

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO GEOGRAFIA E GESTÃO DO TERRITÓRIO

**DISTRIBUIÇÃO E CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS
FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM ÁREA ÚMIDA DO
CERRADO APLICANDO MODELOS MATEMÁTICOS**

FABRÍCIO PELIZER DE ALMEIDA

UBERLÂNDIA/MG

2016

FABRÍCIO PELIZER DE ALMEIDA

**DISTRIBUIÇÃO E CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS E
QUÍMICOS DO SOLO EM ÁREA ÚMIDA DO CERRADO APLICANDO
MODELOS MATEMÁTICOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Geografia.

Área de Concentração: Geografia e Gestão do Território.

Orientador: Prof^a Dr^a Vânia Sílvia Rosolen

Uberlândia/MG

INSTITUTO DE GEOGRAFIA

2016

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

A447d
2016 Almeida, Fabrício Pelizer de, 1979-
Distribuição e correlação dos parâmetros físicos e químicos do solo
em área úmida do cerrado aplicando modelos matemáticos / Fabrício
Pelizer de Almeida. - 2016.
130 f. : il.

Orientador: Vânia Sílvia Rosolen.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Geografia.
Inclui bibliografia.

1. Geografia - Teses. 2. Geomorfologia - Triângulo Mineiro - Teses.
3. Solos - Cerrado - Triângulo Mineiro (MG) - Teses. 4. Latossolos -
Teses. I. Rosolen, Vânia Sílvia. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

CDU: 910.1

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Programa de Pós-Graduação em Geografia

FABRÍCIO PELIZER DE ALMEIDA

“DISTRIBUIÇÃO E CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM ÁREA ÚMIDA DO CERRADO APLICANDO MODELOS MATEMÁTICOS”.



Prof^ª. Doutora Vânia Silvia Rosolen (Orientadora) - UFU



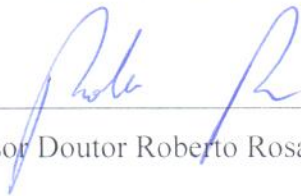
Professor Doutor José Sílvia Govone – UNESP – SP



Professor Doutor André Gustavo Mazzini Bufon – UNESP - SP



Professor Doutor Elias Nascentes Borges – UFU



Professor Doutor Roberto Rosa – UFU

Data: 08 / 04 de 2016

Resultado: Aprovado

*Ao meu filho Enzo, que virou meus dias pelo
avesso e me enche de amor e esperança!*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e seus desafios.

À minha amiga, Prof.^a Dr.^a Vânia Silvia Rosolen, pelo estímulo a continuar. Que fique registrado aqui as inúmeras vezes que pensei em desistir e as inúmeras vezes (mais uma) em que ela me confrontou a persistir. E como valeu à pena! Um aprendizado para a vida toda: simplicidade, paciência, muita disposição e um desejo maior de vencer e construir algo novo e criativo!

Ao Prof. José Sílvio Govone, pelas palavras brandas e certeiras na qualificação. Foram pontuais e decisivas para o prosseguimento da pesquisa e conclusão do trabalho.

Ao Prof. Elias Nascentes Borges, que me acompanhou desde a graduação e a parceria no período em que estive na SADIA S.A. Ao todo, lá se vão 20 anos! Minha expressa gratidão por reencontrá-lo e pelo aceite e disposição em participar da banca de defesa final.

Aos Professores Roberto Rosa e André Gustavo Mazzini Bufon pelo aceite e disposição em participar da banca de defesa final e contribuir neste trabalho!

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, docentes, técnicos e funcionários, pelo acolhimento de um engenheiro agrônomo, o apoio e a paciência quanto à conclusão deste trabalho.

Aos familiares, especialmente meus pais, pelo apoio e presença em minha vida. Vocês me fortalecem diariamente! Em especial à minha mãe, pela herança do gosto pelo estudo e aprendizado. É muito bom concluir um ciclo de formação no mesmo instituto em que se formou, na 1ª turma de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia

Aos meus amigos, pelos momentos de alívio e recuperação de energias. Recebi muito mais de vocês, do que fui capaz de doar. Obrigado pelo abraço, longas conversas e a cerveja gelada!

Aos amigos e colegas da Uniube, pela paciência, convívio diário e partilha de experiências!

De modo muito especial e particular à minha esposa Polyana, pelo amor incondicional, pela paciência, compreensão e incentivo para que chegássemos até aqui. Por me deixar a sós – *o notebook e eu* – em vários momentos, pela vibração a cada etapa vencida e por entender o quanto tudo isso foi importante para chegarmos juntos até aqui!

À minha avó Maria Aparecida Lein Pelizer, pelo enorme carinho. Meu exemplo de inteligência, boas ideias, bom humor e ótimas conversas.

Ao meu avô Sileno Pelizer (*in memoriam*), que mesmo em outra dimensão sempre me inspira. O meu exemplo de simplicidade e amor pelo que fez!

*“Cada homem deve inventar o seu caminho”
“[...] nasci para satisfazer a grande necessidade
que eu tinha de mim mesmo.”*

(Jean-Paul Sartre)

O Caminho da Vida

*“[...] O caminho da vida pode ser o da liberdade
e da beleza, porém nos extraviamos.*

*A cobiça envenenou a alma dos homens...
levantou no mundo as muralhas do ódio... e tem-
nos feito marchar a passo de ganso para a
miséria e morticínios.*

*Criamos a época da velocidade, mas nos
sentimos enclausurados dentro dela. A máquina,
que produz abundância, tem-nos deixado em
penúria.*

*Nossos conhecimentos fizeram-nos céticos; nossa
inteligência, empedernidos e cruéis. Pensamos
em demasia e sentimos bem pouco.*

*Mais do que de máquinas, precisamos de
humanidade. Mais do que de inteligência,
precisamos de afeição e doçura. Sem essas
virtudes, a vida será de violência e tudo será
perdido. ”*

Charles Chaplin

*“Somos o que pensamos. Tudo o que somos surge
com nossos pensamentos. Com nossos
pensamentos, fazemos o nosso mundo.”*

Buda

*“... porque o seu coração estará sempre onde
estiver o seu tesouro.”*

Jesus Cristo

RESUMO

Almeida, Fabrício Pelizer de. **Distribuição e correlação dos parâmetros físicos e químicos do solo em área úmida do cerrado aplicando modelos matemáticos**. 2016. 129f. Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2016.

As áreas úmidas em regiões tropicais constituem-se em uma importante fronteira de conhecimento, devido à complexidade dos seus constituintes mineralógicos, da dinâmica biogeoquímica e dos papéis que desempenha na manutenção da sustentabilidade do bioma Cerrado. Ocorrem nessas áreas de depressão topográfica, os solos hidromórficos, caracterizados pela condição de má drenagem e encharcamento. Já em planícies ocorrem repetição de padrões morfológicos, caracterizados como montes de terras semielípticas e depressões, conhecidas como 'campos de murundus'. Duas correntes discorrem sobre a sua formação, sendo uma que trata da origem geomorfológica dos murundus, descrevendo-os como resultado da erosão diferencial do terreno, e outra que atribui à origem biológica, que seria promovida pela mesofauna, principalmente pelos térmitas (cupins), de forma geralmente cumulativa. A microrregião de Uberlândia, no Triângulo Mineiro (MG), apresenta diversos campos de murundus, na transição entre o platô (bem drenado) e as áreas de depressão. Os objetivos desta pesquisa foram determinar os aspectos biogeoquímicos e morfológicos dos murundus, a partir de indicadores químicos, físicos e biológicos, e avaliar a capacidade de respostas de modelos matemáticos quanto às interações e correspondências de variáveis, e otimização e simulação de indicadores em uma mesma catena. Os dados obtidos a partir de laudos de análise dos solos amostrados, correspondem às trincheiras abertas nas áreas de platôs, murundus, borda e centro da depressão, em superfície e profundidade, e compreendem o complexo sortivo, óxidos totais e aspectos texturais. Os maiores coeficientes de resposta significativos para matéria orgânica no modelo linear generalizado (GLM), foram obtidos nas áreas de borda e centro de depressão (10,14 e 11,84, respectivamente), porém decrescem rapidamente, variando muito de um estrato para outro de profundidade (-7,45 e 5,01 de 51-100cm, respectivamente). Apesar de menores coeficientes significativos observados no GLM, para as áreas de murundus em superfície (8,13 de 00- 20 cm; 5,57 de 21-50cm), observou-se tendência mais uniforme quanto à variação até 100cm (3,04 de 51-100cm). Os traços da hidromorfia e da atividade de bioturbação nos campos de murundus são imprescindíveis para a compreensão do caráter dinâmico de heterogeneização do perfil e principalmente, de acumulação de matéria orgânica e incremento do complexo de cargas no solo. No platô, em todos os modelos matemáticos propostos, não foi possível observar capacidade de resposta significativa para os teores de matéria orgânica. Nos modelos multivariados não hierarquizados, constatou-se maior correspondência entre os fatores que compõem os indicadores do complexo sortivo (agrupados) e as áreas representadas pelos ambientes com algum traço de hidromorfia (mu, T1P2) ou tipicamente hidromórficos (bd, T1P3; cd, T1P4), reiterando a composição do modelo linear generalizado. Quanto à simulação de sobreposição de respostas, foi evidenciado forte semelhança apenas entre os murundus e as bordas da depressão, quanto ao comportamento da relação $\text{Fe}(\text{OH})_3/\text{Al}_2\text{O}_3$. Os resultados de simulação e otimização demonstraram que os murundus são áreas com melhor conjunto de atributos geomorfológicos para expressão dos teores de MO e valores de CTC, sob um parâmetro de mínima faixa de Al_2O_3 (34,9487%) e máxima faixa de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (9,2278%).

Palavras-chave: Cerrado. Murundus. Matéria orgânica do solo. Modelagem matemática. Otimização. Latossolos.

ABSTRACT

Almeida, Fabrício Pelizer de. **Distribution and correlation of soil physical and chemical parameters in Cerrado wetland applying mathematical models**. 2016. 129f. Thesis (Doctorate in Geography). Institute of Geography, University Federal of Uberlândia, Uberlândia, MG, 2016.

Wetlands in tropical regions constitute an important frontier of knowledge due to the complexity of the mineralogical constituents of the biogeochemistry dynamic and the roles it plays in maintaining the Cerrado biome sustainability. Occur in these areas of topographic depression, hydromorphic soils, characterized by the condition of poor drainage and waterlogging. Already in Plains occur when replaying morphological patterns, characterized as lots of semielliptical lands and depressions, known as 'murundus fields'. Two thoughts talk about their training, one that deals with the geomorphological origins of large heaps, describing them because of differential erosion of the land, and another that assigns to the biological origin, which would be promoted by mesofauna, primarily by termites, so cumulative usually. In the microregion of Uberlândia in the Triângulo Mineiro (MG) presents several murundus fields, in the transition between the plateau (drained) and areas of depression. The objectives of this research were to determine the biogeochemical aspects of morphological and murundus, from chemical, physical and biological indicators, and assessing the ability of mathematical models about the interactions and correspondence of variables and the optimization and simulation of indicators in a same catena. The data obtained from soil analysis reports sampled, correspond to open trenches in areas of murundus, plateaus, edge and center of the depression, surface and depth, and understand the complex sorptive, total oxides and textural aspects. The highest coefficients of significant response to organic matter in generalized linear model (GLM), were obtained in the areas of border and Central depression (10.14 and 11.84, respectively), but decrease quickly, varying greatly from one stratum to another deep (-7.45 and 5.01 of 51-100 cm, respectively). Although smaller significant coefficients observed in the GLM, to murundus areas in (8.13 of 00-20 cm; 5.57 of 21-50 cm), more uniform trend was observed as to the variation up to 100 cm (3.04 of 51-100 cm). The traces of the hydromorphy and bioturbation activity in the fields of large heaps are indispensable for understanding the dynamic character of heterogeneization of profile and primarily, of accumulation of organic matter and increase cargo complex on the ground. On the plateau, in all the proposed mathematical models, it has not been possible to observe significant response capacity to the levels of organic matter. Multivariate non-hierarchical models, contacted if more correspondence between the factors that make up the complex indicators sorption (grouped) and the areas represented by the environments with any trace of hydromorphy (mu, T1P2) or typically hydromorphic (bd, T1P3; cd, T1P4), reiterating the composition of the generalized linear model. As for the overlay simulation of responses, it was evidenced only strong resemblance between the murundus and the edges of the depression, as the behavior of the relationship $\text{Fe}(\text{OH})_3/\text{Al}_2\text{O}_3$. The results of simulation and optimization demonstrated that the murundus areas with better set of geomorphological attributes for MO content expression and values of CTC, under a minimum parameter range of Al_2O_3 (34.9487%) and a maximum range of $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (9.2278%).

Keywords: Cerrado; Murundus; Soil organic matter; Mathematical modeling; Optimization; Latosols.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo estrutural e fatores regionais incidentes para avaliação conjuntural da dinâmica de matéria orgânica do solo.....	30
Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo.....	50
Figura 3 - Perfil topográfico do segmento da vertente envolvendo a depressão topográfica com solo Glei (T1P4 e T1P3), o campo de murundus (T1P2) e o Latossolo Amarelo à montante (T1P1).....	52
Figura 4 - Trincheira T1P1 à montante da vertente.....	53
Figura 5 - Trincheira T1P2, aberta na transição entre o centro de um murundu e a depressão que o circunda.	55
Figura 6 - Trincheira T1P3 aberta na borda da depressão.....	57
Figura 7 - Diferenças entre as Médias (Teste de Fisher) e Intervalos de Confiança ($p < 0,05$) para os teores de Matéria Orgânica do Solo (MOS) em relação aos aspectos topográficos: BD (borda da depressão), CD (centro da depressão), MU (murundu) e PL (platôs); entre os estratos de profundidade (S1, 00 – 20 cm; Sub1, 21 – 50 cm; Sub2, 51 – 100 cm; Sub3, > 100 cm).....	76
Figura 8 - Diferenças entre as Médias (Teste de Fisher) e Intervalos de Confiança para os valores de pH em relação aos aspectos topográficos: BD (borda da depressão), CD (centro da depressão), MU (murundu) e PL (platôs); entre os estratos de profundidade (S1, 00 – 20 cm; Sub1, 21 – 50 cm; Sub2, 51 – 100 cm; Sub3, > 100 cm).	77
Figura 9 - Análise de Componentes Principais (ACP) do conjunto de dispersão dos escores fatoriais obtidos através das variáveis originais de caracteres físico-químicos estruturais do solo.	85
Figura 10 - Projeção simétrica (a) e assimétrica (b) de dados contingentes dos óxidos totais (SiO_2 , Al_2O_3 e $\text{Fe}(\text{OH})_3$) em relação à topografia (bd, cd, mu, pl), e os teores de MOS (dag kg^{-1}), e valores de CTC e H^+Al (mmolc dm^{-3}) e pH (CaCl_2).....	88
Figura 11 - Dendograma (diagrama de árvore) das observações individuais a partir de doze principais variáveis referentes à fração granulométrica, complexo sortivo e óxidos totais.....	91
Figura 12 - Distribuição espacial dos teores de Matéria Orgânica do Solo (dag kg^{-1}), em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de <i>clusters</i>	92
Figura 13 - Fotos de microscopia óptica indicando a formação de matriz microagregada do solo produzida por térmitas em murundu (T1P2 à 15cm e 44cm de profundidade).....	93

Figura 14 - Distribuição espacial dos teores de Óxido de Ferro – $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (g cm^{-3}), em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de <i>clusters</i>	94
Figura 15 - Distribuição espacial dos teores de Óxido de Alumínio – Al_2O_3 (g cm^{-3}), em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de <i>clusters</i>	96
Figura 16 - Distribuição espacial dos teores de Óxido de Silício – SiO_2 (g cm^{-3}), em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de <i>clusters</i>	97
Figura 17 - Distribuição espacial das faixas de pH (em CaCl_2) em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de <i>clusters</i>	98
Figura 18 - Distribuição espacial das faixas de CTC (em mmolc dm^{-3}) em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de <i>clusters</i>	99
Figura 19 - Distribuição espacial dos teores de argila (g kg^{-1}) em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de <i>clusters</i>	100
Figura 20 - Distribuição espacial dos teores de areia total (g kg^{-1}) em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de <i>clusters</i>	101
Figura 21 - Distribuição de contornos e sobreposição de faixas de melhor resposta dos teores de Matéria Orgânica do Solo (em dag kg^{-1}), contrastando com os teores de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e Al_2O_3 (em g cm^{-3}), para os perfis topográficos.	104
Figura 22 - Otimização da resposta dos teores de Matéria Orgânica do Solo (em dag kg^{-1}) e CTC (mmolc dm^{-3}) contrastando com os teores ótimos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 e SiO_2 (em g cm^{-3}), e a máxima feição do perfil topográfico – murundu.....	107
Figura 23 - Otimização da resposta dos teores de Matéria Orgânica do Solo (em dag kg^{-1}) e CTC (mmolc dm^{-3}) contrastando com os teores ótimos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 e SiO_2 (em g cm^{-3}), e a máxima feição do perfil topográfico – borda da depressão.....	108
Figura 24 - Otimização da resposta dos teores de Matéria Orgânica do Solo (em dag kg^{-1}) e CTC (mmolc dm^{-3}) contrastando com os teores ótimos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 e SiO_2 (em g cm^{-3}), e a máxima feição do perfil topográfico – platôs.....	109
Figura 25 - Otimização da resposta dos teores de Matéria Orgânica do Solo (em dag kg^{-1}) e CTC (mmolc dm^{-3}) contrastando com os teores ótimos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 e SiO_2 (em g cm^{-3}), e a máxima feição do perfil topográfico – centro da depressão.....	110

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Descritivo de análise de dados e modelagem de variáveis consideradas na pesquisa.	64
Quadro 2 - Variáveis originais selecionadas e as características dos componentes na análise fatorial.....	83
Tabela 1 - Descritivo de intervalos das variáveis para elaboração das faixas de teores nos modelos matemáticos.	65
Tabela 2 - Valores médios, desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (cv, %) do complexo sortivo, COS (carbono orgânico do solo) e MOS (matéria orgânica do solo) nas áreas de platô (T1P1), murundu (T1P2), borda de depressão (T1P3) e centro de depressão (T1P4) por estratos de profundidade (00-20cm; 21-50cm; 51-100cm; >101cm).	71
Tabela 3 - Valores médios de óxidos totais (%), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (cv, %) nas áreas de platô (T1P1), murundu (T1P2), borda de depressão (T1P3) e centro de depressão (T1P4) por estratos de profundidade (00-20cm; 21-50cm; 51-100cm; >101cm)....	72
Tabela 4 - Estatística ANOVA para os teores de Matéria Orgânica do Solo (MOS) e de Carbono Orgânico do Solo (COS) e a significância de suas correlações quanto às faixas das variáveis ambientais, de característica química (pH, SB, CTC, P, K e m), física (aspecto topográfico e estratos de profundidade) e os principais óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$).	74
Tabela 5 - Análise de Variância do Modelo Linear Generalizado (GLM) para as faixas de fontes de variação (fv) e os fatores agrupados (profundidade <i>versus</i> topografia), e as variáveis dependentes (MOS e COS).	78
Tabela 6 - Análise de Variância do Modelo Linear Generalizado (GLM) para as variáveis explanatórias (ve) e os fatores agrupados (profundidade <i>versus</i> topografia), e as variáveis respostas (MOS e COS).	79
Tabela 7 - Valor da estatística gerada pelo Modelo Linear Generalizado (<i>Wald statistics</i>) para os estratos do ambiente, indicando quais deles mostraram diferenças significativas entre as faixas obtidas na determinação dos teores de MOS e COS. * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$	81
Tabela 8 - Resumo dos componentes principais da análise multivariada para as variáveis originais.	84
Tabela 9 - Correlação entre variáveis originais e componentes principais da fração granulométrica, complexo sortivo e óxidos totais.....	84
Tabela 10 - Resumo das contribuições explicativas de cada fator na composição do Componente 1 e 2 da análise de simples correspondência.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA – *Analysis of variance* (Análise de Variância)

Axis - Eixo

C – Carbono

C₃ – Ciclo de carboxilação C₃ (*ou de Calvin*) – as plantas de ciclo C₃ fixam o CO₂ atmosférico à partir da enzima RUBISCO

C₄ – Ciclo de carboxilação C₄ – as plantas de ciclo C₄ fixam o CO₂ atmosférico através da enzima *PEP carboxilase*

CA – Coeficiente de Aglomeração

Ca – Cálcio

CaCl₂ – Cloreto de Cálcio

CI – *Confiance Interval* (Intervalo de Confiança)

City-block – Manhattan distance ou ‘geometria do taxi’, sugere que a distância entre dois pontos é a soma das diferenças absolutas de suas coordenadas

COS – Carbono Orgânico do Solo

CO₂ – Dióxido de Carbono

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

desirability composite – composição de conveniência

dummy – variável fictícia de ajuste ou suavização

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ESALQ-USP – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/ Universidade de São Paulo

Fapesp – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

GLM – *General Linear Model* (Modelo Linear Generalizado)

H₂O₂ – Peróxido de Hidrogênio

HCl – Ácido Clorídrico

IBAR – Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários

LSD - *Least Significant Difference* (Menor Diferença Significativa)

m (%) – Saturação por Alumínio

Mahalanobis – Medida de distância baseada nas correlações entre variáveis nas quais distintos padrões podem ser identificados e analisados.

MANOVA - *multivariate analysis of variance* (Análise de Variância Multivariada)

Mg – Magnésio

MINITAB – Software Estatístico

Mn – Manganês

MOS – Matéria Orgânica do Solo

N – Nitrogênio

OCP - *overlaid contour plot* (gráficos de contornos e sobreposição)

P - Fósforo

pH – Potencial hidrogeniônico

Prof. – Profundidade

ROP - *response optimizer plot* (gráficos de otimização de resposta)

SCA – *Simple Correspondence Analysis* (Análise de Correspondência Simples)

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

% – por cento

dag kg⁻¹ de matéria orgânica – decagrama de matéria orgânica por quilo de solo

g cm⁻³ – grama por centímetro cúbico

mg dm⁻³ de P – miligrama de fósforo por decímetro cúbico

mmol_c dm⁻³ – milimol carga por decímetro cúbico

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO I REFERENCIAL TEÓRICO	21
1.1 HIPÓTESES GEOMORFOLÓGICAS SOBRE A FORMAÇÃO DOS MURUNDUS.....	21
1.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DOS CONSTITUINTES GEOQUÍMICOS DO SOLO..	29
1.2.1 Análise Discriminante e Composição do Cluster	38
1.2.2 Modelo de Regressão Linear	40
1.2.3 Modelo Linear Generalizado (GLM).....	43
CAPÍTULO II MÉTODO E TÉCNICA DE PESQUISA	50
2.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	50
2.1.1 Caracterização Topográfica e Descrição dos Solos	51
2.1.2 Análises e Procedimentos Laboratoriais.....	61
2.2 PROCEDIMENTOS USUAIS DE MODELAGEM MATEMÁTICA E ESTATÍSTICA....	62
CAPÍTULO III RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
3.1 RELAÇÕES ENTRE MOS E COS E OS INDICADORES QUÍMICOS DO SOLO.....	70
3.2 HIPÓTESE DA RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS AVALIADOS E A COMPARTIMENTAÇÃO TOPOGRÁFICA	73
3.3 VARIABILIDADE ESPACIAL DO COMPLEXO SORTIVO, ÓXIDOS TOTAIS E AS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS.....	83
3.4 ANÁLISE HIERÁRQUICA DO COMPLEXO SORTIVO, ÓXIDOS TOTAIS E AS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS.....	90
3.5 MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE RESPOSTAS DOS COMPONENTES GEOQUÍMICOS E OS PERFIS TOPOGRÁFICOS.....	102
CONCLUSÕES.....	112
Referências	116

INTRODUÇÃO

Os solos são recursos naturais de fundamental importância para a manutenção das atividades humanas e principalmente, das funções ecossistêmicas no planeta. Nesse sentido é um componente vital no ciclo hidrológico devido à capacidade de filtração da água e retenção de elementos orgânicos e minerais.

Há de se ressaltar que o solo funciona ainda como meio de cultura ou habitat para uma enormidade de organismos, participando de modo decisivo na manutenção da biodiversidade. Sabe-se que mais de um quarto de todas as espécies que vivem na Terra são restritos ou parcialmente habitantes do solo. (DECAENS et al., 2006).

Trata-se, portanto, de um ambiente peculiar para que se desencadeie uma extensa quantidade de processos e interações vitais à manutenção das condições e características em subsuperfície (WARDLE et al., 2004), e à regulação de comunidades e dinâmicas de nutrientes em superfície, em geral a partir de interações indiretas, menos específicas e em períodos mais longos (VAN DER PUTTEN, 2003; WARDLE et al., 2004).

Entretanto, o solo é compreendido como um habitat altamente heterogêneo e com uma extensa gama de outras composições mineralógicas, tal como um mosaico, resultantes da erosão de rochas e da decomposição de plantas e outros organismos. É importante destacar que a atividade de microrganismos restringe-se na verdade, a apenas 0,1 % do solo em massa, ocupando menos de 5% do volume total do solo. (INGHAM; COLEMAN; MOORE, 1989).

Nesse contexto, a matéria orgânica do solo (MOS) é de fundamental importância para a compreensão dos processos interativos, ciclos biogeoquímicos e dinâmica de complexação e disponibilidade de elementos no solo. (GREGORICH et al. 1994). Dentre os atributos clássicos para a MOS destaca-se o de contribuir para o arejamento do solo, permitindo a absorção e drenagem de água, a formação de agregados e, portanto, contribuindo para a

manutenção estrutural do conjunto de particulados. (TIESEN; CUEVAS; CHACON, 1994; CRASWELL; LEFROY, 2001).

Outro aspecto a ser ressaltado diz respeito à capacidade de retenção e incorporação de carbono orgânico, tão pertinente se considerado as preocupações relativas às alterações climáticas e os esforços de mitigação de gases de efeito estufa, além da iminente proteção do solo contra variações bruscas de suas características físico-químicas. (COLE; BARDGETT, 2002).

Em geral, a atividade orgânica do solo mantém-se relativamente estável em função das variações sazonais. No entanto, as mudanças climáticas intensas podem intensificar estas perturbações sazonais, ampliando os limites para além das faixas extremas toleráveis, especialmente aquelas induzidas de forma antropogênica, tais como a fragmentação do habitat, a manutenção de áreas descobertas, uso frequente e intensivo de fertilizantes químicos e pesticidas, e o preparo e revolvimento do solo para o cultivo. Isoladamente ou ocorrendo simultaneamente, tais fatores podem alterar o habitat de organismos e dos materiais orgânicos e, conseqüentemente, o funcionamento e dinâmica do ecossistema. (GRIFFITHS et al., 2000).

Nesse sentido, a agricultura desempenha papel relevante não só em função dos recortes ou fragmentação do habitat que impõe sobre um determinado local. Levam-se em consideração, os efeitos da elevada carga de elementos químicos no sistema e as alterações na capacidade de escoamento e parâmetros de recalcitrância do solo, em detrimento à perturbação imposta pela atividade econômica. Em um cenário semelhante, as diferentes concentrações desses elementos e eventuais combinações, seja com outros elementos ou dissociados em meio aquoso (período chuvoso ou áreas inundadas), podem indicar um impacto ainda maior na dinâmica e estabilidade de materiais orgânicos no solo. (EYRE; PONT, 2003; ZONTA et al., 2005; ROYER; DAVID; GENTRY, 2006).

Na prática, os processos antropogênicos influenciam de modo negativo a manutenção das condições e características da matéria orgânica no solo, especialmente nas áreas tropicais, devido, dentre outros fatores, ao rigor climático imposto nesses ambientes. Para alguns autores, a depleção ou a perda de caracteres físicos, químicos e biológicos das substâncias orgânicas no solo é sim um fator crítico associado à ocupação de áreas anteriormente preservadas e que, de modo intenso ou gradativo, compromete a capacidade de ciclagem natural de uma gama extensa de elementos e processos biogeoquímicos. (KÖRSCHENS; WEIGEL; SCHULZ, 1998).

Tais processos incluem a conversão de ecossistemas parciais ou totalmente naturais em áreas agricultáveis associado à uma rígida implantação técnica de aração e pastagens extensivas. Para Citeau et al., (2009), a conversão de ecossistemas naturais para agrícolas geralmente provoca depleção de 50 a 75% no reservatório de carbono do solo.

Outro importante parâmetro relacionado aos processos antropogênicos nos solos, diz respeito ao manejo de água nos ecossistemas naturais à medida que são incorporados às áreas agrícolas. Essa condição abrange desde a imposição de procedimentos e técnicas de drenagem em solos tipicamente alagados, a baixa qualidade e, por conseguinte, a inexistência de planos regulares de monitoramento da água após a intervenção no sistema e, por fim, o excesso no volume irrigado para condução da cultura.

Destaca-se que, as alterações no ecossistema natural, mais especificamente na dinâmica do solo e água, são perceptíveis considerando outros indicadores que não somente aqueles relacionados à atividade orgânica. Sollins, Homann e Caldwell, (1996) relacionam ainda os fatores climáticos, tais como a precipitação e temperaturas médias anuais, o modelo exploratório de raízes vegetais, seja sob o ponto de vista físico-químico ou ainda no que se refere à diversidade de material orgânico fresco e a capacidade de depósito e reposição, como variáveis que determinam ou influenciam decisivamente a aceleração ou retração do processo

de alteração. Por fim, os autores destacam os caracteres mineralógicos do solo como os aspectos estruturais, texturais e, principalmente, a perda de estabilidade dos agregados como sendo uma alteração notável e amplamente correlacionada à depleção da matéria orgânica do solo.

Em suma, implica afirmar que uma série de fatores precisam ser avaliados e discutidos, considerando-se a complexidade das relações e dinâmicas existentes no solo, as peculiaridades quanto à resiliência e feições geomorfológicas. No entanto, mesmo que haja alguma capacidade resiliente do solo após sofrer impacto, alteração ou depleção de suas condições naturais, entende-se que sejam necessários longos períodos de tempo para o reestabelecimento dos parâmetros mínimos de biodiversidade e mais ainda, para que sejam estabelecidos novos papéis e níveis de equilíbrio bióticos. (VAN DER WAL et al., 2006).

Apesar do maior destaque para os atributos, a acessibilidade, a estabilização e desestabilização da matéria orgânica no solo, ao menos nessas primeiras impressões do trabalho, faz-se necessário ressaltar as interações desses materiais e os macroelementos no solo. Vários estudos referenciam essas interações, especialmente etapas de solubilização e estabilidade desses elementos, os fluxos de incorporação à fração orgânica e finalmente, os processos de sorção e adsorção quando disponíveis na solução do solo. (BERG et al., 1982; BERG; EKBOHM; MCCLAUGHERTY, 1984; EDMONDS, 1987; MELILLO et al., 1989; ABER; MELILLO; MCCLAUGHERTY, 1990).

Dado a enormidade de variáveis e (re)combinações de fatores bióticos e abióticos no solo, e considerando a importância das áreas tipicamente úmidas como ambientes de recargas para os recursos hídricos e manutenção da funcionalidade das relações ecossistêmicas, há de se destacar o interesse em pormenorizar o estudo para a compreensão da dinâmica, natureza e estocagem de material orgânico. (HUGHES; KAUFFMAN; JARAMILLO, 1999).

Uma especial atenção deve ser atribuída às áreas de murundus que correspondem à aglomeração esparsa de terra, em formato elíptico ou circular, encontradas nas áreas de Cerrado (Cerrado *stricto sensu*). Ponce e Cunha (1993), discorrem sobre a formação dessas áreas no interior do bioma Cerrado e atribuem a esse processo a ocorrência de fatores abióticos, tais como influências geomorfológicas e características locais hidrológicas, e fatores bióticos, devido à ação de cupins sequencialmente à gênese abiótica.

Para Lambin e Meyfroidt (2011), a compreensão dessas dinâmicas típicas de áreas úmidas em regiões tropicais é um desafio central, ou melhor, uma nova fronteira para a sustentabilidade global. Portanto, o interesse de estudo e abordagem desse trabalho está pautado nesse contexto: a expectativa de se compreender e modelar a dinâmica e natureza do material orgânico em áreas úmidas, típicas do bioma Cerrado. Espera-se que seja possível elucidar alguns processos, identificar conexões e interações do material orgânico e os níveis de macronutrientes e por fim, o papel dos processos de bioturbação na constituição geoquímica e dinâmica dessas áreas.

A hipótese dessa pesquisa questiona a origem orgânica de áreas úmidas do bioma Cerrado, com destaque para os locais de ocorrência dos murundus e as possíveis correlações dessa atividade orgânica com os níveis de macronutrientes, e comparativamente aos teores desses elementos em áreas de bordas de depressão e platôs.

Portanto, propõe-se como objetivo central desse trabalho avaliar as correlações dos atributos químicos e físicos dos solos em uma catena, tendo como foco principal a presença de ambiente hidromórfico e suas tendências de distribuição em função da paisagem, utilizando-se de modelos matemáticos.

Os objetivos específicos do trabalho foram (i) caracterizar a concentração de matéria orgânica nos solos e a possível correlação com os compartimentos da paisagem de cerrado (platô, campos de murundus e depressão topográfica hidromórfica); (ii) aplicar modelos

matemáticos e estatísticos para avaliar as tendências de distribuição das características de distribuição nos perfis de solos na paisagem; e por fim, (iii) avaliar possíveis (des)conexões e semelhanças entre áreas úmidas e drenadas, limítrofes, a partir dos parâmetros, variáveis e modelos matemáticos aplicados na pesquisa.

A análise das características físicas e biogeoquímicas do solo dessas áreas de estudo, devem permitir a modelagem e melhor elucidação das dinâmicas e interações, considerando ainda os aspectos climáticos, hidrológicos e pedogenéticos. Espera-se que seja possível compreender os processos já citados de maneira funcional, ao ponto de estabelecer parâmetros comparativos entre áreas (úmidas, bordas e platôs) e eventuais conexões e semelhanças biogeoquímicas.

A composição da modelagem matemática e estatística a partir de ferramentas e metodologias clássicas ou empíricas, utilizando-se dos dados e informações pertinentes, é de fundamental importância para o presente trabalho, em função da própria necessidade de se elucidar os processos e dinâmicas, considerando uma série extensa de variáveis e modos de ocorrência e pertinência para o modelo adotado.

CAPÍTULO I REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 HIPÓTESES GEOMORFOLÓGICAS SOBRE A FORMAÇÃO DOS MURUNDUS

O bioma Cerrado corresponde a cerca de 23% do território brasileiro, e mais de 90% do Planalto Central do Brasil. (RIZZINI, 1997), ocupando aproximadamente 2 milhões de km². (RATTER; RIBEIRO; BRIDGEWATER, 1997). Compreende uma vegetação do tipo savana, intercalada com matas ciliares, galerias ou florestas, além de manchas de floresta estacional semidecidual e ocorrências de solos hidromórficos em áreas alagadas. (BOURLIÈRE; HARDLEY, 1983).

Originalmente, ainda são bastante debatidos os aspectos e fatores que envolvem a formação e constituição do bioma Cerrado. Algumas teorias têm sido propostas com o intuito de elucidar os processos de formação e ocorrência, incluindo as possibilidades de origem antrópica ou natural (FERNANDES, 2000; LEDRU, 2002), sustentando hipóteses de que a origem do Cerrado é amplamente influenciada pelos aspectos edafoclimáticos (FERNANDES, 2000), e pelo fogo. (COUTINHO, 1990; MARIMON et al., 2012).

Em geral, quanto aos solos de Cerrado, são predominantemente lateríticos e caracterizados como pobres em bases, ácidos e com elevados teores de alumínio trocável, bem drenados e profundos e, portanto, bastante lixiviados. (QUEIROZ NETO, 1982; LOPES, 1984; REATTO; CORREIA; SPERA, 1998). Alguns autores destacam a influência de um conjunto de fatores climáticos, especialmente o regime hídrico e a temperatura, na constituição geomorfológica nesses ambientes. (SHERPHERD et al., 1989; FURLEY, 1996).

Em áreas de depressão topográficas, com fluxo de soluções baixo ou impedido, devido às camadas lateríticas encoraçadas (FREITAS; SILVEIRA, 1977), encontram-se os

solos hidromórficos. (LOPES; COX, 1977), caracterizados pela má drenagem e consequentemente encharcamento do solo. Em áreas planas que abrangem tipicamente toda a extensão do bioma, ocorre repetição de padrões caracterizados como montes de terras semielípticas e depressões, conhecidas como ‘campos de murundus’. (ARAÚJO NETO et al., 1986; MAYLE et al., 2007; PONCE; CUNHA, 1993). São, portanto, em linhas gerais, fitofisionomias de ocorrência no bioma Cerrado com funções ecológicas importantes para a manutenção da sustentabilidade do solo nessas regiões.

Os campos de murundus ocorrem principalmente em localidades sujeitas a um clima hiperestacional marcado por períodos de inundações ou excesso de água seguidos de ocasiões de secas. (CIANCIARUSO; SILVA; BATALHA, 2009). Portanto, há predominância de formação de zonas esparsas e ilhadas durante a estação chuvosa, envoltas por rebaixamentos saturados ou inundados, e compostas por plantas lenhosas de Cerrado e grandes montículos de cupins que contribuem para sua aparência peculiar. (OLIVEIRA FILHO, 1992).

Esses campos apresentam montículos de solo, de formato circular variando 2 a 10 m de diâmetro e até 2 m de altura no Brasil, podendo chegar até 10 m de altura, como encontrado na África. (COX; GAKAHU; WAITHAKA, 1989). O solo apresenta baixa capacidade de infiltração de água permanecendo inundado entre os murundus no período das chuvas, sendo vegetado por espécies tolerantes ao alagamento temporário. O terço superior dos murundus, parte seca do solo, apresenta em geral, vegetação típica do Cerrado *strictu sensu*, composta por espécies arbustivas e arbóreas. (RESENDE et al., 2007; MARIMON et al., 2012). Os campos de murundus também são encontrados na África, Austrália e América do Norte (MOLLARD, 1982; COX; GAKAHU; WAITHAKA, 1989; RAHLAO et al., 2008), e, no Brasil, no bioma de Cerrado. (OLIVEIRA FILHO, 1992; SILVA; HARIDASAN; HOFFMANN, 2010).

Embora sejam generalizadas e constituam paisagens com distintas distribuições de características de solos e da vegetação, há ainda pouca descrição pormenorizada ou classificada. Apesar de serem descritos como ‘montículos redondos’, a ocorrência na paisagem e diversidade entre as localidades demonstram certas variações dos tamanhos observados e espaçamento. No entanto essa formação ocorre em um ambiente úmido sazonal, circundado por uma topossequência caracterizada entre o Cerrado típico mais seco e o úmido (mata de galeria) como os fundos de vale. (FURLEY; RATTER, 1988).

Entende-se, portanto, que seja improvável que um único mecanismo particular tenha conduzido a formação desses montículos em todos os ambientes. Algumas hipóteses têm sido lançadas no sentido de elucidar a origem desses ‘montículos’. A maioria dessas conjecturas sugere que os murundus foram edificadas, quer por processos físicos em etapas sucessivas de encolhe-expande (BUOL et al., 2003), ou por atividade de animais específicos construtores de montículos ou humanos.

Há evidências na literatura de que a origem dessas paisagens está relacionada à atividade de insetos sociais (cupins) que seriam responsáveis pela elevação da microtopografia em relação à paisagem predominante. (COLE; BARDGETT, 2002; EITEN, 1984; COX; GAKAHU; WAITHAKA, 1989; MOORE; PICKER, 1991; OLIVEIRA FILHO, 1992; REICHMAN; SEABLOOM, 2002). Essa hipótese sustenta a prerrogativa de que os chamados ‘ninhos de cupins’ constituindo uma área restrita, elevada e particularmente inundada são geralmente ocupados por espécies vegetais diferentes das pastagens que circundam essas localidades. (SILVA; HARIDASAN; HOFFMAN, 2010).

Aliás, podem ser atribuídas a esses montículos aspectos particulares de fertilidade química e orgânica em relação às áreas circunvizinhas. Holt e Coventry (1990, p. 428), argumentam:

(...) the mounds and other structures built-up by termites are usually enriched in soil organic matter and fine particles; hence, they could be considered islands of higher fertility surrounded by less fertile soil, significantly changing soil microbial diversity and activity organic (...).

Realmente, a atividade desses cupins (*ou térmitas*) é de justamente coletar partículas de diferentes profundidades do solo e depositá-los em montículos, contribuindo para que o conteúdo de argila e macroelementos, teores de C orgânico, faixas de ocorrência de pH e aumento da população microbiana seja maior em cupinzeiros que em solos adjacentes (LAL, 1988; BLACK; OKWAKOL, 1997; HOLT, 1998). O material acumulado é posteriormente redistribuído devido aos processos erosivos, que condicionam alterações profundas na microestrutura e fertilidade do solo (DANGERFIELD; MCCARTHY; ELLERY, 1998; JUNGRIUS; VAN DER ANCKER; MUCHER, 1999).

Além disso, atribui-se à atividade de térmitas a construção de uma extensa rede de galerias que aumentam consideravelmente a constituição dos macroporos do solo e consequentemente a capacidade de infiltração de água (MANDO; STROOSNIJDER, 1999; LÉONARD; RAJOT, 2001) impondo uma dinâmica peculiar à essas localidades de montículos. Do mesmo modo, essa capacidade bioturbadora possibilita o acúmulo de uma enormidade de materiais biogênicos que influenciam as propriedades físicas e químicas dos solos nessas estruturas. (LÉONARD; RAJOT, 2001; JOUQUET et al., 2002).

Para Wood (1988), os materiais depositados pelas térmitas podem modificar as características do perfil do solo podendo imprimir mudanças significativas no conjunto de propriedades físicas e químicas. O autor ainda destaca a capacidade desses organismos em construir extensas galerias subterrâneas que dentre outros fatores, impõem efeitos significativos sobre as propriedades de porosidade e hidrológicas do solo dessas áreas de montículos.

Outra hipótese considera a ocorrência de processos erosivos bastante particulares capazes de constituir a microtopografia típica dos ‘campos de murundus’. (ARAÚJO NETO, 1986). Especificamente, essa hipótese propõe que os locais onde foram formados os ‘campos de murundus’ eram savanas ou cerrados típicos, porém não demonstram as mesmas feições resultantes dos processos intempéricos, em função da vegetação tolerante à inundação que persistiu nessas áreas circulares (DONOVAN et al., 2001; MAYLE et al., 2007).

Nesse sentido, alguns trabalhos consideram os campos de murundus no Planalto Central do Brasil como resquícios de uma superfície primitiva, que sofreu processos físico-químicos erosivos na parte inferior das encostas, porém sem alcançar por completo as áreas circulares, devido à resistência oferecida pelas térmitas com a construção e manutenção de ninhos ou montículos. Portanto, atribui-se a essas áreas, a ocorrência de um processo diferenciado de erosão, tanto pela baixa capacidade de infiltração, quanto pelas restrições ao escoamento superficial. (FURLEY; RATTER; SOIL, 1988).

Entretanto, as hipóteses não são excludentes, especialmente no que diz respeito à presença de cupins e suas atividades em terrenos ligeiramente inclinados, bem como a sua capacidade de contribuir decisivamente na caracterização dessas feições morfológicas bastante particulares nas áreas de Cerrado. Aliás, os dois modelos hipotéticos de formação desses montículos propõem que cada uma dessas atividades isoladamente seria responsável por atribuir características químicas, físicas e biológicas distintas.

Nesse ponto, o trabalho de Silva et al. (2008) argumenta que, se a origem desses murundus estiver relacionada à atividade de térmitas, considerando a área circundada de pastagens, seria refletida na matéria orgânica do solo, com uma feição típica de C₄ em profundidade, abaixo dos montículos. Porém, o argumento dos autores sugere que se não forem considerados os aspectos intempéricos, seriam observadas ‘assinaturas’ de C mais

estáveis, semelhante ao histórico da área e persistiria em camadas subsuperficiais. (MARTINELLI et al., 1996; SILVA et al., 2008).

Um outro traço de origem dos murundus diz respeito às propriedades químicas de cátions e ânions no solo, incluindo o carbono orgânico. Neste caso, se houvesse indícios de origem em detrimento à atividade orgânica, haveria resposta no mesmo sentido, dos níveis de macroelementos no solo. No entanto essas condições poderiam ser transitórias, devido à mobilidade da maioria desses elementos na solução do solo. (SILVA; HARIDASAN; HOFFMANN, 2010), e as características das atividades de térmitas ou a bioturbação. (PÄRTEL; LAANISTO; WILSON, 2008; SCHWIEDE; DUIJNISVELD; BOTTCHE, 2005).

Em trabalho mais recente, Silva, Haridasan e Hoffmann (2010), avaliando a composição isotópica de murundus em áreas do Brasil Central e comparando com localidades de pastagem (C₄) e savana (C₃), observaram maior semelhança entre as características químicas dos montículos e a savana, em subsuperfície. Desse modo, para os autores a ação erosiva é preponderante à origem dos murundus, inclusive se considerar ainda, os traços florísticos remanescentes dessas áreas.

Já para Midgley (2010), as diferenças texturais do solo entre os montículos e áreas intermontículos, poderiam resultar não só nos aspectos descritos como de uma ‘erosão diferencial’, como também, pelo menos em parte, em uma incorporação seletiva e gradual de partículas do solo mais finas por agentes biogênicos como cupins (FALL; BRAUMAN; CHOTTE, 2001; JOUQUET et al., 2002).

Portanto, quais fatores poderiam favorecer ou ainda restringir, o modelo de edificação de novas estruturas biogênicas na paisagem? Alguns autores argumentam que os fatores abióticos como o fogo, inundação e secagens sucessivas e os efeitos de bordas de

eventuais ilhas de vegetação, seriam oportunos para maior similaridade entre essas áreas de montículos e o Cerrado típico (BIRD; POUSAI, 1997; BOUTTON et al., 1998).

Poderiam ainda ser incluídos os possíveis teores de macroelementos no contexto da origem orgânica dos murundus, ratificando a hipótese erosiva, se a maioria desses elementos são amplamente móveis na solução do solo e, segundo Silva, Haridasan e Hoffmann (2010), os próprios perfis e suas distinções não podem ser conservadas? Quais outros indícios poderiam ser considerados como evidências que sustentem a dinâmica físico-química nos campos de murundus em função de traços ou semelhanças nos teores desses macroelementos?

Para Maduakor, Okere e Onyeaunuforo (1995), a atividade de térmitas condiciona valores mais elevados de pH, cálcio, magnésio, potássio, sódio, ferro, carbono orgânico e percentual de argila, areia e sedimentos, especialmente no topo dos montículos. A fertilidade dessas estruturas está associada prioritariamente às frações inorgânicas do solo do que com o carbono orgânico nos montes e nas áreas de entorno. O trabalho dos autores corrobora com as conclusões de Pomeroy (1983), acerca das atividades de térmitas em locais de ocorrência desses montículos no território de Uganda (África), especialmente quanto aos teores desses macroelementos e taxas de variações.

O trabalho de Smith e Yeaton (1998) conduzido em um ambiente de transição para o semiárido na África do Sul, distingue os solos em montículos erodidos por térmitas com elevadas concentrações de Mg, Ca, N, P, e o total de cátions trocáveis (CTC), do que aqueles que circundam às margens erodidas, ou ainda os montículos inativos. Algumas espécies vegetais, como a presença de *Themeda triandra*, são tratadas como indicadores de fertilidade desses montículos erodidos ou em atividade.

Nesse ponto, o trabalho conduzido por Sileshi et al. (2010), avaliou evidências sobre o papel exercido por cupins na heterogeneidade da vegetação nas savanas africanas, e ainda, os mecanismos dessa atividade, utilizando-se da meta-análise. Os resultados obtidos permitem

concluir que de fato, os cupins induzem a heterogeneidade da vegetação savânica direta ou indiretamente através de suas atividades de construção de ninhos e forrageamento, associada à ciclagem de nutrientes e sua interação com os herbívoros mamíferos e fogo. Os autores utilizam o termo “ilhas de fertilidade” referindo-se à capacidade de cupinzeiros em transitar e concentrar nessas áreas circulares e em montículos, teores elevados de argila, carbono orgânico, nitrogênio total, cálcio, potássio, e magnésio, em relação ao solo circundante dessas áreas.

Em trabalho mais recente, Davies, Baldeck e Asner (2015), observaram, após o mapeamento de cerca de 9894 cupinzeiros e quase 700 espécimes em áreas de savanas africanas, que compunham 15 espécies distribuídas em duas paisagens em contraste com regime de chuvas determinados por espectroscopia de imageamento dos dados atmosféricos, diferenças significativas na densidade de espécies e composição das comunidades vegetais em função da distância de cupinzeiros. Para os autores, as áreas de maior adensamento de cupinzeiros e sob condições de maior precipitação anual, observou-se maior concentração de certas espécies vegetais, típicas de baixa altitude e prediletas à fertilidade do solo.

Na mesma linha de trabalho, Gosling et al. (2012), atribuem a atividade de térmitas em ambientes savânicos à mobilidade de nutrientes e ajustes nos teores desses elementos ao longo do perfil do solo, em função do tipo de atividade erosiva exercida por determinado gênero de cupins, estratégia de alimentação e o modelo de montículo construído. Os autores discutem inclusive, a interferência desse conjunto de variáveis e das atividades de térmitas propriamente ditas, nas alterações dos teores observados de macroelementos em solos circundantes às áreas de montículos e na formação de ‘mosaicos’ ao longo da paisagem.

De modo similar, Semhi et al., (2008), avaliaram os impactos da atividade de térmitas no ambiente do solo observando o comportamento de elementos-traço. Os autores encontraram respostas bastante significativas de aumento dos teores de cálcio, magnésio,

potássio, sódio, ferro, nesses montículos em relação às proximidades. Além disso, a pesquisa aborda a forma solúvel ou de fácil dissolução de parte desses elementos (H_2O ou HCl) ou para Ca e Mn, os processos de precipitação de carbonatos e fosfatos.

Portanto, as atividades dos térmitas associadas às dinâmicas pedogenéticas da paisagem são determinantes para a constituição físico-química do solos e montículos, na variação dos teores dos elementos e óxidos em função dos estratos de profundidade, a caracterização da vegetação e a manutenção da biodiversidade nas áreas de murundus.

1.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DOS CONSTITUINTES GEOQUÍMICOS DO SOLO

Os estudos geomorfológicos, em suma, consideram uma grande diversidade de atributos e interações de fatores do meio ambiente, em uma escala temporal e que determinam um conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Tais impressões resultantes de um encadeamento de processos naturais amplamente dinâmicos, associados aos mecanismos de formação e destruição do material original propõe uma complexa constituição geofísico-química na paisagem.

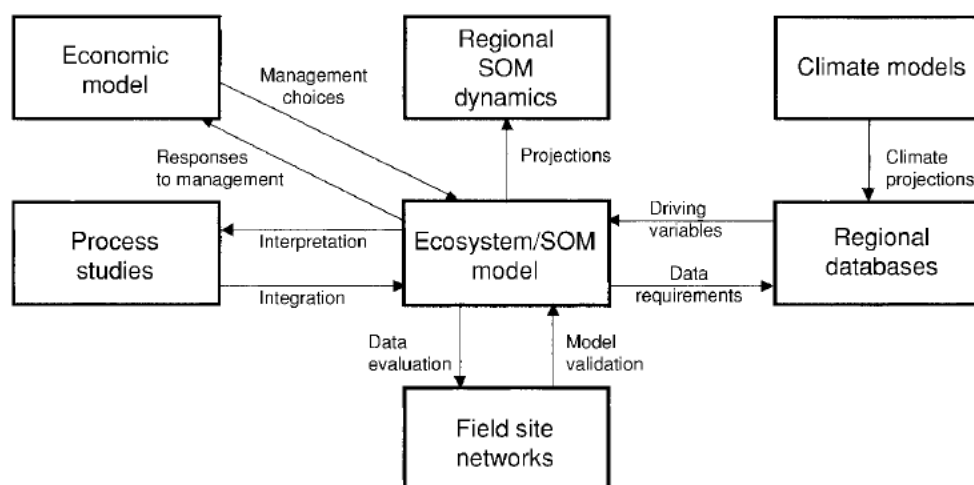
Grande parte dos estudos científicos exige por definição, uma enorme variedade de fontes de coletas e detecções amostrais para que seja possível qualificar as inferências sobre um determinado campo de estudo e produzir estimativas confiáveis em torno das medições, a partir de um modelo com menor erro marginal. (TAYLOR, 2010). Em suma, o modelo matemático é constituído de uma ou mais equações (ou inequações), com a finalidade de representar o comportamento de sistemas ou fenômenos naturais e, portanto, considerados indispensáveis para a expressão do conhecimento científico, possibilitando novas análises, contestação ou afirmação de dogmas e o desenvolvimento de sistemas para apoio à tomada de decisão. (TEDESCHI, 2006).

Especificamente para o contexto de um conjunto de variáveis espaciais, um modelo de resposta que seja capaz de incorporar possíveis integrações e diagnósticos entre cada uma delas (caracteres climáticos, solo, vegetação, uso e ocupação do solo), deve propiciar igualmente, extensa possibilidade de interpretação e inferências sobre a dinâmica local.

A perspectiva da modelagem com intuito de se compreender o comportamento de variáveis locais na dinâmica da matéria orgânica do solo, sob o ponto de vista regional é bem ilustrado na Figura 1. Logicamente, o modelo pode ser desenvolvido considerando a resolução espacial e temporal, na medida em que as variáveis de entrada influenciem a resposta e as projeções de saída do sistema. Um sistema monitorado a longo prazo, tem maior capacidade de validação das respostas, comparando-se realizado *versus* ajustado.

Outro tópico demonstrado na Figura 1 diz respeito às possibilidades de abordagens e robustez do modelo matemático frente à capacidade de interação entre as variáveis. Para Elliot e Cole, (1989) é preciso enfatizar a extrapolação das análises locais para uma escala regional, ampliando a compreensão e elucidação de processos internos muito complexos.

Figura 1 - Modelo estrutural e fatores regionais incidentes para avaliação conjuntural da dinâmica de matéria orgânica do solo.



Fonte: Paustian et al. (2001)

Os modelos climáticos e aqueles de caráter econômico, descritos na Figura 1 decorrem um efeito exógeno à dinâmica da matéria orgânica e do ecossistema local e têm sido amplamente inseridos no contexto de pesquisas ambientais recentes propiciando uma compreensão multidisciplinar acerca do tema. (SCHIMEL et al., 2000; CUTTER et al., 2008; ROCKSTRÖM et al., 2009; FOLKE et al., 2011). Nos termos de um modelo matemático, a descrição empírica dessas relações a partir de um conjunto de variáveis representativas, pode indicar prováveis efeitos de políticas econômicas adotadas, quanto ao manejo, gestão e uso do solo e água, e de que modo essas possíveis influências determinam o comportamento do ecossistema e ainda, a capacidade de *feedback* ao modelo econômico adotado (ELLIOTT; COLE, 1989; PAUSTIAN et al., 1995; POWLSON, 1996).

Nesse sentido, pode-se ainda extrapolar as análises econômico-ambientais em um sentido choque-impacto, avaliando-se o potencial resultado das políticas de mitigação de gases de efeito estufa, inclusive aqueles derivados do solo, em função de mudanças estruturais no ambiente e as recentes e contínuas dinâmicas biogeoquímicas impostas sobre o ambiente. Reiterando, para Paustian et al. (2001) a modelagem do sistema ambiental por si só, não propõe uma referência à sua capacidade de compreensão. É necessária a compreensão do todo, da conexão do sistema regional e de diversos modelos que propiciem uma integração das diversas variáveis, dentro de um mesmo modelo e entre modelos diferentes.

Nesses termos, outra prerrogativa de interesse para o delineamento e emprego da modelagem matemática para esse fim, pauta-se na capacidade de se avaliar o comportamento de um sistema, seja ele de qualquer natureza, de modo a permitir a compreensão das respostas a estímulos externos, projeções futuras, dinâmicas e situações atípicas. Para Elliot, Paustian e Frey (1996) e Arah e Gaunt (2001) o caráter analítico-decisório do modelo frente a um determinado fenômeno em estudo, do mesmo modo, independentemente de sua natureza,

permite a identificação de estratégias de ação mais promissoras por meio de técnicas de análises de sensibilidade, avaliação de cenários e otimização.

Porém, o planejamento de modelos que incorporem a complexidade da realidade observada no ambiente e se prestem genericamente à replicação do comportamento do sistema natural é impraticável. Assim, os modelos matemáticos sugerem restritivamente aspectos essenciais do sistema em função de um objetivo definido. Além disso, o desenvolvimento de modelos e sua capacidade preditiva são limitados pela disponibilidade de dados para sua parametrização, validação ou aplicação à partir dos dados de entrada disponíveis. (CHRISTENSEN, 1996).

Portanto, o processo de modelagem compreende uma série de etapas, que se iniciam na proposta dos objetivos e delimitação do escopo do modelo e abrangem as definições de variáveis, a composição do raciocínio matemático de representação e a escolha dos conjuntos de dados apropriados para sua parametrização. A simulação, a partir de métodos numéricos, propõe soluções analíticas, que se aproximam à realidade de respostas diante de um problema. (ELLIOT; PAUSTIAN; FREY, 1996).

Estimativas obtidas por observações diretas com metodologia adequada são obviamente mais confiáveis que aquelas provenientes de modelos matemáticos. Isso porque são a referência para a parametrização (ajuste) e a avaliação dos modelos. Entretanto, modelos matemáticos podem ampliar o uso das informações obtidas experimentalmente e sua abrangência, a um custo mais baixo e tempo mais curto que a experimentação. (CHRISTENSEN, 1996).

Em geral, os modelos matemáticos são desenvolvidos a partir de duas abordagens básicas, tal como a observação direta de variáveis de interesse associadas ao comportamento do sistema, ou ainda a sistematização dos processos internos e suas interações, de modo a gerar o comportamento mecanicista e assim serem explicitados.

Na primeira proposta, denominada empírica, as análises estatísticas a partir dessas observações podem evidenciar as relações entre si de modo que a partir da determinação de valores de algumas delas (preditoras) estima-se o valor de outra variável de interesse (resposta). Nesse caso, não é explicitado o mecanismo causal pelo qual uma variável interfere na resposta do sistema. Os modelos de máxima verossimilhança com informação limitada, os modelos generalizados de momentos e outros modelos lineares (ANOVA) e de variável limitada são ditos usualmente aplicados a um conjunto de observações com interesse preditivo ou causal. Nos trabalhos de Riedo et al. (1998), Paustian et al. (2001), Gibbons, Ramsden e Blake, (2006), alguns desses modelos são tratados como possibilidades analíticas para sistemas de emissão de CO₂, fluxos de carbono e energia e dinâmica de matéria orgânica no solo *versus* mudanças climáticas globais.

Na segunda abordagem, denominada mecanicista, o sistema é decomposto em seus principais componentes e fluxos internos a partir do conhecimento sobre seu funcionamento. Os fluxos e interações entre os processos são modelados individualmente, inclusive empiricamente e, a saída desses modelos é obtida a partir da simulação dos processos e da interação entre eles.

Como há empecilho quanto à medição direta, as críticas quanto à saída de dados nessa proposta de modelamento são bem direcionadas à estrutura do sistema e à construção empírica dos fluxos e interações para eventuais simulações. Os trabalhos de Arah e Gaunt (2001), Gaunt et al. (2001), Magid, Gorissen e Giller, (1995), Elliot, Paustian e Frey, (1996); Christensen (1996), referenciam essa abordagem de modelamento, com interesse na contabilização da capacidade de armazenamento de carbono em sistemas naturais.

Apesar do interesse simulatório de grande parte dos modelos matemáticos, há de se ressaltar a possibilidade exploratória do agrupamento de dados. As análises descritivas são

peça-chave na elucidação da variância e erro-padrão dos dados coletados, porém sem maiores condições de inferência ou diagnóstico do conjunto de informações.

Nesse ponto, dado o caráter multivariado dos dados provenientes dos estudos voltados ao modelamento de sistemas ambientais (solo, clima, antropização dentre outras) o emprego dos métodos multivariados em consonância aos modelos lineares ou baseados na análise univariada dos dados é bastante interessante e resolutivo quanto à inferência acerca do conjunto de dados. Para Cruz-Castillo et al. (1994), a capacidade de resposta, interações entre os fatores considerados e descrição dos modelos estatísticos multivariados são bastante assertivos nos modelamentos ambientais.

Entretanto, conforme destacam Hair et al. (2009), é razoável que sejam plenamente compreendidas as relações existentes entre as variáveis da pesquisa. Havendo diversas variáveis dependentes em uma única relação, opta-se pela análise de correlação canônica, enquanto que, em condições de apenas uma variável dependente em uma única relação, pode-se propor modelagem de regressão múltipla, em observações métricas.

Para os mesmos autores, a seleção de técnicas multivariadas, seguindo-se esta mesma descrição, compreende a suposição de que há interdependência nas relações entre as variáveis da pesquisa. Nesses casos, tanto para o conjunto de variáveis (análise fatorial) quanto para ocorrência de casos ou respondentes (análise de agrupamentos), permite-se o emprego da análise multivariada.

Tecnicamente, a análise multivariada é constituída por um conjunto de métodos que podem ser utilizados quando variadas medições são feitas em cada indivíduo ou objeto em uma ou mais amostras. Tais medições são compreendidas no modelo, como variáveis e os indivíduos ou objetos como unidades (unidades de investigação, unidades de amostragem, ou unidades experimentais) ou observações. (RENCER; SCHAALJE, 2008).

A análise de variância multivariada (MANOVA - *multivariate analysis of variance*) é uma técnica relevante para a derivação de inferências quanto à variação de um conjunto de variáveis-respostas entre dois ou mais tratamentos, havendo algum nível de dependência. Morrison (1976), argumenta que a análise multivariada tem como objetivo principal o resumo de um conjunto de variáveis, considerando a variância do conjunto de dados, principalmente escalas não-métricas da variável preditora.

Entretanto, mais de uma variável-resposta pode ser observada em cada unidade experimental e, cada uma tem origem no mesmo delineamento experimental. Desse modo, nos modelos multivariados, considera-se a dependência entre as variáveis-respostas (covariância), fato que nos modelos univariados não é contemplado. A utilização de apenas uma variável pode ser uma simplificação pouco proveitosa, não evidenciando de forma adequada as verdadeiras causas de variações intrínsecas aos dados do estudo, além de desconsiderar em um modelo robusto, a informação de covariabilidade entre as variáveis. (BARCIKOWSKI, 1981).

Apesar de MANOVA e as técnicas univariadas (ANOVA) serem empregadas para avaliar a significância estatística das diferenças entre grupos formados, em ANOVA a hipótese nula testada diz respeito à igualdade das médias da variável dependente entre dos grupos. Já com as técnicas multivariadas (MANOVA), a hipótese nula testada é a igualdade das médias vetoriais das variáveis dependentes múltiplas entre os grupos. ((HAIR et al., 2009).

Também em MANOVA, a variável dependente combina de modo bastante otimizado estatisticamente, as medições múltiplas em um único valor, ao contrário de maximizar diferenças ao longo dos diferentes grupos. É possível ainda nesse procedimento, conforme destacam Hair et al. (2009), elaborar gráficos bidimensionais e avaliar as diferenças entre

vetores de resposta, tornando uma única avaliação recorrente para um conjunto extenso de variáveis a serem agrupadas.

Dentre as técnicas multivariadas, a análise de agrupamento é amplamente utilizada em diversas finalidades exploratórias. Ela tem por princípio reunir, ou organizar por algum critério de classificação, as unidades amostrais em grupos, de tal forma que exista homogeneidade dentro do grupo e heterogeneidade entre grupos (JOHNSON; WICHERN, 1992; CRUZ; REGAZZI, 1994).

As técnicas de agrupamento podem ser classificadas em hierárquicas e não hierárquicas. (CORMACK, 1971). A técnica hierárquica consiste em uma série de procedimentos sucessivos de agrupamentos e organização sistemática de elementos, em que são agregados ou desagregados. Já a técnica não hierárquica propõe agrupar elementos em K grupos, em que K é a quantidade de grupos definida previamente. (SIEGMUND; LAIRD; LAIRD-OFFRINGA, 2004).

Ainda segundo Siegmund, Laird e Laird-Offringa (2004), as técnicas hierárquicas envolvem duas etapas. A primeira se refere à estimação de uma medida de similaridade ou dissimilaridade entre os indivíduos e, a segunda, à adoção de uma técnica de formação de grupos. (SANT'ANNA; MALINOVSKI, 2002). Quanto ao número de medidas de similaridade, conforme Bussab, Miazaki e Andrade (1990), há diversas propostas e empregos em análise de agrupamento, optando-se quase sempre pela preferência, experiência e, ou, a conveniência do pesquisador.

Baseando-se na medida de dissimilaridade empregada, espera-se que seja adotada uma técnica de agrupamento que atenda os interesses e propósitos da pesquisa para formação dos grupos. (SOUZA; FERREIRA; XAVIER, 1997). Vários autores ressaltam o caráter decisório independente na condução de um modelo multivariado, como o que requer o conhecimento das propriedades dos diversos algoritmos à disposição e que podem representar

diferentes agrupamentos (GOWER; LEGENDRE, 1986; DUARTE; SANTOS; MELO, 1999). Além disso, os autores destacam que o resultado dos agrupamentos pode ser influenciado pela escolha da medida de dissimilaridade, e consequentemente pela definição do número de grupos.

Entretanto, a similaridade entre as variáveis depende da escala e das unidades em que são expressas (DOLLON; GOLDSTEIN, 1984), e, portanto, devem ser padronizadas antes de serem operadas. Para que se evitem os erros devidos às escalas e unidades das variáveis selecionadas, entende-se que os escores devem ser normalizados para o padrão Z ($\mu = 0$; $\sigma = 1$).

A similaridade entre os atributos investigados em um modelo multivariado pode ser estimada por meio da distância Euclidiana, *city-block* ou Mahalanobis, sendo o primeiro mais usual e assim descrito, conforme Hair et al. (2009):

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{h=1}^p (x_{hi} - x_{hj})^2}, h = 1, 2, \dots, p \quad (1)$$

sendo, d é a distância euclidiana; x_i e x_j os indivíduos representativos de cada variável.

Quanto aos agrupamentos, a definição dos agregados pode ser obtida empregando-se mais comumente o algoritmo de Ward (HAIR et al., 2009). Esse método tende a combinar agrupamentos com um pequeno número de observações e bastantes homogêneos. A medida de homogeneidade utilizada baseia-se na partição da soma de quadrados totais de uma análise de variância, tal como descrito a seguir:

$$d_{ij}^2 = (\bar{x}_i - \bar{x}_j)^2 \quad (2)$$

sendo, d_{ij}^2 é a distância entre as médias das classes.

Em geral, para esses autores, o ponto de corte para definição dos grupos similares deve ser realizado na primeira grande diferença entre os coeficientes de aglomeração (CA), obtido pela Equação 1, partindo-se do princípio de que aumentos repentinos no valor do coeficiente de aglomeração representam fusão de elementos diferentes, aparecendo no dendrograma como maiores distâncias. (DILLON; GOLDSTEIN, 1984).

$$CA = \sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}^2 - \frac{1}{n_j} (\sum_{i=1}^{n_j} X_{ij})^2) \quad (3)$$

na qual: CA é o coeficiente de aglomeração; X_{ij} é o valor da amostra i individual em cada grupo j ; K é o total de amostras em cada estágio; n_j é o número de amostras do grupo.

Em suma, a análise de agrupamentos permite a consolidação de um método empírico e objetivo no sentido de relacionar e classificar variáveis de interesse na pesquisa. Além disso, com base nas características dos próprios agrupamentos, similaridade das variáveis e distâncias entre os grupos é possível distinguir e inferir determinado padrão de comportamento do conjunto de variáveis no ambiente de estudo.

1.2.1 Análise Discriminante e Composição do Cluster

A análise discriminante é uma técnica estatística adequada para os tipos de problemas em que a variável dependente é composta por dois ou mais grupos, como sugere uma classificação de tratamentos diferentes. Para Hair et al. (2009) esse procedimento envolve a determinação de variáveis estatísticas e a combinação linear entre duas ou mais variáveis independentes que melhor discriminam os grupos definidos *a priori*.

Em outras palavras, conforme Mingoti (2013), pode ser definida como uma técnica empregada na classificação de elementos de uma amostra ou uma população, e, assim como nos modelos não hierárquicos, é necessário que os grupos estejam predefinidos, procedimento que permite a elaboração de uma função matemática.

A discriminação é obtida estabelecendo os *scores* da variável estatística para cada variável, a fim de maximizar a variância entre grupos em relação às variâncias observadas dentro de um mesmo grupo. A análise discriminante linear para uma combinação, também conhecida como a função discriminante é determinada pela equação 4:

$$Z_{jk} = \alpha + W_1X_{1k} + W_2X_{2k} + \dots + W_iX_{ik}, \quad (4)$$

onde, Z_{jk} é o discriminante *Z-score* (vetor) da função discriminante j para o objeto k ; α é o intercepto; W_i é o peso determinado para a variável discriminante independente i ; X_{ik} variável independente i para o objeto k .

Portanto, a análise discriminante pode ser compreendida como sendo um procedimento estatístico adequado para testar a hipótese de que as médias observadas em um conjunto de variáveis independentes para dois ou mais grupos não diferem entre si. E desse modo, a análise discriminante multiplica cada variável independente pelo seu peso correspondente e adiciona ambos os produtos obtidos. O resultado é um vetor discriminante *Z-score* para cada indivíduo na análise e, o valor médio assumido pelos grupos (centroide), calculando a média entre os escores discriminantes para todos os indivíduos de um mesmo grupo.

O teste de significância estatística para a função discriminante é uma medida generalizada da distância entre os centros dos grupos, calculada para que seja possível comparar as distribuições dos *scores* discriminantes para os grupos (*cluster*). Se a sobreposição nas distribuições é pequena, a função discriminante separa cada *cluster* de modo bastante compreensível. Entretanto, caso haja uma grande sobreposição, entende-se que a função discriminante explica pouco o comportamento de cada *cluster*, a partir das médias calculadas. (HAIR et al., 2009). Nesse ponto, segundo Mingoti (2013), o *Teste de F multivariado* permite uma análise da qualidade do ajuste da função discriminante, obtidas as comparações pelo Teste de Hotelling, definido por:

$$F = \frac{(n_1+n_2+\dots+n_g)-p-1}{p(n_1+n_2+\dots+n_g)} * T^2 \quad (5)$$

sendo que,

$$T^2 = \frac{(n_1 n_2 \dots n_g) - p - 1}{n_1 + n_2 + \dots + n_g} (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 - \dots - \bar{Y}_g) \quad (5.1)$$

em que p representa o número de variáveis e \bar{Y}_1 o g -ésimo *score* da função discriminante, quando aplicada aos vetores de médias amostrais do *cluster* g . De acordo com Mingoti (2013), essa função possui distribuição de F; e graus de liberdade e nível de significância fixo.

1.2.2 Modelo de Regressão Linear

Comumente, em diversas áreas de estudo e pesquisa, pretende-se compreender relações causais e estabelecer parâmetros entre um conjunto de variáveis selecionadas em um determinado local ou ambiente. Em conteúdos relacionados à epidemiologia, econometria e

sociologia, vários modelos estatísticos são amplamente empregados, especialmente quando experimentos controlados não são viáveis. (CAMERON; TRIVEDI, 2005).

Em modelo de regressão, por exemplo, a variável de interesse da pesquisa (que deve direcionar a capacidade responsiva do modelo) descrita como dependente pode ser influenciada por variáveis quantitativas e qualitativas. As variáveis quantitativas são facilmente mensuradas em alguma escala o que não ocorre com as variáveis qualitativas, uma vez que essas indicam a presença ou a ausência de uma qualidade ou atributo.

Portanto, um modelo estatístico teórico consiste minimamente dos componentes: resposta, erro, parâmetros e a descrição sistemática. Conforme Schabenberguer e Pierce (2002), grande parte dos modelos causais pode ser representado pela expressão: “*Resposta = Estrutura + Erro*”, sendo “*Resposta*” a medida de interesse a ser estimada, geralmente representada por “*Y*”; a “*Estrutura*” que se refere ao aspecto sistemático de parâmetros do modelo, chamada de função média; e o “*Erro*” diz respeito à diferença entre a função média e as observações.

Significa de outro modo, descrever o mesmo raciocínio, com a seguinte notação matemática, destacando-se os aspectos funcionais, como:

$$y_{ki} = f(x_{0i}, x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p) + \varepsilon_{ki}, \quad (6)$$

em que, $x_{0i}; x_{1i}; x_{2i} \dots, x_{ki}$ são as “variáveis medidas”, $\theta_0; \theta_1; \theta_3 \dots, \theta_p$ são os parâmetros representando o aspecto sistemático, y_{ki} é a variável resposta e ε_{ki} é o erro sistemático. Assume-se que as variâncias dos erros apresentem média zero, ou seja, $E[\varepsilon_{ki}] = 0$.

Em um modelo de regressão múltipla o interesse é prever a variável dependente ou variável resposta Y , baseando-se na hipótese de que ela assume uma relação linear com as

variáveis independentes ou preditoras x_1, x_2, \dots, x_k . Essa regressão linear pode ser expressa para um modelo com n observações, por:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (6.1)$$

em que, $\beta_0, \beta_1, \beta_2 \dots \beta_k$, são os parâmetros estimadores e ε_i representa os caracteres aleatórios, ou não incluídos no modelo. Para cada uma das n observações da pesquisa, têm-se as equações:

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \dots + \beta_k x_{1k} + \varepsilon_1 \quad (6.2)$$

$$y_2 = \beta_0 + \beta_1 x_{21} + \beta_2 x_{22} + \dots + \beta_k x_{2k} + \varepsilon_2 \quad (6.3)$$

.

.

.

$$y_n = \beta_0 + \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots + \beta_k x_{nk} + \varepsilon_n \quad (6.4)$$

que, por sua vez, podem ser descritas na forma matricial, tal como:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & x_{nk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

ou ainda, $y = X\beta + \varepsilon$, em que, y é um vetor de realizações de variáveis aleatórias, da dimensão $n \times 1$; X é a matriz conhecida com os valores x'_s do do delineamento, da dimensão $n \times (k + 1)$; β é o vetor dos parâmetros, de dimensão $(k + 1) \times 1$; e ε é o vetor dos erros $(k + 1) \times 1$.

Quanto aos erros de estimativas das observações, de acordo com Rencher e Schaalje (2008), as pressuposições básicas de ocorrência desse componente são de:

$$E(e_i) = 0 \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \text{ ou } E(y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik}; \quad (7)$$

$$\text{var}(\varepsilon_i) = \sigma^2 \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \text{ ou } \text{var}(y_i) = \sigma^2; \quad (7.1)$$

$$\text{cov}(e_i, e_j) = 0 \text{ para todo } i \neq j \text{ ou } \text{cov}(y_i y_j) = 0. \quad (7.2)$$

ou ainda, de modo descritivo linear, $E(e) = 0$ ou $E(y) = X\beta$; e $\text{cov}(e) = \sigma^2 I$ ou $\text{cov}(y) = \sigma^2 I$.

Comparativamente, nos modelos de regressão linear múltipla, considera-se duas ou mais variáveis independentes ou explicativas (x_1 e x_2). O termo linear é usado pois trata-se de uma função linear de parâmetros desconhecidos $\beta_0, \beta_1, \beta_2$, denominados coeficientes da regressão. Portanto, considera-se a especificação genérica para um modelo de dados do tipo:

$$y_i = \beta_{1i} x_{1i} + \beta_{2i} x_{2i} + \dots + \beta_{ki} x_{ki} + \varepsilon_i \quad (8)$$

em que β_i corresponde ao vetor ($k \times 1$) de parâmetros desconhecidos relativos ao ponto i e \mathbf{x}_i a matriz ($k \times 1$) de variáveis explicativas, sendo a primeira coluna no caso do termo independente, igual a 1 's.

1.2.3 Modelo Linear Generalizado (GLM)

Em determinados casos de modelagem aplicados a variáveis ambientais, quando se trabalha com diferentes medidas de um sistema ou ambiente específico, um dos obstáculos enfrentados é a existência de correlação entre elas, gerando distorções típicas de uma condição de multicolinearidade às equações estimadas. Como consequência, os estimadores

apresentam variâncias e covariâncias bastante elevadas, dificultando uma estimativa precisa e confiável.

Além disso, os intervalos de confiança tornam-se mais expressivos, implicando frequentemente à aceitação da hipótese nula de estimador igual a zero. Para remediar a multicolinearidade, conforme Gujarati (2000), as técnicas estatísticas multivariadas, como a análise fatorial, podem ser empregadas particularmente, quando há grande número de variáveis explicativas incluídas no modelo.

Esses prováveis inconvenientes encontrados especialmente em um conjunto de dados ou observações aleatórias são consistentes em delineamentos não equilibrados, ou seja, em condições em que não necessariamente haja um número idêntico de observações para todas as combinações possíveis dos níveis de fatores sugeridos no modelo. Além disso, em se tratando de múltiplas variáveis, há ainda a necessidade de se hierarquizar os termos das variáveis. (HSU, 1996).

Os modelos lineares generalizados (GLM), em suma, compreendem a essas prerrogativas, uma vez que permitem a interação e termos polinomiais, agrupados ou não agrupados e o erro aleatório fixado, tal como uma classe de modelos de regressão. Os fatores incluídos no modelo são preditores (variáveis independentes) que foram elegidas para variar sistematicamente em um plano de observações e coletas, para determinar o seu efeito sobre a variável resposta ou dependente. (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2002).

A proposta inicial de Nelder e Wedderburn (1972), traduz os modelos lineares generalizados como uma extensão dos modelos normais lineares. Para os autores, uma descrição geral do modelo envolve uma variável resposta univariada, variáveis explanatórias e uma amostra aleatória de n observações independentes. O entendimento empírico do modelo é de propor múltiplas opções para a distribuição da variável resposta (componente aleatório do

modelo), inclusive de compor maior flexibilidade para a relação funcional entre a média da variável resposta (μ) e o preditor linear (η).

Portanto, os modelos lineares generalizados permitem múltiplas considerações, seja entre os fatores de um mesmo delineamento experimental (ambiente) ou entre projetos experimentais diferentes. Essas possibilidades dependem do modelo experimental, unidades e/ou indivíduos avaliados, a atribuição de características ou tratamentos e a sequência de observações para essas mesmas unidades e/ou indivíduos (MONTGOMERY, 1991; BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2002).

Desse modo, os modelos lineares generalizados são empregados quando se tem uma única variável aleatória Y associada a um conjunto de variáveis explanatórias $x_1; \dots, x_p$. Para uma amostra de n observações $(y_i; x_i)$ em que $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})^T$ é o vetor coluna de variáveis explanatórias, o modelo compreende o componente aleatório, o componente sistemático e a função de ligação.

O componente aleatório é representado por um conjunto de variáveis aleatórias independentes Y_1, \dots, Y_n , provenientes de uma mesma família de distribuições (Normal, Poisson, Binomial, Binomial Negativa, Gama, Normal Inversa), assumindo médias μ_1, \dots, μ_n , assim descrito,

$$E(y_i) = \mu_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

sendo $\phi > 0$, um parâmetro de dispersão e o parâmetro θ_i denominado parâmetro canônico.

Tem-se, portanto, a função densidade de probabilidade dada por:

$$f(y_1; \theta_i, \phi) = \exp\{\theta^{-1}[y_1\theta_i - b(\theta_i)] + c(y_1, \phi)\}, i = 1, \dots, n \quad (10)$$

onde, $b(\theta_i)$ e $c(y_1, \phi)$ são funções conhecidas. Sabendo-se que $E(y_i) = \mu_i = b'(\theta_i)$ e $Var(Y_i) = \phi V_i$, em que $V_i = V(\mu_i) = d\mu_i/d\theta_i$, denomina-se função de variância e

dependente unicamente de μ_i (Cox & Hinkley, 1979). O parâmetro natural θ_i pode ser assim expresso:

$$\theta_i = \int V_i^{-1} d\mu_i = q(\mu_i), \quad (11)$$

sendo $q(\mu_i)$ uma função conhecida da média μ_i . Conhecida uma relação funcional para a função de variância $V(\mu)$, o parâmetro canônico é obtido à partir da equação (11) e com distribuição determinada na família exponencial descrita na equação (10).

O componente sistemático que abrange as variáveis explicativas é descrito à partir da soma linear de seus efeitos, conforme:

$$\eta_i = \sum_{r=1}^p x_{ir} \beta_r = x_i^T \beta \text{ ou } \eta = X\beta, \quad (12)$$

sendo $X = (x_1, \dots, x_n)^T$ a matriz do modelo, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p)^T$ o vetor de parâmetros e $\eta = (\eta_1, \dots, \eta_n)^T$ o preditor linear. Por fim, a função de ligação, que relaciona o componente aleatório (μ) ao preditor linear (η), ou seja,

$$[\eta_i = g(\mu_i)], \quad (13)$$

sendo $g(\mu_i)$ uma função monótona e diferenciável. (DEDEWICZ; MISHRA, 1988).

Teoricamente, a robustez e possibilidades interpretativas dos GLM's, são plenamente atingidas, quanto ao comportamento das variáveis, se forem dentre outros quesitos, definida de modo coerente $[g(\mu_i) = \theta_i]$ a função de ligação. (PAULA, 2013). Nesse caso, conforme Agresti (1992), o preditor linear modela diretamente o parâmetro canônico resultando em uma escala adequada para a modelagem com interpretação prática para os parâmetros de regressão, além de vantagens teóricas em termos da existência de um conjunto de estatísticas suficientes para os parâmetros e alguma simplificação no algoritmo de estimação.

Para McCullagh e Nelder (1991), embora as funções de ligação canônicas levem a propriedades estatísticas desejáveis para o modelo, principalmente no caso de amostras pequenas, não há nenhuma razão *a priori* para que os efeitos sistemáticos do modelo devam ser aditivos na escala dada por tais funções. Portanto, a definição dos termos do trinômio, distribuição da variável resposta, matriz do modelo e função de ligação é fundamental para a regularidade do modelo linear generalizado.

Nesses termos, um modelo linear generalizado é constituído por uma distribuição da família (conforme a equação 7), uma estrutura linear (equação 10) e uma função de ligação (equação 11). O aspecto “generalizado” diz respeito à distribuição mais ampla do que tão somente a normal, descrita no modelo clássico de regressão, obtido quando $\theta = \mu$ e a função de ligação é linear (identidade), para a variável resposta. Além disso, dá a conotação de uma função não-linear em um conjunto linear de parâmetros, ajustando a média da variável resposta com a parte determinística do modelo. (MCCULLAGH; NELDER, 1991).

A definição da distribuição (equação 7) é, de modo usual, pautada na natureza dos dados (discreta ou contínua) e considera o intervalo de variação (conjunto dos reais, reais positivos ou um intervalo como $(0,1)$). Na descrição da matriz do modelo $X=\{x_{ir}\}$ de dimensões $n \times p$ e por definição, de posto completo, x_{ir} pode representar a presença ou ausência de um nível de um fator classificado categorizado ou hierarquizado, ou ainda pode ser o valor de uma covariável quantitativa. A forma da matriz do modelo representa matematicamente o *design* experimental ou o plano de coletas aleatorizado. A opção da função de ligação considera particularmente a natureza do problema e, pelo menos em teoricamente, conforme descrito por McCullagh e Nelder (1991), cada observação pode incluir uma função de ligação diferente.

A função de ligação¹ deve ser escolhida de tal forma que $g(\mu_i) = \theta_i = \eta_i$, permitindo que o preditor linear modele diretamente o parâmetro canônico θ_i , caracterizando a função de ligação canônica (PAULA, 2004). Portanto, os modelos correspondentes são denominados canônicos. Isso implica necessariamente em uma escala coerente para a modelagem e interpretação prática e aplicável dos parâmetros de regressão, e conforme McCullagh e Nelder (1991), atribui vantagens teóricas de interesse em termos da existência de um conjunto de estatísticas suficientes para o vetor de parâmetros β e alguma simplificação no algoritmo de estimação. O modelo descritivo é $T = X^T Y$, com os componentes $T_r = \sum_{i=1}^n x_{ir} Y_i$, $r = 1, \dots, p$.

Para McCullagh e Nelder (1991) apesar das funções canônicas proporcionarem estatísticas desejáveis e convenientes para o modelo, principalmente no caso de amostras pequenas não há indícios de que os efeitos sistemáticos do modelo devam ser aditivos na proporção atribuída por tais funções. Conforme já descrito anteriormente, no caso do modelo clássico de regressão, a função de ligação é a própria identidade, pois o $\eta = \mu$. Essa função de ligação é adequada no sentido em que ambos os termos, η e μ , podem assumir valores na reta real, facilitando muito a compreensão das estimativas e a predição do modelo.

Entretanto, segundo os mesmos autores, certas restrições devem ser observadas quando a pesquisa trata de dados que seguem, por exemplo, a distribuição de Poisson em que $\mu > 0$ e, portanto, a função de ligação identidade não deve ser considerada, pois $\hat{\mu}$ pode assumir valores negativos na reta real, dependendo dos valores obtidos para $\hat{\beta}$. Além disso, dados de contagem dispostos em tabelas de contingência (que não deve ser o caso dessa pesquisa), supondo o caráter de independência, permitem necessariamente efeitos multiplicativos e que, podem ser linearizados à partir de uma função de ligação logarítmica, ou seja, $\eta = \log \mu$ e, portanto, $\mu = e^\eta$.

¹ As funções de ligação usuais, descritas em McCullagh e Nelder (1991), são: **potência** $\eta = \mu^\lambda$ em que λ é um número real, **logística** $\eta = \log[\mu/(m-\mu)]$, **probit** $\eta = \Phi^{-1}(\mu/m)$, sendo $\Phi^{-1}(\mu/m)$ a função de distribuição acumulada (f.d.a) da distribuição normal padrão, e **complemento log-log** $\eta = \log[-\log(1-\mu/m)]$, em que m é o número de ensaios ou observações independentes.

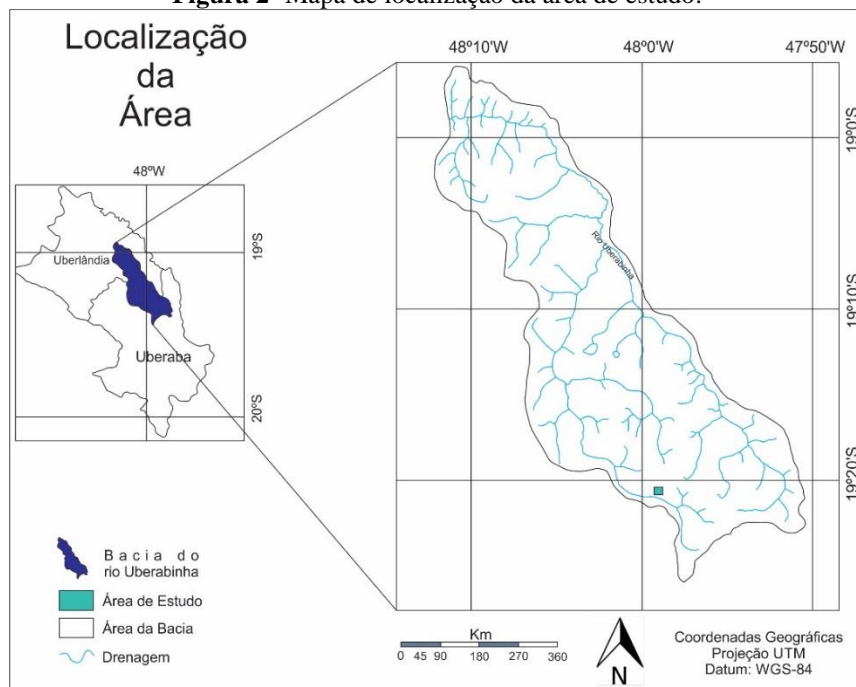
Apresentadas teoricamente as especificações dos modelos matemáticos e os procedimentos estatísticos que validam os resultados em cada um deles, serão inseridos no decorrer das etapas metodológicas, a construção técnica de cada modelo, considerando suas particularidades, o conjunto de variáveis escolhidas, os objetivos e interesses na proposta de modelagem e a confiabilidade dos resultados para eventuais discussões e ponderações.

CAPÍTULO II MÉTODO E TÉCNICA DE PESQUISA

2.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área selecionada para a abertura das trincheiras localiza-se na microbacia do Caroço, em uma área de campo de murundus preservados (Reserva Legal de uma propriedade particular) com algumas plantas exóticas como o capim gordura e alguns espécimes de *pinus*. Está situada na chapada sedimentar do Triângulo Mineiro (Figura 2), no município de Uberaba, inserida no contexto geológico do grupo de formação da Bacia Bauru, de caráter intracratônico, que abrange o centro-oeste de São Paulo, nordeste do Mato Grosso do Sul, sudeste do Mato Grosso, sul de Goiás e oeste de Minas Gerais. (BATEZELLI et al., 2003.).

Figura 2- Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Amendola, Coelho e Rosolen (2015).

O acesso à área de estudo é realizado partindo-se de Uberaba em direção a Uberlândia pela Rodovia BR 050, por estrada de terra, até as proximidades da área de exploração da mineradora IBAR.

As chapadas (superfícies de aplainamento) são traços fundamentais de paisagem do Brasil oriental e, no estado de Minas Gerais, encontram-se bem conservadas, exceto pelo desmantelamento de alguns remanescentes durante eventos denudacionais neoceno-zóicos mais agressivos. (VALADÃO, 2009). A Superfície Sul-Americana definida por King (1956), caracteriza-se como o estágio mais avançado de aplainamento, ao transgredir e truncar arcabouços litoestruturais bastante diversificados da região oriental do Brasil. Esta superfície foi produzida entre o Cretáceo e o Terciário Médio sobre diversas litologias e é revestida por manto de alteração profundo, geoquimicamente bastante evoluído e contendo teores elevados de ferro.

É comum a presença de encrostamentos lateríticos. Estas superfícies encontram-se muito dissecadas em suas bordas pela instalação da rede de drenagem atual. A vegetação original é composta pelo cerrado s.s. e campo cerrado. A ampla retirada da vegetação ocorreu pelo fato de estas terras estarem inseridas no processo de expansão da fronteira agrícola para o Cerrado. Atualmente o uso do solo predominante na região é o cultivo de milho e soja, algumas áreas com reflorestamento e mineração de argila refratária.

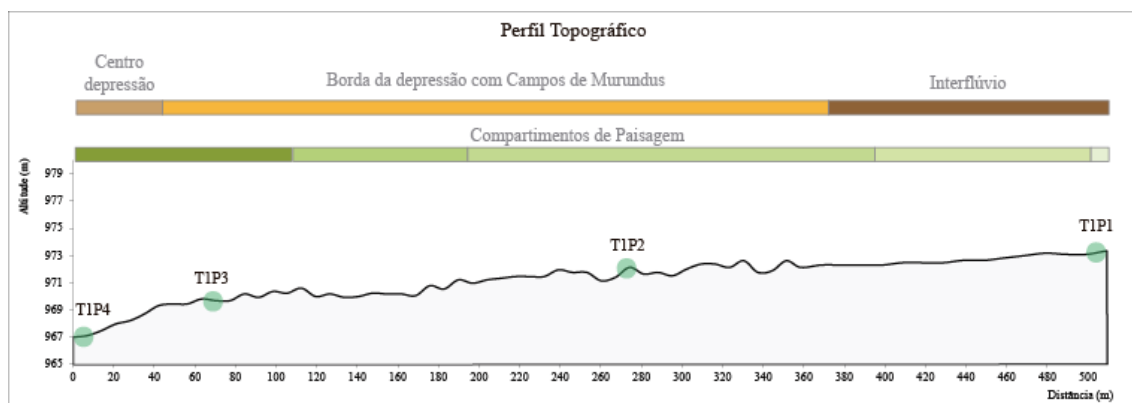
2.1.1 Caracterização Topográfica e Descrição dos Solos

Foram realizados dois trabalhos de campo, entre os dias 25 e 29 de setembro de 2014 e entre os dias 26 e 28 de março de 2015, para selecionar os locais de abertura das trincheiras,

construir o perfil topográfico e coletar amostras para análises químicas e físicas, indeformadas e orientadas para confecção de seções delgadas e polidas.

Com o intuito de se avaliar o desnível e o posicionamento das tradagens e trincheiras na catena, para descrição e coleta de amostras de solo, foi realizado um esboço do perfil topográfico. Foram abertas três trincheiras, complementadas com tradagens para atingir maiores profundidades, e realizada uma tradagem no centro da depressão topográfica hidromórfica (Figura 3).

Figura 3- Perfil topográfico do segmento da vertente envolvendo a depressão topográfica com solo Glei (T1P4 e T1P3), o campo de murundus (T1P2) e o Latossolo Amarelo à montante (T1P1).



Fonte: Nogueira (2015) (Inédito).

A Trincheira T1P1 está localizada à montante da vertente e corresponde ao perfil de solo com drenagem mais eficiente. Trata-se de um perfil de solo amarelo latossólico, argiloso, com fraca individualização de horizontes e recoberto com eucalipto (Figura 4).

Figura 4 - Trincheira T1P1 à montante da vertente.



Fonte: Projeto Fapesp (2014/01131-4).

- **Horizontes amarelados**

- **Horizonte A** (prof. 00-30 cm): argiloso, bruno- amarelado (10YR 5/4), maciça que se rompe em microagregados e localmente grumosa (~ 5mm de diâmetro) e mais coesa. Volumes amarelos (10YR 5/6) de aproximadamente 4-7 cm de diâmetro com volumes de argila bruno-amarelados muito compactos.
- **Horizonte B1** (prof. 30-125 cm): argiloso, bruno-amarelado (10YR 5/4), microagregado contendo grumos milimétricos endurecidos, poucos nódulos ferruginosos (cm) de coloração avermelhada, alguns mais vermelhos e endurecidos e outros apenas argilosos bruno amarelado (10YR 5/6). Matriz seca ao tato.
- **Horizonte B2** (prof. 125-150cm): argiloso, matriz bruno-amarelado (7,5YR 5/6), microagregado e forte pegajosidade.

- **Horizonte B3** (prof. 150-250 cm): argiloso, amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6) pálido com mosqueado vermelho-amarelado (5YR 5/8) ligeiramente mais vivo.

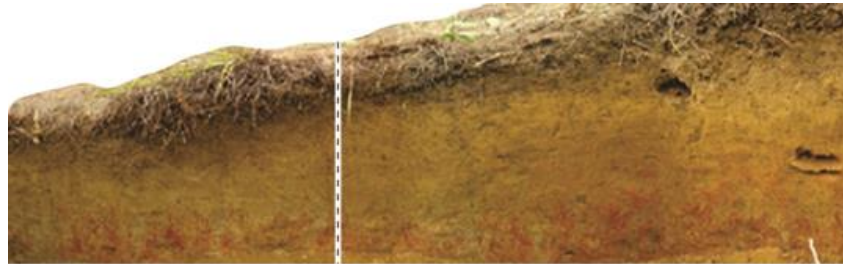
- **Horizontes plínticos**
 - **Horizonte BC1** (prof. 250-290 cm): argiloso, com volumes vermelho amarelado (5YR 5/8) dominante associado com matriz amarelo-avermelhada (7,5YR 6/6), maciço.
 - **Horizonte BC2** (prof. 290-480 cm): argiloso e pegajoso, com volumes vermelhos (2,5YR5/8) associado com igual proporção de volumes vermelho-amarelados (5YR5/8). Aumento dos volumes vermelhos a partir da prof. de 395 cm quando atinge o nível freático.

- **Horizontes manchados de alteração (tradagem)**
 - **Horizonte BC3** (Prof. 480-560cm): estrutura de saprolito fortemente pedogeneizado, com volumes vermelhos (2,5YR5/8) e amarelo-avermelhados (7,5YR 6/6) organizados em lentes, argilo-silto-arenoso a argilo-arenoso.

A trincheira T1P2 foi aberta no murundu e sua depressão adjacente. Considerando sua posição topográfica, representa o solo desenvolvido na transição entre os perfis com propriedades Gleis, que estão submetidos à maior influência da elevação do nível freático (no centro e periferia dentro da depressão topográfica) e o Latossolo Amarelo à montante (Figura 5). A vegetação de cobertura é composta por gramíneas nativas, arbustos e pequenas árvores que se desenvolvem apenas sobre o murundu enquanto na depressão que o circunda se

desenvolve apenas gramíneas do cerrado indicativo dos campos alagados do cerrado e, eventualmente, por exótica de antiga pastagem (capim gordura).

Figura 5 - Trincheira T1P2, aberta na transição entre o centro de um murundu e a depressão que o circunda.



Fonte: Projeto Fapesp (2014/01131-4).

- **Horizontes bruno-amarelado escuro:**

- **Horizonte A1** (prof. 0-10cm): argiloso, bruno muito escuro (10YR 3/3) com canais preenchidos com material bruno acinzentado escuro (10YR 4/2), estrutura grumosa com intensa atividade biológica, raízes de gramíneas (mm).
- **Horizonte A2** (prof. 10-28 cm): argiloso, estrutura grumosa, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/6 e 10YR 3/4), raízes grossas de até 1cm.

- **Horizontes bruno-amarelado a amarelo-brunado:**

- **Horizonte AB** (prof. 28-39 cm): argiloso, bruno-amarelado (10YR 5/6), estrutura grumosa, porosidade tubular antiga preenchida por material pedogeneizado bruno amarelado escuro (10YR 5/4 a 5/6) e preenchida por argila cinza escura.
- **Horizonte B1** (prof. 39-49 cm): transição gradual por leve clareamento da matriz pela diminuição da matéria orgânica, argiloso, bruno-amarelado (10YR 5/6), estrutura maciça que se desfaz em pequenos blocos (3 a 5 mm)

e microagregados. Estrutura grumosa no entorno e preenchendo porosidades, raízes de diâmetro superior (mm) às encontradas nos horizontes superiores.

- **Horizonte B2** (prof. 49-65 cm): argiloso, amarelo-brunado (10YR 5/6) a bruno-amarelado (10YR 6/6) com nódulos ferruginosos milimétricos (alguns amarelos). Mais seco e coeso, maciço a granular fraco, porosidade tubular preenchida com argila bruno acinzentado (10YR 5/2).

- **Horizontes plínticos vermelho e amarelo:**

- **Horizonte B3** (prof. 65-112 cm): topo dos horizontes plínticos associando volumes amarelo-brunados (10YR 6/6) e vermelhos (2,5YR 5/6) com muitos nódulos vermelhos mais escuros (10R 4/8). Aparecem volumes alongados verticalmente bruno-amarelado-claros (10YR 6/4). Porosidade tubular preenchida com argila bruno acinzentado (10YR 5/2), alguns com raízes. Argiloso a argilo-siltoso, maciço que se desfaz em microagregados. A transição para o horizonte superior ocorre com a diminuição do mosqueamento e permanência de nódulos que tornam-se, porém, menores. Aparecem pontuações amarelo-brunadas (10YR 6/6).

- **Horizontes manchados de alteração (tradagem)**

- **Horizonte BC1** (prof. 112-250 cm): argiloso, matriz amarelo-avermelhada pálida (7,5YR 6/6) com mosqueado vermelho-amarelado (5YR 5/8) ligeiramente mais vivo.
- **Horizonte BC2** (prof. 250-290 cm): argiloso, volumes vermelho-amarelados

(5YR 5/8) dominante associado com matriz amarelo avermelhado (7,5YR 6/6).

Seco ao tato.

- **Horizonte BC3** (prof. 290-480 cm): argiloso, volumes vermelhos (2,5YR5/8) associado com igual proporção de volumes vermelho-amarelados (5YR5/8), pegajoso. Aumento dos volumes vermelhos a partir da prof. de 395 cm quando atinge o nível freático.
- **Horizonte BC4** (prof. 480-560cm): saprolito fortemente pedogeneizado comportando volumes vermelhos (2,5YR5/8) e amarelo-avermelhados (7,5YR 6/6) organizados em lentes, argilo-silto-arenoso a argilo-arenoso.

A trincheira T1P3 foi aberta na borda interna da depressão topográfica, e apresenta nível freático aflorante durante o período chuvoso (Figura 6). A vegetação de cobertura é composta por gramíneas nativas e arbustivas do cerrado, com algumas exóticas (capim gordura e raros *pinus*).

Figura 6 - Trincheira T1P3 aberta na borda da depressão.



Fonte: Projeto Fapesp (2014/01131-4)

- **Horizontes superficiais bruno acinzentado:**

- **Horizonte O** (prof. 0-3cm): argiloso, grande quantidade de matéria orgânica, grumoso, muito poroso e muitas raízes finas.
- **Horizonte A1** (prof. 3-12cm): argiloso, bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2) com núcleos mais argilosos herdados do horizonte subjacente ou associado à atividade biológica. Granular com porosidade estrutural bem desenvolvida.
- **Horizonte A2** (prof. 12-29 cm): argiloso com ligeiro aumento de areia, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2) cortado por fraturas verticais. Muitas raízes finas, estruturas em pequenos blocos de 2 a 3 cm, poroso.

- **Horizontes cinza escuro:**

- **Horizonte B1** (prof. 12-61cm): matriz cinza escura (7.5YR 5/1) com pequenos volumes brancos. Argiloso e maciça, com desenvolvimento de pequenos blocos próximo às fraturas verticais. Nestes locais aparecem volumes e impregnações amarelo-brunados que se concentram próximo as fendas. Outro núcleo com estes mesmos volumes ocorre entre 33 e 69 cm, à esquerda da trincheira. Aumentam as raízes e os poros tubulares. A transição para o horizonte inferior é progressiva.
- **Horizonte B2** (prof. 61-81cm): matriz cinza (10YR 6/1), com volumes (cm) e inúmeras pontuações brancas (10YR 8/1) similares ao horizonte subjacente. Neste horizonte encontra-se os segmentos finais de fendas (de até 2 cm de largura) e apresentam domínios amarelos brunados (10YR 6/6) que impregnam as paredes dos poros. As fendas são parcialmente preenchidas com o material da superfície, indicando dinâmica atual. A porosidade nas zonas próximas das

fraturas é grande devido à existência de canais biológicos com estrutura levemente grumosa quando comparada com a estrutura maciça dos horizontes manchados e cinza. Argiloso.

- **Horizontes manchados plínticos:**

- **Horizonte Bg** (prof. 81-92 cm): horizonte com hidromorfia mais efetiva do que o conjunto de horizontes inferior, matriz cinza a cinza claro (10Y 6/1 a 10YR 7/1) com volumes vermelhos (10R 4/6) e vermelho mais escuro (10R 4/8) endurecidos. Ocorrem domínios acinzentados claros relacionados com redistribuição da matéria orgânica que possivelmente migra verticalmente a partir da superfície através de canais laterais e verticais. Argiloso a argilo-siltoso, maciço. A transição com o horizonte sobrejacente é abrupta relacionado principalmente com a cor que reflete impregnação da matriz cinza claro pela matéria orgânica.
- **Horizonte Bgp** (prof. 92-150cm): na base (150 a 92 cm) a plintita exibe volumes verticais vermelho escuro (10R 4/8) nodular, vermelho (10R 4/6) e amarelo-brunado (10YR 6/8) que transicionam para bruno muito pálido (10YR 8/2). Argiloso a argilo-siltoso, maciço com porosidade biológica preenchida por argila cinza. A transição deste conjunto de horizontes manchados para o horizonte com matriz cinza é difusa, caracterizada principalmente pela diminuição dos volumes vermelhos e amarelos.

- **Horizontes manchados de alteração (tradagem):**

- **Horizonte BC1** (prof. 150-210 cm): sequência de horizontes com volumes vermelho e bruno amarelado claro, argilo-siltoso.

- **Horizonte BC2** (prof. 210-450 cm): sequência de horizontes contendo volumes vermelho pálido e bruno amarelado claro, silto-argiloso.
- **Horizonte CB** (prof. 460 cm): rocha alterada comportando volumes vermelho (2,5YR 5/8), amarelo avermelhado (7,5YR 6/6) e bruno amarelado claro (10YR 6/4) organizados em lentes, argilo-arenoso a argilo-silto-arenoso.

O ponto T1P4 foi descrito por tradagem e está localizado no centro da depressão topográfica. Corresponde ao eixo topográfico com solo constantemente saturado pelas águas do freático e de precipitação. A vegetação é exclusivamente composta por gramíneas agrupadas em tufos que deixa parte da superfície do solo descoberta.

- **Horizontes superficiais ricos em matéria orgânica**

- **Horizonte O** (prof. 0-50 cm): matriz variando entre preto (7.5YR 2.5/1, úmida) e cinza (7.5YR 5/1, seca), amarelo brunado (10YR 6/6, úmida) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, seca), com abundantes manchas cinzento-escuro (7.5YR 4/1, seca) diferenciáveis apenas na amostra seca, e poucas manchas esbranquiçadas (10YR 8/1, seca e úmida) (cerca de 10mm de diâmetro), argilo-siltosa com os grãos de coloração esbranquiçada um pouco mais endurecidos e alguns volumes vermelhos (2.5YR 4/8, úmida). Consistência macia quando seca e friável quando úmida, ligeiramente plástico e não pegajoso. Muitas raízes finas pouco decompostas.

- **Horizonte branco desferruginizado com volumes vermelhos e amarelos**

- **Horizonte Bg1** (prof. 50-100 cm): matriz composta com volumes branco (10YR 8/1, úmida e seca), bruno-avermelhado-claro (2.5YR 6/4, úmida e 2.5YR 7/3, seca) e bruno-avermelhado-escuro (2.5YR 3/4, úmida) e vermelho

(2.5YR 5/6, seca) com algumas manchas amarelo brunado (10YR 6/6, úmida) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, seca). Argiloso a argilo-siltoso, consistência muito dura, ligeiramente pegajosa e não plástica. Poucas raízes decompostas. A transição para os horizontes orgânicos ocorre entre 50 – 90 cm de profundidade. Inicialmente a matriz apresenta coloração esbranquiçada (10YR 8/1, úmida e seca) com manchas bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida) e bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, seca). Para o topo a matriz torna-se mais bruno-amarelada (10YR 5/4, úmida) e bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, seca) com poucas manchas esbranquiçadas (10YR 8/1, úmida e seca), algumas concreções na mesma cor da matriz de consistência extremamente dura. Poucas raízes decompostas, consistência macia, não plástica, muito friável e textura argilo-siltosa.

- **Horizonte Bg2** (prof. 280-100 cm): matriz branca (10YR 8/1, úmida e seca) contendo volumes bruno-avermelhado-claro (2.5YR 6/4, úmida e seca) e bruno-avermelhado-escuro (2.5YR 3/4, úmida) e vermelho (2.5YR 5/6, seca). Argiloso a argilo-siltoso, consistência muito dura, ligeiramente pegajosa e não plástico. Poucas raízes decompostas.

2.1.2 Análises e Procedimentos Laboratoriais

Análise Química Total. Foram quantificados os óxidos totais de silício (SiO_2), titânio (TiO_2), alumínio (Al_2O_3), ferro (Fe(OH)_3), manganês (MnO), magnésio (MgO), cálcio (CaO), sódio (Na_2O), potássio (K_2O) e fosfato (P_2O_5) em um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X do Laboratório de Geoquímica do Departamento de Petrologia e Metalogenia (UNESP-Rio Claro).

Análise do Complexo Sortivo. O pH foi determinado usando uma suspensão de $0,01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ de CaCl_2 ; o teor fósforo (P) pelo método colorimétrico extraído com resina trocadora de íons; o potássio (K) foi extraído com resina trocadora de íons e determinado em espectrofotômetro de emissão atômica; o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) foram extraídos em resina trocadora de íons e determinados em espectrofotômetro de absorção atômica; o valor do alumínio trocável (Al) foi obtido pelo método colorimétrico extraído com cloreto de potássio $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$; a acidez potencial (H+Al) foi obtida através da extração com solução-tampão SMP (RAIJ, 1991). O carbono orgânico foi determinado pelo método Walkley–Black e o nitrogênio total (N) pelo método Kjeldahl. As análises foram feitas no Laboratório de Fertilidade de Solo (ESALQ-USP).

Granulometria. As amostras de solo secas ao ar foram peneiradas para a obtenção da fração de partículas $< 2\text{mm}$. A distribuição do tamanho de partículas foi determinada pelo método da pipeta, após a remoção da matéria orgânica com H_2O_2 e dispersão com Na-hexametafosfato (EMBRAPA, 1997). As análises foram feitas na Embrapa Meio Ambiente (Jaguariúna, SP).

2.2 PROCEDIMENTOS USUAIS DE MODELAGEM MATEMÁTICA E ESTATÍSTICA

Para o conjunto de variáveis e observações definidos na pesquisa e que descrevem física e quimicamente os atributos da catena de interesse foram obtidos a média e o erro padrão pela estatística descritiva clássica. Essa impressão inicial do comportamento das variáveis traduz algumas medidas básicas, especialmente quanto à variabilidade dos dados.

Quanto à modelagem das variáveis observadas seguiu-se basicamente três procedimentos distintos, porém complementares. O primeiro diz respeito à composição

multivariada dos fatores e variáveis do ambiente, com intuito de agrupar atributos conforme a semelhança de propriedades e características. Nesse ponto, tal como já foi exposto, os dados observados são transformados em vetores devido às diferentes escalas e magnitudes da cada variável.

O emprego da análise multivariada, através da obtenção de componentes principais envolvendo todas as áreas e atributos em estudo, propicia a redução do conjunto de dados em combinações lineares, gerando escores dos componentes principais que explicam em torno de 80% da variação total, conforme indicado nos estudos de Cruz e Regazzi (1994). Deve ainda permitir a identificação dos atributos mais relevantes na discriminação das áreas compostas no estudo (MANLY, 1994). De modo adicional, optou-se pela análise de agrupamento utilizando-se método de Ward, contendo a medida de dissimilaridade baseada na distância euclidiana média e o conjunto de análises multivariadas com apoio do pacote computacional MINITAB, v. 17.3 (MINITAB QUALITY COMPANION, 2015).

O segundo procedimento dispõe de uma análise de variância univariada (ANOVA) do conjunto de dados. O modelo linear generalizado (GLM) é uma proposta bastante útil para o tratamento de experimentos desbalanceados ou não, a partir da análise de covariância e de uma função de regressão. Nesse modelo é possível ainda avaliar as diferenças entre médias de cada parâmetro, agrupado ou não, utilizando-se comparações múltiplas (MONTGOMERY, 1991; HSU, 1996).

Por fim, o terceiro procedimento abrange a modelagem da superfície de resposta para as variáveis independentes, utilizando o critério de significância (*F-test*; *p-value*) do modelo linear generalizado, considerando a variável dependente (resposta) e a perspectiva espacial, horizontalmente no sentido depressão-vertente (início e centro da depressão, murundus e depressão, montante da vertente), e verticalmente no sentido superfície-(afloramento)-profundidade.

Em seguida, como um desdobramento da superfície de resposta, propõe-se ainda a otimização de resposta, com intuito de avaliar a capacidade máxima e mínima de resposta (ou expressão) da variável dependente, sob a continuidade e prevalência das condições locais do ambiente e manutenção dos teores das variáveis independentes (regressoras).

Todos os procedimentos estatísticos foram desenvolvidos com apoio do pacote computacional MINITAB, v. 17.3 (MINITAB QUALITY COMPANION, 2015). A interface desse software é relativamente simples e possibilita desde o planejamento experimental, as análises descritivas, os procedimentos de interesse da pesquisa, bem como plotar diferentes gráficos e saídas de otimização e superfície de resposta.

O conjunto de possíveis respostas indicam uma “flutuação de expressão da variável” e que possibilitam discriminar o comportamento da variância dos dados otimizados e correlações conjuntas (duas variáveis dependentes), principalmente. No Quadro 1, estão descritos, detalhadamente, os procedimentos adotados para análise do conjunto de dados e modelagem das variáveis na pesquisa.

Quadro 1- Descritivo de análise de dados e modelagem de variáveis consideradas na pesquisa.

Procedimento analítico	Apresentação dos Resultados
Estatística Descritiva	Médias das variáveis – complexo sortivo e óxidos totais. Gráficos de intervalos de resposta.
ANOVA	Análise de variância e teste de F. Teste de Médias (Intervalo de Confiança).
	Modelo Regressivo Linear Generalizado (GLM).
Simulação e Otimização	Gráficos de Superfície de Respostas. Otimização de Respostas (mínima e máxima).
Análise Multivariada	Análise de agrupamentos (<i>cluster</i>) e dendograma. Análise de componentes principais.

Fonte: O autor.

As variáveis foram agrupadas em faixas no modelo linear generalizado, com o intuito de se mensurar os efeitos de cada intervalo, e não dos valores individualizados, caso seja

significativo, na determinação dos teores de matéria orgânica e carbono orgânico. Desse modo, os dados foram simetricamente distribuídos e, portanto, cada faixa corresponde à um estrato ou intervalo de ocorrência de valores (Tabela 1). Estas variáveis foram escolhidas por refletirem muito adequadamente a compartimentação topográfica e as condições de drenagem interna do solo.

Convencionou-se no trabalho, para os modelos regressivos, adotar os teores de matéria orgânica do solo (em $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$) em y_1 e carbono orgânico do solo ($\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$) em y_2 , como variáveis dependentes para o modelo de equações regressivas, ou ainda como uma *proxy* do modelo de caracterização biogeoquímica das áreas de murundus e suas conexões. Em função da alta correlação entre as duas variáveis, não foram descritas no mesmo modelo, como variável regressora, fator de ligação ou covariável.

Tabela 1- Descritivo de intervalos das variáveis para elaboração das faixas de teores nos modelos matemáticos.

Complexo Sortivo			
Variável	Intervalo	Variável	Intervalo
pH	4,0-4,5	CTC	13-35
(CaCl ₂)	4,6-5,0	(mmolc dm ⁻³)	36-58
	5,1-5,5		59-81
	5,6-6,0		82-104
	6,1-6,5		105-127
H+Al	13-35	m	58-66
(mmolc dm ⁻³)	36-58	(%)	67-75
	59-81		76-84
	82-104		85-93
	105-127		94-102
Óxidos Totais			
Variável	Intervalo	Variável	Intervalo
SiO ₂	18,00-25,25	Al ₂ O ₃	34,00-37,99
(g cm ⁻³)	25,26-32,50	(g cm ⁻³)	38,00-41,99
	32,60-40,00		42,00-45,99
	>40,01		>46,00
Fe(OH) ₃	1,00-3,25	TiO ₂	2,23-2,63
(g cm ⁻³)	3,26-5,50	(g cm ⁻³)	2,631-3,031
	5,51-7,75		3,032-3,432
	>7,76		>3,433

Fonte: O autor.

O modelo linear generalizado pode ser descrito considerando o conjunto de variáveis do complexo sortivo e os principais óxidos totais da seguinte forma:

$$y_{MO} \text{ ou } y_{CO} = \alpha_0 + \beta_1 H + \beta_2 Al + \gamma_3 (FxpH) + \gamma_4 (FxCTC) + \gamma_5 dummyprofundidade + \gamma_6 dummytopografia + \gamma_7 dummyprofundidade * dummytopografia + \epsilon_i \quad (14)$$

em que: y_{mo} são os teores de Matéria Orgânica do Solo (em $g \cdot dm^{-3}$) e y_{co} , os teores de Carbono Orgânico do Solo (em $g \cdot dm^{-3}$), α é a constante, β os parâmetros à serem estimados dos termos do modelo, γ os parâmetros à serem estimados das variáveis, *dummy profundidade* que assume “0” quando superficial, (00 à 20 cm) “1” que compreende de 21 à 50 cm, “2” de 51 à 100 cm e “3” horizontes inferiores à 101cm; *dummy topografia* que assume “0” identificando as bordas de depressão (T1P3), “1” o centro da depressão (T1P4), “2” as áreas de murundus (T1P2) e “3” as áreas de platôs (T1P1); e ϵ o erro aleatório.

Para Hosmer e Lemeshow (1980) os fatores descritos nos modelos lineares generalizados como preditores ou variáveis independentes são aqueles escolhidos para variar sistematicamente durante uma observação experimental e são capazes de determinar o seu efeito sobre a variável resposta (dependente). Esses fatores podem atuar de modo agrupado ou cruzado (combinado). Na pesquisa convencionou-se que os fatores atuam de modo cruzado na determinação das características da variável dependente.

Sendo que um procedimento ANOVA permite comparações múltiplas dos parâmetros selecionados no modelo, o intuito foi o de se avaliar todas as possíveis comparações dentro de cada fator, das combinações geradas e os níveis de interação. O critério de avaliação do modelo e as margens de interações desses fatores ocorreram mediante a obtenção do teste de F para combinações múltiplas, conforme HSU (1996).

Outra proposta da pesquisa é avaliar a eficiência dos preditores quanto aos valores ajustados assumidos pela variável resposta, em um dado intervalo de confiança (CI) para a média das combinações obtidas (HSU, 1996). Portanto, o CI é obtido por:

$$\hat{Y}_o \mp t_{\left(\frac{1-\alpha}{2}, n-p\right)} * s(\hat{y}_o) \quad (15)$$

$$s(\hat{y}_o) = \sqrt{s^2(x'_o(x'x)^{-1}x_o)} = \sqrt{x_o s^2(b)x_o} \quad (15.1)$$

onde \hat{Y}_o é o valor estimado para a variável resposta; α é o nível de significância; n e p são o número de observações e de parâmetros, respectivamente; $s^2(b)$ é a matriz de covariância e s^2 é o quadrado médio do erro. O intervalo da previsão de resposta é dado por um sistema semelhante, assim descrito como:

$$\hat{Y}_o \mp t_{\left(\frac{1-\alpha}{2}, n-p\right)} * s(pred) \quad (16)$$

$$s(pred) = \sqrt{s^2(1 + x'_o(x'x)^{-1}x_o)} \quad (16.1)$$

Admite-se ainda, e de acordo com Montgomery (1991), a necessidade de analisar a interação dos fatores na determinação da variável resposta (dependente). Desse modo, a medida de interação dos efeitos no sistema é dada por $(\alpha\beta_{ij})$, onde o *i-ésimo* nível de um dado fator A interage com *j-ésimo* nível do fator B, descrito como:

$$\widehat{\alpha\beta_{ij}} = \bar{Y}_{ij} - (\bar{Y}_{i..} - \bar{Y}_{.j.} - \bar{Y}_{...}), \quad (17)$$

onde Y_{ij} é a média das observações ao nível i do fator A e o nível j -ésimo do fator B; $\bar{Y}_{i..}$ é a média das observações no nível j do fator i -ésimo, $\bar{Y}_{.j.}$ é a média das observações ao nível fator j -ésimo, e $\bar{Y}_{...}$ trata da média de todas as observações do modelo.

Na otimização de resposta, conforme Castillo, Montgomery e McCarville, (1996), são calculadas as conveniências de interação, da seguinte forma para maximização:

$$d_i = 0 \text{ sendo } \hat{y}_i < L_i \quad (18)$$

$$d_i = ((\hat{y}_i - L_i)/(T_i - L_i))^{r_i} \text{ sendo } L_i \leq \hat{y}_i \leq T_i \quad (18.1)$$

$$d_i = 1 \text{ sendo } \hat{y}_i > T_i \quad (18.2)$$

e minimização,

$$d_i = 0 \text{ sendo } \hat{y}_i > U_i \quad (18.3)$$

$$d_i = ((U_i - \hat{y}_i)/(U_i - T_i))^{r_i} \text{ sendo } T_i \leq \hat{y}_i \leq U_i \quad (18.4)$$

$$d_i = 1 \text{ sendo } \hat{y}_i < T_i \quad (18.5)$$

As direções de possíveis respostas para as conveniências de interação, são dadas por:

$$d_i = ((\hat{y}_i - L_i)/(T_i - L_i))^{r_i} \text{ sendo } L_i \leq \hat{y}_i \leq T_i \quad (19)$$

$$d_i = ((U_i - \hat{y}_i)/(U_i - T_i))^{r_i} \text{ sendo } T_i \leq \hat{y}_i \leq U_i \quad (19.1)$$

$$d_i = 0 \text{ sendo } \hat{y}_i < L_i \quad (19.2)$$

$$d_i = 0 \text{ sendo } \hat{y}_i > U_i \quad (19.3)$$

Sendo \hat{y}_i : o valor previsto de resposta; T_i : o valor alvo de uma resposta; L_i e U_i : menor e maior valor aceitável de uma resposta, respectivamente; d_i : função de conveniência para resposta individual; r_i : peso assumido pela função de conveniência da resposta.

Jeff Wu e Hamada (2009) descrevem ainda um procedimento amplificado e robusto, com uma função composta de conveniência que pode ser compreendido como a média geométrica ponderada das conveniências individuais, dada por:

$$D = (\prod(d_i^{w_i}))^{1/W}, \quad (20)$$

onde w_i denota a importância dada a resposta e $W = \sum w_i$. Se a conveniência é a mesma para cada resposta obtida, sendo n é o número de respostas, o modelo composto de conveniência (D) é:

$$D = (d_1 * d_2 * \dots * d_n)^{1/n} \quad (20.1)$$

As saídas de dados, para os modelos regressivos são demonstradas à partir de tabelas consolidadas, especificando-se os coeficientes das variáveis independentes (ou regressoras), o *p-value* (significância) e o parâmetro que corrobora a validade do modelo. Nos modelos multivariados, ANOVA (GLM), simulação e otimização, a saída de dados convencional é gráfica, e tabelas anexas que possibilitem a interpretação e pressupostos plotados.

CAPÍTULO III

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram descritos, apoiados em quatro grupos de análises e considerações. O primeiro procedimento estatístico contempla uma análise descritiva dos dados, com a saída de tabelas com as médias, desvio-padrão e coeficiente de variação. O segundo trata dos modelos regressivos lineares generalizados (GLM), baseados na análise de variância. O terceiro modelo desenvolve a análise multivariada dos dados, com a decomposição dos componentes e a formação de *clusters* à partir do conjunto de variáveis. Por fim, o quarto modelo reúne procedimentos de simulação e otimização das respostas do conjunto de variáveis em torno da máxima e mínima expressão da matéria orgânica.

3.1 RELAÇÕES ENTRE MOS E COS E OS INDICADORES QUÍMICOS DO SOLO

Em geral os solos de Cerrado são descritos como tipicamente ácidos, bastante intemperizados e com baixo potencial de cargas, devido à predominância de argila de baixa atividade caulinítica, e óxido-hidróxido de ferro (hematita e goethita) e de alumínio (gibbsita) (CURI; FRANZMEIER, 1984; BURAK et al., , 2010), sobretudo porque as cargas são dependentes de pH.

Essas características geoquímicas são marcantes na área de estudo, conforme demonstrado na Tabela 2, em especial quanto à faixa de pH ácida, em todas as áreas amostradas, à restrita capacidade de troca catiônica total (CTC), à baixa soma de bases (SB) e elevada saturação de alumínio trocável na solução do solo (m).

Tabela 2 - Valores médios, desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (cv, %) do complexo sortivo, COS (carbono orgânico do solo) e MOS (matéria orgânica do solo) nas áreas de platô (T1P1), murundu (T1P2), borda de depressão (T1P3) e centro de depressão (T1P4) por estratos de profundidade (00-20cm; 21-50cm; 51-100cm; >101cm).

Amostra	Estratos de Horizontes	Complexo Sortivo*									
		pH (CaCl ₂)	CTC	SB	H+Al	Al	K	m	P	COS	MOS
		(mmolc dm ⁻³)						%	mg dm ⁻³	(dag kg ⁻¹)	
T1P1 Platô	S1 (20cm)	4,12	77,23	0,460	76,77	3,34	0,45	89,80	4,62	16,75	29,0
	Sub1 (50 cm)	4,30	71,40	0,400	71,00	3,00	0,40	88,00	4,00	15,00	26,0
	Sub2 (100cm)	4,70	38,30	0,300	38,00	0,00	0,30	77,00	3,00	10,00	17,0
	Sub3 (>101cm)	6,07	16,47	0,100	16,37	0,00	0,00	91,12	1,62	0,25	1,25
σ		0,702	17,987	0,117	17,882	0,948	0,149	6,003	0,942	5,334	8,819
cv (%)		12,199	74,482	78,567	74,509	316,228	213,491	6,715	47,140	197,569	166,411
T1P2 Murundu	S1 (20cm)	4,27	78,80	1,300	77,50	5,50	0,80	82,00	6,75	21,25	36,5
	Sub1 (50 cm)	4,63	44,96	0,633	44,33	1,66	0,23	78,66	2,66	12,33	21,33
	Sub2 (100cm)	5,26	25,13	0,133	25,00	0,00	0,00	88,33	1,66	6,00	10,33
	Sub3 (>101cm)	5,75	14,57	0,075	14,50	0,50	0,00	93,25	2,75	0,00	1,00
σ		0,714	32,218	0,750	31,527	3,024	0,415	8,132	2,239	9,413	15,737
cv (%)		14,331	77,262	134,632	76,629	146,016	149,129	9,471	61,483	94,135	89,925
T1P3 Borda de Depressão	S1 (20cm)	4,40	82,90	1,566	81,33	2,00	0,90	60,66	6,33	41,66	71,7
	Sub1 (50 cm)	5,00	38,20	0,200	38,00	0,00	0,00	83,00	1,00	14,00	25,0
	Sub2 (100cm)	5,62	22,55	0,050	22,50	0,50	0,00	95,50	1,75	4,25	7,75
	Sub3 (>101cm)	5,90	15,55	0,050	15,50	0,00	0,00	95,50	1,75	0,00	1,00
σ		0,701	31,977	0,771	31,220	1,230	0,426	16,040	2,790	18,863	32,128
cv (%)		13,087	87,349	174,704	86,323	184,637	189,630	18,706	98,494	145,101	140,199
T1P4 Centro de Depressão	S1 (20cm)	4,60	79,50	0,050	79,00	2,00	0,50	80,00	4,00	46,00	79,0
	Sub1 (50 cm)	4,50	83,65	0,050	83,60	2,25	0,25	84,62	4,88	36,87	64,0
	Sub2 (100cm)	4,30	121,10	0,100	121,00	3,00	0,00	97,00	7,00	37,00	29,0
	Sub3 (>101cm)	5,00	16,10	0,100	16,00	0,00	0,00	91,00	2,00	0,00	1,00
σ		0,3511	52,875	0,230	52,848	1,527	0,288	8,621	2,516	24,379	41,388
cv (%)		7,579	73,201	98,974	73,401	91,651	173,205	9,651	58,075	88,116	86,225

* obtido à partir de amostras desbalanceadas.

Fonte: O autor.

Nas áreas de depressão (centro e borda) percebe-se um ligeiro incremento nos teores de matéria orgânica do solo, embora os demais indicadores demonstrem um comportamento bastante semelhante se considerados os estratos de profundidade determinados na pesquisa. Portanto, atribui-se ainda mais a dependência dos solos tropicais, especialmente das áreas de Cerrado à presença e atividade da matéria orgânica como fator imprescindível para o aumento da CTC dependente de pH. Em função da hidromorfia, há um aumento da capacidade de

deposição de material orgânico, principalmente até os 20 cm de profundidade (entre 71,7 dag kg⁻¹ à 79,0 dag kg⁻¹), se comparados, em especial, às médias observadas nas áreas mais elevadas do platô (29 dag kg⁻¹).

Quanto aos óxidos considerados nas análises, destacam-se os teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe(OH)₃ e TiO₂. Os demais óxidos, conforme descrito na Tabela 3, estão presentes, porém apresentam teores muito baixos (CaO, MgO, Na₂O, K₂O). Comparativamente nota-se a diminuição gradual dos teores de Fe(OH)₃ (em torno de 41,75 g cm⁻³), prioritariamente, e de Al₂O₃ (17,67 g cm⁻³), do perfil do platô em direção às bordas e centro da depressão, até 20 cm de profundidade.

Tabela 3 - Valores médios de óxidos totais (%), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (cv, %) nas áreas de platô (T1P1), murundu (T1P2), borda de depressão (T1P3) e centro de depressão (T1P4) por estratos de profundidade (00-20cm; 21-50cm; 51-100cm; >101cm).

Amostra	Estratos de Horizontes	Óxidos Totais (g cm ⁻³) *									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe(OH) ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	MnO
T1P1 Platô	S1 (20cm)	27,50	37,68	8,91	0,039	0,080	2,79	0,111	0,019	0,036	0,016
	Sub1 (50 cm)	27,36	39,05	8,47	0,031	0,060	2,82	0,109	0,023	0,031	0,015
	Sub2 (100cm)	23,62	43,30	8,45	0,007	0,007	3,12	0,070	0,055	0,024	0,016
	Sub3 (>101cm)	27,15	43,01	7,95	0,008	0,040	2,89	0,067	0,054	0,023	0,015
σ		4,912	2,437	0,698	0,007	0,074	0,297	0,018	0,010	0,003	0,002
cv (%)		18,314	5,716	8,662	70,3085	162,088	10,224	25,348	21,238	14,339	15,998
T1P2 Murundu	S1 (20cm)	26,68	40,03	7,02	0,014	0,030	3,32	0,033	0,029	0,029	0,007
	Sub1 (50 cm)	23,80	43,89	7,34	0,004	0,015	3,49	0,013	0,036	0,026	0,008
	Sub2 (100cm)	22,90	43,81	7,89	0,003	0,088	3,58	0,005	0,034	0,023	0,012
	Sub3 (>101cm)	29,55	42,20	7,76	0,003	0,111	3,03	0,004	0,043	0,023	0,007
σ		6,266	3,152	1,013	0,009	0,091	0,451	0,027	0,008	0,004	0,003
cv (%)		24,032	7,453	13,533	137,349	146,041	13,5310	79,812	22,844	18,147	34,295
T1P3 Borda de Depressão	S1 (20cm)	21,11	43,84	3,29	0,016	0,099	3,22	0,068	0,031	0,028	0,007
	Sub1 (50 cm)	20,68	49,06	2,43	0,002	0,106	3,78	0,053	0,030	0,022	0,008
	Sub2 (100cm)	28,84	44,70	2,34	0,004	0,066	3,11	0,030	0,033	0,022	0,008
	Sub3 (>101cm)	29,42	45,04	5,64	0,003	0,064	3,04	0,037	0,037	0,025	0,008
σ		6,171	3,972	2,103	0,007	0,065	0,418	0,033	0,007	0,005	0,0005
cv (%)		23,355	8,834	57,025	102,128	85,424	13,195	75,156	21,039	22,158	6,6299
T1P4 Centro de Depressão	S1 (20cm)	18,50	45,77	5,19	0,003	0,007	3,06	0,000	0,021	0,021	0,007
	Sub1 (50 cm)	22,63	43,11	4,31	0,004	0,011	3,05	0,005	0,029	0,021	0,007
	Sub2 (100cm)	25,83	41,54	4,10	0,004	0,150	3,06	0,187	0,037	0,022	0,007
	Sub3 (>101cm)	46,67	37,29	1,02	0,052	0,026	2,49	0,035	0,052	0,017	0,008
σ		14,613	4,240	2,164	0,028	0,009	0,327	0,099	0,015	0,002	0,0008
cv (%)		48,169	10,209	62,835	138,482	59,216	11,380	133,490	41,358	12,942	10,383

* obtido à partir de amostras desbalanceadas.

Fonte: O autor.

A formação de horizontes desferruginizados, com maior acúmulo de matéria orgânica é produto da hidromorfia prolongada no perfil e, portanto, característicos das áreas

mais próximas à depressão. Naturalmente, a condição redutora e o modelo de conexão aberta entre a depressão e os rios condicionam a desferruginização e o predomínio do embranquecimento da matriz do solo.

Outro processo evidente, baseando-se nos dados dispostos na Tabela 3 é a dessilicificação mais acentuada à medida em que se avança para perfis com traços marcantes de hidromorfia, o que explica a variação média em torno de 27% nos teores de sílica entre T1P1 e T1P3 e o aumento relativo de Al_2O_3 nos perfis hidromorfizados (aproximadamente até a profundidade de 100cm).

3.2 HIPÓTESE DA RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS AVALIADOS E A COMPARTIMENTAÇÃO TOPOGRÁFICA

O interesse das análises estatísticas é o de avaliar a significância das relações entre os componentes do complexo sortivo, os principais óxidos e os compartimentos topográficos à partir do platô até a depressão e das profundidades dos perfis de solo. A estatística ANOVA, descrita na Tabela 4, compreende um escopo de variáveis mais relevantes tomados individualmente, considerando a matéria orgânica e o carbono orgânico do solo como variáveis dependentes.

Os principais indicadores avaliados para as áreas de estudo foram significativamente correlacionados com os teores de matéria orgânica do solo (MOS) e carbono orgânico do solo (COS), ao nível de $p < 0,01$, com exceção da compartimentação topográfica (platô, murundu, centro da depressão e borda da depressão), significativos ao nível de $p < 0,05$, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Estatística ANOVA para os teores de Matéria Orgânica do Solo (MOS) e de Carbono Orgânico do Solo (COS) e a significância de suas correlações quanto às faixas das variáveis ambientais, de característica química (pH, SB, CTC, P, K e m), física (aspecto topográfico e estratos de profundidade) e os principais óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$).

	gl	F	p
MOS			
pH	4	12,49	0,000***
SB	4	14,43	0,000***
V	3	10,97	0,000***
CTC	4	47,02	0,000***
P _{resina}	4	12,06	0,000***
K _{resina}	4	12,53	0,000***
H+Al SMP	4	48,93	0,000***
m	4	9,40	0,000***
Aspecto Topográfico	3	2,87	0,050**
Profundidade	3	25,35	0,000***
SiO_2	3	1,38	0,266
Al_2O_3	3	0,08	0,969
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	3	12,80	0,000***
SiO_2	3	1,38	0,266
COS			
pH	4	12,85	0,000***
SB	4	14,46	0,000***
V	3	11,11	0,000***
CTC	4	47,43	0,000***
P _{resina}	4	11,93	0,000***
K _{resina}	4	12,72	0,000***
H+Al SMP	4	49,65	0,000***
m	4	9,35	0,000***
Aspecto Topográfico	3	2,81	0,053**
Profundidade	3	26,09	0,000***
SiO_2	3	0,08	0,972
Al_2O_3	3	0,15	0,930
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	3	0,65	0,590
SiO_2	3	1,42	0,255

n = 45. **, *** significativo aos níveis de $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente.

Fonte: O autor.

Para o modelo proposto, apesar de não haver uma relação significativa entre SiO_2 , Al_2O_3 e a matéria orgânica, os teores de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ foram significativos. Uma consideração provável é que o acúmulo de material orgânico em ambiente redutor, associado à oxidação temporária do ferro, sob a forma reduzida e intensificado pela respiração biológica, proporcionam ambiente favorável às ligações organominerais. (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989). Tais ligações são tipicamente fortes e resultam em aumento da acidez no horizonte, que é proporcional ao teor destes elementos, especialmente o ferro (PONNAMPERUMA, 1972; KÄMPF, 1987).

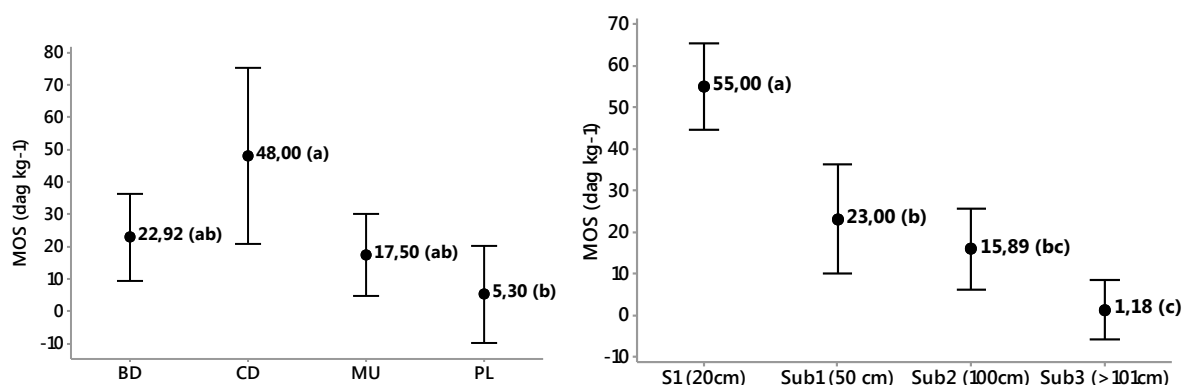
Os fatores - compartimentação topográfica e as faixas de profundidades - considerados na pesquisa foram significativos ao nível de $p < 0,01$ e de $p < 0,05$, respectivamente. Obviamente, as variações nos teores de matéria orgânica em função da profundidade são mais significativas do que se consideradas as variações entre os pontos analisados (T1P1; T1P2; T1P3; T1P4). No entanto, permite ponderar que as etapas de remoção e deposição de material orgânico na catena, e em uma perspectiva vertical, são *a priori* significativos e determinantes, inclusive para elucidação de outras conexões e processos biogeoquímicos.

As diferenças entre as médias dos teores de matéria orgânica do solo obtidas, em função dos aspectos topográficos e estratos de profundidade, evidenciam o maior acúmulo desse material nas trincheiras do centro e na borda da depressão (T1P3 e T1P4), e ainda nos horizontes de até 20cm e 50cm de profundidade (Figura 7). Entretanto, no centro da depressão a faixa de amplitude do teor de matéria orgânica é aproximadamente 60%, enquanto nos outros pontos indicados na pesquisa, a variância é bem menos expressiva.

A maior amplitude observada na direção da depressão, no perfil topográfico, corresponde principalmente à acumulação intensa de matéria orgânica e sua redistribuição nas camadas superficiais em função da prevalência das condições hidromórficas nesse ponto do

perfil. No entanto, a atividade de carreamento de materiais (orgânico e ferro precipitado), através de fendas e conexões, especialmente em T1P4, é bastante evidente em função do elevado teor médio de matéria orgânica até 50 cm de profundidade.

Figura 7 - Diferenças entre as Médias (Teste de Fisher) e Intervalos de Confiança ($p < 0,05$) para os teores de Matéria Orgânica do Solo (MOS) em relação aos aspectos topográficos: BD (borda da depressão), CD (centro da depressão), MU (murundu) e PL (platôs); entre os estratos de profundidade (S1, 00 – 20 cm; Sub1, 21 – 50 cm; Sub2, 51 – 100 cm; Sub3, > 100 cm).



Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Fisher (LSD) à significância de $p < 0,05$.

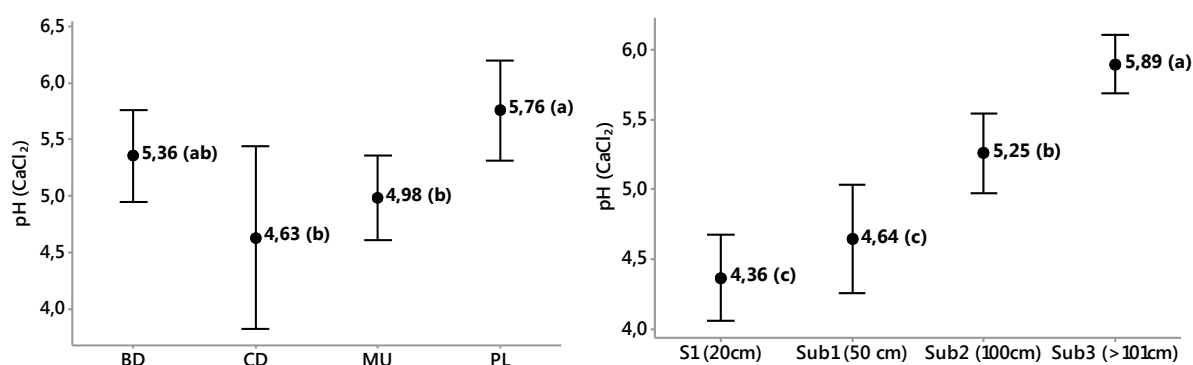
Fonte: O autor.

Especificamente quanto à profundidade e aos teores de matéria orgânica, observa-se diferença significativa entre as camadas mais superficiais e subsuperficiais, reduzindo de modo gradativo e considerável até as camadas inferiores a 100 cm. Para Oliveira Filho (1992), a maior deposição de material orgânico nas áreas de murundus e centros de depressão e o eventual acúmulo significativo na superfície devem-se à atividade típica de bioturbação, condicionada pela porosidade bastante desenvolvida, que caracteriza a dinâmica de carreamento e deposição de materiais orgânicos. Assim, hidromorfia e bioturbação podem atuar favoravelmente para o acúmulo de matéria orgânica.

O comportamento das variáveis quanto aos valores de pH é bastante similar ao observado nos teores de matéria orgânica. O centro e borda da depressão (T1P4 e T1P3), que

apresentaram semelhança nos teores de matéria orgânica, não diferem entre si, pelo Teste de Fisher à $p < 0,05$ quanto aos valores médios de pH, que são menores do que observados nas áreas de platôs – T1P1 (Figura 8). Os valores de pH, coincidem com as maiores acumulações de matéria orgânica do solo T1P4, T1P3 e T1P2 (respectivamente, nesse sentido) resultante do processo da dessilicificação em condições acidificantes.

Figura 8 - Diferenças entre as Médias (Teste de Fisher) e Intervalos de Confiança para os valores de pH em relação aos aspectos topográficos: BD (borda da depressão), CD (centro da depressão), MU (murundu) e PL (platôs); entre os estratos de profundidade (S1, 00 – 20 cm; Sub1, 21 – 50 cm; Sub2, 51 – 100 cm; Sub3, > 100 cm).



Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Fisher (LSD) à significância de $p < 0,05$.
Fonte: O autor.

Quanto à profundidade, os valores médios de pH são ligeiramente menores (mais ácidos) até 50cm, não diferindo estatisticamente pelo Teste de Fisher à $p < 0,05$, dos demais estratos inferiores ao longo do perfil do solo. Portanto, pode-se considerar que a natureza da matéria orgânica nas primeiras camadas de solo, em especial nas áreas centrais e bordas de depressão, constitui-se em ambientes mais ácidos, comparando-se com os pontos localizados no platô, onde prevalece a condição de melhor drenagem e escoamento.

As observações de campo permitem discriminar os perfis de acordo com suas posições topográficas e concentração de matéria orgânica, interpretados pela cor. A análise de variância do modelo linear generalizado permite comprovar ou não, esta relação, bem como a

interação entre estes parâmetros e as faixas dos teores de óxidos ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 , SiO_2) e suas possíveis interações com a matéria orgânica na topografia. Na Tabela 5, estão descritas as fontes de variação testadas no modelo, os graus de liberdade (*gl*), o valor estatístico de *F* (calculado) e o *p-value*. O modelo foi elaborado considerando as faixas de cada uma das variáveis e não os seus valores individualizados, para obtenção de melhor ajuste linear.

Tabela 5 - Análise de Variância do Modelo Linear Generalizado (GLM) para as faixas de fontes de variação (fv) e os fatores agrupados (profundidade *versus* topografia), e as variáveis dependentes (MOS e COS).

fv	gl	F	p
MOS			
FxpH	4	10,81	0,000***
FxCTC	4	24,35	0,000***
H+Al	4	40,84	0,000***
m	4	8,15	0,012***
Profundidade	3	194,38	0,000***
Topografia	3	80,15	0,000***
Profundidade <i>versus</i> Topografia	10	70,14	0,000***
COS			
FxpH	4	9,59	0,000***
FxCTC	4	23,39	0,000***
H+Al	4	48,12	0,000***
m	4	10,35	0,006***
Profundidade	3	182,41	0,000***
Topografia	3	72,10	0,000***
Profundidade <i>versus</i> Topografia	10	68,34	0,000***

, * significativo aos níveis de $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente.

Fonte: O autor.

As variáveis descritas no modelo, como faixas de variação de pH, CTC, H+Al correlacionam-se significativamente com as variáveis dependentes, do mesmo modo que o

fator topografia e profundidade. Entretanto, o que de fato deve ser considerado é a interação entre os estratos de *profundidade* e *aspectos topográficos* na determinação e influência dos teores de matéria orgânica e carbono orgânico de modo restritivo. Entende-se, portanto, que, as possíveis combinações entre cada nível desses fatores podem também ser significativas quanto aos teores de materiais orgânicos e que, tais relações refletem características muito particulares impressas no pedoambiente da pesquisa.

Em um modelo linear generalizado semelhante, considerando as faixas dos teores de óxidos ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 , SiO_2) e as possibilidades de interação com a topografia, observa-se elevada significância ($p < 0,001$) na determinação dos teores dos compostos orgânicos (Tabela 6).

Tabela 6 - Análise de Variância do Modelo Linear Generalizado (GLM) para as variáveis explanatórias (ve) e os fatores agrupados (profundidade *versus* topografia), e as variáveis respostas (MOS e COS).

ve	gl	F	p
MOS			
FxFe(OH) ₃	3	27,23	0,000***
FxSiO ₂	3	11,10	0,000***
FxAl ₂ O ₃	3	3,47	0,029**
FxTiO ₂	3	2,68	0,064 ^{ns}
Profundidade	3	30,57	0,004***
Topografia	3	5,53	0,000***
Profundidade <i>versus</i> Topografia	8	7,31	0,000***
Profundidade <i>versus</i> FxFe(OH) ₃	8	18,95	0,000***
Topografia <i>versus</i> FxSiO ₂	8	4,49	0,006***
COS			
FxFe(OH) ₃	3	26,26	0,000***
FxSiO ₂	3	11,11	0,000***
FxAl ₂ O ₃	3	3,52	0,027**
FxTiO ₂	3	2,63	0,067 ^{ns}
Profundidade	3	31,22	0,004***
Topografia	3	5,40	0,003***
Profundidade <i>versus</i> Topografia	8	7,10	0,000***
Profundidade <i>versus</i> FxFe(OH) ₃	8	18,81	0,000***
Topografia <i>versus</i> FxSiO ₂	8	0,82	0,595 ^{ns}

, * significativo aos níveis de $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente.

Fonte: O autor.

Verificou-se que as concentrações de Al_2O_3 são mais expressivas na interação com as feições do ambiente, do que quando analisadas de modo exclusivo, especialmente no compartimento hidromórfico (portanto com elevados teores de MOS). Em relação ao SiO_2 , observou-se uma dinâmica oposta, refletindo perda (dessilicificação) neste compartimento. Portanto, no modelo numérico, os teores de SiO_2 nas áreas de depressão são opostos à ocorrência dos teores médios de matéria orgânica.

A interação dos fatores geomorfológicos e químicos na determinação dos teores de matéria orgânica é significativa quando compartimentalizada, devido aos aspectos topográficos e os horizontes do perfil. A estatística do modelo linear generalizado, composto pelo conjunto de variáveis permitiu avaliar com maior precisão, em função dos coeficientes ajustados e a significância quanto à variável dependente (matéria orgânica ou carbono orgânico), o comportamento específico dentro de uma faixa de valores ou de cada fator topográfico e as principais possíveis interações (Tabela 7).

Os coeficientes dos termos ajustam-se de modo positivo ou negativo com a variável dependente. Sobre os aspectos topográficos, os centros da depressão (T1P4), borda da depressão (T1P3) e os murundus (T1P2) relacionam-se positivamente com a matéria orgânica (111,98 %, 10,88 %, e 9,56 %, respectivamente), enquanto que no platô (T1P1), o ajuste observado no modelo é muito baixo (1,02 %), indicando que nesse ambiente, há menor capacidade de resposta quanto aos teores da matéria orgânica do solo.

As considerações em torno dos estratos de profundidade são muito semelhantes às discussões com base nos resultados dos modelos anteriores. Observa-se menor resposta nos teores de materiais orgânicos, gradativamente, em horizontes mais profundos. Acima de 100 cm, de acordo com o modelo descrito na Tabela 7, os coeficientes são negativos (-2,06; -1,98), indicando uma resposta inversa da variável dependente, em função desses termos do modelo.

Tabela 7 - Valor da estatística gerada pelo Modelo Linear Generalizado (*Wald statistics*) para os estratos do ambiente, indicando quais deles mostraram diferenças significativas entre as faixas obtidas na determinação dos teores de MOS e COS. * $p < 0,1$; ** $p < 0,005$; *** $p < 0,01$.

<i>Termos</i>		<i>Variáveis Dependentes</i>			
		MOS		COS	
		Coefficiente	p	Coefficiente	p
<i>Constante</i>		25,89	0,000***	14,97	0,000***
FxpH	4,0 – 4,5	-2,92	0,112***	-1,93	0,096
	4,6 – 5,0	0,94	0,639	0,84	0,504
	5,1 – 5,5	9,21	0,000***	5,39	0,000***
	5,6 – 6,0	21,08	0,000***	12,27	0,000***
FxCCTC	13 – 35	-1,11	0,848	-0,10	0,978
	36 – 58	7,74	0,000***	4,67	0,000***
	59 – 81	9,83	0,001***	6,05	0,001***
	105 – 127	13,03	0,000***	7,525	0,000***
<i>Aspecto Topográfico</i>	BD (T1P3)	10,88	0,000***	9,69	0,002***
	CD (T1P4)	11,98	0,000***	8,35	0,003***
	MU (T1P2)	9,56	0,000***	8,12	0,000***
	PL (T1P1)	1,02	0,211	1,06	0,224
<i>Profundidade</i>	S1 (20cm)	16,83	0,000***	16,09	0,000***
	Sub1 (50 cm)	2,33	0,009***	2,66	0,006***
	Sub2 (100cm)	-2,06	0,012**	-2,136	0,002***
	Sub3 (≥ 101 cm)	-1,98	0,025**	-2,102	0,002***
<i>profundidade versus topografia</i>	S1 (20cm) (BD)	10,14	0,000***	11,76	0,000***
	Sub1 (50 cm) (BD)	8,02	0,001***	8,97	0,000***
	Sub2 (100cm) (BD)	-7,45	0,019**	-7,85	0,000***
	Sub3 (≥ 101 cm) (BD)	-8,56	0,045**	-8,99	0,000***
	S1 (20cm) (CD)	11,84	0,001***	11,99	0,000***
	Sub1 (50 cm) (CD)	9,05	0,003***	9,66	0,000***
	Sub2 (100cm) (CD)	5,01	0,008***	5,77	0,008***
	Sub3 (≥ 101 cm) (CD)	1,12	0,422	1,745	0,396
	S1 (20cm) (MU)	8,13	0,002***	7,38	0,001***
	Sub1 (50 cm) (MU)	5,57	0,000***	4,92	0,007***
	Sub2 (100cm) (MU)	3,04	0,042**	3,74	0,006***
	Sub3 (≥ 101 cm) (MU)	1,42	0,419	0,62	0,575
	S1 (20cm) (PL)	-6,11	0,009***	-7,22	0,000***
	Sub1 (50 cm) (PL)	-3,855	0,041**	-4,215	0,007***
	Sub2 (100cm) (PL)	-0,614	0,215	-0,811	0,611
	Sub3 (≥ 101 cm) (PL)	-0,822	0,244	-0,933	0,687

Notas: Stepwise ($\alpha = 0,15$). Interações (2x2) dos termos e ordens. Nível de confiança entre os intervalos: $p > 0,05$. Erros ajustados (Tipo III). Dados não transformados. Código dos fatores (-1; 0; +1).

Fonte: O autor.

Os coeficientes dos termos descritos no modelo nos horizontes superficiais, e as interações com áreas de centro e bordas de depressão (T1P2 e T1P3) são significativos, e

positivos, assumindo valores elevados (11,84% e 10,14%, respectivamente), ao contrário dos coeficientes de T1P4 (8,13%) e principalmente T1P1 (-6,11%).

Em geral, pode-se afirmar que na medida em que se avança para horizontes subsuperficiais, os coeficientes assumem valores negativos, ou seja, há redução brusca no ajuste dos teores de matéria orgânica, significativamente até próximo de 100cm de profundidade. Nos pontos de coleta considerados na pesquisa, que compreendem o perfil do platô (T1P1), não é possível perceber uma dinâmica marcante e significativa de ajuste com a matéria orgânica, ao contrário do observado nas demais áreas analisadas.

Dentre as faixas de complexo de troca catiônica (CTC), o maior coeficiente de ajuste (13,03%) foi observado no estrato de maior quantidade de cargas (13-35 mmolc dm⁻³). Na medida em que foram identificadas maior capacidade de troca catiônica, observou-se aumento gradativo dos coeficientes (7,74% e 9,83%) nos teores de material orgânico dessas amostras. Apenas para a faixa entre 13-35 mmolc dm⁻³, não foi possível observar significância e, portanto, não há correlação entre o coeficiente obtido no modelo (-1,11) e a variável dependente (matéria orgânica do solo).

De modo bastante similar, a faixa que abrange valores de pH mais ácidos, corresponde à menor expressão dos teores de material orgânico, aumentando gradativamente em função das faixas mais elevadas do termo (5,1 à 5,5 e 5,6 à 6,0), em 9,21% e 21,08%, respectivamente. Quanto à faixa intermediária de pH (entre 4,6 e 5,0) o coeficiente obtido no modelo (0,94) não é significativo quanto aos teores de materiais orgânicos.

Por fim, a estatística gerada pelo GLM (modelo linear generalizado), permitiu considerações importantes para a pesquisa no que diz respeito à interação significativa entre as principais variáveis de interesse (complexo sortivo, profundidade e perfil topográfico) e a variável dependente - matéria orgânica e carbono orgânico – que é de fato, um indicador *quali* e quantitativo dos processos e dinâmica geoquímica na catena estudada.

3.3 VARIABILIDADE ESPACIAL DO COMPLEXO SORTIVO, ÓXIDOS TOTAIS E AS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Um relevante aspecto considerado na pesquisa abrange a análise conjunta dos atributos físicos, químicos, mineralógicos e topográficos, de modo a compreender a estrutura de relação entre as variáveis, através da análise fatorial e de componentes principais, e da análise de correspondência simples (SCA).

Nesse sentido, o interesse do emprego de técnicas multivariadas é o de avaliar a variabilidade e comportamento dos componentes - óxidos totais, complexo sortivo e frações granulométricas na catena. Portanto, em uma análise fatorial, considerou-se 12 variáveis e, portanto, obtém-se aproximadamente 12 fatores que correspondem às variáveis originais (Quadro 2).

Quadro 2 - Variáveis originais selecionadas e as características dos componentes na análise fatorial.

Variáveis Originais	Característica dos Componentes
Areia Total (g kg^{-1})	Fração granulométrica
Silte (g kg^{-1})	
Argila (g kg^{-1})	
MOS (dag kg^{-1})	Complexo Sortivo
pH	
CTC (mmolc dm^{-3})	
Al (mmolc dm^{-3})	
H+Al (mmolc dm^{-3})	
SiO ₂ (g cm^{-3})	Óxidos Totais
Al ₂ O ₃ (g cm^{-3})	
Fe(OH) ₃ (g cm^{-3})	
TiO ₂ (g cm^{-3})	

Fonte: O autor.

Na análise dos componentes principais, foram obtidos três componentes que em conjunto explicam 77,5% da variabilidade total dos dados (Tabela 8). Apenas os dois componentes principais já são suficientes para compreender 65,8% da variabilidade total. Os demais contribuíram de forma irrisória e, portanto, não foram considerados na análise.

Tabela 8 - Resumo dos componentes principais da análise multivariada para as variáveis originais.

Componente	Autovalor	Porcentagem	
		Variância	Acumulada
1	5,4424	45,4	45,4
2	2,4590	20,5	65,8
3	1,4021	11,7	77,5

Fonte: O autor.

O primeiro componente principal, composto pelos indicadores do complexo sortivo apresentou isoladamente 45,4% da variabilidade total dos dados, destacando-se os coeficientes obtidos para as variáveis, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, pH e H+Al, em relação aos demais indicadores (Tabela 9).

Tabela 9 - Correlação entre variáveis originais e componentes principais da fração granulométrica, complexo sortivo e óxidos totais.

Variáveis Originais	CP1	CP2	CP3
Areia Total (g kg ⁻¹)	0,042	-0,124	0,984
Silte (g kg ⁻¹)	0,587	0,413	-0,297
Argila (g kg ⁻¹)	-0,567	-0,165	-0,681
MOS (dag kg ⁻¹)	0,920	0,084	0,130
pH	-0,856	-0,054	-0,304
CTC (mmolc dm ⁻³)	0,977	0,040	0,087
Al (mmolc dm ⁻³)	0,763	0,037	0,051
H+Al (mmolc dm ⁻³)	0,976	0,038	0,088
SiO ₂ (g cm ⁻³)	-0,365	-0,875	0,008
Al ₂ O ₃ (g cm ⁻³)	-0,073	0,820	-0,341
Fe(OH) ₃ (g cm ⁻³)	-0,215	0,266	0,004
TiO ₂ (g cm ⁻³)	0,177	0,891	0,234

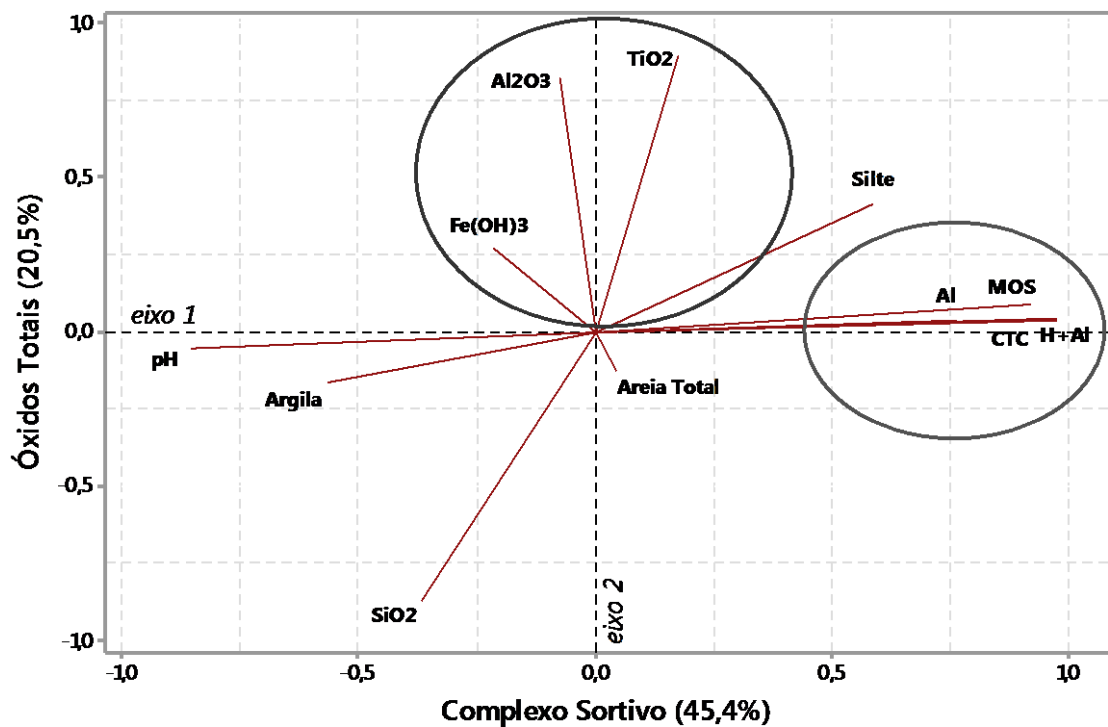
Fonte: O autor.

O coeficiente do indicador pH apresenta sinal negativo devido à correlação inversamente proporcional à variância do conjunto de variáveis originais do componente principal. Implica dizer nesse caso, que o pH, apesar da elevada carga fatorial (-0,856) no primeiro componente do modelo, o sinal negativo indica que a variância dos dados que gerou o índice é negativa.

O segundo componente, composto pelos óxidos totais, representa 20,5% da variabilidade total dos dados, especialmente para SiO_2 , Al_2O_3 e TiO_2 , que apresentaram os maiores coeficientes (87,5%, 82,0% e 89,1% respectivamente). Já o terceiro componente, que explica 11,7% da variância total dos dados, composto pelos componentes que representam as frações granulométricas, dispõe dos coeficientes mais elevados para o percentual de areia total (98,4%) e argila (68,1%).

Uma percepção mais clara dessas relações e da disposição conjunta das variáveis são melhor apresentadas na Figura 9. Na análise dos componentes principais (ACP), a variável de análise que compreende os elementos do complexo sortivo está disposta no eixo do componente principal, enquanto que a variável de segundo plano, que compreende o grupo dos óxidos totais está disposta no eixo do componente secundário.

Figura 9 - Análise de Componentes Principais (ACP) do conjunto de dispersão dos escores fatoriais obtidos através das variáveis originais de caracteres físico-químicos estruturais do solo.



Fonte: O autor.

Portanto, cada variável utilizada para a construção dos eixos da ACP é representada como um vetor; e a direção e o comprimento do vetor são indicados como a contribuição de cada variável para os componentes principais (Figura 9). Os dois primeiros eixos da ACP, conforme já descrito, explicam 65,8% da variabilidade total dos dados, sendo atribuído ao eixo 1 a compreensão de 45,4% e eixo 2 explicando 20,5% da variância total dos dados considerados na análise.

O componente principal (eixo 1) foi correlacionado significativamente com MOS, CTC, Al, H+Al, e pH. O segundo componente (eixo 2) correlaciona-se com Al_2O_3 , SiO_2 e TiO_2 , significativamente. No eixo 1, interpretado como um eixo prevalência de complexo de cargas, a CTC apresentou o maior coeficiente ($X = 0,977$).

Quanto ao eixo 2, deve-se atentar para os coeficientes elevados, e, portanto, significativos, porém com sinais diferentes entre Al_2O_3 , SiO_2 . Devido à relevância desses dois óxidos em relação ao TiO_2 e considerando a baixa significância do coeficiente de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ($X = 0,266$), o eixo 2 pode ser interpretado como um indicador de caracterização das argilas aluminosas e dos processos de dessilicificação. Esse parecer é fundamentado nos coeficientes de Al_2O_3 (correlação positiva, $X = 0,820$) e SiO_2 (correlação negativa, $-0,875$), sugerindo que os processos de remoção e acúmulo dos elementos Al e Si, são amplamente antagônicos e significativos.

Em função da baixa correlação do par de óxidos (Al_2O_3 , SiO_2) com o grupo de complexo de cargas, atribui-se que, o processo de latossolização, recorrente em solos de boa drenagem (T1P1 e T1P2), não está relacionado à maior expressão do complexo de cargas no solo, em especial quanto aos teores de matéria orgânica. É importante ressaltar que esta compreensão se baseia tão somente na análise dos coeficientes e na robustez do modelo de ACP, apropriada para a composição do eixo 2 em relação aos componentes do eixo 1.

Em um procedimento de simples correspondência multivariada, tomando-se os teores de MO e valores de pH, H+Al e CTC - Componente 1- contrastando-os com perfis topográficos (*pl*, *mu*, *bd*, *cd*) – Componente 2 - e de modo suplementar, os óxidos totais (SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$) é possível perceber a homogeneidade dos próprios contrastes (grupos) e os fatores topográficos (próximos de zero), quanto ao componente 1 (*axis 1*) e 2 (*axis 2*).

Em geral, todos os ambientes correlacionam-se significativamente com primeiro componente, entre 89,1% e 99,7% e contribuem para a compreensão (entre 68,1% e 86,3%), com exceção de T1P1 que se mostrou muito abaixo dos demais pontos (Tabela 10). O modelo por sua vez, bem como os fatores delimitados na análise de correspondência explicam 89,8% da variabilidade total do conjunto de dados (Figura 9).

Tabela 10 - Resumo das contribuições explicativas de cada fator na composição do Componente 1 e 2 da análise de simples correspondência.

			Componente 1		Componente 2	
Contribuição de	Componente	Qual ¹	Correlação	Contribuição	Correlação	Contribuição
Linha	pl (T1P1)	1,000	0,891	0,140	0,036	0,147
	mu (T1P2)	0,993	0,964	0,863	0,102	0,526
	bd (T1P3)	0,999	0,964	0,681	0,035	0,254
	cd (T1P4)	1,000	0,997	0,716	0,003	0,047

¹ Qual, ou qualidade do termo escolhido, é um número adimensional que varia entre 0 e 1, sendo que, quanto maior, melhor aproximação. É obtido por, $Q = d_{n^{\circ} \text{dim}}^2 / d_{\text{máx. dim}}^2$, ou seja, é a relação entre o quadrado da distância do ponto de origem do número escolhido de dimensões e o quadrado da distância a partir da origem, no espaço, definido pelo número máximo de dimensões (Dillon e Goldstein, 1984).

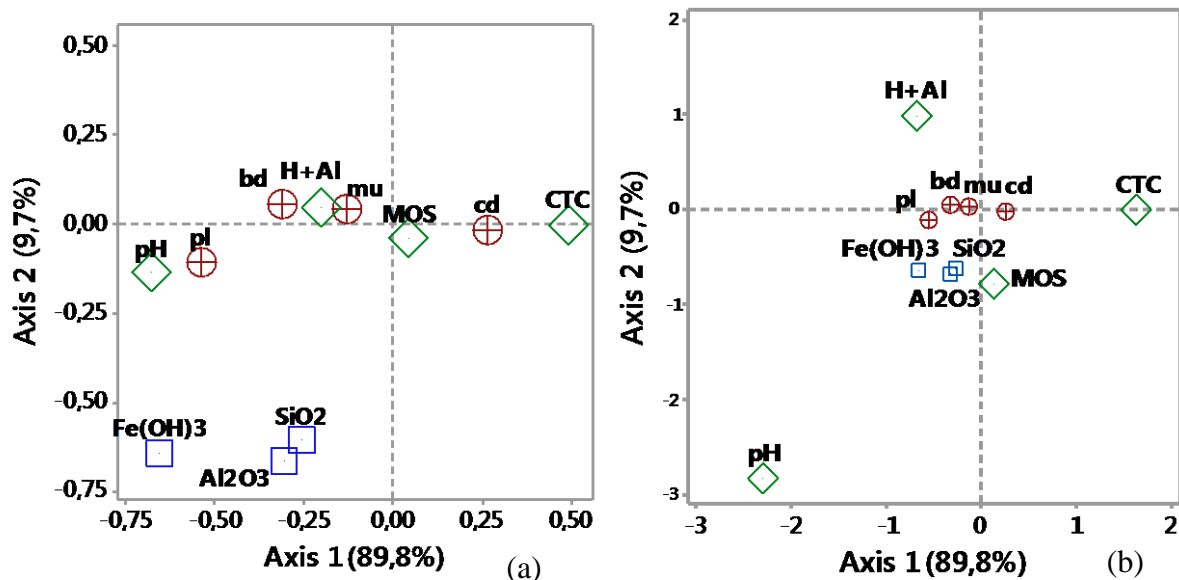
Fonte: O autor.

Em outras palavras, considerando os três parâmetros mais relevantes do complexo sortivo (MO, CTC e H+Al) para avaliação das variáveis de contraste (perfis topográficos) a projeção simétrica dos dados (Figura 10a), indica correspondência entre esses os primeiros em

relação à sequência (T1P2, T1P3, T1P4). Implica afirmar que a maior expressão dos atributos do complexo sortivo corresponde significativamente a essas áreas, e em conjunto são responsáveis por explicar quase a totalidade de variação dos dados.

Considerando-se que sobre os latossolos pode atuar outra via de alteração, tipicamente hidromórfica, os dados apresentados na Figura 10a indicam os resultados mais nítidos na sequência envolvendo o platô (T1P1) diferentemente dos outros contrastes com algum grau de hidromorfia (T1P2, T1P3 e T1P4). É importante ressaltar a semelhança quanto ao comportamento e correspondência na sequência murundu-depressão. O platô, no entanto, não contribui significativamente nos dois componentes, e possui um comportamento oposto e distante dos outros pontos na catena, conforme disposto na Figura 10a, em função principalmente da diferenciação desse ambiente quanto à melhor condição de drenagem.

Figura 10 - Projeção simétrica (a) e assimétrica (b) de dados contingentes dos óxidos totais (SiO_2 , Al_2O_3 e $\text{Fe}(\text{OH})_3$) em relação à topografia (bd, cd, mu, pl), e os teores de MOS (dag kg^{-1}), e valores de CTC e H+Al (mmolc dm^{-3}) e pH (em CaCl_2).



Fonte: O autor.

Em uma compreensão assimétrica dos dados (Figura 10b), percebe-se maior correspondência entre os fatores que compõem os indicadores do complexo sortivo

(agrupados) e as áreas representadas pelos ambientes com algum traço de hidromorfia (mu, T1P2) ou tipicamente hidromórficos (bd, T1P3; cd, T1P4). Considerando os dois quadrantes superiores da figura, de maior expressão dos dois componentes, como critério de maior correspondência, o grupo – centro da depressão, murundu e borda da depressão – é o que mais se aproxima dos teores de MOS, e valores de CTC, H+Al. A assimetria observada a partir do conjunto de dados, confirma que há maior correspondência entre esses dois contrastes e os indicadores do complexo sortivo.

As concentrações dos óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$) apresentaram baixa correspondência com os todos os outros fatores, no modelo estatístico. Esse caráter dos óxidos é também observado na Figura 10b, que avalia a projeção assimétrica de um contraste em relação aos demais. Nesse modelo, os valores de pH destoam da distribuição de correspondência dos demais fatores e entre os contrastes, e inversamente, o grupo (*cd*, *mu*, *bd*) com maior correspondência em relação ao contraste MOS, CTC e H+Al.

De modo geral, a análise de correspondência indica que as áreas sob atividade hidromórfica são mais responsivas à expressão dos teores (e aqui compreendidos como indicadores) de matéria orgânica e valores de CTC, principalmente. A dinâmica nesses ambientes, que favorece o acúmulo de materiais orgânicos e aumento no complexo de cargas são determinantes se comparado ao comportamento desses mesmos indicadores em solos bem drenados (platôs).

Entretanto, o modelo não foi suficiente para identificar alguma correspondência desses contrastes (perfis topográficos e complexo sortivo) e os principais teores dos óxidos avaliados na pesquisa. Apesar desse grupo compor um espectro suplementar no escopo da análise, a correlação e contribuição para a compreensão e explicação dos componentes 1 e 2, a assimetria avaliada na projeção não permite considerações e análise conjunta com os demais fatores ou contrastes.

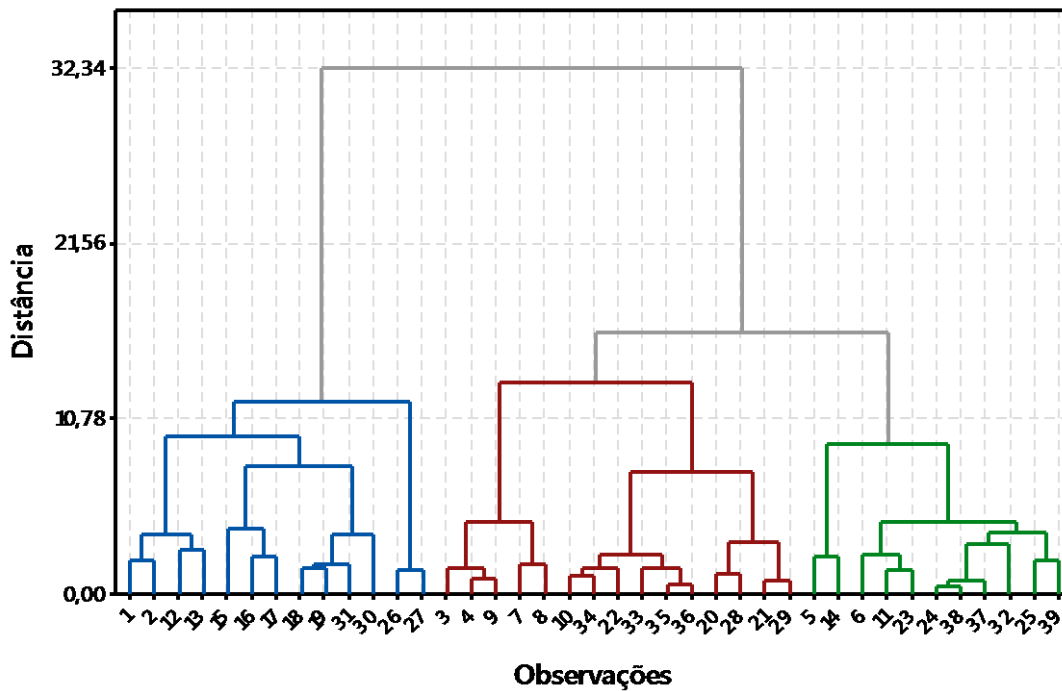
3.4 ANÁLISE HIERÁRQUICA DO COMPLEXO SORTIVO, ÓXIDOS TOTAIS E AS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Um importante parâmetro na análise multivariada consiste em hierarquizar os fatores de interesse ou cada uma das observações, com intuito de obter a distância ou similaridade entre os agrupamentos (*cluster*) e por fim, tomar esse procedimento como relevante para investigar a atuação desses mesmos fatores, na determinação de características específicas no ambiente de estudo.

Portanto, foram consideradas na análise de *cluster*, a mesma composição de variáveis originais descritas no Quadro 1, como critério de agrupamento. Optou-se pelo método de agrupamento descrito por Ward e o critério de similaridade, estimado por meio da distância Euclidiana. Foi especificado ainda, a partição final em três grupos (mínimo, referindo-se à natureza das variáveis), e que o gráfico demonstre a distância entre os grupos e não a similaridade, para melhor compreensão metodológica.

De acordo com a Figura 11, as observações foram agrupadas em três *clusters*, com cerca de 10,8 do centroide. Entretanto o primeiro cluster distingue-se dos outros dois, ao nível de 32,34 do centroide. As marcações de *cluster* foram inseridas no banco de dados, para melhor identificação de cada observação e assim, caracterizá-las quanto aos critérios de topografia e profundidade.

Figura 11 - Dendograma (diagrama de árvore) das observações individuais a partir de doze principais variáveis referentes à fração granulométrica, complexo sortivo e óxidos totais.

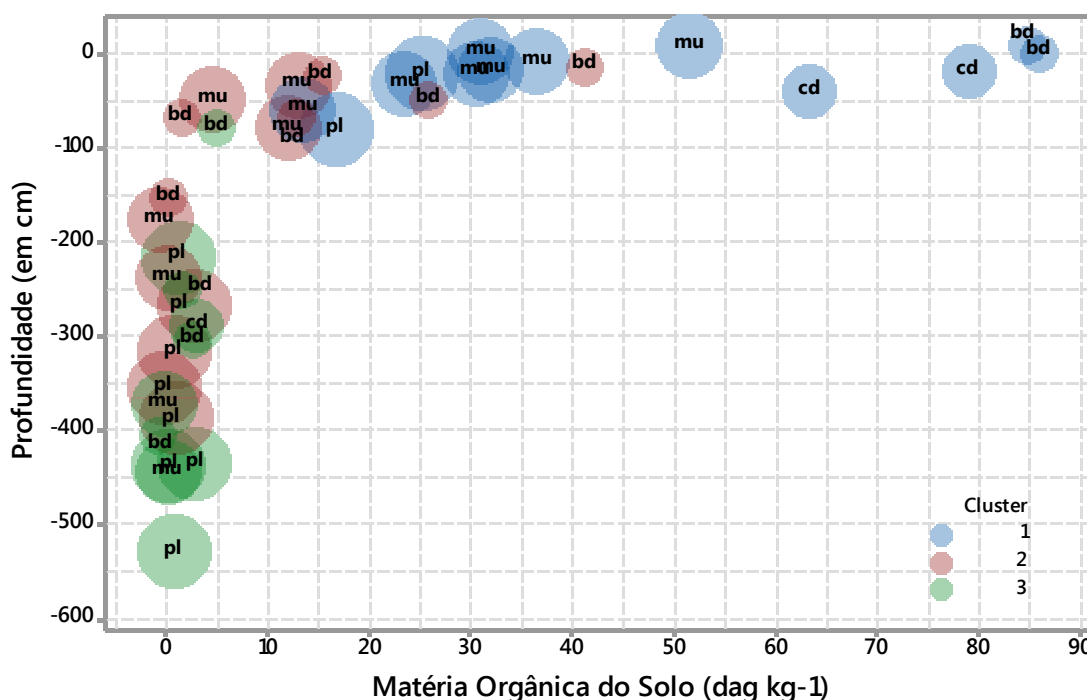


Fonte: O autor.

Baseando-se nas marcações dos *clusters* obtidos é possível segmentar as análises dos principais parâmetros de interesse, considerando o perfil topográfico e das faixas de profundidades. O parâmetro matéria orgânica do solo (MOS), que varia sensivelmente em função da profundidade, apresentou teores diferentes quando segmentado por cada *cluster*. Os maiores teores de matéria orgânica estão relacionados principalmente ao *cluster* 1 e, à medida que se aprofundam no perfil, também variam à ponto de se diferenciar em outros dois *clusters*.

Esse modelo é um importante critério na diferenciação dos *clusters*, indicando que além dos processos já conhecidos de acúmulo de matéria orgânica superficial em relação aos estratos em subsuperfície, outras atividades são determinantes, no caso da catena em estudo, para que haja incremento nos teores desse indicador nas bordas (bd) e centro de depressão (cd), e principalmente nos murundus (mu), ao longo do perfil estudado (Figura 12).

Figura 12 - Distribuição espacial dos teores de matéria orgânica do solo (dag kg^{-1}), em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de *clusters*.



Fonte: O autor.

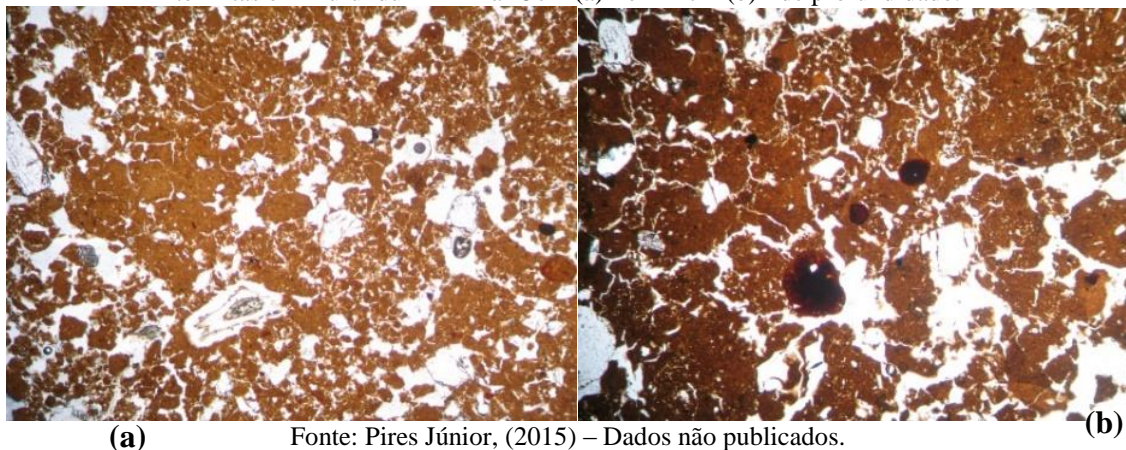
Ainda sobre essa questão, referente à distribuição espacial dos *clusters* em função das trincheiras (T1P1 – platô; T1P2 – murundu; T1P3 – borda da depressão; T1P4 – centro da depressão), observa-se três importantes conformações quanto ao ambiente estrutural, de acordo com a Figura 12. A representatividade da matéria orgânica em relação aos estratos de profundidade (a maior ou menor representatividade está representada pela proporção do tamanho das bolhas), demonstra que no murundu (T1P2) e no Latossolo (T1P1), é mais acentuada em todos os estratos do perfil, compatível com o desenvolvimento de solos em ambiente oxidante e bioturbado.

Um segundo ponto relevante nessa análise é considerar que o *cluster* 1, que agrupa feições topográficas com maior acúmulo de matéria orgânica nos horizontes superiores à 100 cm, seja majoritariamente, cerca de 53% das observações, representado na trincheira (T1P2;

murundus). O terceiro aspecto ressalta a extensão ao longo do horizonte, de modo visualmente representativo, quanto à formação de um *continuum* entre os horizontes superficiais e os horizontes manchados.

Esse último tópico permite considerar a atividade biológica intensa – bioturbação por térmitas – especialmente nos horizontes superiores aos horizontes plúnticos e hidromórficos, como responsáveis pelas alterações profundas estruturais e de rejuvenescimento dos perfis lateríticos em ambientes tropicais (TARDY, 1993; DONOVAN et al., 2001), especialmente em solos com algum impedimento natural à drenagem. O resultado é a formação de horizontes compostos por microagregados de solo, devido à atividade dos térmitas, favorecendo a drenagem interna do perfil, em contraste com as estruturas macroagregadas (Figura 13).

Figura 13 - Fotos de microscopia óptica indicando a formação de matriz microagregada do solo produzida por térmitas em murundu - T1P2 à 15cm (a) - e - 44cm (b) - de profundidade.

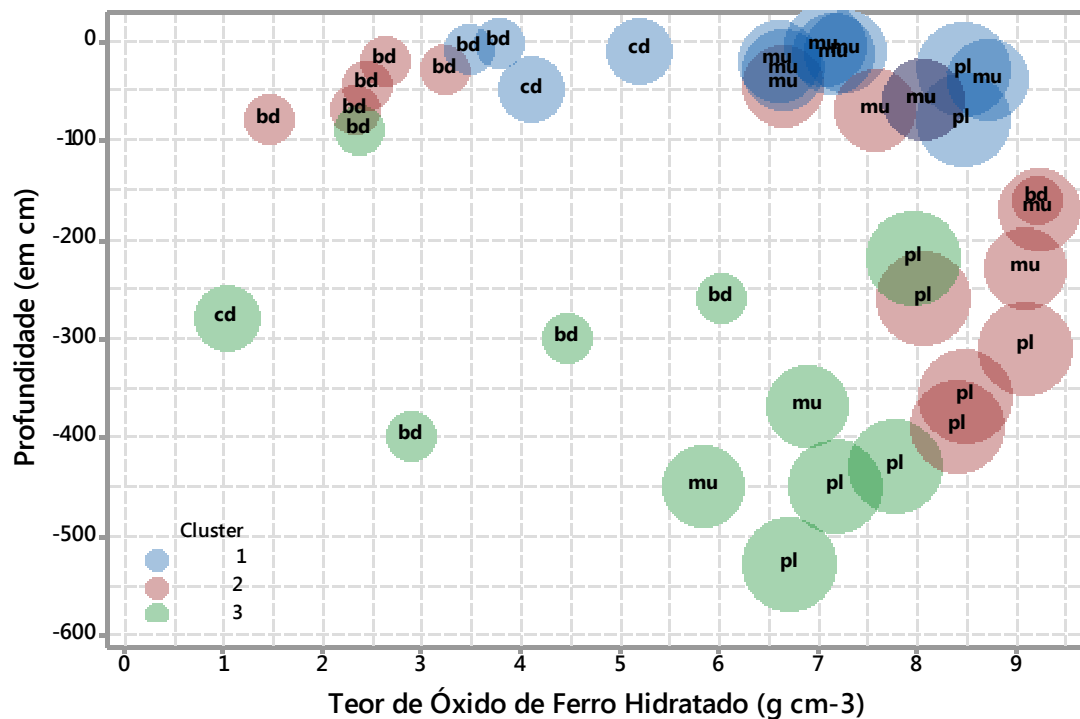


Fonte: Pires Júnior, (2015) – Dados não publicados.

Quando plotada a disposição gráfica dos *clusters* utilizando-se a variável teor de óxido de ferro hidratado ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), observa-se uma nítida diferenciação entre o *cluster* 1 e o *cluster* 3. Enquanto o primeiro, organiza as observações referentes aos horizontes superiores à 100cm, o *cluster* 3, limita-se às observações em horizontes inferiores à 200cm (Figura 14).

Nas faixas mais elevadas dos teores de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ($3,0$ à $9,0 \text{ g cm}^{-3}$), a trincheira T1P2 (murundus) é responsável por cerca de 60% das observações, inclusive com maior representatividade (bolhas maiores). Nesses ambientes, o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ está ligado com o horizonte manchado nodular e, em geral, sugere a tendência de diminuição progressiva no sentido topo-base do perfil.

Figura 14 - Distribuição espacial dos teores de Óxido de Ferro Hidratado – $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (g cm^{-3}), em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de *clusters*.



Fonte: O autor.

Essa ponderação acerca dos ambientes de murundus corrobora com os resultados obtidos considerando o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e os teores de matéria orgânica, em ANOVA. Especificamente para ambientes submetidos à alternância de condições oxidativas e redutoras, a oxidação da matéria orgânica nos períodos secos favorece o acúmulo do ferro em superfície.

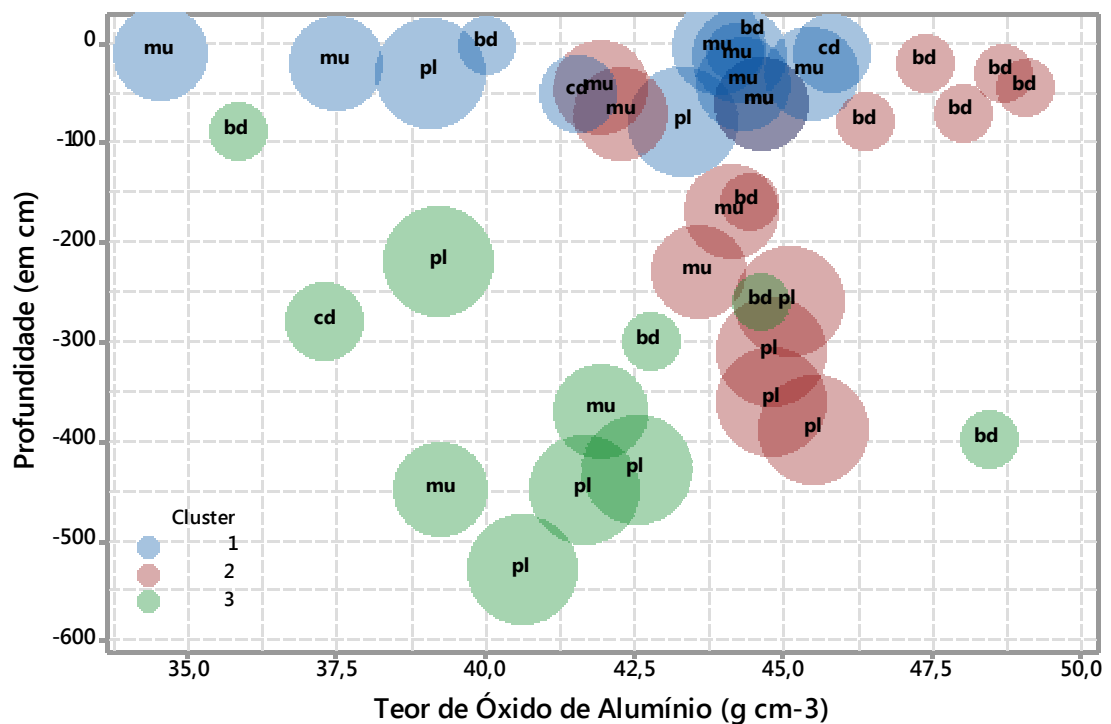
(BREEMEN, 1988). O transporte e acúmulo de matéria orgânica em ambiente temporariamente redutor, nas camadas superiores, associado à oxidação do Fe^{+3} à partir de Fe^{+2} reduzido, intensificado pela atividade biológica, propiciam as ligações organominerais e a formação de concreções de ferro ligado à nódulos impregnados de matéria orgânica. (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989; SOLLINS; HOMANN; CALDWELL, 1996).

Percebe-se ainda, de acordo com a Figura 14, a menor expressão do teor de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (entre 2 e 4 g cm^{-3}) nos ambientes tipicamente hidromórficos (T1P3 – bd; T1P4 – cd). Nas áreas de bordas da depressão, os teores mais elevados são observados no topo do perfil (entre 1 e 4 g cm^{-3}), reduzindo sensivelmente próximo à 100cm (2,0 g cm^{-3}), determinado no horizonte cinza claro. Na medida em que direciona para as trincheiras centrais da depressão (T1P4), os teores de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ são ainda mais reduzidos (próximos à 1,0 g cm^{-3}), caracterizando-se por horizontes brancos e desferruginizados.

Já nos horizontes inferiores (> 200 cm), considerando o mesmo espectro de teores de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, as trincheiras T1P1 (platô) compõe cerca de 53% das observações, e também com maior representatividade em relação aos demais perfis topográficos. Aliás, avaliando-se o conjunto total de dados, os teores mais elevados (não inferiores a 6 g cm^{-3}) e homogêneos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ são observados no perfil T1P1.

Os solos considerados no estudo são em geral, fortemente aluminosos e, quando comparados com os gradientes do SiO_2 e o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ das trincheiras, apresentam globalmente as menores variações máximas e mínimas (entre 35 e 48 g cm^{-3}). Quando comparadas as médias, os resultados são ainda mais próximos entre as trincheiras, ou seja, 43 g cm^{-3} em T1P1, 47 g cm^{-3} em T1P2, 44 g cm^{-3} em T1P3, e 48 g cm^{-3} em T1P4, e ao que parece, denota um aumento da base (horizontes de alteração mais profundos) para a superfície, especialmente em subsuperfície (Figura 15).

Figura 15 - Distribuição espacial dos teores de Óxido de Alumínio – Al_2O_3 (g cm^{-3}), em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de *clusters*.



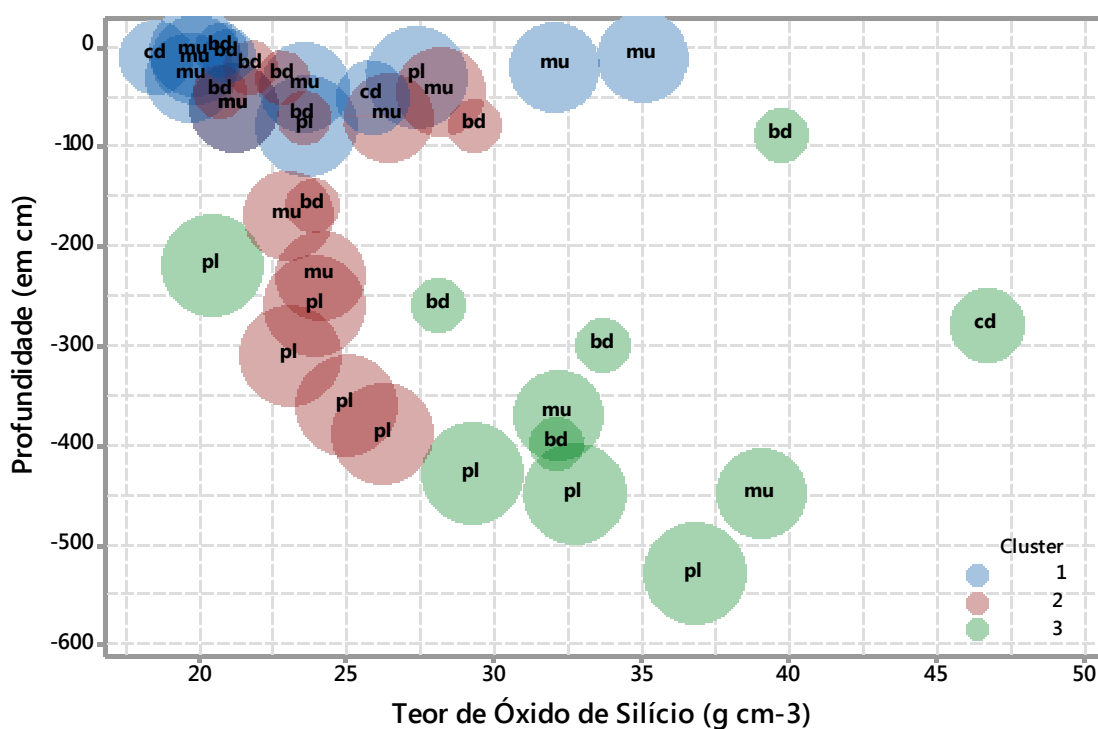
Fonte: O autor.

As demarcações dos clusters, para os teores de Al_2O_3 sugerem agrupamentos em torno dos horizontes, no sentido superfície (*cluster 1*) para subsuperfície até base (*clusters 2 e 3*, respectivamente). A trincheira T1P2 (murundus) representa cerca de 62% das observações agrupadas no *cluster 1*, enquanto que T1P3 e T1P1, compõem aproximadamente 45% e 38% das observações agrupadas nos *clusters 2 e 3*, respectivamente.

Para os ambientes melhor drenados (platôs), a dinâmica mais uniforme ao longo do perfil, pode estar relacionada com a formação de solos em meio à intensa hidrólise que induz à formação de gibbsita. Já nos perfis hidromórficos e drenagem mais lenta, a presença de matéria orgânica ácida pode complexar o Al que se desloca para a subsuperfície, conforme observado nos perfis T1P2, e mais nitidamente em T1P3 e T1P4.

Em relação ao SiO_2 , a amplitude dos teores em função dos perfis topográficos é acentuada, variando de 12 à 48 g cm^{-3} . Os agrupamentos, do mesmo modo que para $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e Al_2O_3 , respaldam-se nos perfis dos horizontes, sendo o *cluster* 1, concentrando-se no topo e os *clusters* 2 e 3, agrupando as observações no sentido da base do perfil (Figura 16). No entanto, as maiores concentrações de grupos topográficos estão direcionadas nas primeiras camadas do solo (até 50 cm), e com a tendência inversa em relação aos demais óxidos; ou seja, o enriquecimento de SiO_2 , se dá em geral, do topo para a base.

Figura 16 - Distribuição espacial dos teores de Óxido de Silício – SiO_2 (g cm^{-3}), em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de *clusters*.

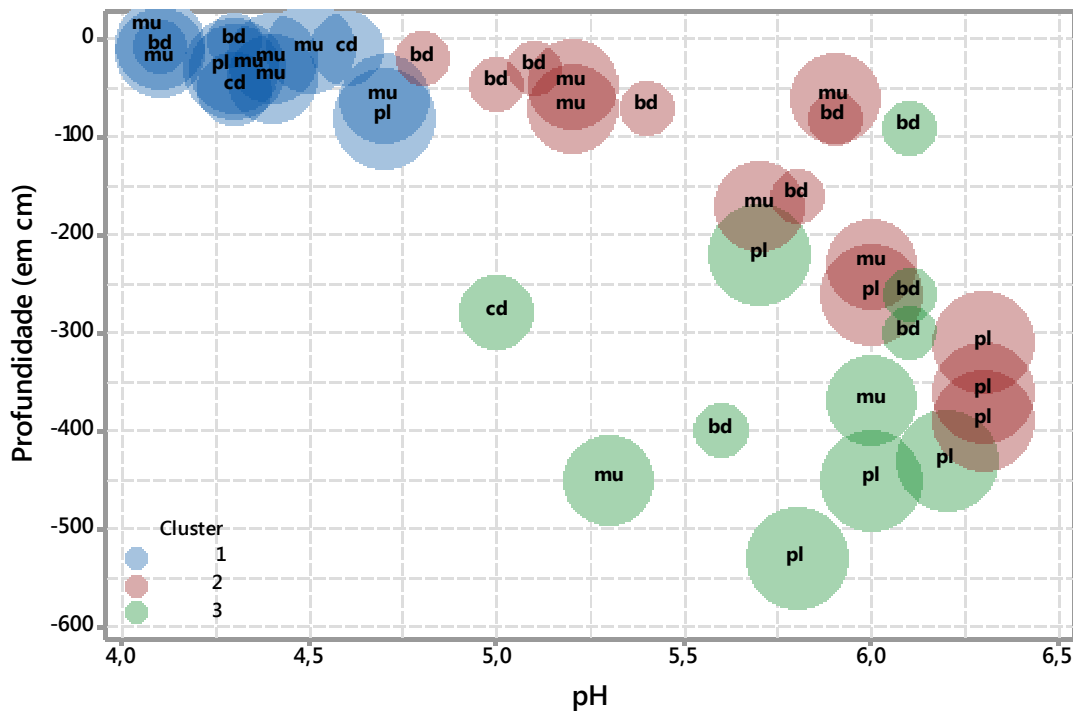


Fonte: O autor.

Portanto, pode-se afirmar que o aumento do ferro no nível concrecionário é acompanhado da diminuição da sílica, indicando que as etapas de dessilicificação (que ocorrem de modo bastante acentuado e generalizado) são anteriores à concentração ferruginosa em meio ácido. Dessa forma, o aumento nos teores de SiO_2 em subsuperfície,

acompanha ligeiramente a diminuição da acidez ativa do solo (Figura 17), enquanto que, na presença de pH mais ácido (4,0 – 4,5), predomina maiores concentrações de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e Al_2O_3 .

Figura 17 - Distribuição espacial das faixas de pH (em CaCl_2) em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de *clusters*.



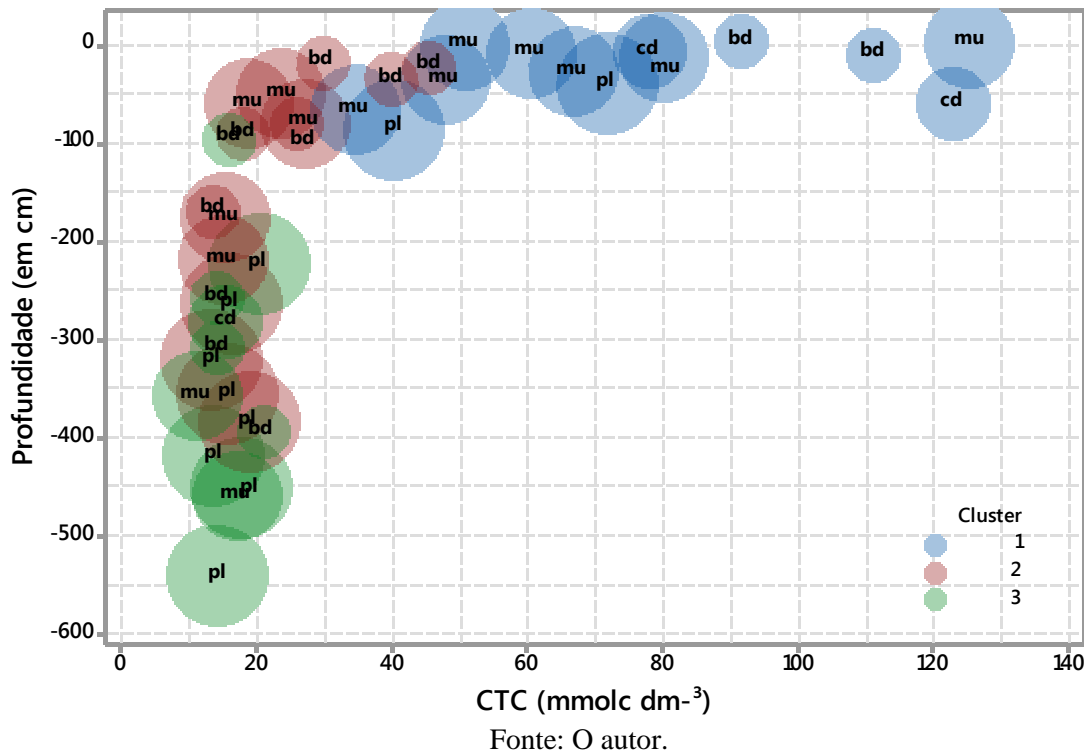
Fonte: O autor.

Ressalta-se ainda, que nos perfis mais hidromórficos (T1P3, T1P4, incluindo T1P2) a dessilicificação é mais acentuada que nos ambientes de melhor drenagem, especialmente comparando-se com T1P1. Em geral, pode-se associar essa dinâmica à possível formação de gibbsita em solos lateríticos muito antigos e ácidos.

A variação do complexo de cargas nos solos estudados (conforme demonstrado na Figura 18) é similar ao comportamento dos teores de matéria orgânica (Figura 12). A semelhança é bastante peculiar em solos do Cerrado, em função da dependência da matéria orgânica nesses ambientes quanto à origem de cargas negativas no solo, exercendo um papel

fundamental no equilíbrio das relações e dinâmica bioquímica nesse bioma (TIESEN et al., 1994; SOLLINS et al., 1996).

Figura 18 - Distribuição espacial das faixas de CTC (em mmolc dm^{-3}) em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de *clusters*.

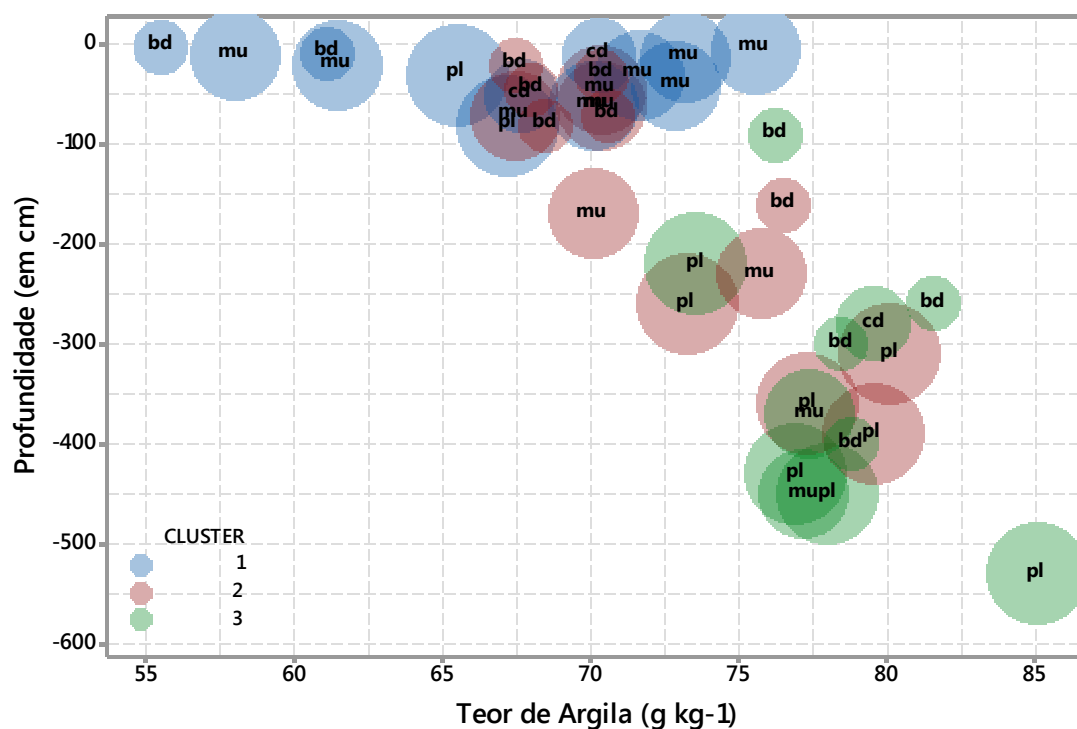


Considerando o argumento de agrupamentos, os *clusters* foram descritos sob o critério da variação do complexo de cargas em função dos horizontes, decrescendo abruptamente no perfil, à partir de 60cm. A maior representatividade no *cluster* 1 (valores mais expressivos de CTC e restrito às camadas superiores) refere-se à trincheira T1P2 (murundus), com cerca de 54% do total das observações pertencentes ao grupo. Esse aspecto reforça ainda mais a possibilidade de que a atividade biológica intensa nesse ambiente seja capaz de alterar e diferenciar profundamente o perfil laterítico em relação à extensão completa do regolito.

A feição microtopográfica atribuída à atividade de térmitas ao longo do perfil dessa trincheira corresponde à formação de microagregados os quais favorecem a drenagem interna do perfil, possibilitando a diferenciação dos indicadores químicos do complexo sortivo. Especificamente quanto à CTC, o aumento é de 15% em relação às áreas hidromórficas (T1P3 e T1P4), chegando a 72,6% se comparados à média observada em T1P1.

Quanto à textura, todos os horizontes descritos são predominantemente argilosos, compactos, coesos e não plásticos. Entretanto, percebe-se uma diminuição gradativa do teor de argila no sentido das áreas hidromórficas, principalmente na profundidade de 0-100cm (Figura 19).

Figura 19 - Distribuição espacial dos teores de argila (g kg^{-1}) em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de *clusters*.

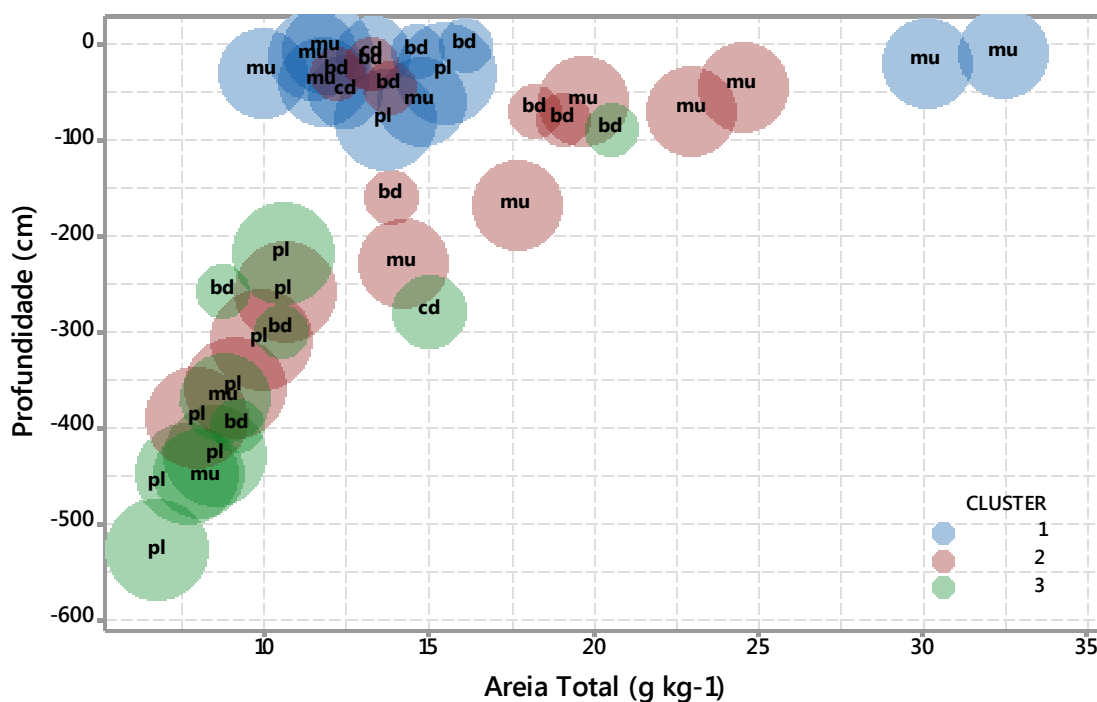


Fonte: O autor.

Neste estrato, cerca de 90% do total de observações referem-se ao cluster 1 e 2 e compreendem as faixas de maior perda desse material, no sentido murundu-depressão (T1P2 > T1P3 > T1P4). A trincheira T1P2 (murundus) representa isoladamente, cerca de 58% do total de observações que compõe o cluster 1, delimitando uma faixa de teores esparsos de argila (55 à 75 g kg⁻¹) e restrito às camadas superiores (Figura 19).

Nos estratos de profundidade inferiores à 100 cm, observa-se uma tendência de aumento gradativo nos teores de argila, mais pronunciado na trincheira T1P1 (platô) e bem segmentado para o cluster 3 e 2. Obviamente, as faixas mais restritas dos teores de areia total (entre 5,0 e 12 g kg⁻¹), nesse mesmo estrato de profundidade, correspondem justamente a área de platô, que representa em torno de 65% do total de observações (Figura 20).

Figura 20 - Distribuição espacial dos teores de areia total (g kg⁻¹) em relação ao perfil topográfico (bd, cd, mu, pl) e em profundidade, segmentado pelos níveis de *clusters*.



Fonte: O autor.

O resultado da remoção gradativa de argila nos estratos dos horizontes superficiais nas áreas de murundus é a caracterização de perfil com uma matriz mais arenosa. De acordo com a Figura 20, a faixa entre 20 e 35 g kg⁻¹ de areia total é composta em sua totalidade por pontos das trincheiras com algum traço de hidromorfia (como observado – bd e mu).

A hidromorfia, que é um fator determinante nesse contexto, associada ao aumento da acidez provocada pelos ácidos orgânicos em ambiente saturado (conforme observado na Figura 12) resulta na dissolução do argilomineral. A argila pode ser desestabilizada e migrar com a água, pelas redes internas de drenagem como observado na trincheira T1P2, permitindo que matriz textural das trincheiras no sentido murundu-depressão seja mais arenosa que em T1P1.

3.5 MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE RESPOSTAS DOS COMPONENTES GEOQUÍMICOS E OS PERFIS TOPOGRÁFICOS

A partir das análises e resultados obtidos e baseando-se nas propostas dos modelos regressivos e multivariados foi possível identificar os principais comportamentos físico-químicos que estão envolvidos na catena estudada, envolvendo a transição entre o Latossolo (platô) e o Gleissolo (depressão topográfica). O desdobramento dos dados coletados, inserindo as informações referentes aos perfis topográficos e de profundidade, contribuíram para demonstrar numericamente a dinâmica dos principais indicadores bioquímicos no ambiente que foi inicialmente considerada nos estudos de campo e nos resultados das análises de laboratório.

Entretanto, o interesse desta pesquisa, vai além desses aspectos, ou seja, pretendeu-se avaliar a capacidade de resposta (máxima e mínima) do ambiente, a partir de alguns parâmetros estabelecidos. Portanto, o intuito é o de elucidar a(s) provávei(s) faixa(s) ótima(s)

do teor de matéria orgânica, considerando entre duas variáveis dependentes e distintamente para cada perfil topográfico. Consequentemente, demonstrar em qual(is) condição(ões) e aspecto(s) topográfico(s), obtém-se a máxima expressão da variável resposta (matéria orgânica).

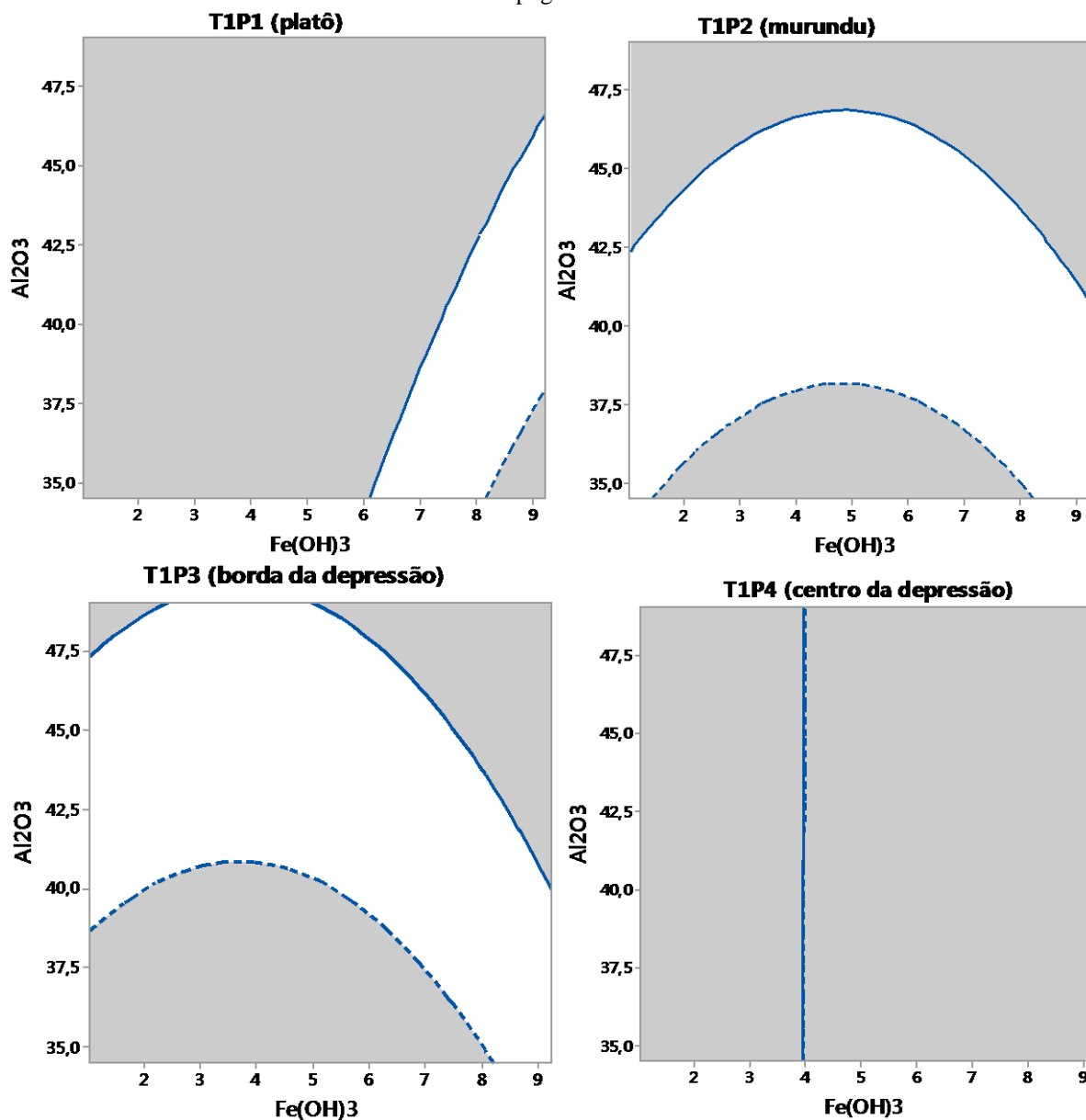
Baseando-se nos modelos matemáticos de otimização, as respostas obtidas podem indicar uma condição maximizada de fertilidade da catena a partir de sua compartimentação, contribuindo para compreender os processos que podem sustentar esse atributo. Nesse sentido, duas linguagens gráficas são importantes para elucidarem essas questões de interesse: os gráficos de contornos e sobreposição (*overlaid contour plot*) e os gráficos de otimização de resposta (*response optimizer plot*).

Os gráficos de contornos e sobreposição (OCP) permitem delinear o modelo de resposta como uma superfície bidimensional, no qual todos os pontos que têm o mesmo valor ajustado estão ligados para produzir linhas de contorno constantes. As interações nessa linguagem são úteis para o estabelecimento de condição das variáveis, capaz de gerar valores de resposta desejáveis. Ao final, pretende-se identificar visualmente uma área ótima comum entre as várias respostas.

Portanto, convencionou-se como variável resposta os teores de matéria orgânica para todas as possíveis saídas de dados, fixando-se a média do teor de SiO_2 , com intuito de avaliar as faixas de Al_2O_3 e $\text{Fe}(\text{OH})_3$ para cada perfil topográfico, nas quais se obtém a melhor combinação da variável resposta. Os gráficos de sobreposição e contorno estão agrupados na Figura 21.

As plotagens dos contornos e sobreposições foram organizadas sequencialmente, conforme o perfil topográfico. As áreas em branco dos gráficos referem-se às melhores combinações entre as duas variáveis (óxidos de ferro e alumínio), para cada ambiente seccionado, quanto à expressão dos teores de matéria orgânica.

Figura 21 - Distribuição de contornos e sobreposição de faixas de melhor resposta dos teores de Matéria Orgânica do Solo (em dag kg^{-1}), contrastando com os teores de Fe(OH)_3 e Al_2O_3 (em g cm^{-3}), para os perfis topográficos.



Nota: As faixas limítrofes para os teores de matéria orgânica adotadas foram de 5,0% (linha superior contínua) e 48% (linha inferior tracejada). Foi mantido o teor fixo de SiO_2 , em torno de 26,7% (média geral do parâmetro).

Fonte: O autor.

Sendo assim, as melhores e mais expressivas combinações para os intervalos simulados para os teores de óxidos, foram obtidas em T1P2 (murundu) e T1P3 (borda de depressão), e menos abrangente em T1P1 (platô). Para T1P4 (centro de depressão) não foi

possível obter uma combinação entre os teores de óxidos de ferro e alumínio, capaz de demonstrar um intervalo satisfatório de teores de matéria orgânica (Figura 21).

Uma interpretação aproximada sugere que dificilmente, tomando-se as condições geomorfológicas descritas na trincheira T1P4 pode-se obter expressões ideais dos teores de matéria orgânica. Em outras palavras, não foi possível estabelecer parâmetros, baseando-se nos teores dos óxidos avaliados, quanto à melhor condição de fertilidade do solo.

Nessa mesma linha de raciocínio, T1P2 (murundu) e T1P3 (borda da depressão), apresentam as melhores condições desejáveis para expressão dos teores de matéria orgânica. A forte semelhança entre as duas trincheiras indica que há características topográficas e geomorfológicas bastante compartilhadas. A atividade hidromórfica, o compartilhamento de redes de drenagem interna, o aspecto topográfico que dá a conotação de uma área representada pelo solo desenvolvido na transição entre o Glei e o Latossolo Amarelo.

Em T1P1, a faixa de melhor combinação para expressão dos teores de matéria orgânica entre as variáveis nos eixos x e y (óxidos de ferro e alumínio) é bastante estreita e deslocada para os teores mais elevados de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, porém extensa no sentido de Al_2O_3 . Essa condição é típica de ambientes bem drenados, onde prevalecem vias lateríticas com expressivas concentrações de ferro e alumínio (Figura 21).

Portanto, a maior estabilidade e homogeneidade dos horizontes nessas áreas contrastam com as mudanças estruturais e maior intensidade dos processos de desferruginização e dessilicificação, na medida em que se avança para os perfis T1P2 e T1P3. São nessas áreas que foram reconhecidas as matrizes hidromórficas, indicando nova via de evolução do material laterítico, que se observa maior dependência da matéria orgânica em relação ao ferro e alumínio residuais (Figura 21).

Entretanto, o aspecto da resposta otimizada (ROP) conjunta do ambiente em relação a expressão do teor de matéria orgânica, considerando os requisitos convenientemente ainda não está plenamente satisfeito. O interesse desta resposta é identificar a melhor combinação de fatores que propiciem a ótima capacidade de expressão de uma variável comum e de interesse na pesquisa.

Na otimização de respostas, com intuito de identificar a capacidade ideal de um sistema (convencionou-se a própria catena), baseando-se nos requisitos definidos para cada resposta é possível maximizar ou minimizar a resposta (teores de matéria orgânica do solo e CTC) e atingir um alvo (um teor especificado). No presente trabalho, foram adotadas 4 variáveis compostas (teores de SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e perfis topográficos conjuntamente) e 2 variáveis de resposta (CTC e matéria orgânica).

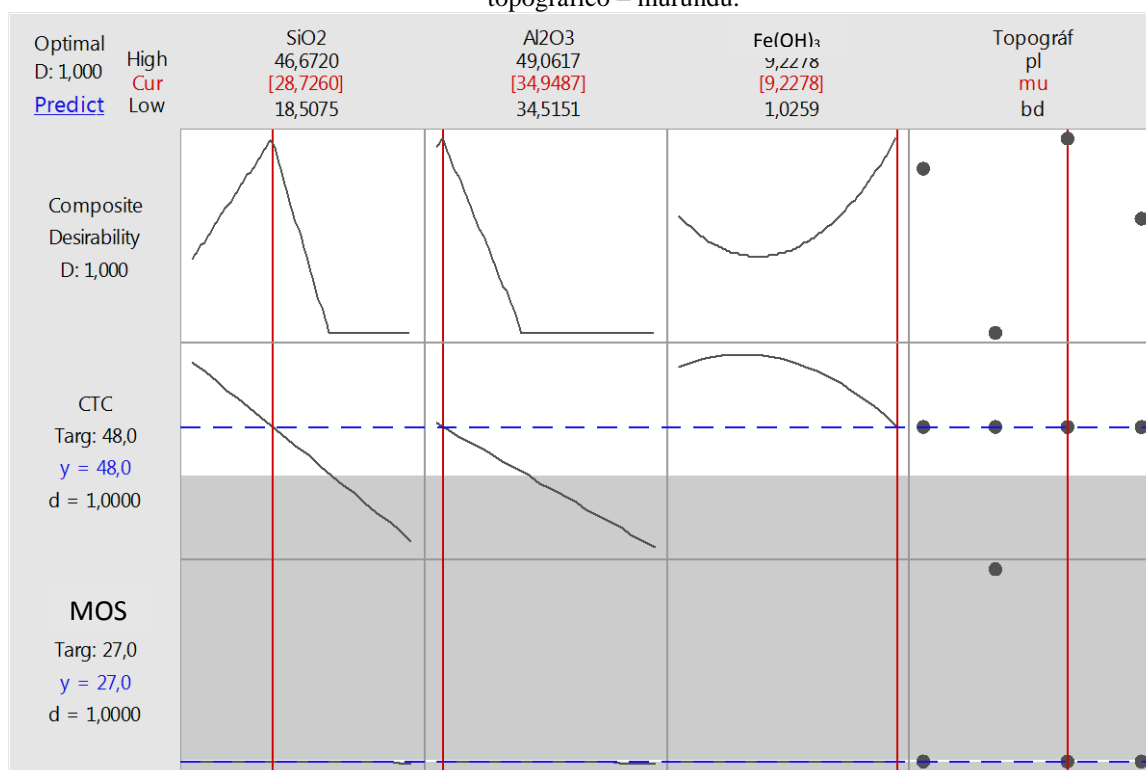
A saída de dados - o *desirability composite* - determina a combinação de um sistema de múltiplas respostas. Quanto mais próximo de 1,000 (*optimal*) melhor a combinação dos fatores individuais (analisados conjuntamente) e quanto menor esse indicador, pior a qualidade da combinação dos fatores analisados. Na Figura 22, estão descritos os fatores e os valores utilizados no modelo de otimização em que se obtém a melhor resposta para as variáveis CTC e matéria orgânica do solo (MOS).

Percebe-se nitidamente, que as melhores expressões dessas variáveis reposta são identificadas no ambiente de murundus, sob uma condição de mínima concentração de Al_2O_3 (34,9487%) e máxima concentração de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (9,2278%), considerando os valores de *cur* (curtose) para esses óxidos obtidos no banco de dados da pesquisa.

Observa-se, portanto, em função dos teores inversos de Al_2O_3 e $\text{Fe}(\text{OH})_3$ na condição de otimização de MOS e CTC, a conjugação e continuidade de uma fase de laterização com ferruginização seguida por outra determinada pela desferruginização e concentração aluminosa. Nas áreas de murundus, com a expressão de teores inversos (acúmulo de $\text{Fe}(\text{OH})_3$

e perda de Al_2O_3), percebe-se, de acordo com o modelo de otimização, a melhor condição geomorfológica para expressão dos teores de MOS e valores de CTC.

Figura 22 - Otimização da resposta dos teores de Matéria Orgânica do Solo (em dag kg^{-1}) e CTC (mmolc dm^{-3}) contrastando com os teores ótimos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 e SiO_2 (em g cm^{-3}), e a máxima feição do perfil topográfico – murundu.



Nota: A faixa-alvo para o teor de matéria orgânica é de 27,0% e para CTC é de 48 $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ (linhas azuis tracejadas). O fator D (composição desejável dos parâmetros) é otimizada quanto mais próxima de 1 (um) e fora dos limites aceitáveis, quanto mais próxima de 0 (zero).

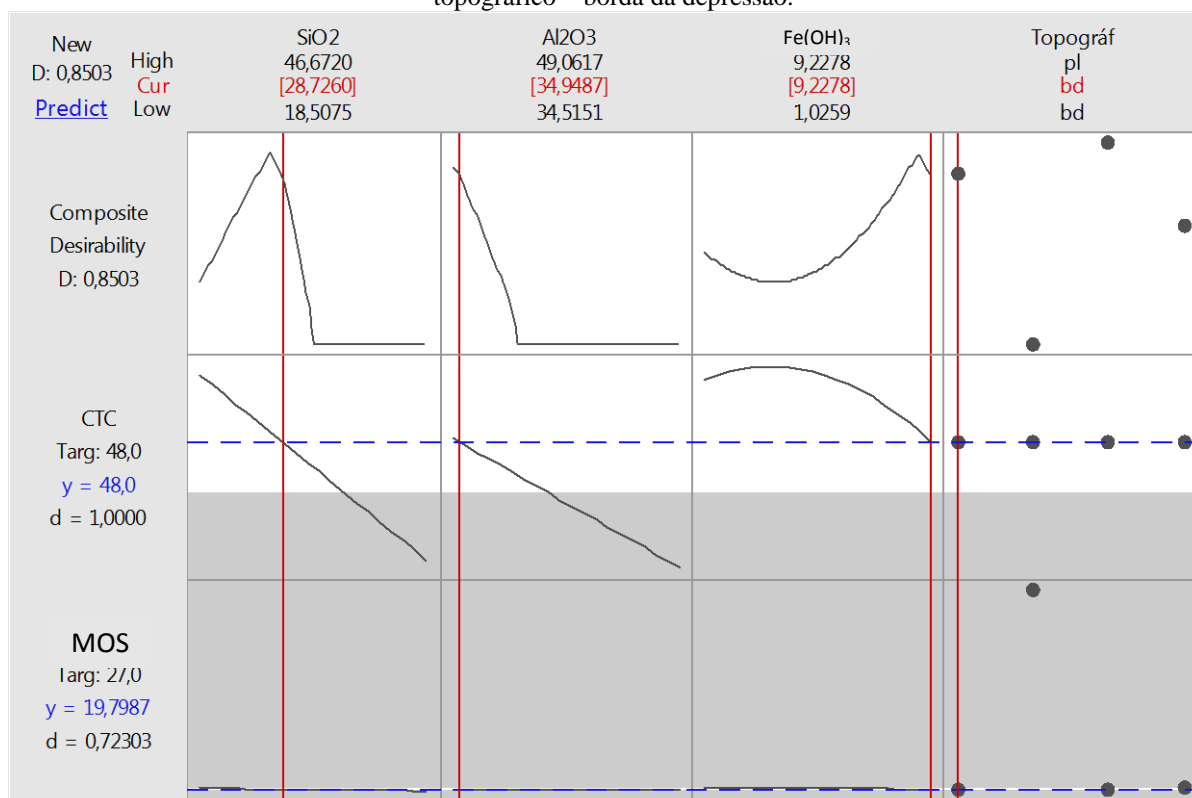
Fonte: O autor.

Por ser uma área de transição entre os solos Glei (submetidos à influência hidromórfica) e o Latossolo Amarelo, típico das áreas melhor drenadas do platô, os traços da hidromorfia e da atividade de bioturbação nesse ambiente (murundu, T1P2) são fundamentais para explicar o caráter dinâmico de heterogeneização do perfil e principalmente, de acumulação de matéria orgânica e incremento do complexo de cargas no solo.

Variando-se os aspectos topográficos e mantendo-se todas as demais variáveis constantes, apenas nas bordas de depressão (T1P3, *bd*) obteve-se resposta aproximada do

ótimo ($d = 1,000$) observado nas áreas de murundus (Figura 23), quanto à composição de variáveis ($d = 0,8503$) no modelo. A similaridade entre essas duas áreas, sob o ponto de vista geomorfológico e geoquímico e o caráter *continuum* de alteração do saprólito e formação da catena justificam o comportamento semelhante quanto à expressão máxima dos materiais orgânicos ao longo do perfil de solo.

Figura 23 - Otimização da resposta dos teores de Matéria Orgânica do Solo (em dag kg^{-1}) e CTC (mmolc dm^{-3}) contrastando com os teores ótimos de Fe(OH)_3 , Al_2O_3 e SiO_2 (em g cm^{-3}), e a máxima feição do perfil topográfico – borda da depressão.



Nota: A faixa-alvo para o teor de matéria orgânica é de 27,0% e para CTC é de 48 $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ (linhas azuis tracejadas). O fator D (composição desejável dos parâmetros) é otimizada quanto mais próxima de 1 (um) e fora dos limites aceitáveis, quanto mais próxima de 0 (zero).

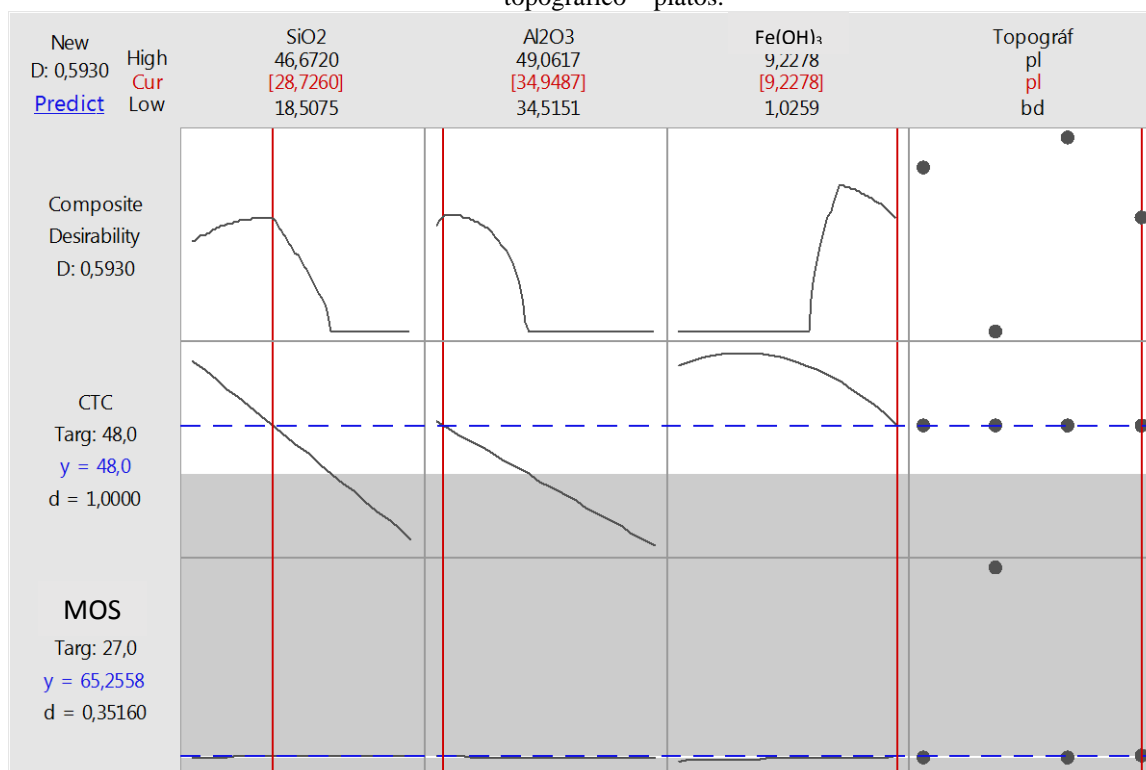
Fonte: O autor.

Como o processo de dessilicificação ao longo das trincheiras é bastante acentuada e contínua, o teor de SiO_2 , na faixa de maior expressão de MOS e CTC é bem próximo da média dos dados, ou seja, não é possível a partir desse modelo, estabelecer uma diferença significativa de perda ou acúmulo de SiO_2 , relacionada à otimização das variáveis resposta.

Portanto, em todas as trincheiras, ao longo do perfil topográfico, o teor de SiO_2 (*cur*) não foi determinante para que se estabeleça uma relação de confluência na resposta dos materiais orgânicos e complexo de cargas.

Nos demais perfis topográficos (platôs e centro da depressão), a qualidade estatística de resposta do modelo é bastante deteriorada. Na Figura 24, observa-se uma redução significativa na significância da composição do modelo de variáveis (teores de SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e platôs) como determinantes na resposta de MOS e CTC. Na saída de dados, percebe-se que a resposta obtida ($d = 0,5930$) está muito abaixo da otimização ($d = 1,000$).

Figura 24 - Otimização da resposta dos teores de Matéria Orgânica do Solo (em dag kg^{-1}) e CTC (mmolc dm^{-3}) contrastando com os teores ótimos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 e SiO_2 (em g cm^{-3}), e a máxima feição do perfil topográfico – platôs.



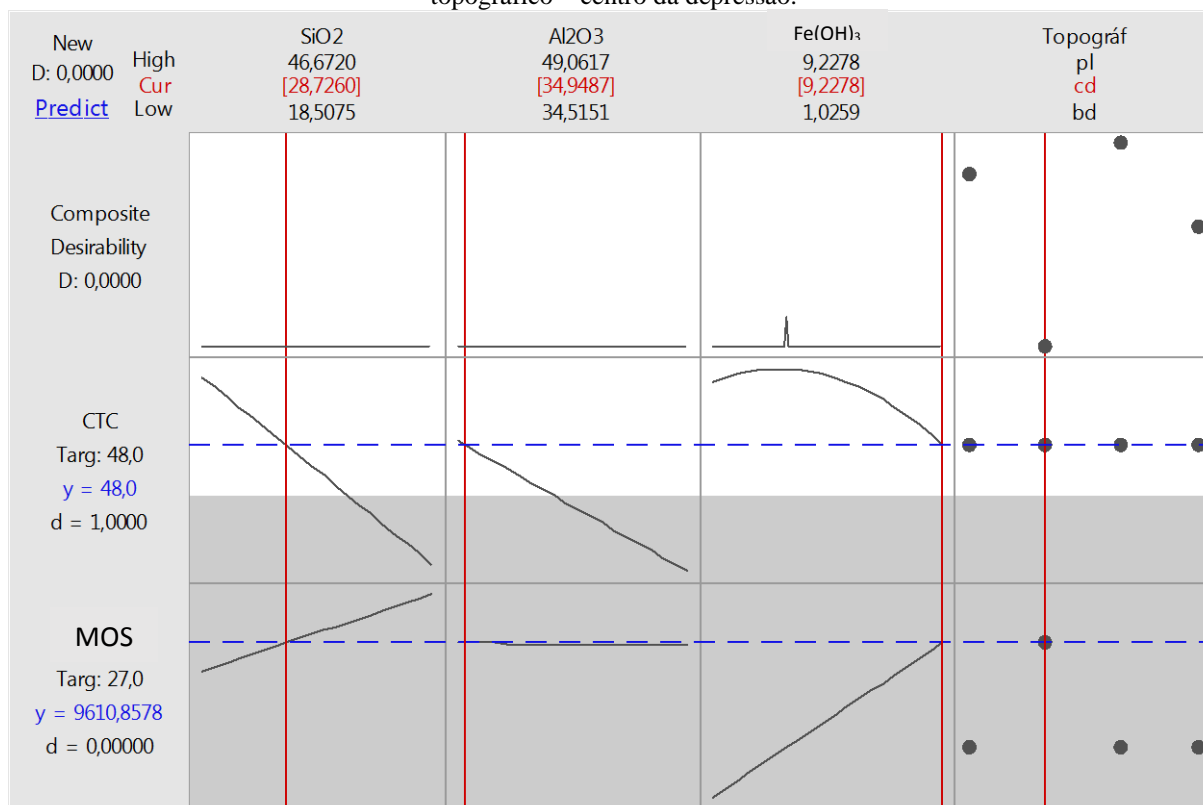
Nota: A faixa-alvo para o teor de matéria orgânica é de 27,0% e para CTC é de 48 $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ (linhas azuis tracejadas). O fator D (composição desejável dos parâmetros) é otimizada quanto mais próxima de 1 (um) e fora dos limites aceitáveis, quanto mais próxima de 0 (zero).

Fonte: O autor.

Entende-se que, em especial devido ao processo laterítico latossolizante, que favorece a concentração discreta de Fe e significativa de Al, não corrobora com os limites estabelecidos para otimização do modelo, que se traduz principalmente em acúmulo elevado de Fe. Desse modo, por se tratar de um ambiente de boa drenagem, e devido à presença de materiais cauliníticos, a resposta de otimização dos materiais orgânicos e complexo de cargas é muito baixa.

Dentre as trincheiras consideradas na pesquisa, o centro da depressão (*cd*) apresentou o menor valor possível ($d = 0,000$) de composição do modelo de variáveis como determinantes na resposta de MOS e CTC (Figura 25).

Figura 25 - Otimização da resposta dos teores de Matéria Orgânica do Solo (em dag kg^{-1}) e CTC (mmolc dm^{-3}) contrastando com os teores ótimos de Fe(OH)_3 , Al_2O_3 e SiO_2 (em g cm^{-3}), e a máxima feição do perfil topográfico – centro da depressão.



Nota: A faixa-alvo para o teor de matéria orgânica é de 27,0% e para CTC é de 48 $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ (linhas azuis tracejadas). O fator D (composição desejável dos parâmetros) é otimizada quanto mais próxima de 1 (um) e fora dos limites aceitáveis, quanto mais próxima de 0 (zero).

Fonte: O autor.

Observa-se que no ambiente centro da depressão, não há expressão dos compostos orgânicos e complexos de cargas, quanto à capacidade de resposta, mantendo-se constantes os teores de SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Nesse ponto, a avaliação conjunta da composição dos valores de conveniência dos óxidos praticamente não foi alterada, indicando que, no centro da depressão (*cd*), não se pode estabelecer um parâmetro entre as variáveis suficiente para compor um modelo de otimização da MOS e CTC.

Por se tratar de um ambiente com maior grau de hidromorfia e a nulidade quanto à capacidade de resposta frente aos anteriores já analisados nessa pesquisa, entende-se que, esse sim, o grau de hidromorfia, é um fator de diferenciação exclusiva do ambiente, desenvolvido à partir das feições topográficas. Em geral, a topografia é decisiva para a compreensão dos processos de acúmulo e dinâmica de materiais orgânicos e dos principais óxidos e de modo ainda mais nítido, em função da atividade hidromórfica.

CONCLUSÕES

O ponto de partida dessa pesquisa é a constituição geoquímica do solo em um campo de murundus preservado, e as dinâmicas e possíveis interações de indicadores químicos (complexo sortivo e óxidos totais) e físicos (aspectos texturais), com a abertura de trincheiras ao longo de uma catena, abrangendo a vertente e a depressão topográfica, o campo de murundus e a plataforma melhor drenada (platô).

Os modelos matemáticos adotados na pesquisa foram o regressivo linear generalizado (GLM - estatística ANOVA), o multivariado e o de simulação e otimização. O teor de matéria orgânica é a variável dependente ou resposta, em praticamente todos os modelos e saídas de dados. Em algumas análises particulares foram consideradas também o teor de carbono orgânico total do solo e a capacidade de troca catiônica (CTC) como um parâmetro comparativo.

A proposta de se desenvolver modelos matemáticos para os indicadores físico-químicos de uma catena no bioma Cerrado torna-se um desafio em função da complexidade das relações ambientais e respostas das variáveis analisadas em cada perfil topográfico, baseando-se nos parâmetros mais relevantes (matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, pH, carbono orgânico do solo).

Os resultados apresentados nesta pesquisa demonstraram que os campos de murundus são áreas com melhor conjunto de atributos geomorfológicos para expressão dos teores de MOS e valores de CTC, sob um parâmetro de mínima faixa de Al_2O_3 (34,9487%) e máxima faixa de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (9,2278%). Conclui-se que, os traços da hidromorfia e da atividade de bioturbação nos campos de murundus são imprescindíveis para a compreensão do caráter

dinâmico de heterogeneização do perfil e principalmente, de acumulação de matéria orgânica e incremento do complexo de cargas no solo.

Outro aspecto relevante quanto aos processos geoquímicos do solo nos campos de murundus, é a atividade biológica intensa (bioturbação), capaz de integrar processos físicos e bioquímicos e impor mudanças mineralógicas profundas em subsuperfície. O resultado dessa atividade é um processo dinâmico de desferruginização - acompanhando o grau de crescente de hidromorfia ao longo da sequência topográfica - e a formação de argilas aluminosas.

Essa estreita relação entre a bioturbação e a dinâmica dos processos geoquímicos nas áreas de murundus é notada na saída de dados do modelo linear generalizado e da análise de variância, principalmente na interação profundidade e topografia. Observou-se que, apesar de coeficiente menores (murundu *versus* profundidade), ao longo dos perfis nas trincheiras dessa área, os coeficientes obtidos foram mais uniformes que nas demais interações do ambiente. Conclui-se que, as diferenças nos teores de matéria orgânica nas áreas de murundus, em subsuperfície são bem menos bruscas que nas bordas (coeficientes negativos) e centro da depressão.

Quanto à espacialização, a partir dos modelos multivariados não hierarquizados, constatou-se maior correspondência entre os fatores que compõem os indicadores do complexo sortivo (agrupados) e as áreas representadas pelos ambientes com algum traço de hidromorfia (mu, T1P2) ou tipicamente hidromórficos (bd, T1P3; cd, T1P4). O platô, no entanto, não contribui significativamente, apresenta um comportamento oposto na análise de simples correspondência e distante dos outros pontos na catena, em função principalmente da diferenciação desse ambiente quanto à melhor condição de drenagem. Em outras palavras, a hidromorfia é um fator particular e de grande importância na diferenciação dos materiais lateríticos, condicionado pela topografia.

Nos modelos hierarquizados, o *cluster* que agrupa os pontos com maior teor de matéria orgânica, obteve maior representatividade da trincheira T1P2 (murundus) nas faixas mais elevadas dos teores de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (3,0% à 9,0%), reduzindo progressivamente no sentido topo-base do perfil, entre 2% e 4% nos ambientes tipicamente hidromórficos (T1P3 – bd; T1P4 – cd). O mesmo comportamento foi verificado quanto à CTC e pH, atingindo valores mais elevados nos pontos das trincheiras abertas no campo de murundus.

Nessa perspectiva e considerando o aspecto textural, percebeu-se diminuição gradativa do teor de argila no sentido murundu-depressão ($\text{T1P2} > \text{T1P3} > \text{T1P4}$), até a profundidade de 0-100 cm, já que esse material pode percolar e atingir estratos mais inferiores de profundidade. O resultado da remoção gradativa de argila nos estratos dos horizontes superficiais nas áreas de murundus é a caracterização de uma matriz mais arenosa.

Apoiando-se no conjunto de análises e modelos matemáticos, conclui-se que a interação dos aspectos geoquímicos e de bioturbação são determinantes para a caracterização e definição dos aspectos morfológicos dos murundus. Essa interação é bastante evidente no modelo de otimização e simulação, considerando dois importantes indicadores do complexo sortivo (MOS e CTC), teores dos óxidos (Al_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e SiO_2) e os aspectos topográficos avaliados na pesquisa. Apesar dos teores de MOS e valores de CTC obtidos nas tradagens de T1P2 (mu), não serem superiores aos observados nas demais trincheiras, a condição de máxima expressão desses indicadores está alinhada ao observado no campo de murundu (*optimal* = 1,000).

Especificamente na simulação (sobreposição de respostas), a semelhança entre os murundus e as bordas da depressão, quanto ao comportamento da relação $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e Al_2O_3 é bastante evidente. Essa conclusão aproxima-se muito do grau da otimização para as duas áreas, indicando compartilhamento de processos nos dois ambientes e semelhanças quanto à dinâmica geoquímica.

Em geral, as propostas metodológicas de construção dos modelos matemáticos puderam demonstrar respostas importantes no decorrer da pesquisa, principalmente quanto à interpretação das condições ótimas para expressão e atividade da matéria orgânica nas áreas de murundus. Outras constatações relevantes abrangem o comportamento físico-químico dos agrupamentos (*cluster*), e tendência de formação de uma matriz mais arenosa (comparando-se com a textura outras trincheiras), nos grupos assinalados como murundus (T1P2).

A fertilidade e dinâmica bioquímica das áreas de murundus são pilares importantes nos campos de murundus e ao mesmo preocupantes, diante de um cenário de expansão da agricultura e da pecuária extensiva no Cerrado. O que se espera, diante do avanço dessas atividades econômicas é um processo de degradação dos solos nessas áreas, acelerando a perda de argila nos horizontes superficiais, a desestabilização dos processos de bioturbação e de formação de agregados organominerais, com o revolvimento do solo e práticas usuais de manejo das culturas.

Desse modo, deve-se ressaltar a interação e dinâmica dos fatores biogeoquímicos nas áreas úmidas do Cerrado, como fatores fundamentais que sustentem as práticas de preservação e conservação dos recursos hidrológicos, ecológicos e geomorfológicos do bioma.

REFERÊNCIAS

- ABER, J. D.; MELILLO, J. M.; MCCLAUGHERTY, C. A. Predicting long-term patterns of mass loss, nitrogen dynamics, and soil organic matter formation from initial tine litter chemistry in temperate forest ecosystems. **Canadian Journal of Botany**, v. 68, out. 1990. p. 2201-2208.
- AGRESTI, A. Analysis of ordinal paired comparison data. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 41, n. 2, p. 287-297, 1992.
- AMENDOLA, D. P.; COELHO, V. D. S.; ROSOLEN, V. S. Elementos traços em perfis lateríticos na chapada sedimentar do Triângulo. **I Simpósio Internacional de Águas, Solos e Geotecnologias - SASGEO - 2015**, Uberaba, p. 1-8, nov. 2015. Disponível em: <<http://www.sasgeo.eco.br/index.php/2015/cred/paper/viewFile/54/83>>. Acesso em: 05 de jan. 2016.
- ARAH, J. R. M.; GAUNT, J. L. Questionable assumptions in current soil organic matter transformation models. In: REES, R. M.; CAMPBELL, C. D.; WATSON, C. A. **Sustainable management of soil organic matter**. [S.l.]: Wallingford: CAB International, 2001. p. 83-89.
- ARAÚJO NETO, M. D. D. et al. The murundus of the cerrado region of Central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, 2, jan. 1986. 17-35.
- BARCIKOWSKI, R. S. Statistical Power with Group Means as the Unit of Analysis. **Journal of Educational Statistics**, 6, set. 1981. 267-285.
- BARROS NETO, B. D.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2. ed. [S.l.]: Unicamp, 2002. 401 p.
- BATEZELLI, A. et al. Análise Estratigráfica aplicada à Formação Araçatuba (Grupo Bauru-Ks) no centro-oeste do Estado de São Paulo. **Geociências**, UNESP, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 5-19, 2003.
- BERG, B. et al. Changes in organic chemical components of needle litter during decomposition. Long-term decomposition in a Scots pine forest. **Canadian Journal of Botany**, 60, ago. 1982. 1310-1319.

BERG, B.; EKBOHM, G.; MCCLAUGHERTY, C. Lignin and holocellulose relations during long-term decomposition of some forest litters. Long-term decomposition in a Scots pine forest. **Canadian Journal of Botany**, 62, nov. 1984. 2540-2550.

BIRD, M. I.; POUSAI, P. Variations of $\delta^{13}\text{C}$ in the surface soil organic carbon pool. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 11, n. 3, p. 313-322, set. 1997.

BLACK, H. I. J.; OKWAKOL, M. J. N. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of termites. **Applied Soil Ecology**, 6, ago. 1997. 37-53.

BOURLIÈRE, F.; HARDLEY, M. Present-day savannas: an overview. In: GOODALL, D. W. **Ecosystems of the world - tropical savannas**. Amsterdam: Elsevier, 1983. p. 730.

BOUTTON, T. W. et al. $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem. **Geoderma**, 82, fev. 1998. 5-41.

BREEMEN, N. V. Effects of seasonal redox processes involving iron on the chemistry of periodically reduced soils. In: J. W. Stuck, B. A. Goodman, & U. Schwertmann (Eds.), **Iron in Soils and Clay Minerals**. [S.l.]: Reidel Publishing Company, 1988. p. 797-809.

BUOL, S. W. et al. **Soil Genesis and Classification**. Iowa: The Iowa State University Press, 2003. 494 p.

BURAK, D. L. et al. Geochemistry and spatial distribution of heavy metals in Oxisols in a mineralized region of the Brazilian Central Plateau. **Geoderma**, 160, dez. 2010. 131-142.

BUSSAB, W. O.; MIAZAKI, E. S.; ANDRADE, D. **Introdução à análise de agrupamentos**. São Paulo: Associação Brasileira de Estatística: [s.n.], 1990. 105 p.

CAMERON, A. C.; TRIVEDI, P. K. **Microeconomics: Methods and Applications**. New York: Cambridge University Press, 2005. 1033 p.

CASTILLO, E. D.; MONTGOMERY, D. C.; MCCARVILLE, D. R. Modified Desirability Functions for Multiple Response Optimization. **Journal of Quality Technology**, 28, jul. 1996. 337-345.

CHRISTENSEN, B. T. Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pools in simulation models of carbon turnover: revision of model structure. In: D. S. Powlson, (Ed), **Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing, Long-term Datasets**. NATO ASI Series, Global Environmental Change. ed. Berlin: Springer-Verlag, v. 38, 1996. p. 143-159.

CIANCIARUSO, M. V.; SILVA, I. A.; BATALHA, M. A. Phylogenetic and functional diversities: new approaches to community Ecology. **Biota Neotrópica**, v. 9, n. 3, p. 1-11.

CITEAU, L. et al. **Gestion durable des sols**. Versailles, France: Quae, 2009. 320 p.

COLE, L.; BARDGETT, R. D. Soil animals, microbial activity, and nutrient cycling. **Encyclopedia of soil science**, Marcel Dekker Inc, New York, p. 72-75, 2002.

COLE, M. M. Cerrado, Caatinga e Pantanal: The distribution and origin of savana vegetation of Brazil. **Geographical Journal**, 126, 1960. 168-179.

CORMACK, R. M. A. Review of Classification. **Journal of the Royal Statistical Society**, 134, n. 3, 1971. 321-367.

COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: GOLDAMMER, J. G. **Fire in the tropical biota**. Berlin: Springer-Verlag, 1990. p. 81-105.

COX, D. R.; HINKLEY, D. V. **Theoretical Statistics**. 1. ed. [S.l.]: Chapman and Hall., 1979. 528 p.

COX, G. W.; GAKAHU, C. G.; WAITHAKA, J. M. The form and small stone content of large earth mounds constructed by mole rats and termites in Kenya. **Pedobiologia**, 33, 1989. 307-314.

CRASWELL, E. T.; LEFROY, R. D. B. The role and function of organic matter in tropical soils. **Nutrient Cycling and Agroecosystem**, 61, set. 2001. 7-18.

CRESSIE, N. A. **Statistics for Spatial Data**. [S.l.]: Wiley-Interscience Publication, 1993. 887 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2. ed. Viçosa: UFV: [s.n.], 1994. 390 p.

CRUZ-CASTILLO, J. G. et al. Applications of canonical discriminant analysis in horticultural research. **HortScience**, 29, 1994. 1115-1119.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 48, 1984. 341-346.

CUTTER, S. L. et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. **Global Environmental Change**, v. 18, n. 4, p. 598-606, out. 2008.

DANGERFIELD, J. M.; MCCARTHY, T. S.; ELLERY, W. N. The mound-building termite *Macrotermes michaelseni* as an ecosystem engineer. **Journal of tropical Ecology**, 14, 1998. 507-520.

DAVIES, A. B.; BALDECK, C. A.; ASNER, G. P. Termite mounds alter the spatial distribution of African savanna tree species. **Journal of Biogeography**, 43, n. 2, out. 2015. 301-313.

DECAENS, T. et al. The values of soil animals for conservation biology. **European Journal of Soil Biology**, 42, n. 1, nov. 2006. S23-S38.

DILLON, W. R.; GOLDSTEIN, M. **Multivariate Analysis—Methods and Applications**. New York: Wiley, 1984. 608 p.

DONOVAN, S. E. et al. The effect of a soil feeding termite, *Cubitermes fungifaber* (Isoptera: Termitidae) on soil properties: termites may be an important source of soil microhabitat heterogeneity in tropical forests. **Pedobiologia**, 45, 2001. 1-11.

DRAPER, N. ; SMITH, H. **Applied Regression Analysis, Wiley Series in Probability and Statistics**. 3. ed. [S.l.]: [s.n.], 1998. 738 p.

DUARTE, M. C.; SANTOS, J. B.; MELO, L. C. Comparison of similarity coefficients based on RAPD markers in the common bean. **Genetics and Molecular Biology**, 22, n. 3, 1999. 427-432.

DUDEWICZ, E. J.; MISHRA, S. N. **Modern mathematical statistics**. New York: Wiley, v. 19, 1988. 838 p.

EDMONDS, R. L. Decomposition rates and nutrient dynamics in small-diameter woody litter in four forest ecosystems in Washington, U.S.A. **Can. J. For. Res.**, 17, 1987. 499-509.

EITEN, G. Vegetation of Brasília. **Phytocoenologia**, 1984. 271-292.

ELLIOT, E. T.; PAUSTIAN, K.; FREY, S. D. Modelling the measurable or measuring the modellable: a hierarchical approach to isolating meaningful soil organic matter fractionations. In: POWLSON, D. S.; SMITH, P.; SMITH, J. U. **Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing, Long-Term Datasets**. NATO ASI Series, Global Environmental Change. ed. [S.l.]: Springer-Verlag, v. 38, 1996. p. 161-179.

ELLIOTT, E. T.; COLE, C. V. A perspective on agroecosystem science. **Ecology**, 70, dez. 1989. 1597-1602.

EMBRAPA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1997. 212 p.

EWEL, K. C. Ecosystem experiments in wetlands. In: MOONEY, H. A., et al. **Ecosystem experiments**. London: John Wiley & Sons, 1991. p. 181-191.

EYRE, B. D.; PONT, D. Intra- and inter-annual variability in the different forms of diffuse nitrogen and phosphorus delivered to seven sub-tropical east Australian estuaries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science.**, 57, 2003. 137-148.

FALL, S.; BRAUMAN, A.; CHOTTE, J. L. Comparative distribution of organic matter in particle and aggregate size fractions in the mounds of termites with different feeding habits in Senegal: *Cubitermes niokoloensis* and *Macrotermes bellicosus*. **Appl. Soil Ecol**, 17, 2001. 131-140.

FERNANDES, A. G. **Fitogeografia brasileira**. 2. ed. Fortaleza: Multigraf, 2000. 340 p.

FOLKE, C. et al. Reconnecting to the Biosphere. **AMBIO**, 40, 2011. 719-738.

FREITAS, F. G.; SILVEIRA, C. O. Principais solos sob vegetação de cerrado e sua aptidão agrícola. In: FERRI, M. G. **Simpósio sobre o Cerrado: bases para utilização agropecuária**, IV. 4. ed. Belo Horizonte: Itatiaia, São Paulo, 1977. p. 155-194.

FURLEY, P. A. The influence of slope on the nature and distribution of soils and plant communities in the central Brazilian cerrado. In: ANDERSON, M. G.; BROOKS, S. **Advances in Hillslope Processes**. London: Wiley, 1996. p. 327-346.

FURLEY, P. A.; RATTER, J. A. Soil resources and plant communities of the central Brazilian cerrado and their development. **Journal of Biogeography**, 15, jan. 1988. 97-108.

GAUNT, et al. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modelling. In: REES, R. M.; BALL, B. C.; CAMPBELL, D. **Sustainable management of soil organic matter**. 4. ed. New York: CABI: Publishing, v. 35, 2001. p. 90-96.

GIBBONS, J. M.; RAMSDEN, S. J.; BLAKE, A. Modelling uncertainty in greenhouse gas emissions from UK agriculture at the farm level. **Agriculture, Ecosystems and Environmental**, 112, 2006. 347-355.

GOSLING, C. M. et al. Effects of Erosion from Mounds of Different Termite Genera on Distinct Functional Grassland Types in an African Savannah. **Ecosystems**, 15, 2012. 128-139.

GOWER, J. C.; LEGENDRE, P. Metric and euclidean properties of dissimilarity coefficients. **Journal of Classification**, 3, 1986. 5-48.

GREGORICH, E. G. et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, 14, 1994. 367-385.

GRIFFITHS, B. S. et al. Ecosystem response of pasture soil communities to fumigation-induced microbial diversity reductions: an examination of the biodiversity ecosystem function relationship. **Oikos**, 90, ago. 2000. 279-294.

GUJARATI, D. N. **Econometria Básica**. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HOLT, J. A. Microbial activity in the mounds of some Australian termites. **Applied Soil Ecology**, 9, n. 1-3, set. 1998. 183-187.

HOLT, J. A.; COVENTRY, R. J. Nutrient cycling in Australian savannas. **Journal Biogeographic**, 17, 1990. 427-432.

HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S. Goodness-of-fit tests for the multiple logistic regression model. **Communications in Statistics: Theory and Methods**, 9, 1980. 1043-1069.

HSU, J. C. **Multiple Comparisons, Theory and methods**. 1. ed. [S.l.]: Chapman e Hall, 1996. 296 p.

HUGHES, R. F.; KAUFFMAN, J. B.; JARAMILLO, V. J. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid region of México. **Ecology**, 80, set. 1999. 1892-1907.

INGHAM, E. R.; COLEMAN, D. C.; MOORE, J. C. An analysis of food-web structure and function in a shortgrass prairie, a mountain meadow, and a lodgepole pine forest. **Biol. Fertil. Soils**, 8, 1989. 29-37.

JEFF WU, C. F.; HAMADA, M. S. **Experiments: Planning, Analysis, and Optimization**. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 2009. 760 p.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1992. 642 p.

JOUQUET, P. et al. Effect of termites on clay minerals in tropical soils: fungus-growing termites as weathering agents. **European Journal of Soil Science**, 53, nov. 2002. 521-528.

JUNGERIUS, P. D.; VAN DER ANCKER, J. A. M.; MUCHER, H. J. The contribution of termites to the microgranular structure of soils on the Uasin Gishu Plateau, Kenya. **Catena**, 34, fev. 1999. 349-363.

KÄMPF, N. Ferro em solos inundados. In: _____ **Reunião sobre Ferro em Solos Inundados. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1. Anais**. Goiânia: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, v. 1, 1987. p. 35-71.

KING, L. C. A geomorfologia do Brasil oriental. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 2, n. 18, p. 147-265, 1956.

KÖRSCHENS, M.; WEIGEL, A.; SCHULZ, E. Turnover of soil organic matter (SOM) and long-term balances - Tools for evaluating sustainable productivity of soils. **Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde**, 161, ago. 1998. 409-424.

LAL, R. Effects of macrofauna of soil properties in tropical ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 24, nov. 1988. 101-116.

LAMBIN, E. F.; MEYFROIDT, P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 108, jan. 2011. 3465-3472.

LEDRU, M. P. Late quaternary history and evolution of the Cerrados as revealed by palynological records. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical Savanna**. New York: Columbia University Press, 2002. p. 33-50.

LÉONARD, J.; RAJOT, J. L. Influence of termites on runoff and infiltration: quantification and analysis. **Geoderma**, 104, nov. 2001. 17-40.

LOPES, A. S. **Solos sob “Cerrado” Características, Propriedades e Manejo**. Piracicaba, Brasil: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984. 162 p.

LOPES, A. S.; COX, F. R. A survey of the fertility status of surface soils under cerrado vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, 41, 1977. 742-747.

MADUAKOR, H. O.; OKERE, A. N.; ONYEANUFORO, C. C. Termite mounds in relation to the surrounding soils in the forest and derived savanna zones of southeastern Nigeria. **Biology and Fertility of Soils**, 20, ago. 1995. 157-162.

MAGID, J.; GORISSEN, A.; GILLER, K. E. In search of the elusive active fraction of soil organic matter - three size-density fractionation methods for tracing the fate of homogeneously c-14-labelled plant materials. **Soil Biology and Biochemistry**, 28, 1995. 89-99.

MANDO, A.; STROOSNIJDER, L. The biological and physical role of mulch in the rehabilitation of crusted soil in Sahel. **Soil Use and Management**, 15, jun. 1999. 123-127.

MANLY, B. F. J. **Multivariate statistical methods: a primer**. 2. ed. London: Chapman & Hall, 1994.

MARIMON, B. S. et al. Florística dos campos de murundus do Pantanal do Araguaia. **Acta Botânica Brasileira**, Mato Grosso, v. 26, p. 181-196, 2012.

MARTINELLI, L. A. et al. Carbon-13 variation with depth in soils of Brazil and climate change during the quaternary. **Oecologia**, 106, maio 1996. 376-381.

MAYLE, F. E. et al. Long-term forest-savannah dynamics in the Bolivian Amazon: implications for conservation. **Phil. Trans. R. Soc. B.**, 362, fev. 2007. 291-307.

MCCULLAGH, P.; NELDER, J. A. **Generalized Linear Models**. 2. ed. [S.l.]: Chapman & Hall/CRC Monographs on Statistics & Applied Probability, 1991. 532 p.

MELILLO, J. M. et al. Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum: Plant litter to soil organic matter. **Plant and Soil**, 115, abr. 1989. 189-198.

MIDGLEY, J. J. More mysterious mounds: origins of the Brazilian campos de murundus. **Plant and Soil**, 336, nov. 2010. 1-2.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. 1. ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2013. 297 p.

MINITAB QUALITY COMPANION. Minitab 17. **Minitab**, 2015. Disponível em: <<https://www.minitab.com/pt-br/>>. Acesso em: 2015.

MOLLARD, J. D. **Landforms and surface materials of Canada: A stereoscopic airphoto atlas and glossary**. [S.l.]: Regina, Mollard & Associates, 1982. 231 p.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 3. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons., 1991. 277 p.

MOORE, J. M.; PICKER, M. D. Heuweltjies (earth mounds) in the Clanwilliam District, Cape Province, South Africa: 4000-year-old termite nests. **Oecologia**, 86, maio 1991. 424-432.

MORRISON, D. F. **Multivariate statistics methods**. 2. ed. New York: McGraw Hill, 1976. 415 p.

MYERS, R. H. **Classical and modern regression with applications**. 2. ed. Boston: PWS-Kent, 1990. 488 p.

NELDER, J. A.; WEDDERBURN, R. W. M. Generalized Linear Models. **Journal of the Royal Statistical Society.**, 135, 1972. 370-384.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. Floodplain 'murundus' of Central Brazil: evidence for the termite-origin hypothesis. **Journal of Tropical Ecology**, 8, fev. 1992. 1-19.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. et al. Environmental factors affecting physiognomic and floristic variation in an area of Cerrado in central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, 5, nov. 1989. 413-431.

PÄRTEL, M.; LAANISTO, L.; WILSON, S. D. Soil nitrogen and carbon heterogeneity in woodlands and grasslands: contrasts between temperate and tropical regions. **Global Ecology and Biogeography**, 17, jan. 2008. 18-24.

PAULA, G. A. **Modelos de Regressão com apoio computacional**. São Paulo: [s.n.], 2013. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~giapaula/texto_2013.pdf>. Acesso em: 10 set. 2015.

PAUSTIAN, K. et al. Use of a network of long-term experiments for analysis of soil carbon dynamics and global change: the North America model. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, 35, 1995. 929-939.

PAUSTIAN, K. et al. Modelling soil organic matter dynamics – Global challenges. In: REES, R. M.; BALL, B. C.; CAMPBELL, C. D. **Sustainable management of soil organic matter**. New York: CABI, Publishing, 2001. p. 929-939.

POMEROY, D. E. Some effects of mound-building termites on the soils of a semi-arid area of Kenya. **Journal of Soil Science**, 34, set. 1983. 555-570.

PONCE, V. M.; CUNHA, C. N. Vegetated earthmounds in tropical savannas of Central Brazil: with special reference to the Pantanal do Mato Grosso. **Journal of Biogeography**, 20, 1993. 219-225.

PONNAMPERUMA, F. N. The Chemistry of Submerged Soils. In: _____ **Advanced in Agronomy**. Philippines: Academic Press, Inc., v. 24, 1972. p. 29-84.

POWLSON, D. S. Why evaluate soil organic matter models? In: POWLSON, D. S.; SMITH, P.; SMITH, J. U. **Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing, Long-term**

Datasets. NATO ASI Series, Global Environmental Change. ed. Berlin: Springer-Verlang, 1996. p. 3-11.

QUEIROZ-NETO, J. P. D. Solos da região dos cerrados e suas interpretações. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, n. 1, p. 1-12, 1982.

RAHLAO, S. J. et al. Long-term vegetation change in the Succulent Karoo, South Africa following 67 years of rest from grazing. **Journal of Arid. Environmental**, 72, maio 2008. 808-819.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres/Potafos, 1991. 343 p.

RATTER, J. A.; RIBEIRO, J. F.; BRIDGEWATER, S. The brazilian cerrado vegetation and threats to its Biodiversity. **Annals of Botany**, 80, 1997. 223-230.

REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T. Solos do bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. **Cerrado: Ambiente e Flora**. Planaltina: Embrapa, 1998. p. 47-86.

REICHMAN, O. J.; SEABLOOM, E. W. The role of pocket gophers as subterranean ecosystem engineers. **Trends in Ecology & Evolution**, 17, jan. 2002. 44-49.

RENCER, A. C.; SCHAALJE, G. B. **Linear models in statistics**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 663 p.

RESENDE, M. et al. **Pedologia: Base para distinção de ambientes**. 5. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2007. 322 p.

RIEDO, M. et al. A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. **Ecological Modelling**, 105, jan. 1998. 141-183.

RIZZINI, C. T. **Tratado de Fitogeografia do Brasil**. Rio de Janeiro: Âmbito Cultural, 1997. 747 p.

ROCKSTRÖM, J. et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society**, 14, set. 2009. 32.

ROYER, T. V.; DAVID, M. B.; GENTRY, L. E. Timing of riverine export of nitrate and phosphorus from agricultural watersheds in Illinois: Implications for reducing nutrient loading to the Mississippi River. **Environmental Science & Technology**, 40, maio 2006. 4126-4131.

SANT'ANNA, C. M.; MALINOVSKI, J. R. Uso da análise multivariada no estudo de fatores humanos em operadores de motosserra. **Cerne**, 8, 2002. 98-104.

SCHABENBERGUER, O.; PIERCE, F. J. **Contemporary Statistical Models for the Plant and Soil Sciences**. [S.l.]: CRC Press, 2002. 738 p.

SCHIMEL, D. et al. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. **Science**, 287, mar. 2000. 2004-2006.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron Oxides. In: DIXON, J. B.; & WEED, S. B. **Minerals in soil environments**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.

SCHWIEDE, M.; DUIJNISVELD, W. H. M.; BOTTCHEER, J. Investigation of processes leading to nitrate enrichment in soils in the Kalahari Region, Botswana. **Physics and Chemistry of the Earth**, 30, 2005. 712-716.

SEMHI, K. et al. Impact of termite activity on soil environment: A perspective from their soluble chemical components. **International Journal Environment of Science and Technology**, 5, 2008. 431-444.

SHERPHERD, A. T. D. et al. Environmental factors affecting physiognomic and floristic variation in area of cerrado in central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, 5, 1989. 413-431.

SIEGMUND, K. D.; LAIRD, P. W.; LAIRD-OFFRINGA, I. A. A comparison of cluster analysis methods using DNA methylation data. **Bioinformatics**, 20, mar. 2004. 1896-1904.

SILESHI, G. W. et al. Termite-induced heterogeneity in African savanna vegetation: mechanisms and patterns. **Journal of Vegetation Science**, 21, jun. 2010. 923-937.

SILVA, L. C. R. et al. Expansion of gallery forests into central Brazilian savannas. **Global Change Biology**, 14, set. 2008. 2108-2118.

SILVA, L. C. R.; HARIDASAN, M.; HOFFMANN, W. A. Not all forests are expanding over central Brazilian savannas. **Plant and Soil**, 333, ago. 2010. 431-442.

SMITH, F. R.; YEATON, I. Disturbance by the mound-building termite, shape *Trinervitermes trinervoides*, and vegetation patch dynamics in a semi-arid, southern African grassland. **Plant Ecology**, 137, jul. 1998. 41-53.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, 74, nov. 1996. 65-105.

SOUZA, A. L.; FERREIRA, R. L. C.; XAVIER, A. **Análise de agrupamento aplicada à ciência florestal**. Viçosa, MG: SIF, 1997. 109 p.

TARDY, Y. **Pétrologie des laterites et des sols tropicaux**. Paris: Masson, 1993. 459 p.

TAYLOR, J. R. **Introdução à Análise de Erros - O Estudo de Incertezas em Medições Físicas**. [S.l.]: Bookman, 2012. 329 p.

TEDESCHI, L. O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural Systems**, 89, set. 2006. 225-247.

TIESSSEN, H.; CUEVAS, E.; CHACON, P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. **Nature**, out. 1994. 783-785.

VALADÃO, R. C. Geodinâmica de superfícies de aplanamento, desnudação continental e tectônica ativa como condicionantes da megageomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 10, 2009. 77-90.

VAN DER PUTTEN, W. H. Plant defense belowground and spatiotemporal processes in natural vegetation. **Ecology**, 84, set. 2003. 2269-2280.

VAN DER WAL, A. et al. Fungal biomass development in a chronosequence of land abandonment. **Soil Biology & Biochemistry**, 01, 38, 2006. 51-60.

WARDLE, D. A. et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. **Science**, 304, jun. 2004. 1629-1633.

WOOD, T. G. Termites and the soil environment. **Biology and Fertility of the Soils**, 6, maio 1988. 228-236.

ZONTA, R. et al. The effect of floods on the transport of suspended sediments and contaminants: a case study from the estuary of the Dese River (Venice Lagoon, Italy). **Environment International**, 31, set. 2005. 948-958.