

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS DE VEREDAS DO TRIÂNGULO  
MINEIRO, REGIÃO DE UBERLÂNDIA, MG**

**DIOGO COSTA NASCIMENTO**

**UBERLÂNDIA**  
**2016**

**DIOGO COSTA NASCIMENTO**

**ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS DE VEREDAS DO TRIÂNGULO  
MINEIRO, REGIÃO DE UBERLÂNDIA, MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós graduação em Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração em Processos Ambientais, para obtenção do título de “Mestre em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental”.

**Orientador:** Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro.

**UBERLÂNDIA**

**2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

N244e Nascimento, Diogo Costa, 1990  
2016 Elementos-traço em solos de veredas do Triângulo Mineiro, região  
de Uberlândia, MG / Diogo Costa Nascimento. - 2016.  
90 f. : il.

Orientador: Bruno Teixeira Ribeiro.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental.  
Inclui bibliografia.

1. Qualidade Ambiental - Teses. 2. Vereda - Teses. 3. Elementos  
traços - Aspectos ambientais - Teses. 4. Solos - Teses. I. Ribeiro, Bruno  
Teixeira. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-  
Graduação em Qualidade Ambiental. III. Título.

**DIOGO COSTA NASCIMENTO**

**ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS DE VEREDAS DO TRIÂNGULO  
MINEIRO, REGIÃO DE UBERLÂNDIA, MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós graduação em Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração em Processos Ambientais, para obtenção do título de “Mestre em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental”.

Uberlândia, 24 de maio de 2016

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro - Orientador  
Departamento de Ciência do Solo - UFLA

---

Prof. Dr. Enio Tarso de Souza Costa  
Instituto de Ciências Agrárias - UFU

---

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira  
Instituto de Ciências Agrárias – UFU

---

Prof. Dr. Guilherme Lopes  
Departamento de Ciência do Solo - UFLA

Àqueles que me concedem a maior das  
alegrias: meus pais.

## **AGRADECIMENTOS:**

Embora uma dissertação seja, pela sua finalidade acadêmica, um trabalho individual, há contributos de naturezas diversas que eu não poderia deixar passar em branco, pois enxergo nesse trabalho o ápice de um processo, repleto de agentes, períodos e histórias.

Por essa razão, desejo expressar aqui os meus sinceros agradecimentos a todos que de forma ou outra contribuíram para minha formação acadêmica e acima de tudo humana ao longo dos anos, pois o trabalho que se segue é resultado de uma etapa da vida compartilhada com muitas pessoas queridas, que me fizeram ser quem eu sou hoje.

Agradeço então, em primeiro lugar, à sociedade brasileira, da qual o suor e o trabalho me proporcionaram a oportunidade de cursar um mestrado em uma instituição pública e gratuita.

Agradeço meus familiares pelo apoio e incentivo de sempre. De maneira muito especial, agradeço minha mãe, Maria Aparecida, pelo espírito libertário que me educou, e que nunca deixou faltar amor, confiança e apoio. Agradeço com muito carinho ao meu pai Rene e meu irmão Emerson, sempre presentes e agentes direto de minha formação.

Aos meus amigos que sempre se fizeram presentes e que compartilharam comigo vários momentos. Obrigado a todos vocês. No limiar dos meus 25 anos já não consigo enumerar todos, sintam-se, portanto, agradecidos. Vocês são com certeza uma das melhores dádivas que a vida me deu.

Aos colegas do PPGMQ, pelo companheirismo e pelos conhecimentos compartilhados durante os dois anos que passamos juntos em Uberlândia, vocês foram demais.

Agradeço aos professores do PPGMQ e técnicos de laboratório do Instituto de Ciências Agrárias da UFU, que me auxiliaram e contribuíram para meu aprimoramento em vários momentos, seja nas aulas, me ajudando a resolver pendências e assuntos acadêmicos, me auxiliando em atividades de pesquisa nos laboratórios ou simplesmente trocando palavras de conforto e de incentivo. Deixo um obrigado em especial para o prof. Ednaldo Carvalho Guimarães e a pós-doutoranda Simone Braga pela ajuda e apoio no tratamento estatístico para apresentação dos dados e resultados e para Glaicon Florisbelo, Élen Rufino, Diesley, Marília, Manoel, Gilda, Marinho, Eduardo, Marco Aurélio, Angélica e Márcia Batistela pelo apoio nas práticas laboratoriais, administrativas e de

campo. Agradeço também ao coordenador do PPGMQ, professor Lucas Carvalho Basílio de Azevedo, pela atenção dispensada.

Deixo também um muito obrigado aos colegas de orientação e estudantes de iniciação científica. Sem vocês nada disso seria possível. Valeu Carolina Berbert, Gabrielly, Camila Borges e Elisabeth Garcia.

Agradeço de maneira muito especial as orientações, disponibilidade e presença constante do professor Bruno Teixeira Ribeiro. Agradeço a confiança em mim depositada e ao apoio, disposição, empatia e incentivo durante a realização deste trabalho. Obrigado pelos exemplos e valiosos ensinamentos.

Agradeço as contribuições da banca avaliadora deste trabalho, professores Enio, Guilherme e Hamilton, pelo cuidado e critério nas revisões e pelas válidas sugestões e ensinamentos.

Agradeço ainda aos professores que marcaram de maneira muito profunda minha formação, em especial à Beatriz Ribeiro Soares, Ângela Soares, Rita de Cássia, Vânia Rosolen, Adriano Rodrigues dos Santos. Vocês me ensinaram que o motor propulsor da atividade intelectual é a vontade de transformação. Gratidão também ao prof. Heitor Sayeg pela revisão textual e dicas de melhorias para esse trabalho. Obrigado a vocês, professores e orientadores, que me incentivaram e possibilitaram minha inserção na vida científica, e que além de bons e admiráveis profissionais, foram bons amigos. Muito obrigado pelo empenho, dedicação e compromisso com o ensino e com a pesquisa.

Deixo também meus agradecimentos ao CNPq pelo financiamento do projeto que subsidiou o presente trabalho (Processo 475922/2013-01) e a CAPES, pela concessão da bolsa de estudos. Ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pelo apoio na concessão de veículos para as idas ao campo. Ao Departamento de Ciência do Solo (DCS), da Universidade Federal de Lavras, pela parceria na realização deste trabalho, pela disponibilização de laboratórios, equipamentos e pessoal (especialmente os técnicos João G. Penha, Geila S. Carvalho e Carlos A. Ribeiro) para determinação dos elementos-traço.

Agradeço também aos homens e mulheres que batalham por um Brasil melhor, mais justo, libertário e igualitário e aos grandes intérpretes do Brasil, os produtores de ciência.

Por fim, destaco o meu agradecimento ao autor maior de toda essa conjuntura, aquele que me possibilitou a vida e capacidade para realizar feitos e trilhar caminhos incríveis, e que me conduz e protege com maestria rumo a novos horizontes e desafios,

na incessante busca de minha missão neste plano.

Infelizmente, não é possível citar aqui todos aqueles aos quais devo agradecimentos, todavia sintam-se agradecidos. Um pouco de cada um desses que fizeram parte de minha história carrego comigo, com muito carinho.

## **BIOGRAFIA:**

Diogo Costa Nascimento, nascido em 04 de dezembro de 1990, é natural de Uberlândia, cidade do estado de MG.

Cursou o ensino fundamental e médio na rede pública do Estado de Minas Gerais, na cidade de Tupaciguara.

Em 2009 ingressou no curso de graduação em Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, onde obteve o título de licenciado em Geografia em 2013, no ano acadêmico seguinte defendeu a monografia intitulada “Determinação do teor e natureza do Carbono orgânico no sistema solo laterítico - solo hidromórfico em área de Chapada no oeste Mineiro”, obtendo o título de bacharel em Geografia.

Durante a graduação foi bolsista de Iniciação Científica do CNPq e esteve envolto em pesquisas relacionadas à conversão do cerrado em sistemas agrícolas e impactos da conversão do solo no teor e natureza do Carbono orgânico em ambientes úmidos em área de Chapada, localizada no oeste do estado de Minas Gerais.

Enquanto estudante de graduação, compôs o quadro de membros da Empresa Júnior do curso, atuando na avaliação, planejamento e execução de projetos e soluções socioambientais. Participou também do Diretório Central dos Estudantes da Universidade Federal de Uberlândia.

Em 2014 ingressou no programa de Pós graduação em Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração em Processos Ambientais, sob a orientação do professor Dr. Bruno Teixeira Ribeiro.

Possui interesse na área de Geociências (ênfase em Ciência do Solo, Geoestatística e Sistemas de Informações Geográficas - SIG's), Planejamento Ambiental e Conservação e uso sustentável do bioma cerrado.

Atualmente desenvolve pesquisa sobre disponibilidade e concentração de elementos-traço de relevância ambiental em áreas úmidas do cerrado. É colaborador do Laboratório de Qualidade Ambiental (LAQUA/ICIAG/UFU) e é Professor de Educação Básica do quadro de servidores da Secretaria de Estado de Educação de Minas Gerais.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO GERAL.....</b>	14
<b>GENERAL ABSTRACT .....</b>	15
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	16
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	18
2.1 O cerrado brasileiro e as fitofisionômias de vereda .....	18
2.2 Leis e dispositivos de gestão ambiental aplicados em ambientes de veredas .....	25
2.3 Elementos-traço nos geossistemas terrestres.....	28
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	35
3.1 Descrição da área .....	35
3.2 Avaliação temporal do uso da solo em veredas do Triângulo Mineiro .....	39
3.3 Monitoramento da profundidade e coleta de água subsuperficial .....	42
3.4 Preparo das amostras de solo.....	43
3.5 Caracterização física.....	43
3.6 Caracterização química .....	46
3.7 Extração e quantificação dos elementos – método USEPA 3051A .....	54
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	57
4.1 Modificação do uso do solo no entorno das veredas selecionadas para o estudo .....	57
4.2 Variação da profundidade da água subsuperficial, pH e condutividade elétrica.....	60
4.3 Variação do potencial redox .....	67
4.4 Concentração de elementos-traço nas amostras de solo .....	70
<b>5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	81
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	82

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

FIGURA 1. Fitofissionomia de vereda (a) epedoambientes característicos na alta (b), média (c) e baixa vertente (d) .....	21
FIGURA 2. Áreas de ocorrência de veredas no estado de Minas Gerais, Brasil.....	22
FIGURA 3. Processos que governam a solubilidade, mobilidade e disponibilidade de elementos-traço e tóxicos no solo. ....	31
FIGURA 4. Localização das veredas selecionadas para o estudo e detalhes da paisagem, região de Uberlândia, MG. ....	35
FIGURA 5. Detalhe do esquema de amostragem realizada em cada segmento de vereda. ....	36
FIGURA 6. (a) Temperatura média e precipitação mensal da região de Uberlândia (série histórica/1981-2013) e para o período de set./2014 a set./2015) (b) .....	37
FIGURA 7. Modelos digitais de elevação de cada segmento de vereda estudado. ....	38
FIGURA 8. Representação esquemática da vista lateral de um dos transectos com a instalação dos tubos de PVC nos terços superior e médio dentro da região hidromórfica. ....	42
FIGURA 9. Detalhe da montagem do ensaio de incubação, em condições laboratoriais, para acompanhamento da variação do potencial redox. ....	54
FIGURA 10. Curvas-padrão obtidas para Cd, Pb, As, Se e Ni (espectrofotômetro de absorção atômica com módulo em forno de grafite); Zn, Fe, Cu e Mn (espectrofotômetro de absorção atômica com módulo de chama). LD <sub>A</sub> = limite de detecção do aparelho... ..	55
FIGURA 11. Alternância do uso do solo na vereda 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e) e 6 (f). ....	58
FIGURA 12. Variação da profundidade do lençol freático nos terços superior, médio e inferior nas veredas: V1(a), V2(b), V3(c), V5(d) e V6(e).....	62
FIGURA 13. Variação do pH nos terços superior, médio e inferior nas veredas: V1(a), V2(b), V3(c), V5(d) e V6(e).....	65
FIGURA 14. Variação da CE nos terços superior, médio e inferior nas veredas: V1(a), V2(b), V3(c), V5(d) e V6(e).....	66
FIGURA 15. Variação temporal do Eh e pH das amostras das camadas 0-20 cm e 40-70 cm, das veredas 1 e 3, saturadas em condições laboratoriais no período de 48 dias. ....	67

FIGURA 16. Concentração de Cd nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média. ....	71
FIGURA 17. Concentração de Pb nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média. ....	72
FIGURA 18. Concentração de As nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média. ....	73
FIGURA 19. Concentração de Se nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média. ....	74
FIGURA 20. Concentração de Ni nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média. ....	75
FIGURA 21. Concentração de Fe nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média. ....	76
FIGURA 22. Concentração de Cu nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média. ....	77
FIGURA 23. Concentração de Mn nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média. ....	78
FIGURA 24. Concentração de Zn nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média. ....	79
FIGURA 25. Análise de componentes principais entre a concentração dos elementos-traço e atributos químicos e físicos das amostras de solos das veredas selecionadas, ambas camadas.....	80

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1. Dispositivos de gestão ambiental em veredas.....	27
TABELA 2. Valores Orientadores para qualidade dos solos em Minas Gerais - 2011..	32
TABELA 3. Chave de interpretação para análise de imagens de satélite.....	40
TABELA 4. Chave de interpretação para análise de fotografias aéreas.....	41
TABELA 5. Teores de argila, silte, areia e densidade de partículas do solo (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nas posições P1, terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI) das veredas selecionadas para o estudo.....	45
TABELA 6. Cor do solo (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nas posições P1, terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI) das veredas selecionadas para o estudo... ..	46
TABELA 7. Atributos químicos do solo (0-20 cm) nas posições P1, terço superior (TS), terço TM (TM) e terço TI (TI) das veredas selecionadas para o estudo.....	48
TABELA 8. Atributos químicos do solo (0-20 cont.) nas posições P1, terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI) das veredas selecionadas para o estudo. ..	49
TABELA 9. Atributos químicos do solo (40-70 cm). ..	50
TABELA 10. Atributos químicos do solo (40-70 cont.) ..	51
TABELA 11. Carbono orgânico das frações ácido fúlvico, ácido húmico e humina.....	52
TABELA 12. Estimativa de dias/ano de inundação em veredas do Triângulo Mineiro	63
TABELA 13. Parâmetros de qualidade da água em veredas do Triângulo Mineiro. ....	64

## **LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIAÇÕES**

CE – Condutividade elétrica  
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de SP  
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente  
COT – Carbono Orgânico Total  
CTC – Capacidade de Troca Catiônica  
DSG – Departamento de Serviço Geográfico  
Eh – Potencial de Oxirredução  
ET – Elemento-traço  
FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente de MG  
GEE – Gases de Efeito Estufa  
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
IUCN - International Union for Conservation of Nature  
MMA – Ministério do Meio Ambiente  
MOS – Matéria orgânica do solo  
NA – Nível da água freática  
NIST – US National Institute of Standards Technology  
PCA – Principal Component Analysis  
SH – Substância Húmica  
TFSA – Terra Fina Seca ao Ar  
USEPA – US Environmental Protection Agency  
VP – Valor de Prevenção  
VRQ – Valor de Referência de Qualidade

## **RESUMO**

Veredas são ecossistemas úmidos de grande importância ambiental no Bioma Cerrado, como: recarga de aquíferos, ocorrência de nascentes, estoque de carbono, emissão de gases ( $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ ) e, também, funções ecológicas e sociais. Pela posição que ocupam na paisagem, as veredas são sujeitas à contaminação devido à possibilidade de acúmulo de sedimentos de erosão e água da enxurrada das encostas. Essa condição torna-se ainda mais preocupante após a grande transformação ocorrida no cerrado nos últimos 40 anos. Objetivou-se com este trabalho avaliar a concentração de elementos-traço (Cd, Pb, As, Se, Ni, Zn, Cu e Mn) e Fe em amostras de solos de veredas da região de Uberlândia, MG. Foram selecionadas seis veredas, onde coletou-se amostras de solo das camadas 0-20 cm e 40-70 cm, em triplicada, em três posições das veredas (terço superior, terço médio e terço inferior) e, também, em uma posição a montante das veredas (encosta fora da região hidromórfica). Em cada posição estabelecida dentro da vereda, instalou-se tubos de PVC (15 cm de diâmetro e 1,50 m de comprimento), funcionando como piezômetros, para acompanhamento da variação da profundidade da água subsuperficial e coleta de amostras de água para determinação do pH e condutividade eletrolítica. Esse acompanhamento foi realizado mensalmente no período de setembro de 2014 a setembro de 2015. Nas amostras de solo realizou-se a caracterização química, física (textura e densidade de partículas), cor do solo e quantificação da matéria orgânica (carbono orgânico total, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina). Os elementos-traço foram determinados em espectrofotômetro de absorção atômica (módulo de forno de grafite ou chama), após digestão em ácido nítrico assistida por micro-ondas (método USEPA 3051A). A concentração dos elementos-traço estudados esteve abaixo dos valores de prevenção (VP) estabelecidos pela legislação brasileira. Elementos-traço na forma catiônica (Cd, Pb, Ni, Cu, Mn e Zn) apresentaram associação com a matéria orgânica das veredas (carbono orgânico total, ácido húmico, ácido fúlvico e humina). Elementos-traço na forma aniônica (Se e As) e, também, o Fe (não considerado elemento-traço) tiveram associação com o teor de argila. Principalmente os catiônicos, observou-se um aumento da concentração da borda para o interior da vereda, seguindo o aumento gradual da matéria orgânica. Ressalta-se, aqui, no que diz respeito à concentração dos elementos encontrada, que com este estudo avaliou-se de forma pontual seis veredas da região de Uberlândia, não permitindo extrapolações no que diz respeito à qualidade de solos de veredas. O trabalho contribui para a construção de um banco de dados sobre elementos-traço em veredas do cerrado.

**Palavras-chave:** Solos hidromórficos. Área úmida. Contaminação do solo. Elementos-traço.

## ABSTRACT

Cerrado wetlands (locally called as veredas) play important environmental roles, such as: carbon sink and reservoir; water storage and ground water maintenance; greenhouse gas emissions (N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>S); and ecological and social functions. Due to their position in the landscape, the wetlands are subjected to contamination by erosion sediments and runoff. This is may be critical after the significant transformation of native Cerrado for crop-livestock production during the past 40 years. This work was carried out aiming to evaluate the trace-elements concentration in soils from six veredas in the Brazilian Savanna Biome (Cerrado). Triplicate surface (0-20 cm) and subsurface (40-70 cm) samples were collected in the upper, middle and lowest position in the wetlands for physical and chemical characterization and to measure the concentration of As, Cd, Pb, Se, Ni, Zn, Cu, Mn and Fe (not trace element) by USEPA 3051A method. In each position in the wetlands, PVC tubes (1.5 m high and 15 cm diameter) were inserted into the soil ( $\square$  1.0 m depth) to monitor monthly the ground water level and to water sampling. The pH and electrical conductivity were measured in the water samples. The concentration of all trace-elements is below the threshold values established by Brazilian guidelines. Cationic trace-elements (Cd, Pb, Ni, Cu, Mn and Zn) were correlated to soil organic matter fractions. Anionic trace-elements were correlated to Fe and clay content. The cationic trace-elements concentration increased from the upper position to lowest position. This work evaluated six fragments of Cerrado wetlands around Uberlândia, MG, Brazil. So, the statement regarding the soil quality from veredas is not possible. The results from this work help to build-up the inventory of the trace-element concentration in soils from Cerrado wetlands.

Keywords: Hydromorphic soils. Waterlogged. Soil contamination. Heavy metals

## 1. INTRODUÇÃO

O marco para a necessidade de conservação das áreas úmidas (*wetlands*) no mundo ocorreu com a Convenção sobre Zonas Úmidas de Importância Internacional (Convenção de RAMSAR), que ocorreu em 1971 e influenciou o despertar de maior interesse científico aos processos e atividades que influem negativamente sobre os ecossistemas úmidos (JUNK et al., 2013).

Em *wetlands* do mundo e do Brasil, pesquisas vem sendo conduzidas evidenciando aspectos da importância ambiental e valor econômico, social e científico de tais áreas. Nas últimas décadas, as áreas úmidas têm sido foco de estudos científicos em diversas áreas do conhecimento, possibilitando a compreensão da grande relevância dos serviços ecossistêmicos desempenhados por essas áreas. Dado o consolidação constante de uma sociedade urbana e industrial, atenção aos processos que ocorrem em *wetlands*, como armazenamento e ciclagem de Carbono (GORHAN, 1991; NEUE, 1997) e capacidade de armazenamento de elementos deletérios à saúde humana e qualidade ambiental (OLIVE-LAUQUET et al., 2001; GRYBOS et al., 2007; BAI et al., 2010; ROSOLEN et al., 2015), são algumas das pautas de pesquisas científicas sobre *wetlands* em diversos países.

No Brasil as áreas úmidas são caracterizadas por intensas diversidades regionais, ocorrendo diversas tipologias de áreas úmidas em função de condições hídricas, fatores físicos e químicos de água e dos solos e parâmetros florísticos. Sob esse contexto, estima-se que 20% do território brasileiro sejam cobertos por *wetlands* (JUNK et al., 2013). Dado a grande biodiversidade e funções ambientais desempenhados por tais ambientes, assuntos como caracterização ambiental (CORRÊA, 1989; LIMA, 1996; PAULINO et al., 2015; RAMOS et al., 2006; RIBEIRO; WALTER, 2008), contaminação e poluição do solo e água (MORAES; HORN, 2010; ROSOLEN et al., 2015), importância hídrica (CARVALHO, 1991; FERREIRA, 2005; BOAVENTURA, 2007) e biodiversidade (ARAÚJO et al., 2002; GUIMARÃES et al., 2002) estão presentes na literatura científica sobre áreas úmidas do cerrado.

As paisagens de veredas são *wetlands* típicas do cerrado brasileiro, que se desenvolvem nas áreas de nascente do bioma cerrado e/ou em depressões alagadiças da paisagem, paralelas a linha de drenagem fluvial. Os solos de ocorrência nas veredas são influenciados pela flutuação sazonal do lençol freático, constituindo-se em ambientes de oxirredução e de grande aporte de matéria orgânica, dado a ocorrência de ambiente mal

aerado, de ciclagem lenta de nutrientes. Tendo em vista essas particularidades, paisagens de veredas têm capacidade tamponante sobre contaminantes e poluentes do solo e água, como os metais pesados (ROSOLEN et al., 2015). As veredas são subsistemas úmidos de grande importância ambiental no cerrado, também pela: recarga de aquíferos, ocorrência de nascentes, estoque de carbono, emissão de gases ( $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ ) e, também, funções ecológicas e sociais.

No cerrado brasileiro, políticas de Estado para a ocupação do bioma foram amplamente difundidas a partir da segunda metade do século XX, proporcionando uma revolução agrícola na produção mundial de alimentos (LOPES; GUILHERME, 2016), por meio de sucessivos programas de colonização agrícola como o Programa Japonês-Brasileiro de Desenvolvimento Agrícola das Regiões do Cerrado (PRODECER) (PÊSSOA; INOCÊNCIO, 2014), Programa de Colonização Dirigido do Alto Paranaíba (PADAD), Programa de Desenvolvimento dos Cerrados (POLOCENTRO) (BITTENCOURT ROSA et al., 2015), Programa Nacional para Aproveitamento de Várzeas Irrigáveis (PROVARZEAS) (ROSOLEN et al., 2015), entre outros.

Com a rápida expansão de atividades econômicas vista no cerrado nos últimos 50 anos, é consenso que os ambientes naturais estão cada vez mais sob a influência de atividades antrópicas e tal fato também se estende aos ecossistemas úmidos, as *wetlands*. Sob essa premissa, o presente trabalho se justifica face a escassez de informações de *background* geoquímico para os diversos sistemas úmidos tropicais e estudos que busquem compreender os processos ambientais que atuam na dinâmica de elementos-traço de solos de veredas do Triângulo Mineiro.

Objetivou-se com este trabalho fazer um levantamento da concentração de Cd, Pb, As, Se, Ni, Cu, Zn, Mn (elementos-traço de relevância ambiental) e Fe, em solos de seis veredas da região de Uberlândia, MG. Pretende-se contribuir para o inventário de elementos-traço em áreas úmidas do cerrado brasileiro.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O cerrado brasileiro e as fitofisionomias de vereda

A diversidade de paisagens no domínio do cerrado brasileiro é assunto que vem sendo incorporado à literatura científica desde meados do século XIX. Até então, por interesse da coroa portuguesa sobre a colônia tropical, haviam sido produzidos vários relatos de expedições de viajantes e naturalistas no interior do Brasil, que contribuíram para elucidar e sistematizar o conhecimento acerca de múltiplos aspectos relacionados à diversidade e à riqueza natural do bioma cerrado. Nesse período, uma tímida ocupação antrópica se fazia presente, devido, sobretudo, ao estabelecimento de rotas e núcleos de povoamento visando consolidar a exploração de recursos naturais como ouro, diamantes e a extração de recursos madeireiros. Estavam lançadas as bases para a incorporação do cerrado aos circuitos produtivos (SILVA, 2001).

A ocupação do bioma cerrado foi ocorrendo gradativamente ao longo das décadas subsequentes aos anos de 1850. Essa ocupação somente adquiriu ímpeto na segunda metade do século XX. Medidas estatais associadas aos pacotes tecnológicos advindos da Revolução Verde, sobretudo após 1960, desempenharam papel estratégico na incorporação do bioma na economia do país, contribuindo para consagrar o agronegócio (produção, transformação, distribuição e consumo de produtos agrícolas) e o mercado de *commodities* em um dos sustentáculos da economia brasileira (FERREIRA; TROPPMAIR, 2004).

Principalmente a partir de 1970 o uso de corretivos e fertilizantes, defensivos agrícolas, melhoramento genético e mecanização agrícola passaram a produzir uma nova lógica de ocupação produtiva do cerrado, na qual o Estado desempenhou papel de agente indutor no incentivo à expansão das fronteiras agrícolas, propiciando incremento e diversificação da produção, aumento da produtividade e maior poder de competitividade no contexto de agricultura em país tropical. Várias foram as medidas e ferramentas que o Estado utilizou para que o cerrado se configurasse como um verdadeiro “*Celeiro do Mundo*”, tais como: créditos rurais, assistência técnica governamental, subsídios e incentivos fiscais, introdução de infraestrutura e criação de centros de pesquisa (LOPES; GUILHERME, 2016).

Nas últimas décadas, as taxas de conversão do uso no solo no cerrado se acentuaram notavelmente e promoveram grandes alterações paisagísticas na área de abrangência desse domínio (SHIKI, 1997; MANTOVANI; PEREIRA, 1998; SANO et

al., 2008). A ocupação da região dos cerrados têm promovido diversos impactos ambientais devido a não utilização de tecnologias adequadas e também devido à grande extensão territorial das ocupações (MANTOVANI; PEREIRA, 1998).

Em condições originais, a abrangência do cerrado se estendia por uma área de aproximadamente 2.045.064 km<sup>2</sup>, o que representa aproximadamente 24% do território brasileiro (IBGE, 2004). Nos últimos 35 anos mais da metade de sua área foi convertida em áreas cultivadas, como pastagens plantadas e culturas anuais (KLINK; MACHADO, 2005). O cerrado brasileiro, com a sua enorme diversidade biológica e cultural, vem se transformando em uma área de expansão de grandes latifúndios produtivos pelas vantagens competitivas que oferece, seja pela riqueza hídrica que abriga, seja pela topografia plana de suas chapadas (PORTO-GONÇALVES, 2004).

O bioma cerrado é o segundo maior bioma brasileiro em extensão (IBGE, 2004) e o que comporta a maior biodiversidade no contexto dos ambientes savânicos da Terra (Walter, 2006). Dado o elevado grau de conversão da terra, alto endemismo de espécies e baixo porcentual de áreas de proteção integral, o cerrado é, juntamente com a mata atlântica, um dos biomas mais ameaçados do mundo, tanto que é considerado um *hotspot* (área prioritária) mundial para conservação (MYERS, 2000; KLINK; MACHADO, 2005; BRASIL, 2014).

O domínio dos cerrados ocupa predominantemente maciços planálticos de estrutura complexa, caracterizados por superfícies planas culminantes e um conjunto significativo de planaltos sedimentares compartmentados, situados em níveis que variam entre 300 e 1.700 m de altitude (AB'SABER, 2003) e é caracterizado por duas estações bem definidas, com verão chuvoso e inverno seco. Na região do Triângulo Mineiro a temperatura média anual é de 23,5 °C, com taxas de precipitação média anual de 1500 mm (SILVA et al., 2008).

Em termos fitofisionômicos, o cerrado apresenta diferentes formações em sua área de abrangência, tais como: 1) formações florestais: mata ciliar, mata de galeria, mata seca e cerradão; 2) savânicas: cerrado sentido restrito, parque de cerrado, palmeiral e vereda; 3) campestres: campo sujo, campo limpo e campo rupestre (RIBEIRO; WALTER, 2008).

No estado de Minas Gerais, o cerrado é o bioma que ocupa a maior extensão territorial e é encontrado nas regiões Norte, Noroeste, Sul/Sudoeste, Oeste, Central Mineira, Região Metropolitana, Jequitinhonha e Triângulo e Alto Paranaíba (IBGE, 2004). Entre o mosaico de diferentes ambientes fitofisionômicos no cerrado, ocorre a presença de áreas úmidas de grande relevância ambiental e ecológica, como covoais,

campos úmidos e veredas. No cerrado do oeste de Minas Gerais, região do Triângulo Mineiro, tais ambientes compreendem as porções de fundo de vales e também ambientes suspensos nas vertentes, sobre crostas lateríticas ou ainda em áreas de topo de superfícies de Chapada (NISHIYAMA; RIBEIRO, 2008).

As áreas úmidas são regiões de transição entre sistemas de suporte terrestres e aquáticos, que na maior parte do tempo encontram-se saturadas e/ou inundadas. Ocorrem em regiões nas quais predominam, sazonalmente, altas taxas de flutuação do lençol freático. Grande parte dos sistemas úmidos do planeta estão compreendidos nas zonas intertropicais e a importância das áreas úmidas para o ciclo global do carbono, balanço hídrico e biodiversidade é proporcionalmente maior, ao se comparar as demais áreas da Terra (NEUE et al., 1997).

Áreas úmidas são segmentos de paisagem constituídos por solos hidromórficos, são ecossistemas frágeis e de alta complexidade ecológica. As áreas úmidas são fundamentais para o processo de estabilidade ambiental e manutenção da biodiversidade. Por estarem em relevos planos ou abaciados, encontram-se frequentemente, com elevados níveis de saturação hídrica, situação essa que favorece a capacidade de fixação de carbono que, por sua vez, resulta em uma alta capacidade de retenção de água e de íons no solo, aumentando a capacidade de filtragem das águas e de regularização da vazão dos cursos d'água (IBAMA, 2008).

Em um contexto mundial no qual estima-se que 50% das áreas úmidas mundiais foram convertidas no século XX, (IUCN, 2000; JUNK et al., 2013; TEEB, 2013) é importante compreender a relevância estratégica que as áreas úmidas representam em ambientes de cerrado, face às múltiplas funções que desempenha.

As paisagens de veredas (Figura 1) se constituem em áreas úmidas do Brasil interiorano e apresentam nível de variação hídrica relativamente estável (JUNK et al., 2013), integram as fitofisionomias do cerrado e são evidenciadas como formações Savânicas (SANO; ALMEIDA, 1998).

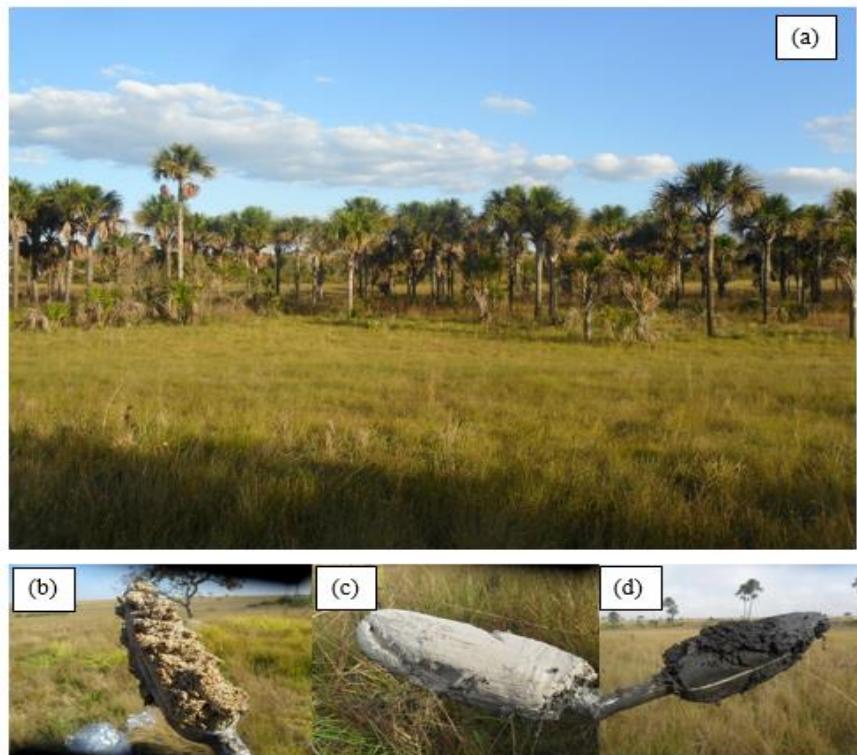


FIGURA 1. Fitofissionomia de vereda (a) epedoambientes característicos na alta (b), média (c) e baixa vertente (d). Fonte: NASCIMENTO (2014)

As veredas estão presentes em meio a grupamentos mais ou menos densos de espécies arbustivas e arbóreas, associados ou não à palmeira *Mauritia flexuosa*, denominada de buriti. Geralmente as veredas são circundadas por campos limpos com vegetação característica. No cerrado de Minas Gerais, a distribuição fitogeográfica das veredas ocorre nas bacias do rios São Francisco, Paranaíba e Grande (Figura 2) (CARVALHO, 1991).

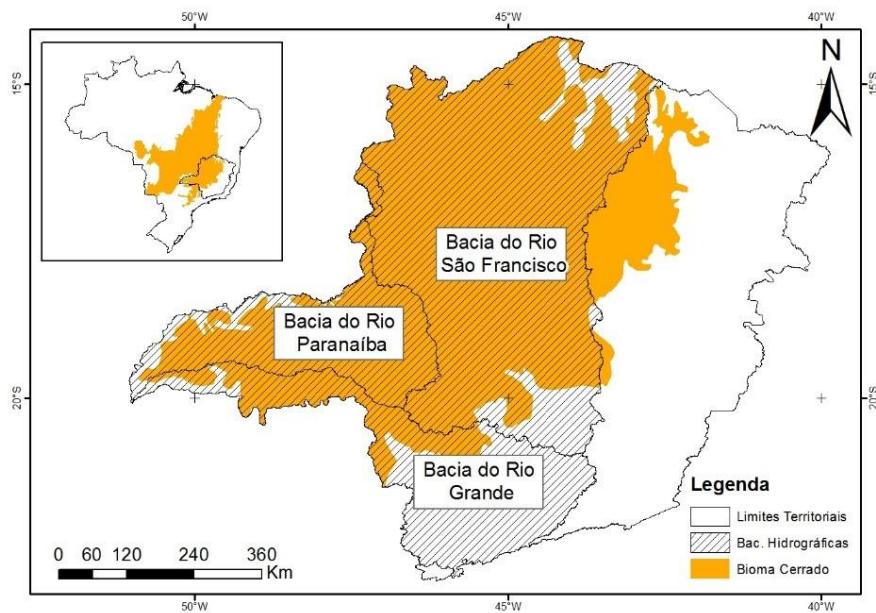


FIGURA 2. Áreas de ocorrência de veredas no estado de Minas Gerais, Brasil. Fonte: IBGE, 2004.

A gênese de subsistemas de veredas em paisagens do cerrado estão condicionados a fatores como: 1) relevo plano ou suavemente ondulado, que permite a percolação e infiltração lenta das águas pluviais; 2) rocha sedimentar porosa ou solos espessos permeáveis sobrepostos a camadas impermeáveis (a existência de camada superior permeável sobre camada impermeável possibilita lenta migração da água do lençol); 3) nível de base local mantido por rochas, geralmente magmáticas, que dificultam o entalhamento do canal fluvial; 4) Clima Tropical, com estação seca e chuvosa contrastantes, que permitem, em momentos alternados, o excedente e déficit hídrico, criando condições para ambiente hidromórfico (BOAVENTURA, 2007).

Baseando-se em critérios geomorfológicos e propriedades hidrológicas em veredas da região Norte de Minas Gerais, Maillard e Alencar-Silva (2012) proporam três tipologias de veredas: 1) as veredas de nascentes ou cabeceiras correspondem ao estágio inicial de evolução de uma vereda, possuem estrato arbóreo estreito e solos com menor teor de umidade e de matéria orgânica em comparação as outras tipologias; 2) as veredas típicas possuem um estágio de evolução mais avançado que o primeiro tipo e apresentam uma faixa arbustiva e arbórea mais larga com a presença de buritis mais altos, e solos com umidade constante e alto teor de matéria orgânica, além de um curso d'água definido nos períodos úmidos e áreas com lençol freático mais alto durante todo o ano; 3) nas

veredas de transição para mata galeria predominam o estrato arbóreo e o dossel é fechado formando galerias, o entalhe do leito do rio é nítido durante todo o ano e o ambiente apresenta alto grau de umidade e matéria orgânica.

A inserção de subsistemas úmidos de veredas em áreas de cerrado ocorre em vales rasos, sobre vertentes côncavas suaves com fundo geralmente preenchido por camada mais argilosa. Devido a tal ambiente pedológico, as veredas constituem-se áreas de contribuição para cursos d'água, pois a água infiltrada no solo converge lentamente para os talvegues, por influência do direcionamento topográfico, contribuindo para a perenização de cursos d'água a jusante desses sistemas (BOAVENTURA, 2007).

Nessas áreas, predominantemente, se encontram solos hidromórficos saturados durante boa parte do ano, ocupando os vales, áreas planas ou acompanhando as linhas de drenagem, bem como as posições intermediárias da vertente próximo às nascentes. A ocorrência da vereda condiciona-se ao afloramento do lençol freático, decorrentes de permeabilidade diferentes em áreas sedimentares do Cretáceo e Triássico (SANO; ALMEIDA, 1998).

Os solos hidromórficos sobre os quais se desenvolvem as veredas têm origem pedogenética relacionada a processos de hidromorfismo (gleização). Evoluem em ambientes inundados por longos períodos que promovem a formação de ambiente de redução em função do consumo do oxigênio dissolvido. Devido ao ambiente de baixa oxidação e pouca ciclagem de nutrientes em ambientes anaeróbicos, camadas de material mal decomposto resultam no acúmulo de MOS e aumento de cargas negativas no solo (KÄMPF, et al., 2009; CAMARGO et al., 1999).

Dessa forma, as veredas, em razão da influência do lençol freático, possuem solos hidromórficos em toda a sua extensão transversal, os quais se diferenciam em Organossolos Mésicos, Gleissolos Melânicos e Gleissolos Háplicos (RAMOS et al., 2006).

Com relação à flora, foram identificadas em veredas do Triângulo Mineiro uma ampla biodiversidade: 526 espécies, 250 gêneros e 89 famílias (GUIMARÃES et al., 2002). Esses autores, em outro levantamento florístico, também realizado no Triângulo Mineiro, encontraram 101 espécies e 29 famílias vegetais (GUIMARÃES et al., 2002).

Destarte, a importância ecológica e socioambiental das veredas nos ambientes de cerrado compreendem aspectos, como:

- Hídrica: por atuar na captação d'água, via condição topográfica, tais ambientes participam do controle do fluxo do lençol freático, desempenhando um papel fundamental

no equilíbrio hidrológico dos cursos d'água no ambiente do cerrado (CARVALHO, 1991; FERREIRA, 2005), contribuindo na perenização dos córregos, ribeirões e até mesmo dos rios a jusante destes sistemas (CARVALHO, 1991) e recarga de aquíferos (BOAVENTURA, 2007). As águas originadas a partir do cerrado são responsáveis pela recarga, via infiltração nas camadas subjacentes do solo, de aquíferos da região e colaboram para a manutenção de regiões hidrográficas do Brasil;

- Biológica: as veredas têm o seu papel reconhecido no equilíbrio ecológico do bioma cerrado, protegendo nascentes e fornecendo água, alimento e abrigo para a diversificada fauna silvestre (GUIMARÃES et al., 2002). Em um cenário onde predomina a fragmentação e extenuação de habitats no cerrado, a existência de ecossistemas que permitam o fluxo biótico e gênico é determinante na manutenção da biodiversidade nesse bioma, pois a integração de diferentes habitats, via corredores ecológicos, ainda é um desafio a ser superado;
- Social: apesar de subsistemas de veredas estarem inseridos sob contexto de intenso uso agropecuário, em algumas regiões do cerrado, as veredas desempenham grande importância social, principalmente no que tange a subsistência de comunidades tradicionais, onde a água é fator restritivo, e também pelo fornecimento de diversos produtos derivados de espécies que ocorrem nesses ambientes, em especial ao do buriti (*Mauritia flexuosa*), que serve como alimento e fonte de vitaminas, e a partir do qual se obtêm óleos medicinais, doces, licores, fibras para usos diversos, etc. (ISPN, 2008);
- Acúmulo de contaminantes e poluentes: As veredas evoluem nas depressões topográficas. A erosão e deposição de sedimentos do solo favorece o assoreamento e acumulação de poluentes e contaminantes, provenientes, por exemplo, do uso de agroquímicos. Há a hipótese de que as áreas úmidas atuam como receptáculos de elementos-traço (contaminantes) (OLIVE-LAUQUET et al., 2001; ROSOLEN et al., 2015). A matéria orgânica (presente em solos desses ambientes), devido a capacidade de complexação de elementos metálicos, também pode atuar como importante fator para o armazenamento de contaminantes no solo, estando, por sua vez, submetida às variações do pH (GRYBOS et al., 2007).

Tais áreas são sensíveis à alteração e possuem pouca capacidade regenerativa, isto é, baixa resiliência, quando perturbados (CARVALHO, 1991; GUIMARÃES et al., 2002; FERREIRA, 2003). Mesmo tendo importância reconhecida, ambientes de veredas tem sido progressivamente pressionados em ambientes de cerrado pelo agronegócio e,

também, descaracterizadas por interferência antrópica, como a construção de barragens e açudes, pecuária, agricultura e por queimadas constantes (RIBEIRO; WALTER, 2008).

Características dos solos, fundamentais para garantir processos ecossistêmicos, estão sendo alteradas por algum processo de degradação (AUGUSTIN et. al., 2009). Apesar da importância ecológica e ambiental das áreas úmidas no cerrado, são escassos e pontuais os estudos sobre as condições atuais e conjuntos de fatores que podem influir negativamente na qualidade dos recursos naturais no âmago dessas áreas. Tais fatos justificam o aprofundamento das pesquisas nestes ambientes.

## 2.2 Leis e dispositivos de gestão ambiental aplicados em ambientes de veredas

A legislação ambiental brasileira se desenvolveu notoriamente a partir da segunda metade do século XX em meio ao alvorecer dos grandes encontros e conferências mundiais sobre clima e meio ambiente, como as Conferências das Partes da Convenção-Quadro da ONU sobre Mudanças Climáticas (COP's) e outras de menor abrangência, mas de grande importância (MCCORMICK, 1992).

Dentre as grandes conferências citam-se a Conferência de Estocolmo em 1972; a Rio-92; Conferência de Kyoto em 1997; Conferência de Nairóbi em 2006 e a Rio +20. Tais conferências sumariamente objetivaram estabelecer metas e acordos com vistas ao desenvolvimento sustentável, conceito posto em evidência em face de indícios de mudanças climáticas, levantadas pela comunidade científica. Por se tratar de um tema amplo, questões sobre padrões de uso da terra, energias renováveis, uso e poluição dos recursos naturais, conservação da biodiversidade, padrões de produção e consumo, entre outros, foram incorporadas às discussões, corroborando para a elaboração de propostas e documentos visando equacionar o crescimento econômico, desenvolvimento social e preservação do meio ambiente. Apesar de, em alguns casos, bastante contraditórios e divergentes, as discussões e documentos oriundos dessas convenções vieram a influenciar as políticas ambientais ao redor do mundo.

No Brasil, a Constituinte Federal de 1988, em seu Art. 225, declara que “Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impõe-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”. Assim, a carta Magna se constituiu a base da legislação ambiental brasileira atual, apesar de anteriormente já

existir importantes instrumentos legais no que tange o direito ambiental brasileiro, como a Lei n.º 4.771 de 1965 (antigo Código Florestal). A partir disso, uma série de leis, decretos, portarias, resoluções CONAMA e outros dispositivos infraconstitucionais, com previsão tanto no âmbito federal, quanto estadual e municipal, foram concebidos, visando buscar o direito e proteção constitucional do meio ambiente, e concomitantemente estabelecer dispositivos de comando e controle para esse fim.

As veredas têm sua importância ambiental, biológica e social reconhecida no arcabouço da legislação brasileira e do estado de Minas Gerais, o que confere efetividade legal na proteção deste ecossistema. A Tabela 1 sintetiza especificidades sobre itens regulatórios presentes na legislação em vigor nos entes estadual e federal, acerca das veredas.

TABELA 1. Dispositivos de gestão ambiental em veredas.

Dispositivo jurídico	Abrangência	Conceito de vereda	Itens regulatórios
<b>LEI Nº 9.375, de 12/12/1986.</b> Declara de interesse comum e de preservação permanente os ecossistemas das veredas no Estado de Minas Gerais.	Estadual, MG	Formações fitoecológicas caracterizadas pela presença dos buritis ( <i>Mauritia sp</i> ) ou outras formas de vegetação típica, em áreas de exsudação do lençol freático que contenham nascentes ou cabeceiras de cursos d'água de rede de drenagem, onde há ocorrência de solos hidromórficos.	§ 2º - São consideradas como reservas ecológicas as áreas de veredas, estabelecidos os seguintes limites:  I - nas veredas de encosta - toda a sua extensão e até 50 (cinquenta) metros além da ocorrência de espécies herbáceas, buritis ou solos hidromórficos;  II - nas veredas de superfície aplainada - toda a sua extensão e até 80 (oitenta) metros além do limite da ocorrência de espécies herbáceas, buritis ou solos hidromórficos;  III - nas veredas-várzea - toda a sua extensão e até 80 (oitenta) metros além do limite da ocorrência de espécies herbáceas, buritis ou solos hidromórficos.
<b>RESOLUÇÃO CONAMA Nº 303, de 20/03/2002.</b> Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente.	Federal	Espaço brejoso ou encharcado, que contém nascentes ou cabeceiras de cursos d'água, onde há ocorrência de solos hidromórficos, caracterizado predominantemente por renques de buritis do brejo ( <i>Mauritia flexuosa</i> ) e outras formas de vegetação típica.	Art. 3º Constitui Área de Preservação Permanente a área situada:  IV - em vereda e em faixa marginal, em projeção horizontal, com largura mínima de 50 (cinquenta) metros, a partir do espaço permanentemente brejoso e encharcado.
<b>LEI Nº 12.651, de 25/05/2012.</b> Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências.	Federal	Fitofisionomia de savana, encontrada em solos hidromórficos, usualmente com a palmeira arbórea <i>Mauritia flexuosa</i> - buriti emergente, sem formar dossel, em meio a agrupamentos de espécies arbustivo-herbácea.	Art. 4º Considera-se Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, para os efeitos desta Lei:  XI - em veredas, a faixa marginal, em projeção horizontal, com largura mínima de 50 (cinquenta) metros, a partir do espaço permanentemente brejoso e encharcado.
<b>LEI Nº 20.922, de 16/10/2013.</b> Dispõe sobre as políticas florestal e de proteção à biodiversidade no Estado.	Estadual, MG	Fitofisionomia de savana, encontrada em solos hidromórficos onde o lençol freático aflora na superfície, usualmente com a palmeira arbórea <i>Mauritia flexuosa</i> - buriti emergente em meio a agrupamentos de espécies arbustivo-herbáceas	Art. 9º Para os efeitos desta Lei, em zonas rurais ou urbanas, são APPs:  IX - em veredas, a faixa marginal, em projeção horizontal, com largura mínima de 50m (cinquenta) metros, a partir do término da área de solo hidromórfico.

Fonte: MINAS GERAIS (1986); CONAMA (2002); BRASIL (2012); MINAS GERAIS (2013).

Sem entrar no mérito da efetividade, validade jurídica e controvérsias presentes vê-se que, nos dispositivos de abrangência estadual há mais rigor nos limites estabelecidos e critérios mais consistentes e precisos. O estado de MG conta com uma lei específica sobre as veredas, o que é um diferencial.

### 2.3 Elementos-traço nos geossistemas terrestres

Elementos-traço são aqueles elementos que estão presentes em baixas concentrações no solo, sedimentos e água. Nos solos, geralmente a concentração é inferior a  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ . O termo metal pesado é utilizado para se referir àqueles elementos que possuem densidade maior que  $5,0 \text{ g cm}^{-3}$ .

Naturalmente ocorre a presença de elementos-traço nos solos e na água. O aumento da concentração destes elementos ocorre tanto por processos naturais, como também em decorrência de atividades antropogênicas, neste caso, podendo se constituir fonte de contaminação e poluição ambiental (GUILHERME et al., 2005). Destaca-se que alguns elementos-traço são biologicamente essenciais, como o Cu, Co, Mn, Se e Zn.

Sob esta ótica, a presença de elementos-traço nos ambientes adquire notória importância, dado que alguns desses elementos, em determinadas quantidades, são tóxicos para plantas e animais. Os elementos-traço podem compor a cadeia trófica dos seres vivos e são bioacumuláveis e estáveis na natureza, se constituindo em fonte potencial e efetiva de poluição e contaminação dos geossistemas e ecossistemas (solo, águas superficiais e subterrâneas, atmosfera, vegetação, microrganismos e níveis tróficos) (GUILHERME et al., 2005).

Dessa maneira, para avaliar a toxicidade de elementos-traço, dever-se-á, levar em consideração as condições ambientais específicas e parâmetros químicos e biológicos que determinam sua biodisponibilidade e bioacessibilidade, que variam em função da concentração, vias de exposição, tipos de organismos expostos, processo biótico de absorção fisiológica (PEIJNENBURG; JAGER, 2003), solubilidade e mobilidade nos compartimentos (GUILHERME et al., 2005). Mesmo elementos-traço tidos como essenciais podem, sob condições específicas, causar impactos negativos a ecossistemas terrestres e aquáticos, constituindo-se, assim, em contaminantes ou poluentes de solo e água (GUILHERME et al., 2005).

Dado o estágio de evolução, de contingente e tecnológico, da sociedade humana, cada vez mais concentrada em núcleos e centros urbanos e do consequente crescimento de atividades econômicas, como atividades industriais e agropecuárias, é notável a tendência no aumento da produção de insumos e resíduos provenientes dos diversos setores produtivos. Com isso, nos últimos tempos tem se aumentado a preocupação com elementos e compostos metálicos, com vistas à saúde humana e qualidade ambiental.

Algumas características e propriedades de elementos-traço de relevância ambiental são tratadas a seguir.

O arsênio (As) é encontrado comumente associado a outros metais (Fe, Pb, Cu) e se torna disponível no meio a partir da extração, exploração ou mineração de Cu, Zn, Pb, Au, entre outros e do uso industrial, como comumente ocorre na utilização de técnicas de preservação da madeira (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2011). Até a década de 1970, cerca de 80% dos pesticidas agrícolas possuíam compostos com As. Atualmente, em vários países, o uso de insumos com As na agricultura é proibido (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2011). Compostos com As são facilmente solúveis, porém a mobilidade é bastante reduzida em função da sorção por argilas, óxidos e MOS. Formas combinadas com óxidos de Fe e Al podem ser hidrolisados e disponibilizadas ao meio com a redução do potencial redox nos solos. O valor médio global de As no solo é estimado em  $6,83 \text{ mg kg}^{-1}$  (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2011). Em regiões do cerrado brasileiro teores que variam de  $0,62$  a  $3,29 \text{ mg kg}^{-1}$  foram determinados por Campos et al. (2013), onde as concentrações mais elevadas estiveram associadas aos solos de textura mais argilosa. O arsênio, até o momento, não possui nenhuma função biológica conhecida (MCBRIDE, 1994).

O cadmio (Cd) é um metal raro na natureza e ocorre normalmente associado a Zn e Pb. O Cd é um dos elementos-traço mais tóxicos e promove efeitos adversos sobre todos os processos biológicos em animais e plantas (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2011). A deposição ambiental de Cd ocorre em função de seu uso industrial como subproduto na mineração e refinamento de minérios de Zn e também a partir de materiais como baterias, ligantes na indústria de plástico e também na confecção de pigmentos. Na agricultura, sua fonte advém principalmente de lodos e adubos (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2011). A combinação da elevada biosdisponibilidade no solo e alta toxicidade para plantas e animais requerem um maior rigor para deposição desses subprodutos no solo (MCBRIDE, 1994). Nos solos, a mobilidade do Cd é altamente influenciado pela textura do solo e sua solubilidade é intimamente associada a acidez do solo e potencial

redox. O Cd é fortemente retido em áreas úmidas. A concentração média de Cd nos solos é estimada em  $0,41 \text{ mg kg}^{-1}$  (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2011). No cerrado brasileiro, concentrações médias de  $1,83 \text{ mg kg}^{-1}$  foram observados por Campos et al. (2013). O Cd, até o momento, também não possui nenhuma função biológica conhecida (MCBRIDE, 1994).

A produção global de chumbo (Pb) é obtida principalmente a partir de depósitos minerais. O maior uso de Pb é para a fabricação de baterias de chumbo-ácido, soldas, ligas, cabos, produtos químicos, aditivos antidetonante em combustíveis, etc. Na agricultura, destaca-se a incorporação via utilização de lodo de esgoto (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2011). Nos solos, a distribuição de Pb é bem associado ao conteúdo de hidróxidos de Fe e Mn, principalmente. A MOS é atributo que muito contribui para adsorção de Pb, se constituindo em um importante meio de complexação, porém, é superada ao se considerar a reatividade da fração argila. A mobilidade do Pb, que naturalmente é lenta, pode ser acelerada pelo aumento da acidez do solo, pois, o pH elevado do solo pode precipitar Pb na forma de hidróxidos, fosfatos ou carbonatos, promovendo a formação de complexos bastante estáveis (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2011). O valor médio global de Pb total para os solos é estimado em  $27 \text{ mg kg}^{-1}$ , com grande variabilidade entre os diferentes solos do mundo. A contaminação de Pb nos solos é um processo de difícil reversão, pois as saídas (outputs) são baixas em comparação com os processos de entrada (inputs). Nesses casos, pode ser alta a translocação de Pb para as raízes de planta (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2011). O Pb não possui nenhuma função biológica conhecida (MCBRIDE, 1994).

Devido ao seu elevado grau de toxicidade, arsénio, cádmio e chumbo estão classificados entre os metais prioritários de importância para a saúde pública, pois são potencialmente cancerígenos (TCHOUNWOU et al., 2014; ATSDR, 2015). Por outro lado, alguns elementos-traço, tais como o cobre (Cu), manganês (Mn), níquel (Ni), selênio (Se) e zinco (Zn) são essenciais às várias funções bioquímicas e fisiológicas nas plantas e animais. No ser humano, o fornecimento inadequado destes micronutrientes resulta em uma variedade de doenças de deficiência ou síndromes, contudo, em determinadas quantidades, estes podem se tornar tóxicos, a exemplo do Cu, cujo limite entre os efeitos benéficos e tóxicos são muito estreitos (TCHOUNWOU et al., 2014).

A concentração e disponibilidade de constituintes inorgânicos no solo é regulada por uma série de reações físico-químicas, tais como potencial hidrogeniônico (pH), potencial de oxirredução, complexação com ligantes orgânicos e inorgânicos,

precipitação, solubilização e troca iônica (YARON et al., 1996). Por sua vez, os processos que governam à mobilidade de elementos-traço no solo perpassam por fatores de controle, tais como: a forma e natureza química do elemento; a natureza química e mineralógica do solo e características físicas e atributos biológicos do solo (MCBRIDE, 1994).

Os processos dinâmicos e interativos que regem a solubilidade, disponibilidade e mobilidade de elementos no solo são sintetizados por McBride (1994) e apresentados na figura 3.

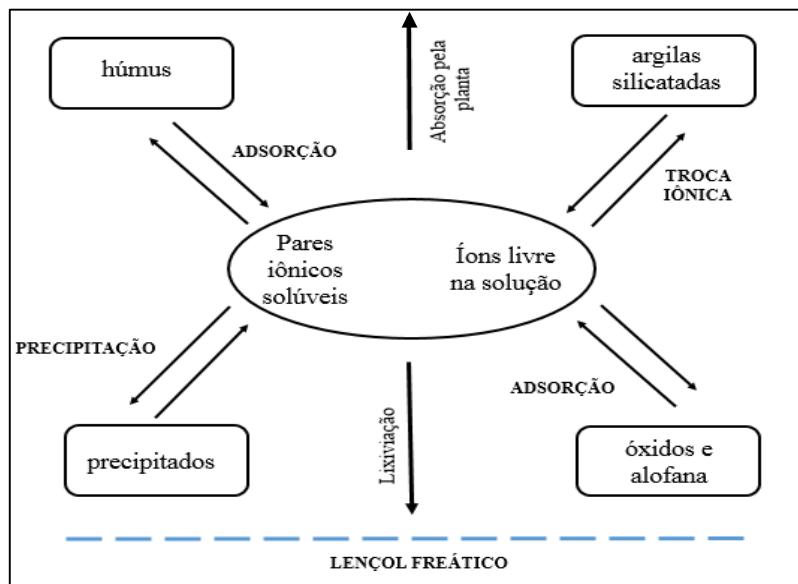


FIGURA 3. Processos que governam a solubilidade, mobilidade e disponibilidade de elementos-traço e tóxicos no solo. Fonte: McBride (1994).

Com o intuito de estabelecer valores de qualidade do solo, diferentes valores são definidos nos solos mundiais, partindo-se do princípio do risco de exposição dos organismos aos efeitos tóxicos e carcinogênicos desses elementos com ênfase na proteção da saúde humana e qualidade ambiental. Em sua concepção, os valores orientadores são relacionados a usos genéricos do solo sem levar em consideração as condições específicas de cada área. Valores orientadores são, então, base para avaliação, onde determina-se a necessidade ou não de investigações mais detalhadas (NASCIMENTO; BIONDI, 2015).

No Brasil, os valores orientadores para qualidade do solo são definidos pela resolução n. 420/2009 do CONAMA e alterada pela resolução nº 460/2013 (CONAMA, 2013). Os valores orientadores são classificados em três categorias: Valores de referência de qualidade (VRQ), de prevenção (VP) e de investigação (VI). Devido à especificidades regionais, os valores de referência de qualidade devem ser definidos por cada estado da

União. Em Minas Gerais os VRQ's são definidos pela deliberação normativa do Conselho de Política Ambiental (COPAM-MG) nº 166/2011 (Tabela 2).

Os valores orientadores são concentrações de substâncias químicas que fornecem orientação sobre a qualidade e alterações do solo e da água subterrânea. Nesse contexto, o valor de referência de qualidade (VRQ) é a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, que foi determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos do estado. O valor de prevenção (VP) é a concentração de determinada substância no solo, acima da qual podem ocorrer alterações da qualidade do solo quanto às suas funções principais e o valor de investigação (VI) é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana (COPAM, 2011).

**TABELA 2.** Valores Orientadores para qualidade dos solos em Minas Gerais - 2011

Elementos	VRQ	VP	Solo - mg kg <sup>-1</sup>		
			Agrícola	Residencial	Industrial
Arsênio (As)	8	15	35	55	150
Cádmio (Cd)	< 0,4	1,3	3	8	20
Chumbo (Pb)	19,5	72	180	300	900
Cobre (Cu)	49	60	200	400	600
Cromo (Cr)	75	75	150	300	400
Níquel (Ni)	21,5	30	70	100	130
Selênio (Se)	0,5	5	-	-	-
Zinco (Zn)	46,5	300	450	1000	2000

Fonte: Adaptado de COPAM (2011).

No Brasil, os valores de *background* geoquímico estão relacionados a solos em condições oxidantes, uma vez que não há valores estabelecidos para solos encharcados, típicos das áreas úmidas do Brasil Central (ROSOLEN et al., 2015).

Há a hipótese de que as áreas úmidas atuam como áreas de armazenamento de elementos-traço, reduzindo a contaminação e eutrofização dos ecossistemas a jusante (OLIVE-LAUQUET et al., 2001; ROSOLEN et al., 2015).

Em solos de áreas úmidas, a mobilidade de elementos-traço depende de mecanismos de controle, como o conteúdo da matéria orgânica dissolvida e da presença

de oxi-hidróxidos de Fe e Mn no solo. A estabilidade redox de oxi-hidróxidos de Fe e Mn é considerada um parâmetro importante para o controle da mobilidade de elementos-traço em solos de áreas úmidas, pela capacidade de estabilização desses elementos por adsorção ou co-precipitação. A matéria orgânica, devido a capacidade de complexação de elementos metálicos, também pode atuar como importante acumulante de elementos-traço no solo, sendo influenciada pelas variações do pH (GRYBOS et al., 2007).

Elementos-traço em áreas úmidas existem em formas retidas, trocáveis e solúveis e a desestabilização do redox de oxi-hidróxidos de Fe e Mn e a decomposição da MOS por microrganismos heterótrofos podem resultar na minimização do tempo de retenção desses elementos inorgânicos em áreas úmidas (OLIVIE-LAUQUET et al., 2001).

Por exemplo, o Cd e Pb têm concentrações aumentadas com o aumento do Eh. Já, as concentrações de As diminuem com o aumento do Eh, o que indica que baixo Eh promove a mobilidade desse elemento. Alterações no Eh e pH modificam também a disponibilidade e solubilidade de micronutrientes, a exemplo do Mn, Zn, Cu e Ni. A solubilidade do Fe é demasiadamente influenciada pela dinâmica dessas variáveis, a toxicidade do  $\text{Fe}^{2+}$  também é bem evidenciada com baixo Eh (HUSSON, 2013).

Nas áreas úmidas, o acúmulo de matéria orgânica constitui-se na maior parte da capacidade de redução do solo, tal fato se deve em parte pelo motivo de que em solos ricos em MOS, os processos de oxidação, por consumir grandes quantidades de  $\text{O}_2$  colabora para a formação de compostos orgânicos com propriedades de redução (HUSSON, 2013).

A disponibilização de elementos-traço em áreas úmidas se configura uma preocupação ambiental, dado ao risco potencial de contaminação de ecossistemas adjacentes (GRYBOS et al., 2007), pois, ao contrário dos contaminantes orgânicos, a maioria dos metais não sofre degradação microbiana ou química, o que torna as concentrações estáveis na natureza (GUO et al., 2006).

Em veredas do Norte do estado de Minas Gerais foram encontrados elevados teores de Cr e Cd sob influência de atividades agrosilvopastoris (MORAES; HORN, 2010). Em outro estudo, na mesorregião do Triângulo Mineiro, Rosolen et al. (2015) encontraram concentrações de As, Cr e Cu acima dos valores de referência de qualidade do solo estabelecidos pela resolução 420/2009 do CONAMA (CONAMA, 2009).

Desse modo, avaliar a presença natural (litogênica) e/ou antropogênica de elementos-traço nos solos, face às condições do meio e dinâmicas de uso do solo presentes, bem como processos decorrentes dessa associação que desemboca na

acumulação e/ou na disponibilização de elementos-traço no ecossistema, se constitui em um importante subsídio para conhecimento e monitoramento da qualidade ambiental em ambientes de cerrado.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição da área e amostragem do solo

Seis segmentos de veredas (V1, V2, V3, V4, V5 e V6), do entorno de Uberlândia, MG, foram selecionados para o estudo (Figura 4).

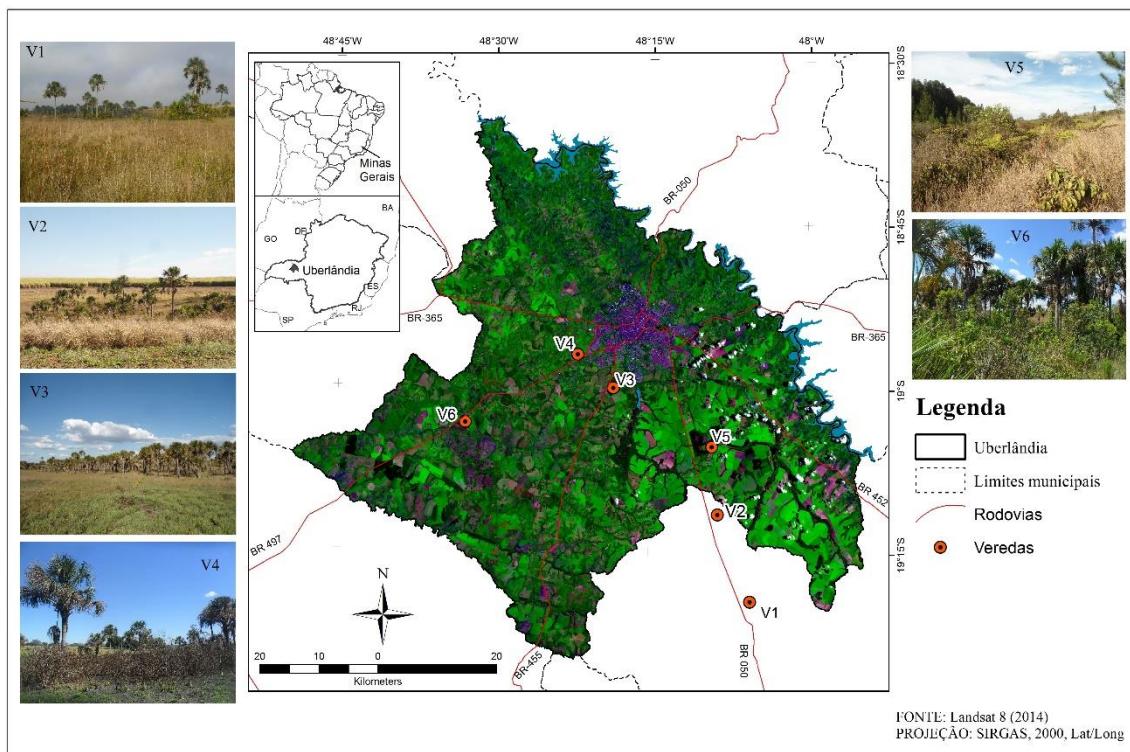


FIGURA 4. Localização das veredas selecionadas para o estudo e detalhes da paisagem, região de Uberlândia, MG.

Em cada segmento de vereda, foram estabelecidos três transectos (T1, T2 e T3) dentro da região hidromórfica no sentido do declive espaçados em aproximadamente 50 m (Figura 5). Cada transecto foi dividido em terço superior (TS), médio (TM) e inferior (TI). Em cada terço e transecto, foram coletadas amostras compostas das camadas 0-20 cm e 40-70 cm utilizando-se um trado tipo holandês de aço inoxidável. Cada amostra composta foi formada por cinco amostras simples retiradas em um raio de aproximadamente 1 m do ponto central (georreferenciado) (Figura 5). Adicionalmente, foram também retiradas amostras das camadas 0-20 cm e 40-70 cm na encosta (na projeção de cada transecto). Essa região está fora da região hidromórfica e local de amostragem foi denominado como P1.

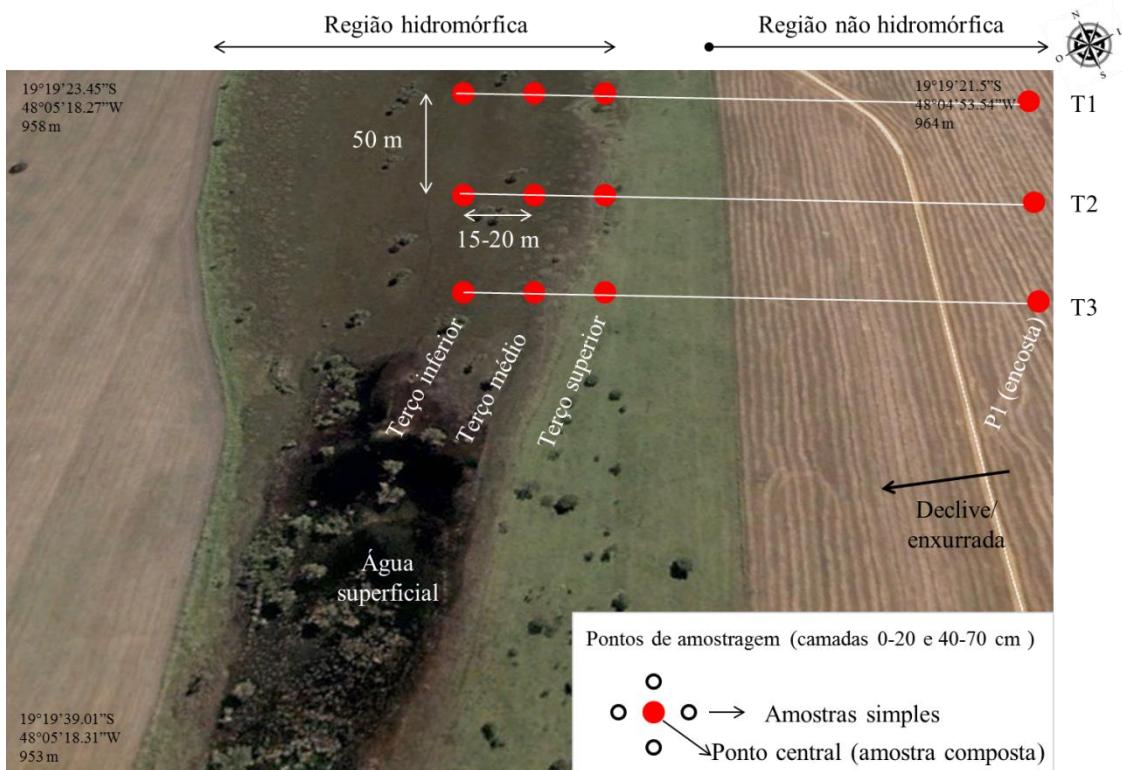


FIGURA 5. Detalhe do esquema de amostragem realizada em cada segmento de vereda.

As veredas 1, 2 e 5 estão situadas na superfície geomórfica denominada Chapada e, as veredas 3, 4 e 6, na superfície geomórfica denominada Arenito Bauru. No terço superior e médio das veredas (Figura 5) ocorrem Gleissolos Háplicos e Gleissolos Melânicos, respectivamente. No terço inferior ocorrem Gleissolos Melânicos e/ou Organossolos (RAMOS et al., 2006).

O clima da região é classificado como “Aw”, conforme Köppen-Geiger (1936), com as estações seca (início de abril a final de agosto) e chuvosa (início de setembro a final de março) bem definidas. A menor precipitação média histórica ocorre em meados de julho e, a maior, no último e primeiro decêndio de dezembro e janeiro, respectivamente (RIBEIRO et al., 2013).

Dados climáticos da região (temperatura e precipitação) foram obtidos da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Uberlândia (LACHR/UFU) (Figura 6).

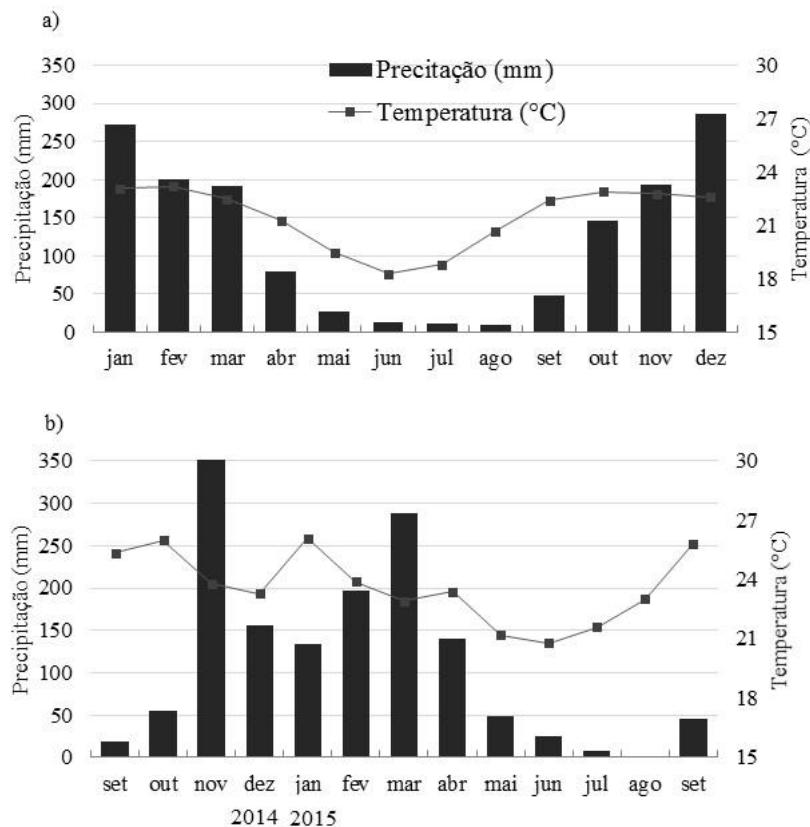


FIGURA 6. (a) Temperatura média e precipitação mensal da região de Uberlândia (série histórica/1981-2013) e para o período de set./2014 a set./2015) (b)

Com relação à altitude local, as veredas ocupam as posições mais baixas na paisagem. Na Figura 7, por meio de modelos digitais de elevação, são mostrados os perfis topográficos de cada segmento de vereda estudado. Modelos digitais de elevação (MDE) foram obtidos a partir de imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com coordenadas XYZ e resolução espacial 30 metros, disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS, 2015). Procedimentos computacionais foram realizados nos softwares SPRING 5.2.6 e ArcScene 10.1.

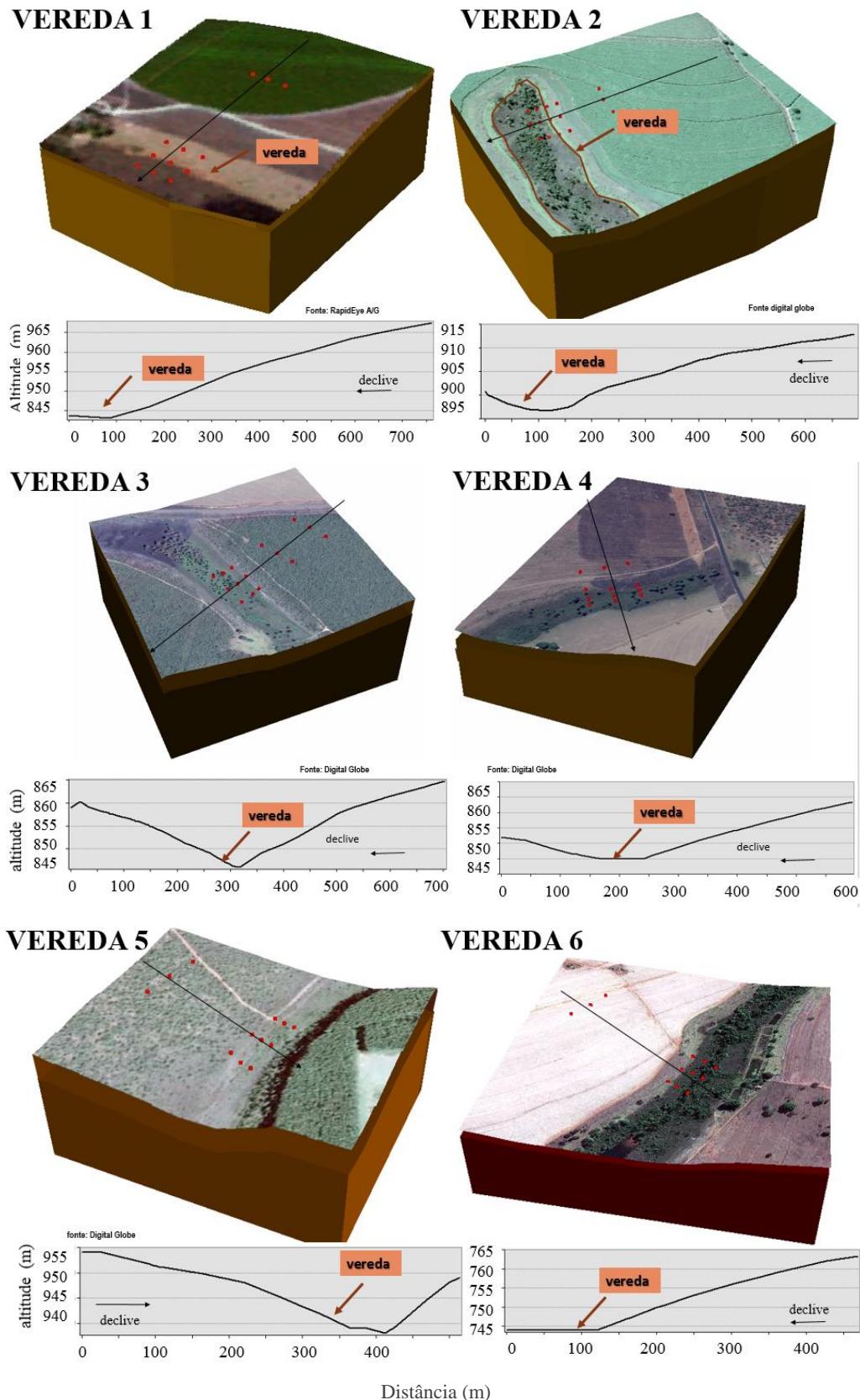


FIGURA 7. Modelos digitais de elevação de cada segmento de vereda estudado.

### 3.2 Avaliação temporal do uso do solo em veredas do Triângulo Mineiro

Para fins de diferenciação do uso do solo nos anos de 1979 e 2010, foram utilizadas ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas - SIG's, subsidiadas por técnicas de geoprocessamento, processamento digital de imagens e cartografia digital. Os procedimentos realizados estiveram em observância aos princípios descritos por Rosa (2003).

Os procedimentos computacionais foram realizados nos softwares SPRING 5.2.6; ENVI 4.7 e ArcMap 10.1.

Os produtos cartográficos utilizados foram:

- Cartas topográficas da região, editadas pela Diretoria de Serviços Geográficos do Exército Brasileiro (DSG), escala de 1: 25.000 e também pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), escala de 1:100.000;
- Fotografias Aéreas publicadas pelo IBC/GERCA do ano de 1979, disponibilizadas em formato analógico no Laboratório de Cartografia e Sensoriamento Remoto do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia;
- Imagens recentes (2010) dos sensores *REIS* (*Rapideye Earth Imaging System*), instalados na constelação composta de 5 micro-satélites multispectrais da empresa *RapidEye*, que obtêm imagens da Terra em cinco faixas espectrais, Azul (440–510 µm), Verde (520-590 µm), Vermelho (630-685µm), Red-Edge (690-730 µm), e Infravermelho Próximo (760-850 µm), com resolução espacial de até 5 metros;
- Imagens TM/Landsat (2014), disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (INPE, 2015)

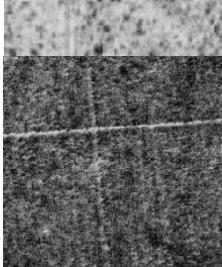
A alteração do uso do solo foi avaliada por técnicas de fotointerpretação digital. A diferenciação dos ecossistemas úmidos em relação aos demais nas imagens RapidEyeAg (2010) e fotografias aéreas (1979), foi realizada em observância à Chave de Interpretação (Tabelas 3 e 4). Atributos como Tonalidade/Cor, Textura e Forma, como proposto por Rosa (2003) foram considerados. Técnicas de classificação supervisionada foram previamente utilizados, contribuindo para a avaliação.

TABELA 3. Chave de interpretação para análise de imagens de satélite.

Uso da Terra	Descrição do Uso	Padrões característicos de interpretação	Exemplo
Agricultura	Áreas utilizadas com culturas anuais ou perenes;	Textura lisa, padrão geométrico, tonalidade em diversos gradientes de verde, alguns tendendo ao magenta, em decorrência da cultura, estado vegetativo e estresse hídrico.	
Áreas úmidas	Nesta categoria estão incluídas as áreas de cerrado ou mata;	Textura rugosa, padrão irregular, tonalidade magenta mosquada, associados ou não a tons verde, correspondentes à vegetação. Nos limites predomina tons de verde, correspondente aos extratos campestres.	
Cana-de-açúcar	Áreas ocupadas com cana-de-açúcar;	Textura lisa, padrão geométrico, tonalidade em diversos gradientes de magenta.	
Cobertura Vegetal Natural	Nesta categoria estão incluídas as áreas de cerrado ou mata;	Textura rugosa, padrão irregular, tonalidades de verde médio e escuro.	
Pastagem	Áreas utilizadas com pastagens plantadas ou naturais;	Textura média, padrão geométrico ou irregular, tons verdes, associado ou não a presença de árvores.	
Silvicultura	Áreas de reflorestamento de Pinus ou Eucalipto;	Textura ligeiramente rugosa, padrão geométrico, tonalidade verde escuro e tons de magenta para área recém-desflorestadas ou em manutenção.	

Fonte: Imagens do satélite RapidEye.

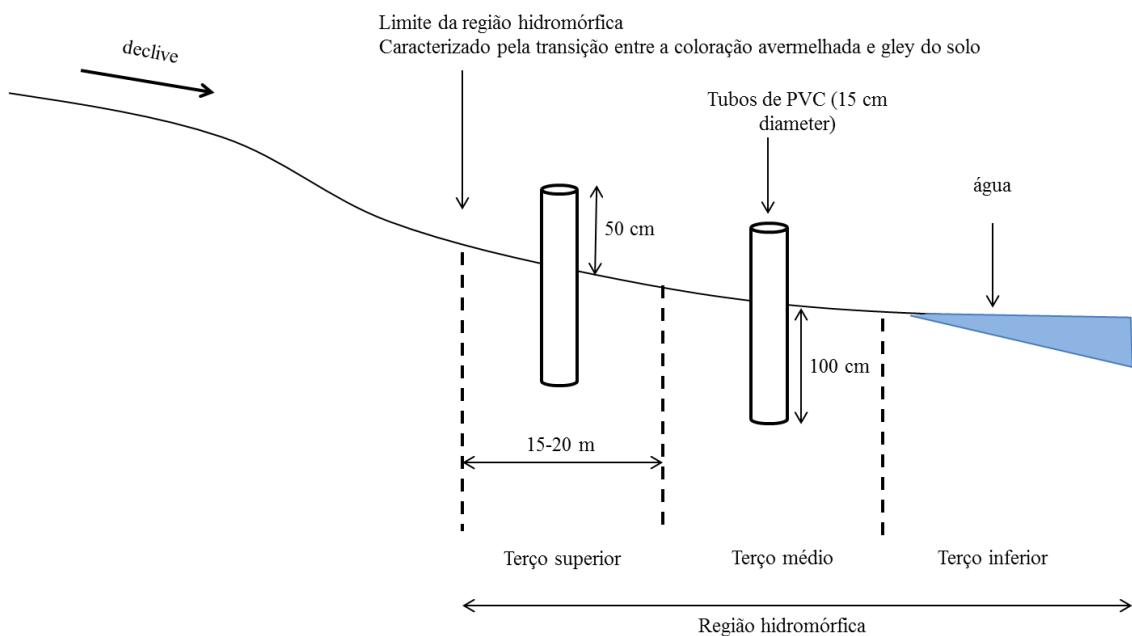
TABELA 4. Chave de interpretação para análise de fotografias aéreas.

Uso da Terra	Descrição do Uso	Padrões característicos de interpretação	Exemplo
Agricultura	Áreas utilizadas com culturas anuais ou perenes;	Textura lisa normalmente associada a abruptos de arado. Padrão geométrico, tonalidade em diversos tons de cinza, em decorrência da cultura e estado vegetativo.	
Áreas úmidas	Nesta categoria estão incluídas as áreas de cerrado ou mata;	Textura rugosa, Padrão irregular, tonalidade de cinza médios e escuros. Presença de gradientes nítidos para estabelecimento de limites de diferenciação.	
Cobertura Vegetal Natural	Nesta categoria estão incluídas as áreas de cerrado ou mata;	Textura rugosa, padrão irregular, tonalidade de cinza mediano. Cobertura com espaçamento irregular	
Pastagem	Áreas utilizadas com pastagens plantadas ou naturais;	Textura média, padrão geométrico ou irregular, tons de cinza associados a mosqueados da vegetação. Predomínio de pastagens naturais.	
Silvicultura	Áreas de reflorestamento de Pinus ou Eucalipto;	Textura ligeiramente rugosa, padrão geométrico, tonalidade cinza mediano. Cobertura com espaçamento regular	

Fonte: Fotografias aéreas IBC/GERCA.

### 3.3 Monitoramento da profundidade e coleta de água subsuperficial

Nas veredas selecionadas (com exceção da vereda 4), foram instalados tubos de PVC de 1,5 m de comprimento e 15 cm de diâmetro a uma profundidade de aproximadamente 1,0 m nos terços superior e médio (Figura 8). Esses tubos funcionaram como piezômetros e destinaram-se à avaliação da profundidade do lençol freático e para coleta de amostras de água. Na parte do tubo que ficou inserida no solo foram feitos furos de 2 mm de diâmetro para permitir a entrada lateral da água. Em cada vereda existiam, assim, nove pontos de coleta. No terço inferior, a coleta de água foi realizada na própria água superficial, inserindo o pote coletor a 10 cm de profundidade.



**FIGURA 8.** Representação esquemática da vista lateral de um dos transectos com a instalação dos tubos de PVC nos terços superior e médio dentro da região hidromórfica.

Durante o período de setembro de 2014 a setembro de 2015 realizou-se, mensalmente, a medida da profundidade do lençol freático e a amostragem da água no interior dos tubos para determinação, em laboratório, do pH e condutividade eletrolítica. Na amostragem de setembro de 2015, realizou-se no campo, a medida dos parâmetros: turbidez, sólidos dissolvidos totais, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e temperatura. Foi utilizado um equipamento multiparâmetro HANNA HI9829.

Para a coleta, preservação e transporte de amostras, foram observadas as recomendações constantes no Guia Nacional de coleta e preservação de amostras (CETESB/ANA, 2011).

Foram obtidas curvas de variação da profundidade do lençol freático em função do tempo e, por meio do software Image J (versão 1.5f3), realizou-se a integralização das camadas inundadas, estimando-se o número de dias que as camadas 0-20 cm e 40-70 cm permaneceram completamente saturadas no período de setembro de 2014 a setembro de 2015.

### 3.4 Preparo das amostras de solo

Após a coleta no campo, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e imediatamente transportadas para o laboratório, onde foram secas ao ar e passadas em peneira de aço inoxidável de abertura 2 mm (TFSA). Durante o processo de secagem e peneiramento, alguns torrões de tamanho 2 a 4 cm foram separados para determinação da cor do solo com uso da carta de cores Munsell. As amostras peneiradas destinaram-se à caracterização física, química e para extração e determinação dos elementos: As, Cd, Pb, Se, Ni, Zn, Fe, Mn e Cu. O Fe, embora não esteja presente em solos em quantidades traço, foi aqui também considerado por ser marcadamente influenciado por condições de oxi-redução.

### 3.5 Caracterização física

Determinou-se a textura de cada amostra pelo método da pipeta (DAY, 1965), com uso de solução dispersante NaOH 1 mol L<sup>-1</sup> e agitação por ultrassom. Em bêquer de vidro com capacidade para 250 mL, em 10 g de solo foram adicionados 10 mL de solução NaOH (1 mol L<sup>-1</sup>) e 190 mL de água destilada. Nessa suspensão, inseriu-se a haste do equipamento de ultrassom de 19 mm de diâmetro a uma profundidade de 2,5 cm. Realizou-se a dispersão por 300 s aplicando-se uma potência de 80W. Nas amostras com teores mais elevados de matéria orgânica (amostras das camadas 0-20 cm dos terços médio e inferior), o material orgânico presente na fração areia foi removido por combustão (3 horas em forno mufla a 550° C), conforme procedimentos descritos por Carmo e Silva (2012), descontando-se a massa no cálculo dos teores de argila, silte e

areia. Determinou-se também a densidade de partículas ( $D_p$ ) pelo método do balão volumétrico (BLACK; HARTGE, 1986). A caracterização física do solo é apresentado na Tabela 5 e a cor do solo determinada a partir da carta de cores Munsell (Munsell Soil Color Chart) é apresentada na Tabela 6.

TABELA 5. Teores de argila, silte, areia e densidade de partículas do solo (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nas posições P1, terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI) das veredas selecionadas para o estudo.

Terço	0 - 20 cm				40 - 70 cm			
	Areia g kg <sup>-1</sup>	Argila g kg <sup>-1</sup>	Silte g kg <sup>-1</sup>	Dp g cm <sup>-3</sup>	Areia g kg <sup>-1</sup>	Argila g kg <sup>-1</sup>	Silte g kg <sup>-1</sup>	Dp g cm <sup>-3</sup>
Vereda 1	P1	128,1 ± 2,0	825,4 ± 3,2	46,5 ± 4,9	2,2 ± 0,0	126,3 ± 8,3	863,3 ± 8,6	10,4 ± 0,4
	TS	194,0 ± 10,4	750,5 ± 11,8	55,5 ± 15,9	2,1 ± 0,0	168,9 ± 12,3	820,9 ± 15,5	10,2 ± 4,5
	TM	182,3 ± 12,4	754,6 ± 8,1	63,1 ± 6,3	1,9 ± 0,0	166,1 ± 10,4	818,6 ± 8,2	15,3 ± 9,7
	TI	341,4 ± 12,8	401,5 ± 52,1	257,1 ± 39,3	1,2 ± 0,1	187,6 ± 11,3	765,0 ± 18,6	47,4 ± 15,3
Vereda 2	P1	676,2 ± 4,6	287,7 ± 7,7	36,0 ± 3,2	2,7 ± 0,0	662,0 ± 0,0	323,8 ± 0,0	14,2 ± 0,0
	TS	670,6 ± 30,6	290,6 ± 30,8	38,9 ± 11,7	2,5 ± 0,0	748,2 ± 9,6	232,6 ± 18,9	19,1 ± 9,6
	TM	625,8 ± 64,4	317,2 ± 55,1	57,0 ± 9,3	2,5 ± 0,2	742,9 ± 45,6	222,7 ± 39,9	34,4 ± 5,7
	TI	500,5 ± 88,0	308,0 ± 49,2	191,6 ± 103,5	1,9 ± 0,4	531,0 ± 75,9	410,1 ± 82,5	59,0 ± 17,4
Vereda 3	P1	636,5 ± 2,4	332,7 ± 16,3	30,7 ± 13,9	2,6 ± 0,0	615,9 ± 0,0	372,4 ± 0,0	11,7 ± 0,0
	TS	830,6 ± 6,0	149,0 ± 12,2	20,4 ± 8,7	2,5 ± 0,0	789,8 ± 9,1	172,8 ± 5,2	37,3 ± 4,8
	TM	716,7 ± 19,6	226,5 ± 16,1	56,8 ± 7,5	2,3 ± 0,0	840,3 ± 1,4	139,0 ± 2,7	20,6 ± 1,8
	TI	511,1 ± 50,7	223,8 ± 31,2	265,1 ± 19,5	1,5 ± 0,1	779,1 ± 14,9	175,6 ± 13,7	45,3 ± 5,5
Vereda 4	P1	570,2 ± 20,1	367,4 ± 24,6	62,3 ± 4,5	2,6 ± 0,0	543,0 ± 28,0	429,8 ± 32,1	27,2 ± 5,7
	TS	655,9 ± 30,0	303,2 ± 25,1	40,9 ± 5,0	2,5 ± 0,0	640,7 ± 33,2	325,9 ± 38,1	33,4 ± 5,4
	TM	508,0 ± 14,9	440,0 ± 13,1	52,0 ± 8,5	2,4 ± 0,1	538,9 ± 8,8	402,3 ± 12,9	58,7 ± 4,2
	TI	413,7 ± 76,0	473,7 ± 106,6	112,6 ± 46,2	2,1 ± 0,3	399,0 ± 36,0	530,7 ± 56,9	70,3 ± 20,9
Vereda 5	P1	193,5 ± 2,3	798,5 ± 5,0	8,0 ± 3,4	2,5 ± 0,1	163,5 ± 3,5	814,6 ± 5,2	22,0 ± 8,1
	TS	287,6 ± 29,6	700,3 ± 34,6	12,1 ± 5,0	2,3 ± 0,1	320,1 ± 30,9	666,0 ± 36,6	13,9 ± 6,2
	TM	113,3 ± 33,0	864,6 ± 41,5	22,2 ± 10,1	2,1 ± 0,1	219,9 ± 24,7	715,0 ± 32,4	65,2 ± 11,3
	TI	225,9 ± 66,1	675,8 ± 101,6	98,4 ± 52,9	2,2 ± 0,1	307,5 ± 8,2	548,9 ± 17,7	143,6 ± 26,0
Vereda 6	P1	818,2 ± 4,7	155,5 ± 4,3	26,3 ± 2,8	2,6 ± 0,0	787,3 ± 0,8	171,7 ± 12,4	41,0 ± 12,3
	TS	827,0 ± 15,8	138,4 ± 16,0	34,5 ± 2,1	2,6 ± 0,1	803,7 ± 28,3	160,4 ± 23,3	35,9 ± 10,8
	TM	633,0 ± 122,5	279,8 ± 91,1	87,3 ± 32,3	2,4 ± 0,1	754,8 ± 27,4	201,4 ± 24,4	43,8 ± 3,1
	TI	386,1 ± 12,8	407,2 ± 54,3	206,7 ± 48,8	1,8 ± 0,2	407,3 ± 34,5	500,3 ± 49,7	92,5 ± 27,8

• Medida de dispersão representa o desvio padrão da média.

TABELA 6. Cor do solo (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nas posições P1, terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI) das veredas selecionadas para o estudo.

Vereda	Posição	Cor solo seco	Cor solo úmido	Cor predominante	Cor solo seco	Cor solo úmido	Cor predominante
		0-20 cm			40-70 cm		
1	P1	5 YR 5/6	5 YR 3/4	Vermelho amarelado	5 YR 4/6	5 YR 4/4	Vermelho amarelado
	TS	5 YR 6/1	5 YR 4/1	Cinza escuro	GLEY1 7/n*	GLEY1 6/n	Cinza
	TM	5 YR 6/1	5 YR 4/1	Cinza escuro	GLEY1 6/n*	GLEY1 5/n	Cinza
	TI	5 YR 2,5/1	5 YR 2,5/1	Preto	5 YR 4/1	5 YR 3/1	Cinza muito escuro
2	P1	5 YR 5/4	5 YR 4/3	Marrom avermelhado	5 YR 4/6	5 YR 4/4	Marrom avermelhado
	TS	5 YR 4/1	5 YR 3/1	Cinza muito escuro	GLEY1 6/n*	GLEY1 5/n	Cinza
	TM	5 YR 4/1	5 YR 3/1	Cinza muito escuro	GLEY1 5/n*	GLEY1 4/n	Cinza escuro
	TI	5 YR 2,5/1	5 YR 2,5/1	Preto	5 YR 2,5/1	5 YR 2,5/1	Preto
3	P1	2,5 YR 4/8	2,5 YR 3/6	Vermelho escuro	2,5 YR 4/6	2,5 YR 3/6	Vermelho escuro
	TS	5 YR 4/1	5 YR 3/1	Cinza muito escuro	GLEY1 7/n*	GLEY1 6/n	Cinza
	TM	5 YR 4/1	5 YR 3/1	Cinza muito escuro	GLEY1 5/n*	GLEY1 4/n	Cinza escuro
	TI	5 YR 2,5/1	5 YR 2,5/1	Preto	5 YR 3/1	5 YR 2,5/1	Preto
4	P1	7,5 YR 5/4	7,5 YR 3/3	Marrom escuro	7,5 YR 4/6	7,5 YR 3/3	Marrom escuro
	TS	7,5 YR 4/1	7,5 YR 3/1	Cinza muito escuro	GLEY1 7/n*	GLEY1 5/n	Cinza
	TM	7,5 YR 4/1	7,5 YR 3/1	Cinza muito escuro	GLEY1 3/n	GLEY 2,5/n	Preto
	TI	7,5 YR 4/1	7,5 YR 3/1	Cinza muito escuro	7,5 YR 2,5/1	7,5 YR 2,5/1	Preto
5	P1	7,5 YR 4/6	7,5 YR 3/4	Marrom escuro	5 YR 4/6	5 YR 3/4	Marrom escuro
	TS	10 YR 5/2	10 YR 4/2	Marrom escuro acinzentado	GLEY1 5/n *	GLEY 4/n	Cinza escuro
	TM	7,5 YR 5/1	7,5 YR 4/1	Cinza escuro	GLEY1 4/n	GLEY 2,5/n	Cinza escuro
	TI	7,5 YR 3/1	7,5 YR 2,5/1	Preto	GLEY1 3/n	GLEY 2,5/n	Preto
6	P1	2,5 YR 3/4	2,5 YR 2,5/4	Marrom escuro avermelhado	2,5 YR 3/4	2,5 YR 2,5/4	Marrom escuro avermelhado
	TS	7,5 YR 5/2	7,5 YR 4/2	Marrom	GLEY1 6/n	GLEY1 5/n	Cinza
	TM	7,5 YR 3/1	7,5 YR 2,5/1	Preto	GLEY1 4/n	GLEY 2,5/n	Preto
	TI	7,5 YR 3/1	7,5 YR 2,5/1	Preto	GLEY1 3/n	GLEY 2,5/n	Preto

\* Presença de mosqueados

### 3.6 Caracterização química

Para caracterização química (DONAGEMMA et al., 2011), determinaram-se os seguintes atributos: pH em água e solução KCl 1 (1 mol L<sup>-1</sup>) (relação solo:solução 1:2,5); Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> por espectrofotometria de absorção atômica e Al<sup>3+</sup> por titulação com NaOH após extração em KCl (1 mol L<sup>-1</sup>); K<sup>+</sup> por fotometria de chama; P por colorimetria após extração em solução Mehlich-1; Cu, Fe, Mn e Zn por espectrofotometria de absorção atômica de chama após digestão em solução DTPA. O carbono orgânico total foi determinado pelo método da digestão com dicromato de potássio em meio ácido e titulação com sulfato ferroso amoniacial (YEOMANS; BREMNER, 1988). O carbono orgânico das frações ácido fúlvico, ácido húmico e humina foi determinado de acordo com a metodologia proposta por Benites et al. (2013).

As caracterizações químicas dos solos são apresentadas nas tabelas a seguir (Tabelas 7, 8, 9 e 10).

TABELA 7. Atributos químicos do solo (0-20 cm) nas posições P1, terço superior (TS), terço TM (TM) e terço TI (TI) das veredas selecionadas para o estudo.

	Posição	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	$\Delta$ pH	P-Mehlich	K	Ca	Mg	Al	H+Al	MO
		-			mg dm <sup>-3</sup>		cmolc dm <sup>-3</sup>				g kg <sup>-1</sup>
Vereda 1	P1	5,4 ± 0,1	4,7 ± 0,1	-0,7 ± 0,1	30,6 ± 7,9	0,3 ± 0,0	2,4 ± 0,2	0,4 ± 0,0	0,0 ± 0,0	5,5 ± 1,0	41,7 ± 4,0
	TS	4,9 ± 0,3	4,1 ± 0,0	-0,8 ± 0,4	1,6 ± 0,3	0,1 ± 0,0	0,3 ± 0,2	0,2 ± 0,0	0,8 ± 0,0	6,4 ± 1,0	41,0 ± 2,2
	TM	5,2 ± 0,4	4,1 ± 0,1	-1,1 ± 0,4	2,0 ± 1,2	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	1,0 ± 0,2	10,1 ± 4,0	88,3 ± 13,8
	TI	5,4 ± 0,4	4,0 ± 0,1	-1,4 ± 0,3	3,4 ± 0,9	0,2 ± 0,2	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,0	0,7 ± 0,2	8,8 ± 2,2	217,0 ± 8,8
Vereda 2	P1	5,7 ± 0,1	5,1 ± 0,0	-0,6 ± 0,1	7,7 ± 4,4	0,1 ± 0,0	1,5 ± 0,7	0,6 ± 0,0	0,0 ± 0,0	2,5 ± 0,0	33,3 ± 2,1
	TS	5,5 ± 0,4	4,4 ± 0,3	-1,1 ± 0,1	7,1 ± 5,1	0,3 ± 0,1	0,7 ± 0,6	0,5 ± 0,2	0,5 ± 0,3	6,2 ± 0,6	46,3 ± 5,4
	TM	4,5 ± 0,5	4,1 ± 0,1	-0,4 ± 0,4	8,8 ± 9,8	0,1 ± 0,0	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,0	1,4 ± 0,6	11,6 ± 6,8	85,3 ± 48,1
	TI	4,4 ± 0,3	4,1 ± 0,2	-0,3 ± 0,2	2,6 ± 1,3	0,2 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,2 ± 0,0	2,2 ± 1,3	19,3 ± 9,9	237,0 ± 157
Vereda 3	P1	5,3 ± 0,1	4,7 ± 0,0	-0,5 ± 0,1	1,2 ± 1,9	0,1 ± 0,0	0,5 ± 0,2	0,4 ± 0,2	0,1 ± 0,1	2,2 ± 0,2	21,7 ± 2,1
	TS	4,2 ± 0,6	4,2 ± 0,1	0,0 ± 0,5	1,5 ± 0,4	0,0 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,9 ± 0,0	5,9 ± 1,1	31,7 ± 1,2
	TM	4,3 ± 0,5	4,2 ± 0,0	-0,1 ± 0,5	2,7 ± 0,4	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	1,6 ± 0,2	12,3 ± 0,4	107,0 ± 36,4
	TI	4,1 ± 0,7	4,2 ± 0,0	0,1 ± 0,7	6,1 ± 1,8	0,2 ± 0,0	0,4 ± 0,0	0,2 ± 0,0	1,5 ± 0,1	15,1 ± 3,8	206,5 ± 30,5
Vereda 4	P1	6,1 ± 0,2	5,7 ± 0,2	-0,4 ± 0,3	22,4 ± 14,1	0,4 ± 0,0	2,9 ± 0,1	0,9 ± 0,0	0,0 ± 0,0	1,9 ± 0,0	34,3 ± 3,1
	TS	5,5 ± 0,1	4,3 ± 0,1	-1,2 ± 0,2	2,0 ± 0,4	0,1 ± 0,0	0,7 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,5 ± 0,2	5,9 ± 0,8	41,3 ± 1,5
	TM	4,7 ± 0,2	4,1 ± 0,0	-0,6 ± 0,2	2,4 ± 0,5	0,1 ± 0,0	0,4 ± 0,2	0,3 ± 0,1	1,3 ± 0,2	12,8 ± 2,3	78,3 ± 6,1
	TI	4,4 ± 0,4	4,1 ± 0,1	-0,3 ± 0,4	2,8 ± 1,1	0,3 ± 0,2	1,4 ± 1,7	0,3 ± 0,2	1,5 ± 0,5	13,2 ± 2,8	162,3 ± 83,4
Vereda 5	P1	4,9 ± 0,2	4,4 ± 0,3	-0,5 ± 0,1	1,1 ± 0,2	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,6 ± 0,0	6,2 ± 0,8	33,3 ± 3,1
	TS	4,6 ± 0,6	4,2 ± 0,1	-0,4 ± 0,7	1,2 ± 0,4	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,8 ± 0,3	7,3 ± 1,9	39,0 ± 2,6
	TM	4,6 ± 0,3	4,5 ± 0,6	-0,2 ± 0,8	2,2 ± 1,0	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,1	1,0 ± 0,2	11,3 ± 1,7	83,7 ± 25,1
	TI	4,5 ± 0,5	2,7 ± 0,0	-1,8 ± 2,6	4,5 ± 1,2	0,1 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,2 ± 0,0	1,2 ± 0,3	11,2 ± 1,8	96,0 ± 96,0
Vereda 6	P1	5,4 ± 0,8	5,1 ± 0,4	-0,3 ± 0,4	26,7 ± 18,2	0,2 ± 0,0	1,8 ± 0,3	0,4 ± 0,0	0,1 ± 0,1	1,9 ± 0,5	23,3 ± 1,5
	TS	5,1 ± 0,1	4,3 ± 0,2	-0,7 ± 0,3	3,9 ± 2,8	0,1 ± 0,1	0,6 ± 0,6	0,2 ± 0,1	0,7 ± 0,5	3,4 ± 1,4	27,3 ± 11,7
	TM	4,6 ± 0,4	4,2 ± 0,0	-0,4 ± 0,4	4,0 ± 2,4	0,1 ± 0,0	0,5 ± 0,3	0,3 ± 0,1	1,3 ± 0,4	10,2 ± 2,9	80,0 ± 49,0
	TI	5,0 ± 0,1	4,4 ± 0,1	-0,6 ± 0,1	4,1 ± 0,7	0,3 ± 0,0	1,8 ± 0,8	0,7 ± 0,3	0,9 ± 0,5	11,2 ± 2,1	158,3 ± 28,6

- Medida de dispersão representa o desvio padrão.

TABELA 8. Atributos químicos do solo (0-20 cont.) nas posições P1, terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI) das veredas selecionadas para o estudo.

	Posição	CO	SB	t	T	V	m	Cu	Fe	Mn	Zn
		g kg <sup>-1</sup>		cmolc dm <sup>-3</sup>	%			mg dm <sup>-3</sup>			
Vereda 1	P1	24,2 ± 2,3	3,0 ± 0,2	3,0 ± 0,2	8,5 ± 1,0	36,0 ± 5,2	0,0 ± 0,0	1,2 ± 0,3	38,7 ± 3,1	1,3 ± 0,2	1,7 ± 0,1
	TS	23,8 ± 1,2	0,6 ± 0,1	1,4 ± 0,2	7,1 ± 1,2	8,7 ± 1,9	56,2 ± 9,2	1,3 ± 0,1	126,3 ± 45,6	0,6 ± 0,0	1,9 ± 2,4
	TM	51,2 ± 8,0	0,5 ± 0,8	1,6 ± 0,1	10,6 ± 4,0	6,3 ± 3,5	65,6 ± 5,7	1,3 ± 0,1	90,3 ± 11,9	0,9 ± 0,4	1,2 ± 1,4
	TI	125,9 ± 5,1	0,7 ± 0,5	1,4 ± 0,1	9,5 ± 2,1	7,8 ± 3,9	52,7 ± 15,9	0,3 ± 0,2	152,3 ± 61,1	1,1 ± 0,4	1,1 ± 1,2
Vereda 2	P1	19,3 ± 1,2	2,2 ± 0,1	2,2 ± 0,7	4,7 ± 0,7	46,0 ± 8,1	0,0 ± 0,0	1,1 ± 0,1	24,0 ± 0,8	1,9 ± 0,2	1,5 ± 0,0
	TS	26,9 ± 3,2	1,5 ± 0,3	1,9 ± 0,6	7,6 ± 0,5	18,6 ± 11,1	31,8 ± 21,7	1,2 ± 0,0	113,7 ± 20,9	1,5 ± 0,0	0,3 ± 0,1
	TM	49,5 ± 28	0,7 ± 2,8	2,2 ± 0,4	12,4 ± 6,6	7,9 ± 4,0	64,0 ± 14,4	2,3 ± 0,2	92,7 ± 46,1	2,0 ± 0,4	0,3 ± 0,0
	TI	137,5 ± 91	0,7 ± 9,1	2,9 ± 1,3	20,0 ± 9,8	4,9 ± 3,0	66,8 ± 22,2	2,2 ± 0,7	181,3 ± 91,0	6,5 ± 5,7	0,4 ± 0,1
Vereda 3	P1	12,6 ± 1,2	1,0 ± 0,1	1,1 ± 0,2	3,2 ± 0,4	29,4 ± 6,4	10,8 ± 9,7	0,6 ± 0,1	16,0 ± 0,0	1,6 ± 0,5	0,2 ± 0,0
	TS	18,4 ± 0,6	0,4 ± 0,1	1,3 ± 0,0	6,3 ± 1,1	7,1 ± 1,3	67,0 ± 0,3	0,8 ± 0,1	110,0 ± 22,1	1,2 ± 0,2	0,1 ± 0,1
	TM	62,1 ± 21	0,5 ± 2,1	2,0 ± 0,2	12,7 ± 0,4	3,5 ± 0,1	77,9 ± 1,8	0,8 ± 0,2	85,0 ± 28,5	0,8 ± 0,3	0,2 ± 0,0
	TI	119,8 ± 17,	0,7 ± 1,8	2,2 ± 0,2	15,8 ± 3,8	4,6 ± 0,8	67,8 ± 0,3	1,0 ± 0,4	436,0 ± 43,0	3,4 ± 1,3	0,3 ± 0,1
Vereda 4	P1	19,9 ± 1,8	4,3 ± 0,2	4,3 ± 0,0	6,2 ± 0,0	69,2 ± 0,2	0,0 ± 0,0	0,8 ± 0,1	15,3 ± 2,5	1,5 ± 0,6	1,8 ± 0,3
	TS	24,0 ± 0,9	1,1 ± 0,1	1,6 ± 0,1	6,9 ± 0,7	15,4 ± 3,2	33,5 ± 9,4	0,9 ± 0,0	110,7 ± 7,1	1,3 ± 0,4	0,2 ± 0,0
	TM	45,4 ± 3,6	0,9 ± 0,4	2,1 ± 0,1	13,7 ± 2,0	6,7 ± 2,9	59,3 ± 9,8	0,9 ± 0,1	156,7 ± 23,4	2,5 ± 1,0	0,3 ± 0,1
	TI	94,1 ± 48	2,0 ± 4,8	3,6 ± 2,2	15,2 ± 4,3	11,9 ± 7,3	48,8 ± 14,7	1,0 ± 0,1	366,3 ± 197	3,6 ± 1,2	0,4 ± 0,1
Vereda 5	P1	19,3 ± 1,8	0,5 ± 0,2	1,1 ± 0,1	6,7 ± 0,8	7,0 ± 1,2	56,3 ± 4,6	0,7 ± 0,1	41,3 ± 4,5	1,3 ± 0,2	0,1 ± 0,1
	TS	22,6 ± 1,5	0,5 ± 0,2	1,3 ± 0,3	7,8 ± 1,9	6,1 ± 1,1	63,4 ± 6,0	1,3 ± 0,2	75,0 ± 26,1	1,6 ± 0,1	0,2 ± 0,1
	TM	48,5 ± 14	0,4 ± 1,5	1,4 ± 0,2	11,7 ± 1,7	3,6 ± 0,7	70,4 ± 3,7	1,8 ± 0,8	111,7 ± 41,3	1,5 ± 0,3	0,2 ± 0,1
	TI	55,7 ± 55	0,6 ± 5,6	1,8 ± 0,3	11,8 ± 1,8	5,3 ± 0,8	64,9 ± 4,9	1,8 ± 1,2	361,0 ± 39,0	1,9 ± 0,5	0,3 ± 0,1
Vereda 6	P1	13,5 ± 0,9	2,4 ± 0,1	2,5 ± 0,1	4,3 ± 0,3	56,6 ± 9,0	2,8 ± 4,9	0,4 ± 0,2	16,7 ± 7,0	4,1 ± 1,7	0,2 ± 0,0
	TS	15,9 ± 6,8	0,9 ± 0,7	1,6 ± 0,2	4,2 ± 0,9	22,5 ± 20,0	46,8 ± 33,8	1,0 ± 0,3	71,3 ± 48,8	2,5 ± 1,5	0,1 ± 0,1
	TM	46,4 ± 28	0,8 ± 2,8	2,1 ± 0,6	11,0 ± 3,1	7,3 ± 2,6	61,8 ± 11,6	1,4 ± 0,2	88,3 ± 24,4	4,3 ± 1,8	0,3 ± 0,2
	TI	91,8 ± 16	2,8 ± 1,7	3,7 ± 0,8	14,0 ± 1,6	20,3 ± 8,4	26,9 ± 18,9	1,4 ± 0,4	376,0 ± 35,0	8,6 ± 1,5	0,5 ± 0,1

- Medida de dispersão representa o desvio padrão.

TABELA 9. Atributos químicos do solo (40-70 cm).

	Posição	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl -	△ pH	P-Mehlich mg dm <sup>-3</sup>	K	Ca	Mg cmolc dm <sup>-3</sup>	Al	H+Al	MO g kg <sup>-1</sup>
Vereda 1	P1	4,7 ± 0,1	4,7 ± 0,1	0,0 ± 0,2	3,1 ± 1,6	0,1 ± 0,0	1,1 ± 0,3	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,1	4,5 ± 0,6	27,7 ± 7,0
	TS	5,4 ± 0,2	5,1 ± 0,1	-0,3 ± 0,2	0,7 ± 0,2	0,0 ± 0,0	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,0 ± 0,0	2,4 ± 0,1	15,0 ± 8,3
	TM	5,2 ± 0,6	5,1 ± 0,4	-0,2 ± 0,2	0,7 ± 0,1	0,0 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,0 ± 0,1	2,9 ± 0,8	13,7 ± 48,7
	TI	4,6 ± 0,4	4,2 ± 0,0	-0,5 ± 0,3	1,0 ± 0,4	0,0 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,1	1,2 ± 0,3	13,1 ± 1,1	89,0 ± 27,3
Vereda 2	P1	5,4 ± 0,8	5,4 ± 0,1	0,1 ± 0,9	0,4 ± 0,1	0,0 ± 0,0	1,2 ± 0,1	0,4 ± 0,0	0,1 ± 0,1	1,6 ± 0,1	21,0 ± 11,0
	TS	5,0 ± 0,2	4,5 ± 0,3	-0,5 ± 0,4	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,0	0,3 ± 0,2	2,1 ± 0,3	7,3 ± 2,1
	TM	4,9 ± 0,5	4,4 ± 0,2	-0,5 ± 0,4	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,3 ± 0,2	2,0 ± 0,3	27,0 ± 31,3
	TI	4,6 ± 0,2	4,1 ± 0,2	-0,5 ± 0,2	1,5 ± 0,8	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	2,7 ± 1,9	19,1 ± 13,2	171,0 ± 144,7
Vereda 3	P1	4,8 ± 0,5	5,2 ± 0,0	0,4 ± 0,5	0,0 ± 0,1	0,0 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	1,4 ± 0,3	8,7 ± 2,1
	TS	5,1 ± 0,1	4,5 ± 0,1	-0,6 ± 0,1	0,1 ± 0,2	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	1,9 ± 0,2	7,0 ± 1,7
	TM	5,1 ± 0,4	4,4 ± 0,0	-0,7 ± 0,5	0,3 ± 0,1	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,4 ± 0,1	2,2 ± 0,2	8,3 ± 2,1
	TI	4,9 ± 0,1	4,2 ± 0,0	-0,7 ± 0,1	0,6 ± 0,2	0,0 ± 0,0	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,1	1,1 ± 0,1	8,9 ± 2,4	48,7 ± 10,7
Vereda 4	P1	5,7 ± 0,9	5,3 ± 0,5	-0,4 ± 0,4	0,7 ± 0,4	0,2 ± 0,0	1,1 ± 0,5	0,4 ± 0,1	0,1 ± 0,1	2,5 ± 1,3	27,3 ± 14,6
	TS	5,2 ± 0,3	4,6 ± 0,4	-0,6 ± 0,7	0,4 ± 0,2	0,0 ± 0,0	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,1	1,9 ± 0,6	11,0 ± 1,7
	TM	4,8 ± 0,2	4,1 ± 0,0	-0,7 ± 0,2	1,0 ± 0,7	0,0 ± 0,0	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,0	1,9 ± 0,4	15,1 ± 2,7	71,3 ± 23,1
	TI	5,0 ± 0,5	4,0 ± 0,0	-1,0 ± 0,5	3,0 ± 1,3	0,0 ± 0,0	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,0	2,4 ± 0,6	17,2 ± 1,6	218,3 ± 27,2
Vereda 5	P1	4,9 ± 0,3	4,9 ± 0,1	0,0 ± 0,3	0,3 ± 0,3	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,2	3,3 ± 1,0	19,7 ± 1,5
	TS	5,4 ± 0,1	4,6 ± 0,4	-0,8 ± 0,3	0,9 ± 0,7	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,3 ± 0,4	5,3 ± 2,2	86,7 ± 107,9
	TM	4,4 ± 0,8	4,2 ± 0,2	-0,3 ± 0,7	1,9 ± 1,0	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,1	1,1 ± 0,5	11,5 ± 5,0	72,7 ± 21,0
	TI	4,6 ± 0,3	3,9 ± 0,3	-0,7 ± 0,5	5,5 ± 1,8	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	1,3 ± 0,3	10,8 ± 2,7	212,3 ± 61,3
Vereda 6	P1	5,9 ± 0,2	5,6 ± 0,3	-0,4 ± 0,3	1,7 ± 0,9	0,0 ± 0,0	1,2 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,0 ± 0,0	1,4 ± 0,2	11,7 ± 1,2
	TS	5,0 ± 0,1	4,3 ± 0,0	-0,6 ± 0,1	3,2 ± 2,1	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,7 ± 0,2	2,9 ± 0,8	9,3 ± 2,1
	TM	4,8 ± 0,1	4,3 ± 0,0	-0,5 ± 0,1	3,6 ± 1,6	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	1,5 ± 0,2	6,7 ± 0,5	56,7 ± 51,6
	TI	4,5 ± 1,2	4,4 ± 0,2	-0,2 ± 1,1	2,4 ± 0,8	0,1 ± 0,0	1,1 ± 0,3	0,8 ± 0,7	1,5 ± 1,2	10,4 ± 2,7	85,7 ± 31,0

- Medida de dispersão representa o desvio padrão.

TABELA 10. Atributos químicos do solo (40-70 cont.)

Posição	CO dag kg <sup>-1</sup>	SB	t cmolc dm <sup>-3</sup>	T	V %	m	Cu	Fe	Mn mg dm <sup>-3</sup>	Zn	
Vereda 1	P1	16,0 2,1	1,4 ± 0,2	1,5 ± 0,2	5,8 ± 0,8	23,5 ± 2,9	8,3 ± 4,8	0,8 ± 0,2	22,0 ± 4,6	1,2 ± 0,1	0,4 ± 0,2
	TS	8,7 1,5	0,4 ± 0,2	0,4 ± 0,1	2,8 ± 0,1	12,7 ± 1,7	0,0 ± 0,0	0,5 ± 0,0	7,3 ± 2,3	1,2 ± 0,4	0,1 ± 0,1
	TM	7,9 2,6	0,3 ± 0,3	0,3 ± 0,1	3,2 ± 0,8	10,1 ± 2,6	7,9 ± 14	0,7 ± 0,1	7,0 ± 2,6	1,1 ± 0,2	0,1 ± 0,0
	TI	51,6 22,7	0,4 ± 2,3	1,6 ± 0,4	13,4 ± 1,1	2,7 ± 0,4	77,3 ± 2,9	2,2 ± 1,2	259 ± 86	1,3 ± 0,4	0,1 ± 0,1
Vereda 2	P1	12,2 1,2	1,6 ± 0,1	1,7 ± 0,2	3,3 ± 0,2	49,8 ± 0,9	3,7 ± 6,3	0,5 ± 0,1	13,0 ± 1,7	1,3 ± 0,1	0,2 ± 0,0
	TS	4,2 2,0	0,5 ± 0,1	0,8 ± 0,3	2,6 ± 0,4	18,7 ± 0,5	28,8 ± 25	0,7 ± 0,3	7,0 ± 2,6	1,5 ± 0,2	0,1 ± 0,0
	TM	15,7 1,2	0,3 ± 1,8	0,6 ± 0,2	2,3 ± 0,3	13,8 ± 2,1	43,3 ± 17	0,9 ± 0,6	4,3 ± 3,2	1,1 ± 0,5	0,1 ± 0,0
	TI	99,2 18,1	0,5 ± 8,4	3,1 ± 1,8	19,6 ± 13,2	3,8 ± 3,4	75,8 ± 23	2,0 ± 0,8	50,3 ± 21	1,4 ± 0,6	0,2 ± 0,1
Vereda 3	P1	5,0 84,0	0,3 ± 0,1	0,4 ± 0,0	1,7 ± 0,3	18,3 ± 3,3	26,9 ± 4,9	0,3 ± 0,1	7,0 ± 3,5	2,2 ± 0,2	0,1 ± 0,0
	TS	4,1 1,0	0,2 ± 0,1	0,5 ± 0,1	2,2 ± 0,2	11,3 ± 3,1	47,4 ± 7,7	0,6 ± 0,2	10,0 ± 4,4	1,6 ± 0,2	0,1 ± 0,1
	TM	4,8 1,2	0,2 ± 0,1	0,7 ± 0,1	2,5 ± 0,2	9,9 ± 3,0	64,1 ± 7,2	1,4 ± 0,6	7,7 ± 6,0	1,1 ± 0,2	0,1 ± 0,1
	TI	28,2 6,2	0,3 ± 0,6	1,4 ± 0,2	9,2 ± 2,4	3,5 ± 1,4	78,4 ± 4,1	6,5 ± 4,4	8,0 ± 1,0	1,5 ± 0,3	0,2 ± 0,1
Vereda 4	P1	15,9 8,4	1,6 ± 0,8	1,7 ± 0,5	4,2 ± 0,9	41,2 ± 18	7,4 ± 8,3	0,6 ± 0,1	13,3 ± 5,1	1,8 ± 0,2	0,3 ± 0,1
	TS	6,4 1,0	0,6 ± 0,1	0,7 ± 0,0	2,5 ± 0,5	24,8 ± 6,6	16,4 ± 10	0,2 ± 0,1	6,0 ± 1,7	1,2 ± 0,2	0,2 ± 0,1
	TM	41,4 13,4	0,4 ± 1,3	2,3 ± 0,3	15,5 ± 2,7	2,6 ± 0,6	82,3 ± 4,8	1,7 ± 1,3	19,7 ± 11	1,8 ± 0,1	0,1 ± 0,1
	TI	126,6 15,8	0,5 ± 1,6	2,9 ± 0,5	17,7 ± 1,5	2,9 ± 0,6	81,6 ± 5,0	3,0 ± 2,6	89,3 ± 78	2,4 ± 0,3	0,3 ± 0,1
Vereda 5	P1	11,4 0,9	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,2	3,6 ± 1,0	6,6 ± 2,2	25,4 ± 29	1,8 ± 0,5	9,0 ± 1,0	0,4 ± 0,3	0,1 ± 0,1
	TS	50,3 62,6	0,2 ± 6,3	0,5 ± 0,4	5,5 ± 2,2	4,3 ± 1,9	45,2 ± 40	4,1 ± 2,3	29,7 ± 25	0,6 ± 0,2	0,1 ± 0,1
	TM	42,1 12,2	0,3 ± 1,2	1,3 ± 0,6	11,8 ± 5,0	2,3 ± 0,3	79,9 ± 2,6	0,5 ± 0,1	64,7 ± 56	0,7 ± 0,2	0,1 ± 0,1
	TI	123,2 35,6	0,2 ± 3,6	1,6 ± 0,3	11,0 ± 2,7	2,1 ± 0,5	85,3 ± 2,9	1,4 ± 0,7	70,7 ± 32	0,6 ± 0,2	0,2 ± 0,1
Vereda 6	P1	6,8 0,6	1,5 ± 0,1	1,5 ± 0,1	2,9 ± 0,3	51,3 ± 2,7	0,0 ± 0,0	1,3 ± 0,9	9,7 ± 3,8	0,4 ± 0,4	0,1 ± 0,0
	TS	5,4 1,2	0,3 ± 0,1	1,0 ± 0,1	3,2 ± 0,7	9,4 ± 3,8	70,2 ± 10	1,9 ± 2,1	6,7 ± 1,5	0,6 ± 0,5	0,1 ± 0,1
	TM	32,9 29,9	0,3 ± 3,0	1,7 ± 0,1	7,0 ± 0,4	4,1 ± 1,8	83,9 ± 6,8	4,3 ± 4,7	13,0 ± 4,0	0,4 ± 0,2	0,1 ± 0,0
	TI	49,7 18,0	2,0 ± 1,8	3,5 ± 0,4	12,4 ± 1,8	17,2 ± 9,3	40,0 ± 31	1,9 ± 0,3	38,3 ± 18	1,3 ± 0,6	0,1 ± 0,1

- Medida de dispersão se trata de desvio padrão.

A quantificação do C das substâncias húmicas é apresentado na tabela 11.

TABELA 11. Carbono orgânico das frações ácido fúlvico, ácido húmico e humina.

Vereda	Posição	C-ácido fúlvico	C-ácido húmico	C-humina	C das SH's
Camada 0-20 cm (g kg <sup>-1</sup> )					
V1	P1	5,06 ± 0,40	2,11 ± 0,80	10,87 ± 1,65	18,03 ± 2,79
	Terço superior	6,06 ± 1,19	2,99 ± 0,59	12,17 ± 1,09	21,22 ± 0,64
	Terço médio	10,69 ± 1,84	9,89 ± 2,92	21,49 ± 1,30	42,07 ± 5,22
	Terço inferior	15,09 ± 0,00	13,84 ± 0,00	30,00 ± 0,00	58,93 ± 0,00
V2	P1	3,02 ± 0,00	0,64 ± 0,00	6,71 ± 0,00	10,37 ± 0,00
	Terço superior	4,68 ± 0,91	5,68 ± 2,02	10,32 ± 1,92	20,68 ± 0,79
	Terço médio	6,50 ± 2,59	8,53 ± 4,96	18,13 ± 10,78	33,16 ± 18,26
	Terço inferior	11,04 ± 5,62	9,81 ± 6,97	23,34 ± 10,51	44,19 ± 23,09
V3	P1	6,19 ± 4,01	0,74 ± 0,16	3,85 ± 0,13	10,78 ± 4,19
	Terço superior	3,74 ± 0,33	2,08 ± 0,50	6,30 ± 0,57	12,11 ± 1,11
	Terço médio	6,79 ± 0,85	12,48 ± 1,66	15,29 ± 4,27	34,56 ± 4,25
	Terço inferior	13,10 ± 1,94	14,01 ± 0,15	30,00 ± 0,00	57,11 ± 2,09
V4	P1	4,00 ± 0,29	1,12 ± 0,12	8,05 ± 1,05	13,17 ± 0,87
	Terço superior	4,71 ± 0,50	2,69 ± 0,21	6,06 ± 0,96	13,46 ± 0,51
	Terço médio	7,13 ± 0,29	8,65 ± 1,64	8,34 ± 0,34	24,13 ± 1,33
	Terço inferior	11,99 ± 3,87	14,09 ± 0,00	17,38 ± 11,15	43,46 ± 14,03
V5	P1	6,33 ± 2,36	1,93 ± 1,10	9,78 ± 0,08	18,05 ± 3,54
	Terço superior	6,71 ± 0,41	2,84 ± 2,04	10,37 ± 3,19	19,91 ± 5,52
	Terço médio	9,87 ± 0,27	14,25 ± 0,28	13,94 ± 1,84	38,06 ± 1,86
	Terço inferior	13,21 ± 1,30	14,25 ± 0,28	28,41 ± 2,75	55,87 ± 4,16
V6	P1	5,84 ± 0,29	2,50 ± 0,22	4,93 ± 0,85	13,27 ± 0,42
	Terço superior	6,59 ± 0,79	2,42 ± 0,87	7,40 ± 3,04	16,42 ± 3,18
	Terço médio	8,67 ± 2,00	7,70 ± 2,82	9,24 ± 1,74	25,61 ± 5,59
	Terço inferior	12,24 ± 1,26	14,57 ± 0,00	30,00 ± 0,00	56,82 ± 1,26
Camada 40-70 cm (g kg <sup>-1</sup> )					
V1	P1	7,44 ± 0,24	4,21 ± 1,37	9,28 ± 1,37	20,92 ± 1,37
	Terço superior	5,89 ± 0,79	2,42 ± 0,14	5,72 ± 0,14	14,03 ± 0,14
	Terço médio	6,40 ± 0,67	2,28 ± 0,87	5,13 ± 0,87	13,81 ± 0,87
	Terço inferior	8,90 ± 1,18	14,57 ± 0,00	16,09 ± 0,00	39,56 ± 0,00
V2	P1	4,97 ± 1,20	1,56 ± 0,29	6,05 ± 0,29	12,57 ± 0,29
	Terço superior	2,35 ± 0,42	1,70 ± 0,00	2,18 ± 0,00	6,24 ± 0,00
	Terço médio	1,70 ± 0,90	1,34 ± 0,22	2,94 ± 0,22	5,98 ± 0,22
	Terço inferior	6,73 ± 1,57	14,57 ± 0,00	30,00 ± 0,00	51,31 ± 0,00
V3	P1	2,43 ± 0,21	1,27 ± 0,00	3,80 ± 0,00	7,49 ± 0,00
	Terço superior	2,31 ± 0,72	1,60 ± 0,33	2,66 ± 0,33	6,57 ± 0,33
	Terço médio	2,40 ± 0,16	1,89 ± 0,17	2,37 ± 0,17	6,67 ± 0,17
	Terço inferior	3,77 ± 0,88	10,52 ± 1,01	13,62 ± 1,01	27,91 ± 1,01
V4	P1	1,32 ± 1,64	1,16 ± 0,11	4,94 ± 0,11	7,41 ± 0,11
	Terço superior	1,67 ± 1,22	1,48 ± 0,07	4,22 ± 0,07	7,38 ± 0,07
	Terço médio	5,11 ± 1,32	14,43 ± 0,14	16,19 ± 0,14	35,73 ± 0,14
	Terço inferior	9,89 ± 3,44	14,57 ± 0,00	27,91 ± 0,00	52,38 ± 0,00
V5	P1	1,67 ± 0,36	1,41 ± 0,07	5,79 ± 0,07	8,87 ± 0,07
	Terço superior	2,54 ± 1,00	1,16 ± 0,18	7,03 ± 0,18	10,73 ± 0,18
	Terço médio	6,19 ± 2,56	9,19 ± 0,18	17,56 ± 0,18	32,94 ± 0,18
	Terço inferior	13,61 ± 1,06	14,57 ± 0,00	29,34 ± 0,00	57,52 ± 0,00
V6	P1	0,82 ± 0,08	0,80 ± 0,83	3,99 ± 0,83	5,61 ± 0,83
	Terço superior	0,61 ± 0,71	0,83 ± 0,07	2,75 ± 0,07	4,20 ± 0,07
	Terço médio	1,04 ± 0,79	8,17 ± 1,12	5,22 ± 1,12	14,43 ± 1,12
	Terço inferior	4,21 ± 1,84	14,57 ± 1,37	15,47 ± 1,37	34,26 ± 1,37

Para medição da variação do potencial redox, realizou-se um ensaio de incubação em condições laboratoriais. Foram utilizadas amostras das camadas 0-20 cm (camada orgânica) e 40-70 cm (camada gley) das veredas 1 (representativa da superfície da Chapada) e 3 (representativa da Formação Bauru). As amostras foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm. Em tubos de PVC de 10 cm de altura e 12 cm de diâmetro dotados de tampão, as amostras foram acondicionadas até uma altura (h) correspondendo a um volume total de solo igual a 750 cm<sup>-3</sup> (Figura 9). As amostras das camadas superficiais das veredas 1 e 3 tiveram a densidade do solo igual 0,70 e 0,88 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente. As amostras subsuperficiais das veredas 1 e 3 tiveram densidade do solo igual a 1,00 e 1,50 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente. Procedeu-se a completa saturação das amostras com água coletada da própria vereda, mantendo-se uma lâmina de aproximadamente 1 cm sobre a superfície da amostra. O volume de água necessário para completa saturação das amostras foi determinado baseado no volume total de poros (VTP) de cada amostra:

$$VTP = 1 - \frac{D_s}{D_p} \quad (1)$$

Onde: VTP é o volume total de poros (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>); D<sub>s</sub> é a densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>) e D<sub>p</sub> é a densidade de partículas (g cm<sup>-3</sup>).

As amostras foram fechadas com uso de um tampão de PVC e, por meio de um orifício no tampão, realizou-se as medições do potencial redox (Eh) e pH nos tempos (dias): 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6°, 7°, 8°, 11°, 15°, 20°, 22°, 27°, 29°, 32° e 48° dia. Os valores de Eh obtidos no aparelho foram corrigidos em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio (JARDIM, 2014).



FIGURA 9. Detalhe da montagem do ensaio de incubação, em condições laboratoriais, para acompanhamento da variação do potencial redox.

### 3.7 Extração e quantificação dos elementos – método USEPA 3051A

Uma porção homogênea do material de solo (< 2 mm) foi totalmente triturada em almofariz de ágata e passada em tela de nylon de 150 µm de abertura. Esse material foi submetido à digestão de acordo com o método USEPA 3051A. Para isso, 0,1 g da amostra foram colocados em tubos de Teflon com capacidade para 50 mL e adicionados 10 mL de HNO<sub>3</sub> (destilado). Após a digestão, os extratos obtidos foram diluídos pela adição de 10 mL de água ultrapura e filtrados. Os extratos filtrados foram mantidos sob refrigeração até a quantificação dos elementos Cd, Pb, As, Se e Ni em espectrofotômetro de absorção atômica com módulo de forno de grafite. Os elementos Zn, Cu, Fe e Mn foram quantificados em espectrofotômetro de absorção atômica com módulo de chama.

O controle de qualidade da análise foi realizado utilizando-se o padrão NIST 2710A, obtendo-se os seguintes valores de recuperação (%): Cd (100); Pb (92); As (110); Se (152); Ni (78); Fe (95); Cu (117); Mn (80); Zn (98). Amostras-branco (10 mL de HNO<sub>3</sub> e 10 mL de água ultrapura) foram utilizadas para determinação dos limites de detecção de cada elemento (APHA, 1989). Na Figura 10 são apresentadas as curvas-padrão utilizadas para cada elemento e o limite de detecção no aparelho (LD<sub>A</sub>). Os valores de LD<sub>A</sub> foram obtidos pela equação:

$$LD_A = \bar{X} + (\sigma \cdot t) \quad (2)$$

Onde,  $LD_A$  é o limite de detecção no aparelho ( $\text{mg L}^{-1}$  ou  $\mu\text{g L}^{-1}$ ); X é a média das concentrações de cada elemento nas amostras-branco ( $n=8$ );  $\sigma$  é o desvio-padrão das concentrações de cada elemento nas amostras-branco ( $n=8$ ); t é o valor tabelado da distribuição t-student para graus de liberdade igual a 7 ( $n-1$ ) e  $\alpha=0,01$ .

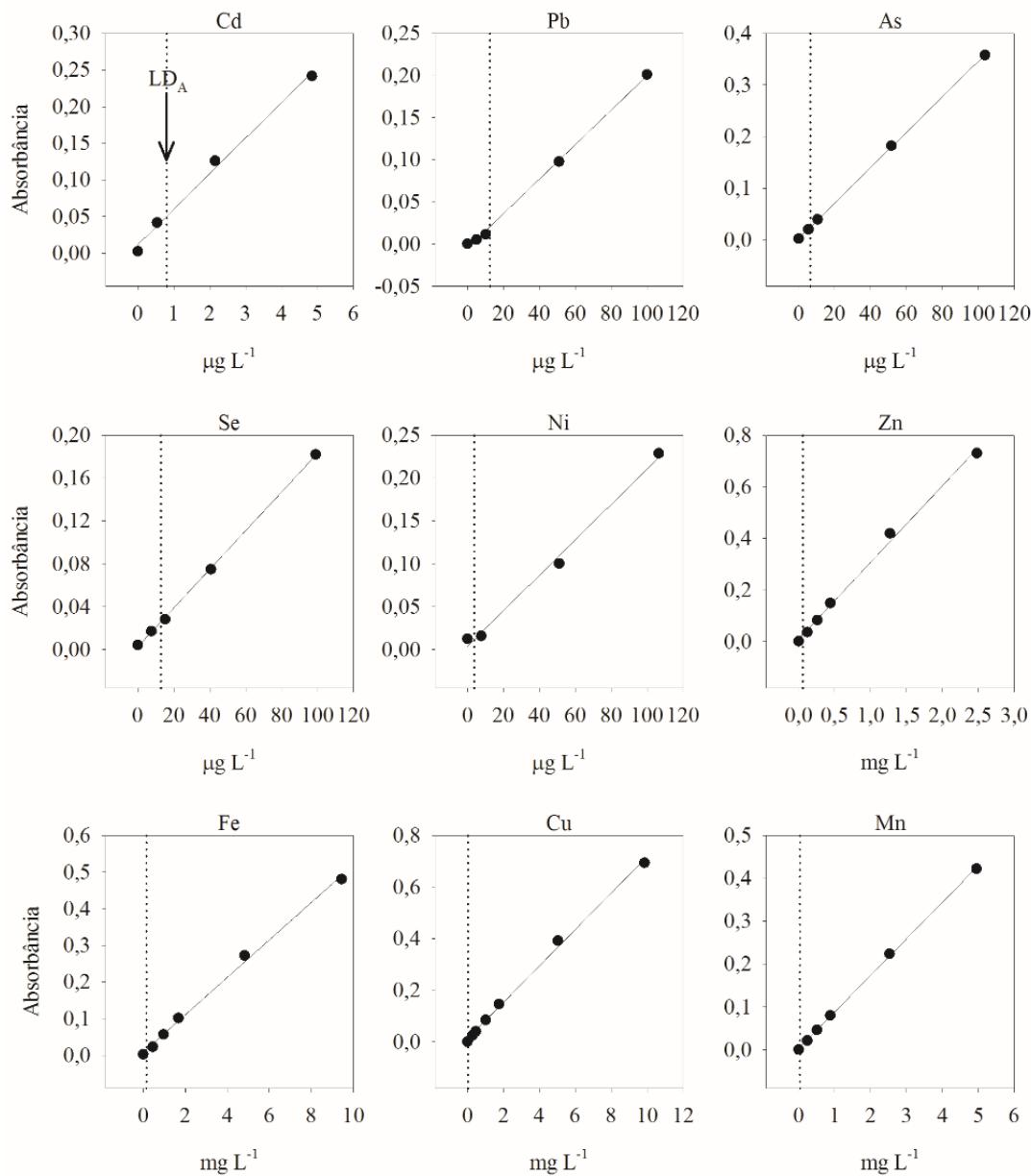


FIGURA 10. Curvas-padrão obtidas para Cd, Pb, As, Se e Ni (espectrofotômetro de absorção atômica com módulo em forno de grafite); Zn, Fe, Cu e Mn (espectrofotômetro de absorção atômica com módulo de chama).  $LD_A$  = limite de detecção do aparelho.

Para os elementos determinados em espectrofotômetro de absorção atômica com módulo em forno de grafite os valores de LD<sub>A</sub> ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) foram: Cd (0,81); Pb (12,60); As (6,45); Se (12,83) e Ni (3,85). Para os elementos determinados em espectrofotômetro de absorção atômica com módulo de chama, os valores de LD<sub>A</sub> (mg L<sup>-1</sup>) foram: Zn (0,06); Fe (0,15); Cu (0,04) e Mn (0,04). No solo, os valores LD<sub>A</sub> obtidos correspondem a: Cd (16,2  $\mu\text{g kg}^{-1}$ ); Pb (0,25 mg kg<sup>-1</sup>); As (0,13 mg kg<sup>-1</sup>); Se (0,26 mg kg<sup>-1</sup>); Ni (0,08 mg kg<sup>-1</sup>); Zn (1,20 mg kg<sup>-1</sup>); Fe (3,00 mg kg<sup>-1</sup>); Cu (0,90 mg kg<sup>-1</sup>) e Mn (0,70 mg kg<sup>-1</sup>).

Os teores de elementos-traço foram avaliado a partir de análise multivariada, por meio de análise gráfica de componentes principais (PCA), procedimento estatístico que tem por objetivo a combinação de variáveis lineares buscando agrupar e evidenciar padrões amostrais.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Modificação do uso do solo no entorno das veredas selecionadas para o estudo

As veredas da região são cercadas por atividades agrícolas, onde grandes extensões de áreas úmidas foram incorporadas aos sistemas agrícolas com remoção da vegetação nativa (ROSOLEN et al., 2015). No ambiente de chapada, onde estão algumas veredas deste estudo, Souza e Reis (2014) determinaram a conversão de 107,3 km<sup>2</sup> de áreas úmidas para atividades do agronegócio entre os anos de 1964 a 2009.

Nas bacias hidrográficas das veredas em questão foi também observado, em fotografias aéreas (1979) digitalmente comparadas a imagens de satélite (2010), que nos últimos 30 anos houve uma intensa alternância no uso do solo, onde grandes áreas de cerrado foram convertidas para o agronegócio e vários campos hidromórficos foram incorporados às atividades produtivas, sobretudo com a cultura de grãos, cana-de-açúcar e florestas plantadas com espécies de Eucalipto (*Eucalyptus spp*) e Pinus (*Pinus spp*).

Principalmente a partir da década de 1970, as práticas com incentivo estatal (Ex.: PROVARZEAS), visando o aumento da área economicamente produtiva, exploraram a riqueza hídrica dos ambientes de vereda, através do incentivo a drenagem de várzeas para cultivo e irrigação. Isso colaborou para que grandes extensões de solos hidromórficos fossem convertidos para o uso agrícola (ROSOLEN et al., 2015b). Nos últimos anos, o maior rigor na legislação ambiental vem incentivando a preservação de ambientes de veredas, através da aplicação do conceito de Área de Preservação Permanente (APP) e instituição de faixas de proteção.

A alternância do uso do solo, em caráter temporal (1979 e 2010) é apresentado na figura a seguir (Figura 11).

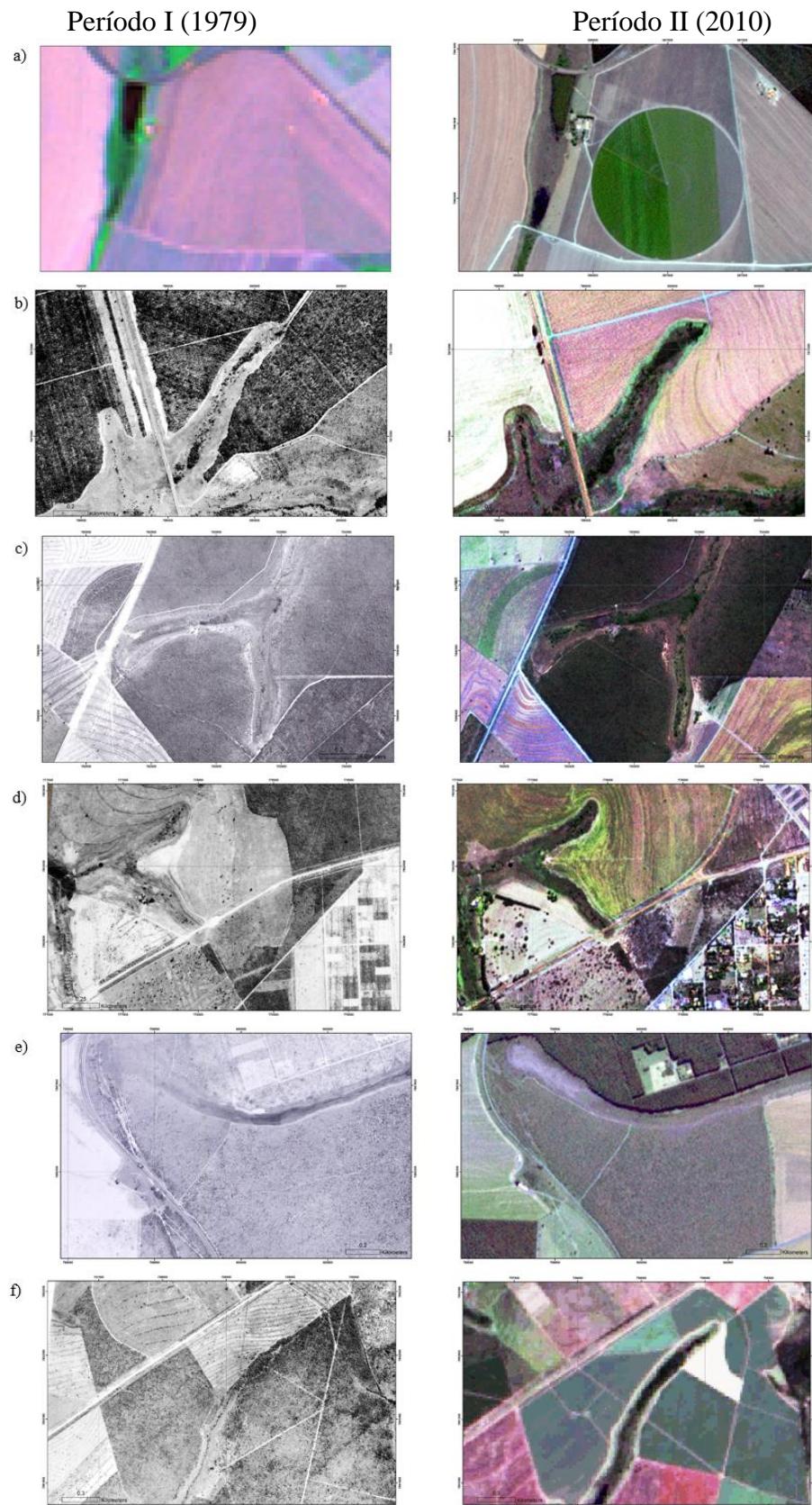


FIGURA 11. Alternância do uso do solo na vereda 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e) e 6 (f).

A vereda 1 teve, nos últimos anos, o uso do entorno pautado em atividades ligadas ao agronegócio (notadamente olerícolas, consórcio soja e milho). A topografia plana do ambiente de chapada favoreceu a prévia conversão do solo para uso agrícola. Na região observa-se grande número de veredas represadas para aproveitamento dos recursos hídricos nas atividades econômicas. Segundo Ramos et al. (2006) o uso da água na agricultura em ambiente de veredas pode ocasionar contaminação ambiental em área de chapada.

As veredas 2 e 6 têm atualmente o uso da área de contribuição pautado na cultura da cana de açúcar. Na região do Triângulo Mineiro, Soares e Porto (2007) constataram contaminação do solo e da água por agroquímicos em regiões produtoras de cana-de-açúcar. Na região, Brito e Reis (2012) determinaram através de imagens *TM/Landsat*, uma expansão na ordem de 119% dessa cultura em um período de 10 anos (1999-2008). Na vereda 2, a conversão do solo é posterior ao ano de 1979, visto que em fotografias aéreas do período, o entorno da vereda era constituído por cobertura vegetal nativa. Por sua vez na vereda 6 foi observado que houve expansão da área para uso agropecuário. Em 1979 uma pequena parcela da área de contribuição da vereda era utilizado para agricultura convencional com uso de arado e grade e também para práticas pastoris, já em imagens de satélite do ano de 2014 observa-se o predomínio da cultura canavieira. Após 1979, observou-se também o represamento de várias veredas da região da vereda 6. De acordo com Ramos et al. (2006) a existência de veredas represadas é comum nessa área, principalmente para dessedentação animal.

A área de contribuição da vereda 3 é constituída em sua grande maioria por cerrado nativo. Houve pouca modificação no uso do solo na área desde o ano de 1979. Em estudo na reserva florestal que abriga a vereda em questão, Araújo et al. (2002) associaram a riqueza florística às características edáficas do solo, principalmente no que se refere ao teor de umidade do solo. No estudo, várias espécies exclusivas desses ambientes foram identificadas.

A vereda 4 encontra-se próxima ao perímetro urbano em cerca de 1500 metros, lotes já existiam desde o ano de 1979. Atualmente a área de contribuição é constituída por atividades agrícolas, uso que em 1979 já se fazia presente. O uso de grades aradoras no ano de 1979 não levava em conta o limite hidromórfico do solo. Pela proximidade de núcleos urbanos, veredas como a em questão são mais suscetíveis a queimadas e sujeitas à deposição de resíduos urbanos.

Na área da vereda 5, grandes áreas de campos hidromórficos foram substituídos por florestas de pinus a partir do ano de 1979. Atualmente a área do seu entorno possui fragmento de cerrado nativo e floresta de pinus. Em ambiente de vereda no Triângulo Mineiro com uso do entorno pautado em pastagem e plantação de pinus, Oliveira et al. (2009) constataram que alterações em bordas de vereda podem interferir na riqueza de espécies e promover a indução de espécies exóticas ao ambiente.

#### 4.2 Variação da profundidade da água subsuperficial, pH e condutividade elétrica

Dentro da região hidromórfica estabelecida, a profundidade do lençol freático foi diferente nas veredas. Isso decorre, dentre outros aspectos, ao relevo local favorecendo uma maior ou menor área de inundação. Em todas as veredas, no terço inferior, o solo permaneceu saturado com água até próximo a superfície por todo o período estudado (Figura 12).

Na vereda 1, no terço médio, o lençol, inicialmente a uma profundidade de 30 cm, elevou-se a superfície em decorrência do início das chuvas (nov./dez. 2014) (Figura 6), permanecendo pouco alterado até setembro de 2015. No terço superior, o lençol inicialmente a 70 cm (set./2014), fica próximo a superfície em dezembro de 2014 e aprofunda-se novamente a partir de abril de 2015.

Na vereda 2, no terço superior, apesar do ponto de amostragem estar em uma região hidromórfica (identificada pela coloração cinza e ocorrência de mosqueados), não foi observada a presença do lençol freático até 100 cm de profundidade. No terço médio, o lençol foi identificado a uma profundidade de 80 a 100 cm somente entre dez./2014 a mar./2015.

Na vereda 3, no terço médio, de set./2014 a fev./2015 o lençol esteve entre 25 e 50 cm de profundidade, ficando próximo da superfície em mar./2015 e a maior profundidade (90 cm) em jun./2015. Nessa mesma vereda, no terço superior, registrou-se a presença do lençol no período compreendido entre dec./2014 até mai./2015. Isso está relacionado com o regime de chuvas da região, ou seja, o pico de chuvas no mês de dezembro e o pico de chuvas em março fechando o verão, a partir de onde a profundidade do lençol vai se rebaixando periodicamente. Na vereda 5, foi observado comportamento semelhante à vereda 3 no terço médio. Já no terço superior, o lençol foi detectado a uma profundidade de 80 cm em mar./2015, permanecendo entre 80 e 120 cm de fev./2015 a set./2015.

Na vereda 6, nos terços médio e superior, o lençol esteve a uma profundidade de aproximadamente 20 e 50 cm, aproximadamente de set./2014 a mai./2015. Em jun./2015 o lençol chega a uma profundidade de 80 cm, subindo novamente a partir de jul./2015.

A grande variabilidade do nível freático (NA) colabora para a existência de diferentes pedoambientes, produtos de diferentes tempos de inundação, contribuindo para ocorrência de diversos processos de interação do solo-água-atmosfera e organismos. No sentido da vertente, a partir da transição do limite do campo hidromórfico, o solo é bem aerado, sujeito a inundações periódicas, já nas porções baixas o solo é extremamente saturado durante quase todo o ano. Com isso, nas baixas vertentes, o acúmulo de MOS é mais acentuado.

Variações sazonais, típicos de ambientes de vereda, influem nos processos de oxiredução e eletroquímica da fase sólida em ambientes inundados (CAMARGO et al., 1999), microrganismos, por ação direta ou indireta, atuam também na mineralização, imobilização orgânica, oxidação/redução, solubilização, precipitação e volatilização de elementos presentes no solo, como As, Se, Zn, Fe e Mn (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Como as veredas são responsáveis pela perenidade dos cursos d'água durante o período seco do ano, alterações nos processos que regulam a dinâmica de poluentes no solo podem influir negativamente na qualidade da água de cursos hídricos, que são funcionalmente ligados às veredas (ROSOLEN et al., 2015).

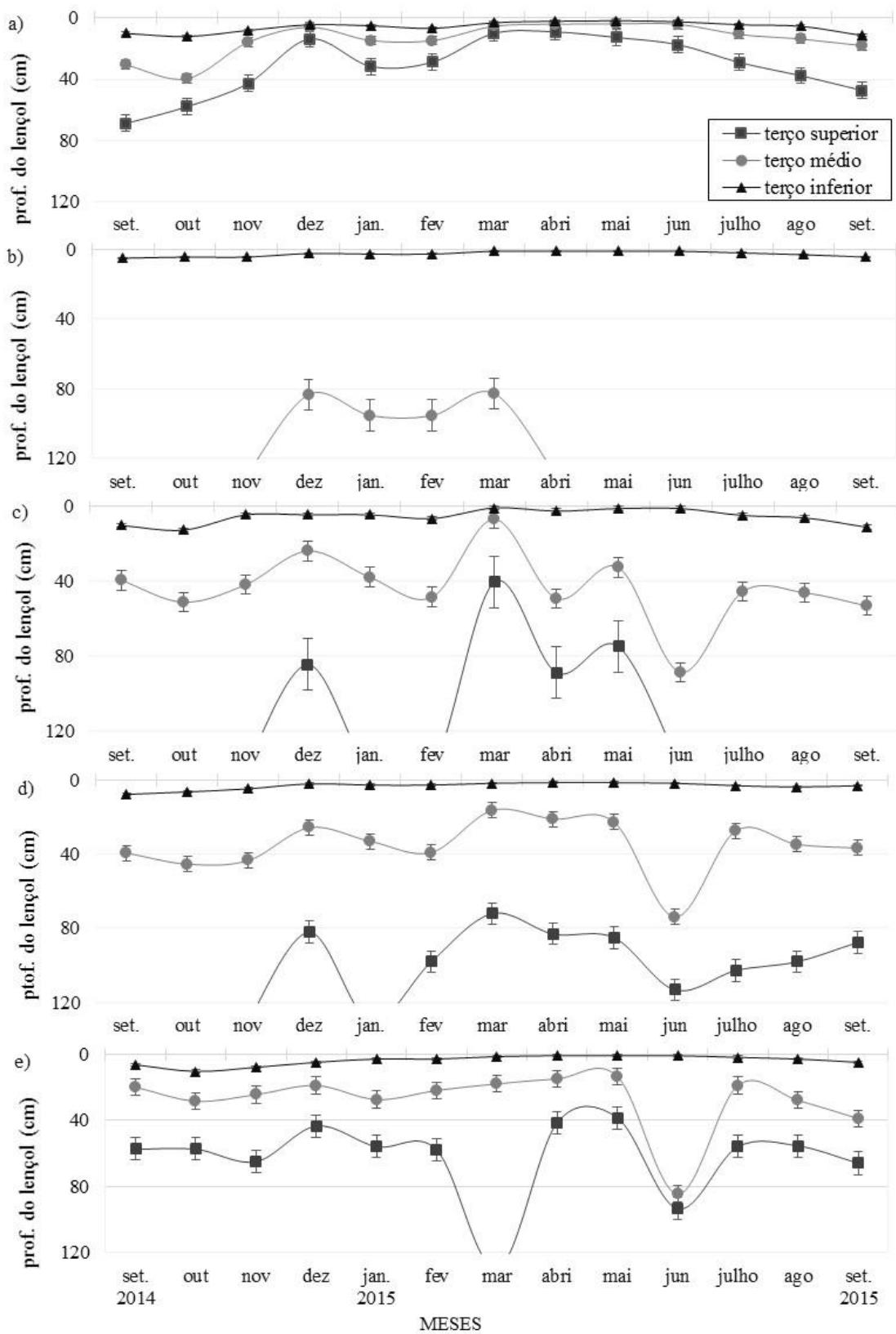


FIGURA 12. Variação da profundidade do lençol freático nos terços superior, médio e inferior nas veredas: V1(a), V2(b), V3(c), V5(d) e V6(e). Barras indicam erro padrão.

Baseado nas variações do lençol freático ao longo do tempo, como apresentado na figura 12, é possível que se tenha uma ideia por quanto tempo uma determinada camada de solo das veredas permaneceu inundada. Na Tabela 10 são apresentados os resultados da integração a partir da qual estimou-se a quantidade de dias que as camadas de 0-20 cm e de 40-70 cm permaneceram completamente inundadas de set./2014 a set./2015.

TABELA 12. Estimativa de dias/ano de inundação em veredas do Triângulo Mineiro

Terço	Camada	vereda				
		V1	V2	V3	V5	V6
Inferior	0-20 cm	250	305	261	299	292
	40-70 cm	365	365	365	365	365
Médio	0-20 cm	149	0	9	4	16
	40-70 cm	341	0	205	240	294
Superior	0-20 cm	43	0	0	0	0
	40-70 cm	253	0	192	3	78

Atributos de qualidade de água foram determinados em campo (Tabela 13) para avaliações complementares (parâmetros: turbidez, sólidos dissolvidos totais, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e temperatura) em amostras obtidas em set./2015.

Notadamente, no terço inferior das veredas avaliadas as taxas de condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos foram maiores se comparado às demais posições. Em média, nas veredas, a temperatura se elevou em cerca de 0,5 °C do terço médio para o terço inferior. As maiores taxas de OD e turbidez foram encontrados no terço médio.

TABELA 13. Parâmetros de qualidade da água em veredas do Triângulo Mineiro.

Parâmetros	Posição	Vereda*				
		V1	V2	V3	V5	V6
Turbidez (FNU)**	inferior	0,30 ( $\pm 0,3$ )	4,9 ( $\pm 1,9$ )	23,0 ( $\pm 17,0$ )	16,6 ( $\pm 14,9$ )	40,7 ( $\pm 5,7$ )
	médio	8,7 ( $\pm 3,2$ )	-	54,9 ( $\pm 8,4$ )	4,9 ( $\pm 3,9$ )	11,2 ( $\pm 1,2$ )
	superior	5,8 ( $\pm 4,4$ )	-	-	-	-
Sólidos dissolvidos totais (mg L <sup>-1</sup> )	inferior	3,75 ( $\pm 0,3$ )	1,3 ( $\pm 0,4$ )	2,0 ( $\pm 1,4$ )	3,3 ( $\pm 0,9$ )	27,5 ( $\pm 0,5$ )
	médio	3,3 ( $\pm 0,5$ )	-	2,5 ( $\pm 0,5$ )	3,0 ( $\pm 0,0$ )	4,0 ( $\pm 0,0$ )
	superior	3,7 ( $\pm 0,4$ )	-	-	-	-
Oxigênio dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	inferior	1,3 ( $\pm 0,8$ )	3,9 ( $\pm 0,2$ )	1,8 ( $\pm 0,1$ )	3,8 ( $\pm 0,5$ )	5,3 ( $\pm 1,7$ )
	médio	1,7 ( $\pm 1,0$ )	-	12,5 ( $\pm 9,3$ )	3,6 ( $\pm 0,6$ )	4,5 ( $\pm 0,3$ )
	superior	2,2 ( $\pm 0,7$ )	-	-	-	-
Conduтивidade elétrica ( $\mu$ S cm <sup>-1</sup> )	inferior	8,5 ( $\pm 0,5$ )	3,3 ( $\pm 0,5$ )	4,7 ( $\pm 2,9$ )	7,0 ( $\pm 2,1$ )	53,5 ( $\pm 3,5$ )
	médio	6,0 ( $\pm 0,8$ )	-	4,5 ( $\pm 1,5$ )	6,5 ( $\pm 0,5$ )	8,5 ( $\pm 0,5$ )
	superior	7,3 ( $\pm 0,5$ )	-	-	-	-
Temperatura (°C)	inferior	18,4 ( $\pm 0,2$ )	20,1 ( $\pm 0,4$ )	20,5 ( $\pm 0,6$ )	19,0 ( $\pm 1,1$ )	19,8 ( $\pm 0,7$ )
	médio	17,7 ( $\pm 0,4$ )	-	19,2 ( $\pm 0,1$ )	20,4 ( $\pm 0,8$ )	19,0 ( $\pm 0,1$ )
	superior	17,9 ( $\pm 0,3$ )	-	-	-	-

\*Medidas de dispersão se referem a desvio padrão. \*\* Unidades Nefelométricas de Formazina (ISO 7027)

As veredas avaliadas apresentaram variação temporal do pH (Figura 13) e condutividade elétrica (CE) (Figura 14) na solução do solo durante o período de setembro de 2014 a setembro de 2015 (13 meses). Em razão das influências sazonais, amplitudes médias de até 14,10  $\mu$ S cm<sup>-1</sup> para CE e 1,05 para pH foram observados nas veredas.

O pH do terço inferior é comumente mais ácido, apresentando pouca variabilidade. Durante o período seco do ano ocorre um ligeiro aumento do pH da solução do solo, por exemplo, no vereda 1, os períodos com baixas pluviométricas mais evidenciadas (julho, agosto e setembro) apresentaram pH médio de 5,3 no terço superior e médio e de 4,5 no terço inferior. Nos meses mais chuvosos do ano os valores médios são, respectivamente 4,8; 5,1 e 4,5 para terço superior, médio e inferior.

A CE apresentou pouca variabilidade entre as veredas, com picos de elevação após eventos pluviométricos, tendendo a estabilização. Durante os três primeiros meses, taxas de CE acima de 20  $\mu$ S cm<sup>-1</sup> nas foram observadas nas veredas 3 e 5. Picos de condutividade elétrica acima de 40  $\mu$ S cm<sup>-1</sup> foram observados no terço inferior da vereda 6, estes foram relacionados a eventos pluviométricos. Com exceção da vereda 6, menores taxas de variabilidade sazonal da CE foram identificados no terço inferior.

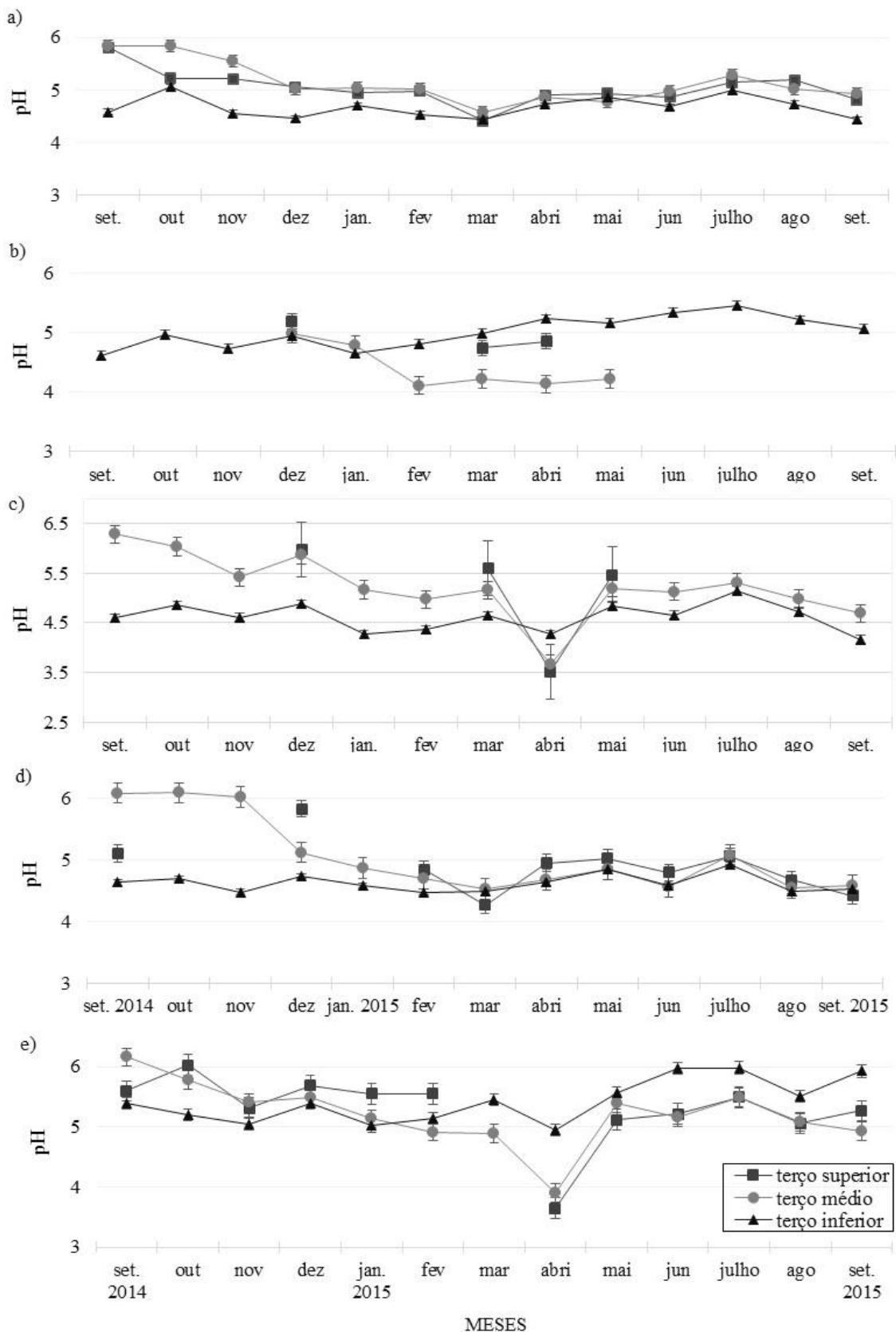


FIGURA 13. Variação do pH nos terços superior, médio e inferior nas veredas: V1(a), V2(b), V3(c), V5(d) e V6(e). Barras indicam erro padrão.

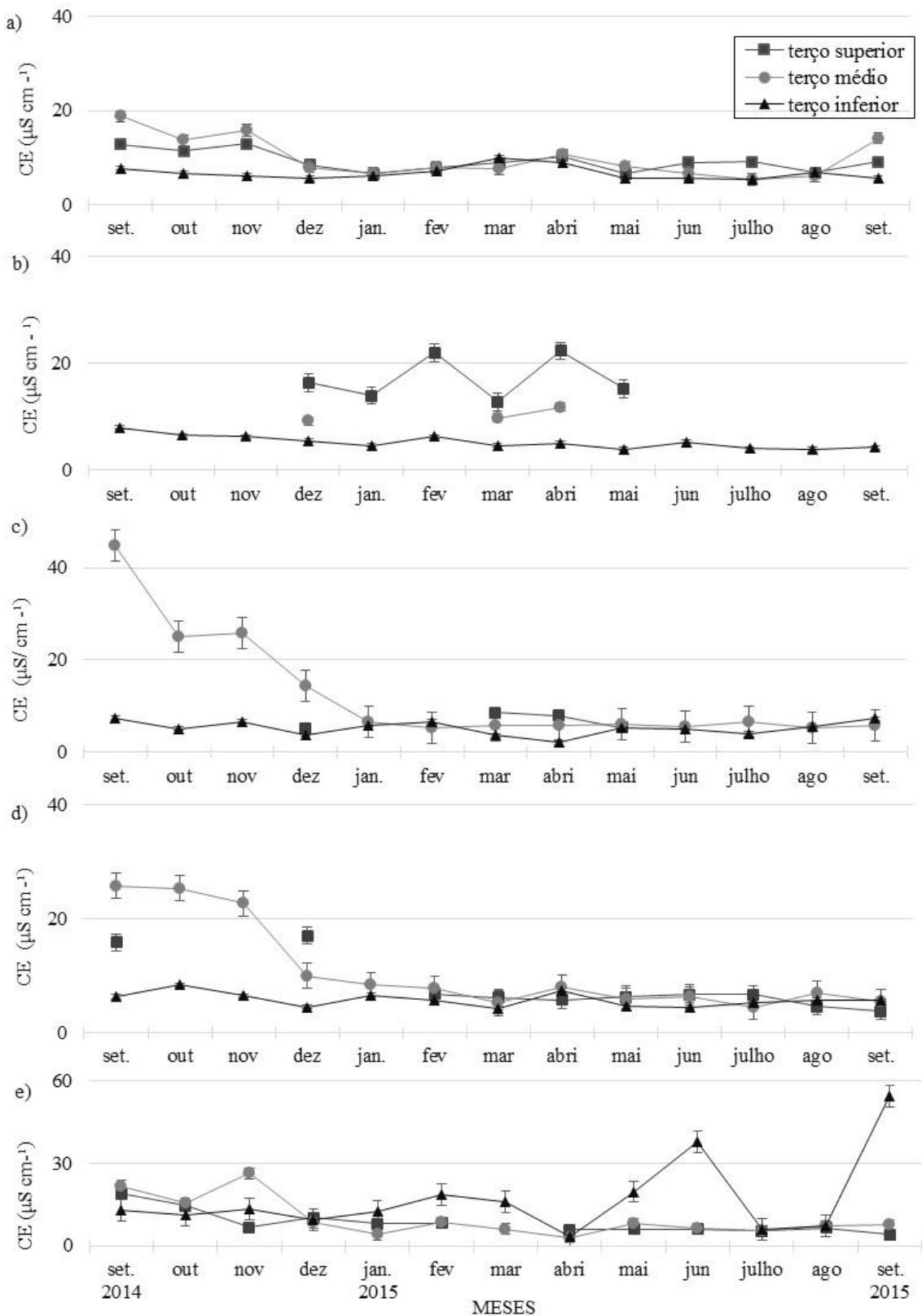


FIGURA 14. Variação da CE nos terços superior, médio e inferior nas veredas: V1(a), V2(b), V3(c), V5(d) e V6(e). Barras indicam erro padrão.

#### 4.3 Variação do potencial redox

Uma das características marcantes de solos hidromórficos, como nas veredas, é a variação do potencial redox. Na Figura 15, são apresentadas as variações dos valores de Eh e pH das amostras das camadas 0-20 cm e 40-70 cm das veredas 1 e 3, obtidos em condições laboratoriais em um período de incubação de 48 dias.

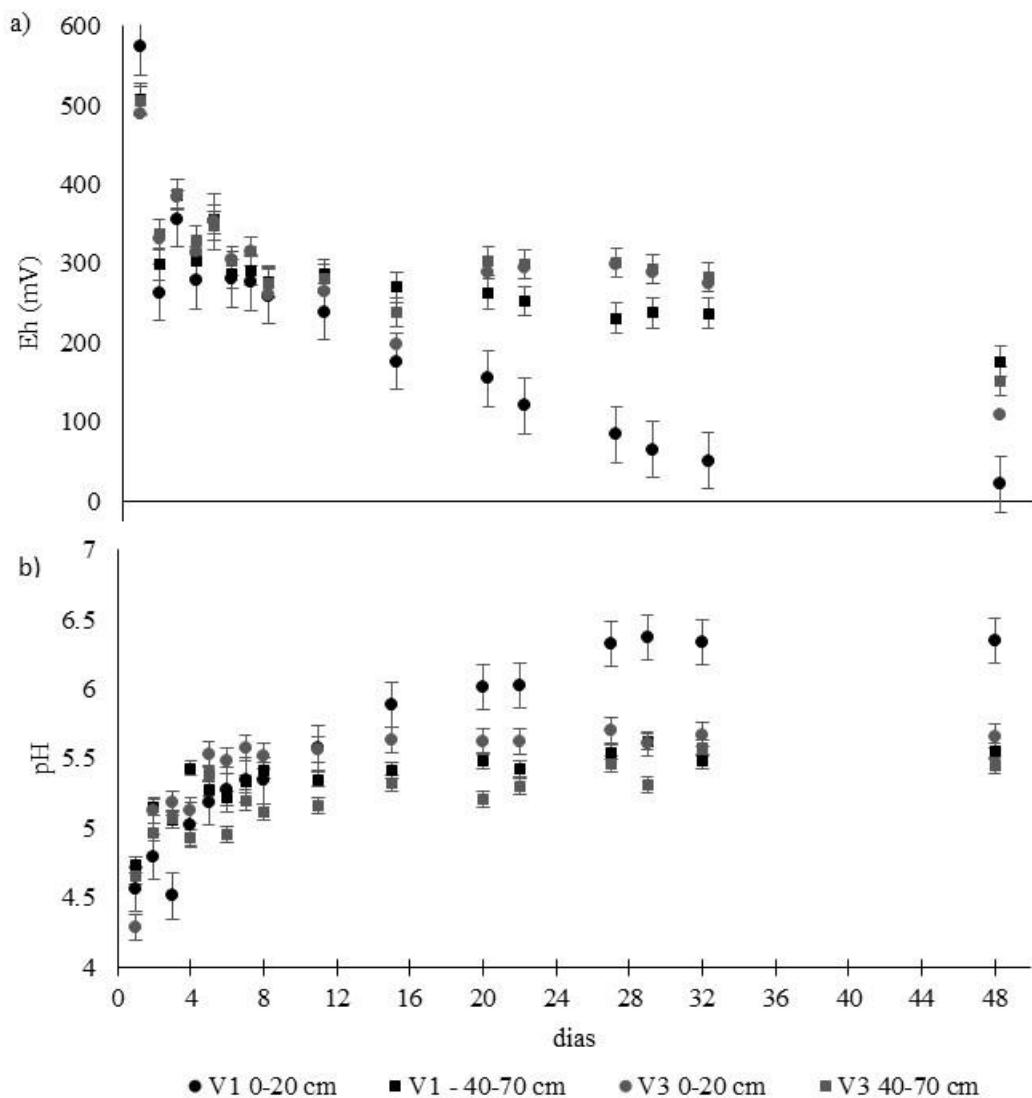


FIGURA 15. Variação temporal do Eh e pH das amostras das camadas 0-20 cm e 40-70 cm, das veredas 1 e 3, saturadas em condições laboratoriais no período de 48 dias.

Segundo Husson (2013), o Eh dos solos comumente variam de -300 a + 900 mV, sendo que solos encharcados têm Eh menor. Tais variáveis possuem variabilidade temporal, estando condicionada a ciclos diários e fortes influências sazonais.

Normalmente, ocorre uma diminuição rápida do Eh após algumas horas após a saturação e o reestabelecimento do nível normal ocorre alguns dias após a drenagem do solo (HUSSON, 2013). Valores positivos de Eh indicam condições oxidantes, enquanto valores negativos indicam disponibilidade de elétrons, ou condições redutoras (JARDIM, 2014). Valores decrescentes de Eh evidenciam ainda o alto consumo de MOS (SILVA et al., 2015).

Não foi observada uma diferença significativa entre as amostras. No período de incubação, observou-se que as amostras passaram de uma faixa considerada oxidada para uma faixa suboxidada, não chegando a atingir valores negativos de Eh após 48 dias. Como em ambientes de redução, ocorre o consumo de íons  $H^+$ , com o tempo de inundação ocorre também um aumento do pH (Figura 15). Essas alterações no Eh e pH são determinantes na forma, mobilidade, disponibilidade (GUILHERME et al., 2005) e toxicidade dos elementos e substâncias presentes.

Com o encharcamento do solo e consequente redução do ferro e óxidos de Mn, concomitante à produção de agentes de complexação orgânicos, Silva et al., (2015) observaram aumento nos teores de elementos como Fe, P, S, Mn, Cu e Zn.

Com a redução do pH (<5), Rosolen et al. (2015) discorreram sobre a presença de complexos metálicos mais móveis e solúveis em áreas úmidas do Triângulo Mineiro, promovendo, possivelmente, a migração de As, Cr, Mn e Ni para camadas inferiores do solo. Por outro lado, Martins et al. (2011) relatam que o aumento do pH promove o aumento da CTC e complexação mais efetiva pela MOS.

Em estudo com elementos-traço comumente presentes em áreas contaminadas, Srivastava et al. (2005) observaram a configuração de sítios de adsorção em função do pH em superfície caulinítica (argilomineral 1:1 presente na área de estudo). No estudo em questão, a sequência de adsorção encontrado para valores de  $pH_{50}$  (aquele no qual metade do elemento disponível é adsorvido) foi Cu <Zn <Pb <Cd. A adsorção em locais de carga permanente predominou em valores de até 5,7; 6,0; 7,3 e 8,0 para os elementos Cu, Pb, Zn e Cd, respectivamente

Após o período de incubação, na vereda 1 (substrato muito argiloso, ambiente de chapada), o Eh variou de 575 mV para 20 mV (camada 0-20 cm) e de 510 mV para 175 mV (camada 40-70 cm). O pH aumentou de 4,5 para 6,3 (camada 0-20 cm) e de 4,8 para 5,6 (camada 40-70 cm). Na vereda 3 (substrato arenoso, superfície Bauru), a variação foi de 490 mV (início do ensaio) para 110 mV (final do ensaio) na camada 0-20 cm e de 505

mV para 150 mV na camada 40-70. Na camada 0-20 cm o pH aumentou de 4,2 para 5,7 e, na camada 40-70 cm, de 4,6 para 5,5.

Entre os elementos estudados neste trabalho, As, Se, Mn e Fe são diretamente influenciados pelas condições de oxirredução, enquanto Cd, Pb, Ni, Zn e Cu não são afetados diretamente pela transferência de elétrons. Baseado nos diagramas de especiação redox apresentados por Essington (2005), algumas considerações sobre os elementos estudados são feitas a seguir:

- a) As - em condições oxídicas e suboxídicas irão ocorrer as formas:  $\text{H}_3\text{AsO}_4^0$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  e  $\text{HAsO}_4^{2-}$ . Na faixa anóxica e entre o pH 4,0 e 6,5, o As irá ocorrer na forma  $\text{As}(\text{OH})_3^0$ . Em condição anóxica e pH bastante elevado ( $> 9,0$ ), ocorrerá a forma  $\text{As}(\text{OH})_4^-$ .
- b) Se - diferentes formas de Se podem ocorrer dependendo da condição redox:  $\text{H}_2\text{SeO}_3^0$ ,  $\text{SeO}_4^{2-}$ ,  $\text{HSeO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{Se}^0$ ,  $\text{SeO}_3^{2-}$  e  $\text{HSe}^-$ . Em condições anóxicas o Se irá ocorrer na forma  $\text{HSe}^-$ .
- c) Mn - em condições de redução,  $\text{Mn}^{4+}$  é reduzido a  $\text{Mn}^{2+}$ , entretanto, dependendo da combinação do valor de pH e Eh outras formas podem ocorrer, como:  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{MnOOH}$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  e  $\text{MnCO}_3$ .
- d) Fe – em condições de redução,  $\text{Fe}^{3+}$  [ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{FeOOH}$ ] é reduzido a  $\text{Fe}^{2+}$  (forma solúvel). Outras formas podem ocorrer em condições de baixos valores Eh e altos valores de pH, como  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e  $\text{FeCO}_3$ .
- e) Cd, Pb, Ni, Zn e Cu – em condições oxidadas, a concentração desses elementos na solução do solo é dada pela reação do solo (troca iônica) e adsorção na fase sólida. São controlados também pela solubilidade de carbonatos, hidróxi-carbonatos e fosfatos desses elementos. Em condições de redução, devido ao aumento do pH, pode ocorrer a precipitação desses elementos. Se o ambiente conter S, o qual estará na forma reduzida ( $\text{S}^{2-}$ ), poderá ocorrer formas estáveis de sulfetos:  $\text{CdS}$ ,  $\text{PbS}$ ,  $\text{NiS}$ ,  $\text{ZnS}$  e  $\text{CuS}$ .

Em um trabalho semelhante de inundação, em condições laboratoriais, utilizando amostras da camada 0-20 cm de um Gleissolo Háplico da Amazônia, o Eh inicialmente + 49 mV decresceu para – 206 mV no terceiro dia, estabilizando em – 390 mV após o 39º dia (SILVA et al., 2015)<sup>1</sup>. A diminuição do Eh foi acompanhada do aumento do pH (de 5,8 para 7,2). As alterações no Eh e pH afetaram a disponibilidade de P, S, Fe, Mn, Cu e Zn.

---

<sup>1</sup> Nesses trabalhos, os autores não mencionam se houve a correção dos valores de Eh em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio.

Também em condições laboratoriais, Grybos et al. (2009<sup>1</sup>) encontraram uma redução do Eh (inicialmente ~ + 550 mV), estabilizando em – 100 mV após 300 horas. Essa redução do Eh foi acompanhada pelo aumento do pH, carbono orgânico dissolvido, Fe total, Mn e por uma redução do NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Assumindo que após um período de inundação ocorre a estabilização dos valores de Eh e pH, e tomando como base a estimativa do número de dias que uma determinada camada permaneceu completamente inundada durante o ano (Tabela 12), é possível inferir quão anóxico permaneceu o sistema. Além disso, baseado nas curvas de variação da profundidade da água subsuperficial, é possível perceber a frequência dos ciclos de oxidação e redução. Olivet-Laquet et al. (2001) estudaram o efeito da variação sazonal do lençol freático sobre a mobilidade de elementos-traço em *wetlands* na França. As concentrações dissolvidas de Fe, Mn, Al, La, U, Th, Cd e As foram fortemente influenciadas pela variação do Eh, pH e carbono orgânico dissolvido.

#### 4.4 Concentração de elementos-traço nas amostras de solo

A concentração de Cd nas amostras de solo das veredas (região hidromórfica) e da encosta (região não hidromórfica – P1) (Figura 16) esteve abaixo do valor de referência de qualidade (VRQ) ( $400 \mu\text{g kg}^{-1}$ ) e também do valor de prevenção (VP) ( $1.300 \mu\text{g kg}^{-1}$ ) estabelecido pelo COPAM (2011). Neste estudo, a máxima concentração de Cd encontrada foi de  $77 \mu\text{g kg}^{-1}$  no terço inferior da V3. Na mesma região do presente estudo (Triângulo Mineiro), a concentração média de Cd encontrada para solos não hidromórficos foi  $1.880 \mu\text{g kg}^{-1}$  (CAMPOS et al., 2005). Em solos de *wetlands* afetadas por diferentes usos na China, a concentração de Cd variou de 790 a  $2.920 \mu\text{g kg}^{-1}$  (BAI et al., 2010). Em mais de 300 *wetlands* nos USA (principalmente no estado Dakota do Norte), a concentração média de Cd foi  $382 \mu\text{g kg}^{-1}$  (JACOB et al., 2013), estando bem correlacionada com a presença de Zn e P, sugerindo uma influência da atividade agrícola do entorno.

As amostras da camada de 0-20 cm apresentaram maior concentração de Cd. Essas amostras apresentaram maior quantidade de matéria orgânica (Tabela 11), o que pode favorecer a sorção de cátions metálicos, como o Cd<sup>2+</sup> (ROTH et al., 2012). Em ambas as camadas, a concentração de Cd aumentou do terço superior para o terço inferior, seguindo o aumento do conteúdo de matéria orgânica (Tabela 11). Apesar da matéria orgânica contribuir para a sorção de Cd, as condições de oxi-redução do ambiente de veredas

podem afetar a forma, disponibilidade e mobilidade desse metal (ZHANG et al., 2012). Além disso, o Cd pode estar associado à matéria orgânica dissolvida e, consequentemente, aumentar sua mobilidade no ambiente (ASHWORTH; ALLOWAY, 2008).

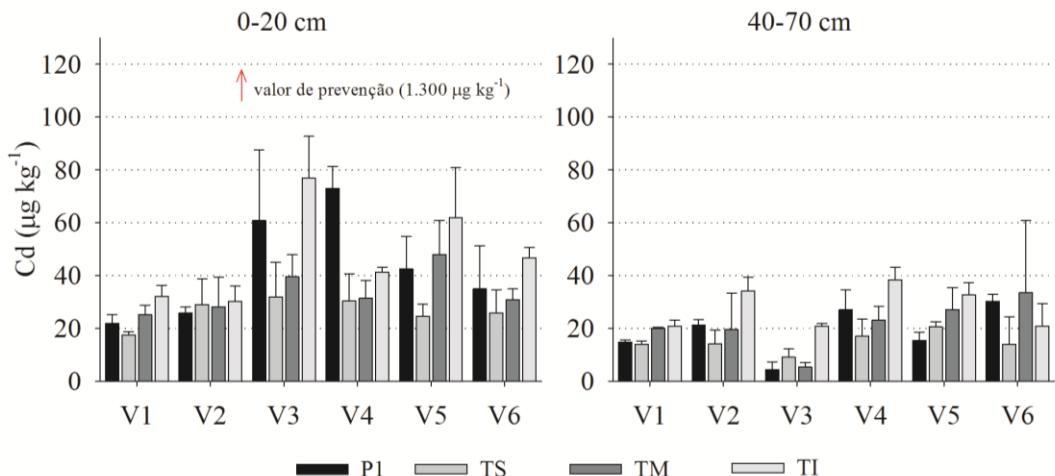


FIGURA 16. Concentração de Cd nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média.

As concentrações de Pb encontradas estiveram abaixo dos valores de prevenção (VP) (COPAM, 2011) (Figura 17). Observou-se que a concentração de Pb aumentou significativamente de P1 (encosta – região não hidromórfica) até o terço inferior das veredas. Nessa posição inferior das veredas, a concentração de Pb ultrapassou os valores de qualidade ( $20 \text{ mg kg}^{-1}$ ). A concentração média de Pb encontrada para solos não hidromórficos formados sobre depósitos sedimentares na região do Triângulo Mineiro foi  $9,0 \text{ mg kg}^{-1}$  (MARQUES et al., 2004). Em outra vereda na mesma região de estudo, a concentração de Pb variou entre  $12,1$  a  $81,0 \text{ mg kg}^{-1}$  (ROSOLEN et al., 2015).

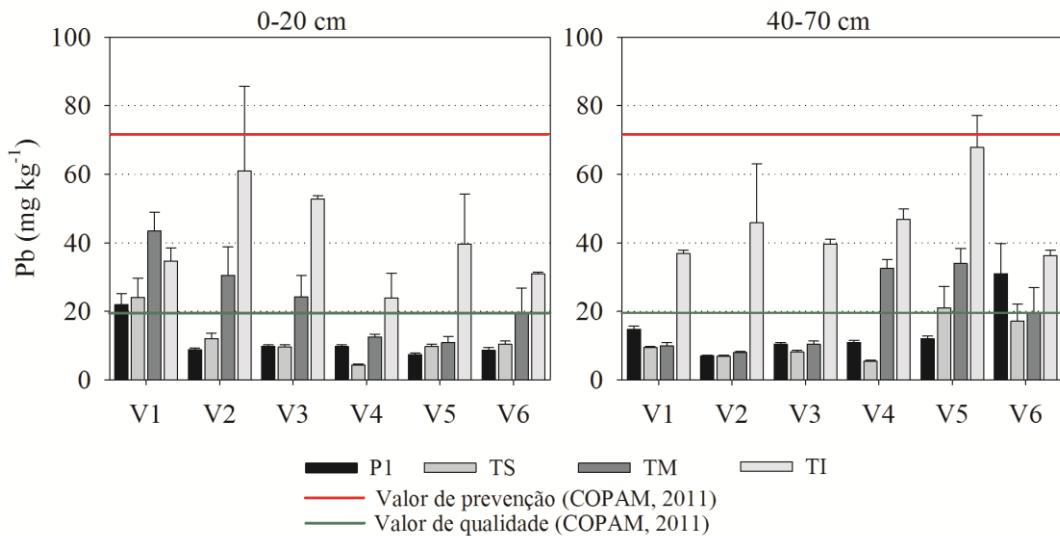


FIGURA 17. Concentração de Pb nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média.

As concentrações de As foram inferior aos valores de prevenção (VP) (Figura 18).

Observou-se em duas das veredas estudadas (V1 e V5, de texturas mais argilosas) uma maior concentração de As (acima do VRQ) nos terços superior, médio e inferior da camada 40-70 cm quando comparada com a camada 0-20 cm. Tendo em vista que a camada de 0-20 cm é mais rica em matéria orgânica, esse resultado sugere a correlação negativa entre As e matéria orgânica, conforme observado por Campos et al. (2013) em solos do cerrado. Arsênio ocorre em solos principalmente na forma aniônica  $\text{AsO}_4^{3-}$  (semelhante ao ânion fosfato), tendo fraca sorção pela matéria orgânica, com predomínio de cargas negativas. Desta forma, o As uma vez depositado na superfície da vereda (rica em matéria orgânica) pode ter sua mobilidade aumentada e ser transportado para a camada subsuperficial (40-70 cm). Em outras veredas da região do Triângulo Mineiro, também foi encontrada maior concentração de As nas camadas subsuperficiais (ROSOLEN et al., 2015). Davranchise et al. (2013) demonstraram que a solubilização de As é controlada pela dissolução do Fe (comum em solos hidromórficos). Desta forma, as *wetlands* podem ser áreas favoráveis ao transporte de As para camadas subsuperficiais e água.

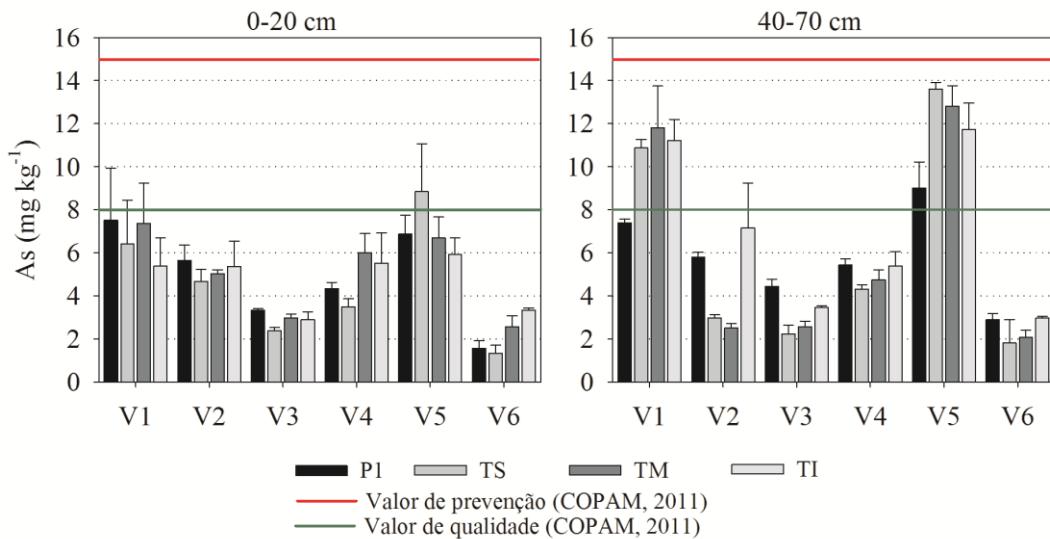


FIGURA 18. Concentração de As nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média.

Os teores de Se (Figura 19) estiveram abaixo dos valores de prevenção estabelecidos (COPAM, 2011). Os teores de Se mais elevados (acima do VRQ) foram encontrados nas veredas 1 e 2, de solos muito argilosos. Os teores de Se em 83% das amostras de solos estiveram acima do VRQ. A V6 apresentou os menores teores de Se. A maior parte das amostras apresentou concentração de Se entre o valor de referência de qualidade (VRQ) e o valor de prevenção (VP).

Em 58 solos do Estado de São Paulo, Gabos et al. (2014) encontraram concentrações de Se muito baixas, variando de 0,08 a 1,61 mg kg⁻¹, estando esses valores relacionados à pedogênese. Esses autores também encontraram, na camada superficial, uma correlação positiva entre Se e capacidade de troca de cátions, matéria orgânica do solo, pH, óxidos e teor de argila. Já, na camada subsuperficial, observou-se correlação apenas com pH e óxidos de Al.

A concentração média de Se encontrada nas amostras está bem acima do valor *background* para solos brasileiros. Ressalta-se aqui que o limite de detecção para Se foi 0,26 mg kg⁻¹, entretanto, a recuperação do padrão de referência de qualidade da análise foi alta (152 %), o que pode ter contribuído para uma superestimativa dos teores de Se.

Atualmente, na agricultura moderna, o Se tem sido estudado visando o aumento da sua concentração e disponibilidade no solo para a biofortificação de alimentos.

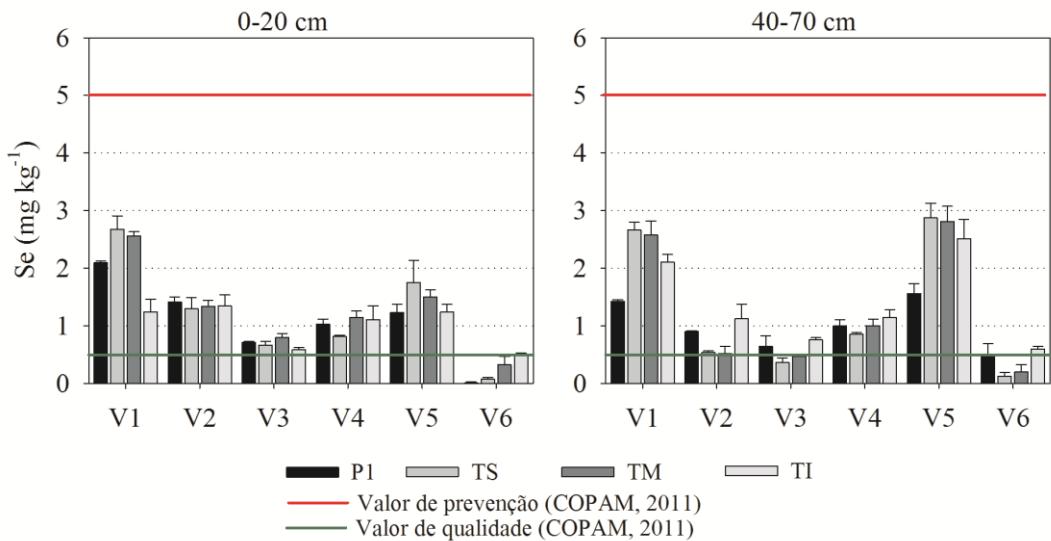


FIGURA 19. Concentração de Se nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média.

No geral, a concentração de Ni (Figura 20) foi inferior ao valor de prevenção estabelecido pela legislação brasileira (COPAM, 2011), exceto na V6. Na vereda 6, valores que excederam o valor de prevenção ( $30 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foram encontrados no terço inferior da vereda, camada 0-20 cm ( $39,10 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Nessa mesma vereda foram observados elevados teores na amostra da área de contribuição (P1), na camada de 40-70 cm. O Ni é afetado indiretamente pelas condições de oxi-redução. Apesar do Ni poder se ligar fortemente à matéria orgânica, em áreas úmidas na Hungria, foi observado que o aumento do pH em condições de redução levou a um aumento da taxa de dissolução da matéria orgânica, aumentando a disponibilidade do Ni retido (LOCKWOOD et al., 2015).

Em *wetlands* na França, Grybos et al. (2007) encontraram que Pb e Ni são perdidos juntamente com a redução do Fe e, principalmente, pelo aumento do carbono orgânico dissolvido. Como a concentração do carbono orgânico dissolvido é controlada pelo pH, os autores ainda concluem que o pH é mais importante que o Eh no que diz respeito à mobilidade desses metais em áreas úmidas.

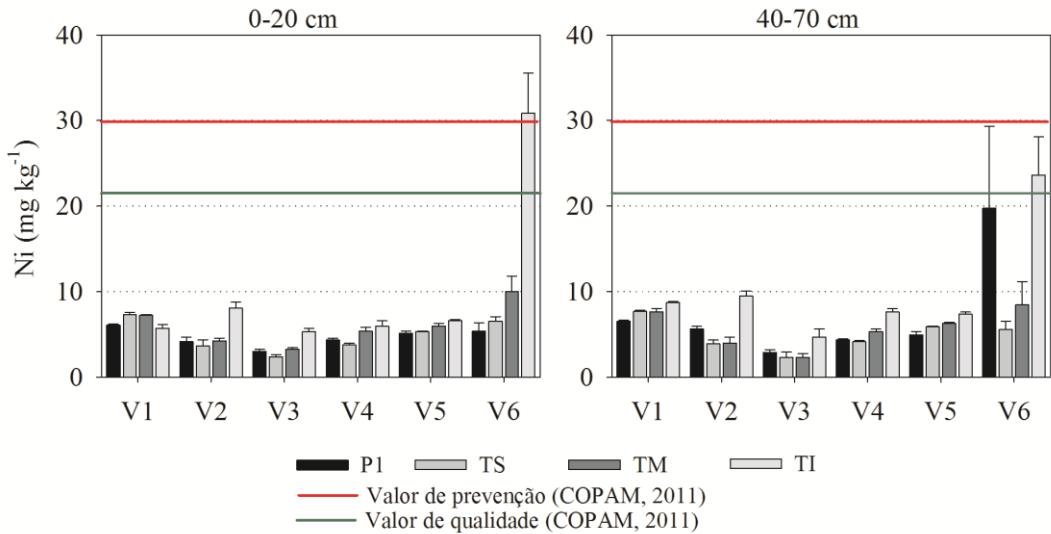


FIGURA 20. Concentração de Ni nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média.

Embora o Fe não seja considerado um elemento-traço, o mesmo foi considerado no estudo, pois as reações de oxi-redução envolvendo compostos contendo Fe podem controlar a disponibilidade e mobilidade de outros elementos presentes. Em média, a concentração de Fe (Figura 21) encontrada nas veredas variou de 11,74 g kg<sup>-1</sup> (terço superior) para 20,75 g kg<sup>-1</sup> (terço inferior) na camada de 0-20 cm e de 6,76 para 6,84 g kg<sup>-1</sup> na camada de 40-70 cm. Como esperado, as amostras da região não hidromórfica (P1) apresentaram maiores teores de Fe.

A vereda é um ambiente hidromórfico onde o Fe<sup>3+</sup> é reduzido a Fe<sup>2+</sup> e, consequentemente, contribuindo para sua remoção do sistema decorrente de sua maior mobilidade (CAMARGO et al., 1999). Nesse ambiente redutor tem-se a ocorrência dominante dos Gleissolos sazonalmente inundados (RAMOS et al., 2006). Grybos et al. (2009) encontraram um aumento da concentração de Fe e carbono orgânico dissolvido em condições de redução. Davranche et al. (2013), por sua vez, encontraram que a matéria orgânica dissolvida influencia as reações de oxi-redução do Fe, devido a interação matéria orgânica e Fe<sup>2+</sup>. O aumento da concentração de Fe na camada superficial no interior da vereda (Figura 21), pode estar relacionado com a formação do *greenrust*, comum na camada mais superficial, conforme observações de campo. *Greenrust* são hidróxidos de Fe que precipitam em ambiente reduzido e fracamente ácido, constituindo fases intermediárias na formação de óxidos de ferro. Devido à sua alta reatividade, o *greenrust*

pode desempenhar um importante papel na sorção de elementos-traço (metais pesados) nas veredas (CHAVES et al., 2005).

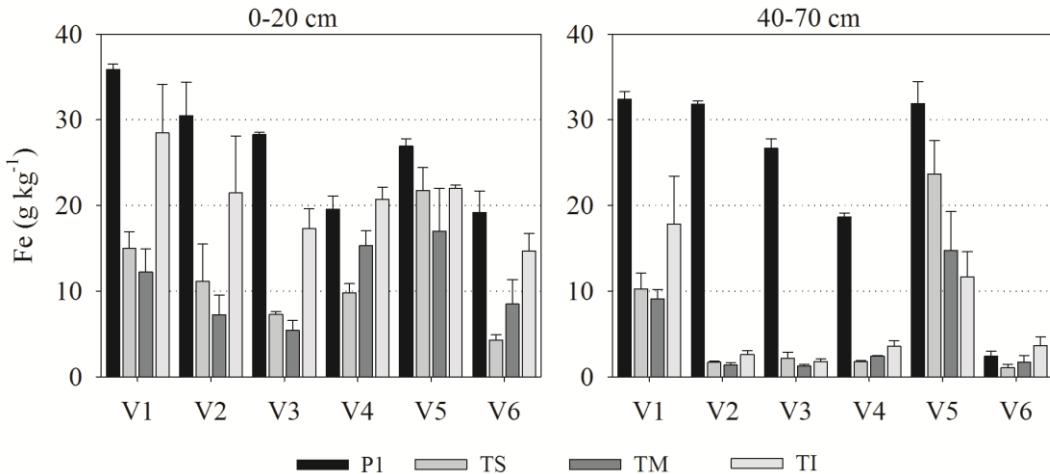


FIGURA 21. Concentração de Fe nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média.

Com relação ao Cu (Figura 22), de maneira geral, a sua concentração aumenta da forma: P1<terço superior<terço médio<terço inferior. No terço inferior foi encontrada maior concentração de Cu na camada 40-70 cm (onde a concentração foi 80% mais elevada em relação à camada superficial). Na V4, no terço inferior, a concentração média de Cu na camada 40-70 cm chega a ficar entre o valor de qualidade e de prevenção.

O Cu é mais móvel em condições de pH ácido, porém têm grande afinidade para formação de complexos com a MOS (LOCKWOOD et al., 2015). Em solos com predomínio de argilomineral caulinita, Srivastava et al. (2005) observaram o aumento da adsorção de Cu com a elevação do pH. Segundo Lockwood et al. (2015), a solubilidade do Cu é controlada, principalmente, pelo pH e presença de carbono orgânico dissolvido. Os autores sugerem ainda que a dissolução do ácido húmico promove a solubilidade do Cu em condições anaeróbias e aeróbias.

Na mesma região de estudo, Rosolen et al. (2015) determinaram concentrações de Cu em áreas úmidas com teores variando de aproximadamente 31 a 88 mg kg⁻¹, em alguns casos, ultrapassando limiares de prevenção (VP). Segundo Rosolen et al. (2015) as concentrações de Cu As e Cr, são os maiores riscos ambientais em veredas da região, em virtude da utilização de agroquímicos.

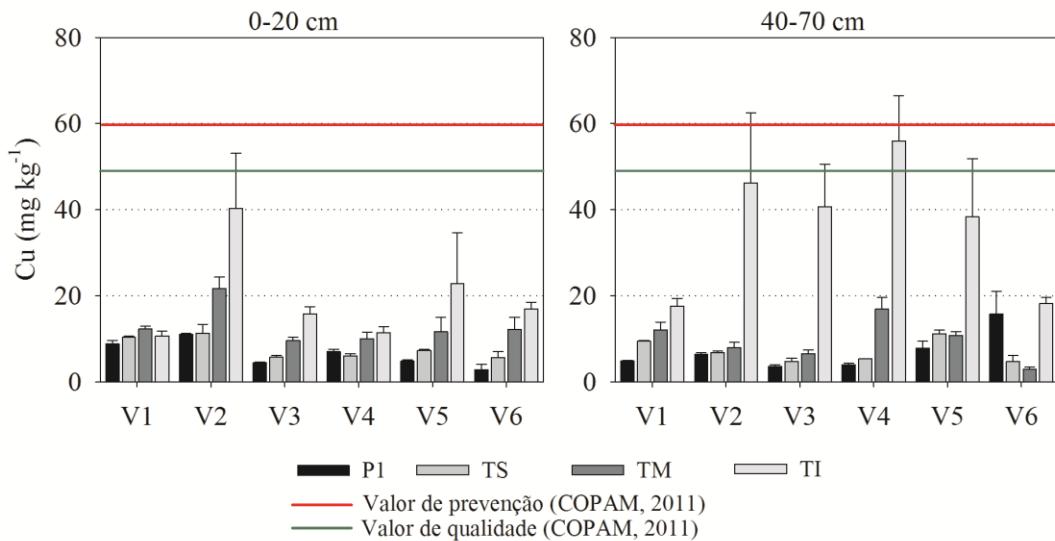


FIGURA 22. Concentração de Cu nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média.

A concentração de Mn em solos não é regulamentada pela legislação brasileira (COPAM, 2011). A maior concentração encontrada ( $96,49 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foi no terço inferior da camada 0-20 cm da V6. Na camada 0-20 cm, a concentração média de Mn nas veredas nas posições P1, terço superior, terço médio e terço inferior foi, respectivamente: 41,66; 13,09; 14,92 e  $30,33 \text{ mg kg}^{-1}$ . Na camada 40-70 cm, nesta mesma sequência, as concentrações de Mn foram: 25,99; 6,58; 6,79 e  $9,36 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 23).

Na posição P1, foi observada maior concentração de Mn, o que pode ser devido ao ambiente mais aerado favorecendo a ocorrência na forma  $\text{Mn}^{4+}$  (menos móvel), comparada à região hidromórfica, a qual favorece a redução do  $\text{Mn}^{4+}$  a  $\text{Mn}^{2+}$  (mais móvel). As concentrações de Mn na posição P1 estão aquém dos valores médios ( $216 \text{ mg kg}^{-1}$ ) encontradas para solos de cerrado na região do Triângulo Mineiro por Marques et al (2004).

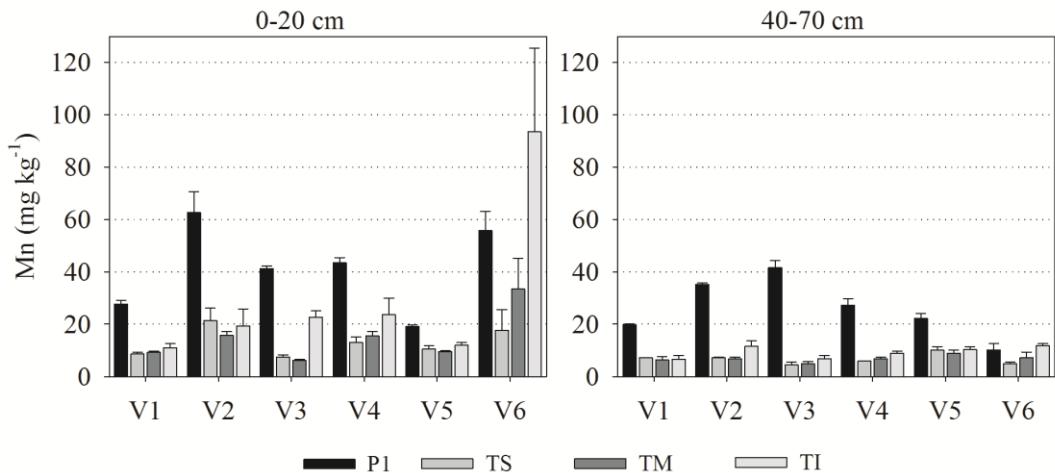


FIGURA 23. Concentração de Mn nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média.

O Zn, de maneira geral, esteve bastante aquém do valor de prevenção (Figura 24). Solos de cerrado sob vegetação nativa são reconhecidos pela deficiência de Zn – um micronutriente de plantas (LOPES; GUILHERME, 2016). Por esse motivo, Zn é aplicado na agricultura via fertilizantes visando a adequada nutrição das plantas cultivadas. Assim como o Se, o Zn é alvo da estratégia de biofortificação de alimentos. Em solos sob influência de atividade de mineração, concentrações elevadas de Zn podem ocorrer, como encontradas por Borges Júnior et al. (2008) em Vazante, MG.

Em solos bem drenados do cerrado, Marques et al. (2004) encontraram concentrações de Zn variando de 22 a 79 mg kg⁻¹. Em solos de veredas do noroeste de MG sob influência de diferentes usos do solo, Moraes e Horn (2010) encontraram concentrações de Zn variando de 8,9 a 80,1 mg kg⁻¹. Nos solos de veredas do Triângulo Mineiro estudados por Rosolen et al. (2015), foram encontrados teores de Zn variando de 5 a 36 mg kg⁻¹, valores próximos aos reportados no presente estudo.

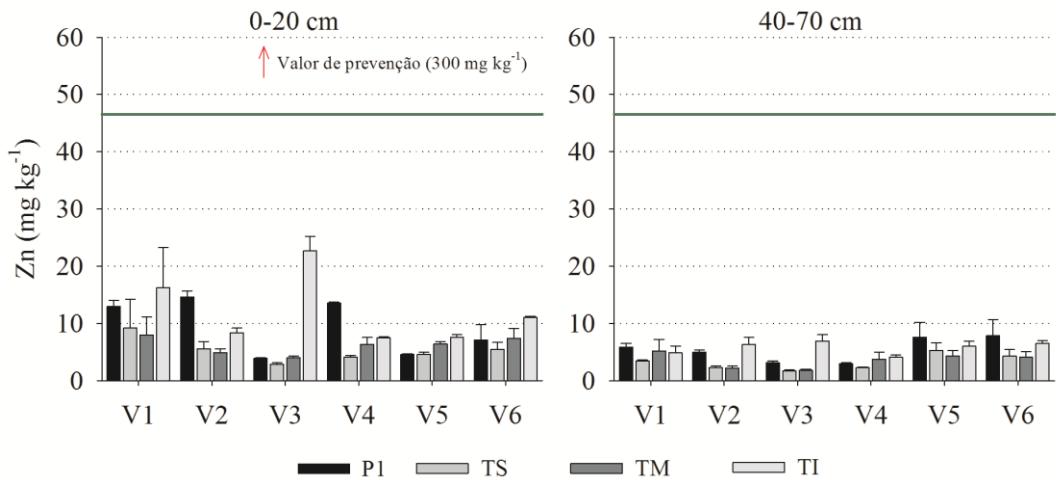


FIGURA 24. Concentração de Zn nas amostras de solo das veredas estudadas (camadas 0-20 cm e 40-70 cm) nos terços superior, médio e inferior, e na encosta (região não hidromórfica – P1). Barras de erro indicam o desvio-padrão da média.

Na Figura 25, estabelecem-se associações entre a concentração dos elementos estudados e alguns atributos químicos e físicos das amostras de solo, por meio de análise de componentes principais. Observa-se uma separação das amostras da posição P1 e terço superior (quadrantes inferiores) das amostras dos terços médio e inferior (quadrantes superiores). No quadrantes superiores, ou seja, para as amostras do interior da vereda, observou-se uma correlação entre os metais catiônicos (principalmente Cu, Pb e Cd), substâncias húmicas, carbono orgânico total e capacidade de troca de cátions. Os elementos na forma aniônica (As e Se) e o Fe apresentaram associação com o teor de argila.

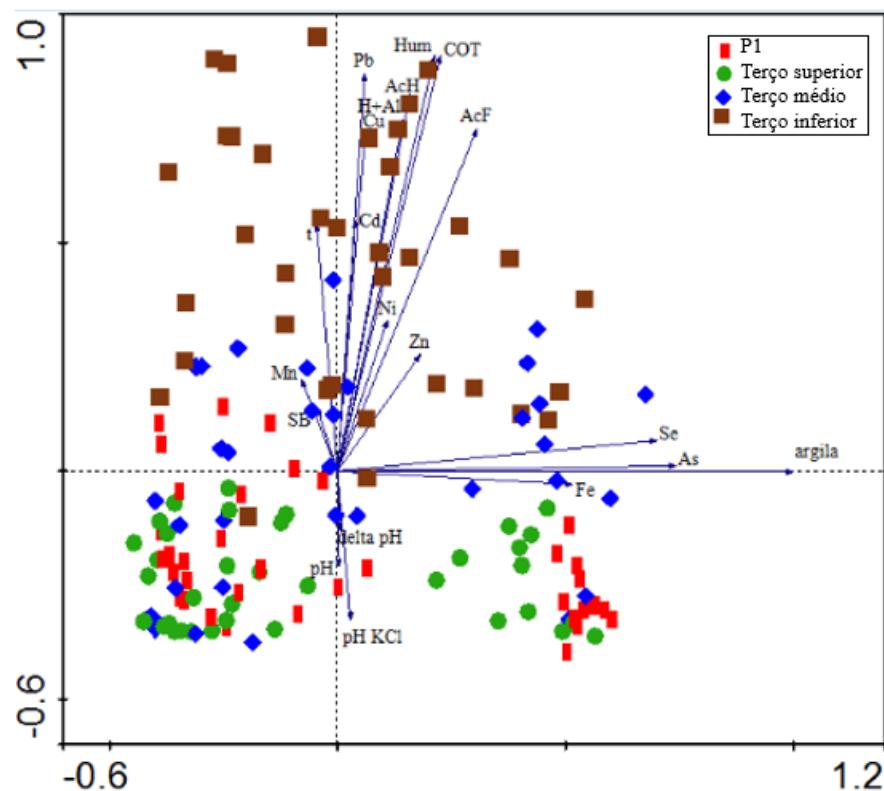


FIGURA 25. Análise de componentes principais entre a concentração dos elementos-traço e atributos químicos e físicos das amostras de solos das veredas selecionadas, ambas camadas.

Os componentes principais 1 e 2 (PCA 1 e PCA 2) explicaram 98.6% da variabilidade total dos dados, sendo que a PCA 1 explicou 97.3% e o PCA 2 explicou 1.3%.

## 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A concentração dos elementos-traço estudados esteve abaixo dos valores de prevenção estabelecidos pela legislação brasileira. Elementos-traço na forma catiônica (Cd, Pb, Ni, Cu, Mn e Zn) apresentaram correlação com a matéria orgânica das veredas (carbono orgânico total, ácido húmico, ácido fúlvico e humina). Elementos-traço na forma aniônica (Se e As) e, também, o Fe (não considerado elemento-traço) tiveram correlação com o teor de argila. Principalmente os catiônicos, observou-se um aumento da concentração da borda para o interior da vereda, seguindo o aumento gradual da matéria orgânica. Ressalta-se, aqui, no que diz respeito à concentração dos elementos encontrada, que com este estudo avaliou-se de forma pontual seis veredas da região de Uberlândia, não permitindo extrapolações no que diz respeito à qualidade de solos de veredas. Além disso, a simples concentração total de um elemento é pouco informativa, principalmente em ambientes hidromórficos, onde a forma, disponibilidade, mobilidade e toxicidade serão fortemente influenciadas pela variação do pH e potencial de oxi-redução. O trabalho contribui para a construção de um banco de dados sobre elementos-traço em veredas do cerrado.

## REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. **Os domínios de natureza no Brasil:** potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê, 2003. 160 p.

ALENCAR-SILVA, T.; MAILLARD, P. Delimitação, caracterização e tipologia das veredas do Parque Estadual Veredas do Peruaçu. **Geografias**, Belo Horizonte, v. 7 n. 2, p. 24-39, 2012.

AMARAL SOBRINHO, N. M.; BARRA, C. M.; LÃ, O. T. A Química dos metais pesados no solo. In: ALLEONI, L. R. S.; MELO W. F. (Org.). **Química e mineralogia dos solos**. Viçosa, MG: SCBS, 2009. v. 2. p. 250-311.

ARAÚJO, G. M. et al. Composição florística de veredas no Município de Uberlândia, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 475-493, 2002.

AGENCY FOR TOXICITY SUSTANCES AND DISEASY REGISTRY - ATSDR **Priority List of Hazardous Substances**. Disponível em: <<https://www.atsdr.cdc.gov/spl/>>. Acesso em: abr. 2015.

AUGUSTIN, C. H. R. R.; MELO, D. R.; ARANHA, P. R. A. Aspectos geomorfológicos de veredas: um ecossistema de bioma do cerrado, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Porto Alegre, v. 10, p. 103-114, 2009.

BACCARO, C. A. D. Estudos geomorfológicos do município de Uberlândia. **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 1, n. 1, p.17-21, 1989.

BAI, J. et. al. Some heavy metals distribution in wetland soils under different land use types along a typical plateau lake, China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 106, p. 344-348, 2010.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd. ed. Madison: Wisconsin, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, p. 363-375, 1986.

BAYER, C. et al. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and Soil**, Haia, v. 238, p.133-140, 2002.

BITTENCOURT ROSA, D.; ROCHA, L. C.; NASCIMENTO, L. A.; BACANI, V. M. DAMASCENO, F. S. Les environnements des cerrados et aspects de l'occupation du sol dans la région de São José dos Talhados. **Confins**, Paris, v. 25, p. 1-14, 2015.

**BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em:

<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm)>. Acesso em: nov. 2014.

CHAVES, L.H.G. The role of green rust in the environment: a review. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, p. 284-288, 2005.

BENITES, V. M.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo:** um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003 (Comunicado Técnico).

BOAVENTURA, R. S. **Vereda berço das águas.** Belo Horizonte: Ecodinâmica, 2007. 264 p.

BORGES JÚNIOR, M.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER, C. E. G. R; ABRAHAO, W. A. P. Valores de Referência Local e Avaliação da Contaminação por Zinco em Solos Adjacentes a Áreas Mineradas no Município de Vazante-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1369-1377, 2008.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 688 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Cerrado.** Disponível em:< <http://www.mma.gov.br/biomass/Cerrado>> Acesso em junho de 2014.

BRITO, J. L. S.; REIS, L. N. G. Mapeamento das áreas de conversão do uso da terra para cana-de-açúcar na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba-MG por meio de imagens TM/LANDSAT. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 13, p. 170-186, 2012

CAMARGO, F. A. O; SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, p. 171-180, 1999.

CARMO D. L; SILVA C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1211-20, 2012.

CAMPOS, M. L. et al. Determinação de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo e zinco em fosfatos de rocha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 361-367, 2005.

CAMPOS, M. L. et al. Teores de arsênio e cádmio em solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online], v. 37, n.1 p.281-286, 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832013000100029&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832013000100029&lng=en&nrm=iso)>. ISSN 0100-0683. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000100029>.

CARVALHO, P. G. S. As Veredas e sua importância no domínio dos cerrados. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 15, n. 168, p. 54-56, 1991.

**CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 303, de 20 de março de 2002.** Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30302.html>>. Acesso em: nov. 2014.

**CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009.** Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em: nov. 2014.

**Conselho de Política Ambiental de Minas Gerais - COPAM. Deliberação Normativa nº 166, de 29 de junho de 2011.** Estabelece os Valores de Referência de Qualidade dos Solos. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>>. Acesso em: abr. 2015.

**CORREA, G. F. Les Microreliefs “murundus” et leur environnement pedologique dans l’ouest du Minas Gerais, region du plateau central bresilien.** Nancy, Vandoeuvre-les Nancy: Universite de Nancy, These de docteur, 1989, 139p.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In BLACK, C. A. (ed). **Methods of soil analysis**, Part 1. Agronomy, n. 9. American Society of Agronomy. Madison, WI, 1965.

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, Série Documentos 132, 2<sup>a</sup> edição revista, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 2011.

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Levantamento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro.** Rio de Janeiro, 1982. 549 p.

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Brasília, DF: Embrapa Solos, 2009. 627p.

FERNANDES, E. C. M. et al. Management control of soil organic matter dynamics in tropical land-use systems, **Geoderma**, Amsterdã, v. 79, p. 49–67, 1997.

**FERREIRA, I. M.** Bioma Cerrado: caracterização do subsistema de Vereda. **Observatório Geográfico de Goiás**, Goiânia, v.1, n. 1, p.1-13, 2005.

**FERREIRA, I. M.; TROPPMAIR, H.** Aspectos do cerrado: análise comparativa espacial e temporal dos impactos no subsistema de veredas do chapadão de Catalão (GO). In: GERARDI, L. H.O.; LOMBARDO, M. A. (Org). **Sociedade e Natureza na visão da Geografia**. Rio Claro: UNESP, 2004, p. 135-152.

GABOS, M. B.; ALLEONI, L. R. F.; ABREU, C. A. Background levels of Selenium in some selected Brazilian tropical soils. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdã, v. 145, p. 35-39, 2014.

GRYBOS, M.; DAVRANCHE, M.; GRUAU, G.; PETITJEAN, P. Is trace metal release in wetland soils controlled by organic matter mobility or Fe-oxyhydroxides reduction? **Journal of Colloid and Interface Science**, Nova Iorque, v. 314, n. 2, p. 490-501, 2007.

GUILHERME, L. R. G. et al. Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. **Tópicos em ciências do solo**, Viçosa, v. 4, p. 385-382, 2005.

GUIMARÃES, A. J.; ARAÚJO, G. M.; CORRÊA, G. F. Estrutura fitossociológica em área natural e antropizada de uma vereda em Uberlândia, MG. **Acta Botânica Brasílica**, Belo Horizonte, v. 16, n. 3, p. 317-329, 2002.

GUO, G. L.; ZHOU, Q. X.; KOVAL, P. V.; BELOGOLOVA, G. A. Speciation distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in contaminated Phaeozem in north-east China using single and sequential extraction procedures. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 44, p.135-142, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Resolução Conjunta IBAMA/SEMA/IAP nº 005, de 28 de março de 2008**. Define critérios para avaliação das áreas úmidas e seus entornos protetivos, normatiza sua conservação e estabelece condicionantes para o licenciamento das atividades nelas permissíveis no Estado do Paraná. Disponível em: <[http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao\\_ambiental/Legislacao\\_estadual/RESOLUCOES/RESOLUCAO\\_CONJUNTA\\_IBAMA\\_SEMA\\_IAP\\_005\\_2008.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/RESOLUCAO_CONJUNTA_IBAMA_SEMA_IAP_005_2008.pdf)>. Acesso em: nov. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa de Vegetação do Brasil**. 2004. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/pro/bio/datadownload.htm>>. Acesso em junho de 2014.

INSTITUTO SOCIEDADE, POPULAÇÃO E NATUREZA - ISPNI. O Buriti – a palmeira de mil e uma utilidades, 2008. Disponível em: <<http://www.ispn.org.br/o-buriti-a-palmeira-de-mil-e-uma-utilidades/>> Acesso em outubro de 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Climate Change 2001: Synthesis Report – A contribution of working groups I, II, III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, 2001.

INTERNATIONAL UNION FOR THE CONSERVATION OF NATURE AND Natural - IUCN. Resources. Vision for water and nature - a world strategy for conservation and sustainable management of water resources in the 21st century, 2000. Disponível em: <<http://www.rivernet.org/general/docs/VisionWaterNature.pdf>> Acesso em outubro de 2014.

HUSSON, O. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. **Plant and Soil**, Haia, v. 362, p.389-417, 2013

JACOB et al. Cadmium and associated metals in soils and sediments of wetlands across the Northern Plains, USA. **Environmental Pollution**, Melbourne, v. 178, p. 211-219, 2013

JARDIM, W. F. Medição e interpretação de valores do potencial redox (Eh) em matrizes ambientais. **Química Nova**, São Paulo, v. 37, n. 7, p. 1233-1235, 2014. Disponível em:  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S010040422014000700020&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010040422014000700020&lng=en&nrm=iso). Acesso em: novembro de 2016.

JUNK, W.J. et al. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. Aquatic Conservation. **Marine and Freshwater Environments**, Melbourne, v. 24 p. 5-22, 2013.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 4.ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 534 p.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Org.). **Química e Mineralogia do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v. 1. p. 333-379.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 148-155, 2005.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: UNESP, 1998. 226 p.

LIMA, S. C. **As veredas do Ribeirão Panga no Triângulo Mineiro e a evolução da paisagem**. 1996. 260 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

LOCKWOOD, C. L. et al. Leaching of copper and nickel in soil-water systems contaminated by bauxite residue (red mud) from Ajka, Hungary: the importance of soil organic matter. **Environmental Science and Pollution Research**, Londres, v. 22, n.14, p. 10800 – 10810, 2015.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 137, p. 1-72, 2016.

MCCORMICK, J. Rumo ao Paraíso: **A história do movimento ambientalista**. Rio de Janeiro: Relume-Dumará, 1992.

MANTOVANI, J. E.; PEREIRA, A. Estimativa da integridade da cobertura vegetal do Cerrado através de dados TM/Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9, 1998. Santos. *Anais...* Santos: [s.n.], 1998.

MARTINS, C. A. S. et al. A dinâmica de metais traços no solo. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 17, p. 383-391, 2011.

MARQUES, J. J. G. S. M. et al. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, Amsterdã, 121:31-43, 2004.

MCBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 1994. 406p.

MELFI, A. J. ; MONTES, C. R. Impacto dos biossólidos sobre o solo. In: TSUTIYA, M.T. et al. (Ed.). **Biofertilizantes na agricultura**, São Paulo: SABESP, 2001. p.243-272.

MINAS GERAIS. **Lei nº 9.375, de 12 de dezembro de 1986**. Declara de interesse comum e de preservação permanente os ecossistemas das veredas no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2196>. Acesso em: nov. 2014.

MINAS GERAIS. **Lei nº 20.922, de 16 de outubro de 2013**. Dispõe sobre as políticas florestal e de proteção à biodiversidade no Estado. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=30375>>. Acesso em: nov. 2014.

MORAES, P. P. F.; HORN, A. H. Teores dos metais pesados Cr, Cd e Zn em perfis de solos de veredas da bacia do Rio do Formoso, município de Buritizeiro, Minas Gerais. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 18, p.78-85, 2010.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Ed. UFLA, 2006. 729p.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, Londres, v. 403, p. 853-858, 2000.

NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M. Valores orientadores da qualidade do solo para metais. In: NASCIMENTO, C.W.A.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; FREIRE, M.B.G.S.; SOUZA, E.R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 9, p. 112-143, 2015.

NEUE; H. U. et al. Carbon in Tropical Wetlands. **Geoderma**, Amsterdã, v. 79, p. 163-185, 1997.

NISHIYAMA, L.; RIBEIRO, A.G. Gênese, dinâmica hidrológica e vegetação de Murundus e Veredas. 2008 (não publicado).

OLIVEIRA, G. C.; ARAÚJO, G. M.; BARBOSA, A. A. A. Florística e zonação de espécies vegetais em veredas no Triângulo Mineiro, Brasil. **Rodriguesia**, Rio de Janeiro, v. 60, p. 1077-1085, 2009.

OLIVIE-LAUQUET, G. et al. Release of Trace Elements in Wetlands: Role of Seasonal Variability. **Water Research**, Nova Iorque, v. 35, n. 4, p. 943-952, 2001.

PAULINO, H. B. et al. Campus de Murundus: gênese, paisagem, importância ambiental e impacto da agricultura nos atributos do solo. In: NASCIMENTO, C.W.A.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; FREIRE, M.B.G.S.; SOUZA, E.R. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015, v. 9, p. 172-211.

PEIJNENBURG, W. J. G. M.; JAGER, T. Monitoring approaches to assess bioaccessibility and bioavailability of metals: matrix issues. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Nova Iorque, v.56, p. 63-77, 2003.

PESSÔA, V. L. S.; INOCENCIO, M. E. O prodecer (re)visitado: as engrenagens da territorialização do capital no Cerrado. **Campo - Território**, Uberlândia, v. 1, p. 1-22, 2014

PORTE-GONÇALVES, C. W. Geografia da riqueza, fome e meio ambiente: pequena contribuição crítica ao atual modelo agrário/agrícola de uso dos recursos naturais. In: OLIVEIRA, Ariovaldo U; MARQUES, Marta Inês M. (Org.). **O campo no século XXI**. São Paulo: Paz e Terra, 2004.

RAMOS, M.V.V. et. al. Veredas do Triângulo Mineiro: solos, água e uso. **Ciência & Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 2, p.283-293, 2006.

RAPIDEYE AG. RAPIDEYE. **Imagens rapideye**. Disponível em: <<http://www.rapideye.de/>>. Acesso em 04 de 2013.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M.T. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. RIBEIRO, J. F. (Ed.) **Cerrado: ecologia e flora**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. p.151-212.

RIBEIRO, B. T.; COSTA JUNIOR, D. F.; SILVA, C. R. 10-day probable rainfall for Uberlandia, Minas Gerais State, Brazil. **Bioscience Journal (Online)**, v. 29, p. 536-542, 2013. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/download/21287/12494>>. Acesso em: novembro de 2016.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 5. ed. Uberlândia: EDUFU, 2003.

ROSOLEN, V. et al. Contamination of wetland soils and floodplain sediments from agricultural activities in the Cerrado Biome (State of Minas Gerais, Brazil). **Catena**, Amsterdã, v 128, p. 203-210, 2015.

ROSOLEN, V.; OLIVEIRA, D. A.; BUENO, G. T. Vereda and Murundu wetlands and changes in Brazilian environmental laws: challenges to conservation. **Wetlands Ecology and Management**, Londres, v. 23, p. 285-292, 2015b.

SANO, E. E. et al. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do bioma cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p.153-156, 2008.

SHIKI, S. Sistema agroalimentar nos cerrados brasileiros: caminhando para o caos? In: SHIKI, S.; SILVA, J. G.; ORTEGA, A. C. (Org.). **Agricultura, Meio Ambiente e Sustentabilidade do Cerrado Brasileiro**. Uberlândia: UFU, 1997. p. 135-165.

SILVA, L.L. O papel do estado no processo de ocupação das áreas de cerrado entre as décadas de 60 e 80. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia, v. 1, n. 2, p. 24-36, 2001.

SILVA, F. A. M; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A. Caracterização Climática do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Org.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília: Embrapa Informação tecnológica, 2008. v. 1. p. 69-106.

SOARES, W. P.; PORTO, M. P. Atividade agrícola e externalidade ambiental: uma análise a partir do uso de agrotóxicos no cerrado brasileiro. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 12, p. 131-144, 2007.

SOUSA, R. F. et al. Matéria orgânica e textura do solo em veredas conservadas e antropizadas no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, p. 861-866, 2011.

SOUSA, R. F. et al. Soil organic matter fractions in preserved and disturbed wetlands of the Cerrado Biome. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 222-231, 2015.

SOUZA, J. R.; REIS, L. N. G. Regressão de áreas úmidas na chapada do oeste Mineiro: mapeamento temporal das áreas úmidas no alto curso do rio Uberabinha, MG e impactos ambientais. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, Tupã, v. 10, p. 150-167, 2014.

TATZBER, M. et al. Impact of different tillage practices on molecular characteristics of humic acids in a long-term field experiment – An application of three different spectroscopic methods. **Science of the total environment**, Amsterdã, v. 406, p. 256-268, 2008.

THE ECONOMICS OF ECOSYSTEMS AND BIODIVERSITY FOR WATER AND WETLANDS - TEEB, 2013, 78p. Disponível em: <[http://www.ramsar.org/pdf/TEEB/TEEB\\_Water&Wetlands\\_Report\\_2013.pdf](http://www.ramsar.org/pdf/TEEB/TEEB_Water&Wetlands_Report_2013.pdf)> Acesso em: 23 de agosto de 2014.

TCHOUNWOU P. B. et al. Heavy Metals Toxicity and the Environment. **EXS**, v. 101, p. 133-164, 2012.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: jun. 2015.

VENDRAME, P. R. S. et al. Disponibilidade de cobre, ferro, manganês e zinco em solos sob pastagens na Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasil, v. 42, p. 859-864, 2007.

WALTER, B. M. T. **Fitofisionomias do bioma Cerrado:** síntese terminológica e relações florísticas. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília. 2006. 389p.

YARON, B.; CALVET, R.; PROST, R. **Soil pollution: process and dynamics.** Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. 320 p.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Nova Iorque, v. 19, p. 1467-1476, 1988.