



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZONICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BARRAGENS E GESTÃO
AMBIENTAL

JAQUELINE PINHEIRO RAMOS

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE USO E QUALIDADE DO SOLO NA ÁREA DO
RESERVATÓRIO DA UHE – TUCURUÍ COM BASE NOS ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS**

Tucuruí-PA
2018

JAQUELINE PINHEIRO RAMOS

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE USO E QUALIDADE DO SOLO NA ÁREA DO
RESERVATÓRIO DA UHE – TUCURUÍ COM BASE NOS ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Segurança de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Karyme S. S. Vilhena

Tucuruí – PA
2018

JAQUELINE PINHEIRO RAMOS

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE USO E QUALIDADE DO SOLO NA ÁREA DO
RESERVATÓRIO DA UHE – TUCURUÍ COM BASE NOS ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Segurança de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Karyme S. S. Vilhena

Aprovada em 21 de dezembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Karyme do Sacramento de Souza Vilhena
Prof^ª. Dr^ª. Karyme S. S. Vilhena, (UFPA)

(Orientadora)

Fernanda P. Gouveia
Prof^ª. Dr^ª. Fernanda P. Gouveia, (UFPA)

(Examinador Interno)

Dr. Pedro Moreira de S. Junior
UFRA - Capanema
SIAPE: 1697792

Pedro Moreira de Souza Junior
Prof. Dr. Pedro Moreira de Souza Júnior, (UFRA)

(Examinador Externo)

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

P654a Pinheiro Ramos, Jaqueline
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE USO E QUALIDADE
DO SOLO NA ÁREA DO RESERVATÓRIO DA UHE -
TUÇURUÍ COM BASE NOS ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS / Jaqueline Pinheiro Ramos. — 2018.
110 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Karyme do Socorro de Souza Vilhena
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Núcleo de
Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade
Federal do Pará, Tucuruí, 2018.

1. limite de plasticidade. 2. limite de liquidez. 3. matéria
orgânica. 4. análise multivariada. 5. granulometria. I. Título.

CDD 624.15136

DEDICATÓRIA

Dedico à minha mãe, por todo apoio e incentivo durante essa caminhada, aos meus irmãos que sempre estiveram apoiando em diversas formas e aos amigos que estiveram presentes. Minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar sabedoria para concluir este trabalho. E por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades que enfrentei durante toda minha jornada. Obrigada Senhor por estar comigo quando ninguém podia estar.

À minha mãe Jacilene Ramos, por me apoiar em todas as minhas decisões, por ter me ensinado como soltar as mãos ao dar o primeiro passo, a não ter medo do novo e que o aprendizado vale pelo sacrifício, por sempre está disposta a me ajudar para que conseguisse atingir todos meus objetivos, aos meus amados irmãos Jacson, Fernando e Jadelene que sempre me alegraram e me fizeram sorrir e superar o estresse causado pelas dificuldades de continuar esse mestrado.

À professora Karyme Vilhena pela orientação e por todo apoio, ensinamento e pela constante presença durante todo desenvolvimento deste trabalho; e ainda pela atenção e confiança depositada em mim durante os anos que trabalhamos juntas, o qual contribuiu para meu amadurecimento pessoal e profissional.

Ao Dr. Fábio José Bonfim Cardoso pelo apoio e colaboração nas análises estatísticas que foram essenciais para a finalização deste trabalho.

Aos meus amigos, em especial Francirene Bonfim, Kamila Bernardes El Banna, Renan Aguiar e Lucas Manoel que estiveram presentes dando forças e auxiliando sempre que necessitei. Obrigada pela amizade e por todos os esforços.

Aos colegas de sala e do laboratório de química, em especial Maria Fenícia e Cristian Nunes e a todos que fizeram parte direta ou indiretamente da minha formação, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

A construção de barragens e seus reservatórios gera uma série de problemas, dentre eles, cita-se as erosões nas margens dos reservatórios. Os solos formadores da região da UHE-Tucuruí estão submetidos a diferentes usos e ocupações que com o passar do tempo tem sofrido alterações com a sazonalidade do lago e a crescente utilização de terras, sem considerar as potencialidades e limitações do solo. Algumas dessas áreas já apresentam sinais de degradação e também são identificados pontos de ocorrência de erosão. O presente trabalho busca a determinação dos atributos químicos e físicos para avaliação de erodibilidade em solos situados na área do reservatório da UHE-Tucuruí. Com a seleção das áreas de mata nativa, plantação e pastagem realizou-se a coleta de amostras do tipo composta e deformada para execução dos ensaios químicos e físicos no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará no Campus Universitário de Tucuruí. Após a obtenção dos resultados das propriedades físicas e químicas dos solos pode-se prescrever as alterações provocadas pela diferença de seu uso e ocupação, no comparativo entre as áreas, os parâmetros estabelecidos evidenciaram a degradação química do solo e a perda de nutrientes que desencadeiam os processos erosivos. Foram aplicadas técnicas de análise multivariada: Análise de Componentes Principais (**PCA**) e Análise de Agrupamento Hierárquico (**HCA**) para correlacionar as variáveis, o entendimento do conjunto de dados foi facilitado e a inter-relação entre as variáveis e amostras ficaram mais claras, a partir dessas análises, foi possível determinar que a área de pastagem na camada superficial é a que mais se diferencia das demais, quando se considera todos os atributos analisados e as amostras extraídas, além disso, a análise multivariada destacou do conjunto de informações, quais as variáveis estão sofrendo alterações em consequência da atividade antropica.

Palavras-chave: Erosão, atributos químicos, análise multivariada.

ABSTRACT

The construction of dams and their reservoirs generates a series of problems, among them, it is mentioned the erosions in the banks of the reservoirs. The soils forming the UHE-Tucuruí region are subject to different uses and occupations that over time have undergone changes with the seasonality of the lake and the increasing use of land, without considering the potentials and limitations of the soil. Some of these areas already show signs of degradation and erosion occurrence points are also identified. The present work seeks to determine the chemical and physical attributes for the evaluation of erodibility in soils located in the reservoir area of Tucuruí Hydroelectric Power Plant. With the selection of native forest, planting and pasture areas, the collected and deformed samples were collected to perform the chemical and physical tests at the Civil Engineering Laboratory of the Federal University of Pará at the Campus Universitário de Tucuruí. After obtaining the results of the physical and chemical properties of the soils can be prescribed the changes caused by the difference of their use and occupation, in the comparative between the areas, the established parameters showed the chemical degradation of the soil and the loss of nutrients that trigger the erosive processes. Multivariate analysis techniques were applied: Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Grouping Analysis (HCA) to correlate the variables, the understanding of the data set was facilitated and the interrelation between the variables and samples became clearer, From these analyzes, it was possible to determine that the pasture area in the superficial layer is the one that most differs from the others, when considering all the attributes analyzed and the extracted samples, in addition, the multivariate analysis highlighted the information set, which variables are undergoing changes as a consequence of anthropic activity.

Keywords: Erosion, chemical attributes, multivariate analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Fases constituintes do solo.....	19
Figura 2.2 Sistema de ordenação de cores Munsell.....	21
Figura 2.3 Guia para agrupamento de classes de textura.....	22
Figura 2.4 Tipos de estruturas do solo.....	24
Figura 2.5 Avaliação da consistência de um torrão seco de solo.....	25
Figura 2.6 Perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo e esquema de seus horizontes diagnósticos.	29
Figura 2.7 Perfil de Latossolo Amarelo.....	30
Figura 2.8 Perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo.....	31
Figura 2.9 Perfil do solo petroplúntico e seus horizontes.....	31
Figura 2.10 Encosta seriamente erodida.....	34
Figura 2.11 Falta de preservação da mata ciliar na margem da UHE - Porto Colombo.....	35
Figura 2.12 Dendrograma resultante obtido por agrupamento de dados de propriedades do solo.....	47
Figura 3.1 Fluxograma de Atividades.....	49
Figura 3.2 Limite territorial do município de Tucuruí, Ilha de Germoplasma e RDS - Alcobaça.....	51
Figura 3.3 Mapa pedológico do município de Tucuruí-Pa.....	54
Figura 3.4 Vegetação típica do município de Tucuruí.....	56
Figura 3.5 Área de Pastagem e Mata nativa adotada para retirada das amostras de solo.....	58
Figura 3.6 Área de plantação adotada para retiradas de amostras compostas.....	58
Figura 3.7. Extração das amostras de solo com trado manual tipo caneco.....	60
Figura 3.8 Processo de homogeneização e acondicionamento das amostras de solos.....	60
Figura 3.9 preparação das amostras para execução dos ensaios.....	63
Figura 3.10 Material passante na peneira 0,42 mm. Massa de solo homogeneizada.....	64
Figura 3.11 Fissuras no cilindro sinaliza fim do ensaio do limite de plasticidade do solo.....	65
Figura 3.12 Ensaio do limite de liquidez feito no aparelho de Casa Grande.....	66
Figura 3.13 Preparo das amostras para análise granulométrica do solo.....	67
Figura 3.14 Agitação da amostra no dispersor mecânico.....	68
Figura 3.15 Leitura da densidade de submersão e temperatura.....	69
Figura 3.16 Ensaio de massa específica dos grãos.....	70
Figura 3.17 Ensaio de determinação do pH.....	70
Figura 3.18 Ensaio de acidez potencial, sistema para filtração e titulação da amostra até o ponto de viragem.....	71
Figura 3.19 Amostras antes e após titulação com solução aquosa de NaOH.....	73
Figura 3.20. Ponto de viragem na determinação de Cálcio e Magnésio trocável.....	73
Figura 3.21 Determinação do cálcio trocável por titulação, ponto de viragem.....	74
Figura 3.22 Extração com ácido sulfúrico e processo de filtração.....	74
Figura 3.23. Fim da titulação da amostra sinalizada pela mudança de coloração.....	75
Figura 4.1 Carta de plasticidade para erodibilidade dos solos.....	80

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1 Análise de componentes principais com base nas variáveis do solo nas diferentes áreas estudadas:	45
Gráfico 3-3 Porcentagem de solos na área de entorno da UHE - Tucuruí.	53
Gráfico 4-1 Análise dos componentes principais para os <i>loadings</i> (variáveis).....	88
Gráfico 4-2 Separação das áreas de pastagem, mata nativa e plantação.	89
Gráfico 4-3 Dendrograma obtido na HCA para as variáveis.....	90
Gráfico 4-4 Dendrograma obtido na HCA para as áreas estudadas.	91
Gráfico 5-1 Limite de liquidez área de mata nativa (prof. 0 - 10 cm).....	104
Gráfico 5-2 Limite de Liquidez da área de Mata Nativa (prof. 10 - 20 cm).	104
Gráfico 5-3 Limite de liquidez área de pastagem (prof. 0 - 10 cm).	104
Gráfico 5-4 Limite de liquidez área de pastagem (prof. 10-20 cm).	104
Gráfico 5-5 Limite de liquidez área de plantação (prof. 0 - 10 cm).....	105
Gráfico 5-6 Limite de liquidez área de plantação (prof. 10 - 20 cm).....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 Reagentes utilizados na análise química do solo.....	61
Tabela 3-2 Equipamentos utilizados nas análises: química e física.	62
Tabela 3-3. Normalização para os ensaios físicos.	63
Tabela 4-1 Teores de umidade das amostras de solos.	78
Tabela 4-2 Percentual obtido para os Limites e índice de plasticidade dos solos.....	79
Tabela 4-3 Plasticidades dos solos.	79
Tabela 4-4 Análise granulométrica dos solos estudados.	81
Tabela 4-5 Média dos resultados do pH das amostras de solo e Δ pH.	82
Tabela 4-6 Classificação da leitura do pH em água e em cloreto de cálcio.	83
Tabela 4-7 Média dos resultados do ensaio de carbono orgânico das áreas de coleta.	84
Tabela 4-8 Médias dos resultados do ensaio de CTC e acidez trocável das áreas de coleta.	86
Tabela 4-9 Médias dos resultados do ensaio de ferro no extrato sulfúrico das áreas de coleta.	87
Tabela 4-10 Variância e Variância Acumulada em relação às Componentes Principais.	89
Tabela 4-11 Distância euclidiana entre as áreas, calculadas a partir da matriz padronizada (autoescalada).	92

LISTA DE SIGLAS E NOMENCLATURAS.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

APA - Área de Proteção Ambiental

APP - Área de Preservação Permanente

CTC – Capacidade de Troca de Cátions.

EDTA – Ácido etilenodiamino tetra-acético

ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

HCA – *Hyerarquical Clustered Analisys*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

p. – página

PARATUR - Companhia Paraense de Turismo

PCA – *Principal Component Analisys*

RDS – Reserva de Desenvolvimento Sustentável

RDS – Reserva de Desenvolvimento Sustentável

SEMAS - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade

SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

TFSA – Terra fina seca ao ar

UHE – Usina Hidrelétrica

UHE – Usina Hidrelétrica

WRB – *World Reference Base for Soil Resources*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	DEFINIÇÃO DE SOLO	18
2.2	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS	20
2.2.1	Cor do solo	20
2.2.2	Textura.....	21
2.2.3	Estrutura	23
2.2.4	Consistência.....	24
2.2.5	Cerosidade	25
2.3	CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	26
2.3.1	Níveis categóricos do SiBCS.....	27
2.3.2	Nomenclatura e descrição das classes	28
2.3.2.1	<i>Argissolos vermelho-amarelo (podzólico)</i>	29
2.3.2.2	<i>Latossolos Amarelos</i>	30
2.3.2.3	<i>Latossolo Vermelho-Amarelo</i>	30
2.3.2.4	<i>Plintossolo Pétrico (solo Petroplíntico)</i>	31
2.4	ESTUDOS DOS SOLOS E A SEGURANÇA DE BARRAGENS	32
2.4.1	Erosão	33
2.4.1.1	<i>Pluviosidade</i>	33
2.4.1.2	<i>Declividade</i>	34
2.4.1.3	<i>Natureza do solo</i>	34
2.4.1.4	<i>Cobertura vegetal</i>	35
2.4.1.5	<i>Ação antrópica</i>	35
2.5	EROSÃO E ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS	37
2.6	ATRIBUTOS DO SOLO NA QUALIDADE E NOS PROCESSOS EROSIVOS ...	39
2.6.1	Atributos físicos.....	40
2.6.1.1	<i>Textura e granulometria</i>	40

2.6.1.2	<i>Umidade</i>	40
2.6.1.3	<i>Limite de liquidez e plasticidade</i>	41
2.6.2	Atributos químicos	41
2.6.2.1	<i>Potencial Hidrogeniônico – pH</i>	42
2.6.2.2	<i>Acidez do solo</i>	42
2.6.2.3	<i>Capacidade de troca de cátions CTC</i>	42
2.7	ANÁLISE MULTIVARIADA APLICADA AO ESTUDO DE SOLOS	43
2.7.1	Análise de componentes principais (PCA).....	44
2.7.2	Análise de agrupamento hierárquico (HCA).....	45
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	48
3.1	DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO.....	50
3.1.1	Condições climáticas	52
3.1.2	Solos	53
3.1.3	Vegetação	55
3.2	ÁREAS PARA RETIRADA DAS AMOSTRAS DE SOLO.....	57
3.2.1	Área de pastagem e área de mata nativa;.....	57
3.2.2	Área de plantação	58
3.3	COLETA E ACONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS	59
3.4	MATERIAIS.....	61
3.4.1	Reagentes.....	61
3.4.2	Equipamentos	62
3.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	62
3.5.1	Ensaio Físicos	62
3.5.1.1	<i>Preparo das amostras de solos para ensaios</i>	63
3.5.1.2	<i>Umidade do solo</i>	64
3.5.1.3	<i>Limite de plasticidade</i>	64
3.5.1.4	<i>Limite de liquidez</i>	66
3.5.1.5	<i>Análise granulométrica</i>	67
3.5.1.6	<i>Massa específica dos grãos</i>	69
3.5.2	ENSAIOS QUÍMICOS	70
3.5.2.1	<i>Potencial Hidrogeniônico – pH</i>	70
3.5.2.2	<i>Acidez do solo</i>	71
3.5.2.3	<i>Matéria orgânica e carbono orgânico</i>	71

3.5.2.4	<i>Capacidade de troca de cátions (CTC)</i>	72
3.5.2.5	<i>Ferro no extrato sulfúrico e ataque sulfúrico</i>	74
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA	76
3.6.1	Análise de componentes principais (PCA).....	76
3.6.2	Análise de agrupamento hierárquico (HCA)	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.1	ANÁLISE FÍSICA	78
4.1.1	Umidade do solo	78
4.1.2	Limite de Plasticidade e Liquidez	79
4.1.3	Análise granulométrica.....	80
4.2	ANÁLISE QUÍMICA	82
4.2.1	Potencial hidrogeniônico do solo (pH).....	82
4.2.2	Matéria orgânica e carbono orgânico	84
4.2.3	CTC do solo.....	85
4.2.4	Teor de ferro no solo	87
4.3	ANÁLISE MULTIVARIADA	88
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
5.1	CONCLUSÕES	93
5.1.1	Atributos do solo	93
5.1.2	PCA e HCA	94
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem sua geração de energia baseada nos aproveitamentos hidrelétricos, haja vista que a geração interna hidráulica responde um montante superior a 65% da oferta energética brasileira, conforme o Balanço Energético Nacional divulgado no ano de 2018, da Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Apesar de ser uma matriz considerada limpa e renovável, apresenta seus maiores impactos durante a implantação do empreendimento e, sobretudo, de seus reservatórios artificiais que resultam em extensas áreas alagadas.

Passados os efeitos e atenções principais do período construtivo da usina, ao longo dos anos de operação, os reservatórios continuam como potenciais geradores de impacto ambiental juntamente com as ações provenientes da intervenção humana nas áreas de entorno das Usinas Hidrelétricas (UHE's). Dentre esses, têm-se os processos erosivos decorrentes das ações do lago artificial, como o ciclo de umedecimento e secagem das margens e os efeitos das explorações inadequadas das áreas adjacentes que muitas vezes favorecem a degradação do solo (D'ARMANDA, 2012).

As erosões nas margens de reservatórios consistem em um agravante para operação das UHE's, visto que são responsáveis por problemas como o assoreamento que, apesar de ser lento, é um dos aspectos mais significativos para diminuição do volume útil na geração de energia elétrica e ainda por comprometer a qualidade, principalmente, do solo e da água. Também, na maioria dos estados brasileiros se constata grandes perdas de solo ocasionadas pela erosão, tornando-se este um dos principais problemas relacionados aos recursos naturais (OLIVEIRA, 2011).

Para compreender e formular medidas corretivas que minimizem os processos erosivos nas áreas de entorno das usinas hidrelétricas é importante, primeiramente, entender a composição e o comportamento do solo. Por meio do estudo de seus atributos (químicos e físicos) é possível quantificar a magnitude e duração das alterações provocadas por diferentes modelos de ambientes, inclusive, os afetados por aqueles empreendimentos hidráulicos. A condução experimental para a determinação da erodibilidade apresenta dificuldades em virtude dos elevados custos operacionais e do tempo de condução necessário. Deste modo, tem se observado a aplicação de métodos indiretos os quais tomam como base algumas propriedades físicas e químicas do solo, sendo bastante empregado no estudo de erodibilidade em solos brasileiros (DEMARCKI; ZIMBACK, 2014).

Como o número de informações geradas por meio das análises das propriedades físicas e químicas para avaliação desse material é relativamente grande, buscam-se técnicas estatísticas capazes de correlacionar às informações obtidas com as características observadas para o solo em estudo. Uma das técnicas mais eficientes para análise dessas variações em relação ao ambiente se dá através da aplicação da análise multivariada (FREITAS, *et al.*, 2014).

Dessa forma, os atributos químicos e físicos presentes nos solos de ilhas formadoras das margens dos lagos artificiais e entornos servem como base para indicar quais os impactos causados pela ocupação e atividade antrópica, bem como o desenvolvimento de processos naturais de intemperização, além de auxiliar no monitoramento de áreas que devem, por lei, serem preservadas. Vale ressaltar ainda que, os indicadores de qualidade dos solos são propriedades mensuráveis (quantitativas e qualitativas) acerca de procedimentos ou atividades e que permitem caracterizar, avaliar e acompanhar as mudanças ocorridas num dado ecossistema (VERAS *et al.*, 2016).

Os solos formadores da região da UHE- Tucuruí estão submetidos a diferentes usos e ocupações (urbanas, extrativistas, cultivo e pastagem) assim como, as ilhas criadas após o barramento do rio Tocantins que, com o passar do tempo tem sofrido alterações com a sazonalidade do lago e a crescente utilização de terras, sem considerar as potencialidades e limitações do solo. Algumas dessas áreas já apresentam sinais de degradação e também são identificados pontos de ocorrência de erosão (SEMAS, 2017). Desta forma, o presente trabalho busca caracterizar os atributos químicos e físicos dos solos da área do entorno da UHE-Tucuruí e recorrendo ao uso das técnicas de análise multivariada para correlacionar tais atributos a degradação do solo e sua influencia nos processos erosivos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar e correlacionar os usos e qualidade dos solos situados às margens do reservatório da UHE- Tucuruí com base nos atributos químicos e físicos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as condições climáticas e meteorológicas (dados de precipitação e temperatura) da região da UHE – Tucuruí e analisar a pedologia do município de Tucuruí e das margens do reservatório da UHE-Tucuruí;
- Classificar e coletar amostras de solos conforme as normalizações vigentes em áreas específicas da região do lago da UHE- Tucuruí e demais áreas adjacentes abrangendo diferentes tipos, uso e ocupação do solo;
- Quantificar os atributos físicos dos solos por meio dos ensaios de: umidade, massa específica e peso específico do solo, análise granulométrica, limites de Atteberg (liquidez e plasticidade).
- Quantificar os atributos químicos do solo por meio dos ensaios de: pH, carbono orgânico, capacidade de troca de cátions (CTC) e bases trocáveis (BT), ferro no extrato sulfúrico, acidez do solo, ataque sulfúrico, sais solúveis;
- Analisar os resultados obtidos aplicando os métodos de análise multivariada como Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA).

1.3 JUSTIFICATIVA

A matriz energética brasileira é baseada, predominantemente, nos aproveitamentos hidrelétricos, considerados como uma fonte de energia renovável, aproximadamente 12% da água doce superficial do planeta está no Brasil. Entretanto, a construção de barragens e reservatórios de Usinas Hidrelétricas gera uma série de problemas, dentre eles, podem-se citar as erosões em margens de reservatórios, visto que são responsáveis por propiciar os assoreamentos, que é um dos fatores significativos na diminuição do volume útil na geração de energia elétrica (BALEEIRO *et al.* 2016).

O acúmulo de sedimentos no reservatório de barragens hidroelétricas, favorece o surgimento de problemáticas tais como: impossibilidade de abertura e fechamento de comportas de órgãos de adução e descarga, desgastes dos componentes internos das turbinas com redução da vida útil e aumento dos esforços na estrutura da barragem pelo aumento do peso específico. No reservatório a montante da barragem, cita-se o aumento das perdas por evaporação, provocado pelo aumento da área superficial livre, e transpiração vegetal, prolongamento do efeito de remanso, com a conseqüente elevação de níveis de enchente a montante, devido a depósitos de material grosseiro na entrada do reservatório (OLIVEIRA, 2011).

O acúmulo de água e sedimentos na área de captação da barragem, além de provocar os efeitos descritos anteriormente, também vem demonstrando aspectos positivos e negativos na qualidade dos solos, envolvendo os atributos químicos, físicos e biológicos. O tipo de solo, o relevo e os sistemas de manejo, são fatores que devem ser analisados ao avaliar e monitorar a influência das barragens na qualidade dos solos (LUCENA, 2015).

Somando-se aos fatores supracitados, empreendimentos como as usinas hidrelétricas podem intensificar as etapas erosivas naturais, contribuindo para ocorrência de desequilíbrios, risco no fornecimento de água e na produção de energia elétrica, eutrofização das águas, diminuição da área do espelho d'água e volume do reservatório, proporcionando um grave problema com conseqüências hidráulicas e econômicas (RAMOS; PEDROZA, 2014).

Do mesmo modo, a construção da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, no estado do Pará, e seu reservatório, resultaram na criação de ilhas artificiais que ao longo dos anos tem sofrido mudanças com o uso e ocupação do solo pelas comunidades ribeirinhas e o aumento do nível de água nos períodos chuvosos, como conseqüência, tem-se a escassez de nutrientes nas áreas de vegetação, e a influência da saturação hídrica na qualidade dos solos às margens do reservatório, favorecem uma superfície com pouca estrutura e baixa resistência contra fenômenos de erosão. (VERAS *et al.*, 2016).

Além disso, a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade – SEMAS, do Estado do Pará, no relatório das oficinas colaborativas sobre Revisão do Licenciamento Ambiental da Usina Hidroelétrica de Tucuruí (2017), confirma que a ocorrência de erosão das ilhas e conseqüente assoreamento das margens do lago prejudicam também a ictiofauna, e destaca a necessidade de mapear e estudar as ilhas do lago e entornos visando adotar medidas para recuperação dessas áreas.

Com base no exposto anteriormente, a presente dissertação tem como finalidade levantar as características dos atributos dos solos que serão coletadas e avaliadas em áreas amostrais localizadas a montante do barramento, sob uso e ocupação distintos, tais como: área de mata nativa (floresta sem intervenção humana, antes e após construção da barragem) área de pastagem, (onde predomina ação antrópica e a vegetação típica de pasto alto), área de cultivo (plantação de baixo porte), considerando ainda, os fatores climáticos de maior significância (precipitação e temperatura) e sazonalidade do reservatório.

Com o conjunto de dados gerado pela caracterização física e química será feita a aplicação das técnicas de análise multivariada para explicar a correlação entre as variáveis analisadas e descobrir quais delas auxiliam na caracterização e/ou alteração do solo, especialmente, na influência no fenômeno erosivo, possibilitando assim, a identificação das técnicas corretivas mais adequadas para resolver tal problemática.

As características dos atributos dos solos serão avaliadas em áreas amostrais adjacentes e homogêneas, tais como: área de mata nativa de floresta sem intervenção humana e área de pastagem, onde predomina a vegetação típica de pasto alto. Serão avaliadas também as condições do contexto natural da região do Lago de Tucuruí, análise do comportamento das variáveis climáticas de maior significância (precipitação e temperatura) segundo o método de Köppen; pedologia, características e potencialidades dos diferentes tipos de solo. Com base no exposto, pretende-se determinar os atributos físicos e químicos do solo sob diferentes usos na região da UHE – Tucuruí e aplicar técnicas de análise multivariada (Análise de Componentes Principais e Análise Hierárquica de Agrupamento) para correlacionar os dados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta dissertação está estruturada e fundamentada em diversos autores e pesquisadores reconhecidos por seus trabalhos científicos, além das pesquisas de campo realizadas na área de ciência dos solos, verificando os fatores que norteiam a problemática principal do referido trabalho e as técnicas de análises que possibilitam resultados significativos na área de estudo dos solos correlacionados a segurança de barragens.

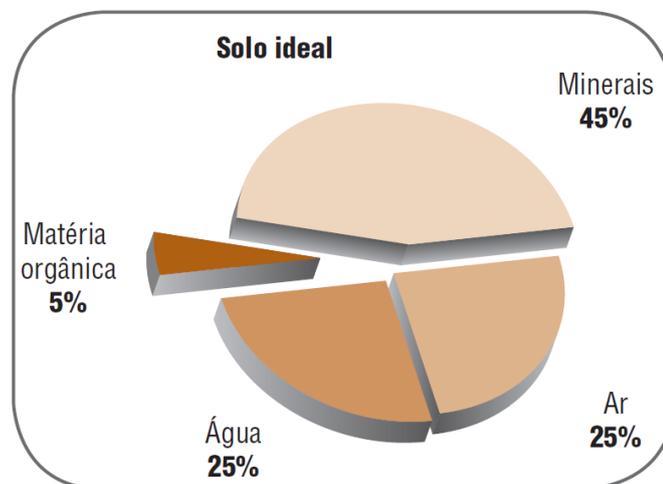
No entanto, para que os resultados obtidos através dos ensaios realizados tenham embasamento teórico, faz-se necessária uma revisão dos principais conceitos, características e classificação dos solos e dos processos erosivos de autores de nível nacional e internacional que colaboram com suas pesquisas para o desenvolvimento de novas teorias relacionadas ao tema. A questão dos processos erosivos vem sendo estudada com grande intensidade há algum tempo nas universidades e instituições públicas especializadas, como por exemplo, a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), seu maior raio de atuação.

2.1 DEFINIÇÃO DE SOLO

A definição do solo está relacionada com o envolvimento deste material e a especificidade do campo de estudo. Isso ocorre devido as diferentes finalidades para sua aplicação. Para a Ciência do solo, trata-se de um recurso natural da superfície da terra, incluindo: modo de formação, classificação, mapeamento, propriedades físicas, químicas, biológicas e fertilidade e correlacionando tais propriedades ao uso e manejo dos solos. Já no campo da Mecânica dos solos, é visto como material que pode ser escavado em função das leis da mecânica, com vistas a projetos de construção e conservação de edificações neles fundamentadas. Assim, ele será conceituado conforme a visão dos profissionais na geologia, pedologia, engenharia de minas, engenharia civil, agricultura, entre outros (LEPSCH, 2010).

De forma abrangente, os solos são materiais naturais não consolidados na superfície da terra, que evoluíram através de processos naturais como um corpo dinâmico e de forma tridimensional. É constituído por três fases: sólido, líquido e gás, conforme é apresentado na Figura 2.1. A fase sólida contém materiais orgânicos e inorgânicos intimamente misturados entre si por processos naturais. A fase líquida consiste em água com sais, ácidos, bases e íons dissolvidos. A fase gasosa consiste em ar do solo que renova de vez em quando da atmosfera. A água e o ar ocupam, respectivamente, pequenos e grandes poros, isto é, os vazios deixados na fase sólida desse material. Assim, um solo tem quatro componentes principais - matéria mineral, matéria orgânica, água e ar (OSMAN, 2013).

Figura 2.1 Fases constituintes do solo.



Fonte: Silva *et al.* (2009)

Também é denominado como um conglomerado de corpos naturais ocorrendo na superfície terrestre, contendo matéria viva e suportando ou sendo capaz de suportar vegetação. São constituídos a partir de diversas partículas de rochas em diferentes estágios de decomposição, água e substâncias químicas dissolvidas, ar, organismos vivos e matéria orgânica. O conhecimento das propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos pode auxiliar na adoção do melhor manejo possível do solo (PES; ARENHARDT, 2015).

Diversos são os fatores responsáveis pela constituição e propriedades dos solos, sendo os mesmos influenciados pelo clima, relevo, material de origem, organismos e tempo. Devido à dinâmica da água nos rios os solos dos barrancos das margens do rio podem variar no tempo e no espaço e, o acompanhamento dessas mudanças pode auxiliar no entendimento de vários processos relacionados aos recursos hídricos (SANTOS *et al.*, 2013).

2.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

A Morfologia do solo é o campo de estudo e a descrição da aparência do solo em meio natural. Constitui-se no conjunto de fatores presentes e observáveis nos solos que permitem diferenciar um determinado tipo de solo dos demais. As principais características observadas na descrição morfológica de um solo são: cor, consistência, textura, estrutura e a cerosidade. Todos os atributos morfológicos observados em campo no perfil do solo são de extrema importância para a caracterização desse material, juntamente com as análises das propriedades físicas, químicas e mineralógicas, realizadas em laboratório (SILVA; CHAVES; LIMA, 2009).

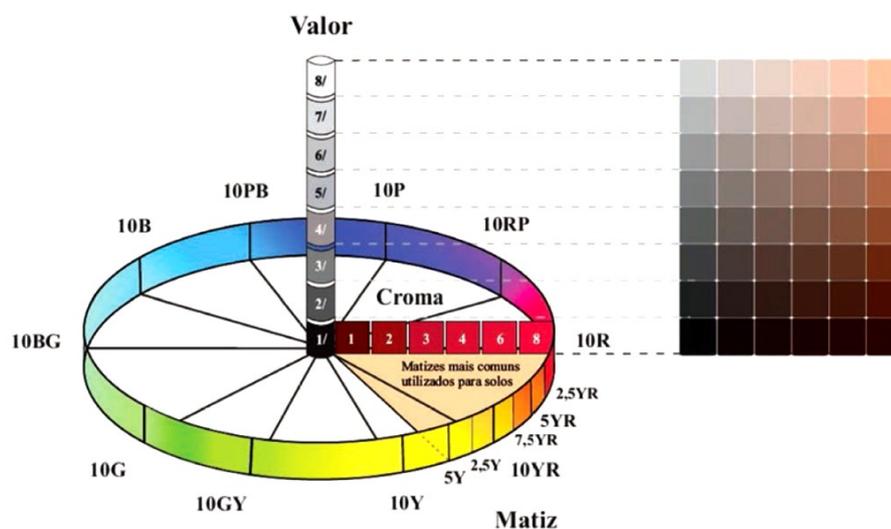
Nesta dissertação serão descritos a seguir os principais atributos citados anteriormente, porém, para estudos especiais outras características morfológicas são levadas em consideração por auxiliarem na classificação dos solos, algumas são particularmente necessárias, como a transição e características como nódulos e concreções minerais, *slikensides*, superfícies de compressão e outras. Estes fatores são indispensáveis para definir os horizontes diagnósticos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2017).

2.2.1 Cor do solo

A cor do material solo tem importância na delimitação e identificação de horizontes de um perfil. As principais colorações registradas são: cores escuras, vermelhas, amarelas, acinzentadas, claras ou esbranquiçadas, e horizontes mosqueados com cor aparente mascarada por algum produto do intemperismo. Também se relaciona a coloração do solo com os elementos nele presente, quanto mais escuro o solo, maior será o conteúdo de matéria orgânica; quanto maior for a presença de óxidos de ferro, mais avermelhado será esse solo, já uma tonalidade preto-azulada pode significar a presença de magnésios (SILVA; CHAVES; LIMA, 2009).

Para melhor padronização utiliza-se para determinação de cores de solos, parte da coleção de cores do livro Munsell (Munsell book of color). Esta parte do livro, também denominada Munsell soil color charts (1994, 2009), contém somente aquela porção de cores necessárias para a caracterização dos solos. Essa escala de cores é construída segundo três variáveis: o MATIZ, o VALOR ou claridade relativa e o CROMA ou intensidade da cor, conforme é apresentado na Figura 2.2 (p. 22) (IBGE, 2015).

Figura 2.2 Sistema de ordenação de cores Munsell.



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais (2015).

Segundo Lepsh (2010) Matiz é a cor pura condicionada pelos comprimentos de onda da luz refletida na amostra de solo. O Valor é a medida do grau de claridade da luz ou tons de cinza presentes que varia numa escala de zero a dez. Já o Cromo é a proporção da mistura da cor fundamental com a tonalidade de cinza que também varia numa escala de zero a dez.

As principais ou mais comuns edições do Munsell soil color charts, contêm sete cartas (correspondentes a sete notações de matiz) que somam 199 padrões de cores, organizados com base nas variáveis; matiz, valor e croma, apresentados na forma de caderno ou caderneta, e ainda, são encontradas no mercado outras edições que contemplam cores mais avermelhadas e ou amareladas comparadas aos cadernos anteriores, porém com os mesmos arranjos (IBGE, 2015).

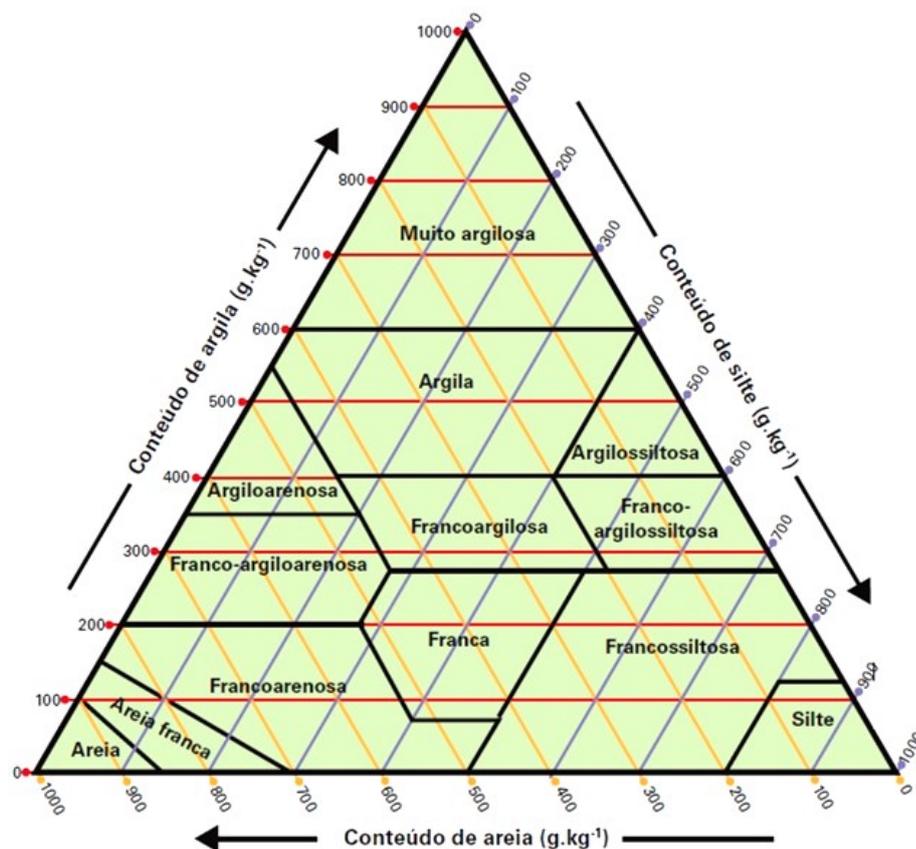
2.2.2 Textura

Ao fragmentar os componentes minerais que constituem os agregados ou torrões de um específico horizonte do solo, observa-se que eles são compostos de um conjunto de partículas individuais que estão entrelaçadas em condições naturais. Elas podem ter diversos tamanhos, sendo perceptíveis ou não a olho nu. Para o campo Pedológico, o termo textura refere-se à proporção relativa das frações de areia, silte e argila em um material do solo e a determinação da classe de textura, pode ser realizada tanto em campo quanto em laboratório (partículas < 0,05mm), por ocasião da descrição morfológica do solo (LEPSCH, 2010).

A diversidade de tais partículas na composição da massa do solo é praticamente infinita, visto que as dimensões dos seus diâmetros constituem um espectro contínuo de valores. Conforme varia a predominância de determinado tamanho de partícula no solo, as características do solo também vão variar. A textura determinada por meio de análises laboratoriais é mais precisa. Já no campo é feita por meio de aproximação, utilizando o tato e as sensações que cada partícula passa (PES; ARENHARDT, 2015).

Como no solo há várias frações e diversas combinações possíveis, se faz necessária a realização de seu agrupamento em classes texturais. Esse grupamento textural é organizado na forma de triângulo (Figura 2.3), Lemos e Santos (1996) foram os primeiros a apresentarem essa metodologia de classificação por meio do Manual de Descrição e Coleta de Solo em Campo. Os intervalos entre os quantitativos de cada uma das frações que definem as diversas classes texturais, tendo em cada um de seus vértices os valores máximos (1000g.kg^{-1}) e mínimos (0g.kg^{-1}) de cada uma das mesmas (areia, silte e argila). A aplicação desse guia para grupamento de classes de textura requer muita atenção com relação à entrada dos dados para que o somatório de todas as frações se complete num total de 1000g.kg^{-1} de TFSA (IBGE, 2015).

Figura 2.3 Guia para grupamento de classes de textura.



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais (2015).

Observa-se que os grupamentos texturais podem ser registrados em notação simples, binária ou ternária. (textura arenosa, argilosa, muito argilosa, siltosa, etc.). Já os contrastes texturais entre horizontes dos solos são expressos por notação binária ou ternária, na forma de frações, como por exemplo, “textura média-argilosa” (binária) e “textura arenosa-média-muito argilosa” (ternária). Podem ser aplicadas nas várias classes de solos para designar variações das classes texturais em profundidade (SANTOS *et al.*, 2013).

Esse sistema triangular aplicado para classificação textural do solo, que apesar de pouco usado no meio geotécnico, é simples e prático. Ele apresenta, no entanto, a desvantagem de não contemplar a classificação de solos pedregulhosos, uma vez que os três eixos representam os teores de argila, silte e areia. Por isso, recorre-se com frequência à distribuição granulométrica devido à sua relação mais direta com o comportamento do solo (CARVALHO, 2010).

2.2.3 Estrutura

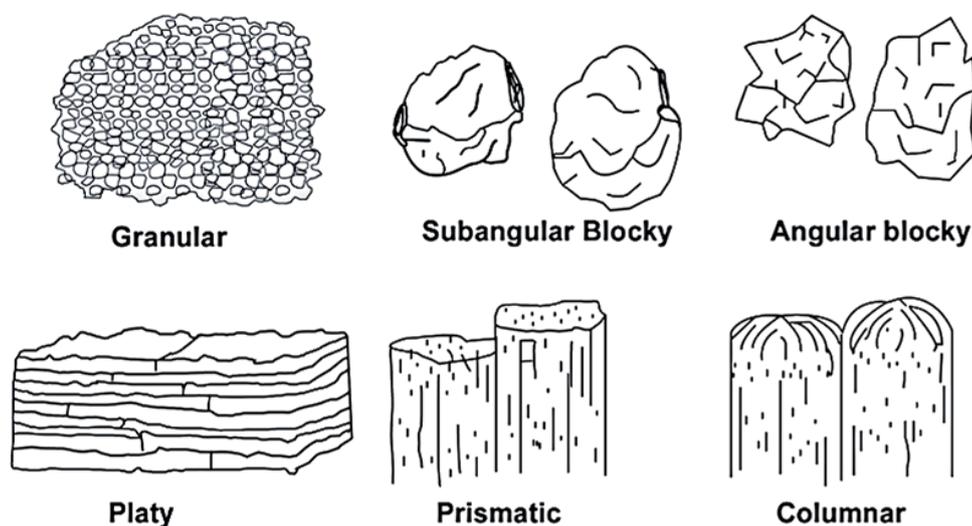
Compreende a orientação ou a forma de arranjo das partículas primárias do solo, como resultado de seu processo de formação, constituindo agregados, separados ou não por superfícies ou linhas de fraqueza. Além de grande influência sobre características e/ou propriedades importantes dos solos, tais como densidade aparente ou global, características físico-hídricas e resistência às dispersões, determinam maior ou menor vulnerabilidade a processos erosivos (IBGE, 2015).

Essa estruturação do solo é promovida, principalmente, pela argila e a matéria orgânica presente no material. As partículas unitárias do solo (areia, silte e argila) unem-se através de forças de adesão e coesão, originando os agregados de características próprias, inerentes à organização natural da matéria sólida que constitui os horizontes componentes do perfil do solo (PES; ARENHARDT, 2015).

Todavia, a estrutura constitui um dos atributos morfológicos mais importantes do ponto de vista de identificação de horizontes dos perfis de solos e ainda, ela é um fator chave no funcionamento do solo. Uma Estrutura favorável do solo e alta estabilidade dos seus agregados são importantes para melhorar a fertilidade do solo, a produtividade, aumentando a porosidade e diminuindo a erodibilidade. Em alguns solos, as partículas permanecem separadas, mas na maioria deles, há agregação dos grãos, constituindo-se em solos bem estruturados, com partículas de solo de vários tamanhos e formas (OSMAN, 2012).

Segundo Lepsch (2010), convencionalmente, os tipos de estruturas presentes nos solos podem ser; granular (grãos pequenos, arredondados e pouco porosos, que não se ajustam entre si), blocos angulares (em forma de cubos ajustados entre si por faces planas e arestas vivas), blocos subangulares (semelhantes aos blocos angulares, apresentando faces convexas ou côncavas, com vértices e arestas arredondados), prismática (apresentam-se na forma de prismas, com faces planas e arestas vivas e o eixo vertical maior), colunar (semelhante à forma de prismas, com as faces planas e vértices superiores arredondados.) e laminar (grãos em forma de lâminas nas quais a linha horizontal é menor que a vertical). Na Figura 2.4 são apresentados alguns tipos de estruturas do solo.

Figura 2.4 Tipos de estruturas do solo.



Fonte: Osman (2013).

2.2.4 Consistência

Conforme o Manual Técnico de Pedologia (2015), consistência refere-se às manifestações das forças físicas de coesão e adesão presentes no solo, de acordo com a variação dos teores de umidade. Para designar a consistência faz-se necessário incluir especificações diferenciadas para a descrição em três estados de umidade padronizados: solo seco, úmido e molhado.

O solo em estado seco apresenta propriedades relacionadas à dureza. Já quando está úmido, apresenta propriedades relacionadas à friabilidade (refere-se ao estado de umidade aproximadamente intermediário entre seco ao ar e a capacidade de campo). E, finalmente, quando está molhado, apresenta propriedades relacionadas à plasticidade, que é a capacidade do material em alterar continuamente de forma, pela ação da força aplicada, e de manter a forma imprimida, quando a ação da força é cessada, e a pegajosidade trata-se da capacidade do solo de aderir a outros objetos (PES; ARENHARDT, 2015). Na Figura 2.5 é apresentada a avaliação da consistência de um torrão seco de solo, pressionando-o entre o indicador e o polegar.

Figura 2.5 Avaliação da consistência de um torrão seco de solo.



Fonte: Lepsch (2011).

2.2.5 Cerosidade

Este atributo é considerado como ocorrência ocasional no solo, refere-se às aglutinações de material inorgânico na forma de preenchimento de poros, cobertura de unidades estruturais, ou de partículas das frações grosseiras que se apresenta com aspecto lustroso e brilho graxo. Esta característica, quando comprovada, na análise de campo deve ser descrita conforme as metodologias atuais, e pode ser ainda, confirmada por meio da análise micromorfológica (SANTOS *et al.*, 2013).

Quando presente, a cerosidade deve constar da descrição do horizonte, imediatamente após a descrição da estrutura, citando-se primeiramente a quantidade (pouca, abundante e comum), seguida do grau de desenvolvimento (fraca, moderada e forte). A correta identificação desta característica é de crucial importância para o enquadramento taxonômico de vários solos, sendo a sua presença ou não, elemento distintivo de gênese e, por conseguinte, de horizontes diagnósticos de classes no primeiro nível categórico do SiBCS (IBGE, 2015).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Segundo Pes e Arenhardt (2015), a classificação de um solo é obtida a partir da avaliação dos dados morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do perfil que o representam. Aspectos ambientais do local do perfil, tais como clima, vegetação, relevo, material originário, condições hídricas, características externas ao solo e relações solo-paisagem, são também utilizadas. São nessas informações e outros fatores ambientais e de formação do solo que os sistemas de classificação estão fundamentados, porque a partir dessas observações é possível o ato de classificação, assim, eles foram desenvolvidos para fornecer dados generalizados aos cientistas e gestores desse recurso (PIDWIRNY, 2016).

De maneira simplificada, o princípio da classificação de solos é basicamente agrupar os solos conforme as características semelhantes que eles apresentam. Além disso, a classificação de solos facilita o entendimento entre técnicos e demais profissionais da área que envolve este material. Também, permite conhecer quais as qualidades e limitações dos solos, prever o seu comportamento e identificar o uso mais adequado (SILVA; CHAVES; LIMA, 2009).

Conforme Lepsch (2010), para serem devidamente classificados, os solos necessitam de um sistema hierarquizado em diversos níveis categóricos. Cada classe, ou unidade sistemática, deve situar-se em um determinado nível. Por sua vez, todas as classes incluem outras, dos níveis inferiores. Há diversos sistemas de classificação do solo em uso, tanto nacionais quanto internacionais, por exemplo, os mais consolidados atualmente são: Soil Taxonomy (EUA), FAO/ UNESCO e WRB (*World Reference Base for Soil Resources*), alguns países também apresentam seus próprios sistemas como o Canadá, Rússia, França, Reino Unido, África do Sul e China.

A versão atual da *Soil Taxonomy* tem seis níveis de classificação em sua estrutura hierárquica. As principais divisões deste sistema de classificação, do geral ao específico, são: ordens, subordens, grandes grupos, subgrupos, famílias e séries. No seu nível mais baixo de organização, a taxonomia do solo dos Estados Unidos reconhece aproximadamente 15.000 séries de solo diferentes (PIDWIRNY, 2016).

A Organização para a Agricultura e Alimentação das Nações Unidas (FAO-UNESCO), foi a pioneira em tentar estabelecer um sistema internacional de classificação de solos, possui um banco de dados significativos e diversos mapa-múndi com a finalidade de acomodar os principais padrões de solo e os problemas enfrentados por este recurso natural. A partir desse sistema de classificação foi desenvolvido o “Sistema Referencial Básico para Recursos dos Solos no mundo – WRB” (MONTANARELLA, 2015).

No Brasil, a classificação pedológica vigente consiste numa evolução dos supracitados sistemas, a coleção de critérios veio a abranger variados atributos diagnosticados a par de diversos horizontes, os quais foram assimilados conforme o desenvolvimento do novo sistema americano de classificação pedológica e do esquema FAO.

O Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS) é um projeto da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) organizado de maneira hierárquica e multicategórica que busca consolidar a sistematização taxonômica que expresse o conhecimento presente para a discriminação de classes de solos identificadas no país. Nesta dissertação a descrição sucinta da classificação de solos que abrange a específica área de estudo está baseada no sistema brasileiro de classificação.

2.3.1 Níveis categóricos do SiBCS

O nível categórico de um sistema de classificação de solos é um conjunto de classes definidas segundo atributos diagnosticados em um mesmo nível de generalização ou abstração e inclui todos os solos que satisfizerem a essa definição. As características diferenciais para os níveis categóricos mais elevados da classificação de solos devem ser propriedades que resultam diretamente dos processos de gênese do solo ou que afetam diretamente sua origem, porque estas propriedades apresentam um maior número de características acessórias (SANTOS *et al.*, 2013).

Os níveis categóricos adotados no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) são seis: 1º nível categórico (ordens), 2º nível categórico (subordens), 3º nível categórico (grandes grupos), 4º nível categórico (subgrupos), 5º nível categórico (famílias) e 6º nível categórico (séries) (SANTOS *et al.*, 2013).

Como esclarece Lepsch (2010), os nomes dados às classes de solos das diversas categorias podem fornecer muitas informações, porque quando um solo é classificado ao nível de subgrupo, cada vocábulo corresponde a uma determinada categoria. Por exemplo, no subgrupo *latossolo vermelho eutroférico típico*:

- I. Latossolo (ordem): o solo é profundo, bem drenado, sem aumento significativo de argila em profundidade, baixa capacidade de troca, minerais primários intemperizados ausentes ou em quantidades muito pequenas;
- II. Vermelho (subordem): as cores no horizonte B são vermelhas, o que indica a presença do mineral férrico hematita.
- III. Eutroférico (grande grupo): tem elevada saturação por bases e teores de ferro também elevados.
- IV. Típico (subgrupo): o solo não apresenta características intermediárias.

2.3.2 Nomenclatura e descrição das classes

Conforme o manual técnico de pedologia (2015), a nomenclatura corresponde ao primeiro nível categórico, os nomes das 13 classes são formados pela associação de um elemento formativo com a terminação – “ssolos” que são: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Espodossolo, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos e Vertissolos. Quanto mais específica e integrada aos outros níveis categóricos, maior será a quantidade de designação dos solos. No levantamento realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE, 2015), destacaram-se 28 predominâncias de solos no território nacional.

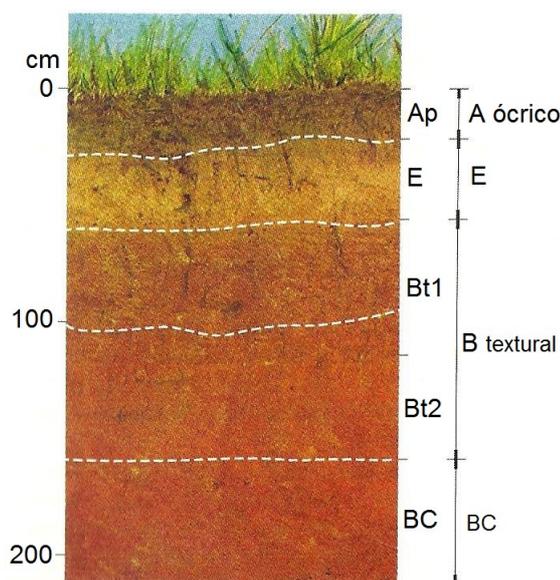
Para melhor esclarecimento e auxílio no entendimento da fundamentação deste trabalho, em vista da diversidade de solos existentes, será descrito de maneira sucinta, os tipos de solos identificados na região de entorno do reservatório da UHE e do município de Tucuruí, como Argissolo (podzólico) Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo e Plintossolos (solo petroplíntico) conforme o plano diretor do município de Tucuruí (2010).

2.3.2.1 Argissolos vermelho-amarelo (podzólico)

Segundo o Plano de Desenvolvimento Regional Sustentável do Lago de Tucuruí - PDRS (2011), os Argissolos vermelho-amarelos são solos minerais não hidromórficos, com argila de atividade baixa e cores vermelhas a amarelas (Figura 2.6). Na região estudada solos dessa classe eutróficos e distróficos (com boa e baixa fertilidade natural respectivamente) são observados. Esta classe de solo apresenta ampla variabilidade de profundidade e de classes texturais.

Nesses solos, constata-se grande diversidade nas propriedades de interesse para a fertilidade e uso agrícola, desde que não estejam situados em áreas montanhosas, com fortes declives, pois nessas condições, estão muito sujeitos a problemas sérios de erosão. Essa suscetibilidade é verificada quando há grande diferença de textura entre os horizontes A e B, sendo maior o problema quando o horizonte A é arenoso, com aumento abrupto de argila em profundidade (Lepsch, 2011).

Figura 2.6 Perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo e esquema de seus horizontes diagnósticos.

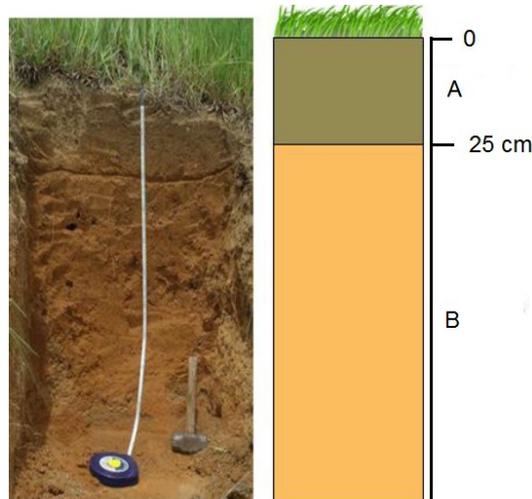


Fonte: Adaptado de LEPSCH (2010).

2.3.2.2 *Latossolos Amarelos*

Os Latossolos Amarelos encontram-se, principalmente, na Amazônia e nos tabuleiros costeiros do nordeste. As principais variações do perfil típico (Figura 2.7) são do horizonte A, bastante espesso e escuro (Latossolo com A proeminente ou A húmico), cores amareladas no B, aliadas a uma estrutura com macroagregados subangulares de consistência firme quando unidos e, dura quando secos (Latossolos Amarelos Coesos). São solos minerais, não hidromórficos, profundos, normalmente distróficos (baixa fertilidade natural) e elevada saturação de alumínio trocável. Trata-se de solos ácidos, permeáveis, embora por vezes apresentem-se como moderados a imperfeitamente drenados. (LESPCH, 2011)

Figura 2.7 Perfil de Latossolo Amarelo.

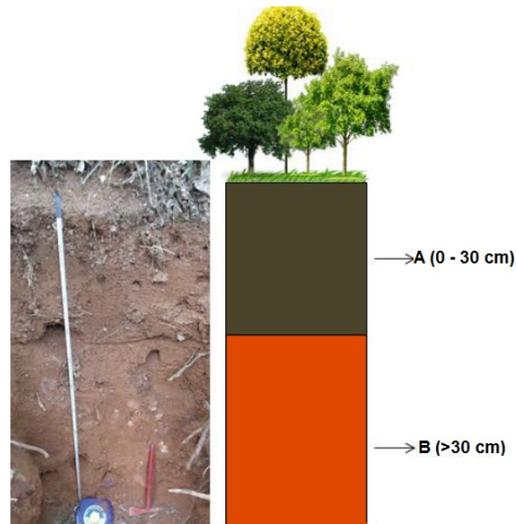


Fonte: Adaptado de Texeira Junior (2015).

2.3.2.3 *Latossolo Vermelho-Amarelo*

Os Latossolo Vermelho Amarelo são solos minerais, não hidromórficos, profundos e bem drenados, normalmente com baixa fertilidade natural e elevada saturação por alumínio, pode ser identificado pela cor alaranjada no horizonte B do perfil do solo, as argilas caulínicas, revestidas por óxidos de ferro, é que são responsáveis pela forte microagregação e pela típica coloração, avermelhadas – quando há predominância de hematita e alaranjadas – pela presença de goethita (LESPCH, 2011). Na Figura 2.8 (p. 32) é ilustrado o perfil do Latossolo Vermelho-Amarelo.

Figura 2.8 Perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo.

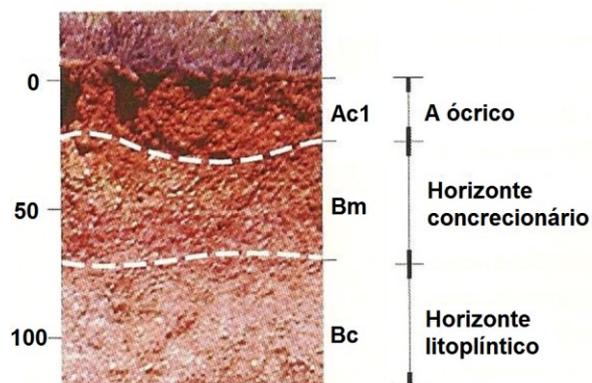


Fonte: Adaptado de Texeira Junior (2015).

2.3.2.4 Plintossolo Pétrico (solo Petroplíntico)

O solo petroplíntico, em sua maioria, apresenta boa drenagem e tem horizonte concrecionário. São considerados muito problemáticos para prática da agricultura, tanto por sua baixíssima fertilidade como pela presença de concreções que limitam o enraizamento e dificultam o trabalho de máquinas agrícolas. Esses solos formam uma classe relativamente heterogênea, que tem em comum a presença de plintita, compreendendo muitos solos intermediários para outras ordens, como as dos Latossolos e Argissolos, com as quais ocorrem associados, principalmente nas regiões de clima quente e úmido. Os solos Petroplíntico localizados na região amazônica, onde escasseiam os afloramentos rochosos, acabam sendo uma das únicas fontes disponíveis para pavimentar estradas (LESPCH, 2011). Na Figura 2.9 é mostrado o perfil do solo Petroplíntico.

Figura 2.9 Perfil do solo petroplíntico e seus horizontes.



Fonte: Adaptado de LEPSCH (2010).

2.4 ESTUDOS DOS SOLOS E A SEGURANÇA DE BARRAGENS

Muitos problemas relacionados às barragens são originados das chamadas deteriorações e hoje com o surgimento da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a mesma define que: anomalias de barragem são quaisquer manifestações, visual ou não, de alteração negativa do comportamento da estrutura. Também, a Resolução ANA 742/2011, anomalia é “qualquer deficiência, irregularidade, anormalidade ou deformação que possa vir a afetar a segurança da barragem, tanto a curto como a longo prazo”.

Os Estudos e análises dos solos estão relacionados no mais diversos campos que envolvem tanto a construção quanto a segurança de barragens. São importantes desde a fase inicial como, por exemplo, localização de jazidas, fundações, como material de constituição (no caso das barragens de terra), e na fase de operação pela estabilidade e qualidade dos solos nos taludes e nas margens dos reservatórios (COSTA, 2012). É por meio dos estudos geotécnicos que é possível a retirada de amostras e a realização de ensaios de laboratório, afim da obtenção das características do solo a ser utilizado no corpo da barragem, tanto no maciço, nos filtros e na proteção dos taludes (BANDEIRA, FEITOSA, 2012).

Segundo Oliveira *et al.* (2013) tratando-se de segurança de barragens (estrutura em si) o risco geológico/geotécnico pode ser considerado um dos principais pontos de estudo, pois na maioria das ocorrências, é a partir do solo que se geram várias patologias (deslizamentos, *piping*, etc.) e erros de análises, viabilizando desta maneira, algo com segurança duvidosa, seja por falha humana e/ou imprevisões. Além de problemas nas próprias estruturas da barragem, deve-se ampliar o olhar para todo conjunto de influencia direta e indireta, que a mesma exerce sobre os solos e vice-versa, uma vez que a esfera de segurança de barragens estende-se também aos aspectos econômicos e ambientais (CHEN *et al.*, 2010).

Dentre os mais diversos fatores que podem afetar a segurança de barragens e o perfeito funcionamento do seu reservatório são destacados nesta dissertação, os aspectos relacionados à degradação dos solos que, conseqüentemente, tem influência direta destes empreendimentos devido às modificações que os mesmos são capazes de provocar no meio no qual está inserido. Observando-se, principalmente, os processos erosivos que muitas vezes é confundido com a degradação do solo como um todo, mas, na verdade, se refere apenas a perdas absolutas de solo. Este é de fato, o efeito mais visível da degradação do solo, mas não abrange todos os seus aspectos (FAO, 2017).

2.4.1 Erosão

A erosão é um processo que resulta no deslocamento de partículas que compõem um solo ou uma rocha. No presente trabalho, será analisada apenas a erosão provocada pela água (o vento, o mar e as geleiras ficaram fora dessa pesquisa) não apenas de esta ser o mais importante agente erosivo, mas também pela existência ou fraca atuação dos demais agentes com relação a barragens no Brasil (COSTA, 2012).

A erosão é causada por forças ativas, como as características da chuva, a declividade e o comprimento do declive do terreno e a capacidade que o solo tem de absorver água e, por forças passivas, como a resistência que o solo exerce a ação erosiva da água e a densidade da cobertura vegetal. A água é o agente principal no processo erosivo, pois além de desprender e manter as partículas do solo em suspensão, o seu escoamento pela superfície do solo transporta, além dos sedimentos, os nutrientes químicos, matéria orgânica, sementes e defensivos agrícolas. A erosão causa também problemas à qualidade e disponibilidade da água, decorrentes da poluição e do assoreamento de mananciais, favorecendo a ocorrência de enchentes no período chuvoso e aumentando a escassez de água nas estiagens (CARVALHO, 2012).

A erosão pelo efeito da água pode ser pluvial, quando exercida diretamente pelas águas da chuva, ou fluvial, quando provocada pelos rios. Em termos de reservatório, a erosão pluvial é muito mais significativa, pois a área exposta a esse processo em uma bacia hidrográfica é muitas vezes superior àquela em que pode ocorrer a erosão fluvial (margens dos rios apenas). Na erosão pluvial, interferem muitos fatores de natureza bastante diversificada, e os mais significativos são: pluviosidade, declividade, natureza do solo, cobertura vegetal e atividade antrópica (COSTA, 2012).

2.4.1.1 Pluviosidade

A influência da pluviosidade é mais significativa na forma como ocorre do que no volume da precipitação pluviométrica anual. Nas regiões onde a pluviosidade é concentrada em poucos meses do ano, os efeitos das precipitações pluviais sobre erosão dos solos são muitos mais intensos. Dependendo da intensidade das chuvas, as primeiras gotas que colidem contra a superfície do terreno desagregam pequenas partículas dos solos, retirando, ao mesmo tempo, a camada mais fértil deste (COSTA, 2012).

2.4.1.2 Declividade

A declividade tem sua influencia direta na intensidade da erosão, uma vez que atua no gradiente das águas percoladas, aumentando sensivelmente a sua velocidade e, o comprimento e forma da encosta, juntamente com outros fatores ligados às propriedades do solo, podem acelerar o processo erosivo. A quantidade de material transportado depende da velocidade da água e esta é uma consequência direta do declive, pois quanto mais longa a encosta, maior o volume de água que escoar e maior a capacidade de remover sedimentos, nas encostas íngremes e compridas o arreste de partículas sólidas são intensificados favorecendo a erosão do solo (RAMIDAN, 2003). Na Figura 2.10 é apresentada uma encosta na região da UHE de Itumbiara – GO com intenso processo erosivo.

Figura 2.10 Encosta seriamente erodida.



Fonte: Ramidan (2003).

2.4.1.3 Natureza do solo

A natureza do solo diz respeito principalmente aos agentes que influem na coesão das partículas que o constituem. Os materiais sem coesão são mais facilmente erodíveis, como é o caso dos solos mais arenosos e siltsos. A laterização ou a calcinação aumentam significativamente a resistência à erosão dos solos. Também pode se afirmar que erosão não é a mesma em todos os solos, decorrência da diferença de resistência que varia entre eles, cujo efeito, depende das suas propriedades físicas e químicas, além das características da cobertura vegetal (COSTA, 2012).

2.4.1.4 Cobertura vegetal

A cobertura vegetal é imprescindível como proteção dos solos contra a erosão, pois sua rede de raízes trabalha como elemento fixador do solo, aumentando a sua resistência a erosão. A sua copa também exerce uma proteção contra a erosão, reduzindo o impacto da chuva diretamente sobre o solo. (COSTA, 2012).

As matas ciliares são estabelecidas pelo Código Florestal Federal, na Lei 12.651 como - área de preservação permanente - para ocuparem as margens dos cursos d'água tais como rios e riachos, e ainda, ao lagos e reservatórios d'água naturais e artificiais são fundamentais para proteção contra os processos erosivos, pois quando formada junto aos barrancos marginais ribeirinhos constitui-se como uma sólida estrutura de contenção de sedimentos carreados pela chuva e pela flutuação dos níveis d'água, evitando que os mesmos se acumulem e diminuam a profundidade do reservatório ao longo do tempo (D'ARMADA, 2012). Na Figura 2.11 é ilustrada uma parte da margem do reservatório da UHE Porto Colômbia, sem a preservação da vegetação ciliar que favoreceu na ocorrência de erosão.

Figura 2.11 Falta de preservação da mata ciliar na margem da UHE - Porto Colombo.



Fonte: D'Armada (2012).

2.4.1.5 Ação antrópica

A ação antrópica é geralmente danosa no processo de erosão, pois o desenvolvimento reflete-se no contínuo desmatamento, que expõe o solo aos efeitos da erosão pluvial. Em áreas urbanas, a concentração de fluxos que encaminham as águas pluviais e de despejo para as áreas periféricas constitui um forte agente erosivo, responsável pela formação de voçorocas que tem comprometido inúmeras cidades brasileiras (COSTA, 2012).

Na área rural, o desmatamento para a implantação da agricultura tem propiciado a formação dos mais variados tipos de erosão, responsável pelo assoreamento de rios e reservatórios. A mineração não controlada expõe extensas áreas decapeadas sujeitas à erosão (COSTA, 2012).

As áreas no entorno das usinas hidrelétricas tanto a montante quanto a jusante, acabam sendo ocupadas pela população local, apesar de serem consideradas na maioria das vezes áreas de proteção ambiental, as fiscalizações para não ocupação são insuficientes. Tais áreas transformam-se em pastagem, plantações, atividades extrativistas, entre outras, em função do manejo inadequado do homem, o solo pode ser passível de degradação, o que prejudica suas funções básicas, trazendo interferências negativas como na diminuição da qualidade de vida dos ecossistemas. No geral, a população desconhece a importância do solo, isso acaba gerando processos que levam à sua alteração e degradação (SANTOS, ZANELLO, 2009).

2.5 EROSÃO E ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS

À escala regional, transformações geradas pelas inundações decorrentes de grandes reservatórios pertencentes às usinas hidrelétricas, apresentam consequências significativas em termos de mudanças de utilização das terras. A cartografia das mudanças de uso e ocupação do solo à escala das bacias hidrográficas é importante porque são as categorias de ocupação do solo que influenciam principalmente sobre a qualidade da água do reservatório e de seus afluentes (STRAT *et al.* 2011).

A perda de solo é um processo que pode ser acelerado pela antropização, por meio da falta de planos de uso e cobertura do solo constituindo-se, dessa maneira, em uma das causas da redução do volume de água útil em reservatórios de geração hidrelétrica. São os reservatórios que interceptam a maior parte das descargas sólidas transportadas na rede fluvial, sua capacidade de armazenamento de água, vida útil e a velocidade de assoreamento está diretamente relacionada com todo sistema da bacia hidrográfica que o alimenta, e também com a qualidade dos solos (OLIVEIRA, 2011).

A erosão e o assoreamento são problemas comuns nos reservatórios de barragens. Esses fatores são abordados em conjunto pela relação entre si de causa/efeito, pois, se entende que a erosão é a causa da remoção dos componentes de um solo ou rocha, já o assoreamento dos cursos d'água e dos reservatórios, decorrente da sedimentação do material erodido, constitui-se no efeito daquele fenômeno. No processo erosão/sedimentação faltaria apenas a componente do transporte, que geralmente é o mesmo veículo responsável pela erosão, ou seja, a água. O risco de erosão e assoreamento são processos que promovem grandes danos a um reservatório (COSTA, 2012).

Dentre outros efeitos, os processos erosivos manifestados pelo assoreamento de cursos d'água e de reservatórios, também prejudicam a qualidade das águas e, os materiais carregados durante esse processo terminam por se depositar nas cotas mais baixas de rios, lagoas, açudes e reservatórios que, conseqüentemente, viabiliza alterações nas respectivas geometrias e dinâmicas de seu funcionamento (SCHREUDERS, 2010).

Segundo D'Armada (2012), depois de implantado o reservatório, as áreas marginais ficam sujeitas às novas condições físicas, submetidas às ações do lago, e tornam-se, na maioria dos empreendimentos, novas Áreas de Preservação Permanente - APP. No entanto, os efeitos das condicionantes regulamentares, muitas vezes, são vagarosos e incertos, não propiciando o equilíbrio ambiental estimado, frente aos efeitos das novas condições físicas, que são imediatas. Dessa maneira, diversos tem sido os registros de avanço de erosões nas faixas marginais dos reservatórios, também com diversas suposições para suas causas.

Para a TVA - Tennessee Valley Authority (2011), as causas que aumentam a velocidade do processo natural de erosão das margens de cursos d'água e encostas estão condicionadas a remoção da cobertura vegetal, o aumento de vazão dos rios; ação das ondas provenientes dos ventos e do movimento de embarcações.

Ramos *et. al* (2014) constatou por meio de mapeamento e monitoramento que os processos erosivos presentes nas encostas do reservatório da UHE- LUIS GONZAGA afetava um total de 16 áreas. As que apresentavam solo com predominância de areia e silte nos desbarrancamentos, favoreciam a suscetibilidade de erosão das margens do corpo d'água. A falta de vegetação ciliar nas áreas com erosão aumentou a instabilidade dos desbarrancamentos marginais contribuindo para o aporte de sedimentos ao reservatório tendendo para um assoreamento em longo prazo.

Além da falta de vegetação ciliar, a erosão do solo e desmoronamentos do terreno frágil, pode ser dada em função da movimentação da água do lago (sazonalidade de elevação e rebaixamento do nível de água do reservatório) e da ação dos ventos nas encostas que estão frontalmente na influência destes, como pode ser observado por Barata (2011) em seu estudo sobre Desmatamentos em Áreas Protegidas na Amazônia na RDS Alcobaça na UHE - Tucuruí localizada a montante do barramento.

Além da constatação de erosão em reservatórios de usinas hidrelétricas, também pode ser observado o desenvolvimento de estudos aplicados à suscetibilidade de tal problemática. Percebe-se isso, claramente, na pesquisa feita no Reservatório de Manso, localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Manso no Estado de Minas Gerais, devido aos problemas de assoreamento causado pelo transporte de sedimentos proveniente das cabeceiras da bacia, fazendo desse fenômeno uma ameaça à vida útil do reservatório (XAVIER *et al.*, 2010), do mesmo modo foi avaliada a suscetibilidade dos solos à erosão na área de entorno do reservatório da UHE de Tombos (CALDERANO *et. al.*, 2014).

2.6 OS ATRIBUTOS DO SOLO NA QUALIDADE E NOS PROCESSOS EROSIVOS

O solo é um sistema aberto entre os diversos geocossistemas do planeta. Ele está constantemente sob ação de fluxos de matéria e energia, essa condição o torna um sistema dinâmico, isto é, o solo evolui, desenvolve-se e forma-se de maneira contínua no ambiente em que está inserido (EMBRAPA, 2017). Durante seu desenvolvimento o solo sofre a ação de diversos processos de formação como perdas, transformações, transportes e adições. Esses processos são responsáveis pela transformação da rocha em solo, diferenciando-se desta por ser constituído de uma sucessão vertical de camadas que diferem entre si na cor, espessura, granulometria, conteúdo de matéria orgânica e nutrientes de plantas (ROSA, 2010).

Segundo Abbott e Murphy (2003) há três componentes fundamentais para a qualidade do solo - físico, químico e biológico. O nível de fertilidade do solo resulta das suas características inerentes e das interações que acontecem entre esses três componentes. A maioria das características que contribuem para a fertilidade do solo, como o pH do solo e a suscetibilidade do solo à compactação, dependem dos constituintes da rocha original. A adição de fertilizantes modificam as características do solo e alteram sua fertilidade. Uma das principais causas de erosão ou perda de solo é devido à destruição da estrutura do solo, que pode ser atribuída a práticas como preparo intensivo (mistura de solo), remoção excessiva de material vegetal e depleção de nutrientes do solo.

As características dos solos, propriamente ditos, estão intimamente relacionadas com as propriedades mineralógicas e da composição das soluções químicas que interagem com esses elementos. Condições térmicas e hidrológicas provocam alterações, desintegrando e decompondo o material constituinte do solo, por meio dos processos de intemperismo, dos quais resultam as partículas de argilominerais e os óxidos de ferro e alumínio (MONTANARELLA, 2015).

A constituição do solo, bem como seus atributos, pode favorecer ou não os processos erosivos, como também as mudanças no canal e conformação das margens (SANTOS *et al.*, 2013). Os agentes externos tais como as chuvas, os fluxos de água e o vento representam forças de deslocamento e transporte das partículas do solo. Quando essas forças são superiores à resistência do solo ocorre erosão. No entanto, a erosão não é a mesma em todos os solos, decorrência da diferença de resistência que varia entre eles, cujo efeito, depende dos seus atributos químicos e físicos, além das características da cobertura vegetal (COSTA, 2012).

2.6.1 Atributos físicos

Segundo Pereira e Thomaz (2015), os atributos físicos em conjunto podem influenciar no crescimento de plantas, nos teores de ar e de água presentes no interior dos solos e geram uma grande influência na erodibilidade dos mesmos. Dentre os atributos físicos que podem ser relacionados aos parâmetros para qualidade dos solos estão: textura, granulometria, umidade, plasticidade e liquidez dos solos.

2.6.1.1 *Textura e granulometria*

Por exemplo, a textura mais arenosa pode favorecer a erosão das margens, devido à baixa coesão entre as partículas, por outro lado, a textura muito argilosa pode dificultar a infiltração da água no solo, favorecendo seu acúmulo na superfície (SANTOS *et al.*, 2013).

A textura também é um dos fatores que influenciam na maior ou menor quantidade de solo arrastado pela erosão. A textura pode ser avaliada na sua formação, podendo ser um solo arenoso que toleraria uma chuva fraca sem nada sofrer devido a sua macroporosidade e alta taxa de infiltração da água. Entretanto o mesmo solo não suportaria uma chuva intensiva causando o arraste de partículas (DYONISIO, 2010).

Alguns dos estudos realizados que representam a importância das propriedades dos solos frente à problemática erosiva foi ocorrência da erodibilidade de solos situados às margens do reservatório da UHE- FURNAS, as análises físicas executadas em diferentes tipos de solo resultaram em perdas de massa superficial, e ainda, a plasticidade e índice de atividade das argilas exercem um papel fundamental na análise do comportamento dos solos, e que a composição granulométrica é um parâmetro fundamental na erodibilidade de um solo (BALEEIRO *et al.*, 2016).

2.6.1.2 *Umidade*

Outro atributo físico que ajudam a compreender o comportamento dos solos frente as diversas problemáticas desse material é a umidade, que apresenta relação também com a granulometria e textura dos solos, uma vez que, a resposta aos problemas de Engenharia dos solos de granulação grossa está relacionada à sua textura. Porém, nos solos de granulometria fina, a presença da água responde muito mais por seu comportamento do que a textura e as dimensões dos grãos, considerados separadamente. A água afeta a interação entre os grãos minerais e isto altera sua plasticidade e coesão (SSI, 2018).

2.6.1.3 Limite de liquidez e plasticidade

Eles permitem determinar os limites de consistência do solo. O termo consistência é usado para descrever um estado físico, isto é, o grau de ligação entre as partículas das substâncias. Quando aplicado aos solos finos ou coesivos, a consistência está ligada à quantidade de água existente no solo, ou seja, ao teor de umidade. Uma argila amolece quando se adiciona água, e se a quantidade acrescentada for excessiva, forma-se uma lama que se comporta como um líquido viscoso com resistência ao cisalhamento praticamente nula. Conforme o teor de umidade no solo, este será classificado conforme seu estado em líquido (solos saturados), plástico (solo excessivamente úmido), semi-sólido (baixo teor de umidade) sólido (solos mais duros) (SSI, 2018).

2.6.2 Atributos químicos

Conforme Cardoso (*et al.*, 2013), os atributos químicos são considerados importantes para a qualidade do solo, pois são capazes de gerar dados sobre os nutrientes para as plantas, elementos retidos e compostos químicos prejudiciais ao desenvolvimento dos vegetais e do ambiente. O pH do solo, a capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica e carbono orgânico são os principais atributos químicos utilizados para análise da qualidade dos solos, principalmente quando se considera a capacidade do solo de suportar tanto sua própria estrutura quando desenvolvimento de cultivos, sustentação e manutenção de florestas nativas, entre outros.

Os atributos químicos quando modificados por fatores externos (ação de chuvas, antrópica, etc) são indicadores que permitem uma ação de melhoria das propriedades químicas do solo por meio de técnicas específicas tais como adubação, reposição de micronutriente, entre outros, além de gerar dados que possibilitam a análise e nível de deterioração dos solos. (LIMA *et al.*, 2016).

2.6.2.1 Potencial Hidrogeniônico – pH

Segundo Nogueira (2017), o pH do solo corresponde a concentração de íons H^+ presente na solução do solo, ele é um dos principais indicadores de sua fertilidade; além de ser um dos parâmetros mais importantes para a determinação da maioria das espécies químicas. O solo é considerado ácido quando possui muitos íons H^+ , dessa forma pode acarretar na pobreza de nutrientes do mesmo, um alto teor de alumínio tóxico, alta deficiência de fósforo e excesso de manganês contribuem para acidificação dos solos (BRAGA, 2012). De modo a controlar os processos químicos que acontecem no solo faz-se necessário manter-se adequadas as faixas de pH, pois, esta influi na produtividade do mesmo; a faixa de pH ideal dos solos para a agricultura é entre 6,5 e 7,5. (NOGUEIRA, 2017; BATALHA et al., 2012).

2.6.2.2 Acidez do solo

A acidez trocável ou real refere-se à quantidade de Al^{3+} adsorvido pelas cargas negativas do solo (CTC), ou seja, ela determina a CTC efetiva definida como a soma das bases + ($H^+ + Al^{3+}$). A CTC efetiva é determinada em função do pH do solo; em solos ácidos, a CTC efetiva é inferior à CTC potencial. Elas são estimadas a partir da soma das bases trocáveis, ou seja, os íons adsorvidos, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , $H^+ + Al^{3+}$. (BRAGA, 2010; EMBRAPA, 2011). A acidez do solo. Em geral, os solos do território brasileiro são mais ácidos e possuem baixa disponibilidade de nutrientes necessários ao rendimento de lavouras (BRAGA, 2010).

2.6.2.3 Capacidade de troca de cátions CTC.

A capacidade de troca de cátions de um solo representa a quantidade total de cátions retidos em sua superfície em condições permutáveis, ou seja, a soma total dos cátions que o solo pode reter; esses cátions são: $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + H^+ + Al^{3+}$ (EMBRAPA, 2011). A CTC pode ser entendida como a medida do poder de adsorção, a troca de cátions do solo varia de acordo com o pH do mesmo, isso se deve pela existência do grande número de cargas negativas dependentes do pH, na superfície dos coloides (BRAGA, 2010).

Em solos arenosos pode ser observada uma baixa CTC, onde ocorre uma maior perda dos nutrientes por lixiviação e necessitam de quantidades menores de calcário para neutralização da acidez desse solo. Por outro lado, nos solos argilosos a CTC é maior e ocorrem menores perdas dos nutrientes por lixiviação, mas necessitam maiores quantidades de calcário (BRAGA, 2010).

2.7 ANÁLISE MULTIVARIADA APLICADA AO ESTUDO DE SOLOS

A análise multivariada tem importante papel no estudo de relações entre variáveis, principalmente, pelo grande número de associações necessárias para resultados precisos. Nas últimas décadas é utilizada como ferramenta que possibilita explicar o máximo de correlações entre os fatores analisados e identificar quais deles é mais sensível para influenciar os dados de respostas esperadas (TABACHINCK, FIDELL, 2013).

Também, por meio da análise multivariada é possível reduzir a representação dimensional dos dados, organizando-os em uma estrutura que facilita a visualização de todo o conjunto de fatores, além de permitir a extração de informações complementares que a análise univariada não consegue evidenciar (MOURA *et al.*, 2006).

De acordo com Khaledian *et al.* (2016) boa parte dos métodos estatísticos multivariados desenvolvidos é capaz, por exemplo, de avaliar a qualidade do solo. Entre eles estão: Método dos mínimos quadrados parciais (PLS – *Partial Least Square*), regressão de componentes principais (PCR – *Partial Components Regression*), regressão dos mínimos quadrados ordinários (OLS – *Ordinary Least Square*), análise de componentes principais (PCA – *Principal Components Analysis*) e análise de agrupamento hierárquico (HCA – *Hierarchical Clustered Analysis*).

Segundo Pragma *et al.* (2012), a técnica multivariada para análise de dados dos solos vem sendo aplicada em diversos trabalhos científicos. Dependendo da finalidade da pesquisa, pode ser empregado mais de um método estatístico multivariado, combinados ou comparados entre si, sendo eles fundamentais para validação de novas técnicas de avaliação das propriedades e componentes do solo (VASQUES *et al.*, 2008). Um exemplo desta afirmativa foi a investigação da contaminação por metais pesados de solos nas margens de afluentes, na qual as análises multivariadas apontaram para causas antropogênicas (REN *et al.*, 2015).

Das análises multivariadas previamente apresentadas, será descrita detalhadamente nesta dissertação, a Análise de componentes principais (PCA) e Análise de agrupamento hierárquico (HCA) que são as duas técnicas de análises que possibilitam a visualização gráfica de todo o conjunto de dados, ainda que a quantidade de amostras e variáveis seja elevada (CORREA; FERREIRA, 2007). Por esta finalidade, essas são as técnicas aplicadas no desenvolvimento da metodologia do referido trabalho.

2.7.1 Análise de componentes principais (PCA)

É uma técnica de análise multivariada fundamentada nas combinações lineares das variáveis originais. O novo conjunto de variáveis, designadas de componentes principais, é ortogonal entre si e, portanto, não correlacionadas. As primeiras componentes principais explicam a maior parte da variância total contida no conjunto de dados e podem ser usadas para representá-lo (MOURA *et al.*, 2006).

Na PCA, o primeiro componente principal (PC1) é a combinação linear de variáveis observadas que se extrai ao máximo a variância dos escores de seus componentes. O segundo componente (PC2) é formado por correlações residuais que retiram a máxima variabilidade não correlacionada com o primeiro componente e descreve a variância máxima no subespaço ortogonal para este. Assim, os principais componentes são ordenados, com o primeiro componente se obtém a maior variação e o último componente a menor variação. A solução é matematicamente única, os componentes principais são retidos reproduzindo a matriz de correlação exata (TABACHINCK, FIDELL, 2013).

Ferreira (2002) destaca que, depois de eliminada a redundância, apenas os primeiros componentes principais são necessários para descrever a maioria das informações contidas no conjunto de dados original. A Matriz de dados \mathbf{X} ($I \times J$) (onde I corresponde ao objeto em análise e J aos descritores) é decomposta em duas matrizes, \mathbf{T} e \mathbf{L} , tal que;

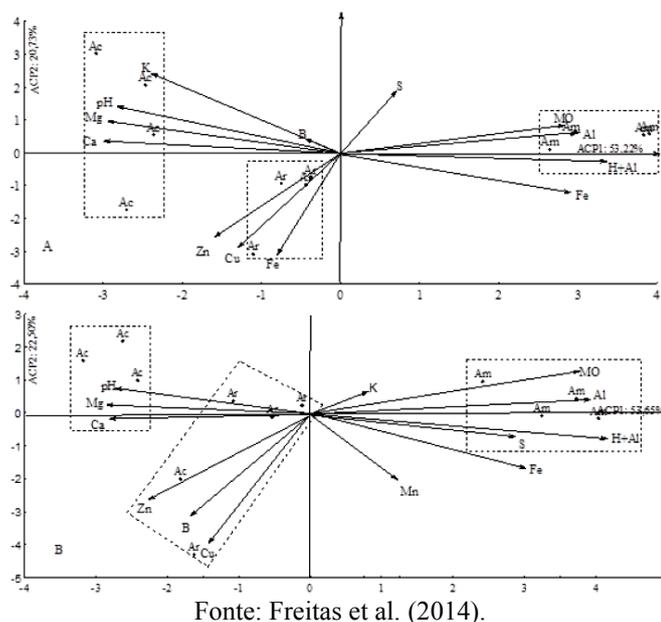
$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\mathbf{L}^T \quad (\text{Eq. 2.1})$$

A matriz \mathbf{T} , conhecida como matriz de "pontuação" representa as posições dos compostos no novo sistema de coordenadas, enquanto as PCs (componentes principais) são os eixos. \mathbf{L} é a matriz de "carregamento" cujas colunas descrevem como o novo eixo, isto é, as PCs são construídas a partir dos eixos anteriores. Isso é mais bem feito usando a técnica de decomposição do valor singular, SVD, que decompõe \mathbf{X} em três matrizes \mathbf{U} , \mathbf{S} e \mathbf{V} , na qual \mathbf{U} e \mathbf{V} são matrizes quadradas auto-verticais ortogonais e \mathbf{S} é uma matriz diagonal contendo os valores singulares (equivalente ao quadrado Raiz dos autovalores). O produto $\mathbf{U} * \mathbf{S}$ é a matriz de pontuação \mathbf{T} , enquanto \mathbf{V} corresponde à matriz de carregamento \mathbf{L} . O quadrado de cada elemento diagonal de \mathbf{S} é igual à quantidade de variância nos dados originais descritos pelo componente principal correspondente (FERREIRA, 2002).

A eficácia da PCA nos estudos dos solos é observada na pesquisa realizada por Nosrati (2013), na qual foi possível indicar a qualidade do solo sobre diferentes usos e a ocorrência de degradação. Semelhantemente, Freitas *et al.* (2014) demonstrou em seu estudo que, o uso intensivo do solo diminui sua qualidade, os pesos entre as variáveis e as componentes principais permitiu caracterizar os indicadores que mais discriminaram na formação e diferenciação dos solos. Através da análise de componentes principais (PCA) das variáveis, levando em conta todos os aspectos químicos analisados, houve clara distinção dos ambientes de mata nativa, reflorestamento e cultivo.

Além disso, as pesquisas que envolvem os estudos dos atributos químicos e físicos dos solos, geralmente, apresentam um grande número de variáveis a serem analisadas. As respostas podem ser geradas e contidas em tabelas ou graficamente, o que facilita a interpretação dos resultados. O Gráfico 2.1 elaborado no estudo de Freitas *et al.* (2014) serve de exemplificação para essa afirmação.

Gráfico 2-1 Análise de componentes principais com base nas variáveis do solo nas diferentes áreas estudadas:



2.7.2 Análise de agrupamento hierárquico (HCA)

De acordo com Moura *et al.* (2006) a Análise de Agrupamento Hierárquico é um dos métodos mais diretos, baseia-se na identificação de grupos de indivíduos ou objetos que são semelhantes entre si, mas diferentes de indivíduos ou objetos em outros grupos, ou seja, com esse método, há a aglomeração e divisão de *cluster* (conjunto de amostra) para formação de subgrupos conforme as suas similaridades.

Segundo Ferreira (2002), a principal função da Análise de Agrupamento Hierárquico é exibir os dados de maneira a enfatizar seus *clusters* e padrões naturais. Os resultados de natureza qualitativa são apresentados na forma de um dendrograma que permite visualizar as amostras ou variáveis em um espaço 2D. As distâncias entre amostras ou variáveis são calculadas e transformadas em uma matriz de similaridade S (uma notação usual que não deve ser confundida pela matriz de valores singulares de PCA) cujos elementos são os índices de similaridade. Para quaisquer duas amostras k e l , o índice de similaridade é definido como:

$$S_{kl} = 1.0 - \frac{d_{kl}}{d_{\max}} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Na qual S_{kl} é um elemento de S , d_{\max} é a maior distância para qualquer par de amostras no conjunto de dados, d_{kl} é a distância euclidiana entre as amostras k e l calculadas pela equação;

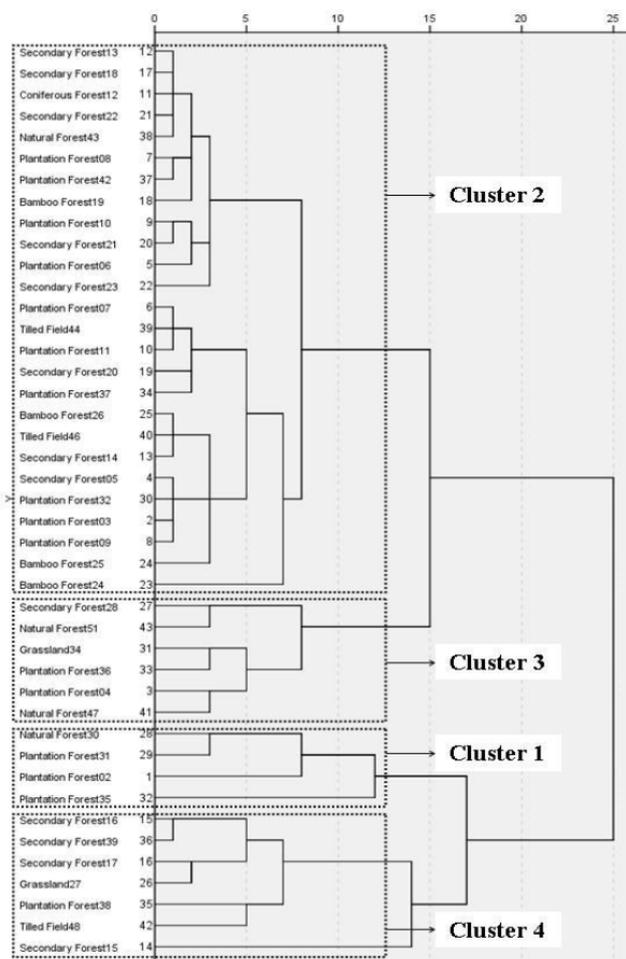
$$d_{kl} = \sqrt{\left((x_{k1} - x_{l1})^2 + (x_{k2} - x_{l2})^2 + \dots + (x_{kj} - x_{lj})^2 \right)} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde x_{ij} é um elemento da matriz de dados X .

A escala de similaridade varia de zero a um. É claro que quanto maior for o índice S_{kl} , menor será a distância entre k e l , portanto, S_{kl} refletirá diretamente sua semelhança. Assim, os elementos-objetos de um grupo tornam-se elementos do grupo superior, constituindo uma série hierarquizada.

Com base nas medidas de proximidades, os objetos são alocados aos grupos de forma que as distâncias entre eles são grandes e os elementos dentro dos grupos estão o mais próximos possível um dos outros. Isso pode ser observado na pesquisa realizada por Wijitkosum e Yolpramote (2013) na qual os agrupamentos das propriedades do solo resultaram em quatro grupos de solos, plotados no Dendrograma apresentado na Figura 2.12 (p. 48). Nesse estudo os autores perceberam que os agrupamentos 2, 3 e 4 possuíam níveis de nutrientes semelhantes, os solos agrupados no *cluster 2* eram extremamente ácidos, os solos do *cluster 3* foram caracterizado por solos arenosos. O *cluster 1* engloba solos mais férteis que os dos outros *clusters* e, a partir da análise ficou evidente que os solos da área de estudo estava seriamente degradados.

Figura 2.12 Dendrograma resultante obtido por agrupamento de dados de propriedades do solo.



Fonte: Wijitkosum, Yolpramote (2013).

Portanto, percebe-se que semelhante à Análise de Componentes Principais (PCA), o método estatístico multivariado de Agrupamento Hierárquico também pode ser visto como uma ferramenta útil e precisa no estudo de solos. Por meio dele, Pragma *et al.* (2012), em sua pesquisa para avaliar a qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto, no qual os autores ao submeter os dados à análise de agrupamento, observaram que os tratamentos com solos sob plantio direto formaram grupos distintos do campo natural, o que demonstrava a alteração dos atributos físicos do solo em relação a mata nativa.

Da mesma forma, Bam *et al.* (2011) aplicou o método HCA para detectar similaridade espacial, formando grupos das amostras sob investigação em relação às características de espécies metálicas e físico-químicas medidas no solo. O procedimento de agrupamento gerou três grupos de amostras de forma convincente, indicando independência relativamente alta para cada *cluster*, e que o desgaste das rochas contribuiu para a fonte de metais nos solos na área estudada.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

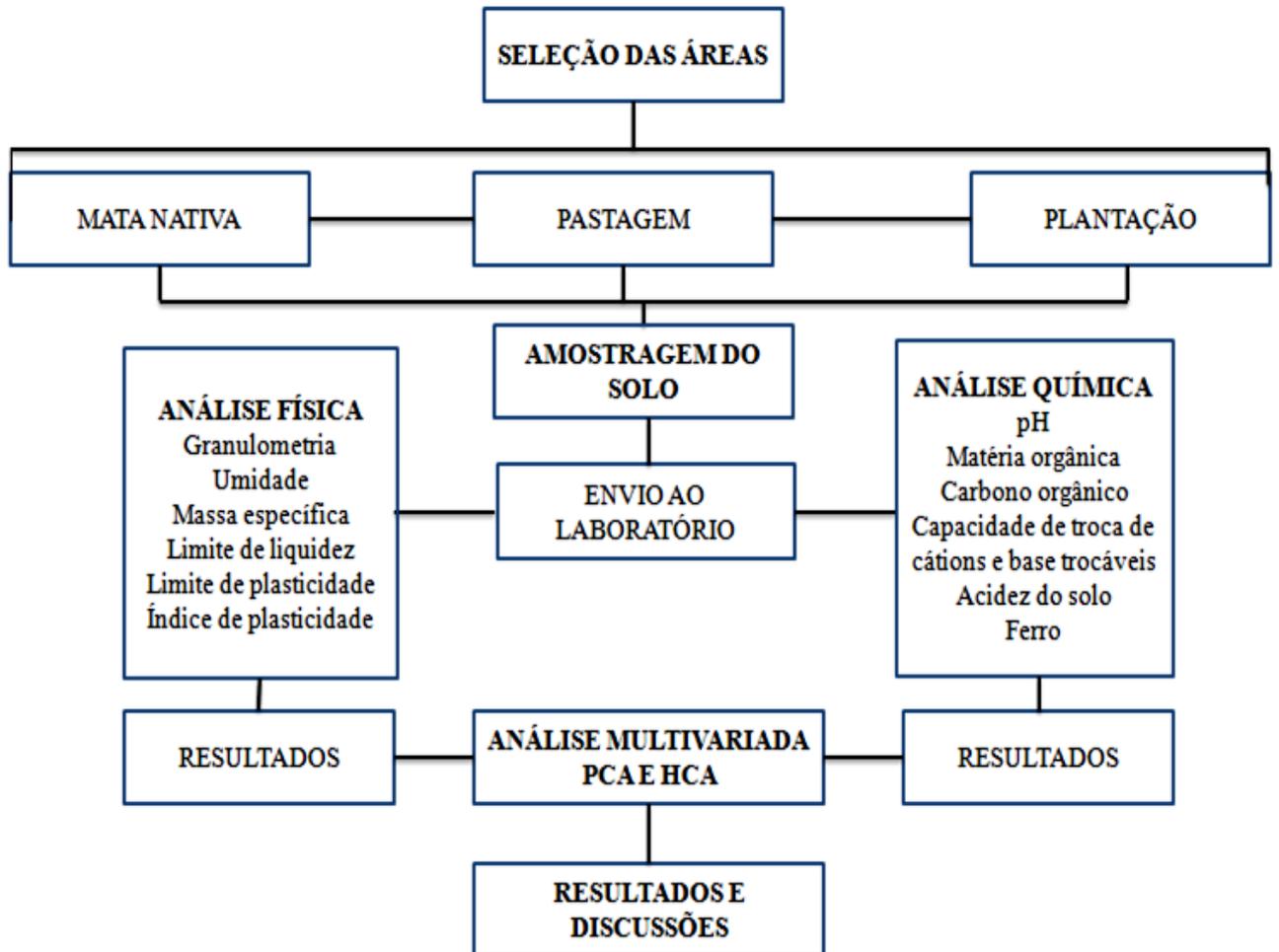
Inicialmente foram selecionadas as áreas de estudo desta pesquisa, que visava abranger áreas adjacentes a UHE – Tucuruí sendo consideradas áreas com diferentes usos e ocupação do solo no município de Tucuruí, incluído algumas ilhas localizadas na margem esquerda a montante do reservatório. Também foi realizada uma descrição geral do município de Tucuruí e da usina hidrelétrica (tipo de solo, vegetação, clima, volume e extensão do reservatório) e por meio da obtenção de dados históricos das estações pluviométricas e meteorológicas foram obtidas informações que correspondem uma descrição das condições climáticas do município e das vazões do lago.

Para avaliação da degradação do solo sobre diferentes uso e ocupação e verificação dos processos erosivos das margens do reservatório, foi realizado primeiramente o plano de amostragem que compreende a seleção dos pontos de análise, definindo-se o tipo de amostra, método de coleta, materiais e equipamentos necessários, quantificação, localização dos pontos de amostragem e os procedimentos para acondicionamento e identificação das amostras extraídas.

Para caracterização das propriedades físicas e químicas do solo foram realizados ensaios (análise granulométrica, umidade, massa específica do solo, pH, acidez do solo, matéria orgânica, entre outros) seguindo os procedimentos normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, juntamente com as recomendações descritas no Manual de Método de Análise de Solo da EMBRAPA (2011). Todos os testes necessários foram efetuados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará no Campus Universitário de Tucuruí.

O tratamento estatístico dos resultados das análises físicas e químicas do solo foi realizado por meio do método multivariado empregando-se a PCA e HCA, a partir dessas duas técnicas será possível correlacionar as variáveis analisadas com os processos de degradação do solo. Na Figura 3.1 (p. 49) é apresentado o fluxograma com as principais etapas que compõe a metodologia deste trabalho.

Figura 3.1 Fluxograma de Atividades

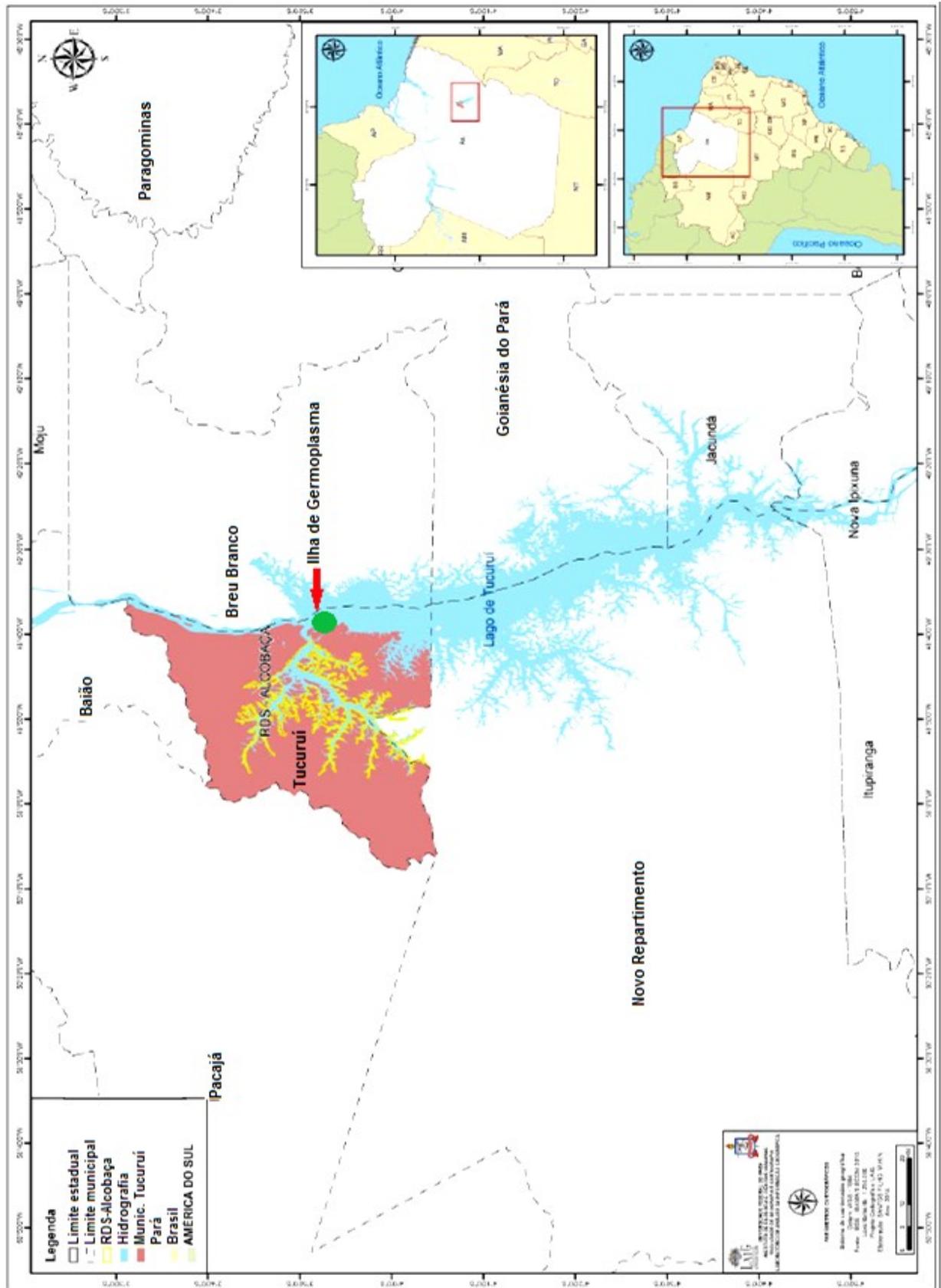


3.1 DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Tucuruí foi criado em 1947, banhado pelo rio Tocantins, situado na Mesorregião do Sudeste do Pará, a uma altitude de 42 m nas coordenadas geográficas (3°43' e 5°15'S; 49°12' e 50°00'W), a 350 km ao sul de Belém, Pará. Parte da hidrografia do município baseia-se no lago artificial criado pelo barramento do Rio Tocantins, situado na cota 72 metros, que inundou uma área de 2.430 km²; seu volume é de aproximadamente 45,8 bilhões de m³ de água, atravessando os municípios de Tucuruí, Breu Branco, Goianésia do Pará, Novo Repartimento, Jacundá, Nova Ipixuna e Itupiranga (ALMEIDA, 2016). Na Figura 3.2 (p. 51) é apresentado o limite territorial do município de Tucuruí.

As Ilhas do entorno da Usina Hidrelétrica da cidade de Tucuruí, correspondem a uma área territorial de cerca 2.086 km²(IBGE, 2016). Na montante foi criado Mosaico de unidades de conservação pela Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará (SEMAS), com base na Lei Nº 6.451 de 08/04/2002 (MEDEIROS, 2013).

O Mosaico de Unidades está constituído por duas reservas de uso sustentável a RDS Alcobaça e a RDS Pucuruí-Ararão, uma APA (Área de Proteção Ambiental), incluindo duas ZPVS (Zonas de Proteção da Vida Silvestre) e a ilha de Germoplasma caracterizada como um espaço selecionado para abrigar e garantir a conservação de material genético para uso futuro, localizada a uma distancia 3 km do barramento com extensão de 129 ha. Cerca de 15.000 árvores de 46 espécies diferentes se encontram preservadas no local (BARATA, 2011).



Fonte: Almeida (2016).

3.1.1 Condições climáticas

A área onde se localiza o reservatório da UHE - Tucuruí apresenta clima categorizado como equatorial super-úmido, tipo Ami, segundo a classificação de Köppen, o que determina uma relativa homogeneidade no clima com variações pouco significativas quanto à temperatura, precipitação, umidade atmosférica, insolação, velocidade dos ventos e demais parâmetros climáticos. Caracteriza-se por apresentar elevados índices pluviométricos (cerca de 2.400 mm de chuva), com temperatura média anual de aproximadamente 26 °C, sendo que as máximas (38 °C) ocorrem nos meses de agosto e setembro, e umidade relativa do ar superior a 85% (ROSA JUNIOR *et al.*, 2015).

Os ventos que predominam na região são os do quadrante norte, com velocidade média situada entre 14 e 17 km/h. O clima da região de Tucuruí apresenta-se com duas estações bem definidas e características: um período chuvoso de dezembro a maio, com chuvas intensas de origem convectiva e totais mensais atingindo valores entre 500-600 mm/mês; e outro período seco de junho a novembro, com uma estiagem pronunciada de agosto a setembro, quando a precipitação é tipicamente da ordem de 30 mm/mês. Por ser uma localidade próxima ao Equador, as temperaturas são altas durante o ano inteiro com médias mensais superiores a 24°C (CINTRA *et al.*, 2013).

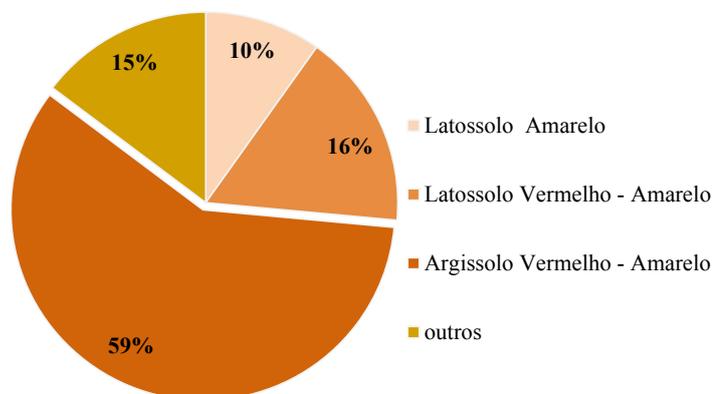
O principal controlador do volume d'água no reservatório é a operação da barragem. A cota máxima é de 74m, sendo a cota normal de operação de 72m e o mínimo de 58m. Para manter níveis desejados de geração de energia pela usina, as comportas dos vertedouros são constantemente ajustadas para uma maior ou menor retenção da água, dependendo da sazonalidade das chuvas. Antes da época de alta precipitação a vazão da água no reservatório é ampliada e a cota do reservatório decrescida para suportar o grande volume de água. No início da seca, as comportas são fechadas para evitar diminuição na produção de energia (CINTRA *et al.*, 2013).

3.1.2 Solos

Os solos existentes na região da UHE - Tucuruí são ácidos e apresentam baixa fertilidade natural (pobres em nutrientes). Os principais tipos de solos, que dominam quase totalmente a região onde está inserido o empreendimento, são os Podzólicos Vermelho-Amarelos (predominantes), Latossolos Vermelho-Amarelos e Latossolos Amarelos como demonstrado no Gráfico 3.3 (ROSA JUNIOR *et al.*, 2015). Na Figura 3.3 (p. 54) é apresentada a pedologia da região municipal de Tucuruí.

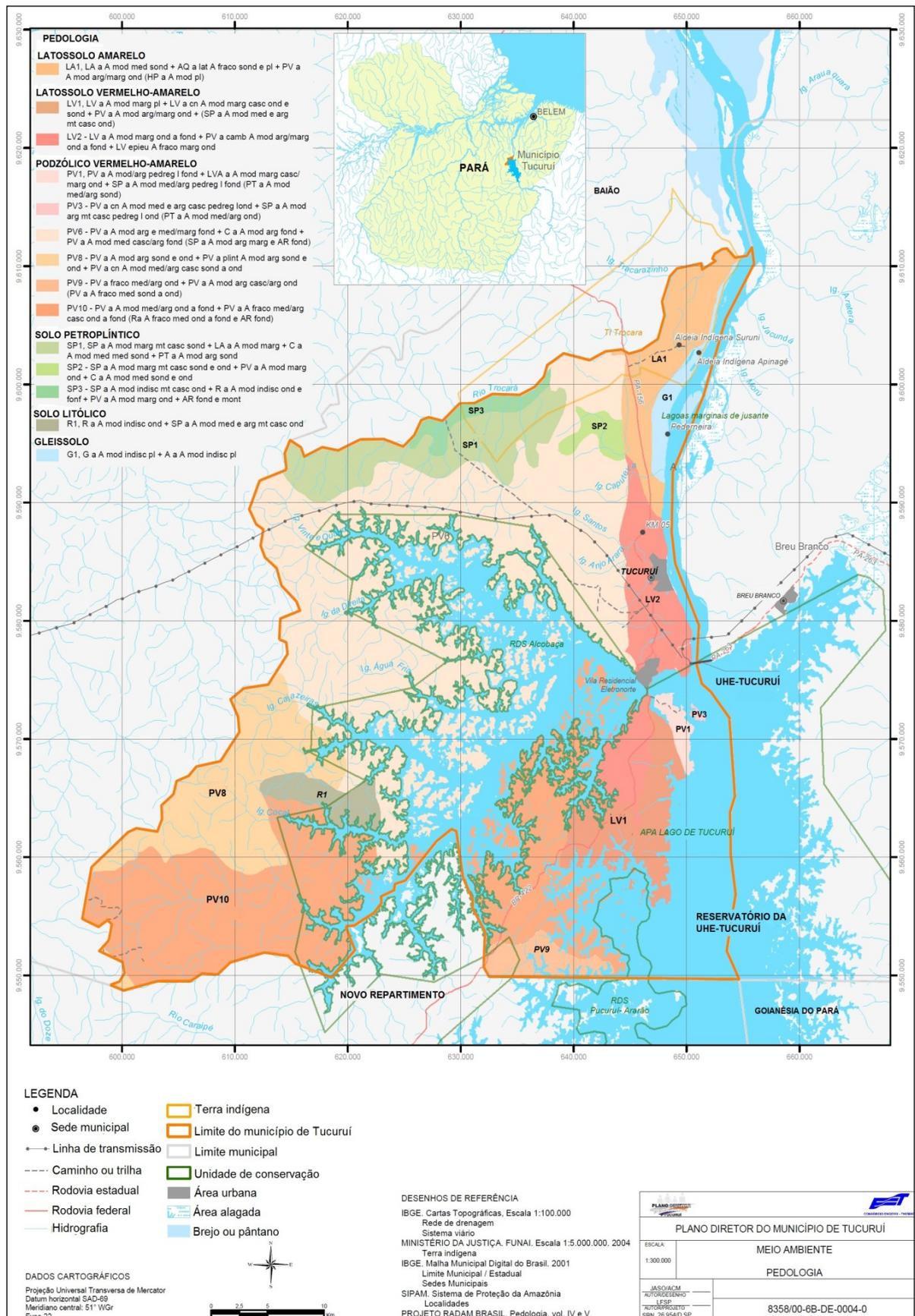
Os solos Argissolos Vermelho-Amarelos localizam-se, principalmente, na margem esquerda do reservatório, ocupando mais da metade da área de influência do reservatório e, apesar de algumas restrições, apresentam condições favoráveis para atividades agrícolas. Os Latossolos Vermelho-Amarelos e Amarelos localizam-se, principalmente, na margem direita do reservatório; são pobres em nutrientes, mas podem ser utilizados para fins agrícolas, quando adubados e corretamente preparados (ROSA JUNIOR *et al.*, 2015).

Gráfico 3-1 Porcentagem de solos na área de entorno da UHE - Tucuruí.



Fonte: Rosa Junior *et al.* (2015)

Figura 3.3 Mapa pedológico do município de Tucuruí-Pa.



Fonte: Plano Diretor do Município de Tucuruí, 2010.

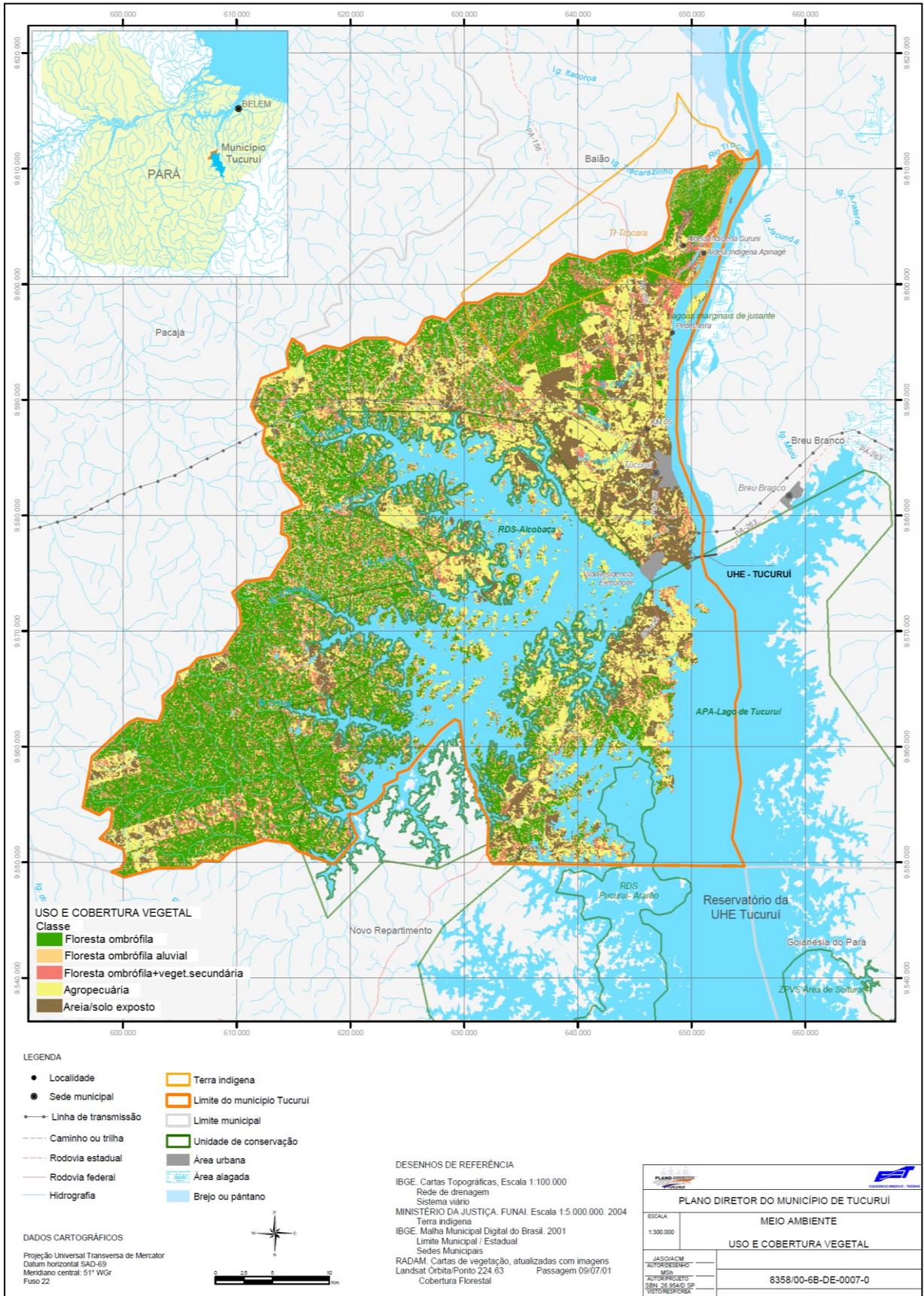
3.1.3 Vegetação

Conforme o Plano de Desenvolvimento Regional Sustentável do Lago de Tucuruí (2012), a vegetação do município formada por floresta tropical úmida, com os subtipos: Floresta Aberta Latifoliada, Densa de Platô, Densa de Terraço, Floresta Submontana, em relevo aplainado. Sendo que nas margens do lago encontra-se a Floresta de Galeria e a Floresta de Diques, compostas de espécies dicotiledôneas de porte arbóreo como a sumaúma, intercaladas palmáceas típicas de lugares úmidos com eventuais inundações. Parte dos tratos florestais do Município, abrangendo as florestas de várzea, matas ciliares e de terra firme, ao longo do curso do rio Tocantins, foi inundada por ocasião do fechamento das comportas da Hidrelétrica Tucuruí, com a formação do reservatório à montante do barramento.

O estado de conservação da floresta na área do lago da UHE Tucuruí é um fator importante para qualidade do solo, no processo de transformação das florestas em áreas de plantio e pastagem, os fazendeiros utilizam o fogo como instrumento para limpar a terra e prepará-la para o plantio ou para controlar o desenvolvimento de plantas invasoras. Essas queimadas geralmente são realizadas no final da estação seca, quando a vegetação está mais vulnerável ao fogo, causando degradação nos ecossistemas. Segundo os dados de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2009) os municípios da região do Lago de Tucuruí, no ano de 2008, apresentavam valores de desmatamento total de aproximadamente 20.210 km².

A maior parte das áreas de terra firme no entorno do lago da UHE-Tucuruí, no entanto, já apresenta profunda modificação antrópica com retirada da floresta para atividades econômicas, principalmente a pecuária extensiva. A alteração da vegetação natural observada nas últimas décadas é uma consequência também, das culturas agrícolas de subsistência (ALHO, FENZL, 2013). Na Figura 3.4 (p. 56) é mostrada a vegetação do município de Tucuruí.

Figura 3.4 Vegetação típica do município de Tucuruí.



Fonte: Plano Diretor do Município de Tucuruí, 2011.

3.2 ÁREAS PARA RETIRADA DAS AMOSTRAS DE SOLO

Como em qualquer análise laboratorial, a coleta adequada das amostras é de fundamental importância para garantir representatividade e, conseqüentemente, resultados confiáveis. É importante destacar que, devido às constantes alterações ambientais, não existem amostras iguais, portanto, o planejamento da coleta deve ser criterioso para fornecer quantidade de amostras suficientes para a realização de todos os testes requeridos e descritos nessa dissertação.

As coletas de amostras de solos foram realizadas de maneira a abranger áreas de pastagem, mata nativa (sem intervenção antrópica) e área de plantação, a seleção baseia-se no tipo de uso e ocupação de maior ocorrência dentro da APA, todas estas regiões são ilhas localizadas à montante do reservatório da UHE-Tucuruí, situadas especialmente na margem esquerda. Desta forma foi possível obter amostragens dos solos formadores da região (Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo; Latossolo vermelho-amarelo e solos petroplíntico) conforme o mapa pedológico do Plano Diretor do Município de Tucuruí (2010).

3.2.1 Área de pastagem e área de mata nativa;

Situada na RDS-Alcobaça, intitulada de comunidade Água Fria com uma distância de aproximadamente 23 km do barramento, nessa ilha há dois tipos de uso e ocupação predominantes (Figura 3.5 p.58), parte da região tem a conservação da floresta, isto é uma prerrogativa para habitação da ilha, de acordo com informações dos ocupantes, deve-se manter preservada esta área.

A outra parte corresponde à pastagem. Conforme algumas informações repassadas pelos moradores da localidade, a criação de gado começou a menos de dois anos (atividade recente). Essa área escolhida para retirada das amostras compostas observou-se que houve uma queima recente para limpeza da superfície, com a existência de fragmentos vegetais carbonizados e coloração extremamente escura da superfície do solo, entretanto o capim novo, ainda rasteiro, já cobria toda área de pastagem.

Figura 3.5 Área de Pastagem e Mata nativa adotada para retirada das amostras de solo.



Fonte: Autora.

Fonte: Google Earth, 2018.

3.2.2 Área de plantação

Situada na RDS-Alcobaça, com uma distância de aproximadamente 14 km do barramento, a atividade de cultivo é recente (menos de dois anos). Região de planície bem próxima à margem do lago, o tipo de cultura é a da *Capiscum spp*, popularmente conhecida como pimenta dedo-de-moça, plantação de baixo porte com distância de cerca de 80 cm entre as mudas, como pode se observado na Figura 3.6. Conforme o dono da propriedade o solo foi preparado e passou por processo de adubação com esterco de gado.

Figura 3.6 Área de plantação adotada para retiradas de amostras compostas.



Fonte: Autora.

Fonte: Google Earth, 2018.

3.3 COLETA E ACONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS

Conforme Estefan *et al.* (2013), Uma amostra de solo deve ser composta por várias sub-amostras representando uma área ou campo aparentemente uniforme, Não há números universalmente aceitos e definidos de sub-amostras, mas uma estimativa para diferentes situações de campo. Para as execuções dos procedimentos experimentais, determinou-se a quantidade de amostras para representação significativas das áreas, planejamento e método de extração a ser adotada em campo seguindo as recomendações do *Methods of Soil, Plant, and Water Analysis* (2013).

Para realizar as análises físicas e químicas foram coletadas amostras do tipo deformadas (retiradas por raspagem ou escavação, implicando na destruição da estrutura e na alteração das condições de compactação ou consistência naturais) em cada subárea, na camada superficial (0,0 – 10 cm) e na camada subsuperficial (10 – 20 cm), a amostra principal foi constituída por 12 sub-amostras (12 pontos de extração de solo). No total dos três tipos de áreas e na escolha das duas profundidades, adotadas nessa pesquisa, foram extraídos 72 pontos de amostragem, a forma de coleta das sub-amostras baseia-se no método *Two-way cross strip* para campos uniformes.

As amostras foram removidas com auxílio de um trado manual do tipo caneco (Figura 3.7 p.60), constituído por uma haste principal de ferro 120cm de comprimento (1/2” ou 3/4” de diâmetro que tem em uma das extremidades um dispositivo que possibilita acoplamento de uma ponteira), as distâncias dos pontos referentes as sub-amostras foram medidas com trena, distâncias máximas de cinco metros, partindo-se de um ponto central, para otimização do processo e precisão na localização de cada ponto amostral, as coordenadas geográficas (apêndice xx) foram capturadas com uso do GPS (modelo *Garmin etrex 20*).

Figura 3.7. Extração das amostras de solo com trado manual tipo caneco.



Fonte: Autora.

As amostras de solos da área de pastagem e mata nativa foram coletadas no dia 06 de fevereiro de 2018, das 08:00hrs as 13:00hrs da manhã, na ilha Morada Nova localizada na Comunidade Água Fria, na noite anterior havia chovido bastante se estendendo até o amanhecer do dia 06, dia parcialmente nublado. Já as amostras da área de plantação foram coletadas no dia 20 de julho de 2018, pela parte da manhã, parcialmente ensolarada, esse período é considerado de menor incidência de chuvas.

Em campo, cada ponto coletado, o solo foi despejado em um recipiente plástico para processo de homogeneização e um pré-tratamento de separação (retirada de galhos e raízes), após isto, elas foram pesadas, acomodadas em recipientes apropriados (embalagem plástica impermeável específica para armazenamento de solo – dimensão de 30cm x 70cm), identificadas, vedadas e transportadas, até o Laboratório de Engenharia Civil do Campus Universitário de Tucuruí, para serem analisadas. O processo descrito anteriormente está apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 Processo de homogeneização e acondicionamento das amostras de solos.



Fonte: Autora

3.4 MATERIAIS

De maneira geral, foi realizado um levantamento dos reagentes fundamentais para execução dos experimentos recomendados pelo Manual de Análise dos solos da EMBRAPA, e dos equipamentos para finalidade do mesmo, isso foi realizado, para melhor planejamento, organização e viabilidade da pesquisa.

3.4.1 Reagentes

São apresentados na Tabela 3-1 todos os reagentes utilizados na execução dos ensaios para determinação dos atributos químicos das amostras de solos analisadas nesta dissertação.

Tabela 3-1 Reagentes utilizados na análise química do solo.

REAGENTES	MARCA
Ácido sulfossalicílico 5%	VETEC
Ácido ortofosfórico (H ₃ PO ₄) concentrado 85%	NUCLEAR
Ácido sulfúrico diluído 1:1	VETEC
Coquetel tampão: Solução tampão pH 10	NUCLEAR E VETEC
Indicador azul de bromotimol	VETEC
Indicador difenilamina	VETEC
Indicador fenolftaleína 0,1%	NUCLEAR
Indicador murexida	SYNTH
Indicador negro de eriocromo	SYNTH
Solução de ácido clorídrico 1:1	NUCLEAR
Solução de ácido clorídrico + ácido nítrico 1:4	NUCLEAR e VETEC
Solução de EDTA 0,01mol/L	VETEC
Solução de Fe(NH ₄) ₂ .(SO ₄) ₂ .6H ₂ O 0,1mol.L ⁻¹	VETEC
Solução de K ₂ Cr ₂ O ₇ 0,0667mol.L ⁻¹	VETEC
Solução de KCN 10%	NUCLEAR
Solução de KCl 1M	NUCLEAR
Solução de KOH 10%	NUCLEAR
Solução de NaOH 0,1 mol.L ⁻¹	VETEC
Solução de NaOH 0,025mol.L ⁻¹	VETEC
Solução padrão de CaCl ₂ 1M	NUCLEAR
Soluções padrões de tampão em pH 4,00 e pH 7,00 (Calibração do aparelho)	NALGON
Trietanolamina 50%	VETEC

3.4.2 Equipamentos

Os equipamentos que auxiliaram no desenvolvimento dos ensaios experimentais relacionados à determinação dos atributos químicos e físicos estão listados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 Equipamentos utilizados nas análises: química e física.

EQUIPAMENTOS	MARCA
Aparelho de pH digital multiprocessado equipado com eletrodo saturado de KCl	PHTECK
Agitador Magnético com aquecimento	BIOMIXER
Chapa aquecedora	QUIMIS
Central de refrigeração acoplada a sistema de extração	QUIMIS
Manta aquecedora com balão de 500 mL	NALGON
Evaporador rotativo	QUIMIS
Balança analítica	QUIMIS
Estufa	DELEO
Capela	NALGON
Aparelho de granulometria	GRANUTEST
Aparelho de Casagrande	SOLOTEST
Aparelho de Dispersão	HUMBOLDT MFG. CO.

3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

São descritos detalhadamente os planejamentos e execuções dos ensaios para determinação dos atributos. As análises físicas foram executadas no Laboratório de Solos e as análises químicas no laboratório de Química Multidisciplinar, ambos os departamentos fazem parte do Laboratório de Engenharia Civil.

3.5.1 Ensaios Físicos

Os ensaios de umidade do solo, ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, análise granulométrica e massa específica real dos grãos, foram realizados observando-se os procedimentos descritos, respectivamente, pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT que estão listadas na Tabela 3-3 (p. 63). Para execução desses cinco experimentos, a preparação das amostras de solos foi realizada observando-se os métodos estabelecidos pela ABNT NBR 6457.

Tabela 3-3. Normalização para os ensaios físicos.

NORMA	TESTE
ABNT NBR 6457	Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização
ABNT NBR 6459	Solo – Determinação do limite de liquidez
ABNT NBR 7180	Solo — Determinação do limite de plasticidade
ABNT NBR 7181	Solo – Análise de Granulometria
ABNT NBR 6502	Rochas e solos – Terminologia
ABNT NBR 6458	Determinação de massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água

3.5.1.1 Preparo das amostras de solos para ensaios

O tratamento das amostras de solos consistiu na secagem prévia ao ar, sendo as amostras espalhadas sobre uma lona plástica, seguida pelo processo de destorroamento dos grãos e retiradas de galhos e raízes das amostras (Figura 3.9), após a secagem ao ar, o solo foi pesado novamente para saber a massa de solo aparente depois da perda de água. Em seguida passado na peneira de abertura 2 mm, o material passante nessa abertura foi acondicionado em novo saco plástico para dar procedimento a todos os ensaios.

Figura 3.9 preparação das amostras para execução dos ensaios.



Fonte: Autora.

3.5.1.2 Umidade do solo

Para determinação do teor de umidade presente nas amostras de solos, uma quantidade de amostra foi colocada em recipiente de alumínio de massa conhecida, em seguida se procedeu com a pesagem, sendo encaminhada para a estufa, com temperatura regular de 105 – 110° C. As amostras de solo permaneceram nesta condição por um período de 24 h. Quando retiradas da estufa, foi colocada em um dessecador para o esfriamento, em seguida foram pesadas na balança analítica com resolução de 0,01g.

Para determinar a umidade do solo utilizou-se a seguinte equação disponibilizada na Norma:

$$W = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \right) \times 100 \quad (\text{Eq.3.1})$$

Onde:

W é o teor de umidade expresso em porcentagem

M₁ é a massa de solo úmido mais a massa do recipiente, expressa em gramas (g)

M₂ é a massa de solo seco mais a massa do recipiente, expressa em gramas (g)

M₃ é massa do recipiente.

3.5.1.3 Limite de plasticidade

A amostra utilizada nesse ensaio foi passada na peneira de 0,42mm, sendo que o material passado constitui na amostra ensaiada. Em seguida, foi colocada a amostra no almofariz e foi adicionando água destilada em pequenos incrementos, e com o auxílio da espátula foi amassando e revolvendo o solo até obter uma pasta homogênea, de consistência plástica. Conforme mostrado na Figura 3.10.

Figura 3.10 Material passante na peneira 0,42 mm. Massa de solo homogeneizada.

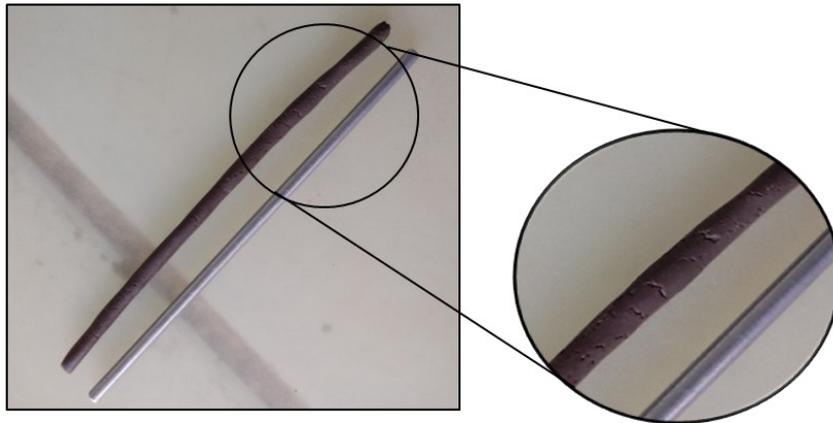


Fonte: Autora.

Após o material ser homogeneizado, tomou-se uma pequena quantidade da amostra e formou-se uma pequena bola, e com a palma da mão foi rolada na placa de vidro para obter uma forma de cilindro. Durante a rolagem na placa de vidro, várias vezes a amostra se fragmentava antes de atingir o diâmetro desejado, o qual retornou essa amostra para a cápsula de porcelana, adicionou mais água, e com o auxílio da espátula foi feita a mistura novamente.

Quando a amostra atingiu o formato cilíndrico, iniciou-se a comparação com o gabarito cilíndrico, mostrado na Figura 3.11. A amostra atingiu as mesmas medidas do gabarito de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, e quando a amostra apresentou essas características, observou-se o surgimento de fissuras, isto é, a ruptura na massa de solo. Imediatamente, foi transferida essa amostra para um recipiente metálico (cápsula cilíndrica de massa conhecida) realizando a pesagem do conjunto (cápsula + solo) em balança analítica. Este procedimento foi realizado seis vezes, isto é, ensaio feito em duplicata, de modo a obter pelo menos três teores de umidade conforme exigência da norma.

Figura 3.11 Fissuras no cilindro sinaliza fim do ensaio do limite de plasticidade do solo.



Fonte: Autora

Todas as amostras foram colocadas em cápsulas metálicas, e foi feito a pesagem de cada um deles, em seguida as cápsulas foram levadas para a estufa, deixando por 24 horas. Após esse período foram retiradas as amostras da estufa, e foi feito a pesagem da amostra seca.

O limite de plasticidade (LP) é determinado pela média dos teores de umidade (W), quando o cilindro de 3 mm se fragmenta ao ser moldado, sendo aplicada a Equação 3.2:

$$LP = \frac{w_1 + w_2 + \dots + w_{nn}}{n} \quad (\text{Eq.3.2})$$

3.5.1.4 Limite de liquidez

O ensaio para determinação do Limite de Liquidez do solo iniciou-se com a preparação da amostra: a secagem prévia, a redução da amostra pelo método de quarteamento e o peneiramento (# 0,42mm). Depois da preparação, tomou-se metade da quantidade de amostra e foi colocada em um almofariz e adicionou-se água destilada em pequenos incrementos, e com o auxílio da espátula foi amassando e revolvendo o solo em um intervalo de tempo de 15 a 30 minutos para obter uma pasta homogênea, com consistência tal que sejam necessários para se fechar uma ranhura com 25 golpes.

Em seguida, transferiu-se parte da mistura para a concha e foi moldando-se de maneira que na parte central a espessura ficou de 10 mm e sem a presença de bolhas de ar no interior da mistura. O excesso de solo retirado no processo de moldagem foi retornado para a cápsula.

Com o auxílio de um cinzel dividiu-se a amostra da concha em duas partes, formando uma ranhura na parte central. Em seguida, recolocou-se a concha no aparelho de Casa Grande e golpeou contra a base deixando-a cair em queda livre com a giração da manivela de duas voltas por segundo, foi verificado e anotado o número de golpes para se fechar a ranhura, após isto, foi transferida uma pequena quantidade do material de próximo as bordas que se uniram para uma cápsula metálica. Todo procedimento descrito anteriormente é apresentado na Figura 3.12.

Figura 3.12 Ensaio do limite de liquidez feito no aparelho de Casa Grande.



Fonte: Autora

O valor é obtido através de um gráfico com escala logarítmica nas ordenadas (números de golpes) e escala aritmética nas abscissas (teores de umidade) conforme é apresentado nos Apêndice 3 (p. 105), ambos os limites estão relacionados com o teor de umidade. Quando se obtém o LL e o LP é possível determinar o IP (Índice de Plasticidade) dos solos, dado pela Equação 3.3 (p. 67).

$$LP = LL - LP \quad (\text{Eq.3.3})$$

3.5.1.5 Análise granulométrica

A amostra de solo seco ao ar é pesada e peneirada, separou-se previamente uma quantidade de 5 kg de material e procedeu-se o ensaio (Figura 3.13). O material retido na #10 (2,00mm) é utilizado no peneiramento grosso do solo. Do material que passa na #10 retiraram-se quantidades suficientes de solo para a realização do peneiramento fino e do ensaio de sedimentação. A parte que fica retida na peneira 10 deve ser lavada e secada na estufa, devendo estar totalmente seca para poder ser utilizada no peneiramento. A passante na peneira 10, também chamada de retida na peneira 200, também deve ser lavada antes do peneiramento.

Figura 3.13 Preparo das amostras para análise granulométrica do solo



Fonte: Autora

- Peneiramento grosso

Neste ensaio foi tomado o solo previamente seco ao ar,. Seguindo os procedimentos sucessivos, as peneiras foram preparadas obedecendo à série normal, (50, 38, 25, 19, 9,5 e 4,8 mm) de modo a formar um único conjunto de peneiras, com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, postas sobre o agitador mecânico. Foi colocada a amostra sobre a peneira superior do conjunto, em seguida realizada a agitação mecânica do conjunto de peneiras por quinze minutos, logo após isso, retirou-se cuidadosamente cada peneira e aferiu-se o material retido em cada.

- Peneiramento fino

Colocou-se a amostra do solo no agitador mecânico. A série de peneiras do peneiramento fino (1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15, 0,075 mm), sendo agitado por 15 minutos, logo após isso, retirou-se cuidadosamente cada peneira e aferiu-se o material retido em cada uma, tendo auxílio de uma escova com cerdas metálicas na retirada do solo das peneiras.

- Sedimentação

Transferiu-se 120g do solo para um béquer e, com o auxílio de uma proveta, juntou-o a 125 mL de uma solução chamada defloculante, a fim de desagregar todos os grãos que estivessem aglutinados; agitou-se o béquer até que todo o material ficasse imerso e, em seguida, a mistura foi deixada em repouso 12 horas. Após isso, a mistura foi agitada novamente e passada para o copo de dispersão, removendo o material aderido ao béquer com água destilada, com auxílio da pisseta. Então, adicionou-se água destilada até que o nível ficasse na metade do copo dispersor (Figura 3.14). Por conseguinte, ligou-o e deixou-o agir por de 15min.

Figura 3.14 Agitação da amostra no dispersor mecânico.



Fonte: Autora.

O passo seguinte foi colocar a mistura na proveta e adicionar água até que atingisse o volume de 1 litro. Depois, com um bastão de vidro, a mistura foi agitada por cerca de 1 minuto. Dando prosseguimento ao processo de sedimentação, imergiu-se cuidadosamente o densímetro e um termômetro na dispersão e, foram efetuadas leituras no mesmo com intervalos de 30s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min e 30 min, respectivamente, com o auxílio de um cronometro o tempo, obtendo, assim, a densidade da submersão e sua temperatura em cada intervalo (Figura 3.15, p. 69).

Foram realizadas leituras ainda nos intervalos de 1, 2, 4, 8 e 24 horas, a cada leitura o densímetro era retirado cuidadosamente e colocado em uma proveta com água limpa.

Figura 3.15 Leitura da densidade de submersão e temperatura.



Fonte: Autora

3.5.1.6 *Massa específica dos grãos*

Para o ensaio de massa específica a norma recomenda o preparo de amostras com 50 gramas de solo passante na peneira #10 (2 mm). Após pesada a quantidade de solo adicionou-se água destilada até cobrir a porção sólida da amostra, agitou-se manualmente e posteriormente deixou em repouso por 12h. Em seguida as amostras são transferidas para o aparelho dispersor, sendo agitadas mecanicamente por 15 minutos, após isso, foram transferidas para picnômetro e submetidas ao processo de vácuo por 15 minutos, após esse intervalo, o picnômetro foi completado com água destilada até a marca de aferição e novamente submetido ao vácuo por mais 15 minutos, finalmente o sistema (picnômetro + solo + água) foi pesado em balança analítica e verificada a temperatura. O procedimento descrito está apresentado na Figura 3.16, (p. 70).

Figura 3.16 Ensaio de massa específica dos grãos.



Fonte: Autora

3.5.2 Ensaios químicos

As amostras de solo foram submetidas às análises químicas de acordo com a metodologia (EMBRAPA, 2011), todos os experimentos foram realizados em triplicata para as seguintes determinações:

3.5.2.1 Potencial Hidrogeniônico – pH

Os ensaios de determinação do pH foram realizados nos seguintes meios: água destilada, KCl e CaCl₂. Pesaram-se 10 mg de solo em béquer de 100 mL, adicionaram-se 25 mL de líquido (água destilada, solução de KCl 1M ou CaCl₂ 0,01M). Em seguida as amostras foram agitadas e ficaram em repouso durante uma hora. Agitou-se cada amostra com bastão de vidro e procedeu-se a leitura do pH, mergulhando o eletrodo na solução (Figura 3.17). O procedimento foi realizado em triplicata para cada meio adotado.

Figura 3.17 Ensaio de determinação do pH.



Fonte: Autora

3.5.2.2 Acidez do solo

Foram pesados 10 g do solo em erlenmeyer de 125 mL e adicionaram-se 50 mL de solução de KCl 1 mol.L⁻¹. Agitou-se algumas vezes a solução e a deixou em repouso durante 30 minutos. Depois, filtrou-se em papel de filtro nº 42, foram adicionadas mais duas porções de 10 mL de solução de KCl 1 mol.L⁻¹, a primeira durante a filtração e a segunda, diretamente no papel de filtro, para a lavagem do sólido retido. Adicionou-se ao filtrado 6 gotas de fenolftaleína a 0,1% e titulou-se com solução NaOH (0,1 mol/L) até o aparecimento da cor rosa conforme apresentado na Figura 3.18.

Figura 3.18 Ensaio de acidez potencial, sistema para filtração e titulação da amostra até o ponto de viragem.



Fonte: Autora

Pode-se obter o teor de acidez no solo a partir do cálculo mostrado na Equação abaixo:

$$At = (V \times M \times 100 / p) \quad (\text{Eq.3.4})$$

Onde:

At = acidez trocável (Cmol_c/kg)

V = volume de NaOH gastos na titulação (mL)

M = molaridade do NaOH (mol/L);

p = peso da amostra (g).

3.5.2.3 Matéria orgânica e carbono orgânico

Foram pesados aproximadamente 20 g de solo, triturou-se em gral e passou-se em peneira de 180 µm. Feito isto, pesou-se 0,5 g do solo triturado e colocou-se em erlenmeyer de 250 mL. Adicionaram-se 10 mL, com auxílio da pipeta, da solução de dicromato de potássio nas amostras. Incluiu-se também um branco somente com 10 mL da solução de dicromato de potássio.

Em seguida, colocou-se um tubo de ensaio (com dimensões de 25 mm de diâmetro e 250 mm de altura) contendo água destilada e fechou-se a boca do tubo de ensaio com papel alumínio, funcionando este como condensador. Colocou-se o erlenmeyer em agitador magnético e aqueceu-se a solução até a fervura branda, durante 5 minutos. Deixou-se a solução esfriar e foram acrescentados 80 mL de água destilada, 2 mL de ácido ortofosfórico e 3 gotas do indicador difenilamina. Iniciou-se a titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ até o desaparecimento da coloração azul, cedendo lugar a verde. Anotou-se o volume de sulfato gasto.

A determinação dos teores de carbono orgânico e matéria orgânica foram calculadas a partir da multiplicação do resultado experimental do teor de carbono orgânico por um fator que equivale a 58% de carbono na composição média do húmus como especificado no Manual de Métodos de Análises de Solo (EMBRAPA, 2011).

$$CO = (40 - \text{volume gasto}) \times f \times 0,6 \quad (\text{Eq.3.5})$$

Onde:

CO = Carbono Orgânico (g/kg)

f = (40 / volume de sulfato ferroso gasto na prova em branco)

$$MO = CO \times 1,724 * \quad (\text{Eq.3.6})$$

Onde:

MO = Matéria orgânica (g/kg)

CO = Carbono orgânico (g/kg)

Fator de Van Bemmelen = 1,724

3.5.2.4 Capacidade de troca de cátions (CTC)

Primeiramente, foi realizada a extração pelo método do KCl onde pesaram-se 7,5 g de solo e colocou-se em erlenmeyer de 250 mL e adicionaram-se 150 mL de solução de KCl 1 mol/L. Fechou-se com rolha de borracha o erlenmeyer e agitou-se com movimentos circulares, várias vezes ao dia, em intervalos 30 em 30 minutos. Desfez-se o montículo na parte central do erlenmeyer e o deixou em repouso durante uma noite. Feito isto, pipetou-se para erlenmeyer de 200 mL três alíquotas de 50 mL da parte sobrenadante da solução, determinou-se alumínio extraível, cálcio e magnésio (juntos) e cálcio trocável.

- Alumínio trocável

Para a determinação do alumínio trocável separou-se uma das alíquotas de 50 mL, adicionaram-se 3 gotas do indicador azul de bromotimol e titulou-se com a solução de NaOH 0,025 mol/L. Para uma melhor determinação do teor de alumínio trocável, a concentração da solução de NaOH foi alterada (diluída) e passou-se a utilizar a concentração de 0,0025 mol/L. Procedeu-se a titulação até a alteração da cor verde para uma coloração verde-azulada como pode ser observado na Figura 3.19.

Figura 3.19 Amostras antes e após titulação com solução aquosa de NaOH.



- Cálcio e Magnésio trocável

Para a determinação do teor de cálcio e magnésio trocáveis (juntos) utilizou-se o método complexiométrico com EDTA, onde se pipetou (sem filtrar) 25 mL do extrato em erlenmeyer de 125 mL. Em seguida, adicionaram-se 4 mL do coquetel KCN, trietanolamina e solução tampão. Feito isto, acrescentou-se 0,03 g de ácido ascórbico e quatro gotas do indicador negro de eriocromo (adicionado imediatamente antes da titulação). Procedeu-se a titulação com EDTA 0,125 mol/L e o ponto de final da titulação foi observado quando houve alteração da cor rosa para azul conforme é apresentado na Figura 3.20.

Figura 3.20. Ponto de viragem na determinação de Cálcio e Magnésio trocável.



Fonte: Autora

- Cálculo trocável

Para cálcio trocável foi feita a determinação complexométrica na presença do indicador murexida. Em um erlenmeyer foram colocados 2 mL de trietanolamina 50%, 2 mL de solução de KOH 10% e uma pitada de murexida (aproximadamente 50 mg) e titulou-se com solução de EDTA 0,125 mol/L, a viragem se deu do rosa para o roxo (Figura 3.21).

Figura 3.21 Determinação do cálcio trocável por titulação, ponto de viragem.



Fonte: Autora

3.5.2.5 Ferro no extrato sulfúrico e ataque sulfúrico

Para o teor de ferro foi realizada a determinação complexométrica com EDTA a partir do extrato sulfúrico. Para este procedimento, foi necessário realizar o ataque sulfúrico, onde se pesou 1 g de solo e transferiu-se para balão volumétrico de fundo redondo (500 mL) e adicionaram-se 20 mL de H_2SO_4 diluído 1:1. Deixou ferver durante 40 minutos, usando-se condensador de refluxo acoplado a central de refrigeração (Figura 3.22). Posteriormente, o extrato foi filtrado para dar seguimento ao ensaio.

Figura 3.22 Extração com ácido sulfúrico e processo de filtração.



Fonte: Autora

O passo seguinte para determinação do teor de ferro no extrato sulfúrico, foi pipetar 20 mL do extrato para erlenmeyer de 250 mL. Adicionaram-se 2,5 mL de solução de HCl + HNO₃ e ferveu-se por alguns minutos, promovendo a destruição da matéria orgânica.. Depois foram adicionados 25 mL de água destilada sendo necessária ajustar o pH da amostra para 1,5 com auxílio do pHmetro, empregando a solução de HCl 1:1 e NH₄OH concentrado. Adicionou-se, em seguida, 1 mL da solução de ácido sulfossalicílico e aqueceu-se em temperatura aproximada de 60°C. Titulou-se com solução de EDTA 0,01 mol.L⁻¹, até ocorrer a mudança de coloração de vermelho para amarelo como é apresentado na Figura

Figura 3.23. Fim da titulação da amostra sinalizada pela mudança de coloração



Fonte: Autora

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = V \times 10 \quad (\text{Eq.4.9})$$

Onde:

Fe_2O_3 = Óxido férrico (g/kg)

V = volume de EDTA gastos na titulação (mL)

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

A análise Multivariada aplicada nessa pesquisa foi desenvolvida usando o software computacional Minitab 16.1.0 (2010) duas análises foram elaboradas:

3.6.1 Análise de componentes principais (PCA)

Para análise dos componentes principais são identificadas quais variáveis pertencentes às respectivas componentes e o quanto cada variável explica cada um desses componentes. Desta maneira, o conjunto inicial de variáveis analisadas passou a ser caracterizado por duas novas componentes principais, o que possibilitou a sua localização em figuras bidimensionais (ordenação dos acessos por componentes principais).

Inicialmente foi elaborada no software a matriz de dados originais \mathbf{X} , contendo todas as informações, ou seja, nas linhas da matriz estão alocadas as amostras (*scores*) de solos (mata nativa, pastagem e cultivo) e suas respectivas profundidades, 0 -10 e 10-20 cm, dessa maneira, 6 no total. Já nas colunas, as variáveis em análise (*loandigs*) da matriz de dados, 14 no total, assim o formato da matriz é \mathbf{X} (**6x14**) apresentada no Apêndice 1 (p.102).

Na segunda etapa foi preparado o conjunto de dados, na qual se selecionou o método mais adequado para efetuar o pré-processamento dos dados originais das análises químicas e físicas. Essa fase é crítica para obter sucesso no tratamento multivariado. Admitindo que na presente pesquisa todas as variáveis tenham igual importância para contribuir na discriminação das amostras, realizou-se o autoescalamento dos dados.

O software realiza o cálculo matemático baseado na equação 3.1. Para uma mesma variável (coluna) foram subtraídos do valor médio (\bar{x}_j) e divididos pelo desvio padrão do conjunto de dados obtidos por essa variável (S_j). Esse cálculo é realizado para cada uma das amostras contidas no conjunto de dados original. A matriz de dados autoescalados para amostras de solos está apresentada no Apêndice 2 (p. 103). E esses são os valores aplicados para iniciar a análise dos dados experimentais.

$$\text{Autoescalamento (as)} \quad X_{ij(as)} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad \text{Eq. (3.1)}$$

3.6.2 Análise de agrupamento hierárquico (HCA)

Os valores utilizados para essa análise HCA estão fundamentados nas distâncias euclidianas calculadas pelo software. Esse cálculo é efetuado para as amostras utilizando os dados autoescalados, ou seja, é feito selecionando-se a matriz pré-processada, apresentada no Apêndice 2 (p. 104).

Após a realização do cálculo da distância euclidiana entre os acessos para o conjunto das variáveis, utilizou-se o algoritmo de melhor ajuste para o agrupamento de acessos similares, sendo adotado o método *Average linkage*. Com este método procurou-se verificar as similaridades entre as variáveis analisadas e as áreas estudadas a partir da criação de grupos homogêneos para o conjunto das variáveis.

O resultado da análise foi representado em forma gráfica (dendrograma) que auxiliou na identificação dos agrupamentos dos acessos, no qual os grupos serão definidos pelo traçado de uma linha paralela ao eixo horizontal, onde se encontram as maiores distâncias em que os grupos foram formados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE FÍSICA

4.1.1 Umidade do solo

Após a aplicação da equação obteve-se os seguintes teores de umidade (Tabela 4-1) para as amostras de solos.

Tabela 4-1 Teores de umidade das amostras de solos.

ÁREAS	PROF. (CM)	W (%)
MATA NATIVA	0 - 10	2,51
	10 - 20	1,94
PASTAGEM	0 - 10	1,96
	10 - 20	2,02
PLANTAÇÃO	0 - 10	3,18
	10 - 20	3,82

Observa-se na Tabela 4-1 que a área de plantação é naturalmente mais úmida, e o teor de umidade aumenta conforme a profundidade do solo, isto é ocorre, pela área de plantação está localizada muito próxima da margem do lago em comparação com as demais áreas estudadas. Para área de mata nativa, as camadas mais superiores apresentam os maiores teores de umidade, comportamento esperado devido à coleta ter sido realizada em período chuvoso, além disso, foi perceptível que após a secagem em estufa muita água foi perdida.

Já na área de pastagem não se notou o mesmo comportamento para as duas profundidades, a camada superficial apresenta menor teor de umidade, apesar de ser coletada em dia chuvoso, uma explicação para essa inversão comparando-se as três áreas e as suas profundidades está fundamentada no processo de queima realizado nessa área de pasto.

A influência desse processo de antropização resulta em uma leve calcinação do solo, provocando a uma redução de forragem verde e mantilho (palha sobre a superfície do solo), e a quantidade volumétrica de água no solo, em consequência da falta da cobertura vegetal, diminui a sua capacidade para reter água, além de favorecer o aumento da compactação e erosão devido ao impacto das gotas de chuva. Esses resultados obtidos confirmam ainda, o estudo realizado sobre o efeito da queima sob o teor de umidade por Zanine e Diniz (2006).

4.1.2 Limite de Plasticidade e Liquidez

Analisando os valores apresentado na Tabela 4-2, percebe-se que, para solos de Mata nativa o IP não altera significativamente conforme o aumento da profundidade, já para solos onde predomina a ação antrópica esse índice tem uma clara alteração. Conforme o IP os solos podem ser classificados de acordo com a Tabela 4-3:

Tabela 4-2 Percentual obtido para os Limites e índice de plasticidade dos solos

ÁREAS	PROF. (CM)	LP(%)	LL(%)	IP(%)
MATA NATIVA	0 - 10	40	21	18
	10 - 20	36	17	19
PASTAGEM	0 - 10	30	15	15
	10 - 20	28	19	9
PLANTAÇÃO	0 - 10	47	25	22
	10 - 20	52	24	28

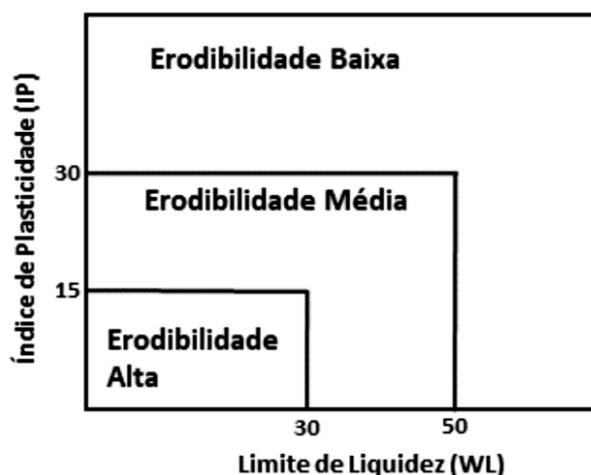
Tabela 4-3 Plasticidades dos solos.

CLASSIFICAÇÃO	VARIAÇÃO IP
Fracamente plástico	$0 < IP < 7$
Medianamente plástico	$7 < IP < 15$
Altamente plástico	$IP > 15$

Fonte: Adapto (PINTO, 2006).

Dentre as classificações percebe-se que os solos de mata nativa e plantação são altamente plásticos, já os de pastagem medianamente plásticos. A propriedade de plasticidade é importante para avaliar as deformações rápidas, sem que ocorra variação volumétrica apreciável, ruptura ou fissuramento, além de ter relação direta com forças de adesão e a coesão das partículas. Com o intuito de relacionar a erodibilidade com os limites de consistência, Molinero Júnior *et al.* (2011) apresentam em seu estudo uma carta de plasticidade (Figura 4.1 p.80) que classifica de acordo com os índices físicos a erodibilidade dos solos em três zonas sendo elas: alta, média e baixa.

Figura 4.1 Carta de plasticidade para erodibilidade dos solos



Fonte: Molinero Júnior *et. al.*, (2011).

Correlacionando os resultados obtidos para as amostras de solos na presente dissertação com a carta de plasticidade de Molinero Junior *et al.*,(2011), percebe-se que; para área de mata nativa e plantação tanto nas profundidade de 0-10 cm e 10-20 cm, a erodibilidade dos solos é considerada média.

Já para área de pastagem na camada superficial (0-10 cm) caracteriza-se com uma erodibilidade alta do solo, coerente com as consequências da falta da cobertura vegetal e os processos de queima que favorecem essa problemática, observa-se que, para a profundidade de 10-20 cm da área de pastagem existe uma erodibilidade média.

Observa-se assim, os limites de liquidez relacionados com o índice de plasticidade dos solos podem fornecer aspectos indiretos das condições de erosão do solo, esses atributos físicos do solo são importantes porque somado as características litológicas do substrato rochoso associadas às condições climáticas condicionam a susceptibilidade do material ao processo erosivo.

4.1.3 Análise granulométrica

A análise granulométrica dos solos, com base na distribuição das frações dos tamanhos das partículas presentes, a Tabela 4-4 (p.81) sistematiza os resultados das análises granulométricas para os solos estudados pelas técnicas de peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação, com utilização de aditivo defloculante (NaOH).

Tabela 4-4 Análise granulométrica dos solos estudados.

Granulometria (Escala ABNT NBR 6502)							
SOLOS	PROF. (CM)	ARGILA (%)	SILTE (%)	A. FINA (%)	A. MÉDIA (%)	A. GROSSA (%)	PEDREG. (%)
Pastagem	0-10	8	13	25	11	19	24
Pastagem	10-20	12	11	21	8	13	35
Mata nativa	0-10	18	13	28	12	16	13
Mata nativa	10-20	23	12	25	11	10	19
Plantação	0-10	48	14	19	10	6	3
Plantação	10-20	58	13	14	8	5	2

Observa-se na Tabela 4-4 que para área de pastagem, para ambas as profundidades, há predominância de areia fina e pedregulho, já os solos das áreas de mata nativa e plantação, a tendência da fração de argila e areia fina é mais significativa, além disso, pode-se afirmar que para todas as amostras de solos analisadas, o teor de argila aumenta conforme a profundidade do solo. Sem dúvida que o solo das áreas de plantação é de caráter argiloso.

As variações relativas entre percentuais de argila, silte, areia e pedregulho observa-se um padrão de erodibilidade totalmente independente de alguma tendência específica. Neste sentido, uma constatação imediata é óbvia: a granulometria, considerada isoladamente, não constitui parâmetro definidor das características de erodibilidade de um dado solo, devendo, portanto, ser incluída num contexto maior de fatores influenciadores na natureza e na magnitude dos processos erosivos.

Sabe-se que, maior teor de finos de um solo atua como ligante de sua estrutura, aumentando a coesão entre as partículas, estas observações ou valores destes parâmetros, considerados isoladamente, são absolutamente inconsistentes para a formulação de uma diretriz geral de resposta qualitativa do solo à erodibilidade, como observado por Couto (2015), vale destacar ainda, que as frações constituintes dos solos, são significativas, quando associadas aos outros atributos, por exemplo, a CTC do solo, na qual tende a ser mais expressiva em solos com maior teor de argila, segundo Lepsh (2011).

4.2 ANÁLISE QUÍMICA

4.2.1 Potencial hidrogeniônico do solo (pH)

Os valores obtidos da análise de pH são apresentados na Tabela 4-5. Por meio deles observa-se um caráter mais alcalino do solo, em vista do pH em água. Esta é uma característica típica de um fenômeno chamado saturação hídrica (onde ocorre a redução da quantidade de hidrogênio (H^+) tornando assim o pH do solo mais elevado), isso acontece devido à área do município apresentar um longo período chuvoso (duração de 6 meses do ano) e assim manter elevado o nível do reservatório deixando o solo bastante úmido.

Tabela 4-5 Média dos resultados do pH das amostras de solo e Δ pH.

Área de amostragem	Prof. (cm)	pH água	pH KCl	pH CaCl ₂	Δ pH
PASTAGEM	0 - 10	6,63	5,96	6,25	-0,67
	10 - 20	7,68	5,72	6,20	-1,96
MATA NATIVA	0 - 10	8,07	5,91	6,34	-2,16
	10 - 20	7,49	6,05	6,58	-1,44
PLANTAÇÃO	0 - 10	7,52	5,24	6,00	-2,28
	10 - 20	8,04	6,80	6,50	-1,24

De acordo com a literatura (BRAGA, 2012) alguns ácidos fracos contidos no solo são difíceis de determinar através da medida do pH em água, além disso, como as amostras de solo chegam úmidas ao laboratório, a concentração de sais pode aumentar. Por esse motivo optou-se por verificar o pH também KCl e CaCl₂. O pH do solo determinado por esses dois métodos apresentou valores inferiores àqueles medidos em água.

Com os resultados obtidos para o pH em solução de KCl e em água, foi calculado o parâmetro Δ pH, dado por: Δ pH = pH KCl – pH água. Um valor negativo de Δ pH indica uma predominância de argilas silicatadas e, conseqüentemente, de cargas negativas no solo, enquanto que valores positivos de Δ pH estão relacionados com o predomínio nos solos com óxidos de alumínio e ferro.

O parâmetro Δ pH constitui também um indicativo da quantidade de alumínio intercambiável: valores negativos estão relacionados a uma elevada concentração deste cátion no solo, ou seja, a determinação do Δ pH indica se o alumínio presente está vinculado em sua maior parte à sua fração intercambiável ou não conforme os estudos realizados por Lima (2003).

Também apontado por Couto (2015), o Δ pH de um solo também está relacionado ao grau de intemperismo, de modo que valores positivos indicam solos altamente intemperizados, com concentrações elevadas de óxidos de alumínio e ferro em sua composição sendo caracterizados por uma maior resistência à erosão.

Considerando as assertivas no estudo de Couto (2015), na Tabela 4-5 (pág. 82) os valores de pH em solução de KCl foram inferiores aos encontrados em água, ou seja, o parâmetro Δ pH das amostras é inferior a zero, indicando predomínio de cargas negativas nos solos, além de indicar grande concentração de alumínio intercambiável para todas as amostras, tornando as áreas menos resistentes aos processos erosivos.

Braga (2012) apresentou uma classificação de leitura de pH do solo para ambos métodos, conforme a Tabela 4-6 onde pode se confirmar que o solo em água possui caráter mais alcalino e em CaCl_2 uma acidez baixa.

Tabela 4-6 Classificação da leitura do pH em água e em cloreto de cálcio.

Classificação	pH em H₂O	Classificação	pH CaCl₂
Acidez elevada	≤ 5,0	Acidez muito alta	≤ 4,3
Acidez média	5,0 – 5,9	Acidez alta	4,4 – 5,0
Acidez fraca	6,0 – 6,9	Acidez média	5,1 – 5,5
Neutro	7,0	Acidez baixa	5,6 - 6,0
Alcalinidade fraca	7,1 -7,8	Acidez muito baixa	6,1 -7,0
Alcalinidade elevada	≥7,8	Neutro	7,0
		Alcalino	≥7,0

Fonte: adaptado de Braga (2012)

Fazendo a classificação do pH em H₂O e CaCl₂ do resultados dos ensaios da Tabela 4-5 (p.82) e comparando com a Tabela 4-6, na área de pastagem (profundidade 0-10 cm), observou-se acidez fraca em água (pH = 6,63), já na profundidade de 10-20 cm possui alcalinidade fraca em água (pH = 7,68). Para a área de mata nativa 0-10 cm notou-se alcalinidade elevada em água (pH = 8,06), e para a profundidade 10-20 cm alcalinidade fraca em água (pH = 7,48).

Nas áreas de pastagem e mata nativa nas duas profundidades (0-10 e 10-20 cm) a classificação do pH em CaCl_2 foi a mesma, possuindo acidez muito baixa (variando em média de 6,20 a 6,48). Observa-se que o pH para área de plantação, na camada superficial (0-10cm) e subsuperficial (10-20 cm) classifica-se com caráter alcalino, aumentando conforme a profundidade do solo.

4.2.2 Matéria orgânica e carbono orgânico

Os valores obtidos dos ensaios de Matéria orgânica e carbono orgânico são apresentados na Tabela 4-7. Observa-se que, conforme a profundidade analisada a quantidade desse atributo sofre variações além de ter interferência com o tipo de manejo sofrido pelo solo. Para área de mata nativa, estima-se apenas a decomposição das folhas e animais, já para pastagem há o preparo do solo, e por fim, a área de cultivo é influenciada pela adição de fertilizantes. Previamente, poderia ter o pensamento que área de cultivo apresentaria maior valor desse atributo do solo para as duas profundidades estudadas, entretanto, percebe-se que há uma concentração maior de matéria orgânica na área de pastagem na camada superficial.

Tabela 4-7 Média dos resultados do ensaio de carbono orgânico das áreas de coleta.

Área de amostragem	Prof.(cm)	Carb. Org. (CO) gC/Kg TFSA	Mat. Org (MO) gMO/Kg
PASTAGEM	0 - 10	14,7755	25,3474
	10 - 20	9,1178	15,7191
MATA NATIVA	0 - 10	9,1023	15,6922
	10 - 20	8,3853	14,4562
PLANTAÇÃO	0 - 10	19,42	33,49
	10 - 20	13,46	23,20

Para todas as áreas de amostragem a camada superficial do solo apresentou maior teor de matéria orgânica e carbono orgânico, conforme previsto na literatura. Em relação ao teor de carbono e matéria orgânica, a área de plantação apresentou resultado elevando em comparação com as demais áreas. Isso ocorre devido à preparação do solo para o cultivo, nesse caso foi aplicada adubação na camada superficial (0-10 cm) com esterco de gado, nesse tipo de composto há uma concentração de carbono e matéria orgânica, quando assimilados ao solo, mantêm esses teores elevados por algum tempo.

Percebe-se também, que a superfície de pastagem (0-10 cm) possui valores superiores a área de mata nativa, ambas extraídas da mesma região de coleta, isso pode ser explicado devido ao uso de fogo nesta área que promoveu o processo de decomposição da matéria orgânica do solo, ressalta-se que esse acúmulo na superfície é um efeito momentâneo. No processo de queima das pastagens, a maior parte da biomassa vegetal, contida acima do solo é destruída e transformada em cinzas que são incorporadas ao solo, aumentando temporariamente a disponibilidade de nutrientes, ou pode ser perdida, principalmente por erosão, causada pela água da chuva ou pelo vento, como decorrência da desproteção do solo. Com a prática da queima, a tendência é diminuir os teores de carbono e matéria orgânica conforme verificou-se no estudo de Potes *et al* (2007).

A matéria orgânica modifica a estrutura dos solos e tem relação direta com a resistência a erosão, por meio da estabilização dos agregados. Diferentes pesquisadores têm buscado estabelecer correlações entre concentrações de matéria orgânica presentes nos solos e índices de erodibilidade; uma das dificuldades neste propósito é estabelecer o teor mínimo capaz de afetar a estabilidade dos agregados e, conseqüentemente, ser diretamente associado ao início do processo erosivo como exposto por Couto (2015).

Como mencionando, as atividades antrópica são recentes para as áreas de plantação e pastagem (menos de dois anos), por esta razão e pela forma de manejo dessas áreas, ainda permanecem valores consideráveis de carbono e matéria orgânica na superfície, indicando hoje certa estabilidade desses solos estudados, além disso, os valores apresentados na Tabela 4-7 (p. 84) corroboram com a afirmativa de cargas negativas dos solos, em vistas dos resultados expostos na Tabela 4-5 (p. 82), pois conforme Lepsch (2011), a quantidade de matéria orgânica é uma importante fonte de cargas negativas do solo.

4.2.3 CTC do solo

A CTC, geralmente definida como a capacidade que os coloides do solo possuem para reter cátions, é diretamente dependente da quantidade de cargas negativas presentes no solo e estão diretamente relacionados à matéria orgânica presente. Os resultados obtidos para CTC das amostras de solos são descritos na Tabela 4-8 (p.86).

Tabela 4-8 Médias dos resultados do ensaio de CTC e acidez trocável das áreas de coleta.

Área de amostragem	Prof. (cm)	Al ³⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺
		Cmolc/kg	Cmolc/kg	Cmolc/kg	Cmolc/kg	Cmolc/kg
PASTAGEM	0 - 10	0,63	4,87	3,10	1,77	0,20
	10 - 20	1,17	3,20	1,37	1,83	0,26
MATA NATIVA	0 - 10	3,53	5,20	1,60	3,56	0,280
	10 - 20	8,57	1,93	0,63	1,30	0,27
PLANTAÇÃO	0 - 10	6,53	3,07	1,67	1,40	0,66
	10 - 20	11,50	1,90	0,93	0,97	0,99

Nota-se que a área de plantação na profundidade 10-20 cm apresenta o teor de Al³⁺ mais elevado que os das bases trocáveis (Ca²⁺+Mg²⁺), do mesmo modo, área de mata nativa na mesma profundidade apresenta o mesmo comportamento. Este resultado é um indicativo de pobreza de nutrientes no solo e que pode ser uma consequência do teor de matéria orgânica observada (Tabela 4-7, p. 84) na qual a tendência é diminuir com a profundidade do solo.

A alta concentração do cátion Al³⁺ na área de plantação na profundidade de 10-20 cm, indica que esta área possui a maior CTC quando comparadas as outras amostras, isto pode ser explicado pela tendência argilosa do solo, como apresentada na análise granulométrica das amostras (Tabela 4-4, p.81).

Com efeito, Lepsch (2011) afirma que a capacidade de troca catiônica de um solo é dependente das variáveis: quantidade de argila, matéria orgânica e pH do solo, assim quanto maior teor de argila no solo (maior será sua CTC), no que diz respeito ao pH, quanto mais ácido o solo, menor o valor de sua CTC. Logo, os valores obtidos corroboram com essa afirmativa, visto que a área de plantação para ambas as profundidades é de caráter argiloso, quanto a classificação de seu pH em água é considerada como alcalina. O mesmo pode ser observado para área de mata nativa na profundidade 10-20 cm.

Pode-se compreender que o estudo desta variável está comumente relacionado à disponibilidade de nutrientes para o crescimento vegetal, porém é um parâmetro indireto para análise de outras características importantes do solo. Conhecer a CTC de um solo pode ajudar a distinguir fatores que indicam a qualidade e degradação dos solos associado aos processos erosivos conforme Couto (2015).

Verificando-se as áreas de amostragem percebe-se que para pastagem na profundidade de 0-10 cm, a CTC é maior que na profundidade de 10-20 cm, Essa inversão é resultante do processo de queima da área, que favorece a disponibilização momentânea de nutrientes no solo, pela queima da vegetação nativa, segundo estudos apontados por Braz *et al* (2004). Apesar dessa consequência, dentre as áreas estudadas, os solos de pastagem, estão mais propensos ao desencadeamento de erosões do que as áreas de mata nativa e plantação.

4.2.4 Teor de ferro no solo

De acordo com a Tabela 4-9 observam-se maiores teores de Fe na área de plantação e também na profundidade de 10-20 cm da área de mata nativa. O menor teor de Fe foi observado na área de pastagem na profundidade de 0-10 cm, o que pode estar relacionado à elevada quantidade momentânea de carbono e matéria orgânica (Tabela 4-7, p. 85) e o baixo pH (Tabela 4-6, p. 83).

Tabela 4-9 Médias dos resultados do ensaio de ferro no extrato sulfúrico das áreas de coleta.

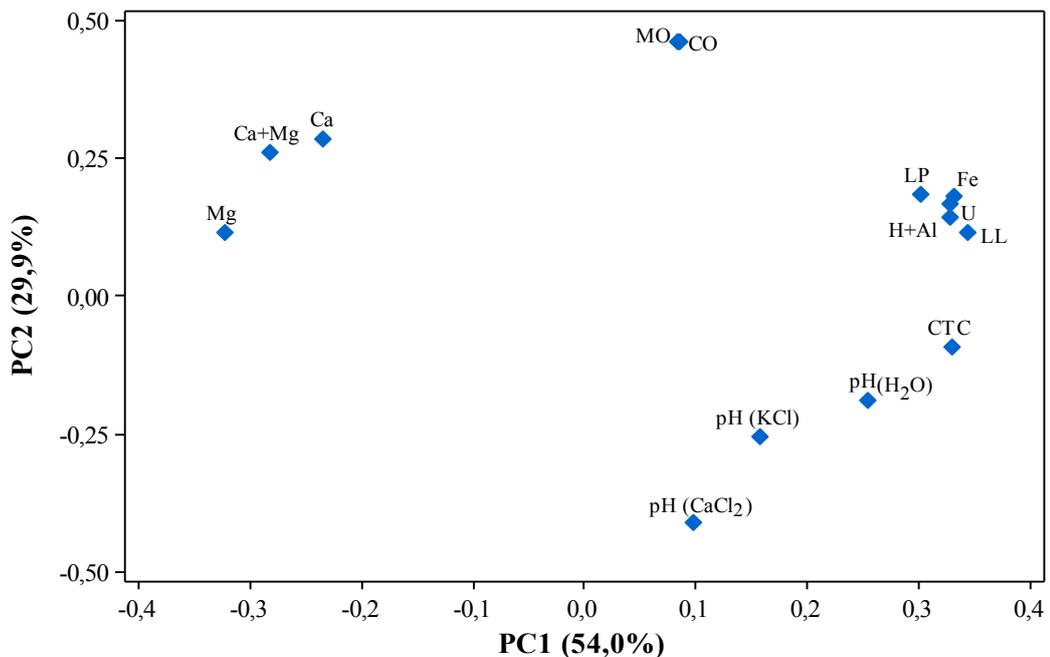
Área de amostragem	Prof. (cm)	Fe (Extrato Sulfúrico) g/Kg
PASTAGEM	0 - 10	23,6667
	10 - 20	33,6667
MATA NATIVA	0 - 10	38,6667
	10 - 20	44,6667
PLANTAÇÃO	0 - 10	89,33
	10 - 20	94,33

Percebeu-se que a coloração vermelha ou vermelho-escura dos solos está associada à maior concentração de óxidos de ferro desidratados, dando uma indicação de boa drenagem do solo. E os solos que apresentam coloração amarela, por sua vez, indicam a maior ocorrência de ferro oxidado hidratado. O solo da região de acordo com o mapa pedológico é o Latossolo Vermelho-Amarelo (Figura 3.3, p. 54), através da Figura 3.13 (p. 67) é possível notar que o solo tende a um marrom avermelhado, e isso pode estar relacionado com os resultados dos teores de Fe demonstrados na Tabela 4-9.

4.3 ANÁLISE MULTIVARIADA

No Gráfico 4-1 é apresentado o resultado obtido pela análise estatística de componentes principais (PCA) onde é demonstrada a influência na separação das áreas por meio dos atributos físicos e químicos analisados, ou seja, por meio das variáveis (*loadings*). É possível observar que, Ca^{2+} , Mg^{2+} e $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, esses cátions são constituintes da CTC do solo que, juntamente, com os teores de carbono orgânico, matéria orgânica foi determinante para separar e caracterizar as áreas estudadas, nessa análise percebe-se a contribuição, importância e maneira, que essas propriedades dos solos, passam a ser alteradas pelo seu uso ocupação.

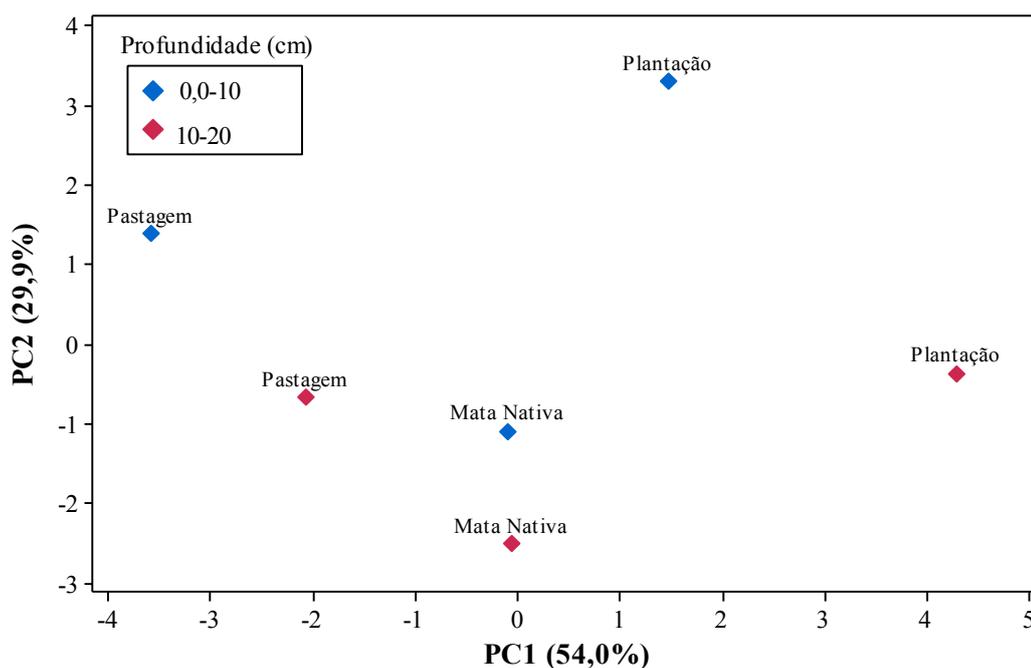
Gráfico 4-1 Análise dos componentes principais para os *loadings* (variáveis).



No Gráfico 4-2 (p. 90) de PCA está ilustrada a separação pelas características das áreas, fundamentadas nas variáveis analisadas. Observa-se uma clara distinção da área de plantação na profundidade de 0-10 cm que apresentou características peculiares, essa separação pode ser explicada especialmente pelos teores de CO e MO, que são específicos e diferenciados. Isto decorre do uso e preparo do solo por adubação (esterco bovino), o que alterou significativamente esses atributos na superfície da área.

Outra observação importante está na separação das áreas de plantação das áreas de pastagem e mata nativa, percebe-se que estas duas últimas áreas estão mais próximas entre si (maior similaridade), afastando-se das áreas de plantação, isto pode ser explicado devido as amostras serem extraídas da mesma ilha (constituem a mesma região), sendo esta resposta gráfica esperada, confirmando a coerência da análise aplicada nesse estudo.

Gráfico 4-2 Separação das áreas de pastagem, mata nativa e plantação.



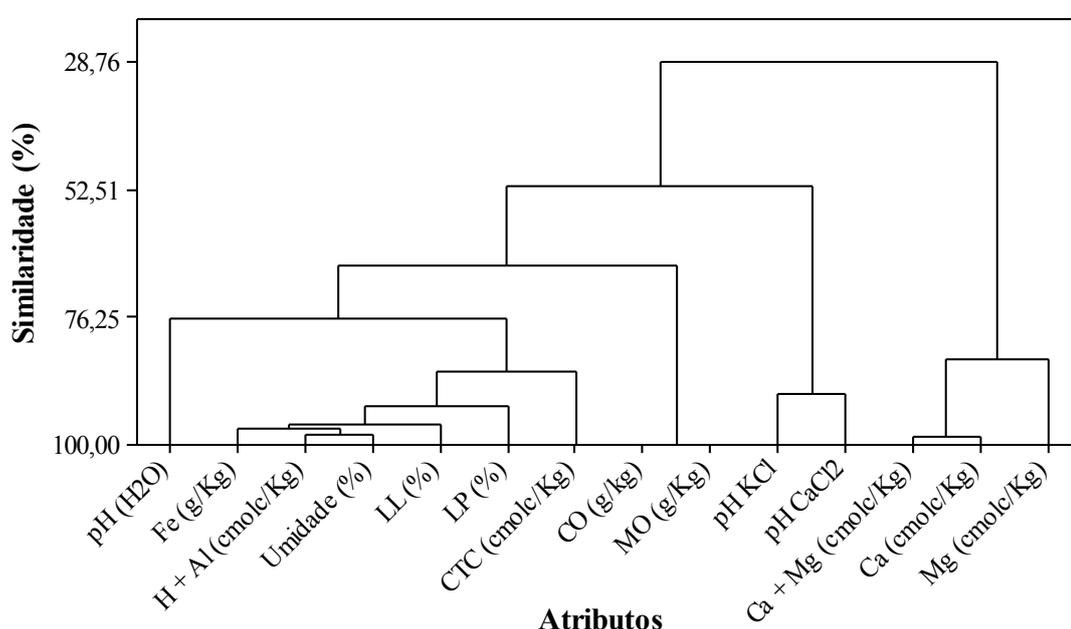
Na Tabela 4-10 é apresentada a porcentagem de informação das variâncias em relação a cada componente principal descrita e a variância total acumulada com uma, duas e três componentes principais. A segunda coluna representa a variância explicada por cada uma das componentes e a terceira coluna representa o percentual de variância total acumulada. Destaca-se que duas componentes principais (PC1 e PC2) são suficientes para explicar 84,3% da informação original dos dados, com uma perda de informação original de apenas 15,7%.

Tabela 4-10 Variância e Variância Acumulada em relação às Componentes Principais.

PC's	V (%)	VA (%)
PC1	54,4	54,4
PC2	29,9	84,3
PC3	15,7	100

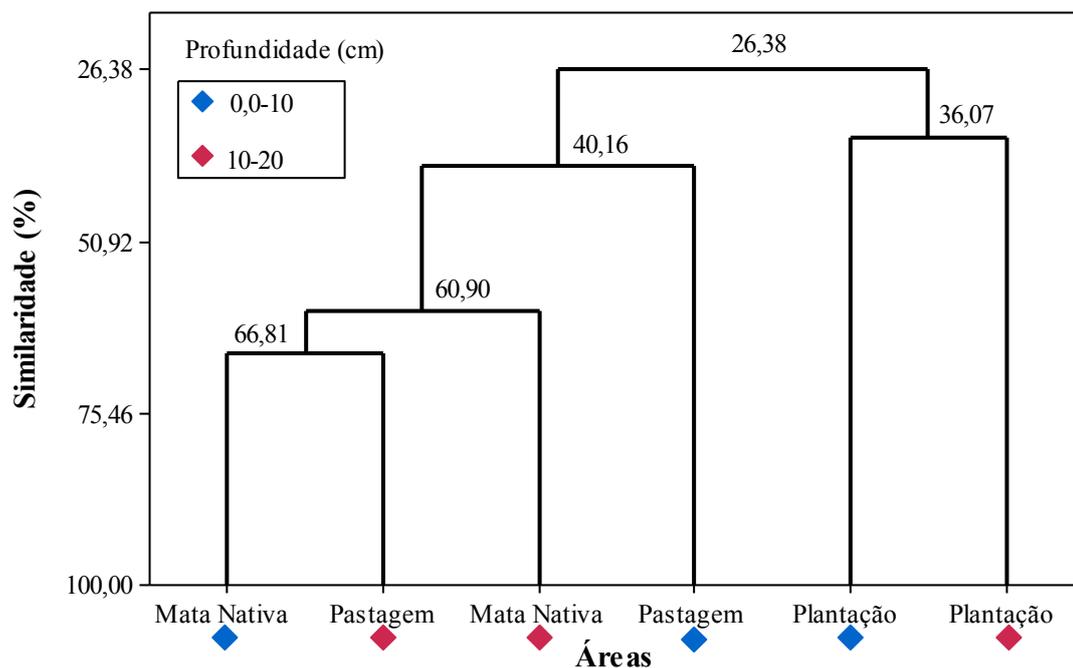
As tendências observadas através da análise de componente principais (PCA) foram confirmadas através do dendrograma obtido pelo HCA mostrado no Gráfico 4-3. No Dendrograma organizaram-se os atributos analisados no eixo x e o índice de similaridade no eixo y . Os principais agrupamentos por similaridade foram formados entre os teores de CO e MO com 100% de similaridade, ocorre devido à maneira como esse atributo é quantificado, os cátions que contribuem para formação da CTC do solo (Ca + Mg, e Ca), e a umidade com os cátions $H^+ + Al^+$, explicados pelo ocorrência de saturação hídrica dos solos

Gráfico 4-3 Dendrograma obtido na HCA para as variáveis.



O Gráfico 4-4 (p. 91) de HCA, demonstra a similaridade entre as áreas analisadas. Na área de plantação o solo na profundidade 0-10 cm é similar (36,07%) ao solo na profundidade de 10-20 cm, formando um único cluster de entre si, sendo distinto à área de pastagem e mata nativa. Percebe-se que para as áreas de mata nativa e pastagem, conforme a profundidade adotada ocorre uma contrariedade no que diz respeito à similaridade entre áreas de mesmo uso e ocupação. Nota-se que a área de mata nativa na profundidade de 0-10 cm é mais similar à área de pastagem na profundidade de 10-20 cm (66,81%) formando um cluster, que posteriormente é ligado a área de mata nativa (prof. 10-20 cm) formando um novo cluster e por fim a área de pastagem (prof. 0-10 cm).

Gráfico 4-4 Dendrograma obtido na HCA para as áreas estudadas.



Essa resposta gráfica apresentada no Dendrograma (Gráfico 4-4) está fundamentada na distância calculada entre as amostras de solos, baseado nas variáveis analisadas, agrupando amostras com teores semelhantes, a partir desse ponto é possível constatar que distâncias pequenas implicam em amostras parecidas, desta maneira, as distâncias calculadas (Tabela 4-11 p. 92) podem auxiliar na busca e confirmação por similaridade entre as amostras de solo estudadas, sendo fácil perceber que a amostra de solo da área de pastagem na profundidade 10-20 cm é muito parecida com a amostra de solo da área de mata nativa na profundidade de 0-10 cm ($d = 2,6922$).

Uma justificativa coerente para essas semelhanças e distinções da área de pastagem e mata nativa conforme a profundidade observada é o fato de, primeiramente, pertencerem à mesma ilha, segundo, pela atividade recente (cerca de dois anos) de criação de bovinos, compreende-se que toda ilha, inicialmente, era mata nativa e, com a alteração da ocupação do solo e interferência do desmatamento e queima da área, resulta nessa forte distinção entre elas, por conseguinte, destaca-se que para pastagem na profundidade de 10-20 cm, ainda encontram-se características semelhante à mata nativa na profundidade de 0-10 cm. Os dendrogramas de similaridades construídos com as áreas e os atributos químicos e físicos do solo serviram como complemento para o PCA e auxiliaram na melhor visualização e caracterização das áreas estudadas.

Tabela 4-11 Distância euclidiana entre as áreas, calculadas a partir da matriz padronizada (autoescalada).

ÁREAS	Mata Nativa (0-10 cm)	Mata Nativa (10-20 cm)	Pastagem (0-10cm)	Pastagem (10-20cm)	Plantação (0-10cm)	Plantação (10-20cm)
Mata Nativa (0-10 cm)	0	2,7874	5,0113	2,6922	4,94	4,9779
Mata Nativa (10-20) cm	-	0	5,6247	3,5555	6,1524	5,2575
Pastagem (0-10cm)	-	-	0	3,9242	6,0345	8,1106
Pastagem (10-20cm)	-	-	-	0	5,5035	6,7928
Plantação (0-10cm)	-	-	-	-	0	5,1852
Plantação (10-20cm)	-	-	-	-	-	0

No Apêndice 4 (p. 106) são demonstrados os valores do coeficiente de correlação de Pearson. Os valores negativos indicam que as variáveis são inversamente proporcionais e os positivos são diretamente proporcionais. A correlação de Pearson mede a intensidade e a direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas, quando os valores de correlação variam de 0,00 a 0,30 (0,00 a -0,30) a correlação é considerada insignificante; de 0,30 a 0,50 (-0,30 a -0,50) a correlação positiva (negativa) é considerada baixa; 0,50 a 0,70 (-0,50 a -0,70) a correlação positiva (negativa) é considerada moderada; 0,70 a 0,90 (-0,70 a -0,90) a correlação positiva (negativa) é considerada alta e, por fim, se o valor varia entre 0,90 a 1,00 (-0,90 a -1,00) a correlação positiva (negativa) é considerada muito alta (MUKAKA, 2012).

Analisando os valores observados no Apêndice 4 (p. 108), as correlações positivas consideradas muito altas ocorrem entre as variáveis CO/MO, quanto maior o teor de carbono maior será o teor de matéria orgânica; Fe/CTC quanto maior a CTC do solo mais teor de ferro encontra-se disperso nele; U/LL a umidade do solo influencia diretamente nos limites, quando mais úmido maior o limite de liquidez, da mesma forma existe uma alta correlação da umidade com a acidez potencial do solo U/H+Al.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

5.1.1 Atributos do solo

A partir deste trabalho, conclui-se que as técnicas aplicadas para as análises dos atributos químicos e físicos permitiram verificar as características dos solos analisados e seus resultados foram satisfatórios. As propriedades tanto físicas quanto químicas do solo podem prescrever as alterações provocadas pela diferença de uso e ocupação do solo das áreas à montante do reservatório da UHE - Tucuruí. A partir de parâmetros estabelecidos e referenciados, a degradação química do solo e a perda de nutrientes resultam em sua vulnerabilidade e por sua vez facilitam os processos erosivos.

Com base nos resultados de ensaios realizados no desenvolvimento deste trabalho, fica clara que nem todos os atributos, quando analisados isoladamente, podem fornecer um parâmetro ou resposta do processo erosivo do solo, como evidenciado na discussão da análise granulométrica, porém isso não afeta a importância de se conhecer tal atributo, uma vez que ele se correlaciona as outras propriedades do solo, como a matéria orgânica e capacidade de troca catiônica.

Do conjunto de variáveis analisadas para as amostras de solos é evidente que algumas já servem de parâmetros para classificar se um solo possui alta, média ou baixa erodibilidade, como é o caso do Limite de Liquidez e o Índice de Plasticidade, que forneceu uma resposta coerente aos resultados e observações executadas nesta dissertação. Além disso, reforça a importância de investigar quais outros atributos convergem para a mesma resposta, percebe-se que há uma interdependência dos atributos físicos para respostas dos fenômenos erosivos no que diz respeito à umidade do solo e os limites (liquidez e plasticidade).

Por sua vez, os atributos químicos apresentam forte dependência entre si, também com alguns atributos físicos, Dentre estes parâmetros, o pH (ou Δ pH), a capacidade de troca catiônica (CTC) e teores de matéria orgânica mostraram-se mais relevantes nas análises. Estes parâmetros estão diretamente vinculados aos efeitos do intemperismo sobre um determinado solo. Todos os solos analisados apresentaram Δ pH < 0; valores negativos de Δ pH indicam uma predominância de argilas silicatadas, cargas negativas e presença de maiores frações de alumínio intercambiável, caracterizando solos pouco intemperizados na área de influência do reservatório da UHE – Tucuruí.

Dentre as três áreas analisadas de mata nativa, plantação e pastagem, nas profundidades de 0 – 10 cm e 10 – 20 cm, é evidente na análise e discussão dos resultados obtidos dos ensaios físicos e químicos que, a camada superficial de pastagem é a mais suscetível ao desencadeamento de erosões, logo, as atividades desenvolvidas nas áreas situadas a montante que mais tem efeito na qualidade do solo, são aquelas que recorrem ao uso da queima na área da superfície, isto é, a formação do pasto para criação bovina, isso é um agravante, pois a maior parte das áreas de terra firme no entorno do lago da UHE-Tucuruí, apresenta profunda modificação antrópica com retirada da floresta para a pecuária extensiva.

5.1.2 PCA e HCA

As análises dos gráficos obtidos pela PCA e HCA são complementares entre si, por isso, as duas foram aplicadas nesta pesquisa, além de aumentar a consistências das interpretações, o entendimento do conjunto de dados foi facilitado e as inter-relações entre as variáveis ficaram mais claras. Essas técnicas foram aplicadas ao conjunto de dados formados por 14 variáveis medidas em 6 amostras de solos obtidas de áreas de pastagem, mata nativa e plantação.

As análises estatísticas deram suporte para visualização, entendimento e comparação das características e similaridades das áreas estudadas nas diferentes profundidades. A partir dessas análises foi possível determinar que a área de pastagem na camada superficial é a que mais se diferencia das demais, quando se considera todos os atributos analisados e as amostras extraídas da mesma região, aquém destas duas áreas estão as amostras de solo de plantação.

A PCA utilizada para transformação dos dados complexos visou explicitar as informações mais importantes para facilitar a interpretação do conjunto de dados exposto nessa dissertação. Dessa maneira, é possível compreender quais aspectos físicos e químicos favorecem para tal comportamento, isto é, as variáveis mais importantes para determinar o posicionamento vertical das amostras no gráfico. A avaliação conjunta dos resultados analíticos para as 6 amostras de solos permitiu identificar as variáveis, Ca^{2+} , Mg^{2+} e $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, MO e CO, como as principais responsáveis pela discriminação das áreas.

Mediante aos dados obtidos, percebe-se que a análise multivariada é fundamental para auxiliar na busca de medidas corretivas contrárias a degradação do solo, uma vez que, o conjunto de informações advindos do grande quantitativo de atributos físicos e químicos, destaca-se quais estão sofrendo maiores alterações causadas pela atividade antropica.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas análises realizadas, devido a problemática enfrentada pelas regiões formadoras das margens do reservatório da UHE - Tucuruí, a recomendação básica seria pela continuidade dos estudos, num escopo e numa abrangência muito maiores, envolvendo também a parte jusante da barragem, devido a oscilação do nível do rio com a abertura e fechamento das comportas, assim como estender para toda região do reservatório devido a sua grande dimensão que atinge mais de cinco municípios, fazendo a aplicação das relações de erodibilidade propostas nesta dissertação. Neste sentido como sugestões complementares, citam-se as seguintes proposições:

- Estudos de erodibilidade envolvendo a combinação integrada de outras variáveis geotécnicas obtidas por meio de ensaios de laboratório (consideradas ou não no presente trabalho) ou ensaios de campo;
- Levantamentos das áreas com ocorrência de erosão para desenvolvimento de mapeamento para melhor visibilidade da problemática constante nas áreas de entorno do reservatório da UHE- Tucuruí;
- Simulação da trajetória e quantitativo de sedimentos carreados até as estruturas da barragem,
- Estudo dos efeitos sedimentos provindos dos processos erosivos no favorecimento do assoreamento devido à diminuição da coluna de água do reservatório.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT: **NBR 6502**: Rochas e Solos – Terminologias, São – Paulo, 1995.

ABNT: **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT: **NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT: **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ALHO, C. J. R.; FENZL, N. **Projeto de gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos transfronteiriços na bacia do rio Amazonas, considerando a variabilidade e mudança climática**. Relatório Técnico. Porto Alegre, Brasil. 2013

ALMEIDA, N. J. R. **Saberes da pesca em unidade de conservação: os pescadores da RDS Alcobaça no lago da Usina Hidrelétrica de Tucuruí-Pa**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Pará, Belém – Pará, 2016.

BANDEIRA, A. P. N.; FEITOSA, J. R. L. **Caracterização geotécnica de solos para subsídio ao projeto de barragem de terra**. Universidade federal do Ceará. VI Encontro Universitário da UFC. Juazeiro do Norte – CE, 17 a 19 de dezembro de 2012.

BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X. Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 61, n. 6, p. 1012-1021, Nov/dez, 2014.

BALEEIRO, C. B. R.; LUZ, M. P.; NASCIMENTO, R. O.; MASCARENHAS, M. M. A.; SALES, M. M. Erodibilidade de solos situados nas margens dos reservatório da UHE – Furnas. **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG**, 2016, p. 19.

BAM, E.K.; AKITI, T. T.; OSAE, S. D.; GANYAGLO S. Y.; GIBRILLA, A. Multivariate cluster analysis of some major and trace elements distribution in an unsaturated zone profile, densu river basin, Ghana. **Afriacan journal of Environmental Science and Technology**. 2011, v. 5, 155-167p.

BARATA, A. S. N. **Ambiente e Ordenamento do Território: A Questão Ambiental dos Desmatamentos em Áreas Protegidas na Amazônia. Estudo de caso na RDS (Reserva de Desenvolvimento Sustentável) Alcobaça, Tucuruí-Pará-Brasil**. Dissertação (mestrado). Universidade de Coimbra, Instituto de Estudos Geográficos. Coimbra – Portugal. 2011

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3.ed. PortoAlegre: Bookman, 2013. 704p.

BRAGA, G. N. M. **O pH na Análise do Solo – Assuntos sobre Agronomia**. Na sala com Gismonti, 2012. [http:// agronomiacomgismonti.blogspot.com/2012/06/o-ph-na-analise-do-solo.html](http://agronomiacomgismonti.blogspot.com/2012/06/o-ph-na-analise-do-solo.html).

CALDERANO FILHO, B.; CARVALHO JÚNIOR, W.; CALDERANO, S. B.; GUERRA, A. J. T. Suscetibilidade dos solos à erosão na área de entorno do reservatório da Usina Hidrelétrica de Tombos (MG). **REVISTA GEONORTE**, Edição Especial 4, V.10, N.10, p.476– 481, 2014.

CARVALHO, J. C. **Solo como material de construção**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais. Ed. G. C. Isaia. 2ª ed. São Paulo, IBRACON, 2010, v. 1, 528 p.

CASANOVA, M.; SALAZAR, O.; SEGUEL, O.; LUZIO, W. **The soils of Chile**. World soils book series. Springer Science. Santiago – Chile. 2013, 185 p.

CHEN, S.; FATH, B. D.; CHEN, B. Ecological risk assessment of hydropower dam construction based on ecological network analysis. **Procedia Environmental Sciences**. 2010, 725–728p.

CINTRA, I. H. A.; FLEXA, C. E.; SILVA, M. B.; ARAÚJO, L. F.; SILVA, K. C. A. A pesca no reservatório da usina hidrelétrica d Tucuruí, região Amazônica, Brasil: aspectos biológicos, sociais, econômicos e ambientais. **Acta of Fisheries and Aquatic Resources**. 2013,1(1), 57-78p.

CORREIA, P. R. M.; FERREIRA, M. M. C. Reconhecimento de padrões por métodos não supervisionados: explorando procedimentos quimiométricos para tratamento de dados analíticos. **Química Nova** [online]. 2007, vol.30, n.2, pp.481-487.

COSTA, W. D.; **Geologia de barragens**. São Paulo: Oficina de Texto, 2012. 521 p.

COUTO, B. O. C; **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotécnica (NUGEO),.Ouro Preto – MG, 2015. 125p.

D'ARMADA, J. C. R. **Como as ondas gerada pelo vento e as características da vegetação ciliar influenciam erosões em margens de reservatórios: UHE Porto Colombo, um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá – MG, 2012.

DEMARCHI, J.C. & ZIMBACK, C.R.L. Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do ribeirão das Perobas. **Energia na Agricultura**, v. 29, n. 2, p. 102-114, 2014.

DYONISIO, H. A. F. Erosão hídrica: suscetibilidade do solo. **Revista Eletrônica Thesis**, São Paulo, ano VII, n. 13, 2010, p. 15-25.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Embrapa Solos. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2011. 230p.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Balanço Energético Nacional – 2018: Ano base 2017. Rio de Janeiro, EPE, 2018.

ESTEFAN, G. SOMMER R, RYAN J. (2013) **Methods of Soil, Plant, and Water Analysis**. A Manual For The West Asia And North Africa Region: Third Edition. ICARDA.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Soil degradation. FAO Soils Portal. Disponível em: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/en/> Acessado em: agosto de 2017.

FERREIRA, M. M. C. Multivariate QSAR. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. 2002, v. 13, n. 6, 742-753p.

FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; SOUZA JÚNIOR, P. R.; CAMPOS, M. C. C. Análises multivariadas de atributos químicos do solo para caracterização de ambientes. **Revista Agroambiente**, 2014, v. 8, n. 2, 155-164p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; Portal IBGE Cidades, Pará, Tucuruí. 2016 Publicado em: <http://cidades.ibge.gov.br/>

KHALEDIAN, Y.; KIANI, F.; EBRAHIMI, S.; BREVIK, C.E.; PETERSON-AITKENHEAD, J. Assessment and monitoring of soil degradation during land use change using multivariate analysis. **Land Degradation and Development**. 2016, v. 28, 128-141p.

LEI 12.651. **CODIGO FLORESTAL, POLITICA DO MEIO AMBIENTE**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Disponível em http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/lei%2012.651-2012?OpenDocument

LEMOS, R. C. de; SANTOS, R. D. dos. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 3. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo; Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1996 83 p.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo. Oficina de texto, 2011.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. São Paulo. Oficina de texto, ed 2ª, 2010.

LIMA, M. C. **Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto a voçorocas**. Tese (Doutorado em Geotecnia). Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Brasília. Brasília.2003. 364 p.

LUCENA, W. B.; FERREIRA, G. B.; SILVA, M. S. L.; MOREIRA, M. M.; SILVA, M. J. S.; SOUZA, M. S. Avaliação dos atributos químicos em solos com barragem subterrânea em agroecossistemas do semiárido. **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Natal – RN, 2015.

MANUAL TÉCNICO DE PEDOLOGIA. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 420 p. (Manuais técnicos em geociências. N 4 disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/rec/recursosnaturais/sistematizacao/manual_pedologia.shtm>. Acesso em: abr. 2017.

MOLINERO JUNIOR, J. A. et al. Avaliação da erodibilidade de solos da BR-050 (Uberlândia – Uberaba). In: **V Simpósio Sobre Solos Tropicais E Processos Erosivos No Centro-Oeste. Anais... Brasília: Editora Ipanema, 2011, 399p.**

MONTANARELLA, L.; BADRAOUI, M.; CHUDE, V.; COSTA, I. dos S. B.; MAMO, T.; YEMEFACK, M.; AULANG, M. S.; YAGI, K.; HONG, S. Y.; VIJARNSORN, P.; ZHANG, G. L.; ARROUAYS, D.; BLACK, H.; KRASILNIKOV, P.; SOBOCA, J.; ALEGRE, J.; HENRIQUEZ, C. R.; MENDONCA-SANTOS, M. de L.; TABOADA, M.; VICTORIA, D. E.; ALSHANKITI, A.; PANAH, S. K. A.; EL MUSTAFA EL SHEIKH, E. A.; HEMPEL, J.; PENNOCK, D.; CAMPS ARBESTAIN, M.; MCKENZIE, N. (Ed.). **Status of the world's soil resources: main report.** Rome: FAO, 2015. xxxix, 608 p.

MUKAKA, M. M. **Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research.** Malawi Medical Journal; 24(3): 69-71 September, 2012

MUNSELL soil color charts: with genuine Munsell color chips. Rev. ed. Grand Rapids: Munsell Color, 2009. v. 1.

NOGUEIRA, N. **A Hortênsia e o pH do solo.** Utilidade Pública Ciência, 2017

NORASTI, K. Assessing soil quality indicator under different land use and soil erosion using multivariate statistical techniques. International Journal **Environmental Monitoring and Assessment.** 2013, 185, 2895–2907p.

OLIVEIRA, H. V. B.; VAZ, L. F.; CARNEIRO, C. D. R. Avaliação de risco geológico em barragens. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.** 2013, v. 3, n. 1, 31-44p.

OLIVEIRA, J. A. (2011). **Análise da perda de solo na bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos (SP).** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá – MG.

OSMAN, K. T.; **Forest Soils: Properties and Management.** Springer Science. Chittagong – Bangladesh. 2013. 217 p.

OSMAN, K. T.; **Soils: Principles, Properties and Management.** Springer Science. Chittagong – Bangladesh. 2012. 274 p.

PEQUENO, P. L. L. **Noções básicas de uso e manejo de solo.** EDUFRO. Porto Velho – RO, 2013, 59p.

PEREIRA, A. A. THOMAZ, E. L. **Parâmetros Físicos Do Solo Em Diferentes Sistemas De Manejo Convencional, Município De Reserva – Pr.** Revista do Departamento de Geografia, 2015.

PIDWIRNY, M. **Soil and soil classification.** In: Understanding Physical Geography. Our Planet Earth Publishing. British Columbia, Canada. 2016, 42p.

PLANO DIRETOR DO MUNICÍPIO DE TUCURUÍ. **Meio ambiente: Pedologia**. 2017. Disponível em: <http://www.seidurb.pa.gov.br/pdm/tucurui/pedologia_A3.pdf>.

POTES, M.L.; DICK, D.P.; DALMOLIN, R.S.D; ROSA, A.S. Efeito da queima na composição da matéria orgânica de Neossolo Litólico sob pastagem nativa. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 31., Gramado, 2007. Anais...Gramado: SBCS, 2007, 5p. (CD-ROM)

PRAGANA, R. B.; RIBEIRO, M. R.; NOBREGA, J. C. A.; RIBEIRO FILHO, M. R.; COSTA, J. A. Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2012, v. 36, n. 5, 1591-1600p.

RAMOS, Y. S.; PEDROZA, J. P. Áreas degradadas por erosão próximas ao reservatório da Usina Hidrelétrica Luiz Gonzaga PE. **XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Natal-RN, 4 a 7 de novembro. ABRH, 2014.

RAMIDAN, M. A. S. **Estudo de um processo de voçoramento próximo a UHE de Itumbiara – GO**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC. Rio de Janeiro. 2003

REN, J.; SHANG, Z.; TAO, L.; WANG, X. Multivariate analysis and heavy metals pollution evaluation in yellow river surface sediments. **Polish Journal of Environmental Studies**. 2015, v. 24, n. 3, 1041-1048p.

ROSA – JÚNIOR, W. O.; BASTOS, M. N. C.; AMARAL, D. D.; SOARES, C. C. Composição florística de remanescente florestais na área de influencia do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Tucuruí, Pará, Brasil. **Biota Amazônia**, 2015, v. 5, n. 2, 10-17p.

ROSA, S. F. **Propriedades físicas e químicas de um solo arenoso sob o cultivo de *Eucalyptus spp.*** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais. Rio Grande do Sul, 2010.

SANTOS, F. A. S.; MARIANO, R. S. R.; PIERANGELI, M. A. P.; SOUZA, C. A.; BAMPI, A. C. Atributos químicos e físicos de solos das margens do Rio Paraguai. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 239-249, 2013.

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

SANTOS, E. S. ZANELLO, S. **Análises Físico-Químicas Das Águas E De Solos Do Rio Canguiri**. Disponível em: <http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/pde/arquivos/1701-8.pdf>. Acesso em: 12 de julho de 2018.

SCHREUDERS, L. C. **Erosão em pequenas centrais hidrelétricas: planejamento de abordagens**. Monografia (especialização). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.
SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE. **Oficina colaborativas: Revisão do licenciamento ambiental da usina hidroelétrica (UHE) de Tucuruí – PA**. Relatório técnico. Governo do Estado do Pará. Belém – PA, 2017.

STRAT, A.; SANTOS, J. W. M. C.; DUBREUIL, V. Avaliação das mudanças de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Manso – MT- Brasil. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.6081.

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

SUPORTE, SONDAAGEM E INVESTIGAÇÕES (SSI). **Limites de Atterberg**. Nota eletrônica sobre serviços especializados em geotécnica. São Paulo, disponível <http://www.suportesolos.com.br/blog/consistencia-do-solo-ensaios-geotnicos-ensaios-de-limite-de-liquidez-ll-e-de-plasticidade-lp/33/> acessado em 12 de outubro de 2018.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. **Using Multivariate Statistics**. Pearson Education. Sixth edition. New Jersey – USA, 2013, 1018p.

TENNESSEE VALLEY AUTHORITY – TVA. No. 7 in **Riparian Restoration Fact Sheets Series, Understanding Erosion**. Disponível em: https://www.tva.gov/file_source/TVA/Site%20Content/Environment/Environmental%20Stewardship/Land%20Management/understanding.pdf. Acessado em 29 jul 2017.

TEXEIRA JÚNIOR, J. C. **Análise físico-química dos solos de uma vertente em morros rebaixados sob diferentes coberturas vegetais**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense. Niterói – RJ, 2015.

VASQUES, G. M.; GRUNWALD, S.; SICKMAN, J. O. Comparison of multivariate methods for inferential modeling of soil carbon using visible/near-infrared spectra. **Geoderma**, 2008, v. 146, 14-25p.

VERAS, C. L. G.; SILVA, S. A. S. da.; CAMPOS, Y. O. Determinação dos atributos químicos do solo de ilhas do lago da Usina Hidrelétrica de Tucuruí-PA. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, p. 458 – 469, 2016.

WIJITKOSUM, S.; YOLPRAMOTE, K. Clustering soil properties for appropriate soil improvement in Huay Sai Royal Development Study Center, Thailand. **The 6th TSAE International Conference**. 2013, 175-178p.

XAVIER, F. V.; CUNHA, K. L.; SILVEIRA, A.; SALOMÃO, F. X. T. Análise da suscetibilidade à erosão laminar na bacia do rio manso, Chapada dos Guimarães, MT, utilizando sistemas de informações geográficas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.11, n.2, p.51-60, 2010.

ZANINE, A. M.; DINIZ, D. Efeito da queima sob o teor de umidade, características físicas e químicas, matéria orgânica e temperatura no solo sob pastagem. **Revista Eletrônica de Veterinária, REDVET**, v.7, 2006.

APÊNDICE

APÊNDICE 1 - Matriz de dados originais.

ÁREA	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	pH (CaCl ₂)	CO (g/kg)	MO (g/kg)	Fe (g/kg)	CTC (cmolc/Kg)	H+Al (cmolc/Kg)	Ca+Mg (cmolc/Kg)	Ca (cmolc/Kg)	Mg (cmolc/Kg)	U (%)	LL (%)	LP (%)
Mata Nativa (0-10 cm)	8,07	5,91	6,34	9,102	15,692	38,667	3,533	0,258	2,800	1,600	1,233	2,51	40	21
Mata Nativa (10-20) cm	7,49	6,05	6,58	8,385	14,456	44,667	8,5667	0,262	1,933	0,633	1,300	1,94	36	17
Pastagem (0-10cm)	6,63	5,96	6,25	14,775	25,347	23,667	0,633	0,195	4,866	3,100	1,767	1,96	30	15
Pastagem (10-20cm)	7,68	5,72	6,20	9,118	15,719	33,667	1,167	0,259	3,200	1,367	1,833	2,02	28	19
Plantação (0-10cm)	7,52	5,24	6,00	19,424	33,487	89,33	6,533	0,664	3,067	1,667	1,400	3,18	47	25
Plantação (10-20cm)	8,04	6,8	6,5	13,458	23,201	94,333	11,500	0,993	1,900	0,933	0,967	3,82	52	24

APÊNDICE 2 - Matriz de dados autoescalados que foi obtida para as amostras de solos

ÁREA	pH (H₂O)	pH (KCl)	pH (CaCl₂)	CO	MO	Fe	CTC	H+Al	Ca+Mg	Ca	Mg	U	LL	LP
Mata Nativa (0-10 cm)	0,950	-0,072	0,135	-0,756	-0,754	-0,511	-0,416	-0,564	-0,148	0,058	-0,555	-0,079	0,124	0,213
Mata Nativa (10-20) cm	-0,156	0,203	1,274	-0,921	-0,920	-0,312	0,754	-0,552	-0,945	-1,070	-0,353	-0,814	-0,300	-0,808
Pastagem (0-10cm)	-1,795	0,026	-0,292	0,553	0,540	-1,009	-1,089	-0,758	1,753	1,809	1,059	-0,788	-0,936	-1,318
Pastagem (10-20cm)	0,206	-0,446	-0,530	-0,752	-0,751	-0,677	-0,966	-0,559	0,220	-0,214	1,261	-0,711	-1,149	-0,298
Plantação (0-10cm)	-0,098	-1,391	-1,480	1,626	1,6322	1,172	0,281	0,704	0,097	0,136	-0,050	0,784	0,866	1,233
Plantação (10-20cm)	0,893	1,679	0,894	0,249	0,253	1,338	1,435	1,730	-0,976	-0,719	-1,362	1,609	1,396	0,978

APÊNDICE 3 – Limite de Liquidez obtido para as amostras de solos.

Gráfico 5-1 Limite de liquidez área de mata nativa (prof. 0 - 10 cm).

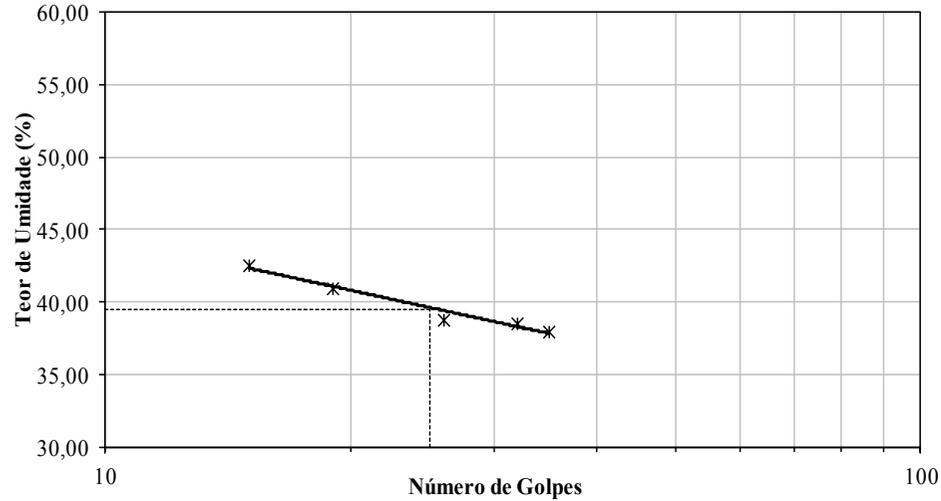


Gráfico 5-2 Limite de Liquidez da área de Mata Nativa (prof. 10 - 20 cm).

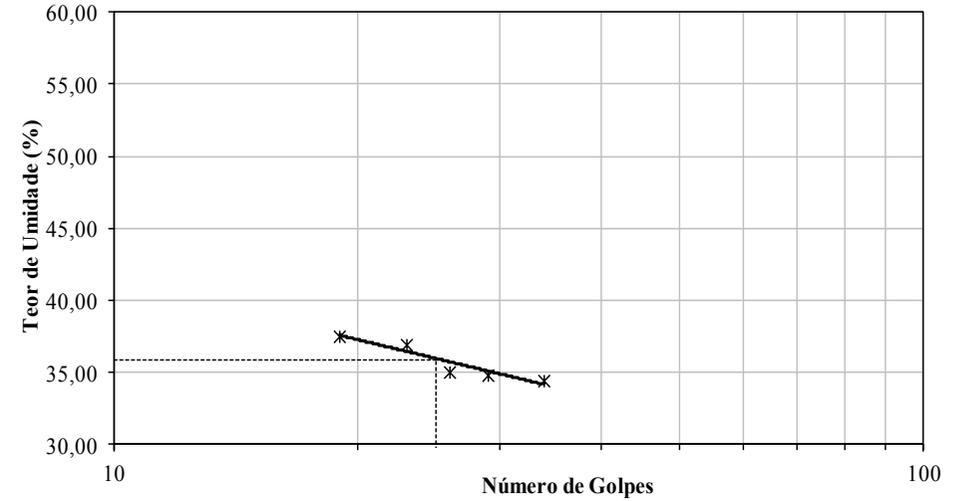


Gráfico 5-3 Limite de liquidez área de pastagem (prof. 0 - 10 cm).

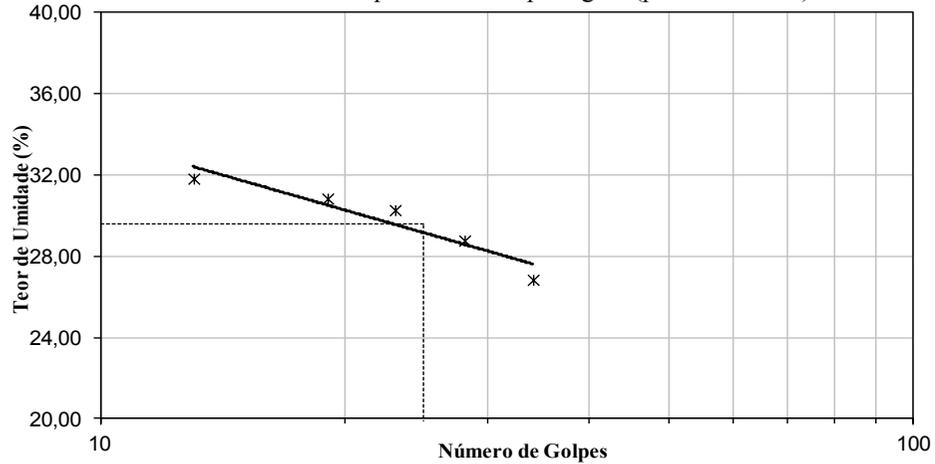


Gráfico 5-4 Limite de liquidez área de pastagem (prof. 10-20 cm).

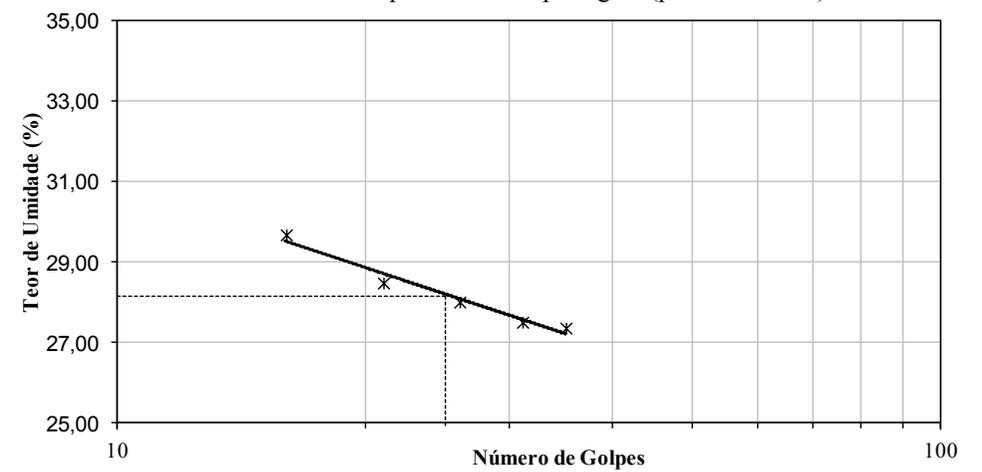


Gráfico 5-5 Limite de liquidez área de plantação (prof. 0 - 10 cm).

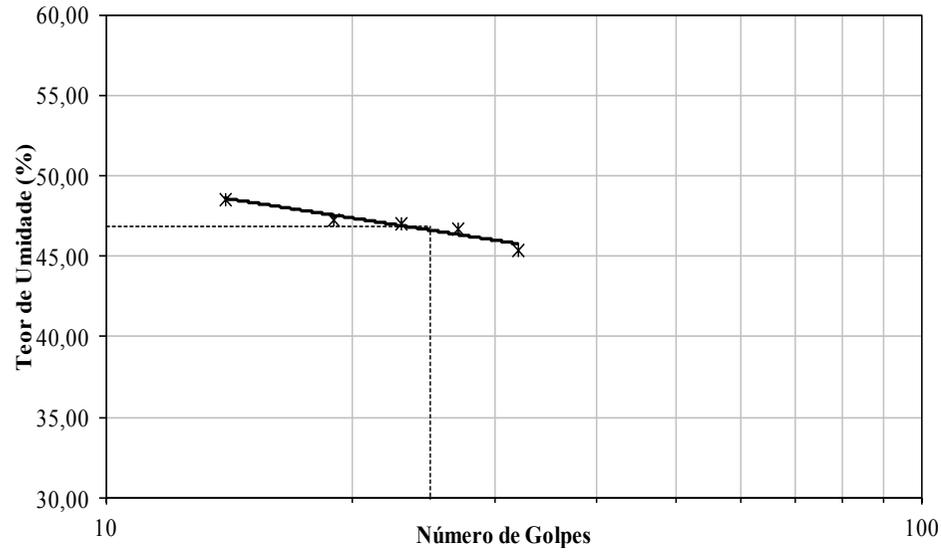
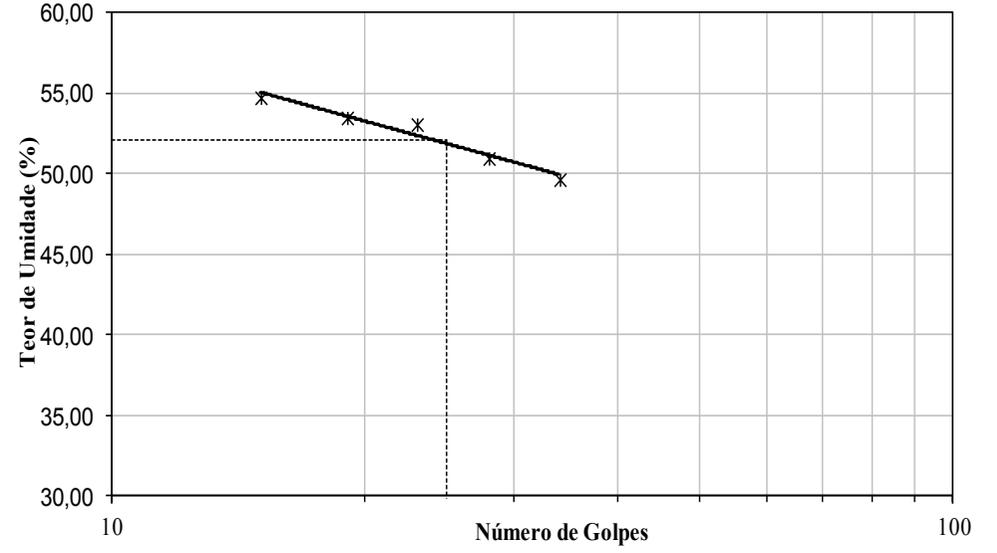


Gráfico 5-6 Limite de liquidez área de plantação (prof. 10 - 20 cm).



APÊNDICE 4 – Matriz de correlação de Pearson das propriedades analisadas.

Variáveis	pH (H₂O)	pH (KCl)	pH (CaCl₂)	CO	MO	Fe	CTC	H+Al	Ca+Mg	Ca	Mg	U	LL
pH (KCl)	0,279												
pH (CaCl₂)	0,258	0,677											
CO	-0,332	-0,325	-0,645										
MO	-0,327	-0,326	-0,645	1,0									
Fe	0,463	0,173	-0,070	0,573	0,577								
CTC	0,500	0,521	0,521	0,112	0,116	0,796							
H+Al	0,454	0,417	0,049	0,503	0,506	0,949	0,773						
Ca+Mg	-0,795	-0,402	-0,574	0,341	0,335	-0,548	-0,829	-0,494					
Ca	-0,745	-0,295	-0,523	0,429	0,424	-0,436	-0,718	-0,369	0,968				
Mg	-0,665	-0,557	-0,529	-0,008	-0,011	-0,682	-0,875	-0,678	0,775	0,593			
U	0,536	0,350	-0,032	0,517	0,521	0,929	0,699	0,965	-0,450	-0,292	-0,726		
LL	0,554	0,312	0,097	0,457	0,461	0,927	0,820	0,895	-0,581	-0,401	-0,869	0,943	
LP	0,677	-0,031	-0,281	0,465	0,471	0,886	0,555	0,810	-0,496	-0,396	-0,600	0,886	0,855