para avaliar a sustentabilidade cresceu muito, por serem instrumentos que, de forma simples, expressam uma mensagem complexa, resultante de numerosos fatores (HARDI et al., 1997). Esse tipo de ferramenta metodológica permite transmitir a informação técnica de uma forma sintética, preservando o significado original dos dados e usando apenas as variáveis que melhor espelham os objetivos desejados (SMEETS; WETERINGS, 1999).

O modelo Pressão–Estado–Resposta (PER), ou DSR (*Driving force–State–Response*), desenvolvido pela OECD para o estudo de indicadores ambientais globais, é bastante aceito e adotado internacionalmente. Baseia-se no conceito de causalidade: as atividades humanas exercem pressão sobre o ambiente, alterando a qualidade e a quantidade de recursos naturais, ou seja, alterando o seu estado; A sociedade responde a essas mudanças, mediante políticas ambientais, econômicas ou setoriais (ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2003).

A metodologia desenvolvida pelo IBGE tem abrangência regional e se baseia no documento elaborado pela Comissão das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (CSD), que publicou uma lista com 134 indicadores, os quais abrangem aspectos sociais, econômicos, ambientais e institucionais do desenvolvimento sustentável (UNITED NATIONS, 2001). Por sua vez, o IBGE (2004) reduziu essa lista para 57 indicadores, adaptados às particularidades do Brasil, tendo como suporte o modelo proposto PER, adotado pela ONU.

O conceito de desenvolvimento sustentável utilizado pelo IBGE (2004) segue a mesma linha de pensamento CDS/ONU (UNITED NATIONS, 2001), que considera

o desenvolvimento sustentável como um processo de transformação no qual a exploração dos recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional se harmonizam e reforçam o potencial presente e futuro a fim de atender às necessidades e aspirações futuras [...] é aquele que atende às necessidades do presente, sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades (UNITED NATIONS, 2001, p. 10).

Expansão da cana-de-açúcar em Goiás

O setor sucroalcooleiro passou por fases diversas no País, mas a produção de cana-de-açúcar encontra-se praticamente consolidada na região Sudeste, em particular no Estado de São Paulo (MYERS et al., 2000). Atualmente, uma das áreas preferenciais para a expansão dessa cultura é a região Centro-Oeste,

onde já se pode constatar uma grande concentração de novas e antigas usinas de álcool instaladas, destacando-se as regiões do Centro e Sul Goiano, cujo incremento vem se dando, sobretudo, desde 2004 (CASTRO et al., 2010; RUDORFF et al., 2010).

No Sul Goiano concentra-se a maior parte das usinas e áreas de plantio do Estado de Goiás, principalmente em terrenos suaves e cobertos por solos argilosos e profundos, como os Latossolos Vermelhos; uma das suas microrregiões, a de Quirinópolis, aonde a cana chegou em 2004, se tornou a nova centralidade da produção (BORGES, 2011). Outros municípios, como Rio Verde, apesar de terem o mesmo tipo de solo e relevo, por serem agroindustrialmente consolidados em outros setores, como grãos e pecuária, não estão sendo alvo da expansão. E, por fim, municípios como Mineiros, com relevos suaves, porém com solos arenosos de baixa aptidão, como os Neossolos Quartzarênicos, começam a receber a cana-de-açúcar em 2008 (CASTRO et al., 2010; PIETRAFESA et al., 2012; TRINDADE, 2015).

Este capítulo apresenta uma abordagem para a avaliação integrada da sustentabilidade da expansão da cana-de-açúcar no Sudoeste Goiano, utilizando-se a metodologia das Funções de Uso da Terra (FUTs) e Indicadores de Sustentabilidade.

A sustentabilidade da expansão canavieira no Sudoeste Goiano

O Projeto SENSOR, que teve início em 2004, foi desenvolvido por um consórcio de 38 instituições de pesquisa distribuídas em 15 países europeus e financiado pelo Programa Quadro 6, da Comissão Europeia. Seu objetivo foi desenvolver ferramentas de avaliação da sustentabilidade em diferentes cenários de uso da terra por meio da análise integrada dos impactos econômicos, sociais e ambientais resultantes de políticas públicas. Em 2007, quatro países externos à União Europeia (Brasil, Argentina, China e Uruguai) foram incorporados a esse projeto na qualidade de “Países Terceiros Alvos” (*Third Targeted Countries, TTC*). A Embrapa Solos representou o Brasil nesse Consórcio com o objetivo de avaliar a transferibilidade das metodologias desenvolvidas pelo componente europeu do projeto.

A equipe brasileira selecionou, como estudo de caso, a expansão da cana-de-açúcar em áreas de alta dinâmica de mudança de uso das terras no bioma Cerrado. O Projeto SENSOR, em ação integrada com a Rede de Pesquisa Solos Frágeis, desenvolveu ações para a avaliação de impactos da expansão canavieira à sustentabilidade da região do Sudoeste Goiano. Entre os 26 municípios que compõem essa microrregião, foram selecionados os municípios de Mineiros, Rio Verde e Quirinópolis (Figura 3), por possuírem características biofísicas, estruturais e socioeconômicas bastante distintas, que se refletem em diferenças significativas com relação às taxas de expansão da cana-de-açúcar (Tabela 2).

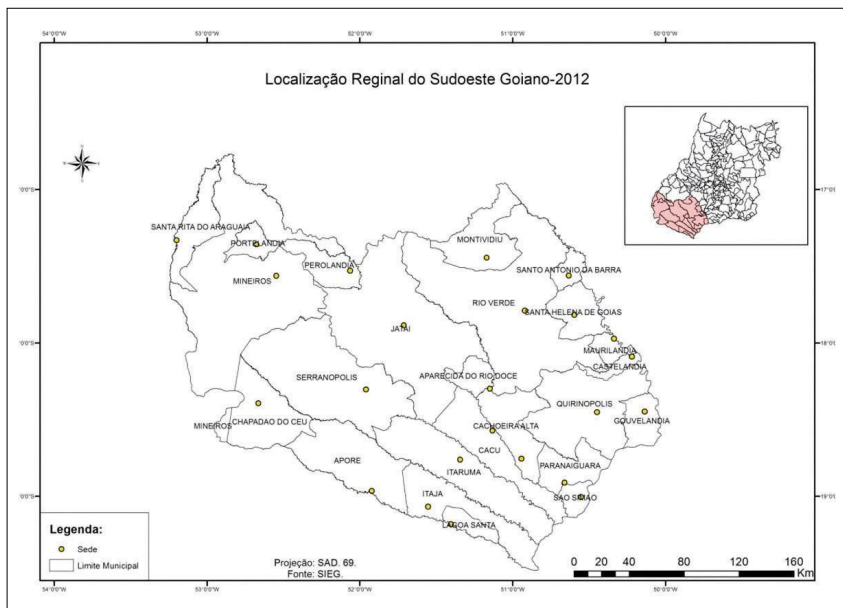


Figura 3. A Região de Planejamento Sudoeste Goiano (SEGPLAN-GO) com seus 26 municípios.

Fonte: Trindade (2015).

Tabela 2. Área ocupada por cana-de-açúcar em hectare e taxa de expansão no período de 2005 a 2011.

Município	2005 (ha)	2011 (ha)	Expansão (%)
Rio Verde	2.900	14.300	393
Quirinópolis	5.000	48.000	860
Mineiros	35	21.101	60.188

A “Oficina de Preparação para Avaliação Participativa de Impactos à Sustentabilidade de Políticas de Expansão Canavieira no Sudoeste Goiano” foi realizada no Instituto de Estudos Socioambientais (IESA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), em Goiânia-GO, no dia 11 de dezembro de 2012, sob coordenação conjunta da Embrapa Solos e do Laboratório de Geomorfologia, Pedologia e Geografia Física (LABOGEF) do IESA (UFG), com os objetivos de promover uma discussão interdisciplinar estruturada sobre a expansão canavieira no Sudoeste Goiano, selecionar instrumentos de políticas públicas para a construção de cenários de ocupação por cana-de-açúcar e definir funções de uso das terras e indicadores a serem utilizados na avaliação participativa de impactos (Framework for Participatory Impact Assessment – FoPIA) (MORRIS et al., 2011). Participaram da Oficina 32 especialistas convidados em função de sua atuação em projetos de pesquisa na região ou experiência em estudos sobre o processo de expansão ou os impactos gerados pela mudança de uso das terras para a produção de açúcar e álcool na região. A Oficina foi estruturada com palestras orientadoras seguidas por trabalhos em grupos e discussão em plenária, dividida em três sessões de estudo: (I) Cenários de Políticas Públicas; (II) Funções de Uso da Terra; e (III) Indicadores de Impacto. No presente trabalho, serão apresentados resultados relativos às sessões II e III. Seus resultados serão publicados por Pietrafesa et al. (2015).

Na concepção do Projeto SENSOR, foram consideradas nove FUTs, sendo três para cada dimensão da sustentabilidade, conforme apresentado anteriormente na Tabela 1. No entanto, as FUTs são flexíveis e permitem que modificações sejam feitas a fim de melhor atender aos objetivos de cada estudo de caso. Dessa forma, tendo em vista o objeto de estudo deste trabalho – expansão da cana-de-açúcar no Sudoeste Goiano –, nove FUTs foram apresentadas na Sessão II da Oficina Participativa, sendo validadas em termos de relevância e adequabilidade ao estudo de caso (Tabela 3).

Tabela 3. Funções de Uso da Terra (FUT) definidas pela equipe do Projeto SENSOR para o estudo de caso expansão da cana-de-açúcar no Sudoeste de GO.

Sustentabilidade	FUTs Sudoeste GO
Social	Qualidade e oferta de trabalho
	Saúde e qualidade de vida
	Desenvolvimento sociocultural local
Econômica	Atividades industriais e construção civil
	Produção rural e consumo local
	Infraestrutura
Ambiental	Conservação de recursos abióticos
	Conservação de recursos bióticos
	Manutenção de processos ecossistêmicos

Na Sessão III da Oficina, os grupos de trabalho deliberaram sobre quais indicadores de sustentabilidade seriam os mais apropriados para representar cada FUT definida na Sessão II, considerando os critérios de relevância, simplicidade, robustez, mensurabilidade, operacionalidade e disponibilidade (espacial e temporal). Cada grupo de trabalho, tendo em vista a dimensão de sustentabilidade que representaram, propôs quatro indicadores para cada FUT.

Um total de 53 indicadores foram apontados pelos seis grupos de trabalho, que, após análise e remoção de redundâncias e inconsistências, resultaram em 36 indicadores propostos, sendo 12 sociais, 12 econômicos e 12 ambientais.

A sustentabilidade da expansão canavieira nos municípios de Mineiros, Quirinópolis e Rio Verde

A maior limitação ao desenvolvimento do trabalho foi a disponibilidade de dados sobre os indicadores selecionados e o acesso aos mesmos. Observa-se na Tabela 4 que, dos 36 indicadores listados, foi possível encontrar registros em 24 deles. Porém, tais registros foram, em sua maioria, apenas encontrados em nível estadual e com a série temporal incompleta. Apenas para três indicadores

(PIB industrial, PIB agropecuário e área plantada) foram encontrados registros em nível municipal e com maior disponibilidade temporal.

Observa-se, ainda, na Tabela 4, que a dimensão com a menor disponibilidade de dados é a ambiental, seguida pela econômica e pela social. A dimensão social, geralmente, é a mais esquecida em uma análise de sustentabilidade, sendo dada maior ênfase especialmente às dimensões econômica e ambiental. Mesmo diante desse fato, a dimensão ambiental é a que apresenta a menor disponibilidade de dados, o que pode estar relacionado ao fato de as análises de sustentabilidade com ênfase na dimensão ambiental serem realizadas em escalas de detalhe, permitindo, assim, a coleta de indicadores “in loco” e/ou o acesso à base de dados de projetos de pesquisa. Outra hipótese é que os dados utilizados para essas análises, quando realizadas em escalas de menor detalhe, sejam inadequados à realização das mesmas, ou seja, os indicadores utilizados podem não mostrar a ocorrência de determinados fenômenos de forma adequada.

Uma análise possível de ser feita com os dados disponíveis é a relação entre a expansão da área plantada com cana e o aumento do PIB agropecuário nos municípios considerados (Figura 4). No entanto, observa-se não ser adequado estabelecer tal correlação, uma vez que fica evidente que a expansão da área plantada não impacta diretamente no aumento do PIB, apesar da tendência de aumento de ambos os indicadores. Ou seja, uma possível correlação que, à primeira vista, parece ser verdadeira, ao se plotar os dados, observa-se que não atende à hipótese considerada. Esse exemplo reforça a necessidade de uma análise mais ampla e robusta, com uso de indicadores variados para que se possa chegar à real interação entre os diversos fatores que afetam determinado fenômeno.

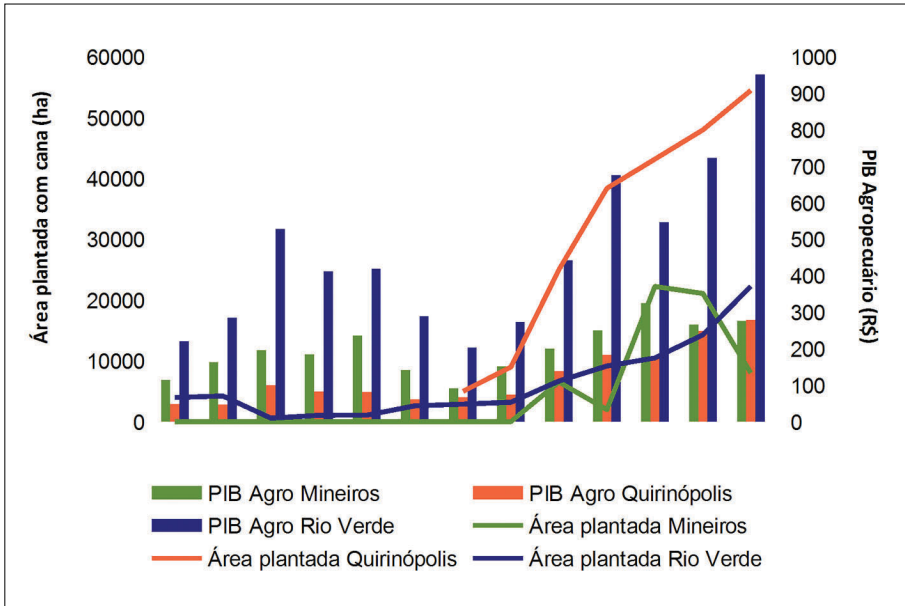


Figura 4. Área plantada x PIB Agropecuário nos municípios de Mineiros, Quirinópolis e Rio Verde.

Fonte: IBGE (2014).

Dessa forma, não foi possível realizar a avaliação integrada da sustentabilidade utilizando-se a metodologia das FUTs. A disponibilidade dos dados em recortes espaciais e série temporal adequada foi o fator determinante que impossibilitou as análises. No entanto, o levantamento de dados realizado e a sistematização dos mesmos em uma base de dados podem ser considerados resultados importantes para a realização de outras avaliações nessa área de estudo.

Tabela 4. Dados disponíveis para os indicadores selecionados, de acordo com a FUT associada, disponibilidade espacial e temporal e fonte.

FUT	Indicadores	Disponível para	Série Temporal	Fonte
Qualidade e oferta de trabalho	Admissão, demissão e saldo (% população assalariada)	Estado e Municípios	2012	IBGE - Cadastro Central de Empresas
	Média salarial (Renda domiciliar per capita média, em R\$)	Estado de Goiás	2002 a 2009 / 2011 a 2012	PNAD 2002-2012 IBGE
	Taxa de emprego por setor (Taxa de desemprego total - rural e urbano)	Estado de Goiás	2002 a 2011	PNAD 2002-2012 IBGE
	Uso de mão de obra local	ND*	ND	ND
Saúde e qualidade de vida	Acesso a saneamento básico (Abastecimento adequado de água) (%)	Estado de Goiás	2002 a 2011	PNAD 2002-2012 IBGE
	Hospitais e leitos (Mil/hab.)	Estado de Goiás	2000 / 2005 a 2010	IBGE
	Média de anos de estudos (Anos)	Estado de Goiás	2003 a 2009 / 2011a 2012	IMB/GO
	Taxa de criminalidade (Homicídio masculino de 15 a 29 anos)	Estado de Goiás	2002 a 2009 / 2011	IMB/GO
Desenvolvimento socio-cultural local	Nº de equipamentos públicos de lazer	ND	ND	ND
	Índice GINI (Renda domiciliar per capita)	Estado de Goiás	2000 a 2010	PNAD 2002-2012 IBGE
	Grupos culturais (Número de Indígenas)	Estado de Goiás	2010	IBGE
	Nº de Conselhos Municipais	ND	ND	ND
Nº de concluintes do Ensino Médio (Taxa de frequência líquida à escola - Ensino Médio faixa etária 15 a 17 anos)	Estado de Goiás	2002 a 2009 / 2011 a 2012	IMB/GO	

Continua...

Tabela 4. Continuação.

FUT	Indicadores	Disponível para	Série Temporal	Fonte
Atividades industriais e construção civil	Taxa de urbanização	Estado de Goiás	2000 a 2011	IBGE
	Proporção (%) de população urbana			
	Diversificação industrial	ND	ND	ND
	PIB Industrial (Valor adicionado bruto da indústria, em mil R\$)	Municípios de Mineiros, Quirinópolis e Rio Verde	2000 a 2012	IBGE
Produção rural e consumo local	Disponibilidade de transporte público	ND	ND	ND
	Acesso da população à energia elétrica	Estado de Goiás	2001 a 2008 / 2011 a 2012	IMB/GO
Infraestrutura	PIB Agropecuário (Valor adicionado bruto da agropecuária, em R\$)	Municípios de Mineiros, Quirinópolis e Rio Verde	2000 a 2012	IBGE
	Diversificação agropecuária	ND	ND	ND
	Área ocupada por culturas agrícolas (Área plantada com cana, ha)	Estado e Municípios	2000 a 2013 / a partir de 2006 para o município de Rio Verde	IBGE
	Consumo de produtos agrícolas locais	ND	ND	ND
Infraestrutura	Geração de energia elétrica (GWh/km ²)	Estado de Goiás	2006 a 2013	BEN - Balanço Energético Nacional
	Rede de transmissão elétrica	ND	ND	ND
	Diversidade da malha viária	ND	ND	ND
	Cogeração de energia elétrica	ND	ND	ND

Continua...

Tabela 4. Continuação.

FUT	Indicadores	Disponível para	Série Temporal	Fonte
Conservação de recursos abióticos	Consumo de pesticidas e fertilizantes (Ton. agrotóxicos/área plantada, km ²)	Estado de Goiás	2005 e 2009	IBGE
	Discrepância de uso/ZAE	ND	ND	ND
	% de APP preservada	Estado de Goiás	2001 a 2014	IBGE
	(% área)	Estado de Goiás	2010	IBGE
Conservação de recursos bióticos	Taxa de expansão da cana/uso total (Variação de área plantada 2000-2010, %)	ND	ND	ND
	Perda de solo	Estado de Goiás	2001 a 2014	MMA
	% de APP preservada	ND	ND	ND
	(% área)	Estado de Goiás	2002 e 2008	IBGE
	Taxa de expansão da cana/uso total	ND	ND	ND
	Pontos de queimada/ano (Nº de Focos de Calor)	Estado de Goiás	2008	MMA
Manutenção de processos ecossistêmicos	Taxa de desmatamento – Limpeza de pasto (Km ² desmatados)	Municípios de Mineiros, Quirinópolis e Rio Verde	2008	MMA
	Nº de fragmentos	ND	ND	ND
	(Métricas de paisagens associadas)	ND	ND	ND
	Consumo de pesticidas	ND	ND	ND
	% de APP preservada	ND	ND	ND
	Estoque e sequestro de carbono (CO ₂ ton./km ²)	Estado de Goiás	2000 a 2002	Estimativas anuais de emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil
	Taxa de sedimentação dos corpos hídricos	ND	ND	ND
	% de Área contígua de área de produção (Matriz da paisagem/permeabilidade)	ND	ND	ND
	Grau de fragmentação dos remanescentes	ND	ND	ND

*ND: Não disponível.

Fonte: Brasil (2015), Empresa de Pesquisa Energética (2015), Estimativas... (2014), IBGE (2002-2012, 2014), Instituto Mauro Borges de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos (2015).

Considerações finais

De modo geral, pode-se dizer que foi encontrada uma quantidade significativa de dados, especialmente aqueles relacionados à dimensão social e econômica, uma vez que são dados que fazem parte das estatísticas oficiais de governo. Mesmo assim, a falta de continuidade temporal desses dados não permitiu que os mesmos fossem utilizados a contento pela metodologia proposta no trabalho. Já os dados para indicadores ambientais foram os mais difíceis de serem encontrados.

Pressupõe-se que grande parte desses dados sejam obtidos em projetos específicos, publicados em relatórios técnicos, dissertações, teses e artigos científicos. Essa questão, além de não promover a disponibilização desses dados em repositórios que possam ser facilmente acessados, dificilmente promove a continuidade no levantamento e sistematização dos mesmos, ficando restritos ao recorte temporal de um dado projeto.

Um outro ponto importante sobre os indicadores ambientais é que, para se manter uma rede de monitoramento para a obtenção desses dados (qualidade da água, por exemplo), é necessário um investimento em infraestrutura (instalação de estações para monitoramento, no caso do exemplo citado), além da contratação e disponibilização de técnicos especializados para operar o monitoramento. A disposição do poder público para operar essas ações também esbarra na sobreposição de mandatos das instituições públicas, o que dificulta que se chegue a um consenso sobre qual instituição deverá executar determinada atividade.

A grande maioria dos dados é disponibilizada em escalas de pouco detalhe, geralmente em um recorte estadual. Dessa forma, fica evidente a precariedade de se proceder a atividades de planejamento de uso do solo em nível municipal, por exemplo. Os poucos dados disponíveis em nível municipal apresentavam-se de forma desorganizada e desatualizada, o que constituiu um grande obstáculo para a aplicação da metodologia às FUTs.

Portanto, para análises da sustentabilidade da expansão da cana na região, sugere-se o uso de metodologias mais simples e genéricas, que possam utilizar

dados disponíveis, e/ou a realização dessas análises em áreas menores, com a possibilidade de levantamento “in loco” dos indicadores, com possibilidade de extrapolação para áreas maiores.

Referências

ALBUQUERQUE, L. **Análise crítica das políticas públicas em mudanças climáticas e dos compromissos nacionais de redução de emissão de gases de efeito estufa no Brasil**. 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BORGES, V. M. S. **Formação de uma nova centralidade do setor sucroenergético no Cerrado: o caso de Quirinópolis, Estado de Goiás**. 2011. 238 f. Tese (Doutorado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

BRASIL. Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010. Regulamenta os arts. 6º, 11 e 12 da Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 10 dez. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7390.htm>. Acesso em: 30 set. 2015.

_____. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/12187.htm>. Acesso em: 30 set. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 1 set. 2015.

CASTRO, S. S. de; ABDALA, K.; SILVA, A. A.; BORGES, V. A expansão da cana-de-açúcar no cerrado e no Estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, n. 1, p.171-191, 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2015: ano base 2014**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em: 20 set. 2015.

ESTIMATIVAS anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2. ed. Brasília, DF: MCTI, 2014. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf>. Acesso em: 20 set. 2015.

GRAYMORE, M. L. M.; SIPE, N. G.; RICKSON, R. E. Regional sustainability: how useful are current tools of sustainability assessment at the regional scale? **Ecological Economics**, n. 67, n. 3, p. 362-372, Oct. 2008

GRAYMORE, M. L. M.; WALLIS, A. M.; RICHARDS, A. J. An index of regional sustainability: a GIS-based multiple criteria analysis decision support system for progressing sustainability. **Ecological Complexity**, v. 6, n. 4, p. 453-462, Dec. 2009.

GRAYMORE, M. **The journey to sustainability**: small regions, sustainable carrying capacity and sustainability assessment methods. 2005. 439 f. Thesis (Doctor of Philosophy). Australian School of Environmental Studies, Griffith University, Brisbane.

HARDI, P.; BARG, S.; HODGE, T.; PINTER, L. Measuring sustainable development: review of current practice. **Occasional Paper**, Ottawa, n. 17, Nov. 1997.

IBGE. **Estatísticas do cadastro central de empresas**: 2012. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv86882.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2015.

_____. **Indicadores de desenvolvimento sustentável**: Brasil 2004. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <ftp://geofpt.ibge.gov.br/documentos/recursos_naturais/indicadores_desenvolvimento_sustentavel/ids2004.pdf>. Acesso em: 30 set. 2015.

_____. **Pesquisa nacional por amostra de domicílios**. Rio de Janeiro, 2002-2012. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php?id_pesquisa=40>. Acesso em: 20 set. 2015.

_____. **Produção agrícola municipal 2014**: tabela 1612 - área plantada, área colhida, quantidade produzida e valor da produção da lavoura temporária. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1612&z=p&o=18>>. Acesso em: 1 set. 2015.

INSTITUTO MAURO BORGES DE ESTATÍSTICAS E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS. **IMB - Instituto Mauro Borges de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos**. Disponível em: <<http://www.imb.go.gov.br/>>. Acesso em: 20 set. 2015.

KATES, R. W.; CLARK, W. C., CORELL, R.; HALL, M. J.; JAEGER, C. C.; LOWE, I.; MCCARTHY, J. J.; SCHELLNHUBER, H. J.; BOLIN, B., DICKSON, N. M.; FAUCHEUX, F.; GALLOPIN, G. C.; GRÜBLER, A.; HUNTLEY, B.; JÄGER, J.; JODHA, N. S.; KASPERSON, R. E.; MABOGUNJE, A.; MATSON, P.; MOONEY, H.; MOORE III, B.; O'RIORDAN, T.; SVEDIN, U. Sustainability science. **Science**, Washington, DC, v. 292, n. 5517, p. 641-642, Apr. 2001.

LANCKER, E.; NIJKAMP, P. A policy scenario analysis of sustainable agricultural development options: a case study for Nepal. **Impact Assessment and Project Appraisal**, Fargo, v. 18, n. 2, p. 111-124, 2000.

MORRIS, J. B.; TASSONE, V.; GROOT, R. de; CAMILLERI, M.; MONCADA, S. A framework for participatory impact assessment: involving stakeholders in european policy making, a case study of land use change in Malta. **Ecology and Society**, v. 16, n. 1, 2011. Disponível em: <<http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art12/>>. Acesso em: 3 set. 2015.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B. da; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, n. 403, p. 853-858, Feb. 2000.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD environmental indicators**. Paris, 1994.

_____. **OECD environmental indicators: development, measurement and use**. Paris, 2003.

PÉREZ-SOBA, M.; PETIT, S.; JONES, L.; BERTRAND, N.; BRIQUEL, V.; OMODEI-ZORINI, L.; CONTINI, C.; HELMING, K.; FARRINGTON, J. H.; MOSSELLO, M. T.; WASCHER, D.; KIENAST, F.; GROOT, R. de. Land use functions: a multifunctionality approach to assess the impact of land use changes on land use sustainability. In: HELMING, K.; PÉREZ-SOBA, M.; TABBUSH, P. (Ed.). **Sustainability impact assessment of land use changes**. Berlin; New York: Springer, 2008. cap. 19, p. 375-404.

PIETRAFESA, J. P.; CASTRO, S. S.; TRINDADE, S. P. A crescente produção sucroalcooleira em áreas de Cerrado e o Estado de Goiás: contribuição ao estudo sobre indicadores de sustentabilidade. In: FRANCO, J. J. de A.; SILVA, S. D. e; DRUMMOND, J. A.; TAVARES, G. G. (Org.). **História ambiental: fronteiras, recursos e conservação da natureza**. Rio de Janeiro: Garamond, 2012. p. 311-332.

PIETRAFESA, J. P.; COUTINHO, H. C.; TURETTA, A. P. D.; MONTEIRO, J. M. G.; TRINDADE, S. P. Construção de metodologia para análise de uso do solo: arcabouço para Avaliação Participativa de Impactos (FoPIA). In: PEIXOTO, J. C.; PIETRAFESA, J. P.; BARBALHO, M. G. S.; SIMÕES, S. (Org.). **Indicadores de uso e manejo de biotas, solos e águas**. Rio de Janeiro: Garamond, 2015. No prelo.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

SCOPUS. 2013. Disponível em: <<http://www.scopus.com/>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

SMEETS, E.; WETERINGS, R. **Environmental indicators: typology and overview.** Copenhagen: European Environment Agency, 1999. (Technical report, n. 25).

SOARES, L. H. de B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil.** Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2009. 14 p. (Embrapa Agrobiologia. Circular técnica, 27).

TRINDADE, S. P. **Aptidão agrícola, mudanças de usos dos solos, conflitos e impactos diretos e indiretos da expansão da cana-de-açúcar na região sudoeste goiano.** 2015. 187 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

UNITED NATIONS. Commission on Sustainable Development. **Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies.** New York, 2001. Disponível em: <<http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/indisd/indisd-mg2001.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2015.

Capítulo 5

Cenários para expansão da cana-de-açúcar no Sudoeste Goiano - estudo de caso de Mineiros

Joyce Maria Guimarães Monteiro; Elaine Cristina Cardoso Fidalgo

Introdução

A produção de bioenergéticos é uma tendência mundial, configurada, principalmente, pela importância da diversificação da matriz energética e pelo impacto das mudanças climáticas globais. O Brasil apresenta vários diferenciais que o tornam altamente competitivo para atender à crescente demanda interna por biocombustíveis derivados do cultivo da cana-de-açúcar.

O setor sucroalcooleiro brasileiro destaca-se pelo aproveitamento energético do bagaço da cana-de-açúcar (cogeração de energia), que permite sua autossuficiência energética e a comercialização dos excedentes no mercado (BRASIL, 2014). Além disso, observa-se a predominância de unidades industriais mistas de fabricação de açúcar, álcool etílico (CONAB, 2013) e o recente desenvolvimento tecnológico para aproveitamento do bagaço, da palha e das pontas da cana-de-açúcar na produção do etanol de segunda geração, ou celulósico e outros bioprodutos (MATOS, 2012).

Pelo lado da oferta de matéria prima, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (CONAB, 2015). O cultivo da cana-de-açúcar continua em franca expansão no País, ocupando aproximadamente nove milhões de hectares, com uma produção em torno de 650 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra de 2014/2015 (CONAB, 2015). Estima-se que a área colhida de cana-de-açúcar no País passará de 8,7 Mha em 2014 para 10,6 Mha em 2023 (BRASIL, 2014).

A perspectiva é de crescimento da participação do biocombustível etanol na matriz energética de transportes. O etanol carburante hidratado (teor alcoólico de 95%) é utilizado diretamente como combustível nos veículos de motores *flex*. O etanol anidro (teor alcoólico de 99,5%) é usado em mistura à gasolina, atualmente, na proporção de 25% (BRASIL, 2014). A produção de etanol total da safra 2014/2015 é estimada em 28,66 bilhões de litros, estando concentrada na região Centro-Sul, responsável por 92,93% do total produzido no País, principalmente nos estados de São Paulo (48,61%), Goiás (14,41%), Minas Gerais (10,25%) e Mato Grosso do Sul (9,02%). Desse total, 11,80 bilhões de litros deverão ser de etanol anidro e 16,86 bilhões de litros de etanol hidratado (CONAB, 2015). A projeção é que a produção de etanol nacional aumente de 27,6 para 47,3 milhões de m³ no período de 2013 a 2023 (BRASIL, 2014).

A produção de cana-de-açúcar deve se expandir a taxas elevadas nos estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso, Minas Gerais e Goiás. Entretanto, enquanto em São Paulo a produção e a área plantada devem aumentar em cerca de 30% até 2021, no Estado de Goiás o aumento deverá atingir 42% (BRASIL, 2013). De fato, no Estado de Goiás a expansão do cultivo de cana-de-açúcar para alimentação das indústrias sucroalcooleiras está em ritmo acelerado de crescimento, ocupando grandes áreas agrícolas. O estado é segundo maior produtor brasileiro de etanol e o quarto produtor de açúcar (CONAB, 2013). A partir dos dados da área cultivada com cana-de-açúcar disponíveis no Canasat (2015), pode-se constatar que houve um aumento da área cultivada em 304% no período de 2006 a 2013, totalizando mais de 800 mil hectares em Goiás em 2013. A região do Sudoeste Goiano é considerada a nova fronteira de expansão do cultivo de cana-de-açúcar.

No entanto, se, por um lado, o Estado de Goiás apresenta vantagens comparativas para a expansão da cana-de-açúcar relacionadas ao clima, à disponibilidade de terra e a tecnologias de ponta, além de políticas de incentivos (SILVA; PEIXINHO, 2012), por outro, é desejável que essa expansão ocorra de acordo com os princípios da sustentabilidade socioambiental, considerando as questões associadas à redução dos impactos sobre o meio ambiente.

Nessa linha, o principal instrumento político disponível atualmente é o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar – ZAE Cana (MANZATTO et al., 2009), que prevê a regulação governamental da expansão do plantio de cana-de-açúcar levando em conta as áreas prioritárias para expansão de acordo com a aptidão agrícola e as restrições ambientais.

O objetivo deste capítulo é apresentar um cenário exploratório de expansão sustentável de cana-de-açúcar para a produção do etanol no Município de Mineiros, localizado na Região de Planejamento Sudoeste Goiano – RPSG. O ZAE Cana é o instrumento utilizado para elaborar os cenários de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no período de 2014 a 2023. São apresentados alguns aspectos da dinâmica da expansão do cultivo de cana-de-açúcar no município, como as áreas de expansão de cana em relação ao uso e à ocupação do solo como um todo e em relação aos diferentes tipos e classes de solos e seus principais aspectos de fragilidade.

Por último, com o objetivo de ressaltar o potencial de mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE), levando em conta os cenários elaborados, serão apresentadas estimativas da produção de etanol e do potencial de redução de emissões de GEE (emissões evitadas) pela produção e uso do etanol como combustível veicular.

Estudo de caso – Município de Mineiros, GO

O Município de Mineiros está localizado na região Centro-Oeste do Brasil, na mesorregião do Sul Goiano, na microrregião do Sudoeste Goiano, inserido na região de Planejamento Sudoeste Goiano – RPSG (SEGPLAN-GO)¹ e distante cerca de 420 km de Goiânia. Seu território abrange uma área de 9.060,091 km² e abriga uma população de 60.464 habitantes (IBGE, 2014a). Seus municípios limítrofes são: Jataí, Santa Rita do Araguaia, Portelândia, Serranópolis, Chapadão do Céu, Perolândia, Caiapônia, Doverlândia e Alto Taquari (todos no estado de Goiás); Alto Araguaia em Mato Grosso; e Costa Rica no Mato Grosso do Sul.

Quanto à utilização de terras, de acordo com o censo agropecuário (IBGE, 2006), são 1.228 estabelecimentos rurais que ocupam uma área de 650.553 ha, sendo principalmente pastagens (55%), lavouras temporárias (19%) e matas (18%). O perfil agropecuário é marcado pela predominância da pecuária. De acordo com dados do IBGE, havia 341 mil cabeças de bovinos, 7.700 suínos e 1,9 milhões de galináceos no município em 2012 (IBGE, 2014c). Na cidade há uma estrutura de engorda e abate de aves, além de um frigorífico de bovinos com capacidade para abater 1,2 mil cabeças por dia.

Quanto às lavouras temporárias, como pode ser observado na Figura 1, a soja se destaca pela ocupação do solo, com mais de 100 mil hectares, seguida pelo milho, com cerca de 50 mil hectares, e do algodão, que vem perdendo importância no município, mas ainda ocupava cerca de 10 mil ha em 2012 (IBGE, 2014b).

¹ A RPSG é composta por 26 municípios: Acreúna, Aparecida do Rio Doce, Aporé, Cachoeira Alta, Caçu, Castelândia, Chapadão do Céu, Gouvelândia, Itajá, Itarumã, Jataí, Lagoa Santa, Maurilândia, Mineiros, Montividiu, Paranaiguara, Perolândia, Portelândia, Quirinópolis, Rio Verde, Santa Helena de Goiás, Santa Rita do Araguaia, Santo Antônio da Barra, São Simão, Serranópolis e Turvelândia.

Mais informações no site da SEGPLAN/IMB – Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento / Instituto Mauro Borges de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos de Goiás (<http://www.seplan.go.gov.br/sepin/index.asp>).

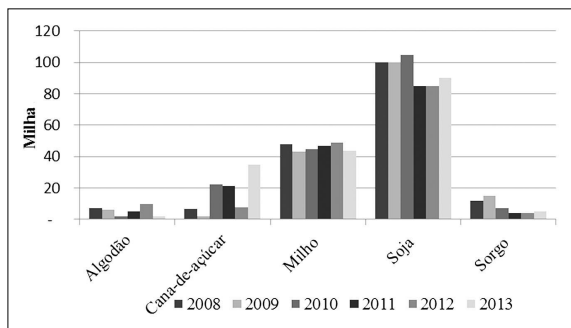


Figura 1. Área colhida das principais lavouras agrícolas temporárias no Município de Mineiros (GO), 2008 a 2013.

Fonte: IBGE (2014b).

Dos municípios da região, os que possuem usinas instaladas são: Acreúna, Aporé, Chapadão do Céu, Jataí, Montividiu, Mineiros, Quirinópolis, Portelândia, Rio Verde, Santa Helena de Goiás, Serranópolis e Turvelândia. A área total cultivada com cana-de-açúcar nessa região foi de 475 mil ha em 2013, representando cerca de 50% do cultivo canavieiro do estado. De acordo com dados do Canasat (2015), o Município de Quirinópolis detém a maior área cultivada com cana-de-açúcar do Estado de Goiás, com cerca de 70 mil ha ou 15% do total cultivado em 2013, seguido pelo Município de Mineiros, com cerca de 50 mil ha, equivalente a 11% do total cultivado na Região de Planejamento do Sudoeste Goiano. A ocupação do solo com o cultivo da cana-de-açúcar é recente no Município de Mineiros. Somente a partir de 2008, o cultivo canavieiro começou a ganhar expressão no município.

No ano de 2007, teve início a implantação, no município, da Usina Breco – Companhia Brasileira de Energia Renovável, denominada de Morro Vermelho. Inaugurada em agosto de 2010, a unidade Morro Vermelho atualmente pertence ao Grupo Odebrecht Agroindustrial (antiga ETH Bioenergia). A unidade é dedicada à produção de álcool etílico (etanol anidro e hidratado) e energia, tendo como capacidade instalada 340 milhões de litros de etanol e 349 mil Mwh de energia (cogeração a partir de biomassa). Além dessa unidade, o Grupo Odebrecht Agroindustrial detém mais três unidades agroindustriais dedicadas exclusivamente à produção de etanol e energia (cogeração) em municípios

limítrofes a Mineiros. São elas: Água Emendada, em Perolândia, GO; Alto Taquari, em Alto Taquari, MT; e Costa Rica, em Costa Rica, MS.

As condições edafoclimáticas, a disponibilidade de áreas para o cultivo e as políticas governamentais, tanto em nível federal como estadual, estão entre os principais fatores de atração para a implantação, expansão e revitalização das indústrias do setor sucroalcooleiro na região (SILVA; PEIXINHO, 2012). Cabe ressaltar algumas políticas de ordenamento e incentivo que atuam no desenvolvimento do setor agroindustrial de Goiás. O Programa de Desenvolvimento Industrial de Goiás (Produzir) fornece incentivos fiscais para as indústrias do setor, como, por exemplo, a prorrogação de 70% do ICMS, por um prazo de até 25 anos, incluindo a possibilidade da participação acionária do Estado de Goiás (Lei nº 13.591/2000). Também o Plano Estratégico de Desenvolvimento do Centro-Oeste 2007-2020 (PEDCO), criado pelo Ministério da Integração Nacional, permite financiamentos do Fundo Constitucional do Centro-Oeste (FCO) e do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) com o objetivo de fortalecer a economia do Centro-Oeste.

Por fim, o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (ZAE Cana) objetiva fornecer subsídios técnicos para formulação de políticas públicas, visando ao ordenamento da expansão e à produção sustentável de cana-de-açúcar no território brasileiro (MANZATTO et al., 2009). O ZAE Cana é parte da política agrícola do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para a contratação de crédito de custeio e seguro agrícola.

Aspectos do cultivo da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é uma planta da família *Poaceae* (gramínea) que se adapta muito bem às regiões de clima tropical, possibilitando a produção em escala econômica em uma grande porção territorial brasileira, do nível do mar até um pouco mais de 1.000 m de altitude (CONAB, 2013). A produtividade e o teor de sacarose da cana-de-açúcar são fortemente influenciados pelas condições climáticas, indicando que a temperatura ideal para seu desenvolvimento é entre 20 e 32°C, com precipitação acumulada acima de 1.000 milímetros por ano durante a fase de crescimento e temperaturas mais amenas e baixa disponibilidade de água na fase de maturação e colheita (MAGALHÃES, 1987).

Os solos ideais para o desenvolvimento da cana-de-açúcar devem ser bem arejados e profundos, com boa retenção de umidade, alta fertilidade e pH próximo à neutralidade (ROSSETTO et al., 2004). A declividade ideal do terreno fica entre 2 e 5%, pois em terrenos completamente planos pode ocorrer necessidade de drenagem e, para a colheita mecânica, é exigido no máximo 12% declividade (MANZATTO et al., 2009).

O plantio da cana-de-açúcar pode ser realizado no final das chuvas (cana de ano e meio) ou no início das chuvas (cana de ano), mesmo frequente no País, devido ao menor rendimento agrícola (CONAB, 2013). A denominação cana-planta refere-se ao primeiro ciclo da cultura, ou seja, do plantio ao primeiro corte. Do primeiro corte em diante, a cana-de-açúcar é conhecida como cana-soca. Em média, a cana-soca permite cinco cortes a cada doze meses (independente da variedade). Assim, o ciclo produtivo da cana-de-açúcar é de seis anos (semiperene), quando, então, é realizado um novo plantio, chamado de renovação ou reforma do canavial. As áreas são cultivadas próximas às usinas (até 30 km de distância), e a maioria das usinas produz por conta própria ou em esquema de integração². Tipicamente, a expansão da área de plantio comercial com cana-de-açúcar é devido ao aumento da capacidade das unidades produtivas e/ou a instalação de novas unidades industriais.

Dependendo da fonte, CONAB, IBGE e Canasat, os dados de área cultivada com cana-de-açúcar diferem um pouco em função das metodologias utilizadas para o levantamento. Os dados da área de cultivo anual da cana-de-açúcar geralmente se referem às áreas de corte do canavial, que é diferente da área total de cultivo, que, por sua vez, corresponde à soma das áreas de corte e das áreas dos canaviais que não foram cortadas, seja porque são áreas que foram plantadas com cana-planta de ano e meio, seja por outro motivo.

Neste trabalho, serão utilizados os dados de área total cultivada com cana-de-açúcar do Canasat, capitaneado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esse projeto vem usando imagens do satélite Landsat

² Uma parte importante da cana-de-açúcar é cultivada em terras arrendadas de terceiros pela indústria sucroalcooleira ou em terras adquiridas pelas usinas (esquema de integração). Nesses sistemas, as usinas exercem controle sobre a produção canavieira do plantio até a colheita, sendo o transporte da cana-de-açúcar madura realizado também pelas unidades de produção, de acordo com a sua programação de moagem.

desde 2003 e técnicas de processamento digital para mapear anualmente áreas cultivadas com cana-de-açúcar na escala 1:50.000 na região Centro-Sul (RUDORFF et al., 2010).

Cenários – Aspectos teóricos e metodológicos

Um cenário pode ser entendido como uma configuração de um sistema ou situação que se deseja conhecer e avaliar, sempre vinculada a um período de tempo, com o objetivo de aumentar a compreensão do funcionamento do sistema e a seleção de opções mais plausíveis de futuro. Os cenários podem ser *normativos*, quando se aproximam das aspirações do decisor em relação ao futuro plausível, ou *exploratórios*, quando se caracterizam em futuros possíveis ou prováveis, a partir da realidade presente (BUARQUE, 2003).

Neste trabalho, foi elaborado um cenário exploratório da expansão do cultivo de cana-de-açúcar para a produção do etanol no Município de Mineiros, já citado, para o período de 2014 a 2023, considerando que a expansão do plantio ocorrerá nas áreas aptas ao cultivo, conforme preconizado pelo Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (ou simplesmente ZAE Cana) (MANZATTO et al., 2009).

O ZAE Cana é um estudo feito para todo o território nacional visando avaliar, indicar e espacializar as áreas aptas à expansão da cultura em regime sequeiro (sem irrigação plena) para a produção de etanol e açúcar, como base para o planejamento do uso sustentável das terras, em harmonia com a biodiversidade (MANZATTO et al., 2009). A espacialização é disponibilizada na escala 1:250.000.

As áreas de restrição para o cultivo da cana-de-açúcar no ZAE Cana são as terras com declividade superior a 12% (inadequadas para mecanização); áreas cobertas por reflorestamento, vegetação nativa, dunas e afloramento de rochas; e, ainda, áreas de proteção ambiental, terras indígenas, áreas urbanas e de mineração. Em relação às limitações climáticas, as áreas não indicadas são as que se enquadram em parâmetros que caracterizam carência térmica ou alto risco de geada, necessidade de irrigação intensiva ou excesso de água com prejuízo para maturação e colheita.

Considerando os critérios climáticos, as áreas indicadas apresentam temperatura média anual maior que 19°C, Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA) maior que 0,6, risco de geada menor que 20% e deficiência hídrica menor que 200 mm. A avaliação da aptidão considera, ainda, seis fatores de limitação, a saber: (i) deficiência de fertilidade; (ii) deficiência de água; (iii) excesso de água ou deficiência de oxigênio; (iv) suscetibilidade à erosão; (v) impedimentos à mecanização; e (vi) impedimento ao sistema radicular. As terras são classificadas em Preferencial (P), Regular (R), Marginal (M) ou Inapta (IN).

Para o desenvolvimento dos cenários, além do ZAE Cana, foram utilizados os dados do monitoramento da cana-de-açúcar do Canasat (RUDORFF et al., 2010) nos anos de 2005 a 2013 e o limite do Município de Mineiros, proveniente do Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG). O mapeamento do uso e cobertura da terra do SIEG dos anos 2005 e 2010 e o mapeamento dos solos do município (NUNES, 2015) foram utilizados para a caracterização dos principais usos e tipos de solo atingidos pela expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Município de Mineiros.

Todos os dados secundários utilizados foram fornecidos em formato vetorial e estavam georreferenciados. Utilizou-se o programa ARCGIS®, versão 10.2, da ESRI³ para sua integração e análise. Inicialmente, os dados foram transformados para projeção poligônica, *datum* SAD69, e recortados segundo o limite do Município de Mineiros.

A análise teve como objetivo a identificação das áreas anualmente destinadas à cana-de-açúcar no período de 2003 a 2013, identificando sua ocorrência em relação à aptidão das terras. Para tal, foram integradas as classes provenientes:

- do ZAE Cana: as áreas de aptidão preferencial (P) e restrita (R), bem como as áreas sem aptidão (X);
- do Canasat: área total cultivada com cana-de-açúcar.

O período utilizado neste estudo (2003 a 2013) está relacionado à disponibilidade de dados da expansão da cultura de cana-de-açúcar fornecidos

³ Informações sobre o programa ARCGIS®, acessar o site <http://www.esri.com/software/arcgis>.

pelo Canasat. No entanto, no Município de Mineiros, somente a partir do ano de 2008 as áreas destinadas ao cultivo de cana foram registradas. Por conseguinte, para o desenvolvimento do cenário, foram consideradas como referência as áreas ocupadas com o cultivo de cana-de-açúcar em Mineiros no período de 2008 a 2013.

Inicialmente, foi calculada a área ocupada com o cultivo de cana-de-açúcar anualmente por classe de aptidão (P, R e X). Em seguida, foi calculada a taxa relativa de crescimento da área destinada à cana-de-açúcar por ano em relação a cada classe de aptidão, utilizando a Equação 1.

$$T_i = \frac{c_{ix} - c_{ix-1}}{P_i - c_{x-1}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

T_i = taxa anual de crescimento da área destinada à cultura na classe de aptidão i ;

c_{ix} = área de cana na classe de aptidão i no ano x ;

c_{ix-1} = área de cana na classe de aptidão i no ano anterior; e

P_i = área total da classe de aptidão i .

Portanto, a taxa anual de crescimento corresponde ao aumento da área destinada à cultura de cana-de-açúcar em determinado ano em relação à área não ocupada por cana-de-açúcar nesse ano na classe de aptidão considerada.

De forma complementar, o mesmo procedimento de cálculo do aumento das áreas de cana-de-açúcar e estimativa da taxa anual de crescimento foi realizado para a área no Município de Mineiros, com distância de até 30 quilômetros (*buffer*) da localização das usinas do Grupo Odebrecht Agroindustrial: Morro Vermelho, em Mineiros (GO); Água Emendada, em Perolândia (GO); Alto Taquari, em Alto Taquari (MT); e Costa Rica, em Costa Rica (MS).

Utilizando as taxas de crescimento da cana-de-açúcar no município e no *buffer* de 30 km, foram elaborados cenários de crescimento da cultura para o ano de 2023. Três cenários foram estabelecidos:

- no primeiro cenário, considerou-se que a taxa média de crescimento da cultura da cana-de-açúcar em cada classe de aptidão do ZAE Cana (P, R e X) se manterá constante;
- no segundo cenário, considerou-se que não haveria aumento da área destinada à cana-de-açúcar nas zonas sem aptidão (X); e
- no terceiro cenário, considerou-se o fim do cultivo de cana-de-açúcar nas zonas sem aptidão (X).

A expansão da cana-de-açúcar em Mineiros, GO e cenários para 2023

Em 2013, o Município de Mineiros apresentava aproximadamente 51.000 ha de cultivo de cana-de-açúcar. Na Figura 2, é possível visualizar a evolução da área de cana-de-açúcar no município a partir de 2008, ano em que se iniciou o cultivo. Em 2008, havia cerca de 3.000 ha ocupados com cana-de-açúcar e, em 2009, um pouco mais de 15.500 ha. O aumento da área plantada na safra de 2008/2009 pode estar relacionado ao plantio de cana-de-açúcar após o início da implantação da usina agroindustrial Morro Vermelho, que ocorreu em 2007. A partir daí, houve um aumento da área de cultivo bastante acentuado.

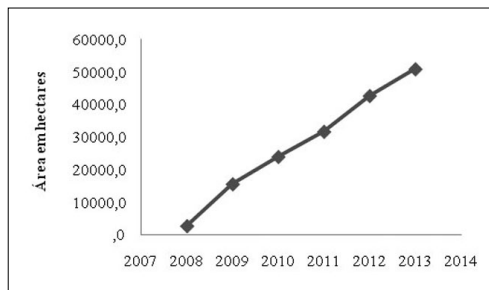


Figura 2. Área total ocupada com cana-de-açúcar no período de 2008 a 2013 em Mineiros, GO.

Fonte: Canasat (2015).

Ao analisarmos as áreas de expansão de cana-de-açúcar nos anos de 2008, 2009 e 2010, comparando-as ao uso e cobertura da terra em 2005, vemos que

em torno de 55% da expansão nesse período ocorreu em áreas de agricultura e 40% em áreas de pastagem. A mesma relação foi observada para as áreas de expansão de cana-de-açúcar de 2011, 2012 e 2013, comparando-as ao uso e cobertura da terra em 2010 (Figura 3).

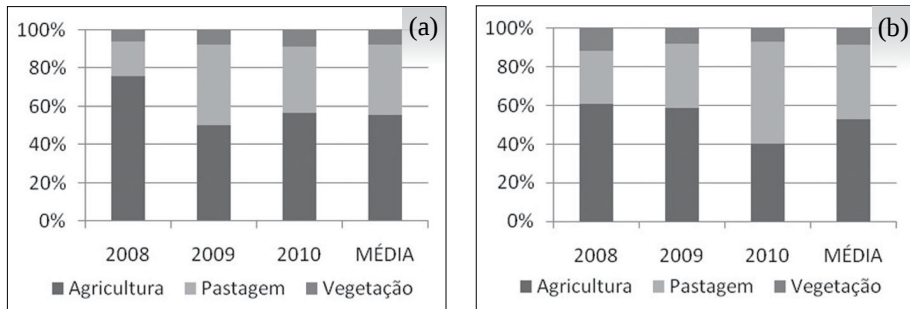


Figura 3. Expansão do cultivo de cana-de-açúcar em relação às classes de uso e ocupação da terra no Município de Mineiros, GO: a) em relação a 2005, no período de 2008 a 2010; e b) em relação a 2010, no período de 2011 a 2013.

Fonte: Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás – SIEG.

A área total mapeada pelo ZAE Cana no Município de Mineiros soma 904.571 ha, sendo que a maior parte (525.800 ha) são áreas sem aptidão (Figura 4).

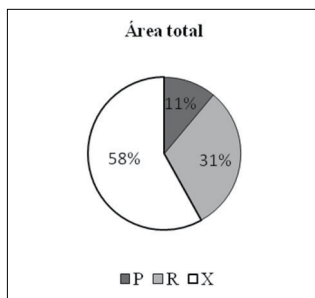


Figura 4. Porcentagem de áreas com aptidão agrícola preferencial (P), restrita (R) e sem aptidão (X), mapeadas no ZAE Cana no Município de Mineiros, GO.

Fonte: Manzatto et al. (2009).

A análise da distribuição das áreas de cana-de-açúcar por classe de aptidão agrícola do ZAE Cana no Município de Mineiros e no *buffer* de 30 km (Figura 4) evidencia que o cultivo ocorre preferencialmente em áreas de aptidão restrita, seguidas de áreas de aptidão preferencial e sem aptidão.

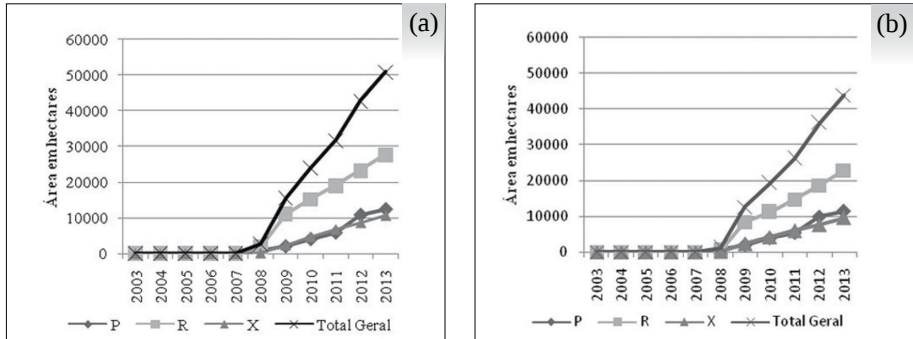


Figura 5. Áreas ocupadas com cana-de-açúcar por classe de aptidão agrícola do ZAE Cana (P – preferencial, R – restrita, X – sem aptidão) no período de 2003 a 2013 em a) Mineiros, GO; e b) área de 30 km ao redor das usinas da região.

Fonte: Canasat (2015) e Manzatto et al. (2009).

Na Figura 6, é apresentada a taxa relativa de crescimento anual da área ocupada pela cultura da cana-de-açúcar por classe do ZAE Cana no Município de Mineiros no período de 2003 a 2013, considerando toda a área do município e a área de 30 km ao redor das usinas da região.

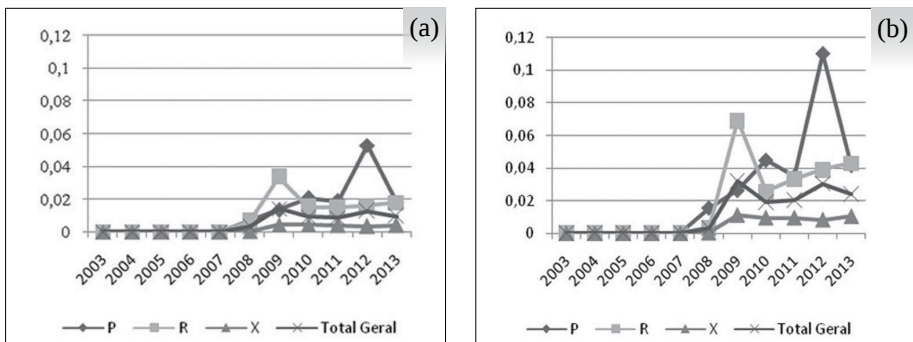


Figura 6. Taxa relativa de crescimento anual da área ocupada pela cultura da cana-de-açúcar por classe do ZAE Cana (P – preferencial, R – restrita, X – sem aptidão) no período de 2003 a 2013 em a) Mineiros, GO; e b) área de 30 km ao redor das usinas da região.

No município, houve um crescimento, em média, de 2,2% e 1,7% ao ano nas classes de aptidão agrícola preferencial e regular, respectivamente. Praticamente não houve crescimento nas áreas ocupadas por cana-de-açúcar nas áreas sem aptidão (X). No entorno das usinas, as taxas de crescimento foram maiores: de 4,6%, 3,5% e 0,8% nas áreas de aptidão preferencial, regular e sem aptidão, respectivamente.

Nota-se, na Figura 6, que houve um pico de crescimento de plantio de cana-de-açúcar nas áreas regulares de aptidão agrícola no ano de 2009 e nas áreas de aptidão preferencial no ano de 2012. O pico de 2009 ocorre após a implantação da usina Morro Vermelho. As taxas de crescimento em áreas de aptidão preferencial, se sobrepondo às taxas de crescimento em áreas de aptidão restrita, são observadas após 2009, ano em que houve a publicação do ZAE Cana.

As áreas de cana-de-açúcar ocorrem em diferentes tipos de solos, com diferentes tipos de limitação ao uso, como indicado na Tabela 1. Observa-se que o cultivo da cana ocorre predominantemente em Latossolos e Neossolos Quartzarênicos, sendo apontadas como principais limitações ao uso agrícola a baixa fertilidade. Porém, deve-se destacar a grande ocorrência de solos de textura arenosa, que são mais suscetíveis à erosão, têm restrita capacidade de armazenamento de água disponível e podem apresentar sérios problemas de lixiviação de nitratos e sulfatos, o que configura grande potencial de poluição dos recursos hídricos. Solos litólicos e hidromórficos, que apresentam limitações ao uso devido aos problemas de drenagem, também são utilizados, embora em menor extensão, para o cultivo da cana-de-açúcar.

Tabela 1. Área ocupada por cana-de-açúcar nos diferentes tipos de solos em Mineiros, GO, e as principais limitações ao uso.

Área de cana-de-açúcar (ha)	Tipo de solo e classe textural	Limitações
12034,65	Latossolo Vermelho Distrófico – textura argilosa a muito argilosa	Baixa fertilidade natural e baixa quantidade de água disponível às plantas e a susceptibilidade à compactação.
11020,90	Latossolo Vermelho Álico – textura média	Baixa fertilidade natural, toxidez devido ao alumínio impede desenvolvimento radicular.
10235,11	Neossolo Quartzarênico Órtico – textura arenosa	Baixa fertilidade natural, sem restrição ao manejo.
7462,83	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico – textura média	Baixa fertilidade natural.
6095,73	Latossolo Vermelho Distrófico – textura média	Baixa fertilidade natural.
2743,21	Argissolo Vermelho Distrófico – textura média a arenosa	Baixa fertilidade natural.
1314,09	Neossolo Quartzarênico Órtico – textura média a arenosa	Baixa fertilidade natural, sem restrição ao manejo.
664,01	Neossolo Litólico Distrófico – textura arenosa a cascalhenta	Baixa fertilidade natural, pouca profundidade, presença da rocha.
381,95	Neossolo Quartzarênico Hidromórfico – textura média a arenosa	Forte restrição à drenagem.
367,90	Gleissolo Háptico Distrófico – textura argilosa	Presença de lençol freático elevado, com riscos de inundação, necessitando de drenagem para seu uso. Raramente apresenta fertilidade alta e a neutralização da acidez pela calagem exige, muitas vezes, grandes quantidades de calcário.
21,05	Cambissolo Háptico Distrófico – textura média	Baixa fertilidade natural, pequena profundidade, ocorrência de pedras na massa do solo.

A taxa relativa de crescimento anual das áreas ocupadas com cana-de-açúcar calculada para o Município de Mineiros foi utilizada para a elaboração dos cenários exploratórios de expansão da cultura no município para produção de etanol no período de 2014 a 2023.

No Cenário 1, que considera a manutenção da taxa de crescimento da cultura em todas as classes de aptidão do ZAE Cana, a estimativa da projeção foi de aproximadamente 126.000 ha de cana-de-açúcar cultivada em 2023. No Cenário 2, que desconsidera aumento de área plantada na classe sem aptidão do ZAE Cana, a área projetada para 2023 foi de 108.000 ha. Já no Cenário 3, o mais conservador, que considera o fim do cultivo em área sem aptidão, a área projetada foi de 97.000 ha. A Figura 7 ilustra a área atual ocupada pela cana-de-açúcar, seu crescimento no período entre 2008 e 2013 e a projeção dessa área nos três cenários.

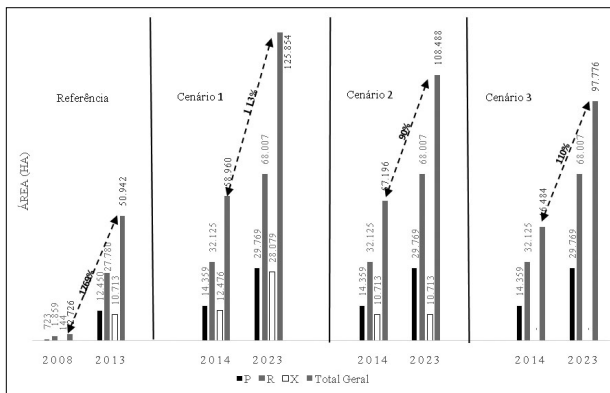


Figura 7. Áreas ocupadas com cana-de-açúcar por classe de aptidão agrícola do ZAE Cana no período de 2003 a 2013 (referências) e projeção para o período de 2014 a 2023 – Mineiros, GO.

Em todos os cenários sugeridos, o aumento da área cultivada se dá em menor proporção que o ocorrido no período de 2008 a 2013 devido à redução de terras disponíveis, fator considerado no modelo. O Cenário 3, de menor crescimento da área cultivada, parte da premissa de que todo o cultivo atual em área sem aptidão (X) seria finalizado, considerando uma total adesão ao ZAE Cana a partir de 2014. Essa condição dificilmente ocorreria e, de fato, não

ocorreu. Os cenários foram criados para uma visão do eventual crescimento da cultura em diferentes situações com a proposta de fornecer subsídios à definição de políticas públicas para a região. Essa informação deve ser analisada à luz da influência de outros fatores socioeconômicos que podem favorecer ou restringir o cultivo da cana-de-açúcar na região.

Estimativa da quantidade de etanol produzido e cenários de expansão

A produção de etanol a partir do cultivo de um hectare de lavoura de cana-de-açúcar irá depender da produtividade física da lavoura e do rendimento industrial da usina. A produtividade, ou rendimento agrícola, é medida em toneladas por hectare de cana e depende do material genético utilizado, dos tratamentos culturais aplicados, das condições edafoclimáticas e do estágio de cultivo da cana-de-açúcar (primeiro corte e cana-soca até reforma/renovação do canavial). A produtividade média da cana-de-açúcar em Goiás é de cerca de 70 t/ha, considerando as variedades plantadas e a produtividade média por corte (do primeiro ao sexto) (CONAB, 2013). Quanto ao rendimento industrial, medido pela quantidade de ATR (Açúcar Total Recuperável), esse índice está associado ao grau de concentração de sacarose que a planta consegue assimilar (rendimento da cana) e está diretamente relacionado às condições de clima, variando bastante entre as regiões produtoras. No Estado de Goiás, a ATR média varia em torno de 141,92 kg/t cana (CONAB, 2013). Com base nesses dados, é possível inferir que são necessários, em média, 12 kg de cana-de-açúcar para produzir um litro de etanol no Estado de Goiás.

A fim de estimar o potencial de produção de etanol, foram considerados os cenários que apresentam o potencial máximo (Cenário 1) e mínimo (Cenário 3) de expansão do cultivo de cana-de-açúcar em Mineiros, e um aumento da produtividade média de 70t/ha em 2013 a 90t/ha em 2023.

A estimativa foi que seria produzido um total de 297 milhões de litros (mil m³) de etanol em 2013. A produção, em 2023, variou de 630 a 943 milhões de litros de etanol. O valor mínimo foi encontrado quando se considerou somente as áreas efetivamente colhidas em determinado ano, considerando ciclo produtivo de cinco cortes para cana-de-açúcar, ou seja, o escalonamento da colheita nas áreas mapeadas.

Considerando que a produção de etanol total em Goiás foi de 3,8 bilhões de litros na safra de 2013/2014 (CONAB, 2015), a produção de etanol estimada para Mineiros em 2013 (297 milhões de litros) equivale a 8% do total produzido em Goiás naquele ano. Essa estimativa é totalmente compatível com a capacidade industrial instalada da unidade Morro Vermelho em Mineiros, cuja capacidade de produção de etanol diária é de 3.200 m³/dia (BOLETIM..., 2015). Para alcançar a produção estimada de etanol, seriam necessários cerca de 100 dias de funcionamento na safra. Já para atender à projeção de produção de etanol estimada para 2023, seria necessário contar com a capacidade instalada das usinas localizadas nos municípios limítrofes a Mineiros (Grupo Odebrecht) ou com a expansão da capacidade industrial da usina Morro Vermelho.

Potencial de redução de Gases de Efeito Estufa (GEE)

Quando se trata das questões relacionadas às mudanças climáticas globais, a expansão sustentável do cultivo de cana-de-açúcar para a produção combustível renovável (etanol) ganha papel de destaque. Cabe ressaltar que está em curso um esforço global com o objetivo fechar um novo acordo entre os países para diminuir a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), reduzindo o aquecimento global e limitando o aumento da temperatura do planeta em 2°C até 2100. Os países estão preparando suas Contribuições Nacionalmente Determinadas Pretendidas (*Intended Nationally Determined Contributions – INDC*) para apresentar na Conferência do Clima (COP) de 2015. No que tange ao setor sucroenergético, de acordo com a UNICA⁴, a INDC brasileira prevê a participação de 18% de bioenergia sustentável – considerando a participação de etanol carburante e demais biomassas derivadas da cana-de-açúcar no total da matriz energética até 2030.

O País pode assumir liderança no cenário internacional quanto à redução de emissão de GEE pela utilização do etanol como combustível automotivo. As emissões evitadas de GEE poderiam ser contabilizadas pelo uso do etanol como substituto da gasolina automotiva, uma vez que o etanol é um biocombustível

⁴ UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Em notícias: Unica analisa com cautela participação dos derivados da cana nas metas da INDC brasileira – depoimento da Presidente da UNICA, Elizabeth Farina, em 29/09/2015. Disponível em: <http://www.unica.com.br/noticia>. Acesso em: 20 set. 2015.

de fonte renovável (cana-de-açúcar). Além disso, na produção do etanol também são evitadas as emissões de GEE pelo uso do bagaço excedente como combustível das unidades industriais, substituindo o óleo combustível. De forma bastante generalizada, a título de ilustração, serão estimada as emissões evitadas pelo uso de etanol em substituição à gasolina, considerando dados de balanço das emissões de GEE na produção e no uso do etanol no Brasil apresentados por Macedo et al. (2004).

Macedo et al. (2004) utilizam técnicas de avaliação do ciclo de vida para a quantificação da energia gasta em cada etapa de produção (agrícola, industrial – considerando a cogeração) e suas correspondentes emissões por conteúdo energético disponibilizado para o uso final do produto. Os autores utilizam dados médios do setor sucroalcooleiro da região Centro-Sul do Brasil e consideram como fonte de GEE as emissões relativas ao uso de combustíveis fósseis e as emissões de outras fontes (queima da palha e decomposição de fertilizantes nos solos). Para expressar os valores das emissões N_2O e CH_4 em CO_2 equivalente, os autores utilizaram o Poder de Aquecimento Global –GWP (equivalência do gás com o CO_2 em função da sua reatividade) de 2001 (HOUGHTON et al., 2001)

De acordo com Macedo et al. (2004), considerando uma possível comparação direta entre motores a gasolina, etanol e flex, assumindo que um litro de etanol anidro equivale a um litro de gasolina (misturado à gasolina na proporção de 25%) e um litro de etanol hidratado equivale a 0,7 litro de gasolina (100% etanol), e contabilizando o uso do bagaço da cana (como emissão evitada no processo de produção do etanol), as emissões líquidas evitadas devido ao uso de etanol em substituição à gasolina seriam:

- 2,6 t $CO_2eq./m^3$ de etanol anidro; e
- 1,7 t $CO_2eq./m^3$ de etanol hidratado.

A usina Morro Vermelho, em Mineiros, produz praticamente 50% de etanol anidro e 50% de etanol hidratado (BOLETIM..., 2015). Nesse caso, considerando o fator de emissão apresentado por Macedo et al. (2004), os valores das emissões evitadas pelo uso do etanol total (anidro e hidratado) como combustível veicular em substituição à gasolina pura (gasolina A) seria

de 638 kt CO₂eq em 2013 e na faixa de 1.500 a 2.200 kt CO₂eq em 2023. O valor estimado de emissões evitadas pelo uso do etanol produzido em Mineiros em 2013 corresponde a cerca de 4% das emissões de GEE do setor energia no Estado de Goiás em 2013, que foi de 15.365 kt CO₂eq (SEEG..., 2015).

Considerações finais

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil continua em franca expansão. O Estado de Goiás tem se configurado como uma região de expansão, e o Sudoeste do estado é considerado como preferencial na consolidação dessa expansão. Nessa região, Mineiros é o segundo município em área plantada de cana-de-açúcar. Em Mineiros há uma usina de produção de etanol e há mais três usinas no seu entorno, situadas em municípios limítrofes.

Em Mineiros, a área agrícola é, tradicionalmente, ocupada com grãos e pecuária. O cultivo de cana-de-açúcar é recente, iniciado em 2008, após a instalação da usina Morro Vermelho. Em um primeiro momento, considerando o uso e a ocupação da terra no ano de 2005 como referência, a cana-de-açúcar ocupou mais as áreas anteriormente destinadas ao cultivo agrícola do que as áreas de pastagens. Nos anos seguintes, tomando como base o ano de 2010, as lavouras canavieiras continuaram a ocupar prioritariamente as áreas agrícolas, exceto no ano de 2013, quando as áreas anteriormente destinadas às pastagens foram mais ocupadas por cana-de-açúcar em relação às áreas agrícolas.

A partir da elaboração de cenários de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Município de Mineiros, com base no ZAE Cana, foi possível notar que o plantio de cana-de-açúcar ocorreu preferencialmente nas áreas de aptidão restrita, seguida das preferenciais e, em menor proporção, nas áreas sem aptidão no período de 2008 a 2013. No mesmo período, as taxas relativas de crescimento anual de área plantada foi maior nas classes de aptidão preferencial (2,2%), seguida da restrita (1,7%) e quase não houve crescimento nas áreas sem aptidão. Nas áreas localizadas até 30 km de raio das usinas instaladas na região (*buffer*), as taxas de crescimento do cultivo de cana-de-açúcar foram superiores: 4,6% na classe preferencial, 3,5% na regular e 0,8 nas áreas sem aptidão. No entanto, foi possível apurar que a maioria dos solos ocupados com lavouras canavieiras no município apresentam algum tipo de fragilidade, tanto

em relação à fertilidade natural, quanto à classe textural, indicando, portanto, a necessidade de investimentos em manejo e fertilidade dos solos. Verificou-se que, inicialmente, pode ter havido um investimento maior na expansão do cultivo de cana-de-açúcar nas áreas com aptidão preferencial em detrimento da restrita, uma vez que, embora o plantio de cana-de-açúcar tenha ocorrido mais nas classes de aptidão agrícola restrita, a taxa de crescimento foi maior nas classes preferenciais.

Os cenários exploratórios mostraram que a expansão da área cultivada alcançará de 97 a 126 mil hectares de cana-de-açúcar em 2023, respectivamente, no Cenário 1, menos restritivo, e no Cenário 3, mais restritivo. Isso corresponde, aproximadamente, a 100% de aumento das áreas de cultivo de cana-de-açúcar no período de 10 anos (2014 a 2023).

A perspectiva é de crescimento da participação do etanol na matriz energética de transportes em função das metas do INDC brasileiro. Dessa forma, espera-se que o incentivo à produção de etanol aumente nos próximos 10 anos. A estimativa do potencial de produção de etanol a partir da área plantada variou de 630 a 943 milhões de litros em 2023, considerando os cenários 1 e 3, respectivamente, ou seja, um aumento de cerca de duas a três vezes em relação à produção de etanol estimada para o ano de 2013. As emissões evitadas de GEE pelo uso do etanol em substituição à gasolina no setor de transporte poderiam alcançar cerca de 4% do total de emissão de GEE contabilizada pelo setor de transporte do Estado de Goiás em 2013.

Os cenários de expansão de cana-de-açúcar no Município de Mineiros permitiram indicar a dinâmica da expansão e apontar algumas fragilidades e potencialidades da produção de etanol no Município de Mineiros. Essa informação pode ser analisada à luz da influência das forças motrizes que atuam nos setores industrial e agropecuário locais, que podem favorecer ou restringir o cultivo da cana-de-açúcar na região.

Referências

- BOLETIM DO ETANOL. Rio de Janeiro: ANP, n. 4, jun. 2015. 25 p. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/SITE/acao/download/?id=76320>>. Acesso em: 20 set. 2015.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2012/2013 a 2022/2023**. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2013. 96 p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2023_ConsultaPublica.pdf>. Acesso em: 27 out. 2015
- BUARQUE, S. C. Técnicas de construção de cenários. In: _____. **Metodologia e técnicas de construção de cenários globais e regionais**. Brasília, DF: IPEA, 2003. p. 50-67. (Textos para discussão, 939).
- CANASAT. São José dos Campos: Inpe, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/tabelas.html>>. Acesso em: 27 out. 2015.
- CONAB (Brasil). **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar: safra 2015/2016: primeiro levantamento**. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_49_33_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_15-16.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2015.
- _____. **Perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil: safra 2011/2012**. Brasília, DF, 2013. 88 p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_10_02_11_28_41_perfil_sucro_2012.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2015.
- HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; LINDEN, P. J. van der; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. A. (Ed.). **Climate change 2001: the scientific basis**. New York: Cambridge University Press, 2001. 881 p. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/>>. Acesso em: 20 set. 2015.
- IBGE. **Censo agropecuário 2006**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/brasil_2006/Brasil_censoagro2006.pdf>. Acesso em: 27 out. 2015.
- _____. **Estimativas populacionais para os municípios brasileiros em 01 de julho de 2014**. Rio de Janeiro, 2014a. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2014>>. Acesso em: 1 set. 2015.

_____. **Produção agrícola municipal 2014:** tabela 1612 - área plantada, área colhida, quantidade produzida e valor da produção da lavoura temporária. Rio de Janeiro, 2014b. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1612&z=p&o=18>>. Acesso em: 1 set. 2015.

_____. **Pesquisa pecuária municipal 2014:** tabela 3939 - efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho. Rio de Janeiro, 2014c. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=3939&z=p&o=28>>. Acesso em: 1 set. 2015.

MACEDO, I. de C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. da. **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e uso do etanol no Brasil.** São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, 2004. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=11168105>>. Acesso em: 20 set. 2015.

MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola.** Piracicaba: Potafos, 1987. p. 113-118.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. (Org.). **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar:** expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009, 55 p. il. (Embrapa Solos. Documentos, 110).

MATOS, C. R. A. de. **Etanol e biodiesel.** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2012. 104 p. (Cadernos de educação ambiental, 11).

NUNES, E. D. **Modelagem de processos erosivos hídricos lineares no município de mineiros - GO.** 2015. 242 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Estudos Socioambientais - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

ROSSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 1, p. 105-119, 2004.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

SEEG: Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa: nota metodológica: setor de energia. São Paulo: Observatório do Clima: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2015. 51 p. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/notas-metodologicas/>>. Acesso em: 20 set. 2015.

SILVA, W. F. da; PEIXINHO, D. M. A expansão do setor sucroenergético em Goiás: a contribuição das políticas públicas. **Campo-Território: Revista de Geografia Agrária**, Uberlândia, v. 7, n. 13, p. 97-114, fev. 2012.

Este livro apresenta parte dos resultados das pesquisas desenvolvidas no Projeto “Novos paradigmas no conhecimento de solos frágeis para a produção agrícola sustentável do Brasil” por pesquisadores da Rede de Pesquisa Brasileira em Solos Frágeis, cujo objetivo maior foi avançar no conhecimento sobre esses solos de modo a viabilizar seu uso agrícola sustentável. Esses solos apresentam características intrínsecas e/ou ocupam posição na paisagem que lhes conferem baixa resiliência e elevada suscetibilidade à degradação física, química e biológica quando submetidos ao uso.

Os 14 capítulos estão distribuídos em três grandes blocos temáticos: (1) Caracterização e Critérios de Distingção, (2) Manejo e (3) Avaliação da Sustentabilidade do Uso de Solos Frágeis. Inicialmente, discute-se a polêmica questão conceitual e considera-se a distribuição e a ocorrência desses solos no Brasil. Em seguida, os textos tratam do uso de técnicas de geotecnologias, com ênfase em mapeamento digital de solos em escala de detalhe, e também de avaliações em séries históricas de uso com base em imagens de satélite, de modo a compreender a dinâmica evolutiva e suas respectivas consequências. Nos demais capítulos, os leitores poderão conhecer os tipos de solos frágeis e seu comportamento sob diferentes sistemas de manejo e produção agrícola em estudos realizados no Nordeste Brasileiro, em São Paulo e em Goiás.

Os estudos apresentados nesta coletânea revelam que as ações humanas já resultaram em impactos diversos sobre esses solos; que essas ações podem ser moduladas nas mais diversas escalas, sobretudo nas locais e regionais; e que a fragilidade dos agrossistemas depende mais do manejo do que da aptidão e da vulnerabilidade dos solos. E, de certo modo, fortalecem o pressuposto de que o conhecimento do solo é questão chave para a governança de territórios e para a garantia do desenvolvimento sustentável.

Apoio:



Ministério da
**Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PÁTRIA EDUCADORA



CGPE 12516