

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS FACULDADE DE  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

CLEIDIMAR JOÃO CASSOL

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE SOLOS DE REFERÊNCIA E SUA  
RELAÇÃO COM A FRAGILIDADE AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA  
DO RIO IVINHEMA-MS**

DOURADOS

2022

CLEIDIMAR JOÃO CASSOL

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE SOLOS DE REFERÊNCIA E SUA  
RELAÇÃO COM A FRAGILIDADE AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA  
DO RIO IVINHEMA-MS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Linha de Pesquisa Tecnologia Ambiental, da Universidade Federal da Grande Dourados, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo José de Arruda  
Coorientadora: Prof. Dra. Alessandra Mayumi Tokura Alovisi

DOURADOS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

C345a Cassol, Cleidimar Joao

ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE SOLOS DE REFERÊNCIA  
E SUA RELAÇÃO COM A FRAGILIDADE AMBIENTAL NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA-MS

[Recurso eletrônico] / Cleidimar Joao Cassol. -- 2022.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Dr. Eduardo José de Arruda.

Coorientadora: Dra. Alessandra Mayumi Tokura Alovisi.

Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade  
Federal da Grande Dourados, 2022.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

## TERMO DE APROVAÇÃO

Após apresentação, arguição e apreciação pela banca examinadora, foi emitido o parecer APROVADO, para a tese intitulada: **ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE SOLOS DE REFERÊNCIA E SUA RELAÇÃO COM A FRAGILIDADE AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA-MS**, de autoria de **Cleidimar João Cassol**, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Grande Dourados.



---

Prof. Dr. Eduardo José de Arruda - PGCTA/UFGD - (Participação Remota Síncrona)  
Presidente da Banca Examinadora



---

Prof. Dr. Dr. Ismael Laurindo Costa Junior (participação remota)  
Membro Examinador (UTFPR-MD)



---

Prof. Dr. Adelmo Lowe Pletsch - (Participação Remota Síncrona)  
Membro Examinador (UTFPR-SH )



---

Prof. Dr. Ivan Ramires - (Participação Remota Síncrona)  
Membro Examinador (UFGD)

Elisângela Dupras .

---

Profa. Dra. Elisângela Dupas - (Participação Remota Síncrona)  
Membro Examinador (UFGD)



---

Profa. Dra. Alessandra Mayumi Tokura Alovise - (Participação Remota Síncrona)  
Presidente/Coorientador (UFGD)



---

Profa. Dra. Zefa Valdivina Pereira/UFGD - (Participação Remota Síncrona)  
Membro Examinador (UFGD)

Dourados/MS, 07 de Fevereiro de 2022.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ver seus propósitos se cumprindo em minha vida. Sabemos que Deus age em todas as coisas para o bem daqueles que o amam, dos que foram chamados de acordo com o seu propósito (Rm 8:28). No período de doutorado muitas portas me foram abertas pela humildade e mansidão aprendidas do Senhor Jesus.

A Universidade Federal da Grande Dourados por oferecer excelente estrutura para realização deste curso e aos professores do Programa de Pós-Graduação (PPGCTA).

A CAPES-DS pelo auxílio financeiro Bolsa n° 88882.457532/2019-01.

Ao excelentíssimo trabalho de orientação do professor Dr. Eduardo José de Arruda e coorientação da professora Dra. Alessandra Mayumi Tokura Alovisi, os quais contribuíram para além do conhecimento científico institucionalizado. Eduardo e Alessandra sem dúvida fazem parte do propósito de Deus em minha vida. Registro aqui meus votos de honra.

À namorada, Tatiane Antunes Peixoto, por ser uma mulher virtuosa conforme provérbios 31.

Ao professor Dr. Ivan Ramires e família pela confiança e condução aos professores do Programa de Pós-Graduação (PPGCTA).

À professora Dra. Carla Eloize Carducci, pelo auxílio e orientação na realização das análises físicas do solo.

Ao técnico de laboratório e irmão na fé em Cristo Jesus, João Augusto Machado da Silva, pelo auxílio e orientação nas análises químicas do solo.

Ao professor Dr. Cleiton Messias Rodrigues Abrão, pelo auxílio na delimitação da bacia hidrográfica e suporte no geoprocessamento.

Aos amigos Wagner Ferreira da Silva e Lauriane Azuaga Villalba pelo auxílio na realização das coletas.

Aos motoristas do setor de transporte, pelo companheirismo durante a campanha amostral.

Aos colegas de curso Amanda Caroline Nava Pinheiro, Estefane Isis Teixeira, Marivane Turim Koschevic, Maycon dos Santos e Thaís Melissa dos Santos. A você que direta ou indiretamente contribuiu de alguma maneira para a conclusão deste trabalho, registro aqui meus votos de honra e agradecimentos.

## RESUMO GERAL

O avanço da fronteira agropecuária é crescente no Bioma Cerrado, motivado pela produção de carne e grãos para exportação. O desmatamento causa preocupação ambiental e, em algumas regiões do Bioma Cerrado já excederam os limites de conversão de uso do solo, e devem ser consideradas áreas prioritárias para realização de estudos e monitoramentos ambientais. Nesse sentido, objetivou-se com esta pesquisa avaliar atributos químicos e físicos de solos de referência e sua relação com a fragilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema, Mato Grosso do Sul. Foram definidos 62 pontos amostrais, representativos das unidades geológicas e pedológicas da bacia, em remanescentes de vegetação nativa. Amostras deformadas e indeformadas foram coletadas para determinação de atributos químicos e físicos. Os resultados mostraram ampla variedade de solos no interior da bacia, cuja fertilidade natural foi alta para os solos Neossolo Litólico, Neossolo Regolítico e Nitossolo Vermelho, e baixa para os solos Plintossolo Argilúvico, Plintossolo Petroplúvico e Planossolo Háptico. A textura dos solos analisados variou de arenosa a argilosa, com heterogeneidade de tamanho de partículas até mesmo dentro da mesma classe textural. O predomínio de areia média e areia fina e, em menor proporção de areia muito fina, possibilita alta capacidade de ajuste das partículas. Solos arenosos associados a formações areníticas conferem maior fragilidade ao ambiente se comparado a solos argilosos basálticos em condições ambientais semelhantes. A análise de fragilidade mostrou que cerca de 17.977 km<sup>2</sup> ou 47,7% da área é composta por fragilidade potencial baixa, associada a solos argilosos e baixa declividade (0 – 3%). O fator antrópico favorece o aumento da fragilidade ambiental na área estudada, pois, com a inserção do uso e cobertura da terra a fragilidade ambiental alta se destacou em 16.795 km<sup>2</sup> ou 44,6% da bacia, especialmente tendo a agricultura como maior abrangência encontrada na bacia. Os dados obtidos nesta pesquisa podem suprir as lacunas de conhecimento e/ou informações de referência para os solos da Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema, e do seu entorno. Estas informações são úteis, tanto para adequar práticas de conservação dos solos agrícolas mais suscetíveis a processos erosivos, quanto para os órgãos de controle e monitoramento ambiental e/ou estudos para a recuperação de áreas e manutenção da fertilidade do solo.

**Palavras-chave:** Solos tropicais. Fertilidade natural. Geoprocessamento. Uso da terra. Planejamento ambiental.

## GENERAL ABSTRACT

The advance of the agricultural frontier is growing in the Cerrado Biome, motivated by the production of meat and grains for export. Deforestation causes environmental concern, and in some regions of the Cerrado Biome they have already exceeded the limits for conversion of land use, and should be considered priority areas for carrying out environmental studies and monitoring. In this sense, aimed of this research was to evaluate chemical and physical attributes of reference soils and their relationship with environmental fragility in the Ivinhema River Basin, Mato Grosso do Sul. For this purpose, 62 soil samples were defined, representative of the geological and pedological units of the basin, in remnants of native vegetation. Deformed and undisturbed samples were collected to determine chemical and physical attributes in the laboratory. The results showed a great variety of soils inside the basin, whose natural fertility was high for the Leptosol, Regosol, and Nitisol soils, and low for the Argiluvic Plinthosol, Petroplinthic Plinthosol, and Planosol soils. The texture of the analyzed soils ranged from sandy to clayey, with particle size heterogeneity even within the same textural class. The predominance of medium sand and fine sand and, to a lesser extent, very fine sand, enables high particle adjustment capacity. Sandy soils associated with sandstone formations confer greater fragility to the environment when compared to basaltic clayey soils under similar environmental conditions. The fragility analysis showed that about 17,977 km<sup>2</sup> or 47.7% of the area is composed of low potential fragility, associated with clayey soils and low slope (0 - 3%). The anthropic factor favors the increase of environmental fragility in the studied area, because, with the insertion of land use and land cover, high environmental fragility stood out in 16,795 km<sup>2</sup> or 44.6% of the basin, especially with agriculture as the largest coverage found in the bowl. The data shown in research can fill the gaps of knowledge and/or for adapting conservation practices of agricultural soils that are more susceptible to erosive processes, as well as for environmental control and monitoring bodies and/or studies of area recovery and maintenance of soil fertility.

**Keywords:** Tropical soils. Natural fertility. Geoprocessing. Land use. Environmental planning

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>FIGURAS DO CAPÍTULO 1 – FERTILIDADE NATURAL E FRAGILIDADE INTRÍNSECA DE SOLOS DE REFERÊNCIA DO CERRADO BRASILEIRO.....</b>	<b>13</b>
FIGURA 1 - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA .....	15
FIGURA 2 - MAPA GEOLÓGICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS .....	17
FIGURA 3 - MAPA GEOMORFOLÓGICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS .....	19
FIGURA 4 - MAPA PEDOLÓGICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS .....	20
FIGURA 5 - MAPA DE DECLIVIDADE COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS .....	22
FIGURA 6 - MAPA HIPSOMÉTRICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS .....	23
FIGURA 7 - MAPA PLUVIOMÉTRICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS .....	24
FIGURA 8 - DIVERSIDADE FLORESTAL ENCONTRADA NA ÁREA DE ESTUDO ....	25
FIGURA 9 - MAPA DE USO E COBERTURA DA TERRA COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS .....	26
FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE AREIA, SILTE E ARGILA NOS SOLOS DA B.H.I.....	34
FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE PH (H <sub>2</sub> O) NOS SOLOS DA B.H.I....	36
FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE ΔPH NOS SOLOS DA B.H.I.....	38
FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE Al <sup>3+</sup> NOS SOLOS DA B.H.I.....	39
FIGURA 14 - SOLOS COM PRESENÇA DE PLINTITAS E PETROPLINTITAS.....	40
FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE H+Al NOS SOLOS DA B.H.I .....	41
FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE Ca <sup>2+</sup> NOS SOLOS DA B.H.I.....	42
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE Mg <sup>2+</sup> NOS SOLOS DA B.H.I .....	43
FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE K <sup>+</sup> NOS SOLOS DA B.H.I.....	44
FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE SB E V% NOS SOLOS DA B.H.I....	45
FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE CTC NOS SOLOS DA B.H.I.....	46
FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE C.O NOS SOLOS DA B.H.I .....	47
FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE P NOS SOLOS DA B.H.I.....	49

FIGURA 23 - SOLOS EM CONDIÇÃO DE HIDROMORFISMO.....	51
FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE Fe NOS SOLOS DA B.H.I.....	51
FIGURE 25 - SOLOS EM PROCESSO DE REDUÇÃO DE Fe .....	52
FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE Mn NOS SOLOS DA B.H.I .....	53
FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE Cu NOS SOLOS DA B.H.I .....	54
FIGURA 28 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE Zn NOS SOLOS DA B.H.I .....	55
FIGURA 29 - DIAGRAMA DE ORDENAÇÃO OBTIDO PELA ACP MOSTRANDO A PROJEÇÃO DAS VARIÁVEIS NO PLANO DO FATOR CP1 × CP2 .....	56
FIGURA 30 - DIAGRAMA DE PROJEÇÃO DAS CLASSES DE SOLOS EM FUNÇÃO DE SUAS VARIÁVEIS NO PLANO DO FATOR PC1 X PC2.....	59
<b>FIGURA DO CAPÍTULO 2 – FRAÇÕES DE AREIA E SUA RELAÇÃO COM ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ELETROQUÍMICOS DE SOLOS DE REFERÊNCIA DO CERRADO BRASILEIRO .....</b>	<b>71</b>
FIGURA 1 - (a) = DIAGRAMA DE ORDENAÇÃO OBTIDO PELA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS MOSTRANDO A PROJEÇÃO DAS VARIÁVEIS NO PLANO DO FATOR CP1 × CP2. (b) = DIAGRAMA DE PROJEÇÃO DAS CLASSES DE SOLOS EM FUNÇÃO DE SUAS VARIÁVEIS NO PLANO DO FATOR CP1 X CP2 .....	82
<b>FIGURAS DO CAPÍTULO 3 – MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE POTENCIAL E AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA.....</b>	<b>89</b>
FIGURA 1 - MAPA DE FRAGILIDADE POTENCIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA, MS .....	102
FIGURA 2 - MAPA DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA, MS .....	106

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELAS DO CAPÍTULO 1 – FERTILIDADE NATURAL E FRAGILIDADE INTRÍNSECA DE SOLOS DE REFERÊNCIA DO CERRADO BRASILEIRO.....</b>	<b>13</b>
TABELA 1 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA, GEOLOGIA E SOLOS .....	28
TABELA 2 - VALORES MÉDIOS E DESVIOS PADRÃO DAS VARIÁVEIS QUÍMICAS E GRANULOMÉTRICAS PARA OS SOLOS ESTUDADOS.....	32
<b>TABELA DO CAPÍTULO 2 – FRAÇÕES DE AREIA E SUA RELAÇÃO COM ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ELETROQUÍMICOS DE SOLOS DE REFERÊNCIA DO CERRADO BRASILEIRO .....</b>	<b>71</b>
TABELA 1 - VALORES MÉDIOS E DESVIOS PADRÃO DAS VARIÁVEIS FÍSICAS E ELETROQUÍMICAS PARA OS SOLOS ESTUDADOS .....	75

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO DO CAPÍTULO 1 – FERTILIDADE NATURAL E FRAGILIDADE INTRÍNSECA DE SOLOS DE REFERÊNCIA DO CERRADO BRASILEIRO.....</b>	<b>13</b>
QUADRO 1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS CLASSES DE SOLOS AMOSTRADAS NA B.H.I.....	21
<b>QUADROS DO CAPÍTULO 3 – MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE POTENCIAL E AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA.....</b>	<b>89</b>
QUADRO 1 - CLASSES GEOLÓGICAS, GRAU DE FRAGILIDADE, CARACTERÍSTICAS E ÁREA ABRANGENTE .....	92
QUADRO 2 - CLASSES DE DECLIVIDADE, GRAU DE FRAGILIDADE, CARACTERÍSTICAS E ÁREA ABRANGENTE .....	93
QUADRO 3 - CLASSES CLIMÁTICAS, GRAU DE FRAGILIDADE E CARACTERÍSTICAS.....	94
QUADRO 4 - CLASSES DE SOLO, GRAU DE FRAGILIDADE, CARACTERÍSTICAS E ÁREA ABRANGENTE .....	95
QUADRO 5 - GRAU DE FLOCULAÇÃO DO SOLO, GRAU DE FRAGILIDADE E ÁREA ABRANGENTE.....	97
QUADRO 6 - MATÉRIA ORGÂNICA, GRAU DE FRAGILIDADE E ÁREA ABRANGENTE.....	97
QUADRO 7 - MATÉRIA ORGÂNICA, GRAU DE FRAGILIDADE E ÁREA ABRANGENTE.....	98
QUADRO 8 - USO DA TERRA E COBERTURA VEGETAL, GRAU DE FRAGILIDADE, CARACTERÍSTICAS E ÁREA ABRANGENTE .....	100
QUADRO 9 - FRAGILIDADE POTENCIAL E ÁREA ABRANGENTE .....	103
QUADRO 10 - FRAGILIDADE AMBIENTAL E ÁREA ABRANGENTE.....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACP – Análise por Componentes Principais  
ADA – Argila Dispersa em Água  
A.F – Areia Fina  
A.G – Areia Grossa  
Al – Alumínio  
A.M – Areia Média  
A.M.F – Areia Muito Fina  
A.M.G – Areia Muito Grossa  
B.H – Bacia Hidrográfica  
B.H.I – Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema  
Ca – Cálcio  
CaCl<sub>2</sub> – Cloreto de Cálcio  
C.O – Carbono Orgânico  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
CTC – Capacidade de Troca Catiônica  
Cu – Cobre  
Ds – Densidade do Solo  
Dp – Densidade de Partículas  
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Est. C.O – Estoque de Carbono Orgânico  
FAAS – Flame Atomic Absorption Spectrometer  
FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura  
Fe – Ferro  
FF – Plintossolo Pétrico  
FT – Plintossolo Argilúvico  
G.F – Grau de Flocculação  
GX – Gleissolo Háptico  
H+Al – Acidez Potencial  
H<sub>2</sub>O – Água  
H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – Ácido sulfúrico  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
K – Potássio

KCl – Cloreto de Potássio  
K1βsg – Formação Serra Geral  
K2c – Grupo Caiuá Indivisivo  
LV – Latossolo Vermelho  
m% - Saturação por alumínio  
M<sub>a</sub> - Macroporosidade  
Mg – Magnésio  
M<sub>i</sub> – Microporosidade  
Mn – Manganês  
M.O – Matéria Orgânica  
M.O.S – Matéria Orgânica do solo  
NV – Nitossolo Vermelho  
P – Fósforo  
PCZ – Ponto de Carga Zero  
pH – Potencial Hidrogeniônico  
Pt – Porosidade Total  
PV – Argissolo Vermelho  
Q2a – Depósitos Aluvionares  
Qpp – Formação Ponta Porã  
RL – Neossolo Litólico  
RQ – Neossolo Quartzarênico  
RR – Neossolo Regolítico  
SB – Sama de Bases  
SX – Planossolo Háplico  
V% – Saturação por Bases  
Zn – Zinco

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO 1 – FERTILIDADE NATURAL E FRAGILIDADE INTRÍNSECA DE SOLOS DE REFERÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA, MS</b>	<b>13</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>13</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
2.1 ÁREA DE ESTUDO .....	15
2.1.1 Geologia .....	16
2.1.2 Geomorfologia.....	18
2.1.3 Pedologia .....	20
2.1.4 Declividade.....	22
2.1.5 Hipsometria .....	23
2.1.6 Clima .....	23
2.1.7 Cobertura Vegetal.....	24
2.1.8 Uso e cobertura da terra.....	25
2.2 AMOSTRAGEM.....	27
2.3 ANÁLISES QUÍMICAS E GRANULOMÉTRICAS .....	29
2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	31
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS DA B.H.I....	31
3.2 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	56
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>
<b>CAPÍTULO 2 – FRAÇÕES DE AREIA E SUA RELAÇÃO COM ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ELETROQUÍMICOS DE SOLOS DE REFERÊNCIA DO CERRADO BRASILEIRO .....</b>	<b>71</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>71</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>71</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>73</b>
2.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO.....	73
2.2 ANÁLISES FÍSICAS E CÁLCULOS ESTIMATIVOS PARA VARIÁVEIS ELETROQUÍMICAS .....	73

2.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	74
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>74</b>
3.1 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	81
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>86</b>
<b>CAPÍTULO 3 – MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE POTENCIAL E AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA .....</b>	<b>89</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>89</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>89</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>91</b>
2.1 ÁREA DE ESTUDO .....	91
2.2 FRAGILIDADE POTENCIAL .....	91
2.2.1 Geologia .....	91
2.2.2 Declividade.....	92
2.2.3 Clima .....	93
2.2.4 Solos .....	94
2.2.5 Grau de floclulação.....	96
2.2.6 Matéria orgânica .....	97
2.2.7 Argila.....	98
2.2.8 Uso da terra e cobertura vegetal .....	99
2.3 FRAGILIDADE AMBIENTAL OU EMERGENTE.....	101
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>101</b>
3.1 FRAGILIDADE POTENCIAL .....	101
3.2 FRAGILIDADE AMBIENTAL.....	105
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>110</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>111</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

Considerado um *hotspot* mundial de biodiversidade, o Cerrado é um dos biomas mais importantes do mundo, sendo o segundo da América do Sul (FERREIRA; LINO, 2021), com abrangência de cerca de 22% de área do território brasileiro, se distribui, originalmente, por mais de dois milhões de quilômetros quadrados, sobre os Estados de: Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia, Paraná, São Paulo e Distrito Federal, além dos encaves no Amapá, Roraima e Amazonas (MMA, 2021).

Apesar de sua importância o Bioma Cerrado tem passado por diversas alterações de suas características naturais, sendo que depois da Mata Atlântica, o Cerrado é o bioma brasileiro que mais passou por alterações com a ocupação humana. O avanço da fronteira agropecuária é crescente, motivado pela produção de carne e grãos para exportação (FERREIRA; LINO, 2021). Entre 2001 e 2018 mais de 27 milhões de hectares de terra sob vegetação nativa foram convertidos em agricultura intensiva orientada para o mercado em larga escala (MMA, 2018).

Segundo Alencar et al. (2020) entre os anos de 1985 e 2017 a taxa de perda líquida anual do Cerrado foi de 0,50% ao ano ou 748.687 hectares por ano. A maior parte da perda líquida de vegetação nativa ocorreu na parte Sul do Cerrado, nos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso e, principalmente nos estágios iniciais da série histórica, de forma que são consideradas como as mais antigas fronteiras da expansão agrícola do Cerrado.

Sano et al. (2019) apresentaram uma divisão abrangente do Cerrado em diferentes ecorregiões que refletem a heterogeneidade ambiental dentro do bioma, o estudo analisou as ecorregiões em termos de características biofísicas, áreas protegidas, passivo ambiental em áreas de preservação permanente ao longo dos cursos d'água, prioridades para conservação da biodiversidade e classificação das ecorregiões em termos de risco para a conservação e restauração da biodiversidade. O estudo concluiu que a região Sul do Cerrado ultrapassou seus limites de conversão de uso do solo, devendo ser considerada área prioritária para realização de estudos e monitoramentos ambientais.

Nesse sentido, o conhecimento sobre as vocações e restrições do território tem sido necessário para disciplinar o uso e a ocupação do solo (LOPES et al., 2019). Para a realização deste tipo de estudo, a tendência tem se concentrado na seleção de bacias hidrográficas como unidade de planejamento ambiental. As Bacias Hidrográficas têm sido utilizadas como unidade de estudo para compreensão da dinâmica de solos de referência, usos e cobertura da

terra e fragilidade ambiental (FERREIRA; LINO, 2021; SANTOS; MARCHIORO, 2020; BOCARDI et al., 2018).

Na Bacia Hidrográfica do Paraná 3, região oeste do Estado do Paraná, Bocardi et al. (2018), avaliaram solos de unidades de conservação e remanescentes florestais, com o propósito de estabelecer um banco de dados de referência para solos. Os autores determinaram atributos químicos e granulométricos e reforçaram a necessidade de realização de estudos regionalizados das características dos solos, devido a diversidade pedológica existente no Brasil.

Solos sob remanescentes de vegetação nativa, distribuídos nas bacias hidrográficas do Rio Paraguai e do Rio Paraná foram pesquisados por Alovizi et al. (2021), com o objetivo de avaliar a fertilidade natural do solo e gerar informações de referência para tomadas de decisões no uso do recurso solo. Os autores ressaltaram que para garantir o uso racional dos recursos naturais devem-se considerar as classes de solo bem como seus atributos granulométricos e químicos.

A espacialização de atributos químicos e físicos do solo, bem como de outros elementos físicos da paisagem como geologia, geomorfologia, relevo, clima e cobertura vegetal tem sido fundamental nas análises de fragilidade ambiental de bacias hidrográficas. A possibilidade de cruzamento de dados em sistemas de informação geográfica (SIG) é uma das maneiras mais eficientes de se determinar a fragilidade ambiental em uma bacia hidrográfica, permitindo avaliar de forma integrada as potencialidades e suscetibilidades dos elementos da paisagem (SANTOS; MARCHIORO, 2020).

Nesse sentido, objetivou-se com esta pesquisa avaliar atributos químicos e físicos de solos de referência (vegetação nativa) e sua relação com a fragilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema (B.H.I), Mato Grosso do Sul.

Os dados apresentados nesta Tese estão distribuídos em três capítulos. O primeiro apresenta uma caracterização da região de estudo, bem como os resultados da fertilidade natural e fragilidade intrínseca de solos do Cerrado brasileiro. No segundo os dados apresentados referem-se as frações de areia e sua relação com atributos físicos, químicos e eletroquímicos de solos de referência do Cerrado brasileiro. Por fim, o terceiro faz a inserção de atributos do solo inéditos na metodologia de Ross (1994; 2012) e modela a fragilidade potencial e ambiental da BHI.

## **CAPÍTULO 1 – FERTILIDADE NATURAL E FRAGILIDADE INTRÍNSECA DE SOLOS DE REFERÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA, MS**

### **RESUMO**

Estudos de solos de áreas preservadas têm dupla relevância. Por um lado, auxilia no entendimento da dinâmica natural da fertilidade do solo, por outro, permite o estabelecimento de critérios de qualidade ambiental pelos órgãos de controle e monitoramento. Objetivou-se com este estudo avaliar os atributos de fertilidade natural e fragilidade intrínseca dos solos na Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema, para subsidiar projetos de desenvolvimento agrícola e órgãos de controle e monitoramento ambiental. Para tanto, foram coletadas 62 amostras de solo, na profundidade de 0 a 20 cm, em áreas de vegetação nativa pertencentes ao estado de Mato Grosso do Sul – Brasil. Encontram-se dois tipos climáticos predominantes na área de estudo, o clima Aw - Clima tropical de savana e o clima Cwa – Clima temperado de inverno seco e verão quente e chuvoso. A vegetação predominante faz parte do bioma Cerrado e o substrato geológico é composto predominantemente pela Formação Serra Geral e Caiuá. As amostras foram secas ao ar e determinada a granulometria: areia, silte e argila, e atributos químicos: pH (H<sub>2</sub>O; CaCl<sub>2</sub> e KCl), ΔpH, Al<sup>3+</sup>, m%, H+Al, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, CEC, SB, V%, C.O, P, Cu, Fe, Mn e Zn foram determinadas conforme o manual de métodos de análise de solo da Embrapa. Os dados obtidos foram avaliados por estatística descritiva e análise de componentes principais. Os resultados mostraram grande variedade de classes de solos no interior da bacia, cuja fertilidade natural foi alta para os solos Neossolo Litólico, Neossolo Regolítico e Nitossolo, e baixa para os solos Plintossolo Argilúvico, Plintossolo Petroplíntico e Planossolo. Os solos arenosos apresentaram menores teores de carbono orgânico e cargas superficiais negativas, mostrando menor capacidade de retenção de cátions essenciais às plantas e de retenção de contaminantes ambientais, se houver. Com relação à fragilidade textural dos solos da Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema, pôde-se constatar alta sensibilidade do solo a erosão e suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas ou infiltradas. Os dados mostrados na pesquisa podem suprir as lacunas de conhecimento e/ou informações de referência para os solos da Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema, e do seu entorno. Estas informações são úteis, tanto para adequar práticas de conservação dos solos agrícolas mais suscetíveis a processos erosivos, quanto para os órgãos de controle e monitoramento ambiental e/ou estudos de recuperação de áreas e manutenção da fertilidade do solo.

Palavras-chave: Solos tropicais. Qualidade do solo. Bacia Hidrográfica Ivinhema. Conservação do solo. Análise de componentes principais.

### **1 INTRODUÇÃO**

A população mundial deve crescer em 2 bilhões de pessoas nos próximos 30 anos, passando dos atuais 7,7 bilhões de indivíduos para 9,7 bilhões em 2050 (ONU, 2019). Esse aumento implica em transformações constantes e aceleradas no meio ambiente, influenciada pelas atividades econômicas e dinâmicas populacionais. Projeção de crescimento populacional gera perspectivas de maior consumo de alimentos obviamente.

O Brasil se apresenta como importante produtor mundial de alimentos e com potencial de expansão da oferta. Na safra 2019/20 assumiu a liderança global de produção e exportação de soja, uma das principais *commodities* internacionais (VIANA et al., 2021). Somente no Bioma Cerrado entre 2001 e 2018, mais de 27 milhões de hectares de terra sob vegetação nativa foi convertida em agricultura orientada para o mercado em larga escala (MMA, 2018). Por outro lado, o avanço acelerado da última fronteira agrícola do país (Cerrado), gera preocupação ambiental, devido a crescente pressão para a abertura de novas áreas (FERREIRA; LINO, 2021).

Na Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema (B.H.I), segunda maior bacia do Estado de Mato Grosso do Sul (Sul do Bioma Cerrado), predominam cultivos diversos, com destaque para a soja, milho, cana-de-açúcar, trigo, arroz, mandioca, feijão, sorgo, café, abacaxi e pastagens. De maneira geral, mais de 80% da área da B.H.I é composta apenas por agricultura e pastagem, restando em média 10% de vegetação nativa, (Ecótono Cerrado/Mata Atlântica) encontrada em sua maior parte a leste da B.H.I, no vale do rio Paraná (Plano de Recursos Hídricos, 2015).

Os poucos remanescentes florestais existentes na B.H.I são de fundamental importância para estudos que visam analisar áreas com mínima ou nenhuma interferência antrópica, visto que, a maior parte da vegetação nativa foi suprimida no século passado. Estudos que analisam a dinâmica natural do solo para estabelecimento de valores orientadores de qualidade para elementos potencialmente tóxicos são dependentes de áreas com características o mais próximo do natural possível.

Estudos de solos de áreas preservadas têm dupla relevância. Por um lado, auxilia no entendimento da dinâmica natural da fertilidade do solo, por outro, permite o estabelecimento de critérios de qualidade ambiental pelos órgãos de controle e monitoramento. Apesar da relevância ainda não há registro de estudos em nível de bacia hidrográfica dos atributos de fertilidade natural e fragilidade intrínseca dos solos da B.H.I, fato que limita as poucas informações dessa B.H a comparações com outras regiões, o que não é adequado devido à diversidade de solos de um país continental como o Brasil (BIONDI et al., 2011).

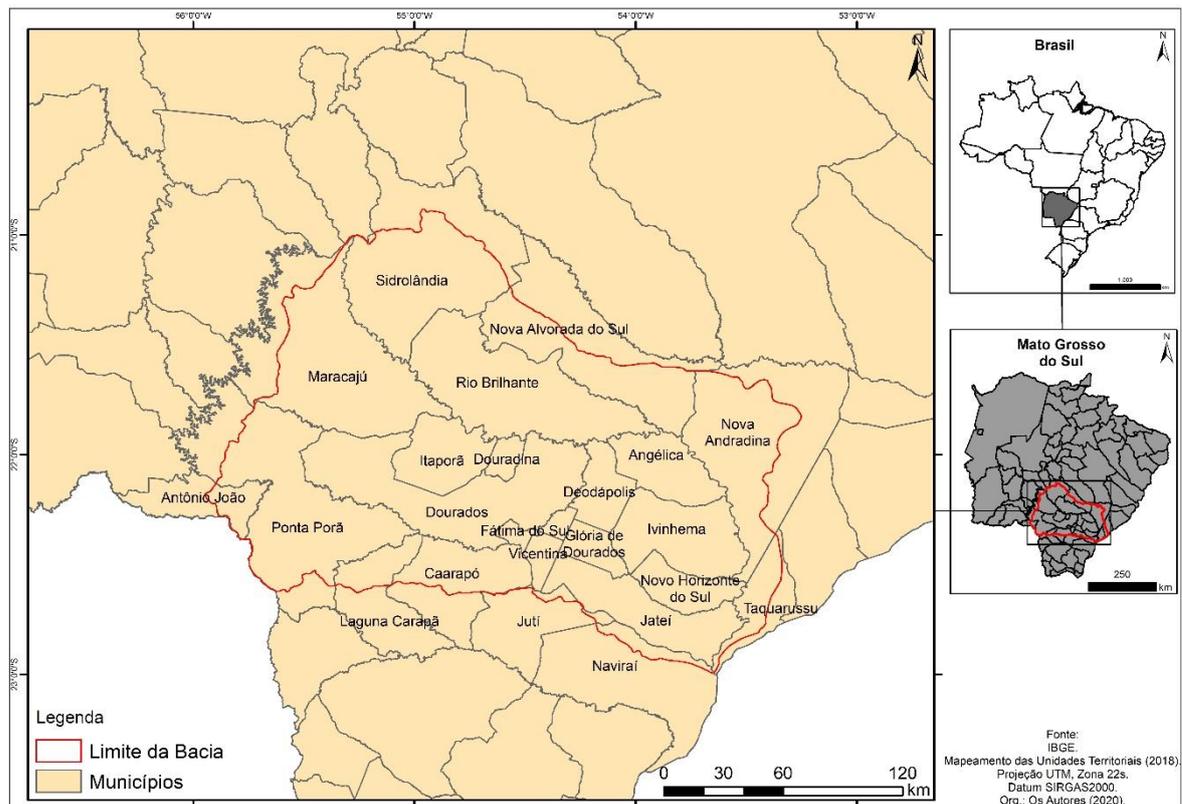
Assim, objetivou-se com este estudo avaliar os atributos de fertilidade natural e fragilidade intrínseca dos solos da B.H.I, para subsidiar projetos de desenvolvimento agrícola e órgãos de controle e monitoramento ambiental.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

## 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A B.H.I encontra-se integralmente dentro dos limites brasileiros na região Centro-Oeste, no Estado de Mato Grosso do Sul, fazendo fronteira com o Paraguai na sua porção Sudoeste (Figura 1). A Bacia forma um polígono irregular compreendido entre os paralelos 20°51' e 23°14' de latitude sul e os meridianos 52°21' e 55°57' de longitude Oeste de Greenwich. Hidrograficamente encontra-se inserida na bacia do rio Paraná, limita-se na margem Oeste pela Serra das Araras, Serra de Camapuã e parte da Serra de Maracaju e na sua margem Leste pela calha do rio Paraná. Também o limítrofe Oeste é divisa com a Bacia Hidrográfica do Rio Miranda parte da Bacia Hidrográfica do rio Paraguai (Plano de Recursos Hídricos, 2015).

FIGURA 1 - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA



FONTE: Adaptado de IBGE (2018).

Com aproximadamente 37.687 km<sup>2</sup> ou 3.768.700 hectares a B.H.I é a segunda maior B.H do Estado de Mato Grosso do Sul. Distribuída em 25 municípios, englobando integralmente os municípios de: Anaurilândia, Angélica, Batayporã, Dourados, Deodápolis, Itaporã, Ivinhema, Jateí, Rio Brilhante, Novo Horizonte do Sul, Taquarussu, Vicentina e,

parcialmente, os municípios de Antônio João, Caarapó, Juti, Laguna Caarapã, Maracaju, Nova Alvorada do Sul, Nova Andradina, Naviraí, Ponta Porã e Sidrolândia (POTT et al., 2014).

Dentre as 15 B.H presentes no Estado de Mato Grosso do Sul (Iguatemi, Amambai, Ivinhema, Pardo, Verde, Sucuriú, Quitéria, Santana, Aporé, Correntes, Taquari, Miranda, Negro, Nabileque e Apa), a B.H.I foi a que melhor correspondeu aos critérios estabelecidos para o desenvolvimento desta pesquisa: i) Ausência de estudos de referência para solos; ii) Aspectos geoquímicos; iii) Vulnerabilidade ambiental; iv) Aspectos geográficos e econômicos associados aos deslocamentos para realizações de coletas.

### 2.1.1 Geologia

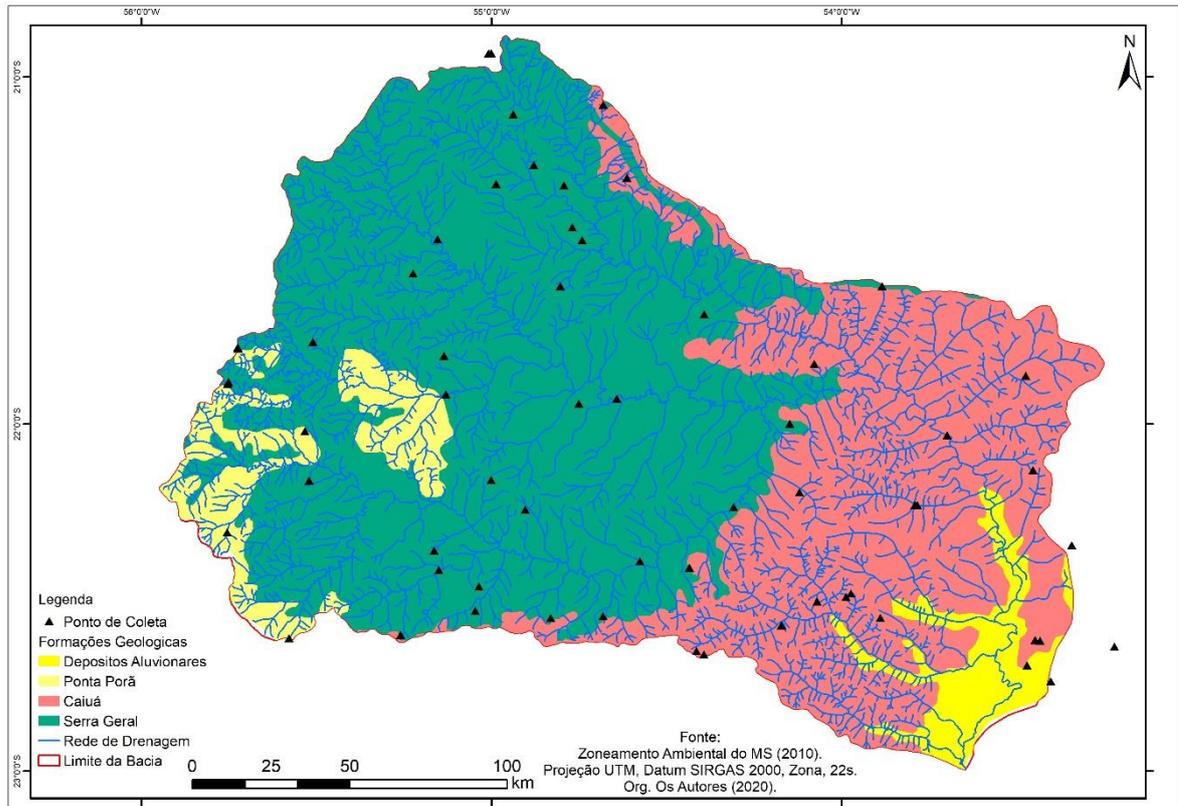
A B.H.I está inserida em sua totalidade no contexto geológico da bacia sedimentar do Paraná. Apresenta as unidades litoestratigráficas desenvolvidas no Mesozóico e Cenozóico (Figura 2). No Grupo São Bento encontram-se manchas de afloramentos da Formação Botucatu (Jr) e de rochas vulcânicas, predominantemente básicas da Formação Serra Geral (K1βsg), o Grupo Bauru ocupa a região Leste da bacia e é formado por arenitos da Formação Caiuá (K2c). Na parte inferior da bacia ocorrem os sedimentos quaternários do rio Paraná, formando Depósitos Aluvionares (Q2a) e na região sudoeste da bacia a Formação Ponta Porã (Qpp), abrangendo principalmente os municípios de Antônio João e Ponta Porã e parte de Maracaju e Dourados (CPRM, 2006).

A Formação Serra Geral, é caracterizada por rochas de natureza vulcânica, que estão inseridas na sequência Gondwana III da Bacia do Paraná. Encontra-se sobreposta aos arenitos eólicos da Formação Botucatu, ou então, diretamente sobre o embasamento cristalino da Faixa Brasília ao sul de Goiás e sudoeste de Minas Gerais, e sotoposta as rochas sedimentares da Bacia Bauru (grupos Bauru e Caiuá) ou depósitos sedimentares inconsolidados do Cenozóico (MACHADO et al., 2009).

A composição mineralógica dos basaltos da região de estudo já foi determinada (Lastoria, et al., 2006), em amostras coletadas na Pedreira SULTEPA em Dourados, representando níveis maciços e vesiculares dos derrames. O basalto maciço apresenta-se constituído por plagioclásio (labradorita), augita como piroxênio principal, na proporção de 40% e 30%, respectivamente, e como minerais acessórios magnetita (transformada parcialmente em gohetita), olivina, apatita, clorofilita (com lamelas de clorita) e vidro devitrificado. Os níveis com estrutura vesículo-amigdaloidal, a composição mineralógica é

semelhante à observada nas amostras de estrutura maciça, e as vesículas apresentam-se geralmente preenchidas por esmectitas.

FIGURA 2 - MAPA GEOLÓGICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS



FONTE: Adaptado de CPRM (2006).

Sobrepostos aos basaltos, na porção leste e centro leste do Mato Grosso do Sul, é comum a ocorrência de sedimentos relacionados ao Grupo Caiuá (formações Santo Anastácio e Rio Paraná), com arenitos fino-médio avermelhados exibindo estratificação plano-paralela, normalmente com clastos de basalto de dimensões de até 1 cm e leve imbricação. Observa-se também, lentes centimétricas de siltito, de coloração mais esbranquiçada, intercaladas nos arenitos (MACHADO et al., 2009).

A cobertura suprabasáltica neocretácea estende-se atualmente pelo Planalto Ocidental de São Paulo, noroeste do Paraná, parte oriental do Mato Grosso do Sul, parte do Triângulo Mineiro (MG) e sul de Goiás. Constitui-se de rochas sedimentares de origem continental, acumuladas durante o Cretáceo Superior, com rochas vulcânicas localmente intercaladas (FERNANDES; COIMBRA, 1994).

Os minerais mais comuns na Formação Caiuá são: quartzo, variando entre 75% a 90% do total da rocha, secundariamente aparecem os feldspatos (microclínio e plagioclásios),

e raramente calcedônia e muscovita. Os grãos são, de modo geral, subarredondados a arredondados, foscas, encobertos por película de óxido de ferro e a presença de estratificações cruzadas (SNLCS, 1979; GASPARETTO, 1999; FRANÇA JUNIOR et al., 2010).

O extremo Leste da B.H.I é representado por Depósitos Aluvionares, arenitos cretáceos da Formação Caiuá, bastante alterados, porém ainda preservando suas estruturas. Contudo, esta formação tem área aflorante em pontos restritos, principalmente junto às margens do rio Ivinhema (FORTES et al., 2004).

Estudo realizado por Fortes e Volkmer (2003), identificou dois tipos de cascalheiras no extremo Leste da B.H.I: as oligomíticas e as polimíticas. As primeiras constituídas de clastos de quartzo e quartzito e as segundas de seixos de quartzo, quartzito, calcedônia, ágata e arenito.

As cascalheiras oligomíticas encontram-se instalados em compartimentos topográficos superiores as polimíticas, porém inferiores do ponto de vista estratigráfico. As polimíticas afloram nas margens do rio Ivinhema e possuem, em sua maioria matriz silicosa e cimento ferruginoso em diferentes formas de ateração do ferro (FORTES et al., 2004).

A Formação Ponta Porã (Qpp), pertencente à era Cenozóica é constituída por depósitos conglomeráticos com matriz arenosa e cimento ferruginoso, contendo fragmentos de tamanhos desde seixos a matações. Os fragmentos são principalmente quartzos, metassedimentos do Grupo Caiuá e arenitos da Formação Furnas; subordinadamente encontram-se fragmentos de rochas graníticas. Ocorre em áreas não contínuas de aproximadamente 50 a 70 km, abrangendo principalmente os municípios de Antonio João e Ponta Porã e parte de Maracaju e Dourados (SAKAMOTO et al., 2006).

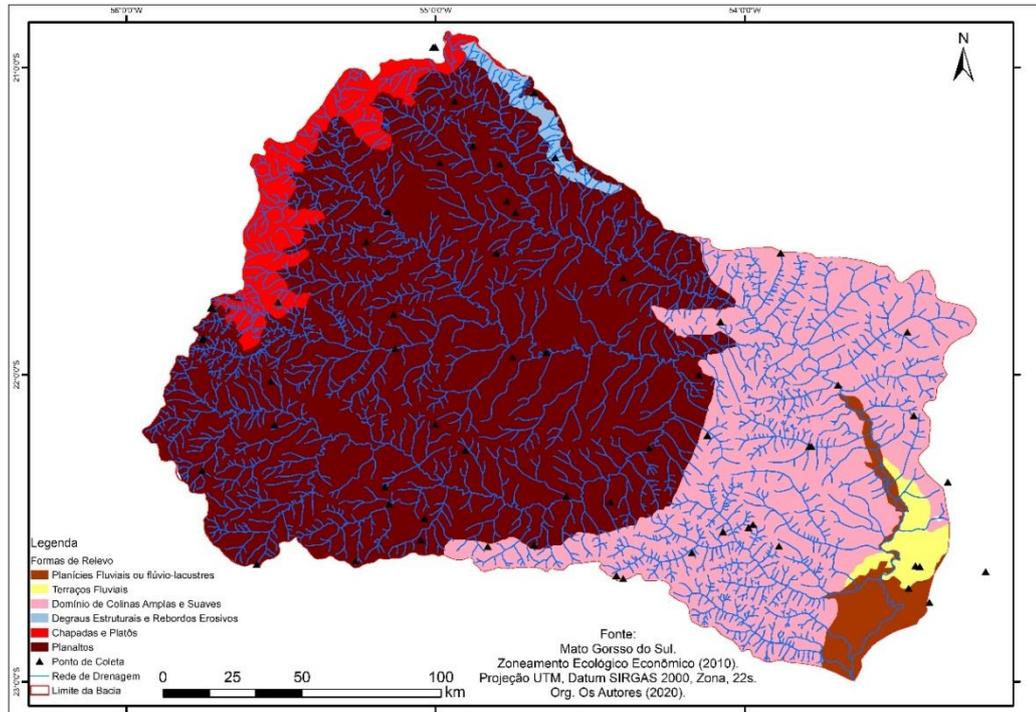
### 2.1.2 Geomorfologia

Na B.H.I predominam as seguintes unidades geomorfológicas: Planícies Fluviais, Terraços Fluviais, Domínio de Colinas Amplas e Suaves, Degraus Estruturais e Reborbos Erosivos, Chapadas e Platôs, Planaltos de Maracaju e Dourados. A distribuição espacial destas unidades é apresentada na Figura 3.

Planícies Fluviais e Terraços Fluviais, unidades geomorfológicas localizadas no extremo leste da B.H.I, com altitude entre 250 e 300 metros, na maior parte sem deficiência hídrica para a vegetação devido à grande disponibilidade de água no solo (SEMAC, 2010). No baixo curso do Ivinhema há planícies, leques aluviais e superfícies erosivas, terraço alto, terraço médio com grande quantidade de depressões e lagos, e terraço baixo com planícies,

leques aluviais e superfícies erosivas; a Planície divide-se em alta e baixa, uma superfície plana cuja largura aumenta para montante, sendo inundada pelo Rio Ivinhema, exceto próximo ao terraço baixo soerguido (FORTES, 2003).

FIGURA 3 - MAPA GEOMORFOLÓGICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS



FONTE: Adaptado de Mato Grosso do Sul (2010).

Com inclinação para sudeste a unidade Domínio de Colinas Amplas e Suaves é uma extensa superfície em rampa, com altitudes mais elevadas para noroeste, atingindo 400 metros, decrescendo em direção ao Vale do Paraná, quando chega a 250 metros. Nessa unidade, predomina o arenito da Formação Caiuá, que recobre as superfícies dos espigões em colinas aplainadas ou tabulares (LIMA, 2006).

Degraus Estruturais e Rebordos Erosivos, presentes em uma estreita faixa no noroeste da B.H.I. Transição geológica entre a formação Serra Geral e Caiuá, com presença predominante de Argissolos ao norte e Latossolos ao sul. Declividade menor que 10% e altitude variando de 400 a 580 metros (CPMR, 2006).

Chapadas e Platôs ocorrem em uma estreita faixa no extremo oeste da B.H.I. Composta por superfícies tabulares alçadas, ou relevos soerguidos, planos ou aplainados, não ou incipientemente pouco dissecados. Os rebordos dessas superfícies, posicionados em cotas elevadas, são delimitados, em geral, por vertentes íngremes a escarpadas (CPRM, 2010). Nas regiões de maior dissecção foram encontrados solos RL e RR.

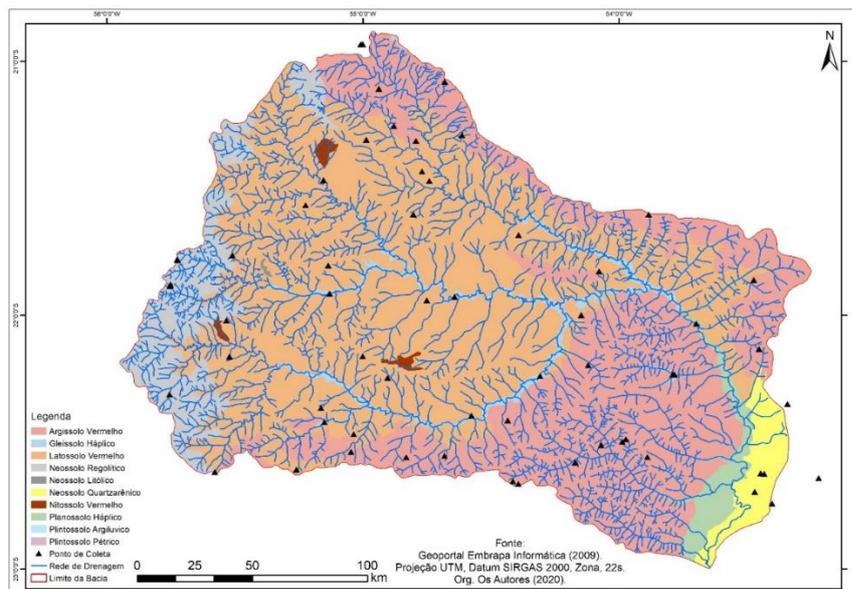
O Planalto de Maracaju, representa as maiores altitudes da B.H.I, esculpido em rochas basálticas da Formação Serra Geral, também é conhecido localmente como Serra de Maracaju. Atinge altitude de cerca de 600 metros e configura-se como o divisor de águas das drenagens que vertem para o rio Paraná, onde se destacam os rios Brilhante, Santa Maria e Dourados, formadores do rio Ivinhema, e os que vertem para o rio Paraguai (LIMA, 2006).

Do extremo oeste para o centro da B.H.I, o planalto de Dourados caracteriza-se como uma superfície rampeada, formando um plano inclinado para o Sudeste. No limite com o Planalto de Maracaju as altitudes situam-se em torno de 500 metros atingindo, no limite com os divisores das Sub-Bacias meridionais, a cota de 300 metros ao longo do rio Dourados, onde se une com a unidade limítrofe já referida. O relevo acha-se esculpido em derrames basálticos da Formação Serra Geral ocorrendo, localmente, manchas de arenitos da Formação Bauru (MATOS, 2017).

### 2.1.3 Pedologia

A extensão geográfica da área de estudo, desde o planalto de Maracajú até o Vale do Rio Paraná, proporciona grande variação nos fatores que atuam na formação do solo. Dentre os quais citam-se ambiências climáticas, geomórficas, vegetacionais e geológicas. Nesse sentido, a diversidade de solos encontrados na B.H.I, sob fitofisionomias nativas, é composta por sete ordens e dez subordens de solos, conforme o sistema brasileiro de classificação de solos (SANTOS et al., 2018), (Figura 4).

FIGURA 4 - MAPA PEDOLÓGICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS



FONTE: Adaptado de Embrapa (2009).

No extremo oeste da B.H.I, foram encontrados solos da ordem dos Plintossolos Argilúvicos (FT) e Plintossolos Pétricos (FF). Do extremo oeste para região central da B.H.I, foram encontrados Latossolos Vermelhos (LV), Nitossolos Vermelhos (NV), Neossolos Liólicos (RL) e Neossolos Regolíticos (RR). Os solos Argissolos Vermelhos (PV), foram encontrados em maior extensão da região central para Leste da B.H.I. Ao longo de toda B.H.I, nas regiões mais baixas do terreno e fundo de vale, associadas as drenagens, foram encontrados os solos Gleissolos Háplicos (GX). Na região Leste da B.H.I foram encontrados os solos Planossolos Háplicos (SX), associados as regiões de planície do Rio Ivinhema, e no Vale do Rio Paraná os solos Neossolos Quartzarênicos (RQ). No Quadro 1 são apresentadas as principais características das classes de solos amostradas na B.H.I.

QUADRO 1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS CLASSES DE SOLOS AMOSTRADAS NA B.H.I

FT	Plintossolos com horizonte ou camada de acumulação de argila abaixo do horizonte A superficial. Apresentam drenagem variável, podendo ocorrer excesso de água temporário até excesso prolongado de água durante o ano.
FF	Apresentam um horizonte ou camada concrecionário ou litoplíntico, com sérias restrições ao uso agrícola devido ao enraizamento das plantas, entrave ao uso de equipamentos agrícolas e pouco volume de solo disponível para as plantas. Nestes solos, pastagens constituem o uso mais comum.
GX	São solos minerais, hidromórficos, apresentando horizontes A (mineral) ou H (orgânico), seguido de um horizonte de cor cinzento-olivácea, esverdeado ou azulado, chamado horizonte glei, resultado de modificações sofridas pelos óxidos de ferro existentes no solo (redução) em condições de encharcamento durante o ano todo ou parte dele. O horizonte glei pode começar a 40 cm da superfície. São solos mal drenados, podendo apresentar textura bastante variável ao longo do perfil.
LV	Apresentam cores vermelhas acentuadas devido aos teores mais altos e à natureza dos óxidos de ferro presentes no material originário em ambientes bem drenados, e características de cor, textura e estrutura uniformes em profundidade.
NV	Nitossolos de cores vermelhas e vermelho-escuras, argilosos e muito argilosos, estrutura em blocos fortemente desenvolvidos, derivados de rochas básicas e ultrabásicas, com diferenciação de horizontes pouco notável. Corresponde ao que se denominava anteriormente de Terra Roxa Estruturada.
PV	Argissolos de cores vermelhas acentuadas devido a teores mais altos e à natureza dos óxidos de ferro presentes no material originário, em ambientes bem drenados. O teor de argila no horizonte subsuperficial (de cor vermelha) é bem maior do que no horizonte superficial, sendo esse incremento de argila percebido sem dificuldade quando se faz o exame de textura, no campo.
RQ	Solos sem contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm a partir da superfície, com sequência de horizontes A-C, porém apresentando textura areia ou areia franca em todos os horizontes até, no mínimo, a profundidade de 150 cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico ou lítico fragmentário.
RL	Solos com contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm a partir da superfície, apresentando horizonte A ou hístico assente diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr ou sobre material com 90% (por volume) ou mais de sua massa constituída por fragmentos grosseiros (por exemplo, cascalheira de quartzo) com diâmetro maior que 2 mm (cascalhos, calhaus e matações). Admitem um horizonte B em início de formação, cuja espessura não satisfaz a nenhum tipo de horizonte B diagnóstico.
RR	Solos sem contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm a partir da superfície, apresentando horizonte A ou hístico sobrejacente a horizonte C ou Cr. Admite um horizonte B em início de formação, cuja espessura não satisfaz a nenhum tipo de horizonte B diagnóstico.
SX	Planossolos são solos constituídos por material mineral com horizonte A ou E seguido de horizonte B plânico. Horizonte plânico sem caráter sódico perde em precedência taxonômica para o horizonte plíntico.

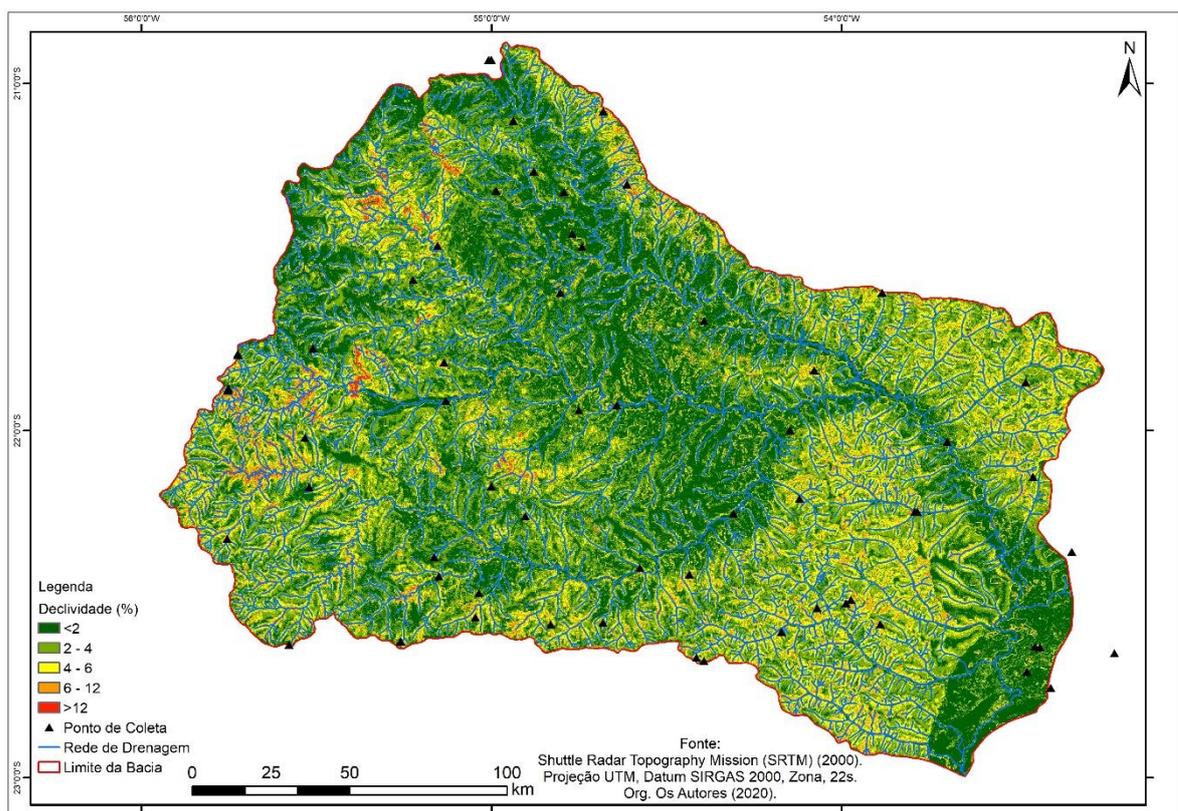
FF = Plintossolo Pétrico; FT = Plintossolo Argilúvico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico. Fonte: Santos et al. (2018).

Cabe ressaltar a possibilidade de ocorrência de outras classes de solos na B.H.I, especialmente sobre usos e manejos, pois, para definição das amostragens dos solos foram recrutados apenas solos sob fitofisionomias nativas. Pott et al. (2014) relataram a ocorrência de Luvisolos arenosos a argilosos e solos orgânicos no município de Taquarussu, entretanto, há algumas décadas, quando o uso de várzeas era considerado desenvolvimento e incentivado pelo programa oficial Pró-Várzeas, foram feitas extensas obras de drenagem de várzeas do Rio Ivinhema, com construção de grandes canais, para cultivo de pastagens.

#### 2.1.4 Declividade

A ocorrência de locais com alta declividade é pouco expressiva na B.H.I, condição explicada pela geomorfologia do terreno formado predominantemente por planaltos e outras formações com características também planas (Figura 5).

FIGURA 5 - MAPA DE DECLIVIDADE COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS



FONTE: Adaptado de SRTM (2000).

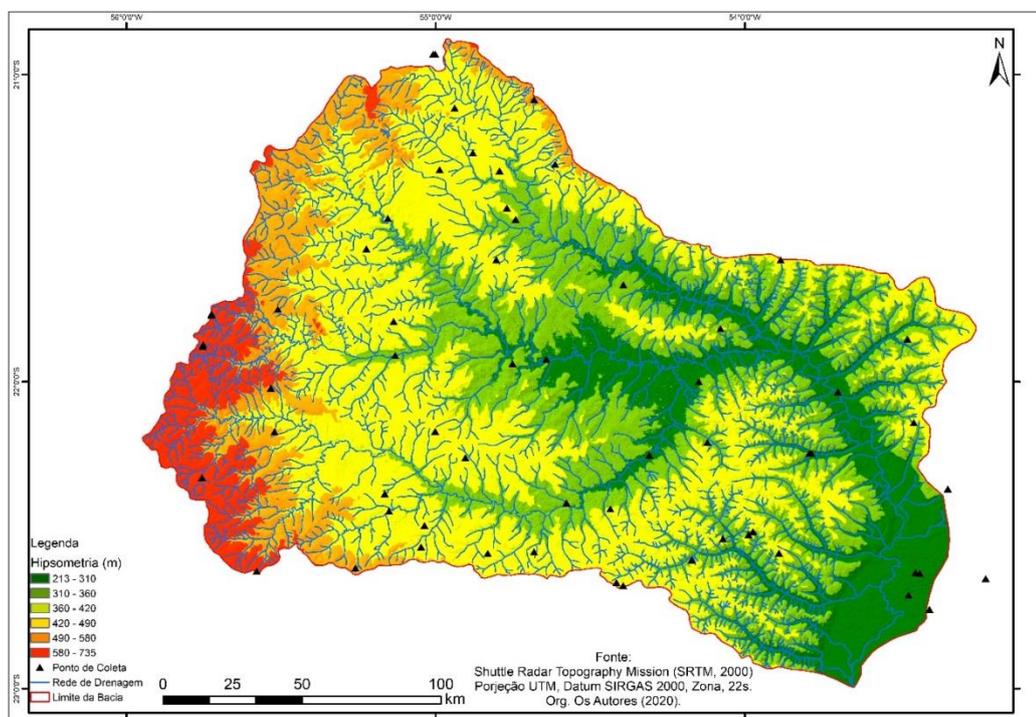
Em torno de 78% da B.H.I corresponde ao relevo plano, com declividade entre 0 e 3%. Tal condição favorece o aumento das taxas de infiltração de água e uma menor velocidade de escoamento superficial da água sobre o solo, fator este influenciado também

pelas unidades pedológicas presentes na B.H, as quais apresentam elevadas taxas de infiltração em solos sob vegetação nativa (Plano de Recursos Hídricos, 2015).

### 2.1.5 Hipsometria

O mapa hipsométrico (Figura 6), permite a identificação da amplitude de relevo e o grau de dissecação da unidade de paisagem. Essa condição possibilita ter uma ideia geral do transporte de materiais que esculpem as formas de relevo. Considerando a declividade e hipsometria da B.H.I, os relevos mais movimentados estão associados aos Planaltos de Maracaju e Dourados, e esses à formação geológica Serra Geral.

FIGURA 6 - MAPA HIPSEMÉTRICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS



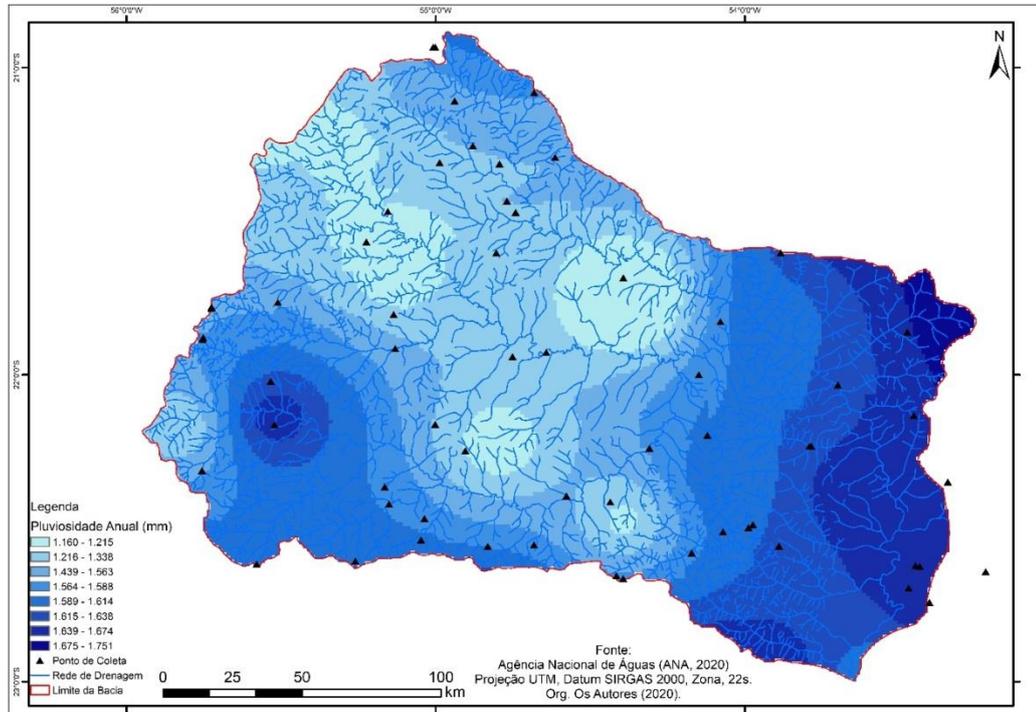
FONTE: Adaptado de SRTM (2000).

### 2.1.6 Clima

Encontram-se dois tipos climáticos predominantes na área de estudo, o clima Aw - Clima tropical de savana e o clima Cwa – Clima temperado de inverno seco e verão quente e chuvoso. Segundo a classificação de Köppen, o clima Cwa é caracterizado por apresentar inverno seco e verão chuvoso com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e a do mês mais quente superior a 22°C. O clima Aw, por sua vez, apresenta estação chuvosa no verão (novembro a abril) e estação seca no inverno (maio a outubro), com temperatura média

do mês mais frio superior a 18°C e precipitação do mês mais seco menor que 60 mm (ARAI, 2010; IVASKO JÚNIOR et al., 2020). No ano de amostragem a precipitação variou de 1.160 a 1751 mm ao longo da área de estudo (Figura 7).

FIGURA 7 - MAPA PLUVIOMÉTRICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS



FONTE: Adaptado de ANA (2020).

### 2.1.7 Cobertura Vegetal

A diversidade geológica, geomorfológica, pedológica e climática condicionou distintas formações vegetais na B.H.I (Figura 8). Em terrenos areníticos lixiviados e ricos em alumínio trocável, ocorrem fitofisionomias de cerrado. Já nos solos de origem ígnea e/ou eruptiva, e logicamente mais férteis (Latosolos Eutróficos, Nitossolos e Argissolos), ocorrem os tipos florestais estacionais (IBGE, 2012; FERREIRA; SILVA et al., 2017).

A vegetação da B.H.I, de Nordeste ao Sudeste, está na transição Cerrado/Floresta Estacional Semidecidual. Ao Norte do Rio Ivinhema predomina Cerrado e ao Sul, Floresta Estacional Semidecidual (POTT et al., 2014). Na planície dos rios Paraná e Ivinhema ocorrem fitofisionomias Aluvial e Submontana da Floresta Estacional Semidecidual, formações Pioneiras Aluviais, associações entre estas fitofisionomias florestais e formações pioneiras (PEREIRA; KINOSHITA, 2013).

FIGURA 8 - DIVERSIDADE FLORESTAL ENCONTRADA NA ÁREA DE ESTUDO



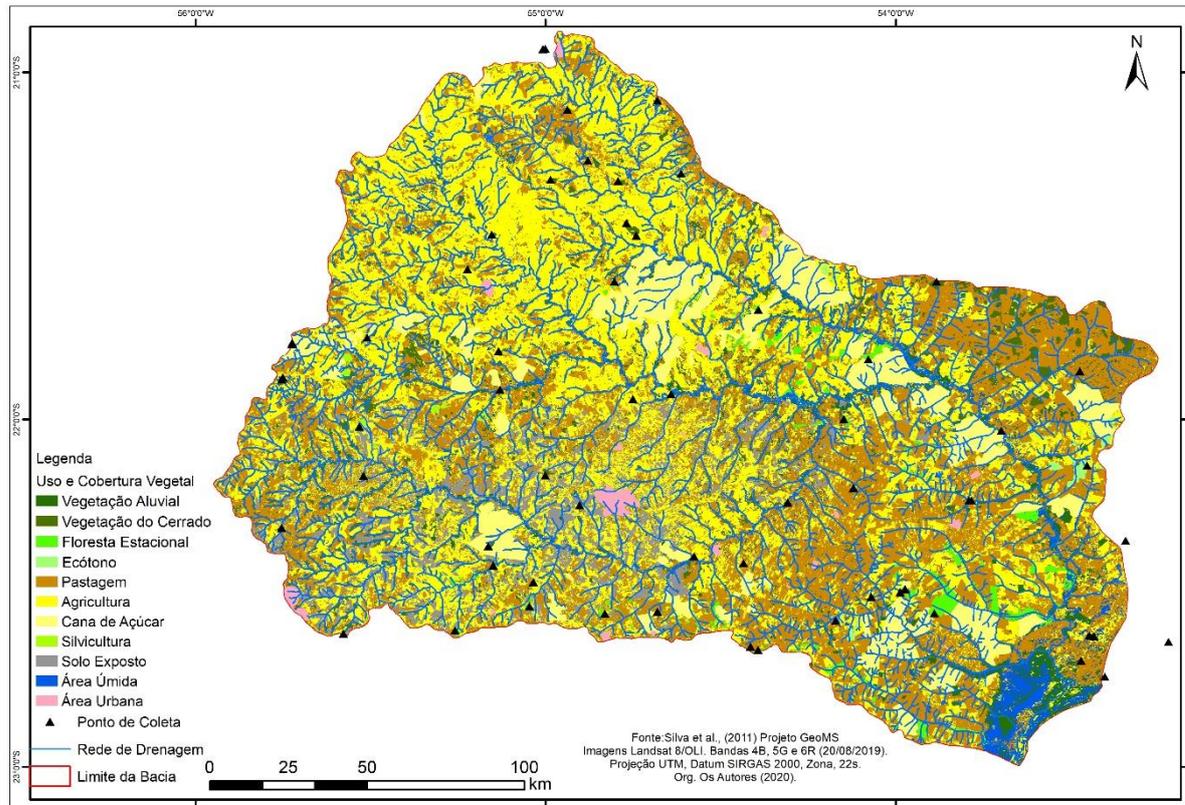
FONTE: O autor (2020).

#### 2.1.8 Uso e cobertura da terra

Por meio do mapa de uso e cobertura da terra (Figura 9), verificou-se a distribuição espacial das diversas formas de utilização da área. O uso agrícola por culturas de ciclos curtos (soja e milho) ocupa a maior parte da área (37%) se comparado aos demais usos. Geograficamente, esses usos se concentram, em sua maior parte, na região de alto curso da B.H.I. De maneira geral, coincidem com as classes de solo de boa aptidão agrícola, como os Latossolos e Nitossolos oriundos da formação geológica Serra Geral.

O uso da terra por pastagem ocupa a segunda maior proporção de área (34%) da B.H.I, estando distribuído, predominantemente, na região de baixo curso da bacia, associado a classes de solo de textura arenosa como os Argissolos e Neossolos Quartzarênicos, oriundos da formação geológica Caiuá. No extremo Sudoeste da B.H.I, os usos da terra por pastagem coincidem com a ocorrência de Plintossolos oriundos da formação geológica Ponta Porã.

FIGURA 9 - MAPA DE USO E COBERTURA DA TERRA COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS



FONTE: Adaptado de Silva et al. (2011).

Áreas ocupadas por vegetação nativa são restritas a fragmentos isolados ao longo de toda bacia. Considerando as fitofisionomias de Cerrado, Floresta Aluvial, Floresta Estacional e Áreas de transição (Ecótonos) esta ocupação abrange a terceira maior proporção de área (10%) da B.H.I. Na planície dos rios Paraná e Ivinhema (áreas úmidas; solos mal drenados) ocorrem Formações Pioneiras de vegetação herbáceo-arbustiva a arbórea e vegetação aquática que somam 4,9% da área de estudo (POTT et al., 2014). Ainda com relação a ocupação florestal existem áreas que contemplam floresta plantada ou silvicultura que quantificam 0,26% da área de estudo.

A cultura da cana-de-açúcar ocupa a quarta maior proporção de área (7,7%) da B.H.I. Segundo Ferreira e Silva (2019), a expressividade desta cultura se deve a boa e regular aptidão agrícola dos solos e aspectos políticoeconômicos, como os incentivos fiscais concedidos pelo poder público na esfera federal, estadual e municipal, o baixo custo das terras para arrendamento ou compra e o suporte logístico para escoamento da produção facilitaram e foram determinantes para expansão do setor sucroenergético nessa área.

A presença de solo exposto ocupa a quinta maior proporção de área (5,9%) da B.H.I. Esta classe de uso está relacionada com o período de entressafra da região (mês de agosto), coincidindo com a retirada do milho e preparo do solo para a semeadura de soja.

Os usos urbanos mais expressivos em termos quantitativos de área geográfica compreendem as cidades de: Dourados, Ponta Porã, Sidrolândia, Maracaju, Nova Andradina e Rio Brillhante. Todos os ambientes urbanos presente no interior da B.H.I somam 0,53% da área de estudo.

## 2.2 AMOSTRAGEM

Para definição dos pontos de coleta procedeu-se inicialmente uma consulta espacial por imagens de satélite fornecidas pelo *Google Earth Pro*, para identificação de fitofisionomias nativas e acessibilidade às áreas. Sequencialmente, foi realizada uma sobreposição das cartas geológicas e pedológicas de Mato Grosso do Sul (CPRM, 2006). Todo o trabalho de geoprocessamento para confecção dos produtos cartográficos foi realizado com o auxílio do programa *ArcGIS 10.6*, e o sistema de referência informado em cada mapa. O intuito de cruzamento de informações geológicas, pedológicas e fitofisionômicas foi de abranger a maior diversidade de classes de solos possíveis em áreas preservadas no interior da B.H.I.

A partir da exploração espacial da área, foi possível obter as coordenadas geográficas e realizar a marcação dos locais de coletas. No planejamento foram definidos 62 pontos amostrais representativos das unidades geológicas e pedológicas da B.H.I, em remanescentes de vegetação nativa (Tabela 1). De posse das coordenadas geográficas, foram traçadas rotas por meio de um aplicativo de celular (*Google Maps*). Em campo, as coordenadas geográficas exatas dos pontos de amostragem foram coletadas por meio de um aparelho de GPS (*Global Positioning System*), da marca Garmin eTrex Legend®. Características importantes para a caracterização dos solos como afloramentos rochosos, presença de cascalho, hidromorfismo e cor do solo foram registradas.

TABELA 1 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA, GEOLOGIA E SOLOS Continua

Ponto	Coordenadas geográficas		Geologia	Descrição	solo
	S	W			
1	22° 9'40.11"	55° 0'4.36"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
2	21°54'52.42"	55° 7'49.12"	K2c	Arenito quartzoso	GX
3	21°48'12.48"	55° 8'6.31"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
4	21°34'1.60"	55°13'25.31"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	RL
5	21°28'4.50"	55° 9'15.10"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	NV
6	21°18'33.98"	54°59'11.37"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
7	21° 6'28.57"	54°56'15.06"	K2c	Arenito quartzoso	PV
8	21° 4'49.90"	54°40'50.93"	K2c	Arenito quartzoso	PV
9	20°55'59.11"	55° 0'27.28"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	RL
10	20°55'55.67"	55° 0'3.05"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	RR
11	21°15'16.30"	54°46'56.31"	K2c	Arenito quartzoso	PV
12	21°17'28.58"	54°47'30.42"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
13	21°18'45.98"	54°47'34.91"	K2c	Arenito quartzoso	PV
14	21°26'2.30"	54°46'9.21"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
15	21°28'14.91"	54°44'26.78"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
16	21°47'0.20"	55°43'27.89"	Qpp	Arenitos/conglomerados	FT
17	21°46'46.01"	55°43'28.19"	Qpp	Arenitos/conglomerados	FT
18	21°46'52.60"	55°43'27.41"	Qpp	Arenitos/conglomerados	FT
19	21°45'48.69"	55°30'36.84"	K2c	Basalto/Basalto adensito	RR
20	21°52'43.12"	55°45'4.49"	Qpp	Arenitos/conglomerados	FT
21	21°53'7.60"	55°45'12.84"	Qpp	Arenitos/conglomerados	FF
22	22° 1'15.48"	55°31'57.98"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	NV
23	22° 9'47.56"	55°31'15.59"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
24	22°18'41.75"	55°45'18.90"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	RR
25	22°37'2.14"	55°34'41.69"	K2c	Arenito quartzoso	PV
26	22°36'23.68"	55°15'33.56"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
27	22°32'16.53"	55° 2'46.91"	K2c	Arenito quartzoso	PV
28	22°28'5.46"	55° 2'7.79"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
29	22°25'14.24"	55° 9'0.69"	K2c	Arenito quartzoso	GX
30	22°21'53.44"	55° 9'49.80"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
31	22°14'47.73"	54°54'11.77"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	NV
32	22°33'31.69"	54°49'50.69"	K2c	Arenito quartzoso	PV
33	22°33'12.72"	54°40'52.16"	K2c	Arenito quartzoso	PV
34	22°23'40.36"	54°34'34.01"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	RL
35	22°24'51.16"	54°26'4.56"	K2c	Arenito quartzoso	PV
36	22°39'15.91"	54°24'52.02"	K2c	Arenito quartzoso	PV
37	22°39'49.70"	54°23'34.38"	K2c	Arenito quartzoso	PV
38	22°34'47.58"	54°10'16.78"	K2c	Arenito quartzoso	PV
39	22°33'29.30"	53°53'20.24"	K2c	Arenito quartzoso	PV
40	22°30'37.82"	54° 4'11.70"	K2c	Arenito quartzoso	PV
41	22°37'18.88"	53°26'49.83"	Q2a	Depósitos aluvionares	RQ
42	22°37'24.76"	53°25'59.31"	Q2a	Depósitos aluvionares	RQ
43	22°41'40.62"	53°28'10.82"	Q2a	Depósitos aluvionares	RQ

					Conclusão
44	22°44'29.18"	53°24'7.13"	Q2a	Depósitos aluvionares	RQ
45	22°38'26.17"	53°13'12.20"	Q2a	Depósitos aluvionares	RQ
46	22°20'55.17"	53°20'32.86"	K2c	Arenito quartzoso	GX
47	22° 7'59.06"	53°27'9.10"	K2c	Arenito quartzoso	PV
48	21°51'38.33"	53°28'23.97"	K2c	Arenito quartzoso	PV
49	22° 2'0.20"	53°41'52.19"	K2c	Arenito quartzoso	SX
50	22°14'0.59"	53°47'1.25"	K2c	Arenito quartzoso	SX
51	22°13'57.62"	53°47'25.53"	K2c	Arenito quartzoso	GX
52	22°14'20.59"	54°18'29.95"	K2c	Arenito quartzoso	GX
53	22°11'47.50"	54° 7'13.04"	K2c	Arenito quartzoso	PV
54	21°59'58.25"	54° 8'52.25"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
55	21°49'35.99"	54° 4'41.39"	K2c	Arenito quartzoso	PV
56	21°36'11.31"	53°53'0.71"	K2c	Arenito quartzoso	PV
57	21°41'1.71"	54°23'32.17"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
58	21°36'10.65"	54°48'12.03"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	LV
59	21°56'27.21"	54°45'1.74"	K1βsg	Basalto/Basalto adensito	NV
60	21°55'36.57"	54°38'29.67"	K2c	Arenito quartzoso	GX
61	22°29'18.12"	53°58'22.33"	K2c	Arenito quartzoso	PV
62	22°29'51.93"	53°59'14.54"	K2c	Arenito quartzoso	PV

K1βsg = Formação Serra Geral; K2c = Grupo Caiuá Indivisivo; Q2a = Depósitos Aluvionares; Qpp = Formação Ponta Porã; FF = Plintossolo Pétrico; FT = Plintossolo Argilúvico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico.

As coletas foram realizadas no mês de junho de 2019. Para cada ponto de coleta amostrado foram obtidas amostras compostas (cinco amostras simples homogeneizadas) de aproximadamente 2 kg de solo, retiradas com picaretas feitas de aço inoxidável e pá cavadeira isentas de revestimento ou pintura, na profundidade de 0-20 cm. Amostras indeformadas na forma de anel volumétrico foram coletadas na profundidade de 0-10 cm para determinação de atributos físicos, apresentados no capítulo II. Foram adotados procedimentos de manuseio, preservação, acondicionamento e transporte de acordo com normas nacionais e internacionais, respeitando-se os prazos de validade, juntamente com as características regionais (CONAMA, 2009).

Na coleta foram tomadas medidas para garantir a qualidade do conjunto amostral, ao se tratar de estradas, resguardou-se um mínimo de 200 m de rodovias asfaltadas de intenso fluxo, de 100 m de rodovias asfaltadas de menor fluxo e 50 m de rodovias vicinais de terra conforme descrito por (ABRAHÃO; MARQUES 2013; BOCARDI et al., 2018).

### 2.3 ANÁLISES QUÍMICAS E GRANULOMÉTRICAS

As amostras de solo foram secas ao ar, protegidas de luz solar, destorroadas manualmente e passadas em peneira de aço inoxidável com abertura de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) para as determinações químicas e granulométricas.

Todas as variáveis químicas e granulométricas foram determinadas em duplicatas, conforme as metodologias descritas por (CLAESSEN, 1997; TEIXEIRA et al., 2017).

As variáveis granulométricas (areia, silte e argila), foram determinadas de acordo com o método da pipeta, no qual foi pesado 20 g de amostra de TFSA, adicionado 250 mL de água destilada, 10 mL de hidróxido de sódio  $1 \text{ mol L}^{-1}$  como agente dispersante. A argila dispersa em água foi determinada pelo mesmo procedimento, excetuando-se a utilização do hidróxido de sódio.

Foi determinado o pH em água,  $\text{CaCl}_2 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{KCl } 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$  na proporção 1:2,5 (m/v), respectivamente. As leituras foram realizadas por potenciômetro de bancada. A acidez potencial foi estimada pelo uso do pH da solução SMP (mistura de sais neutros com vários tampões).

O Ca e o Mg trocáveis foram extraídos por  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ , em conjunto com o Al trocável, titulando-se numa fração do extrato, o alumínio com  $\text{NaOH}$ , na presença de azul-debromitol como indicador. Em outra fração, o  $\text{Ca}^{+2}$  e o  $\text{Mg}^{+2}$  foram determinados por espectrometria de absorção atômica em chama (FAAS).

O  $\text{K}^+$ , P, Fe, Mn, Cu e Zn disponíveis foram extraídos por solução duplo-ácida, composta pela mistura de  $\text{H}_2\text{SO}_4 0,05 \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{HCl } 0,025 \text{ mol L}^{-1}$ , conhecida como solução de Mehlich-1. Os micronutrientes Fe, Mn, Cu e Zn foram determinados por espectrometria de absorção atômica em chama (FAAS), e o  $\text{K}^+$  em fotômetro de chama. A determinação de P disponível foi feita por espectroscopia (UV/Vis), por meio da leitura da intensidade da cor do complexo fosfomolibdico, produzido pela redução do molibdato com o ácido ascórbico.

O teor de carbono orgânico (C.O) foi determinado por oxidação com  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  em meio sulfúrico, empregando-se como fonte de energia o calor desprendido do  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e o aquecimento, método conhecido como Walkley-Black. O excesso de dicromato após a oxidação foi titulado com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal e o teor de C.O foi calculado pela quantidade de  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$  reduzido.

A partir dos resultados obtidos procedeu-se com a realização cálculos para obtenção da soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica a pH 7 (CTC), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e delta pH ( $\Delta\text{pH}$ ). A SB foi obtida pela soma dos cátions  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^+$ . Para a CTC foi somado a SB + H+Al. Os valores V% e m% foram obtidos

pelas equações:  $100.SB/CTC$  e  $100.Al^{3+}/SB + Al^{3+}$ , respectivamente. Por fim, os valores de  $\Delta pH$  foram calculados pela equação:  $pH H_2O - pH KCl$ .

## 2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Primeiramente procedeu-se com análise estatística descritiva para o conjunto de dados gerados para B.H.I. Adicionalmente, os dados foram individualizados por classe de solo e apresentados em diagramas de caixa ou *box plot*, que permite a visualização de valor mínimo, máximo, mediano, primeiro e terceiro quartil e ainda sugere pontos discrepantes.

Técnicas estatísticas multivariadas como a análise de componentes principais (ACP), permite ampla visão dos resultados obtidos, pois detecta possíveis interações entre variáveis e classes de solo. Para tal padronizou-se a matriz de dados (média do conjunto de dados transformados igual a 0 e desvio padrão igual a 1), e procedeu-se a análise com os seguintes critérios: 1) valores próprios maiores que um; 2) a variância acumulada é de pelo menos 70%; 3) cada fator explique pelo menos 5% da variância (JOLLIFFE, 2002). As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio dos softwares Excel (descritiva) e Statistica versão 10.0 (multivariada).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS DA B.H.I

Os atributos químicos e granulométricos determinados apresentaram grande variabilidade, o que está associada à diversidade de solos encontrada na região de estudo (Tabela 2). Ao todo são sete ordens e dez subordens segundo o sistema brasileiro de classificação de solos (SANTOS et al., 2018). A extensão geográfica da área de estudo, desde a Serra de Maracaju até as margens do Rio Paraná proporciona grande variação nos fatores que atuam na formação do solo, a começar pelas diferenças de material de origem geológica, ígnea e sedimentar (CPRM, 2006), e outros como precipitação pluviométrica, temperatura, relevo, umidade e vegetação.

TABELA 2 - VALORES MÉDIOS E DESVIOS PADRÃO DAS VARIÁVEIS QUÍMICAS E GRANULOMÉTRICAS PARA OS SOLOS ESTUDADOS

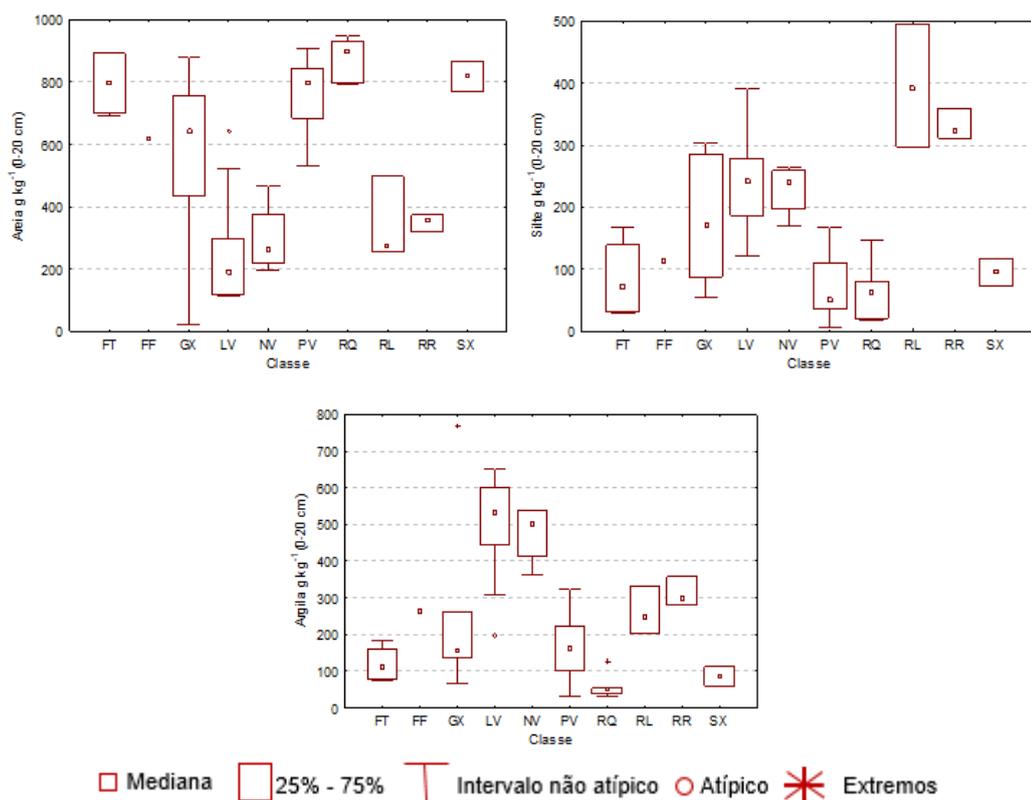
Solo	FT (n = 4)	FF (n = 1)	GX (n = 6)	LV (n = 13)	NV (n = 4)	PV (n = 21)	RQ (n = 5)	RL (n = 3)	RR (n = 3)	SX (n = 2)
Variáveis	0-20 cm									
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	795,7 ± 111	621,1	563,8 ± 306	283,7 ± 296	296,8 ± 119	779,8 ± 99	875 ± 73	342,4 ± 135	350,4 ± 28	819,1 ± 69
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	84,8 ± 66	114,0	179 ± 104	230,2 ± 69	227,9 ± 42	71,4 ± 50	65,4 ± 52	395,3 ± 99	331,8 ± 25	94,6 ± 32
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	119,3 ± 51	265,0	257 ± 259	486 ± 129	475,2 ± 83	148,7 ± 74	59,5 ± 38	262,1 ± 65	311,8 ± 40	86,2 ± 37
pH (H <sub>2</sub> O)	4,48 ± 0,1	4,50	5,08 ± 0,5	5,47 ± 0,7	5,79 ± 0,4	5,09 ± 0,7	5,62 ± 0,9	6,47 ± 0,2	6,42 ± 0,1	5,12 ± 0,9
pH (CaCl <sub>2</sub> )	3,88 ± 0,1	3,90	4,48 ± 0,5	4,87 ± 0,7	5,19 ± 0,4	4,49 ± 0,7	5,02 ± 0,9	5,87 ± 0,3	5,82 ± 0,1	4,5 ± 0,9
pH (KCl)	3,88 ± 0,1	3,72	4,26 ± 0,3	4,49 ± 0,8	5,0 ± 0,4	4,41 ± 0,7	4,97 ± 0,9	5,44 ± 0,5	5,62 ± 0,2	4,5 ± 0,9
ΔpH	-0,59 ± 0,04	-0,78	-0,82 ± 0,13	-0,99 ± 0,26	-0,78 ± 0,1	-0,68 ± 0,13	-0,65 ± 0,03	-1,03 ± 0,29	-0,80 ± 0,07	-0,62 ± 0,04
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,13 ± 0,4	2,50	0,74 ± 0,8	0,76 ± 0,4	0,2 ± 0,1	0,92 ± 0,4	0,41 ± 0,2	0,00	0,00	0,45 ± 0,4
m (%)	68 ± 3,4	78,2	19,5 ± 2,1	7,2 ± 5,7	1 ± 0,3	38,3 ± 33	21,7 ± 18,3	0,00	0,00	45,8 ± 35,2
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,9 ± 0,5	2,73	1,80 ± 0,6	1,84 ± 0,6	1,52 ± 0,4	1,46 ± 0,5	0,67 ± 0,3	1,08 ± 0,1	1,15 ± 0,3	1,17 ± 0,2
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,18 ± 0,1	0,27	4,57 ± 4,1	7 ± 4,2	10,4 ± 3,2	2,77 ± 3,5	2,8 ± 2,6	15,4 ± 0,7	15 ± 0,2	1,1 ± 1,5
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,10 ± 0,06	0,11	1,42 ± 1,4	2,56 ± 1,1	2,89 ± 0,8	0,92 ± 1	0,83 ± 1	3,96 ± 0,6	4,41 ± 0,3	0,26 ± 0,3
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,24 ± 0,03	0,31	0,14 ± 0,1	0,42 ± 0,4	0,46 ± 0,3	0,18 ± 0,1	0,18 ± 0,1	0,83 ± 0,2	0,96 ± 0,5	0,06 ± 0,03
CTC (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,46 ± 0,7	3,42	7,94 ± 5,2	11,8 ± 5,1	15,3 ± 3,7	5,40 ± 4,4	4,50 ± 3,6	21,3 ± 1,4	21,5 ± 1,1	2,63 ± 1,6
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,53 ± 0,2	0,69	6,1 ± 5,6	10 ± 5,3	13,8 ± 3,8	3,8 ± 4,5	3,8 ± 3,6	20,2 ± 1,4	20,3 ± 0,9	1,46 ± 1,9
V (%)	21,4 ± 3,8	20,2	66,3 ± 28	79,4 ± 15	89,2 ± 5	51,1 ± 31	68,1 ± 32	94,8 ± 0,6	94,6 ± 1,3	40,7 ± 47
C.O (g kg <sup>-1</sup> )	15,7 ± 2,9	19,8	24,4 ± 14	25,1 ± 9	31,3 ± 17	15,5 ± 6	10,6 ± 6,3	55,2 ± 10	49,4 ± 11	18,4 ± 10
P (mg dm <sup>-3</sup> )	3,1 ± 0,7	1,40	6,2 ± 3,9	5,8 ± 6	6,5 ± 4	4,7 ± 4	9,3 ± 5	22,4 ± 17	5,7 ± 5	2,3 ± 0,5
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	167 ± 29	216,4	1088 ± 206	32,8 ± 28	29,6 ± 20	85,3 ± 64	28,2 ± 24	10,9 ± 0,5	44,6 ± 34	1033 ± 163
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	7,2 ± 6,4	6,4	89,6 ± 67	148 ± 99	172 ± 85	69,5 ± 61	107,5 ± 67	246,7 ± 102	256,4 ± 93	36,6 ± 31
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,65 ± 0,24	1,1	5,4 ± 1,9	4,7 ± 4	6,9 ± 6	1,7 ± 1	0,41 ± 0,1	1,1 ± 0,3	4,2 ± 2	2 ± 0,6
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,07 ± 0,05	0,17	2,1 ± 1,8	3,1 ± 2	1,5 ± 1	1,9 ± 1	1,3 ± 1	2,8 ± 1,9	2,5 ± 1,3	0,6 ± 0,3

FF = Plintossolo Pétrico; FT = Plintossolo Argilúvico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; H+Al = Acidez potencial; CTC = Capacidade de troca catiônica; SB = Soma de Bases; V% = Saturação por bases em porcentagem; C.O = Carbono orgânico; n = Número de amostras.

As variáveis granulométricas (areia, silte e argila) permitiram enquadrar os solos em diversas classes texturais sendo os solos FT, PV, RQ e SX de textura arenosa, FF, GX, RL e RR de textura média, e LV e NV de textura argilosa (SANTOS et al., 2018). As diferenças texturais estão associadas ao material de origem e as transformações ocorridas ao longo do tempo por processos de intemperismo.

Os teores de areia, silte e argila variaram amplamente nas classes de solos analisadas (Figura 10). Em torno de 50% das amostras dos solos PV, FT e SX apresentaram predomínio da fração areia na composição granulométrica, com os teores acima de 800 g kg<sup>-1</sup>. Na classe dos solos RQ todas as amostras coletadas apresentaram teores de areia acima de 800 g kg<sup>-1</sup>. A única amostra de solo FF e 50% das amostras de GX obtiveram teores de areia superior a 600 g kg<sup>-1</sup>. Essas características são coerentes com a origem sedimentar desses solos, constituída por rochas areníticas com granulação arredondada fina a grossa e cores avermelhadas (CPRM, 2006).

FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE AREIA, SILTE E ARGILA NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

Cerca de 50% do conjunto amostral da B.H.I é de textura arenosa, característica que exige medidas conservacionistas como forma de contribuir para o zoneamento agrícola e estimar o potencial produtivo desses solos caracterizados como leves, uma das alternativas é a

adoção de sistemas integrados de produção, tais como a integração lavoura-pecuária e a integração lavoura-pecuária-floresta (DONAGEMMA et al., 2016).

Dentre os diversos benefícios dos sistemas conservacionistas, pode-se destacar a cobertura do solo e a permanência de níveis adequados de MO para o sistema. Com isso, aumentam-se os níveis de nutrientes no solo favorecendo a nutrição de plantas, e por outro lado, as cargas negativas geradas na superfície dos coloides orgânicos favorecem a retenção de possíveis contaminantes ambientais.

A preocupação com a contaminação ambiental, especialmente de águas subterrâneas, em solos de textura arenosa é bastante relatada na literatura. Em solos de textura leve do Ceará, com aplicações anuais de  $510 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrogênio, observou-se movimentação de nitrato até cerca de 7 m de profundidade e presença do mesmo íon na água subterrânea em valores superiores aos permitidos para consumo humano (ANDRADE et al. 2009). Donagemma et al. (2016) relataram teores de potássio disponíveis acima de  $50 \text{ mg dm}^{-3}$ , em profundidades superiores a 1,8 m, em solos areníticos do oeste baiano.

Por outro lado, uma série de outros fatores influencia no potencial de lixiviação de íons solúveis no perfil do solo. Por exemplo, o regime de chuva, a dose aplicada, a cultura, ou sistema de cultivo estabelecido, além da mineralogia da fração mineral. Portanto, o conhecimento e avaliação das características do solo permite o desenvolvimento de diferentes práticas de manejo do solo, buscando minimizar tais problemas, e nunca se esquecer de aplicar as boas práticas conservacionistas, como cobertura do solo e rotação de culturas (SANTOS et al., 2015).

De modo geral, os teores mínimos de argila nos solos NV e LV, superam os valores máximos das demais classes de solo, evidenciando intensas transformações do material de origem (GHIDIN et al., 2006). Por outro lado, os basaltos que deram origem a esses solos possuem granulometria fina a afanítica, o que contribui para solos argilosos (CPRM, 2006). Cerca de 25% das amostras de LV apresentaram teor de argila superior a  $600 \text{ g kg}^{-1}$ , e mais de 75% das amostras de LV e NV expressaram conteúdo de argila superior a  $400 \text{ g kg}^{-1}$ .

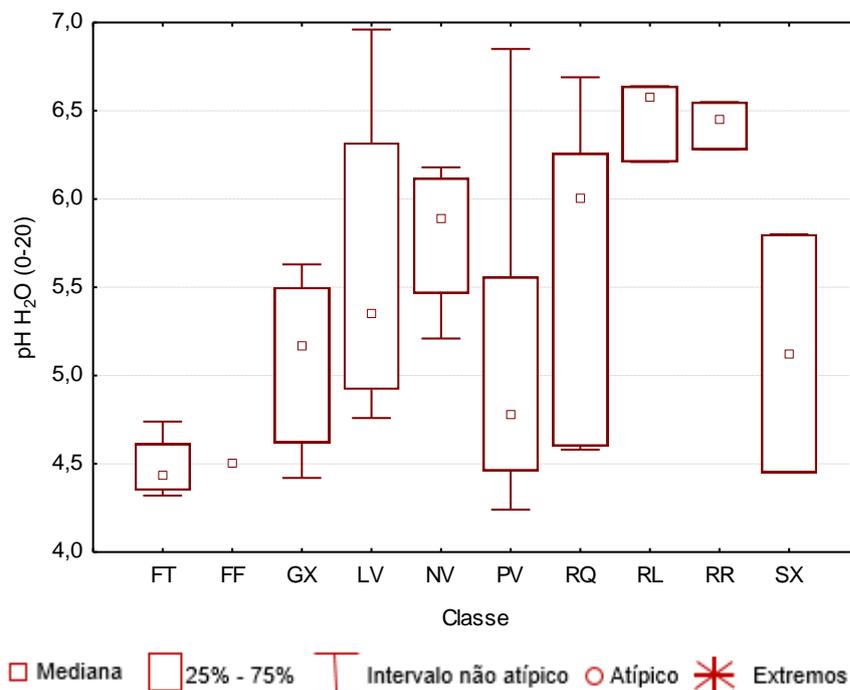
Os menores teores de argila ( $197,5$  e  $310 \text{ g kg}^{-1}$ ) encontrados em dois pontos amostrais do solo LV, possivelmente estejam associados a uma mancha de Arenito Caiuá, onde essas amostras foram coletadas, como pode ser observado no mapa de classe de rochas. Valores semelhantes foram encontrados em um LVdf, formação geológica predominante de arenitos, em ambiente Cerrado *stricto sensu* (FONTANA et al., 2016).

Todas as amostras de solo RL e RR apresentaram teor de silte superior a  $300 \text{ g kg}^{-1}$ . Isso se justifica pelas características inerentes ao material originário ou pela variação da

atuação dos processos pedogenéticos que apresentam intensidade e velocidade distintas de formação do solo (GONÇALVES et al., 2013). A relação silte/argila é usada para avaliar o estágio de intemperismo em solos de regiões tropicais, no qual valor inferior a 0,7 nos solos de textura média ou valor inferior a 0,6 nos solos de textura argilosa ou muito argilosa indicam solos com alto grau de intemperismo (SANTOS et al., 2018). Com base apenas nesse critério os solos RL e RR são solos de baixo intemperismo, visto que apresentaram valores de relação silte/argila de 1,5 e 1,06, respectivamente. Por outro lado, mais de 50% das amostras de solo FT, PV e RQ expressaram teor de silte inferior a  $80 \text{ g kg}^{-1}$  o que é condizente com os altos teores de areia encontrados nesses solos.

Todos os solos analisados apresentaram características ácidas (Figura 11). Com relação aos valores médios de pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ), os solos apresentaram a seguinte sequência: 4,48; 4,50; 5,08; 5,47; 5,79; 5,09; 5,62; 6,47; 6,42 e 5,12, para os solos FT; FF; GX; LV; NV; PV; RQ; RL; RR e SX, respectivamente. Segundo as classes adotadas por Sousa e Lobato (2004), para solos agrícolas do Cerrado, na camada de 0 a 20 cm, o pH dos solos FF, FT, GX, PV e SX é baixo, médio para os solos LV e NV, adequado para os solos RQ e alto para os solos RL e RR.

FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE PH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háptico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háptico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

A acidez de solos sob mata nativa é considerada um processo natural devido a lixiviação de cátions básicos causada pelas precipitações e absorção de nutrientes pelo sistema radicular das plantas. Em condições tropicais este processo é intensificado devido as altas temperaturas e elevadas precipitações (POLESSO et al., 2021).

Condições de baixo pH como foi encontrada para 50% das classes de solo analisadas é considerado um problema grave em sistemas de cultivo. Isso se justifica pela presença de elementos como o  $Al^{3+}$  e o  $Mn^{2+}$  em concentrações consideradas tóxicas. Não menos importante, deve-se ressaltar para o fato de que da mesma forma que a acidez é um ponto limitante ao desenvolvimento das espécies, valores elevados de pH também são considerados prejudiciais. Por exemplo, valores de pH superiores a 6,5 pode afetar a disponibilidade de micronutrientes por diminuir a solubilização e absorção de Cu, Zn, Fe e Mn, e aumentar a disponibilidade de Mo (DECHEN et al., 2018; POLESSO et al., 2021).

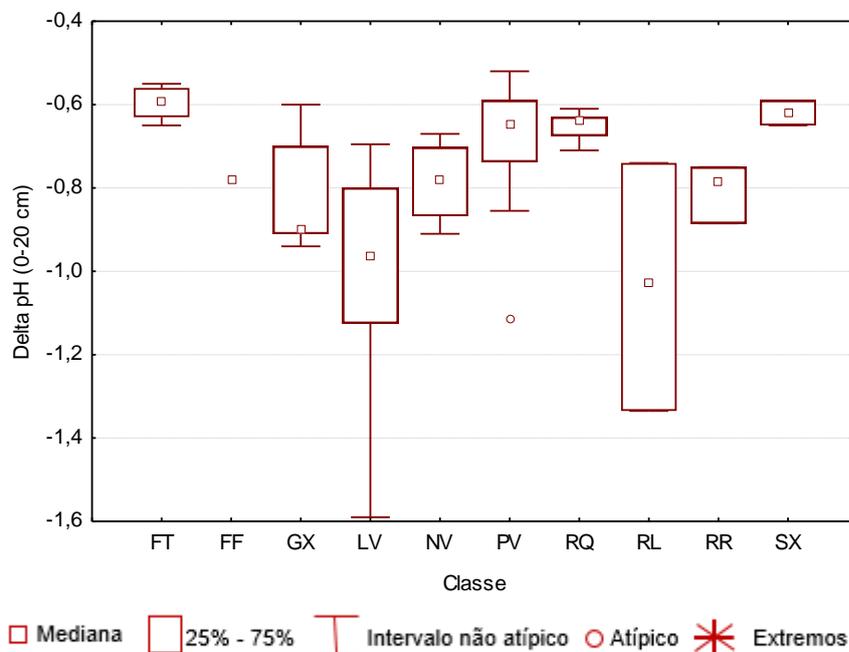
Em torno de 75% das amostras de solo GX e PV, mais de 25% das amostras de LV, NV e RQ e todas as amostras de FT e FF apresentaram valores de pH abaixo de 5,6, condição que indica haver a presença de  $Al^{3+}$  na solução do solo. Segundo Kochian et al. (2015) em solos onde o pH (pH  $H_2O$ ) é inferior a 5,6 a acidez pode estar associada ao  $Al^{3+}$  devido ao aumento de sua solubilidade. Entretanto, cerca de 25% das amostras de solo LV e NV, 50% das amostras de RQ e todas as amostras dos solos RL e RR apresentaram valores de pH superiores a 6,0. Condição favorável à fertilidade do solo, e retenção de possíveis contaminantes, devido ao incremento de cargas negativas geradas nas superfícies dos argilominerais e da matéria orgânica (COSTA et al., 2019).

Os valores de  $\Delta pH$  mostraram que na B.H.I predominam solos eletronegativos, adsorvendo maior quantidade de cátions que de ânions nos coloides, característica importante na retenção de metais pesados e macro e micronutrientes. O menor valor de  $\Delta pH$  foi encontrado no solo RL, indicando possível contribuição da matéria orgânica na geração de cargas negativas (Coringa; Weber, 2008), uma vez que esse solo obteve o maior teor de carbono orgânico comparado aos demais solos analisados. Esse efeito indica que a preservação e o aumento dos estoques de carbono orgânico são fundamentais para geração de cargas elétricas negativas no solo, e por consequência pode aumentar a CTC do solo e reduzir a atividade tóxica do  $Al^{3+}$  (BALDOTTO; VELLOSO, 2014).

De maneira geral os solos FT, PV, RQ e SX são menos eletronegativos que as demais classes analisadas (Figura 12), o que pode ser justificado pelos altos teores de areias quartzozas desses solos, pobres em cargas, onde a matéria orgânica do solo é a principal fonte de cargas negativas do solo.

A predominância de cargas negativas no solo é um importante parâmetro de fertilidade e excelente indicador ambiental e da qualidade do solo. De maneira geral, os solos mais eletronegativos deste estudo tiveram maior CTC e menor acidez. Isso indica que as fontes de cargas desses solos em grande parte são variáveis e dependentes de pH. Fontes et al. (2001) explicam que a MOS possui carga variável negativa e tem sua origem na dissociação de hidroxilas de grupamentos carboxílicos, fenólicos, enólicos etc. Por outro lado, Vilela (2017) salienta que cargas negativas das argilas aluminosilicatadas surgem a partir da substituição de átomos de silício (tetraivalentes) por átomos de alumínio (trivalentes) nas células unitárias. Esta substituição resulta em uma carga negativa proveniente de um átomo de silício já presente na estrutura.

FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE  $\Delta$ PH NOS SOLOS DA B.H.I

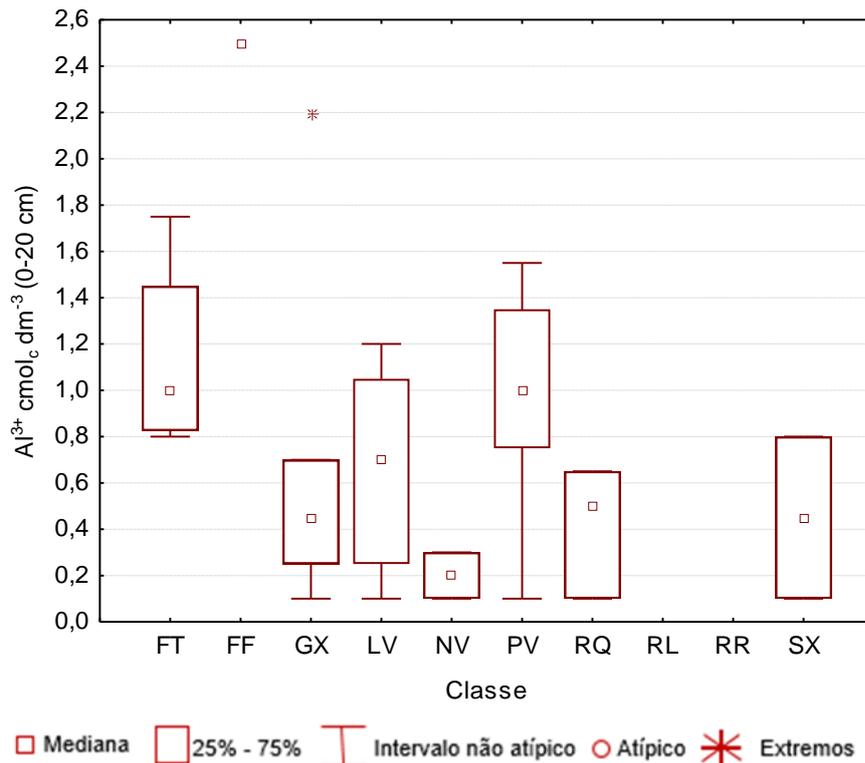


FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

Em média os maiores teores de  $Al^{3+}$  foram encontrados nos solos FF e FT, com 2,50 e 1,13  $cmol_c\ dm^{-3}$ , respectivamente. Para interpretação dos valores de  $Al^{3+}$  deve-se calcular a saturação por  $Al^{3+}$  (m%), visto que, valor alto de teor de alumínio em solo arenoso pode ser desprezível em argiloso, ou seja, a toxicidade do  $Al^{3+}$  depende dos valores da CTC, os quais variam de um solo para outro. Assim, conforme as classes de saturação por alumínio (m%) adotado por Sousa e Lobato (2004), têm-se saturação muito alta para os solos FF e FT, alta para os solos PV, RQ e SX, e baixa para os solos GX, NV, LV, RL e RR.

Nas amostras de solo RL e RR não foram encontrados o  $Al^{3+}$  (Figura 13). Essa condição é justificada pela alta saturação por bases encontrada nesses solos, e por consequência disso baixa acidez. À medida que se eleva o pH da solução do solo, as moléculas de água da esfera de hidratação perdem  $H^+$  (hidrólise do Al) até o ponto de equilíbrio que ocorre em torno de pH 5,0, em que a atividade das formas de Al na solução [ $Al^{3+}$ ,  $AlOH^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ] se equivalem (CAMPOS et al., 2014).

FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE  $Al^{3+}$  NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

A única amostra de solo FF, cerca de 50% das amostras de FT e PV e 25% das amostras de LV expressaram teores de  $Al^{3+}$  maior que  $1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Consequentemente, essas amostras apresentaram baixos valores de saturação por base, CTC e elevada acidez, configurando baixa fertilidade natural.

Tais resultados são coerentes com as características de solos de ambientes tropicais. Por exemplo, solos LV e PV são solos em estágio avançado de intemperização, em condição natural apresentam geralmente acidez elevada, com predomínio de argilas 1:1 (mais intemperizado), a exemplo da caulinita e óxidos de Fe e Al (CARNEIRO, 2019). Por outro lado, a presença de Plintitas e petroplintitas (Figura 14) nas amostras de solo FT e FF são

algumas justificativas para o maior teor de  $\text{Al}^{3+}$  encontrado nessas duas classes quando comparada as demais (SANTOS et al., 2018).

FIGURA 14 - SOLOS COM PRESENÇA DE PLINTITAS E PETROPLINTITAS



FONTE: O autor (2020).

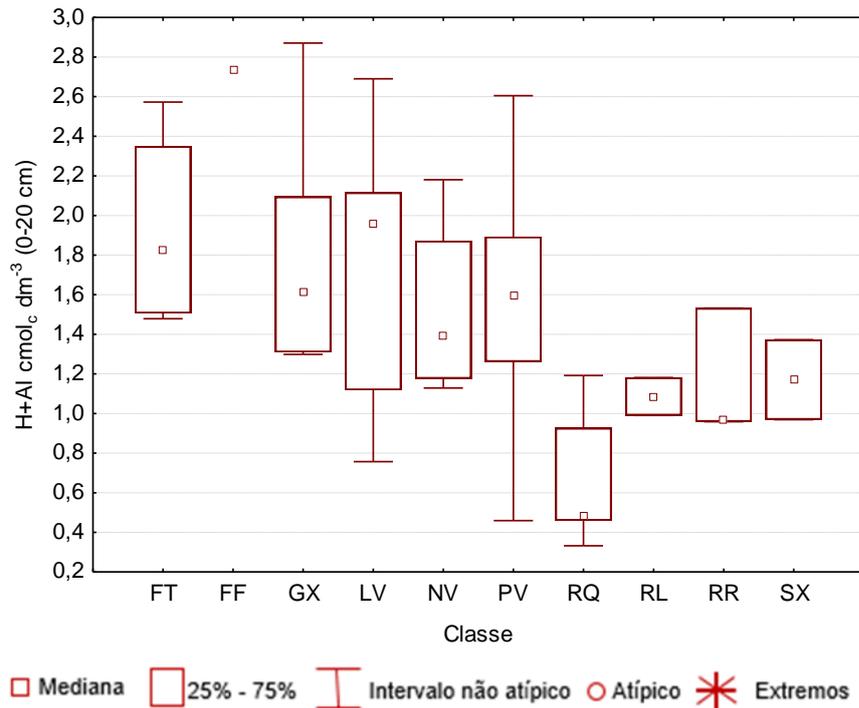
Os maiores teores de H+Al foram encontrados nos solos FF e FT, corroborando com a alta saturação por  $\text{Al}^{3+}$  desses solos. A relação existente entre H+Al e  $\text{Al}^{3+}$  decorre da decomposição de minerais de argila, no qual ocorre liberação do  $\text{Al}^{3+}$  das camadas octaédricas. O  $\text{Al}^{3+}$  assim produzido pode permanecer na superfície em forma trocável (deslocando  $\text{H}^+$  dos sítios de adsorção do solo) ou passar para a solução do solo (RONQUIM, 2010).

A acidez potencial (H + Al) distribuiu-se de maneira mais homogênea nas classes de solo, cerca de 50% das amostras de solo FT, GX, LV, NV e PV apresentaram teor de H + Al variando de 1,2 a 2,2  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (Figura 15). Teores entre 1 e 1,5  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  foram encontrados em todas as amostras de solo RL, RR e SX, o que está associado ao alto poder de tamponamento dos teores de C.O especialmente nos solos RL e RR.

Em dois pontos amostrais dos solos GX e FF os teores de H + Al foram superiores a 2,7  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , fato que pode ser justificado pela elevada acidez ativa dessas amostras, cujos valores de pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) foram 4,4 e 4,3. Reitera-se que essas amostras expressaram elevada saturação por alumínio (m%), valores de 82 e 78%, respectivamente. Em solos minerais com alta (m%), a H + Al está associada ao comportamento químico do  $\text{Al}^{3+}$  na solução do solo, (Essington, 2003; Costa et al. 2019) explicam que uma vez em solução, o  $\text{Al}^{3+}$ , coordenado por seis moléculas de água  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ , sofre hidrólise produzindo até 3  $\text{H}^+$  à medida que a molécula de água da camada primária de hidratação é decomposta.

De maneira geral os solos RQ expressaram menores teores de H + Al, o que possivelmente esteja associado aos baixos teores de argila, menor mediana de todas as classes analisadas. Os teores médios de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  também contribuíram com a manutenção do pH, mediana em torno de 6,0, condição em que o Al se encontra precipitado.

FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE H+Al NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háptico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háptico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

Os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  segundo Sousa e Lobato (2004) são considerados altos para os solos RL, RR, NV, e LV, adequados para os solos GX, PV e RQ e baixos para os solos FT, FF e SX. Exceto nos solos FT e FF os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  foram os nutrientes que mais contribuíram na constituição da CTC do solo. A manutenção do  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  no solo é função do material de origem (rocha), sendo influenciado pela sua textura, teor de matéria orgânica e pela remoção das plantas. Verifica-se que nos solos com teor alto de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  os teores de M.O também são altos, o que aponta para importância da MOS na manutenção desses nutrientes.

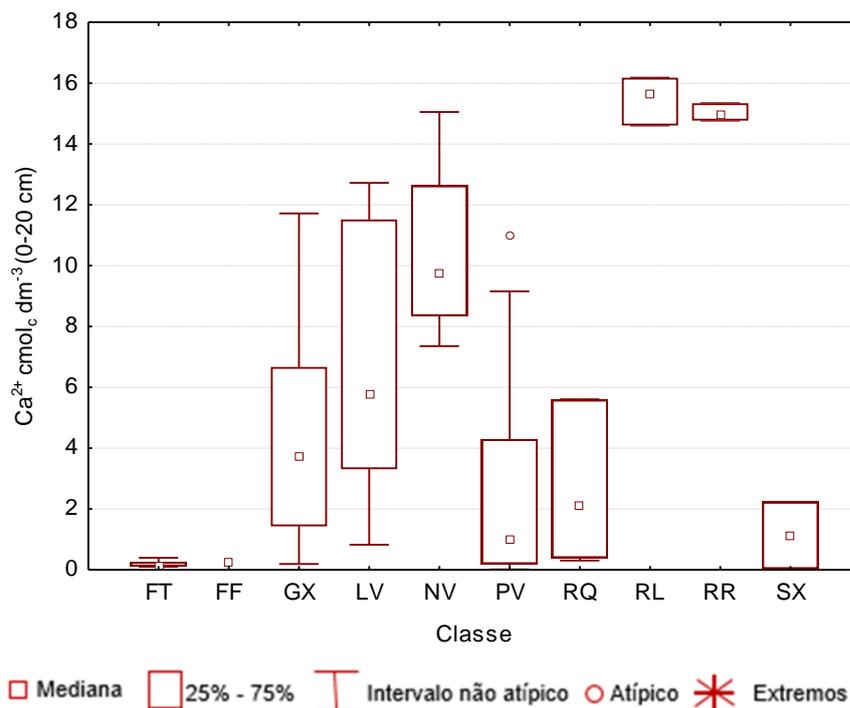
Todas as amostras das classes de solo FT e FF expressaram teores de  $\text{Ca}^{2+}$  abaixo de  $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . As duas amostras de solo SX, e cerca de 50% das amostras de PV e RQ apresentaram teor de  $\text{Ca}^{2+}$  inferior ou igual a  $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . De maneira geral as medianas dos solos de origem sedimentar derivados do arenito Caiuá são inferiores a  $4,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , enquanto nos solos de origem ígnea derivados de rochas basálticas são superiores a  $6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , chegando a  $15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nos solos RL e RR (Figura 16).

Os altos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  nos solos RL e RR estão associados a possível presença de minerais primários, uma vez que por definição são solos pouco evoluídos, com características herdadas do material originário (SANTOS et al., 2018). Com relação ao material parental,

Branco (2015) relata que minerais mais comuns nas rochas ígneas são todos do grupo dos silicatos: feldspatos, feldspatoides, quartzos, olivinas, piroxênios, anfibólios e micas. Os elementos químicos mais abundantes nelas são o silício e o oxigênio (75% do total), mas são também importantes o alumínio, ferro, cálcio, sódio, potássio, magnésio e titânio. Considerando que o material de origem imprime características mesmo em solos altamente intemperizados, os altos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  no LV e NV, além da MOS, pode estar associado ao material de origem.

Outro fator que contribui para o incremento de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo é o teor e qualidade da MOS. Nesse sentido, os solos de origem basáltica se sobressaem por apresentar fitofisionomias mais densas como: Floresta Estacional Semidecidual Submontana, Floresta Estacional Semidecidual Montana e Cerradão, devido sua maior fertilidade natural, enquanto nas classes de solo originados do arenito Caiuá predominam fitofisionomias de Cerrado sentido restrito (Cerrado Denso, Cerrado Típico, Cerrado Ralo e Cerrado Rupestre) (FERREIRA; SILVA, 2017).

FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE  $\text{Ca}^{2+}$  NOS SOLOS DA B.H.I

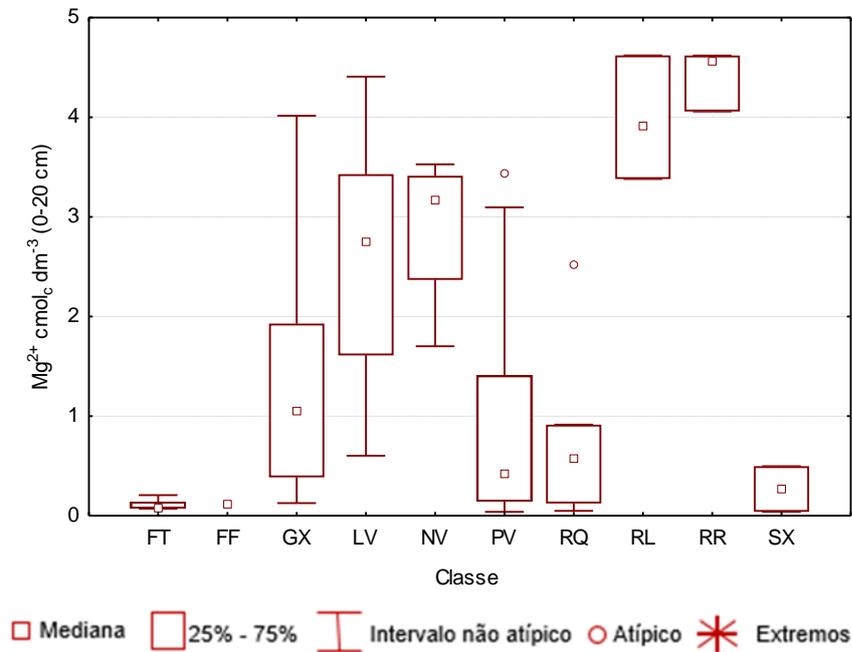


FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

A distribuição dos teores de  $\text{Mg}^{2+}$  nas classes de solo foi semelhante ao  $\text{Ca}^{2+}$ , maior nos solos de origem ígena e menor nos solos sedimentares, (Figura 17). As justificativas para

essa tendência estão associadas à origem e comportamento químico desses cátions nos minerais e MOS.

FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE  $Mg^{2+}$  NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háptico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háptico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

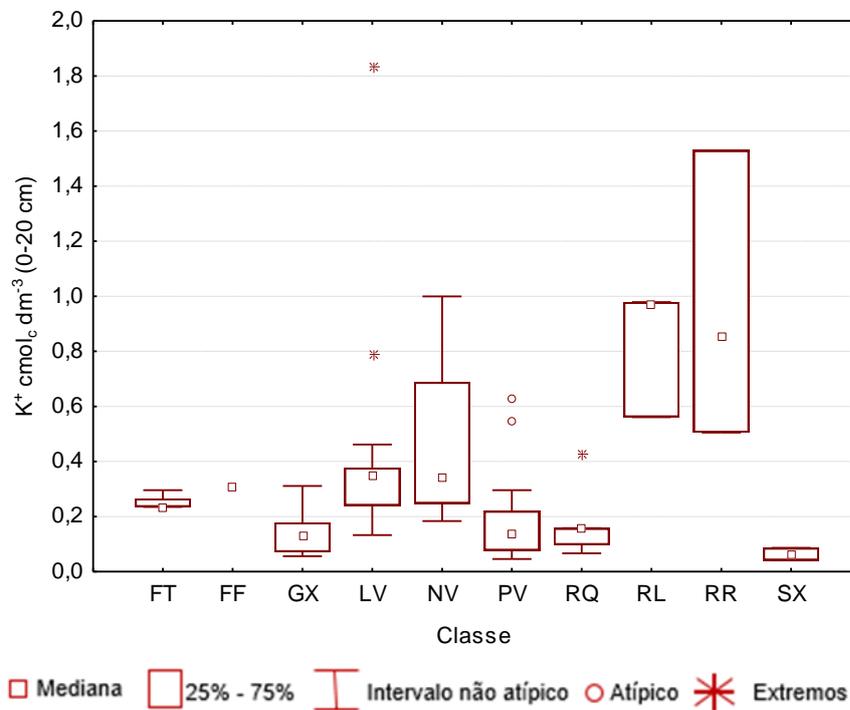
A inter-relação entre os nutrientes  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  é de fundamental importância na nutrição vegetal, devido às suas propriedades químicas próximas, como o raio iônico, valência, grau de hidratação e mobilidade, fazendo com que haja competição pelos sítios de adsorção no solo, e na absorção pelas raízes (MEDEIROS et al., 2008). Como consequência, a presença de um em excesso pode prejudicar os processos de adsorção e absorção do outro (FONSECA; HANISCH 2018).

Relações entre Ca:Mg no solo e na planta tem sido estabelecida em busca de equilíbrio e maiores produtividades. Nesse sentido, Medeiros et al. (2008) considera relações Ca:Mg entre 4:1 a 8:1 como adequadas para culturas agricultáveis. Entretanto, Silva et al. (2012) verificaram que a relação Ca:Mg de 1:1 proporcionou a maior produção de matéria seca da parte aérea da soja em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. Todavia em um sistema natural o balanceamento dos nutrientes no solo se dá por meio dos ciclos biogeoquímicos. Dessa maneira, a relação Ca:Mg nos solos sob vegetação nativa da B.H.I apresentaram a seguinte ordem: 1,8; 2,4; 3,2; 2,7; 3,6; 3; 3,3; 3,8; 3,4 e 4,2 para os solos FT; FF; GX; LV; NV; PV; RQ; RL; RR e SX, respectivamente.

Com exceção dos solos FT, FF e SX, os teores de  $K^+$  apresentaram tendência semelhante ao  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  para as demais classes de solo. É importante salientar que o  $K^+$  foi o cátion que mais contribuiu com a CTC nos solos FT e FF, contudo, quando se observa os valores da SB, verifica-se que apenas 21,5% da CTC é constituída por cátions básicos, corroborando com elevados índices de saturação por  $Al^{3+}$  (m%).

A distribuição dos teores de  $K^+$  nas classes de solo foi semelhante ao  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , com excessão dos solos FT e FF (Figura 18). É importante salientar que a relação Ca:K foi de 0,75 e 0,87, nos solos FT e FF, respectivamente. Nos demais solos analisados a sequência foi a seguinte: 32,6; 16,6; 22,6; 15,3; 15,5; 18,5; 15,6 e 18,3 para os solos GX; LV; NV; PV; RQ; RL; RR e SX, respectivamente.

FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE  $K^+$  NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

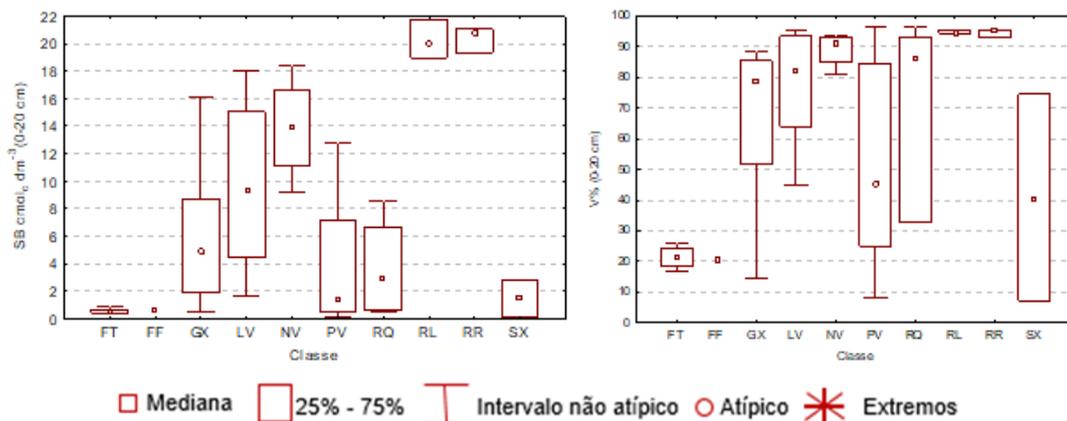
A relação Ca:K foi maior nos solos FT e FF quando comparado aos demais solos analisados, o que pode estar associado a presença de feldspatos potássicos constatados por Stradioto et al. (2008) em um estudo analisaram 88 amostras de arenitos (rochas) das formações Caiuá, Santo Anastácio, Araçatuba e Adamantina no qual encontraram porcentagem média de feldspatos de 16,2%; a maior ocorrência foi registrada na Formação Caiuá 18,3%, seguida das formações Adamantina 18,0%, Santo Anastácio 14,8% e Araçatuba

14,2%. Os autores relatam que os feldspatos mais frequentes são os potássicos e, secundariamente os plagioclásios.

Os valores médios da SB variaram de 0,53 a 20,3  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  para os solos SX e RR, respectivamente. A variação desse parâmetro influencia diretamente na constituição da CTC e V%. Desse modo, tem-se grande amplitude entre essas variáveis também. De maneira geral, a SB foi maior nos solos cujo teor de CO e argila também foram maiores (RL; RR; NV; LV). Por outro lado, as menores médias de SB encontradas nos solos FF, FT e SX, são justificadas pela acidez elevada e presença de  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  em substituição a cátions básicos ( $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{K}^+$ ) (RAMPIM; FRANDOLOSO, 2013).

A distribuição dos valores de SB nas classes de solo variou na proporção do  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ , uma vez que esse parâmetro é gerado pela soma desses cátions. O  $\text{Ca}^{2+}$  foi o cátion mais expressivo na constituição da SB em todas as classes de solo, seguido pelo  $\text{Mg}^{2+}$ , exceto nos solos FT e FF que foi o  $\text{K}^+$ . Todas as amostras de solo RL e RR apresentaram valores de SB em torno de 20  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , o que expressou índice V% acima de 90% para essas classes de solo, conferindo-lhes a condição de eutróficos,  $V\% >$  que 50% (Figura 19) (SANTOS et al., 2018). Por outro lado, os baixos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  (Sousa; Lobato, 2004), elevada acidez e saturação por alumínio (m%), em mais de 50% das amostras de solo PV e todas as amostras de FT e FF, contribuíram para condição de solos distróficos,  $V\% <$  50% (SANTOS et al., 2018).

FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE SB E V% NOS SOLOS DA B.H.I



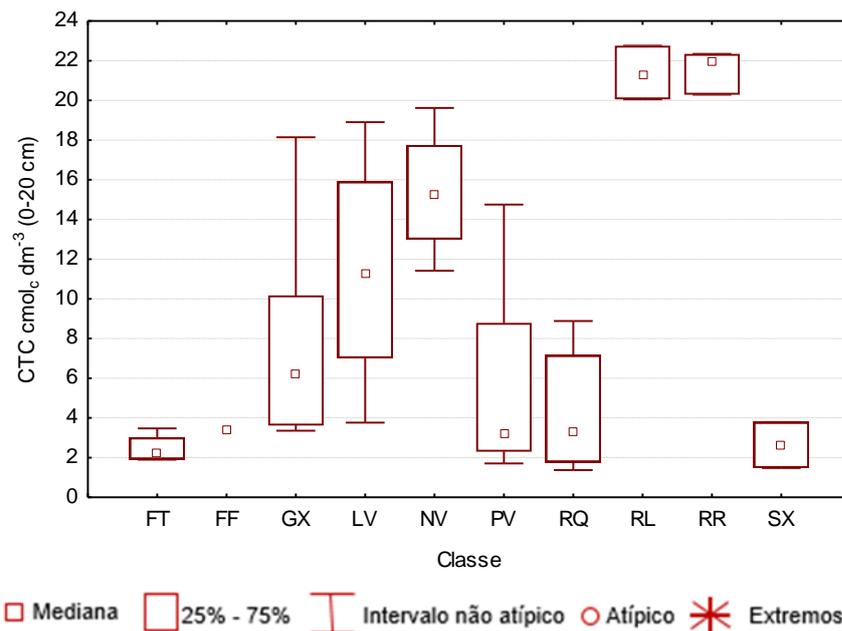
FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; SB = Soma de bases; V% = Saturação por bases; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

Conforme a classificação adotada por Sousa e Lobato (2004), a CTC média dos solos da B.H.I apresentam-se na seguinte ordem: alta para os solos RL, RR e NV; adequada para LV, GX, PV e RQ; média para FT e baixa para SX. A CTC do solo é um importante

parâmetro de fertilidade, todavia pode ser excelente indicador ambiental pela sua capacidade de reter metais pesados (KASEMODEL; RODRIGUES, 2015). Solos com alta CTC de maneira geral são vistos como indicadores ambientais positivos, enquanto aqueles com baixa, como indicadores negativos. Essa condição se deve a matriz de cargas negativas do solo, minerais de argila e especialmente a MOS.

Cerca de 75% das amostras de solo FT e 50% das amostras de PV, RQ e SX apresentaram valores de CTC  $< 3,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , condição de baixa CTC (Figura 20) (SOUSA; LOBATO, 2004). De maneira geral, as amostras com baixa CTC são explicadas pelos menores teores de MOS, pH, argila e presença de  $\text{Al}^{3+}$ . Meurer et al. (2015) explicam que dentre os fatores que afetam a CTC do solo, destacam-se o tipo e a quantidade de argilominerais, teor de MOS e pH da solução do solo. Costa et al. (2019) relatam que as características dos argilominerais que podem influenciar na magnitude da CTC são os tipos de cargas negativas (permanente ou dependente de pH) e a área superficial específica.

FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE CTC NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; CTC = Capacidade de troca catiônica; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

Quanto as cargas negativas das amostras de solo da B.H.I, observa-se que em grande parte são dependentes do pH, constatado pela amplitude dos valores de  $\Delta\text{pH}$ , especialmente no solo LV. Em relação a área superficial específica é consenso que quanto menor for o tamanho de partículas de uma dada massa, maior será a área superficial específica. Nesse sentido, pode-se afirmar que os solos de origem sedimentar expõem menor área superficial

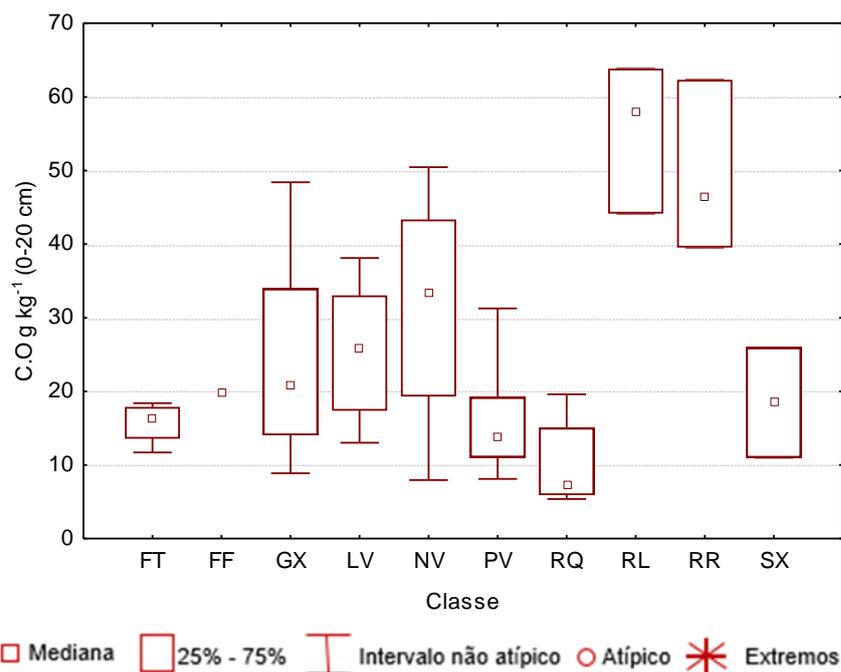
específica, devido aos maiores teores de areia, quando comparados aos solos de origem ígnea, e conseqüentemente menor capacidade de retenção de íons.

Por outro lado, todas as amostras de solo RL e RR, cerca de 75% das amostras de NV e 43% das amostras de LV apresentaram alta CTC. Condição coerente com as características desses solos, por exemplo, a possível presença de minerais primários nos solos RL e RR e os altos teores de MO são fontes de cargas negativas responsáveis por atrair quimicamente diversos cátions dentre eles  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ , resultando em maior CTC.

Quanto as fontes de cargas negativas decorrentes da MOS, os solos de origem ígnea se sobressaem em relação aos sedimentares, por apresentar teores de MO geralmente superiores, o que está associado as fitofisionomias mais densas como Floresta Estacional Semidecidual Submontana, Floresta Estacional Semidecidual Montana e Cerradão (FERREIRA; SILVA, 2017). Costa et al. (2018) encontraram maiores valores de CTC para solos sob fitofisionomias de Cerradão quando comparado aos valores obtidos em áreas sob Cerrado Sensu Stricto, corroborando com o presente estudo.

Os teores médios de CO variaram de 10,6 a 55,2  $\text{g kg}^{-1}$  para os RQ e RL, respectivamente (Figura 21). Em ordem decrescente os teores médios de CO nos solos da B.H.I apresentaram a seguinte sequência:  $\text{RL} > \text{RR} > \text{NV} > \text{LV} > \text{GX} > \text{FF} > \text{SX} > \text{FT} > \text{PV} > \text{RQ}$ . Em relação classificação adotada por Sousa e Lobato (2004), com exceção do LV que é adequado os demais solos são classificados com teores altos de CO.

FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE C.O NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR =

Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; C.O = Carbono orgânico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

Foi observada ampla variação nos teores de CO dos solos da B.H.I, o que é justificado pela diversidade da vegetação encontrada ao longo da extensa área de estudo. O teor mínimo de CO foi de  $5,3 \text{ g kg}^{-1}$ , encontrado no solo RQ, ao passo que o máximo foi de  $63,8 \text{ g kg}^{-1}$  no solo RL.

Todas as amostras de solo RL e RR apresentaram teor de C.O acima de  $40 \text{ g kg}^{-1}$ , valores considerados altos (SOUSA; LOBATO, 2004). Contudo, nenhuma amostra excedeu o limite estabelecido de  $80 \text{ g kg}^{-1}$  de C.O na fração TFSA para ser considerado como solo orgânico, portanto todos os solos amostrados são solos minerais (SANTOS et al., 2018).

Os maiores teores de C.O estão associados com a deposição abundante de material vegetal sobre o solo, camada espessa de serrapilheira, especialmente nos solos da região Centro Oeste da B.H.I que está sob fitofisionomias mais densas como: Floresta Estacional Semidecidual Submontana, Floresta Estacional Semidecidual Montana e Cerradão. Por outro lado, no extremo Oeste e de Centro para Leste da B.H.I, ocorrem fitofisionomias de Cerrado sentido restrito (Cerrado Denso, Cerrado Típico, Cerrado Ralo e Cerrado Rupestre) e solos com menores teores de CO (FERREIRA; SILVA, 2017).

Além da diversidade vegetal, a litologia e clima presente na B.H.I influencia nos teores de C.O do solo (YANG et al., 2020). Em relação à litologia, verificou-se que os solos de origem ígnea apresentaram os maiores teores de C.O comparado aos solos sedimentares, o que pode ser atribuído aos maiores teores de argila presentes nesses solos, pois favorecem a agregação e estabilização do C.O no solo.

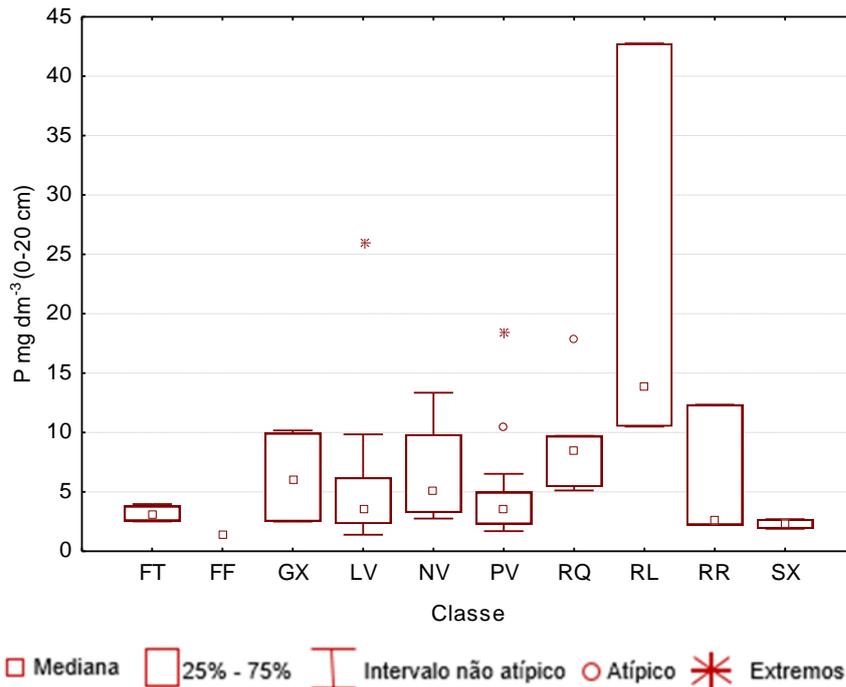
Por outro lado, em solos sedimentares quase sempre arenosos, os processos de lixiviação são mais intensos que em solos argilosos, além disso, a acidez elevada pode reduzir a atividade microbiana, e conseqüentemente afetar a decomposição da MOS (NOGUEIRA et al., 2019). Essas condições favorecem menor teor de C.O e conseqüentemente menor presença de nutrientes dependentes da MOS em sistema natural, especialmente o P.

De maneira geral houve predomínio de concentração muito baixa de P nos solos da B.H.I. Em média os menores teores de P foram encontrados nos solos FF, SX e FT, fato que pode ser justificado pelos altos teores de Fe e Al e baixos valores de pH encontrados nesses solos. A relação dessas e de outras variáveis envolvidas na fixação de P na matriz do solo é amplamente relatada em estudos que analisam a capacidade máxima de adsorção de P no solo. Nesse sentido diversos estudos demonstraram haver relação da adsorção de P na matriz do solo com o teor de argila, pH, M.O, óxido de alumínio e óxido de ferro (GUEDES et al.,

2015). Corrêa et al. (2011) relataram maior adsorção de P em solos mais ácidos, com maiores valores de alumínio trocável, acidez potencial e concentração de argila.

Todas as amostras de solo FT, FF e SX, cerca de 75% das amostras de PV apresentaram teores de P consideradas muito baixa (SOUSA; LOBATO, 2004). Ainda segundo a classificação do autor supracitado, todas as amostras de solo GX, cerca de 50% das amostras de LV e NV contêm baixos teores de P (Figura 22).

FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE P NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

Os teores de P encontradas nas amostras de solo da B.H.I são coerentes com suas características físicas, químicas e pedogenéticas. Por exemplo, os baixos teores de P nos solos LV pode ser justificado pelo seu avançado estágio de intemperização (SANTOS et al., 2018) no qual predomina altos teores de óxidos de ferro e alumínio ocasionando alta capacidade de adsorção de P (FINK et al., 2016).

De maneira geral os solos mais ácidos e com maiores valores de  $\Delta\text{pH}$  apresentaram menor teor de P, o que é coerente com o comportamento químico desse elemento, que é imobilizado por causa da precipitação como fosfato de alumínio insolúvel ou em óxidos de alumínio e minerais de argila em  $\text{pH} < 5$  (NDUWUMUREMYI, 2013). Por outro lado, maiores valores de  $\Delta\text{pH}$  significa mais cargas positivas no solo e, portanto, maior adsorção de

ânions como o fosfato, corroborando com os menores teores de P nos solos menos eletronegativos.

Com relação aos solos mais jovens RL e RR observou-se maiores teores de P, comparado aos demais, o que pode ser justificado pela possível ocorrência de P em minerais primários, na forma orgânica (Po), ou mineral (Pi), adsorvida fracamente aos minerais secundários (SANTOS et al., 2008). Por outro lado, a baixa acidez encontrada nesses solos favorece a liberação de íons de P a partir dos óxidos de Fe e Al, que é responsável pela fixação desse elemento (CARNEIRO et al., 2018).

Outra importante fonte de P para solos tropicais é o teor de MOS, que atua na manutenção desse elemento através dos ciclos biogeoquímicos. Por outro lado, a MOS tende a reduzir a adsorção de P no solo, por meio da competição pelos sítios de troca aniônica, aumentando o P disponível para solução do solo (FELIX et al., 2016). A disponibilidade de P é aumentada devido à decomposição da MOS, que forma compostos orgânicos complexos, especialmente com  $Fe^{2+}$  e  $Al^{3+}$ , evitando a formação de compostos insolúveis de P (PEREIRA et al., 2000; MOLINE; COUTINHO, 2015). Entretanto, a formação de complexos orgânicos também auxilia na manutenção de micronutrientes como Cu, Zn e Mn, devido a afinidade destes com os coloides orgânicos do solo (CORDOVIL et al., 2014; CASSOL et al., 2020).

Os teores naturais de elementos essenciais às plantas como Fe, Mn, Cu e Zn dependem da composição do material de origem, dos processos pedogenéticos e do grau de desenvolvimento dos solos (Biondi et al., 2011). Na B.H.I encontram-se solos muito evoluídos como os Latossolos e Argissolos, também solos de baixo intemperismo como os RL e RR (SANTOS et al., 2018). Assim, os teores de micronutrientes encontrados nesses solos apresentam ampla variação.

Conforme a classificação adotada por Sousa e Lobato (2004) os teores médios de Fe nos solos da B.H.I apresentam-se na seguinte ordem: alto para os solos FT, FF, GX, LV, PV, RR e SX, médio para NV e RQ e baixo para RL. Em termos de valores médios os solos GX e SX apresentaram as maiores concentrações com 1088 e 1033  $mg\ dm^{-3}$ , respectivamente. Os maiores teores de Fe nesses solos, dentre outros fatores está associado à ocorrência de reações químicas de oxirredução, favorecidas pelas condições de hidromorfismo (Figura 23), características desses solos (Biondi et al., 2011). Outra justificativa consiste no baixo valor de pH encontrado nesses solos, que aumenta a disponibilidade de Fe para solução do solo (PAYE et al., 2010).

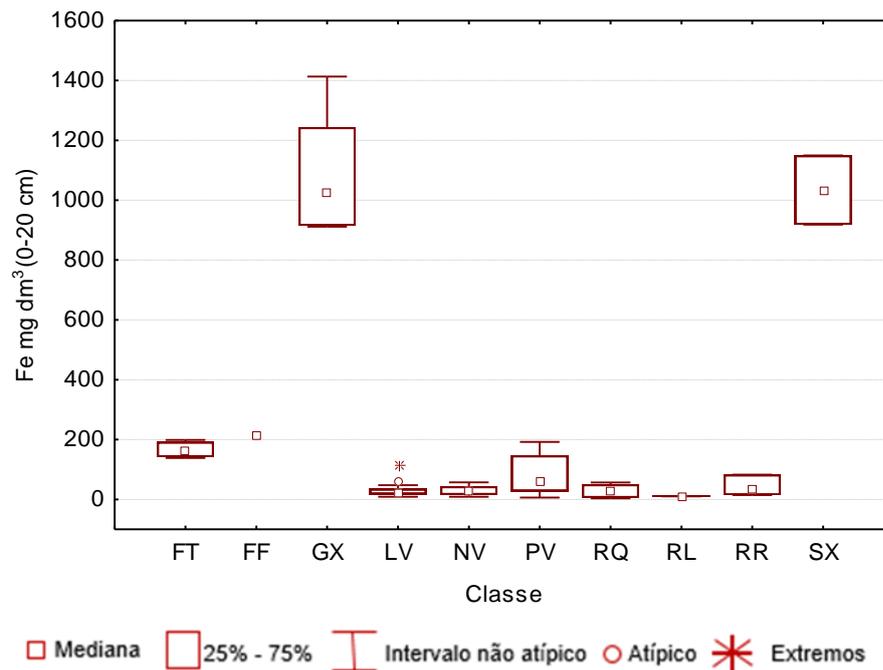
FIGURA 23 - SOLOS EM CONDIÇÃO DE HIDROMORFISMO



FONTE: O autor (2020).

O menor teor de Fe foi de  $3,4 \text{ mg dm}^{-3}$ , encontrado no solo RQ, enquanto o maior teor foi de  $1412 \text{ mg dm}^{-3}$  encontrado no solo GX (Figura 24). A amplitude observada entre os teores de Fe nas amostras de solo da B.H.I, está associada a diversidade de solos. De maneira geral, os solos sedimentares expressaram maiores teores de Fe, quando comparado aos solos de origem ígnea, o que possivelmente não esteja associado à quantidade total de Fe no solo, mas sim a forma química deste elemento, que é dependente de pH e potencial de oxirredução (Biondi et al., 2011).

FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE Fe NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háptico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háptico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

Os solos GX e SX expressaram elevados teores de Fe, comparado aos demais solos analisados, o que é coerente com a condição de hidromorfismo encontrada nesses solos. A saturação por água durante todo o ano ou pelo menos por um longo período gera processos de oxirredução (Figura 25), o que torna o Fe mais solúvel (SANTOS et al., 2018).

FIGURE 25 - SOLOS EM PROCESSO DE REDUÇÃO DE Fe



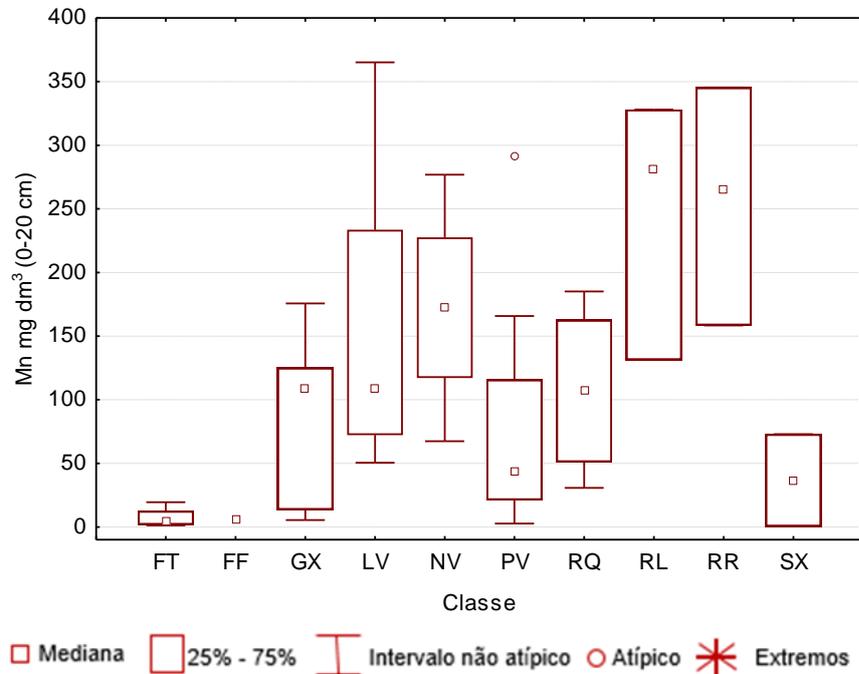
FONTE: O autor (2020).

Na classe dos solos FT e FF é provável que o efeito do baixo valor de pH (Sousa; Lobato, 2004), tenha contribuído para teores de Fe duas vezes superior aos solos de origem ígnea. Outra hipótese consiste na gênese desses solos, formados sob condições de restrição à percolação da água sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade, de maneira geral imperfeitamente ou mal drenados, e se caracterizam fundamentalmente por apresentar expressiva plintitização (Figura 14) (SANTOS et al., 2018).

Os teores médios de Mn variaram de 6,4 a 256,4 mg dm<sup>3</sup> para os FF e RR, respectivamente (Figura 26). Conforme a classificação adotada por Sousa e Lobato (2004) os teores médios de Mn são altos para todas as classes de solo. Em ordem decrescente os teores de Mn nos solos da B.H.I apresentaram a seguinte sequência: RR > RL > NV > LV > RQ > GX > PV > SX > FT > FF. Os maiores teores de Mn especialmente nos solos RR, RL, NV e LV estão associados à presença de rochas máficas na litologia da região, com presença de rochas basálticas (CPRM, 2006), ricas em minerais ferromagnesianos. Condição que

possibilita maior concentração e manutenção do Mn no sistema solo (BIONDI et al., 2011). Althaus et al. (2018); Gonçalves et al. (2013) relataram maiores teores de Mn em solos de origem basáltica quando comparado a outras litologias.

FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE Mn NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

Os teores de Mn mostraram-se altos em quase todas as amostras de solo coletadas na B.H.I. Segundo a classificação proposta por Sousa e Lobato (2004), todas as amostras de solo FF, GX, LV, NV, PV, RQ, RL, RR e 50% das amostras de FT e SX são consideradas altas. No entanto, na classe de solo FT, uma amostra foi classificada como média e outra como baixa. Houve também uma amostra de solo SX com teor de Mn considerado Baixo.

O menor teor de Mn foi de  $0,35 \text{ mg dm}^{-3}$ , encontrado em um ponto amostral do solo SX, o que é coerente com a elevada acidez ( $\text{pH CaCl}_2 = 3,85$ ) encontrada nesse solo. Em condições de solo ácido natural, o Mn geralmente possui alta disponibilidade (Millaleo et al., 2010), o que pode promover perdas significativas por lixiviação. Outros fatores como a condição visível de hidromorfismo, somada ao alto teor de areia ( $868 \text{ g kg}^{-1}$ ) e baixa CTC ( $1,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) possivelmente contribuíram para os menores teores de Mn (NACHTIGALL et al., 2009).

Em contrapartida os solos com os maiores teores de Mn em termos de mediana (RL e RR), possivelmente esteja associado a litologia basáltica mais rica em elementos metálicos que litologias sedimentares (Hugen et al., 2013), não obstante o estágio de intemperismo

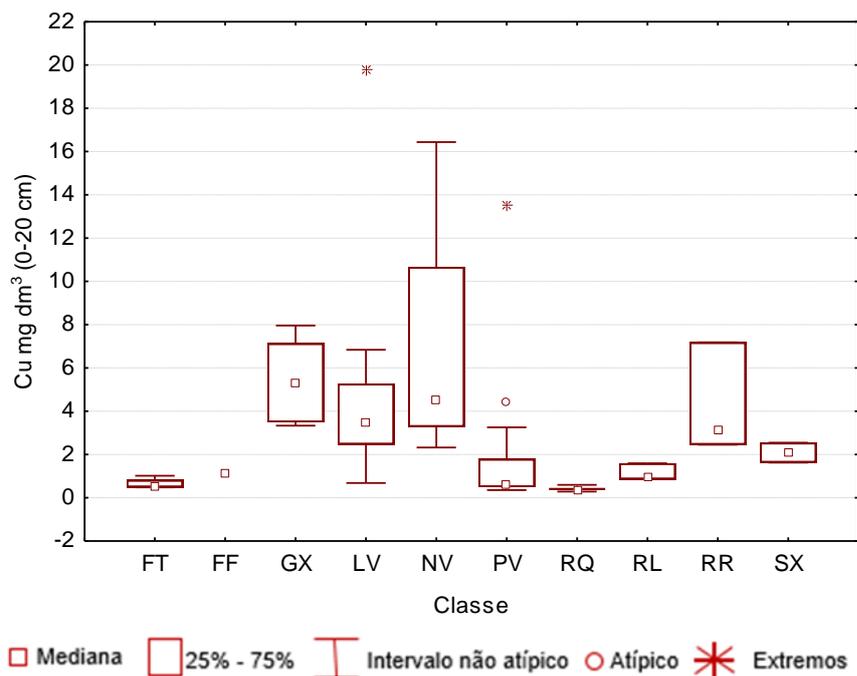
pouco avançado dos solos RL e RR pode ter contribuído para maior concentração e manutenção de Mn no sistema solo (BIONDI et al., 2011).

Com exceção dos solos FT e RQ, todos os demais apresentaram altos teores de Cu (SOUSA; LOBATO, 2004). Em média o maior teor de Cu foi encontrado no NV (6,9 mg dm<sup>3</sup>), resultado típico de solos originados de rochas básicas, especialmente as máficas, que são naturalmente mais ricas em microelementos (PAYE et al., 2010). Por outro lado, o menor teor de Cu (0,41 mg dm<sup>3</sup>) no solo RQ do presente estudo corrobora com o estudo de Huguen et al. (2013) que encontraram menores teores de Cu em litologias sedimentares comparada a basáltica.

Pesquisa realizada por Biondi et al. (2011) com 35 solos de referência do Estado de Pernambuco também encontrou maior teor de Cu em NV, e atribuiu tal resultado ao material de origem mais rico em elementos metálicos, devido a uma ocorrência geológica, de pequena extensão, com presença de basalto em sua formação.

Houve predomínio de teores altos de Cu nos solos da B.H.I (Figura 27). Todas as amostras de solo SX, RR, RL, NV, LV, FF e GX, cerca de 30% das amostras de PV, 25% das amostras de FT apresentaram teores considerados altos (SOUSA; LOBATO, 2004). Por outro lado, em torno de 60% das amostras de solo RQ e 5% das amostras de PV expressaram teores considerados baixos. Por fim, 75% das amostras de solo FT e 70% das amostras de PV apresentaram teores médios, segundo as classes adotadas pelos autores supracitados.

FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE Cu NOS SOLOS DA B.H.I



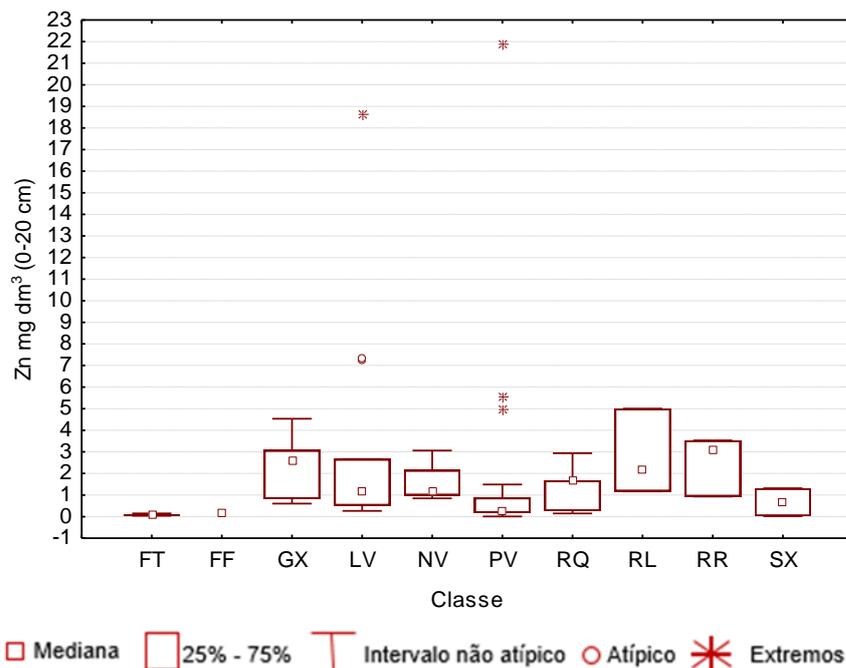
FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

Observou-se que as amostras de solo com teores de Cu classificados como médios e baixos estão associadas a litologias sedimentares e textura arenosa. Huguen et al. (2013) explicam que solos desenvolvidos sobre sedimentos arenosos apresentam menores concentrações de Cu comparado a litologias basálticas, fato justificado pela predominância da fração areia, na maioria quartzosa e, naturalmente, pobres em elementos metálicos.

Dentre os micronutrientes, o Zn é relatado como sendo um dos mais limitantes para o desenvolvimento das plantas, por expressar baixos teores nos solos naturais do Cerrado (FAQUIN, 2005; OLIVEIRA et al., 2017). No entanto, nem todos os solos sob Cerrado apresentam baixos teores de Zn. Por exemplo, na B.H.I das dez classes de solos amostradas, em média cinco apresentaram teores considerados altos GX, LV, PV, RL e RR (SOUSA E LOBATO, 2004). Por outro lado, os solos FT, FF e SX apresentaram teores extremamente baixos, com média de 0,07; 0,17 e 0,6 mg dm<sup>3</sup>, respectivamente.

Todas as amostras de solo FT e FF, cerca de 75% das amostras de PV, 50% das amostras de LV e SX, e 25% das amostras de GX, NV e RQ apresentaram teores de Zn considerados baixos (SOUSA; LOBATO, 2004). Entretanto, em torno de 50% das amostras de solo GX, LV, NV, RQ, RL e RR expressaram altos teores de Zn (Figura 28).

FIGURA 28 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE Zn NOS SOLOS DA B.H.I



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; B.H.I = Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema.

A distribuição dos teores de Zn nas classes de solo da B.H.I, mostraram tendência de valores baixos, especialmente nas amostras com menor teor de argila e C.O, fato que pode estar associado pobreza do material de origem arenoso (Hugen, et al., 2013), e a menor presença de cargas elétricas negativas responsáveis por atrair elementos metálicos como o Zn.

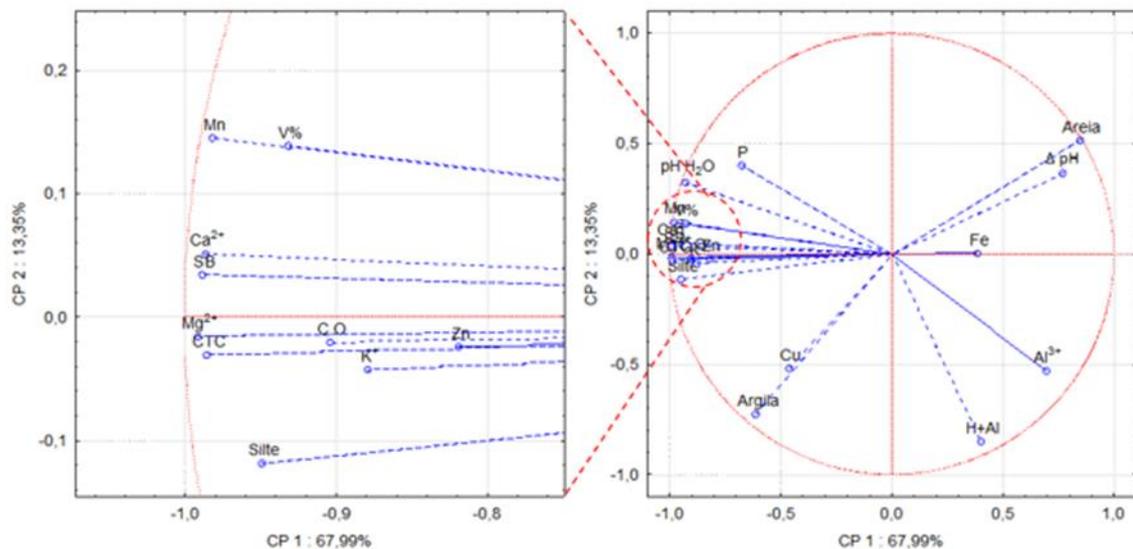
### 3.2 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

As duas primeiras componentes principais apresentaram elevados autovalores (12,91 CP1 e 2,53 CP2) os quais explicaram 81,34% da variância dos dados, sendo 57,78% a CP1 e 23,63% CP2 (Figura 29) (JOLLIFFE, 2002).

Baseado nas correlações das variáveis com as CPs foi possível evidenciar quais foram as variáveis mais significativas para cada fator. Assim, pela CP1 eixo positivo de X destacam-se as variáveis: areia,  $\Delta pH$  e  $Al^{3+}$ . Ainda pela CP1, porém eixo negativo de X destacam-se as variáveis:  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^{+}$ , CTC, SB, V%, C.O, silte, pH ( $H_2O$ ), Mn, Zn e P. Para a CP2 verificou-se altas cargas fatoriais negativas para as variáveis H+Al e argila, destacando essas variáveis como as mais explicativas da CP2 (Tabela 3).

A nuvem de variáveis sobreposta no eixo negativo de X evidencia correlações positivas fortes entre essas variáveis (Figura 29). Quanto menor forem os ângulos formados em relação ao eixo das abcissas, para vetores de comprimentos semelhantes, mais altas são as correlações entre as variáveis (HONGYU, et al., 2015). Por outro lado, vetores em sentido oposto no plano das variáveis indica relação inversa.

FIGURA 29 - DIAGRAMA DE ORDENAÇÃO OBTIDO PELA ACP MOSTRANDO A PROJEÇÃO DAS VARIÁVEIS NO PLANO DO FATOR CP1  $\times$  CP2



H+Al = Acidez potencial; CTC = Capacidade de troca catiônica; SB = Soma de Bases; V% = Saturação por bases em porcentagem; C.O = Carbono orgânico.

As variáveis  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ , CTC, SB, V%, C.O, silte, pH ( $H_2O$ ), Mn, Zn e P apresentaram contribuições similares para o eixo negativo da CP1, e são altamente correlacionadas entre si, isto foi verificado pelas variáveis que têm vetor de maior comprimento e que foram mais próximas ao eixo negativo da CP1. Essa componente pode ser denominada como sendo de alta fertilidade representada pelos solos RL e RR. Apesar da fertilidade química estes solos possuem algumas limitações físicas como pequena profundidade que impede uma boa retenção e infiltração de água, não possibilitando condições para um bom desenvolvimento radicular, consistindo em solos limitantes principalmente para culturas perenes (GONÇALVES et al., 2013).

A litologia somada a baixa acidez e altos teores de C.O favoreceram a discriminação dos solos RL e RR dos demais solos analisados. Em relação ao material de origem os altos teores de silte comparado aos demais solos analisados, evidencia baixo desenvolvimento pedogenético e possível presença de minerais primários ricos em cátions básicos conforme encontrado nesses solos (SANTOS et al., 2018). Em consequência disso, verifica-se ausência de acidez trocável e valores de pH próximo da neutralidade. O autovetor do C.O associado às bases e índices de fertilidade indica que o teor de C.O é uma importante fonte de nutrientes para esses solos. Associações entre C.O e variáveis de fertilidade do solo são amplamente relatadas na literatura (BOCARDI et al., 2018; COSTA et al., 2019; CASSOL et al., 2020).

A correlação dos micronutrientes Mn e Zn ao eixo negativo de X está associada a maior abundância de Mn e C.O, nos solos RL e RR. Associações semelhantes foram observadas em solos de mesma origem na região oeste do Paraná (CASSOL et al., 2020). Cabe ressaltar que o Zn está mais fortemente associado ao C.O, vetores com ângulos mais agudos, comparado ao Mn. Esse fato pode ser justificado pelo alto grau de seletividade das substâncias húmicas por certos metais, esse é um dos motivos pelo qual alguns micronutrientes possuem maior afinidade com o C.O em relação a outros, essa afinidade reflete também as correlações entre micronutrientes e C.O (KYZIOL et al., 2006; CAMPOS, 2010).

Por outro lado, a associação entre Mn e Zn, pode estar associada à afinidade geoquímica desses elementos no solo. Por exemplo, as características físicas dos óxidos e hidróxidos de Mn, como pequenos cristais e conseqüentemente grandes áreas superficiais, têm importantes implicações geoquímicas especialmente na retenção de outros elementos metálicos, dentre eles o Zn (MINEROPAR, 2005).

No terceiro quadrante a variável argila demonstrou correlação positiva com o Cu, vetores em mesmo sentido do plano. A associação da argila com o Cu pode ser explicada pela

forte adsorção do Cu na superfície dos coloides da fração argila, indicando que grande parte deste elemento se encontra concentrado em argilominerais e óxidos de Fe que compõem essa fração (Biondi et al., 2011).

A fração argila (e silte, em menor grau) contém os principais adsorventes minerais no solo, como os óxidos de Fe e Al, e, portanto, exerce considerável influência sobre a distribuição de elementos metálicos como o Cu no perfil do solo (KABATA-PENDIAS, 2011; ALTHAUS et al., 2018). VENDRAME et al. (2007) relataram que a disponibilidade de Cu em Latossolos do Cerrado é explicada pelos óxidos de Fe e pH. Entretanto, nas amostras de solo da B.H.I o efeito do pH foi menos evidente, que a argila. Associações entre argila e Cu já foram reportadas em outras pesquisas (CASSOL et al., 2020; ALTHAUS et al., 2018).

O quarto quadrante reteve as variáveis associadas a acidez dos solos,  $Al^{3+}$  e  $H+Al$ . Essas variáveis são correlacionadas entre si, e inversamente correlacionadas aos índices de fertilidade e pH do solo. A condição de baixo pH ( $pH_{H_2O} < 5,6$ ) encontrada em grande parte das amostras favorece o aparecimento de formas livre de Al na solução do solo (KOCHIAN et al., 2015). Uma vez na solução do solo, o  $Al^{3+}$  tem preferência no complexo de troca do solo, pela sua maior valência e menor raio iônico hidratado, ocorre ligado às cargas negativas das superfícies dos argilominerais e matéria orgânica do solo (SPARKS, 2003; COSTA et al., 2019). Conseqüentemente, o  $Al^{3+}$  tende a aumentar sua concentração relativa devido à lixiviação das outras bases, pois o ambiente onde se encontra é caracterizado por alta concentração pluviométrica.

O vetor da areia associado ao  $\Delta pH$  no primeiro quadrante (Figura 29) evidencia correlação positiva entre essas variáveis, indicando que nos solos da B.H.I as cargas negativas diminuem com o aumento do teor de areia. Baixa quantidade de cargas negativas é desfavorável para a fertilidade do solo, pois acarreta menor retenção de cátions essenciais e, portanto, menor CTC. Conseqüentemente, a capacidade de retenção de possíveis contaminantes, especialmente elementos metálicos tóxicos tende a ser baixa (COSTA, 2015). Aumentar os teores de MO é uma excelente alternativa para incrementar as cargas negativas do solo (BALDOTTO; VELLOSO, 2014).

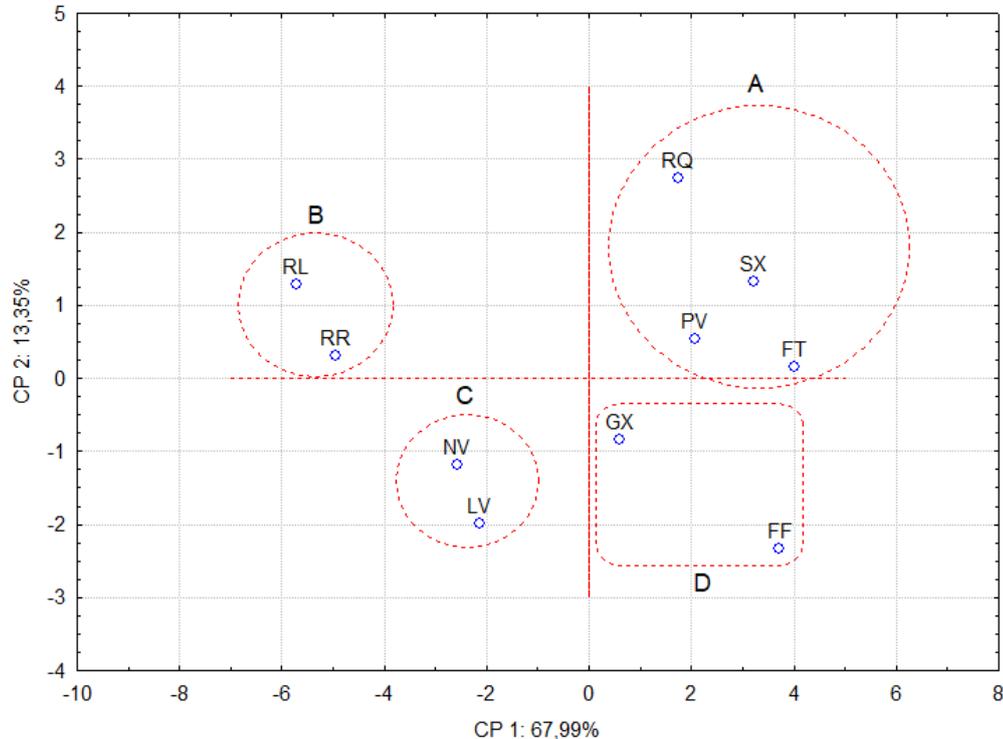
O posicionamento das classes de solo em relação à CP1 e CP2 (Figura 30) reflete a contribuição individual de cada variável para definição de cada componente. Logo, o posicionamento dos autovetores no diagrama de ordenação das variáveis (Figura 29), é responsável por associar ou discriminar as classes de solo, de modo que, áreas que ocupam uma dada posição no diagrama de ordenação das classes de solo (Figura 30) são influenciadas principalmente pelas variáveis que ocupam estas mesmas posições ou posições opostas no

diagrama de projeção das variáveis. Assim, quanto mais próxima uma classe de solo estiver de outra, maior será a semelhança de suas características (BOCARDI et al., 2018).

As dez classes de solo encontradas na B.H.I formaram quatro pequenos grupos no diagrama de projeção das classes de solo, os quais foram denominados de A, B, C e D (Figura 30). No primeiro quadrante observam-se as classes de solo RQ, SX, PV e FT. Esses solos discriminaram-se dos demais especialmente em função dos teores de areia e  $\Delta pH$ , o que é coerente com a litologia sedimentar responsável pela textura arenosa e solos menos eletronegativos.

Apesar dos ecossistemas naturais apresentarem integrações harmoniosas entre a cobertura vegetal e os atributos do solo, decorrente de processos essenciais de ciclagem de nutrientes e acumulação e decomposição da MOS (Cardoso et al., 2011), as características discriminantes dos solos do primeiro quadrante revelam que são ambientes sensíveis a degradação de sua qualidade natural e portanto devem ser preservados sempre que possível, ou manejados com práticas mecânicas e vegetativas que visem melhoria da qualidade do solo e controle da erosão (DONAGEMMA et al., 2016).

FIGURA 30 - DIAGRAMA DE PROJEÇÃO DAS CLASSES DE SOLOS EM FUNÇÃO DE SUAS VARIÁVEIS NO PLANO DO FATOR PC1 X PC2



FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; CP = Componente principal.

Os solos presentes no grupo B discriminaram-se dos demais em função de sua alta fertilidade natural evidenciada pela alta saturação por bases, C.O e silte. A proximidade entre essas duas classes de solo é coerente e pode ser justificada pela semelhança do material de origem e baixa evolução pedogenética (SANTOS et al., 2018).

No terceiro quadrante a proximidade entre as classes de solo LV e NV ocorreram em função dos teores de argila. Com isso, assume-se que o teor de argila é a principal variável responsável pela discriminação dos solos LV e NV dos demais. Essa constatação é coerente com granulometria afanítica do material de origem desses solos (CPRM, 2006). Outros fatores como o avançado estágio de intemperização dos solos LV e em menor proporção dos NV (SANTOS et al., 2018), contribuíram para a separação destes solos do grupo dos Neossolos, que também estão sobre litologia basáltica.

As variáveis  $Al^{3+}$  e  $H + Al$  foram responsáveis pela discriminação dos solos FF e GX dos demais. Entretanto, o solo GX posicionado próximo da origem sugere influência da variável Fe, pois, esse solo apresentou teor de Fe cinco vezes maior que o solo FF. Por outro lado, os teores de Fe encontrados nos solos SX são semelhantes aos encontrados nos solos GX, contudo a textura desses solos é diferente, principal justificativa para separação dessas duas classes de solo.

A aplicação da ACP mostrou-se eficaz na redução da dimensão dos dados, pois, foi capaz de reduzir as 19 variáveis a duas componentes principais e agrupar as dez classes de solos em quatro pequenos grupos com características dominantes. De maneira geral, os solos do grupo D podem ser denominados como solos de baixa fertilidade natural, contrastando com os solos do grupo B, que apresentaram alta fertilidade natural. Os solos presentes no grupo C apresentaram características desejáveis do ponto de vista da exploração agrícola, enquanto os solos do grupo A se mostraram sensíveis a degradação de sua qualidade natural, devido aos altos teores de areia e baixa quantidade de cargas negativas.

#### **4 CONCLUSÃO**

Ocorre ampla variedade de classes de solos na B.H.I. A textura dos solos estudados variou de arenosa a argilosa, sendo o material de origem e os fatores de intemperismo responsável por essa variação. Os solos FT, PV, RQ e SX são de textura arenosa, FF, GX, RL e RR de textura média, e LV e NV de textura argilosa.

Predominam solos ácidos e eletronegativos. A fertilidade natural dos solos mostrou-se mais elevada nos solos de origem ígnea comparada a sedimentar. Os parâmetros de

fertilidade do solo, expressos pelos valores de V%, SB e CTC, apontam alta fertilidade nos solos RL, RR e NV, e baixa fertilidade nos solos FT, FF e SX. Em ordem decrescente os teores de C.O apresentaram a seguinte sequência: RL > RR > NV > LV > GX > FF > SX > FT > PV > RQ.

A aplicação da ACP mostrou-se eficaz na redução da dimensão dos dados. Os solos GX e FF podem ser denominados como solos de baixa fertilidade natural, contrastando com os solos RL e RR, que apresentaram alta fertilidade natural. Os solos NV e LV apresentaram características desejáveis do ponto de vista da exploração agrícola, enquanto os solos RQ, SX, PV e FT se mostraram sensíveis à degradação de sua qualidade natural, devido aos altos teores de areia e baixa quantidade de cargas negativas.

## REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, W. A. P., MARQUES, J. J. Manual de coleta de solos para valores de referência de qualidade no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013. 15 p.
- ALENCAR, A.; SHIMBO, J. Z.; LENTI, F.; BALZANI MARQUES, C.; ZIMBRES, B.; ROSA, M.; ARRUDA, V.; CASTRO, I.; RIBEIRO, J. P. F. M.; VARELA, V.; ALENCAR, I.; PIONTEKOWSKI, V.; RIBEIRO, V.; BUSTAMANTE, M. M. C.; SANO, E. E.; BARROSO, M. Mapping Three Decades of Changes in the Brazilian Savanna Native Vegetation Using Landsat Data Processed in the Google Earth Engine Platform. **Remote Sens.**, v. 12, n. 6, p. 1-23, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12060924>
- ALOVISI, A. A.; CASSOL, C. J.; ALOVISI, A. M. T.; de SOUZA, L. C. F.; de ARRUDA, E. J.; da SILVA, R. S. Atributos de fertilidade dos solos sob vegetação nativa do bioma Cerrado. **RICIA**, v. 12, n. 7, 2021.
- ALTHAUS, D.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J.; SILVA, K. J. BISSANI, C. A.; FELISBERTO, R. Natural Fertility and Metals Contents in Soils of Rio Grande do Sul (Brazil). **Ver. Bras. Cienc. Solo**; v. 42, p. 1-15, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160418>
- ANDRADE, E. M.; AQUINO, D. N.; CRISÓSTOMO, L. A.; RODRIGUES, J. O.; LOPES, F. B. Nitrogen and chloride impacto on water table under irrigated condition. **Cienc. Rural**, v. 39, p. 88-95, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009000100014>
- ARAI, F. K. **Caracterização da disponibilidade hídrica na Bacia Hidrográfica do Ivinhema, MS**. 2010. 127 f. Dissertação (Agronomia). Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, Mato Grosso do Sul, 2010.
- BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X. Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. **Rev. Ceres**, v. 61, n. 6, p. 1012-1021, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737X201461060018>

BIONDI, C. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; FABRICIO NETA, A. B.; RIBEIRO, M. R. Teores de Fe, Mn, Zn, Ni e Co em solos de referência de Pernambuco. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v.35 n.3, p. 1057-1066, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000300039>

BOCARDI, J. M. B.; PLETSCH, A. L.; ROCHA, A. S.; QUINAIA, S. P. Parâmetros físicos e químicos em solos de Unidades de Conservação Florestal da Bacia do Paraná 3, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 1, p. 99-113, 2018. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.6.p099-113>

BRANCO, P. de M. As rochas (curso de extensão para professores do Ensino Médio). 2015. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/> Acesso em 25 de fev. de 2020.

CPRM (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS). **Geodiversidade do estado de Mato Grosso do Sul**. [São Paulo]: CPRM, 2010. 179 p. Disponível em: [file://laptopvqq408jp/Users/Public/Documento%20PCAntigo/Documents/Downloads/Geodiversidade\\_MS.pdf](file://laptopvqq408jp/Users/Public/Documento%20PCAntigo/Documents/Downloads/Geodiversidade_MS.pdf). Acessado em 18 de maio de 2020.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Mapa geológico do estado de Mato Grosso do Sul**. [Brasília]: CPRM, 2006. Escala 1:1.000.000. Disponível em: [http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/10217/2/mapa\\_ms.pdf](http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/10217/2/mapa_ms.pdf). Acessado em 18 de maio de 2020.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; CURY, N.; FERREIRA, M. M.; FRANÇA, D. A. F. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-Mato-Grossense. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, n. 2, p. 613-322, 2011.

CARNEIRO, K. de A. A. **Óxidos de Fe e Al no deslocamento vertical de P em Neossolos Regolíticos**. 2019. 171 f. Tese (Ciência do Solo). Universidade Federal da Paraíba. Areia, Paraíba, 2019.

CARNEIRO, J. S. da S.; SOUSA, S. de A.; NIKKEL, M.; DEUSDARÁ, T. T.; MACHADO, A. F.; da SILVA, R. R. Supercalagem: alterações em atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo distrófico. **Rev. Ciênc. Agroamb.**, v. 16, n. 1, p. 31-38, 2018. DOI: 10.5327/Z1677-606220181522

CAMPOS, J. R. R.; SILVA, A. C; SILVA, E. B; VIDAL-TORRADO, P. Extração e quantificação de alumínio trocável em Organossolos. **PAB**, v. 49, n. 3, p. 207-214, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000300007>

CAMPOS, M. C. C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. **Ambiência Guarapuava** v. 6 n. 3 p. 547-565, 2010. <https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/591/1154>

CASSOL, C. J.; PLETSCH, A. L.; COSTA JÚNIOR, I. L.; BOCARDI, J. M. B.; ALOVISI, A. M. T. A.; FRONZA, F. L. Natural metal levels in basaltic soils in western Paraná, Brazil. **Rev. Bras. Ciênc. Agrar.**, v. 15, n. 2, p. 1-7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i2a6992>

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

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Disponível em:  
<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>. Acessado em: 05 de nov. de 2019.

CORINGA, E. A. O.; WEBER, O. L. dos S. Ponto de efeito salino nulo de Latossolos da microbacia Chico Nunes, Mato Grosso. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 441-448, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100042>.

CORDOVIL, M. C. O.; MENDONÇA, A. G. R.; BOTERO, W. G.; SANTOS, A.; ROCHA, J. C.; MELLO, K.; TOPPA, R. H.; OLIVEIRA, L. C. Análise espacial e quimiométrica da distribuição de espécies metálicas em solos alagáveis e não alagáveis da Bacia do Médio Rio Negro, Amazônia. **Quím. Nova** v. 37 n. 5, p. 770-775, 2014. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140124>

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos **Acta Scientiarum**. Agronomia, Maringá, v. 33, n. 1, p. 153-159, 2011.  
<http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v33i1.3129>.

COSTA, H. T. D. **Concentração de metais pesados nos solos utilizados para agricultura urbana na cidade de Lisboa**. 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

COSTA, T. G. A.; IWATA, B. F.; COELHO, J. V.; ROCHA, I. L.; SANTOS, J. G. P.; LEOPOLDO, N. C. M.; ALVES, M. F.; MACIEL, A. C. R.; CLEMENTINO, G. E. S. Atributos de qualidade do solo sob fitofisionomias de cerrado sensu stricto e cerradão no Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba. **Rev. Bras. Gest. Amb. Sustent.**, v. 5, n. 10, p. 625-642, 2018. DOI: 10.21438/rbgas.051016

COSTA, J. J. F.; SILVA, E. da S.; COELHO, F. F.; TIECHER, T.; BISSANI, C. A.; FILIPPI, D. Atributos químicos relacionados à acidez e capacidade de troca de cátions de solos do Rio Grande do Sul com diferentes graus de intemperização. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 8, n. 2, p. 81-100, 2019. DOI: <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v8i2.19885>

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R.; CARMELLO, Q. A. de C.; SANTOS, L. A.; SPERANDIO, M. V. L. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. de; SANTOS, L. A. (Eds.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, 2018. 670 p.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAUJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesq Agropec Bras.**, v. 51, n. 9, p. 1003-1020. 2016.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X201600090000>.

ESSINGTON, M. E. Soil and water chemistry: an integrative approach. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2003. p. 552.

FAQUIN, V. Nutrição Mineral de Plantas. Lavras-MG: Universidade Federal de Lavras/FAEPE, 2005. 186 p.

FELIX, J. C.; VENDRAME, P. R. S.; MARCHÃO, R. L.; OLIVEIRA, J. F.; GUIMARÃES, M. F.; BROSSARD, M.; BECQUER, T.; BRITO, O. R. Predição de fósforo, carbono e nitrogênio em solos de basalto, por meio de espectroscopia NIR. **PAB**. Brasília, v. 51, n. 9, p. 1405-1416, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900039>

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. O grupo caiuá (ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 24, n. 3, p. 164-176, 1994.

FERREIRA, R. M.; LINO, E. N. da S. Expansão agrícola no cerrado: o desenvolvimento do agronegócio no estado de Goiás entre 2000 a 2019. **Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 79, p. 01-17, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG227951217>

FERREIRA, P. S.; SILVA da, C. A. Reclassificação e quantificação da cobertura vegetal nativa da bacia hidrográfica do Rio Brillhante-MS. *In* I congresso nacional de geografia física. Campinas-SP, 2017. DOI - 10.20396/sbfga.v1i2017.1828 - ISBN 978-85-85369-16-3

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62-68, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.017>

FONSECA, J. da A.; HANISCH, A. L. Cinza de biomassa é um produto eficiente para uso em sistema de produção de cereais em base agroecológica? **Rev. Ciênc. Agrovet.**, v. 17, n. 4, p. 454-461, 2018 DOI: <https://doi.org/10.5965/223811711732018454>

FONTANA, A.; TEIXEIRA, G. T.; BALIEIRO, F. de C.; de MOURA, T. P. A.; de MENEZES, A. R.; SANTANA, C. L. Características e atributos de Latossolos sob diferentes usos na região Oeste do Estado da Bahia. **PAB**, v. 51 n. 9, p. 1457-1465, 2016. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900044>

FONTES, M. P. F., CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Sci. Agric.**, v. 58, n. 3, p. 627-646, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000300029>

FORTES, E.; VOLKMER, S.; STEVAUX, J. C. Controles hidrológicos e hidrográficos dos processos erosivos do baixo curso do rio Ivinhema, MS. *In*: V Simpósio Nacional de Geomorfologia e I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia. 2004, Santa Maria-RS, **Anais...** Santa Maria/RS: 2004.

FORTES, E.; VOLKMER, S. Cascalheiras do baixo curso do rio Ivinhema, MS – Brasil. *In* IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. 2003, Recife, PE, **Anais...** Recife, PE: 2003.

FRANÇA JUNIOR, P.; PETSCH, C.; VILLA, M. E. C. D.; MANIERI, D. D. Relato de campo sobre os aspectos físicos do terceiro planalto paranaense (Maringá aos terraços do Rio Paraná). **Bol. geogr.**, v. 28, n. 2, p. 185-195, 2010 DOI: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v28i2.10599>

GASPARETTO, V. L. N. **As formações superficiais do Noroeste do Paraná e sua relação com o arenito Caiuá**. 209 f. 1999. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-09122015-111333/publico/Gasparetto\\_Doutorado.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-09122015-111333/publico/Gasparetto_Doutorado.pdf). Acesso em: 22 de abril de 2020.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná: II - relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 30, n. 2, p. 307-319, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000200011>.

GONÇALVES, M. A.; TELLES, T. S.; CAVIGLIONE, J. H.; URBANO, A.; FILHO, J. T. Diferenciação dos solos em duas topossequências sobre rochas basálticas no norte-central paranaense. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 2777-2792, 2013. DOI: 10.5433/1679-0359.2013v34n6p2777

GUEDES, R. S.; FERNANDES, A. R.; SOUZA, E. S.; SILVA, J. R. R. Maximum phosphorus adsorption capacity adjusted to isotherm models in representative soils of eastern Amazon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, n. 20, p. 2615–2627, 2015. <http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2015.1089264>

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. O. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S - Engineering and Science**, v. 5, n. 1. p. 83-90, 2015. DOI: 10.18607/ES20165053

HUGEN, C.; MIQUELLUTI, D. J.; CAMPOS, M.L.; LMEIDA, J.A.; FERREIRA, É.R.N.C.; POZZAN, M. Teores de Cu e Zn em Perfis de Solos de Diferentes Litologias em Santa Catarina. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** v. 17, n. 6, p. 622–628. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000600008>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. Rio de Janeiro: Manuais Técnicos em Geociências, 2012. 271 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Mapeamento das unidades territoriais, 2018.

IVASKO JÚNIOR, S.; MASTELLA, A. D. F.; TRES, A.; TETTO, A. F.; WENDLING, W. T.; SOARES, R. V. Classificação do estado de Mato Grosso do Sul segundo sistema de zonas de vida de Holdridge. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 26, n. 16 p. 629-645, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.61843>

JOLLIFFE, L. T. Principal component analysis. 2 ed. New York: **Springer**, 2002. 487p.

KABATA-PENDIAS A. Oligoelementos em solos e plantas. 4th ed. Boca Raton: CRC Press; 2011.

<https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1201%2Fb1018>

KASEMODEL, M. C.; RODRIGUES, V. G. S. Geological and Geotechnical Characterization of the Basal Soil Portion at a Former Mining Waste Disposal. **EJGE**, v. 20, n. 1, p. 369-384, 2015.

KYZIOL, J. TWARDOWSKA, I.; SCHMITT-KOPPLIN, P. The role of humic substances in chromium sorption onto natural organic matter (peat). **Chemosphere**, v. 63, n. 11, p. 1974-1982, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.09.042>

KOCHIAN, L.V.; PIÑEROS, M. A.; LIU J.; MAGALHAES J. V. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. **Annu. Rev. Plant Biol.**, v. 66, p. 571-598, 2015. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114822>

LASTORIA, G.; SINELLI, O; KIANG, C. H.; HUTCHEON, I.; FILHO, A. C. P.; GASTMANS, D. Hidrogeologia da formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. **Águas Subterrâneas**, v. 20, n. 1, p. 139-150, 2006.

LIMA, de P. A. **Transformações da paisagem nos municípios de Fátima do Sul, Glória de Dourados e Deodápolis: região meridional de Mato Grosso do Sul**. 2006. 173 f. Dissertação de mestrado. (Programa de pós-graduação em geografia). Instituto de geociências e ciências exatas. Rio Claro – SP, 2006.

LOPES, E. R. do N.; SOUZA de, J. C.; FILHO, J. L. A.; LOURENÇO, R. W. Caminhos e entraves do zoneamento ecológico-econômico no Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia - MG v. 20, n. 69 Março/2019 p. 342–359. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/RCG206941305>

MACHADO, F. B.; NARDY, A. J. R.; ROCHA, Jr. E. R. V.; MARQUES, L. S.; OLIVEIRA M.A.F. 2009. Geologia e litogeoquímica da Formação Serra Geral nos Estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. **Geociências**, v. 28, n. 4, p. 523-540, 2009.

MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômenos de Sorção em Solos. *In*: MEURER, E. J. Ed. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre, 2015. p. 113 - 154.

MATOS, de J. P. L. **As águas subterrâneas como fonte de água potável para o abastecimento público - estudo de caso na área urbana de Dourados, Mato Grosso do Sul**. 2017. 79 f. Monografia. (Especialização em elaboração e gerenciamento de projetos para a gestão municipal de recursos hídricos). Instituto federal de educação, ciência e tecnologia do Ceará. Fortaleza, 2017.

MEDEIROS, J. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; ROSA, J. D., GATIBONI, L. C. Relação cálcio:magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 4, p. 799-806, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2008v29n4p799>

MILLALEO, R.; REYES-DIAZ, M.; IVANOV, A.G.; MORA, M.L.; ALBERDI, M. Manganese as essential and toxic element for plants: Transport, accumulation and resistance mechanisms. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 10, n. 4, p. 470-481, 2010. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>

MINEROPAR. Minerais do Paraná S.A. (2005) Levantamento Geoquímico Multielementar do Estado do Paraná. Geoquímica de solo - Horizonte B: Relatório final de projeto - Volume 2. Curitiba. Mineropar, 408 p.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Biomas. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/biomas/cerrado.html>. Acessado em: 08 de outubro de 2021.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Balço de execução: PPCDAm e PPCerrado 2016-2020**. Brasília, 2018. 107 p. Disponível em: [http://combateadodesmatamento.mma.gov.br/images/Doc\\_ComissaoExecutiva/Balanco-PPCDAm-e-PPCerrado\\_2019\\_aprovado.pdf](http://combateadodesmatamento.mma.gov.br/images/Doc_ComissaoExecutiva/Balanco-PPCDAm-e-PPCerrado_2019_aprovado.pdf)

MOLINE, E. F. da V. COUTINHO, E. L. M. Atributos químicos de solos da Amazônia Ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. *Rev. Cienc. Agrar.*, v. 58, n. 1, p. 14-20, jan./mar. 2015. **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 58, n. 1, p. 14-20, 2015. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.1683>

NACHTIGALL, G. R.; NOGUEIROL, R. C.; ALLEONI, L. R. Extração sequencial de Mn e Zn em solos em função do pH e adição de cama-de-frango. **Rev. bras. eng. agríc. Ambient.**, v. 13 n. 3, p. 240-249, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000300004>

NDUWUMUREMYI, A. Soil acidification and lime quality: sources of soil acidity, its effects on plant nutrients, efficiency of lime and liming requirements. **Journal of Agriculture and Allied Sciences**, v. 2, n. 4, p. 26-34, 2013

NOGUEIRA, A. M.; TOCANTINS, N.; SALOMÃO, F. X. de T. Degradação de áreas com processo de Arenização na Bacia do Córrego Guanabara, município de Reserva do Cabaçal – MT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 722-737, 2019. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.3.p722-737>

OLIVEIRA, F. C.; BENETT, C. G. S.; BENETT, K. S. S.; SILVA, L. M.; VIEIRA, B. C. Diferentes doses e épocas de aplicação de zinco na cultura da soja. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, Suplemento 1, p. 28-35, 2017. ISSN 2358-6303.

PAYE, H. S.; MELLO, J. W. C. V.; ABRAHÃO, W. A. P.; FERNANDES FILHO, E. I. DIAS, L. C. P.; CASTRO, M. L. O.; MELO, S. B.; FRANÇA, M. M. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo. **Rev. Bras. de Ci. do solo**, v. 34, n. 6, p. 2041-2051, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000600028>

PEREIRA, W. L. M.; VELOSO, C. A. C.; GAMA, J. R. N. Propriedades químicas de um Latossolo Amarelo cultivado com pastagens na Amazônia Oriental. **Scientia agricola**, v. 57, n. 3, p. 531-537, 2000. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162000000300025>.

PEREIRA, Z. V.; KINOSHITA, L. S. Rubiaceae Juss. do Parque Estadual das Várzeas do Rio Ivinhema, MS, Brasil. **Hoehnea**, v. 40, n. 2, p. 205-251, 2013. <https://doi.org/10.1590/S2236-89062013000200002>

Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema-PRHBHRI. Campo Grande – MS, abril de 2015. Disponível em:

<http://www.servicos.ms.gov.br/imasuldownloads/planosdebacia/PLANOIVINHEMA.pdf>.

Acessado em: 05 de nov. de 2019.

POLESSO, A. M.; SPAGNOLLO, E.; BARETTA, C. R. D. M. Levantamento da fertilidade do solo de propriedades rurais do município de Chapecó - SC: um estudo de caso. **Acta Ambiental Catarinense**, v. 18, n. 01, p. 72-86, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24021/raac.v18i1.5296>

POTT, A.; da SILVA, J. dos S. V.; GOMES, E. L. Características da Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema. **Revista GeoPantanal**, v. 9, n. 16, p. 109-124, 2014.

RAMPIM, L.; M. C. do.; FRANDOLOSO, J. F. Fósforo e enxofre disponível, alumínio trocável e fósforo remanescente em latossolo vermelho submetido ao gesso cultivado com trigo e soja. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 4, p. 1623-1638, 2013. DOI: 10.5433/1679-0359.2013v34n4p1623

RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Embrapa Monitoramento por Satélite. Campinas 2010. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 8, 26 p. ISSN 1806-3322. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31004/1/BPD-8.pdf>

ROSS, J. L. S. Land forms and environmental planning: potentialities and fragilities. **Revista do Departamento de Geografia**, Volume Especial 30 anos RDG, p. 38-51, 2012. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0112.0003>

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade ambiental dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 8, p. 63-74, 1994. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>

SAKAMOTO, A. Y.; BACANI, V. M.; OLIVEIRA, T. C. M. de; YONAMINE, S. Avaliação da vulnerabilidade ambiental do município de Ponta Porã-MS. *In: IV SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA*, 2006. **Anais...** Goiânia-GO.

SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHÜLER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818–828, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.108>

SANTOS, J. R. U.; MARCHIORO, E. Análise empírica da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, Espírito Santo, Brasil. **Revista do departamento de geografia**, v. 39, p. 72-87, 2020. <https://doi.org/10.11606/rdg.v39i0.160946>

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.; ARAUJO FILHO, J. C. de.; OLIVEIRA, J. B. de.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, F. F. dos.; RESENDE, A. V. de; FILHO, M. R. A. de; BORIN, A. L. D. C.; PASSOS, A. M. A. dos. Dinâmica da fertilidade em solos frágeis. *In: CASTRO, S. S de;*

HERNANI, L. C. **Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade**. 1ª ed. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p.161-184.

SANTOS, D. R. dos; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>

SEMAC. Mato Grosso do Sul. Região Leste. Disponível em: <https://www.imasul.ms.gov.br/>. Acessado em: 18 Mar 2019.

SILVA, J. S. V.; POTT, A.; ABDON, M. de M.; POTT, V. J.; SANTOS, K. R. dos. **Projeto GeoMS: cobertura vegetal e uso da terra do Estado de Mato Grosso do Sul**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2011a. 64 p.

SILVA, G. R.; SENA, W. de L.; MATOS, G. S. B.; FERNANDES, A. R.; GAMA, M. A. P. Crescimento e estado nutricional da soja influenciados pela relação Ca:Mg em solo do cerrado paraense. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 55, n. 1, p. 52-57, 2012  
<http://dx.doi.org/10.4322/rca.2012.038>

SNLCS. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, RJ. 1979.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (Ed.). Cerrado: correção do solo e adubação 2. ed. Brasília, DF:Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

SPARKS, D. L. Environmental soil chemistry. 2nd. **Academic Press**, 2003. 352p.

STRADIOTO, M. R; KIANG, C.H; CAETANO-CHANG, M.R. Caracterização petrográfica e aspectos diagenéticos dos arenitos do Grupo Bauru na região do sudoeste do Estado de São Paulo. **Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 4, p. 433-441, 2008.  
<https://doi.org/10.1590/S0370-44672008000400005>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (2017) - Manual de métodos de análise do solo. 3. ed. Brasília: Embrapa, 573 p.

United Nations Organization (ONU) World Population prospects 2019. Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>. Acessado em 22 de novembro de 2019.

VENDRAME, P. R. S.; BRITO, O. R.; QUANTIN, C.; BECQUER, T. Disponibilidade de cobre, ferro, manganês e zinco em solos sob pastagens na região do cerrado. **PAB**. v. 42, n. 6, p. 859-864, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600013>

VIANA, J. S.; TENÓRIO BARROS, C.; BORGES, J. P. G. da S.; SILVA, M. B. G.; GONÇALVES, E. P.; MOURA, M. F. de. Condicionantes para cultivo de soja tolerante ao déficit hídrico no Semiárido Nordeste. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. 1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.13980>

VILELA, F. J. **Desenvolvimento de um Condicionador de Solos com valor agregado a partir da biomassa de *Magonia pubescens***. 2017. Tese 105 f. (Doutorado em Tecnologias Química e Biológica). Instituto de Química da Universidade de Brasília, Brasília 2017.

YANG, S.; JANSEN, B.; ABSALAH, S.; HALL, R. L. V.; KALBITZ, K.; CAMMERAAT, E. L. H. Lithology- and climate-controlled soil aggregate-size distribution and organic carbon stability in the Peruvian Andes. **Soil**, v. 6, n. 1, p. 1–15, 2020. <https://doi.org/10.5194/soil-6-1-2020>

## **CAPÍTULO 2 – FRAÇÕES DE AREIA E SUA RELAÇÃO COM ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ELETROQUÍMICOS DE SOLOS DE REFERÊNCIA DO CERRADO BRASILEIRO**

### **RESUMO**

O fracionamento da areia em diversas classes de tamanho permite conhecer melhor as propriedades químicas, físicas e eletroquímicas dos solos. Objetivou-se com esta pesquisa fracionar o conteúdo de areia de dez classes de solo do Cerrado brasileiro e verificar a relação destas partículas com atributos físicos, químicos e eletroquímicos dos solos. Para tal coletaram-se 62 amostras de solo, em profundidade de 0 a 20 cm, em áreas de vegetação nativa pertencentes ao estado de Mato Grosso do Sul – Brasil. As amostras foram secas ao ar e determinados os seguintes atributos: densidade do solo, estoque de carbono orgânico, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, argila dispersa em água, grau de flocculação, potencial da dupla camada difusa, ponto de carga zero, densidade de partículas, argila, silte e areia. A areia foi subdividida em cinco classes (muito grossa, grossa, média, fina e muito fina). Os solos apresentaram textura variando de arenosa a argilosa, com heterogeneidade de tamanho de partículas, até mesmo dentro da mesma classe textural. As frações de areia relacionaram-se com os atributos físicos, químicos e eletroquímicos fundamentais dos solos. O predomínio de areia média e areia fina e, em menor proporção de areia muito fina, possibilita alta capacidade de ajuste das partículas. Como consequência, maior densidade do solo e microporosidade, potencial da dupla camada difusa menos negativa, menor macroporosidade e estoque de carbono orgânico.

Palavras-chave: Granulometria. Densidade do solo. Ajuste de partículas. Ponto de carga zero

### **1 INTRODUÇÃO**

Os solos apresentam diversas propriedades físicas e eletroquímicas. Em consequência, diferem na reação às práticas de gestão, na capacidade para fornecer serviços ecossistêmicos, bem como na resiliência às perturbações e vulnerabilidade à degradação (FAO, 2019). Portanto, o estudo das propriedades dos solos especialmente em sua dinâmica natural é de fundamental importância para direcionar ações de manejo e conservação ambiental.

A textura do solo é importante atributo físico, uma vez que, influi na dinâmica da água no solo, na resistência a tração, no grau de compactação, na capacidade de troca de cátions, dosagem de nutrientes, corretivos e de herbicidas (CENTENO, et al., 2017).

Entre as frações que compõe o solo a areia e a subdivisão do tamanho dessas partículas requerem uma atenção especial. O tamanho de partículas granulométricas interfere no tamanho efetivo de poros do solo, de modo que, quanto mais heterogêneo em termos de

tamanho de partículas for o solo, maior será a possibilidade de reajustes. Com isso, é possível a ocorrência de determinadas distribuições de tamanho de partículas que propiciem o adensamento do solo e minimizem seu espaço poroso (DONAGEMMA et al., 2016).

Segundo Parahyba et al. (2019), a distribuição das frações granulométricas, com maiores teores de frações areia fina e média, aumentaram as proporções de microporos, favorecendo a maior retenção de água em solos arenosos do semiárido nordestino.

De maneira geral, o tamanho de partículas granulométricas interfere nos estoques de carbono orgânico do solo (Est C), de modo que, solos com predominância de partículas granulométricas mais grosseiras (areia), tendem a armazenar menos carbono orgânico que solos com partículas granulométricas mais finas (silte e argila), em condições ambientais semelhantes. Segundo Dou et al. (2016), isto ocorre devido à maior proteção física oferecida pela argila, ocorrendo menores perdas de matéria orgânica.

Baldotto e Velloso et al. (2014) observaram que atributos eletroquímicos como o ponto de carga zero (PCZ) e potencial da dupla camada difusa ( $\Psi_0$ ) relacionam-se significativamente com a eletroquímica da matéria orgânica dos solos, indicando sua forte participação na geração de cargas negativas (capacidade de transferir elétrons). Partindo do princípio de que os solos arenosos acumulam menos carbono orgânico (Dou et al. 2016), em última instância o tamanho de partículas granulométricas interfere no potencial eletroquímico do solo pelo efeito e maior ou menor acúmulo de matéria orgânica.

Filizola et al. (2017) observaram que o fracionamento da areia em diversas classes de tamanho permite conhecer melhor os solos de textura leve e assim compreender melhor seu comportamento. De modo semelhante, Donagemma et al. (2016) relataram que a determinação pormenorizada de partículas granulométricas em solos arenosos e francoarenosos permite fazer a distinção entre e dentro de classes de solos.

O solo sob vegetação nativa encontra-se, normalmente, em melhor estado de agregação e com teor estável de matéria orgânica. Sua utilização para fins agrícolas, com a introdução das práticas de cultivo, altera as propriedades físicas e eletroquímicas. Assim, o conhecimento de valores de referência desses atributos permitirá direcionar ações de uso, manejo e conservação do solo.

Nesse contexto, objetivou-se com esta pesquisa fracionar o conteúdo de areia de dez classes de solo do Cerrado Sul Mato Grossense e verificar a relação destas partículas com atributos físicos, químicos e eletroquímicos dos solos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

Todas as informações referentes a caracterização da área de estudo podem ser consultadas no capítulo 1, item 2.1 Área de estudo; item 2.1.1 Geologia; item 2.1.2 Geomorfologia; item 2.1.3 Pedologia; item 2.1.4 Declividade; item 2.1.5 Hipsometria; item 2.1.6 Clima; item 2.1.7 Cobertura Vegetal; item 2.2 Amostragem; item 2.3 Análises químicas e granulométricas (pH em água, pH KCl, carbono orgânico, areia, silte e argila).

### 2.2 ANÁLISES FÍSICAS E CÁLCULOS ESTIMATIVOS PARA VARIÁVEIS ELETROQUÍMICAS

Após a determinação da granulometria, conforme apresentado no item 2.3 do capítulo I, procedeu-se com o fracionamento da areia total (A.T). A fração A.T retida em peneira de malha 0,053 mm foi secada em estufa a  $\pm 105$  °C e passada manualmente em peneiras com as seguintes malhas: areia muito grossa (A.M.G) (<2,0 - 1,0 mm), areia grossa (A.G) (<1,0 - 0,5 mm), areia média (A.M) (<0,5 - 0,25 mm), areia fina (A.F) (<0,25 - 0,10 mm) e areia muito fina (A.M.F) (<0,10 - 0,05 mm) (SOIL SCIENCE DIVISION STAFF, 2017).

Todas as determinações físicas seguiram o disposto no manual de métodos de análise de solo da Embrapa (Claessen, 1997; Teixeira et al., 2017), sendo a densidade do solo ( $D_s$ ) (método do cilindro volumétrico), porosidade total ( $P_t$ ) (saturação com água da amostra de solo de volume total conhecido), microporosidade ( $M_i$ ) (método da mesa de tensão), macroporosidade ( $M_a$ ) (diferença entre  $P_t$  e  $M_i$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ) (método do balão volumétrico), grau de flocculação em porcentagem ( $G.F\%$ ) =  $100 \cdot (\text{argila total} - \text{argila dispersa em água})/\text{argila total}$ .

O estoque de carbono orgânico (Est. C.O) foi calculado pela expressão: Est. C =  $(C.O \cdot D_s \cdot \text{profundidade da camada})/10$  (ELLERT; BETTANY, 1995). Para estimar o ponto de carga zero (PCZ) utilizou-se a seguinte expressão:  $PCZ = 2 \cdot (\text{pH KCl} - \text{pH H}_2\text{O})$ , em que os valores de pH KCl e de pH H<sub>2</sub>O provém da determinação do pH em KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e em água, ambos na relação solo: extrator igual a 1: 2,5. De posse do PCZ foi possível calcular o potencial da dupla camada elétrica ( $\Psi_o$ , mV) pela equação simplificada de Nernst:  $\Psi_o = 0,059 (PCZ - \text{pH H}_2\text{O})$  descrita por Uehara e Gillman (1980).

### 2.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados obtidos foram tratados por meio de medida de posição (média aritmética) e medida de dispersão (desvio padrão). Técnicas estatísticas multivariadas como a análise de componentes principais (ACP), ajudam a interpretar semelhanças ou dissimilaridades do conjunto de dados sem que haja perda significativa da informação. Para tal padronizou-se a matriz de dados (média do conjunto de dados transformados igual a 0 e desvio padrão igual a 1), e procedeu-se a análise com os seguintes critérios: 1) valores próprios maiores que um; 2) a variância acumulada é de pelo menos 70%; 3) cada fator explique pelo menos 5% da variância (JOLLIFFE, 2002).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os solos da B.H.I apresentaram heterogeneidade de tamanho de partículas granulométricas. O fracionamento de areia mostrou predominância da subfração A.F para os solos: GX, LV, NV, PV, RL e SX. Para os demais solos (FT, FF, RQ e RR), a subfração A.M obteve maior proporção da A.T (Tabela 1).

Considerando as cinco subfrações em que a A.T foi subdividida é possível perceber que as subfrações A.M, A.F e A.M.F somam mais de 90% da A.T dos solos FT, GX, LV, NV, PV, RQ e SX, logo, a contribuição das frações A.M.G e A.G pode ser considerada baixa nesses solos. Por outro lado, nos solos FF, RL e RR as subfrações A.M.G e A.G contribuíram com cerca de 25% da A.T.

Uma maneira simples de verificar se há predominância pronunciada de uma fração em relação a outra é calcular a relação (AG/AF e AT/AF), nos casos em que a relação é próxima de 1,00 infere-se que não há predominância pronunciada de uma fração em relação a outra, mas quando a relação se distancia de 1,00 há predominância pronunciada de uma das frações (DONAGEMMA et al., 2016). Assim, as relações (AG/AF e AT/AF) podem ser um indicador do comportamento de ajuste de partículas e, também, da retenção de água no solo. Diante dessas observações, pode-se considerar que os solos da B.H.I possuem alta capacidade de ajustes de suas partículas granulométricas, visto que, apresentaram relações AG/AF variando de 0,03 a 0,49 e relação AF/AT variando de 2,17 a 3,80.

TABELA 1 - VALORES MÉDIOS E DESVIOS PADRÃO DAS VARIÁVEIS FÍSICAS E ELETROQUÍMICAS PARA OS SOLOS ESTUDADOS

Solo	FT (n = 4)	FF (n = 1)	GX (n = 6)	LV (n = 13)	NV (n = 4)	PV (n = 21)	RQ (n = 5)	RL (n = 3)	RR (n = 3)	SX (n = 2)
Variáveis	0-20 cm									
A.M.G (g kg <sup>-1</sup> )	13,6 ± 7	85,9	0	0	0	0	6,64 ± 1	35,7 ± 4	42,2 ± 11	0
A.G (g kg <sup>-1</sup> )	24,6 ± 8	64,2	8,1 ± 0,7	17,2 ± 1,8	24 ± 1,6	12,1 ± 1,5	59,8 ± 5	38,4 ± 11	43,4 ± 12	35,3 ± 4,4
A.M (g kg <sup>-1</sup> )	390,6 ± 99	199,7	115,9 ± 56	71,8 ± 21	89,4 ± 29	257,3 ± 88	362,1 ± 42	84,4 ± 26	103,4 ± 29	262,5 ± 157
A.F (g kg <sup>-1</sup> )	266,1 ± 50	171,8	228,7 ± 95	101,8 ± 75	108,6 ± 73	365,2 ± 106	336,2 ± 80	101,4 ± 39	93,7 ± 25	340,2 ± 67
A.M.F (g kg <sup>-1</sup> )	100,7 ± 19	99,4	211,1 ± 125	65,8 ± 25	74,7 ± 20	129,5 ± 49	110,2 ± 39	82,3 ± 17	67,6 ± 10	181 ± 21
A.G/A.F	0,11 ± 0,01	0,37	0,03 ± 0,05	0,28 ± 0,05	0,31 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,19 ± 0,07	0,49 ± 0,03	0,46 ± 0,03	0,11 ± 0,03
A.T/A.F	3,02 ± 0,2	3,61	2,62 ± 0,7	3,09 ± 1	3,06 ± 0,6	2,17 ± 0,4	2,66 ± 0,3	3,80 ± 1	3,52 ± 0,5	2,46 ± 0,6
A.T (g kg <sup>-1</sup> )	795,7 ± 111	621	563,8 ± 306	256,7 ± 165	296,8 ± 119	764,3 ± 162	875 ± 73	342,4 ± 134	350,4 ± 80	819,1 ± 69
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	84,8 ± 66	113,9	179 ± 103	238,8 ± 66	227,9 ± 42	71,5 ± 48	65,4 ± 52	395,3 ± 99	331,8 ± 25	94,6 ± 31
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	119,3 ± 51	265	257,1 ± 73	504,3 ± 124	475,2 ± 82	164,2 ± 75	59,5 ± 37	262,1 ± 65	311,8 ± 40	86,2 ± 37
Ds (g cm <sup>-3</sup> )	1,38 ± 0,1	1,07	1,29 ± 0,1	1,08 ± 0,1	0,99 ± 0,1	1,34 ± 0,1	1,65 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,1 ± 0,1	1,51 ± 0,3
Est. C.O (Mg ha <sup>-1</sup> )	43,4 ± 8	42,3	59,1 ± 27	54,9 ± 22	64,7 ± 21	41,4 ± 11	34,9 ± 14	110,2 ± 21	112,3 ± 26	52,4 ± 19
Pt (m <sup>-3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,46 ± 0,04	0,56	0,5 ± 0,07	0,58 ± 0,07	0,59 ± 0,06	0,48 ± 0,05	0,43 ± 0,03	0,62 ± 0,06	0,54 ± 0,08	0,46 ± 0,08
M <sub>i</sub> (m <sup>-3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,24 ± 0,07	0,27	0,4 ± 0,06	0,3 ± 0,03	0,3 ± 0,07	0,25 ± 0,04	0,23 ± 0,03	0,3 ± 0,02	0,26 ± 0,07	0,29 ± 0,07
M <sub>a</sub> (m <sup>-3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,22 ± 0,03	0,29	0,1 ± 0,04	0,28 ± 0,07	0,29 ± 0,02	0,23 ± 0,03	0,2 ± 0,04	0,32 ± 0,04	0,28 ± 0,01	0,16 ± 0,01
ADA (g kg <sup>-1</sup> )	34,3 ± 11	25	139,5 ± 23	366 ± 144	378 ± 76	56,3 ± 38	27,2 ± 17	120,8 ± 57	62,5 ± 12	44,5 ± 23
G.F (%)	68,6 ± 12	90,5	59,1 ± 25	30,7 ± 19	20,4 ± 7	61,6 ± 20	59,9 ± 13	55,2 ± 10	79,6 ± 5	55 ± 15
Ψ <sub>o</sub> (mV)	-70,3 ± 5	-92,2	-97,4 ± 16	-117,9 ± 22	-92,8 ± 12	-80,4 ± 16	-77,2 ± 4	-122,1 ± 25	-95,3 ± 8	-73,3 ± 5
PCZ	3,29 ± 0,1	2,94	3,44 ± 0,3	3,56 ± 0,9	4,22 ± 0,4	3,7 ± 0,7	4,32 ± 1	4,41 ± 0,7	4,81 ± 0,2	3,89 ± 1
Dp (g cm <sup>-3</sup> )	2,66 ± 0,03	2,56	2,5 ± 0,1	2,54 ± 0,2	2,65 ± 0,1	2,57 ± 0,1	2,45 ± 0,2	2,41 ± 0,1	2,38 ± 0,1	2,38 ± 0,07

FF = Plintossolo Pétrico; FT = Plintossolo Argilúvico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; n = Número de amostras; A.M.G = areia muito grossa (<2,0 - 1,0 mm); A.G = areia grossa (<1,0 - 0,5 mm); A.M = areia média (<0,5 - 0,25 mm); A.F = areia fina (<0,25 - 0,10 mm); A.M.F = areia muito fina (<0,10 - 0,05 mm); A.G/A.F = areia grossa/areia fina; A.T/A.F = areia total/areia fina; A.T = areia total; Ds = Densidade do solo; Est. C.O = Estoque de carbono orgânico; Pt = Porosidade total; M<sub>a</sub> = Macroporosidade; M<sub>i</sub> = Microporosidade; ADA = Argila dispersa em água; G.F% = Grau de flocculação; Ψ<sub>o</sub> = Potencial da dupla camada elétrica (Ψ<sub>o</sub> = 0,059 (PCZ - pH H<sub>2</sub>O); PCZ = Ponto de carga zero (PCZ = 2 pH(KCl) - pH (H<sub>2</sub>O)); Dp = Densidade de partícula ± = Desvio padrão.

Na prática a heterogeneidade de tamanho de partículas implica em diferenças no comportamento físico-hídrico, químico e eletroquímico dos solos (SANTOS et al., 2018). Entretanto, essas diferenças são poucas consideradas nas práticas de manejo e uso do solo, uma vez que a análise granulométrica padrão para composição da textura do solo é estabelecida em função dos teores de AT, silte e argila.

Portanto, a adoção de critérios relacionados a uma caracterização pormenorizada de partículas granulométricas do solo, especialmente solos com textura média e arenosa, permite estabelecer relações com propriedades fundamentais ao manejo e conservação de solos. Fidalski et al. (2013), ao estudar a relação das frações de areia com a retenção de água em solos do noroeste paranaense, demonstraram que o comportamento físico-hidráulico de solos arenosos analisados varia de acordo com a granulometria da fração areia, e que, solos arenosos com partículas mais finas têm maior retenção de água do que solos arenosos com partículas mais grossas.

Nesse sentido, ao analisar a distribuição de partículas granulométricas nos solos da B.H.I é provável que solos enquadrados em uma mesma classe textural apresente diferenças no comportamento físico-hidráulico. Por exemplo, as classes de solos FF e GX foram enquadradas na classe textural média, entretanto, quando se analisa mais detalhadamente as subfrações de areia percebe-se que o solo GX apresenta teor de A.M.F duas vezes maior em relação ao solo FT e cerca de 33% a mais de A.F.

Dessa maneira, a diferenciação entre solos com base no tamanho de partículas granulométricas deveria estar mais presente nas análises de rotina, o que poderia favorecer as ações de manejo e conservação dos recursos naturais, especialmente a água usada em sistemas de irrigação, comumente presentes na B.H.I. Segundo Bybordi (1973); Donagemma et al. (2016) valores de condutividade hidráulica saturada (Ks) variam em mais de 20 vezes, na comparação entre areias grossas (12 mesh, com abertura de 1,68 mm) e areias finas (60 mesh, com abertura de 0,25 mm). Assim, mesmo nos casos de materiais constituídos exclusivamente pela fração areia, a mudança do tamanho dos grãos já implicaria alteração no seu comportamento físico-hídrico. Além disso, essa redução também aumentaria a superfície específica, e ampliaria as forças de contato e a interação sólido/líquido no solo, com reflexos na retenção de água e no fluxo de solutos.

Além do tamanho de partículas granulométricas a forma e a maneira como estas estão agrupadas podem criar arranjos que influenciam o empacotamento, compactação e armazenamento de água do solo (ABRAHÃO et al., 1998; FILIZOLA et al., 2017). Segundo Donagemma et al. (2016), quanto mais heterogêneos forem os solos em relação ao tamanho

de partículas, maior será sua suscetibilidade ao selamento superficial e à compactação. Portanto, é provável que as partículas granulométricas dos solos sedimentares da B.H.I estejam arranjadas em íntimo contato, uma vez que houve relação pronunciada de A.G/A.F e A.G/A.T, com predomínio de subfrações A.F e A.M, que em tese proporcionaria uma maior imbricação dos grãos entre si (Filizola et al., 2017), justificando maiores densidades nos solos sedimentares com textura arenosa.

Com exceção do solo FF a  $D_s$  foi em média maior nos solos de origem sedimentar quando comparada aos solos de origem ígnea. Em parte, esses resultados podem ser explicados pela textura arenosa e média, encontrada nos solos sedimentares, reflexo da ocorrência de maior empacotamento em materiais arenosos com heterogeneidade de tamanho de partículas, como constatado pelo fracionamento de areia destes solos (DONAGEMMA et al., 2016).

O menor valor de  $D_s$  encontrado para o solo FF quando comparado aos demais solos sedimentares analisados, pode ser justificado pela proporção dos teores de A.M.G e A.G que somam cerca de 25% da fração AT. É provável que a A.M.G e A.G tenha favorecido a porosidade total desse solo que mostrou valor superior aos demais solos sedimentares (FT, GX, PV, RQ e SX). De modo geral, o aumento da porosidade do solo reduz a sua densidade. Além da porosidade total a composição orgânica e mineralógica do solo são fatores determinantes na sua densidade (TEIXEIRA et al., 2017).

Por outro lado, nos solos de origem ígnea os valores médios de  $D_s$  variaram de 0,99 no solo NV a  $1,10 \text{ g cm}^{-3}$  no solo RR. Esses valores são condizentes com a textura argilosa encontrada nos solos NV e pelo alto estoque de C.O, o que contribui para redução da  $D_s$  (PARAHYBA et al., 2019). No caso dos solos RR a textura foi classificada como média, entretanto, o teor de silte foi superior ao teor de argila e os estoques de C.O foram altos, condições que favorecem a porosidade total do solo e consequente redução da  $D_s$ .

Os estoques de C.O apresentaram tendência contrária a  $D_s$ , com maiores teores encontrados nos solos de origem basáltica, quando comparado aos solos sedimentares. Esse resultado se deve a melhor condição de fertilidade natural encontrada nos solos basálticos, que possibilita o estabelecimento de vegetação mais densa e maiores taxas de deposição de resíduos vegetais no solo, contribuindo com uma camada espessa de serrapilheira.

Após a deposição dos resíduos vegetais no solo iniciam-se outros processos importantes de fragmentação e decomposição do material vegetal, os quais são dependentes da biota presente no sistema e fatores físicos como a litologia e clima (YANG et al., 2020). A decomposição da serrapilheira acumulada sobre o solo constitui importante reservatório de

nutrientes no sistema solo-planta. Em relação a litologia, verificou-se que os solos de origem basáltica por apresentarem maiores teores de argila (LV e NV), e silte (RL e RR), favorecem a agregação que protegem da mineralização e promove aumento nos estoques de C.O.

Por outro lado, nos solos sedimentares amostrados na B.H.I a deposição de resíduos vegetais é menor em função da baixa fertilidade natural do solo se comparada aos solos basálticos, o que possibilita formações florestais mais abertas como Cerrado sentido restrito e menor aporte de restos vegetais. A prevalência da fração areia na composição textural desses solos favorece maior intensidade de lixiviação de carbono orgânico dissolvido e partículas de tamanho reduzido, acarretando menores estoques de C.O, justificando os menores valores encontrados para esses solos.

Com relação a Pt observa-se tendência de valores no sentido dos estoques de C.O e tendência de valores contrária a Ds. Em outras palavras, a Pt foi maior nos solos basálticos quando comparada aos solos sedimentares, exceção para o solo FF. Esses resultados são coerentes com o tamanho de partículas granulométricas e estoque de C.O encontrado nos solos da B.H.I. De maneira geral, a Pt é determinada pela forma como se arranjam as partículas do solo (FILIZOLA et al., 2017). Logo, uma determinação de partículas granulométrica pormenorizada como foi realizada neste estudo tende a fornecer melhor compreensão da Pt do solo.

Seguindo o raciocínio do parágrafo anterior é possível observar com mais clareza o efeito do tamanho de partículas granulométricas na porosidade dos solos da B.H.I. Por exemplo, a macroporosidade é superior a microporosidade nos solos FF, RL e RR. Esse resultado parece ter sido favorecido pela maior proporção das subfrações A.M.G e A.G, que juntas somam cerca de 25% da fração A.T desses solos. Por outro lado, nos demais solos analisados (FT, GX, LV, NV, PV, RQ e SX), às subfrações A.M, A.F e A.M.F somam mais de 90% da fração A.T, possível explicação para preponderância de microporosidade nesses solos.

Para Parahyba et al. (2019), a preponderância de subfrações como A.M e A.F contribui com maiores proporções de microporos, os quais influenciam na retenção e disponibilidade de água para as plantas. Donagemma et al. (2016) explicam que em materiais arenosos homogêneos, com estreita distribuição de tamanho de partículas, o tamanho dos poros depende do tamanho das partículas, de modo que a redução destas leva à redução do tamanho de poros e ao incremento das forças de retenção de água.

Parahyba et al. (2019) relataram que o armazenamento de água em solos arenosos pode ser favorecido pela diversidade de partículas granulométricas da fração areia devido ao

melhor arranjo das partículas, resultando em diâmetro menor na rede capilar, contribuindo na retenção de pequenos filmes de água aderidos à superfície das partículas do solo.

Por outro lado, uma infiltração de água mais lenta no perfil do solo tende a aumentar o escoamento superficial em períodos de alta pluviosidade, podendo provocar perdas de solo por erosão, especialmente em solos com maior desprendimento de partículas em água e baixo grau de floculação. Para reduzir os impactos negativos como perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes é indispensável manter a cobertura do solo quando este estiver sob algum sistema de produção.

Os manejos do solo favoráveis ao controle da erosão são aqueles que melhoram a capacidade de infiltração da água, reduzem a desestruturação de agregados e diminuem o impacto das gotas da chuva sobre o solo. A atividade agrícola sem as técnicas adequadas ao tipo de solo, clima e relevo eleva o desgaste da camada superficial do solo ocasionada pela erosão hídrica.

Para a ADA o menor teor médio foi encontrado no solo FF, com valor médio de 25 g kg<sup>-1</sup>, esse valor corresponde a 7,5% da argila dispersa em NaOH. Consequentemente, esse solo obteve elevado GF, valor médio de 90,5%. Dentre as justificativas possíveis para este resultado atribui-se a alta H+Al encontrada nesse solo (Sousa e Lobato, 2004), que possui elevado poder de floculação, resultando em menor dispersão de argila (NUNES et al., 2010; GUIMARÃES et al., 2014).

É importante ressaltar que os solos FF são ricos em ferro, ou ferro e alumínio, com quartzo e outros materiais, frequentemente ácidos e com baixa reserva de nutrientes (SANTOS et al., 2018). Essas características possivelmente favoreceram maior GF e consequentemente menor dispersão de argila em água, visto que os óxidos de alumínio e óxidos de ferro são importantes agregantes do solo (VILARINHO et al., 2013; AZEVEDO et al., 2016).

Por outro lado, os maiores teores de ADA foram encontrados nos solos NV e LV, com valores médios de 378 e 366 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Os teores de ADA encontrados para os solos NV e LV representam 63 e 58% da argila dispersa em NaOH, respectivamente, logo, o GF% será baixo nesses solos devido a relação inversa que há entre ADA e GF%.

Os valores médios encontrados para o GF% nos solos NV e LV foram de 20,4 e 30,7%, respectivamente. Esses valores podem ser considerados baixos se comparado aos demais solos analisados, o que pode ser justificado em parte pela textura argilosa desses solos e seus potenciais eletronegativos que devido a prevalência de cargas negativas favorece a repulsão de partículas do solo.

Por outro lado, solos como os RL apresentaram valores de  $\Psi_o$  semelhante ao solo LV, contudo, o GF% foi superior em quase duas vezes. Nesse caso, dentre outros fatores atribui-se aos elevados estoques de C.O e cátions divalentes como o  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  que foram cerca de duas vezes maiores no solo RL ( $\text{Ca}^{2+} = 15,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ;  $\text{Mg}^{2+} = 3,96 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em comparação com o solo LV ( $\text{Ca}^{2+} = 7,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ;  $\text{Mg}^{2+} = 2,56 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). Segundo Abbaslou et al. (2020), íons de maior valência diminui a espessura da dupla camada elétrica levando a um aumento nas forças de atração entre partículas, o que possivelmente contribuiu para o maior GF% no solo RL se comparado ao solo LV.

Os valores médios calculados para a  $\Psi_o$  variaram de -70,3 no solo FT a -122,1 mV no solo RL. A magnitude da carga de superfície do solo é função da diferença entre o pH do solo e o PCZ: se o pH do solo for superior ao PCZ, o solo estará carregado negativamente, apresentando, então, capacidade de troca catiônica (CTC). Se o pH for menor que o PCZ, o solo terá carga positiva e apresentará capacidade de troca aniônica (CTA) (TEIXEIRA et al., 2017).

Com base no critério apresentado no parágrafo anterior todos os solos amostrados na B.H.I estão carregados negativamente, entretanto, em magnitudes distintas, os solos arenosos apresentaram maior tendência ao carácter eletropositivo se comparado aos solos com textura média e argilosa, isso pode ser verificado pela diferença entre o PCZ e o pH em água, de maneira que, quanto mais o pH em água se aproxima do PCZ menor é o valor de  $\Psi_o$  e maior é a tendência de o solo atingir a nulidade de cargas.

Portanto, a diferença entre PCZ e pH em água se constitui importante variável para o manejo e conservação do solo, visto que, apresenta relação direta com as cargas líquidas do solo. Para a fertilidade, aumentar as cargas negativas do solo é importante, pois implica em maior retenção de cátions essenciais as plantas. Por outro lado, solos com predominância de cargas negativas são vistos como bons indicadores ambientais, entretanto, o aumento de cargas negativas pode aumentar a dispersão de argila em água com conseqüente redução do grau de floculação e possíveis problemas de erosão, quando não adotadas práticas de cobertura de solo.

Os valores médios determinados para a Dp variaram de 2,38 nos solos RR e SX a 2,66  $\text{g cm}^{-3}$  no solo FT. De maneira geral, a Dp tende a diminuir com o aumento de matéria orgânica em solos semelhantes, por outro lado, se observa o contrário com o aumento nos teores de argila (SCHJØNNING et al., 2017). Essa afirmação corrobora com os resultados encontrados nos solos basálticos do presente estudo, por exemplo, os solos RL e RR apresentaram estoques de C.O cerca de duas vezes superior aos solos LV e NV, essa seria

uma possível justificativa para os menores valores de  $D_p$  nos solos RL e RR. Por outro lado, atribui-se aos teores de argila a maior  $D_p$  dos solos LV e NV quando comparado aos solos RL e RR, visto que pertencem a mesma litologia (CPRM, 2006).

Para os solos sedimentares (FT, FF, GX, PV, RQ e SX), os valores médios de  $D_p$  estiveram próximos de  $2,65 \text{ g cm}^{-3}$  que é a média geral relatada para a  $D_p$  do quartzo, constituinte básico de solos arenosos (PARAHYBA et al., 2019). Como os solos sedimentares do presente estudo estão sobre o mesmo domínio geológico a variação na  $D_p$  observada nos resultados apontam para particularidades de cada classe de solo, dentre as quais se destacam a qualidade e quantidade de argila e matéria orgânica, as quais juntas explicam mais de 90% da variação nos dados de  $D_p$  (SCHJØNNING et al. 2017).

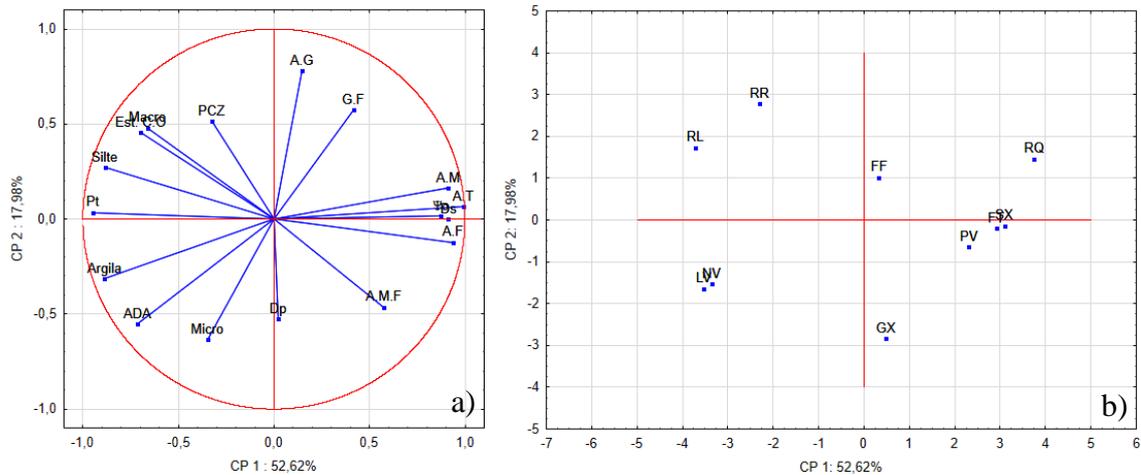
### 3.1 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Para avaliar possíveis interações entre as diferentes propriedades dos solos, de modo a associar variáveis similares e reduzir a dimensão do número de dados foi aplicada a análise de componentes principais (ACP). Os dois primeiros eixos explicaram 70,6 % da variância dos dados, sendo o primeiro 52,6 e o segundo 18% (Figura 1).

Com a aplicação da ACP foi possível visualizar quais foram as variáveis que melhor discriminaram as classes de solo. Os solos RQ, SX, FT e PV apresentaram como principais características discriminantes os teores de:  $D_s$ ,  $\Psi_o$ , A.T, A.F e A.M. De modo geral, essas variáveis apresentaram contribuições similares para o eixo positivo da CP1, e são altamente correlacionadas entre si, isto foi verificado pelas variáveis que têm vetor de maior comprimento e que foram mais próximas ao eixo positivo da CP1.

Há que se destacar que o tamanho de partículas granulométricas interferiu nos valores de  $D_s$  e  $\Psi_o$ , visto a correlação positiva mostrada no círculo de autovetores. Cabe ressaltar que as subfrações A.F e A.M contribuíram em maior magnitude para a  $D_s$  de solos arenosos na B.H.I. Essas informações têm importantes implicações para o manejo e conservação do solo, uma vez que a retenção de água no solo, adsorção e/ou lixiviação de elementos químicos estão intimamente ligados ao tamanho de partículas do solo.

FIGURA 1 - (a) = DIAGRAMA DE ORDENAÇÃO OBTIDO PELA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS MOSTRANDO A PROJEÇÃO DAS VARIÁVEIS NO PLANO DO FATOR CP1 × CP2. (b) = DIAGRAMA DE PROJEÇÃO DAS CLASSES DE SOLOS EM FUNÇÃO DE SUAS VARIÁVEIS NO PLANO DO FATOR CP1 X CP2



A.M.G = areia muito grossa; A.G = areia grossa; A.M = areia média; A.F = areia fina; A.M.F = areia muito fina; A.G/A.F = areia grossa/areia fina; A.T/A.F = areia total/areia fina; A.T = areia total; Ds = Densidade do solo; Est. C.O = Estoque de carbono orgânico; Pt = Porosidade total; Macro = Macroporosidade; Micro = Microporosidade; ADA = Argila dispersa em água; G.F% = Grau de floculação;  $\Psi_0$  = Potencial da dupla camada elétrica ( $\Psi_0 = 0,059 (PCZ - pH H_2O)$ ); PCZ = Ponto de carga zero ( $PCZ = 2 \text{ pH}(KCl) - \text{pH}(H_2O)$ ); Dp = Densidade de partícula; FT = Plintossolo Argilúvico; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; PV = Argissolo Vermelho; RQ = Neossolo Quartzarênico; RL = Neossolo Litólico; RR = Neossolo Regolítico; SX = Planossolo Háplico; CP = componente principal.

De modo geral, solos com heterogeneidade de tamanho de partículas, condição observada para os solos de referência da B.H.I, tendem a apresentar “arranjos” mais compactos, o que em tese reduziria o espaço poroso do solo com reflexos na infiltração e armazenamento de água no solo. Estudo realizado por Parahyba et al. (2019), em solos arenosos do semiárido da região Nordeste mostrou que a distribuição das subfrações de areia ao longo do perfil parece explicar os processos de retenção de água melhor do que a fração de argila, não obstante as pequenas quantidades de argila nestes solos (entre 40 e 150 g kg<sup>-1</sup>) intensificaram sua capacidade de retenção de água.

Por outro lado, os solos com maiores teores de A.M e A.F mostraram-se menos eletronegativos, uma vez que foram correlacionados positivamente com a  $\Psi_0$  (Figura 31a). Essa relação em parte está associada a baixa quantidade de cargas negativas presente na areia devido sua origem ser essencialmente quartzosa. Outra justificativa consiste nos baixos estoques de C.O, característica intrínseca de solos arenosos em condição tropical. A influência dos estoques de C.O nas cargas negativas de solos arenosos da B.H.I é estatisticamente comprovada pela relação inversa entre os autovetores: estoque de C.O e  $\Psi_0$ .

Assim, deve-se considerar a importância da cobertura vegetal na manutenção dos estoques de C.O e conseqüentemente na geração de cargas negativas e manutenção da fertilidade natural do solo. Nogueira et al. (2019) observaram que a conversão de vegetação

nativa de cerrado para pastagem reduziu os níveis de MOS e a fertilidade natural do solo, acarretando processos erosivos e “manchas” de arenização em solos RQ do estado de Mato Grosso. Portanto, para os solos da B.H.I que estão sob vegetação nativa recomenda-se que permaneçam preservados, para os solos que estão sob sistemas produtivos se recomenda o uso de técnicas conservacionistas já desenvolvidas pelas pesquisas da agropecuária brasileira como: Sistema de Plantio Direto, Integração Lavoura Pecuária, Integração Lavoura Pecuária Floresta e Sistemas Agroflorestais (DONAGEMMA et al., 2016).

Para os solos RL e RR, segundo quadrante, observou-se que as variáveis silte, Pt, estoque de C.O, macro e PCZ foram responsáveis pela aproximação dessas duas classes de solo no gráfico de escores. De maneira geral, o estoque de C.O nos solos RL e RR foi superior aos demais solos analisados, resultado que possivelmente favoreceu a macro e Pt, confirmado pela correlação positiva entre os vetores dessas variáveis.

De modo geral, os solos RL e RR apresentaram características físicas e eletroquímicas muito interessantes do ponto de vista da fertilidade, dentre as quais se destacam os altos teores de C.O e porosidade, entretanto, esses solos apresentam camada pouco espessa, com contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm a partir da superfície, no caso do solo RL, e sem contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm a partir da superfície para a classe RR (Santos et al., 2018), estando associados a terrenos acidentados e pedregosos, no caso da B.H.I, de maneira geral, estes fatores limitam o crescimento radicular, o uso de máquinas e elevam o risco de erosão.

Considerando que a camada destes solos (RL e RR), é pouco profunda, com predominância de macroporos (infiltração rápida) e relevo declivoso, caso sejam convertidos em sistemas produtivos sem a implementação de sistema de manejo adequado as perdas de solo podem ser desastrosas. As recomendações mais adequadas para estes solos são normalmente a preservação da flora e fauna. Wang et al. (2016) identificaram que as maiores taxas de erosão estão relacionadas a ecossistemas frágeis que sofreram mudanças no uso da terra.

Miguel et al. (2021) relataram que o comprimento da encosta e grau de declividade determinou a magnitude do processo erosivo em solos RL e RR. Em contrapartida, a cobertura do solo apresentou a maior relação com o controle das perdas de solo na bacia hidrográfica. Moura-Bueno et al. (2018) ao quantificarem perdas de solo e água em solos frágeis sob diferentes usos da terra em áreas de encosta com sistema de produção familiar, observaram que as perdas foram significativamente menores em áreas com uso da terra campo nativo e floresta nativa, quando comparadas a lavouras com solo descoberto.

Os solos argilosos (LV e NV) apresentaram como principais características discriminantes os teores de argila e ADA. De modo geral, os teores de argila são coerentes com o material parental desses solos (basalto), e com as intensas transformações ocorridas ao longo do tempo (GHIDIN et al., 2006). Por outro lado, grande parte da fração argila ( $\cong 60\%$ ) mostrou tendência de dispersão natural em água, o que não era esperado devido a estabilidade conferida pelos óxidos de ferro e alumínio presentes em Latossolos tropicais.

Apesar da elevada coesão entre partículas proporcionada pelos óxidos de ferro e alumínio (Momoli; Cooper, 2016), é necessário salientar que os solos LV e NV do presente estudo apresentaram teores de C.O variando de médio a alto, resultado que interfere de forma direta no potencial elétrico do solo, com reflexos na dispersão de argila. Ghidin et al. (2006), ao analisarem solos semelhantes, no Terceiro Planalto Paranaense, observaram que o baixo teor de C.O favoreceu elevada floculação do solo, acima de 90%.

Bertossi et al. (2016), ao analisarem as propriedades físicas e químicas de Oxisols sob diferentes coberturas vegetais (floresta, pastagem e lavouras), observaram maior teor de ADA na cobertura floresta. Os autores associaram tais resultados a mineralogia caulínica dos solos analisados, bem como a qualidade e maiores teores de matéria orgânica encontrada no solo com cobertura florestal.

Considerando que os solos LV e NV presentes na B.H.I estão sob cultivos de milho, soja e pastagem em sua maioria, e que esses usos implicam na reposição de nutrientes e correções de acidez por meio de calagens, é fundamental que tais práticas sejam cuidadosamente recomendadas. Segundo Donagemma et al. (2016), a calagem é bastante benéfica porque neutraliza o alumínio tóxico, ao elevar o pH do solo, e disponibiliza cálcio e magnésio às plantas. Tendo em vista que quanto maior os valores de ADA, menor será a estabilidade de agregados e a resistência do solo aos processos de degradação. Assim, a dose de corretivos deve ser cuidadosamente recomendada, especialmente em solos como os LV e NV do presente estudo, que apresentaram tendência de dispersão natural de argila em água.

Manejos adequados poderão evitar impactos ambientais negativos como os de erosões de solos, reportado por Momoli e Cooper (2016), em uma topossequência composta por LV, FF e GM, em Goiatuba, estado de Goiás. Esses autores alertaram que as espessas camadas de sedimentos provenientes da erosão no solo LV depositadas sobre o GM, na área úmida que contém a mata ciliar e nascentes, constituem expressivo impacto à qualidade do solo, com comprometimento de sua função ecológica e de filtro, além do soterramento de sementes e plântulas, e dificultam a germinação e o estabelecimento de plantas nativas.

Com relação aos solos FF e GX observou-se influência do tamanho de partículas granulométricas na discriminação desses solos. De modo geral, no solo GX houve predominância de areias mais finas comparado ao solo FF. Acredita-se que devido as oscilações sazonais do lençol freático e fenômenos de empacotamento, devido a heterogeneidade de partículas (Donagemma et al., 2016), esteja ocorrendo a diminuição da macroporosidade no solo GX. Os resultados mostraram que 80% da Pt é constituída por microporos.

Corroborando com o presente estudo, Momoli e Cooper (2016), afirmaram que a redução na porosidade de Gleissolos pode decorrer do colapso dos poros conectados por causa do peso dos sedimentos aportados na baixa vertente após receber sedimentos transportados de regiões mais altas do relevo, ou relacionado às oscilações sazonais do lençol freático.

Nesse sentido, recomenda-se a realização de estudos hidrogeomorfopedológicos (Oliveira et al., 2020), para a identificação de possíveis impactos ambientais negativos, relacionados ao acúmulo de sedimentos sobre os solos úmidos de baixas vertentes no interior da B.H.I. Solos de áreas úmidas, como veredas, podem apresentar importantes alterações quanto à textura e porosidade em razão da sedimentação proveniente da erosão à montante. Tais alterações podem representar graves impactos à qualidade do solo e da água, pois localizam-se em áreas de recarga de nascentes, destinadas à preservação permanente (APP) (MOMOLI; COOPER 2016).

#### **4 CONCLUSÃO**

Os solos apresentaram textura variando de arenosa a argilosa, com heterogeneidade de tamanho de partículas, até mesmo dentro da mesma classe textural.

As frações de areia relacionaram-se com os atributos físicos e eletroquímicos fundamentais dos solos da B.H.I. O predomínio de areia média e areia fina e, em menor proporção de areia muito fina, possibilita alta capacidade de ajuste das partículas. Como consequência, maior densidade do solo e microporosidade,  $\Psi_0$  menos negativa, menor macroporosidade e estoque de carbono orgânico.

Neste aspecto, a diversidade de solos e suas propriedades reforçam a importância do conhecimento detalhado das frações granulométricas dos solos, principalmente onde tem-se predominância da fração areia, para a adoção de práticas de uso, manejo e conservação dos solos e da água.

## REFERÊNCIAS

- ABBASLOU, H.; HADIFARD, H.; GHANIZADEH, A. R. Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils. **Heliyon**, v. 6, n. 2, p. 1-8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03462>
- AZEVEDO, J. R., BUENO, C. R. P. Potencialidades e limitações agrícolas de solos em assentamento de reforma agrária no município de Chapadinha-MA. **Scientia agraria**, v. 17 n. 3, p. 1-13, 2016. <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v17i3.46841>
- BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X. Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. **Rev. Ceres**, v. 61, n. 6, p. 1012-1021, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737X201461060018>
- BERTOSSI, A. P. A.; DA ROCHA JÚNIOR, P. R.; RIBEIRO, P. H.; DE MENEZES, J. P. C.; CECÍLIO, R. A.; ANDRADE, F. V. Soil cover and chemical and physical attributes in oxisol in the atlantic forest biome. **Rev. Árvore**. v. 40 n. 2, p. 219-228, 2016. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000200004>
- BYBORDI, M. Infiltration of water into nonuniform soils. *In*: HADAS, A.; SWARTZENDRUBER, D.; RIJTEMA, P.E.; FUCHS, M.; YARON, B. (Ed.). **Physical aspects of soil water and salts in ecosystems**. New York: Springer-Verlag, v. 4, p. 91- 95, 1973. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-65523-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-65523-4_10)
- CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; SOUSA, R. O. D.; TIMM, L. C. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**. v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017. DOI: <HTTPS://DOI.ORG/10.15210/RBES.V4I1.11576>
- CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Mapa geológico do estado de Mato Grosso do Sul**. [Brasília]: CPRM, 2006. Escala 1:1.000.000. Disponível em: [http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/10217/2/mapa\\_ms.pdf](http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/10217/2/mapa_ms.pdf). Acessado em 18 de maio de 2020.
- DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAUJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 51, n. 9, p. 1003-1020. 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X201600090000>.
- DOU, F.; SORIANO, J.; TABIEN, R. E.; CHEN, K. Soil Texture and Cultivar Effects on Rice (*Oryza sativa*, L.) Grain Yield, Yield Components and Water Productivity in Three Water Regimes. **PLOS ONE**. v. 11, n. 3, p. 1-12, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150549>

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995. <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>

FAO – Food And Agriculture Organization. (2019). Diretrizes Voluntárias para a Gestão Sustentável dos Solos. Roma: FAO. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i6874pt/I6874PT.pdf>. Acessado em 13 de abril de 2021.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; AULER, P. A. M. Influência das frações de areia na retenção e disponibilidade de água em solos das Formações Caiuá e Paranavaí. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p.613-621, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300007>

FILIZOLA, H. F.; FONTANA, A.; DONAGEMMA, G. K.; DE SOUZA, M. D.; BORTOLON, E. S. O.; BORTOLON, L. Qualidade física de solos influenciada pelo uso e manejo na região de Guaraí-TO. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariúna, SP, 2017.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná: II - relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 30, n. 2, p.307-319, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000200011>.

GUIMARÃES, G. P.; MENDONÇA, E. de S.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V. Soil aggregation and organic carbon of oxisols under coffee in agroforestry systems. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v.38, n.1, p. 278-287, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100028>

JOLLIFFE, L. T. Principal component analysis. 2.ed. New York: **Springer**, 2002. 487p.

MIGUEL, P.; DALMOLIN, R. S. D.; MOURA-BUENO, J. M.; SOARES, M. F.; da CUNHA, H. N.; ALBERT, R. P.; STUMPF, L.; LEIDEMER, J. D. Mapeamento da erodibilidade e erosão potencial do solo em uma bacia hidrográfica de encosta. **Eng. Sanit. Ambient.** v.26, n. 1, p. 1-9, 2021 <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190235>

MOMOLI R. S; COOPER M. Erosão hídrica em solos cultivados e sob mata ciliar. **Pesq. agropec. bras.**, v. 51, n. 9, p.1295-1305, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900029>

MOURA-BUENO, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; MIGUEL, P.; HORST, T. Z. Erosão em áreas de encosta com solos frágeis e sua relação com a cobertura do solo. **Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p. 102-112, 2018. <https://doi.org/10.5380/rsa.v19i1.53738>

NOGUEIRA, A. M.; TOCANTINS, N.; SALOMÃO, F. X. de T. Degradação de áreas com processo de Arenização na Bacia do Córrego Guanabara, município de Reserva do Cabaçal – MT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 722-737, 2019. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.3.p722-737>

NUNES, L.A.P.L.; DIAS, L.E.; JUCKSCH, I. & BARROS, N.F. Atributos físicos do solo em área de monocultivo de cafeeiro na zona da mata de Minas Gerais. **Biosci. J.**, v. 26, n. 1, p. 71-78, 2010.

OLIVEIRA, A. S. de.; SILVA, A. M. da.; MELLO, C. R. de. Dinâmica da água em áreas de recarga de nascentes em dois ambientes na Região Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Eng. Sanit. Ambient.** v. 25, n. 1, p. 59-67, 2020 <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020148177>

PARAHYBA, R. da B. V.; DE ARAÚJO, M. do S.B.; DE ALMEIDA, B. G.; NETO, F. C. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Water retention capacity in Arenosols and Ferralsols in a semiarid area in the state of Bahia, Brazil. **An. Acad. Bras. Ciênc.** v. 91, n. 4, p. 1-20, 2019. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920181031>

SANTOS, H. G. dos.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos.; OLIVEIRA, V. A. de.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de.; ARAUJO FILHO, J. C. de.; OLIVEIRA, J. B. de.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCHJØNNING, P., MCBRIDE, R., KELLER, T., OBOUR, P. B., 2017a. Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. **Geoderma**, v. 286, p. 83-87, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.020>

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. 2017. Soil survey manual. In: Ditzler C, Scheffe K and Monger HC (Eds), Handbook 18. USDA, Washington, D.C, Government Printing Office, 603 p. [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2\\_054253#particle\\_size](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054253#particle_size)

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (Ed.). Cerrado: correção do solo e adubação 2. ed. Brasília, DF:Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (2017) - **Manual de métodos de análise do solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 573 p.

VILARINHO, M. K. C.; KOETZ, M.; SCHLICHTING, A. F.; SILVA, M. C.; BONFIM SILVA, E. M. Determinação da taxa de infiltração estável de água em solo de cerrado nativo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 7, n. 1, p. 17-26, 2013. DOI: 10.7127/rbai.v7n100097

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, B.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010. **Catena**, v. 137, p. 256-268, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.004>

UEHARA, G.; GILLMAN G. P. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals: I. Theory. **Soil Science Society America Journal**, v. 44, n. 2, p. 250-252, 1980a. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400020008x>

YANG, S.; JANSEN, B.; ABSALAH, S.; HALL, R. L. V.; KALBITZ, K.; CAMMERAAT, E. L. H. Lithology- and climate-controlled soil aggregate-size distribution and organic carbon stability in the Peruvian Andes. **Soil**, v. 6, n. 1, p. 1–15, 2020. <https://doi.org/10.5194/soil-6-1-2020>

## CAPÍTULO 3 – MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE POTENCIAL E AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA

### RESUMO

A identificação dos ambientais naturais e suas fragilidades potencial e ambiental proporcionam a definição das diretrizes e ações a serem implantadas no espaço físico-territorial, servindo de base para o zoneamento ambiental e subsídio à gestão e o planejamento das bacias hidrográficas. Objetivou-se com este estudo acrescentar três novos fatores a proposta metodológica de Ross (1994; 2012) para determinação da fragilidade potencial e ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema. A área de estudo encontra-se integralmente dentro dos limites brasileiros, na região Centro Oeste, no Estado de Mato Grosso do Sul, fazendo fronteira com o Paraguai na sua porção Sudoeste. Foram utilizadas técnicas de geoprocessamento e os preceitos metodológicos propostos por Ross (1994 e 2012) da fragilidade potencial e ambiental, acrescentando-se novos atributos (teor de argila, matéria orgânica e grau de floculação do solo). Observou-se que cerca de 17.977 km<sup>2</sup> ou 47,7% da área é composta por fragilidade potencial baixa, associada a solos argilosos e baixa declividade (0 – 3%). Com a inserção do uso e cobertura da terra a fragilidade ambiental alta se destacou em 16,795 km<sup>2</sup> ou 44,6% da bacia, especialmente tendo a agricultura como maior abrangência encontrada na bacia. O uso de tecnologias de geoprocessamento possibilitou acrescentar novos fatores associados a fragilidade potencial/ambiental, permitindo o entendimento de diferentes realidades e, conseqüentemente, melhorar a gestão territorial.

**Palavras-chave:** Fragilidade ambiental. Geoprocessamento. Planejamento ambiental. Uso da terra. Bacia hidrográfica Ivinhema.

### 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional associado ao desenvolvimento econômico tem provocado transformações significativas nos ecossistemas (CASSOL et al., 2020). As múltiplas formas de exploração dos recursos naturais nem sempre tem considerado as potencialidades e limitações do meio ambiente, o que tem acarretado perda de serviços ecossistêmicos (ALMEIDA et al., 2020).

As intervenções realizadas nos elementos que compõem a paisagem estimulam a desestabilização, temporária ou permanente da mesma, de forma funcional ou dinâmica (SOUZA et al, 2020). Frente a essas alterações os impactos variam conforme o grau de resistência a modificações que cada ambiente possui, assim, a fragilidade ambiental pode variar em função das características locais, tais como a geologia, solos, relevo, vegetação e clima (GUERRERO et al., 2018).

Com o intuito de avaliar a fragilidade do ambiente, Ross (1994), baseado em Tricart (1977), propôs um método capaz de avaliar a fragilidade intrínseca dos elementos naturais da paisagem, denominada de fragilidade potencial. Neste método, a fragilidade potencial é correlacionada às condições naturais da paisagem como declividade do relevo, pedologia e erosividade das chuvas. A fim de considerar o fator antrópico, o método propõe integrar a fragilidade potencial aos tipos de uso da terra e cobertura vegetal, classificados de acordo com o grau de proteção ao solo.

A partir da criação do método de análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados, mencionado no parágrafo anterior, diversas pesquisas têm sido realizadas utilizando e aprimorando essa metodologia de acordo com as características naturais e antrópicas de cada área de estudo (STORTO; COCATO, 2018; ABRÃO; BACANI, 2018; MARTINS et al., 2018; SANTOS; MARCHIORO, 2020).

O aprimoramento do método de análise por meio da inserção de novas variáveis busca sempre melhorar os resultados e tornar o modelo o mais fiel possível à realidade. Gonçalves et al. (2011) enfatizam que quanto maior for a incorporação de novos fatores na metodologia de análise, desde que eles estejam relacionados com a determinação da fragilidade potencial/ambiental, mais condizentes com a realidade local serão os resultados obtidos.

Desse modo, o uso de atributos químicos e físicos de solos, ligados à sua estrutura e resistência a erosão como os teores de argila, matéria orgânica e grau de flocculação podem contribuir com detalhamento da análise de fragilidade potencial/ambiental, especialmente no que diz respeito aos efeitos erosivos dos solos, pois, essas variáveis desempenham papel fundamental na estruturação do solo (DANTSOVA et al., 2009; SOARES et al., 2018; NUNES et al., 2020).

Argila e matéria orgânica são elementos importantes no processo de agregação do solo. Segundo Silva et al. (2014), os constituintes granulométricos do solo influenciam na formação e na estabilidade de agregados, de modo que, solos com maiores teores de argila contribuem para a agregação e solos mais estáveis. Donagemma et al. (2016) relataram que solos de texturas mais finas são menos suscetíveis a degradação quando comparados a texturas de areia e francoarenosa, em condições ambientais semelhantes. Nessa direção, Teixeira et al. (2017) observaram que o grau de flocculação pode ser considerado um indicador de qualidade do solo, visto que, está relacionado à agregação e à erosão do solo.

Dada a importância de se detalhar a análise de fragilidade potencial/ambiental e o potencial de integração de novas variáveis diretamente relacionada a estabilidade dos solos,

bem como da facilidade de exercer a combinação de diferentes tipos de informações por meio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), objetivou-se com este estudo acrescentar três novos fatores a proposta metodológica de Ross (1994; 2012) para determinação da fragilidade potencial e ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema (B.H.I).

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 ÁREA DE ESTUDO**

Todas as informações referentes a caracterização da área de estudo podem ser consultadas no capítulo I, item 2.1 Área de estudo; item 2.1.1 Geologia; item 2.1.2 Geomorfologia; item 2.1.3 Pedologia; item 2.1.4 Declividade; item 2.1.5 Hipsometria; item 2.1.6 Clima; item 2.1.7 Cobertura Vegetal; item 2.2 Amostragem; item 2.3 Análises laboratoriais.

### **2.2 FRAGILIDADE POTENCIAL**

Para elaboração da fragilidade potencial foram utilizadas sete variáveis que representam os principais aspectos físico-químicos da B.H.I, que estão descritas na sequência. Primeiramente os dados foram convertidos de vetorial (*shapefile*) para (matricial) e, em seguida, foram reclassificados de acordo com os pesos de fragilidade atribuídos por Ross (1994; 2012). Após essa etapa, foi realizada a sobreposição ponderada (álgebra de mapas) no *software* ArcGIS 10.6 de todos os temas, cuja soma resultou na fragilidade potencial.

#### **2.2.1 Geologia**

Conforme levantamento geológico realizado para o estado de Mato Gross do Sul em escala de 1:250.000 da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2006), encontram-se no interior da B.H.I quatro classes geológicas: Formação Serra Geral, Caiuá, Ponta Porã e Depósitos Aluvionares, os percentis que cada tipo geológico ocupa na bacia e suas características são apresentadas no Quadro 1.

QUADRO 1 - CLASSES GEOLÓGICAS, GRAU DE FRAGILIDADE, CARACTERÍSTICAS E ÁREA ABRANGENTE

Geologia*		Grau de Fragilidade	Características**	Área km <sup>2</sup>	%
Q2a	Depósitos Aluvionares	Alta	Localizado no baixo curso da B.H.I, composto por areia, areia quartzosa, cascalho, silte, argila e localmente turfa. Ambiente continental fluvial.	1.686,2	4,47
Qpp	Formação Ponta Porã	Alta	Localizada no Sudoeste da B.H.I, constituída por depósitos conglomeráticos com matriz arenosa e cimento ferruginoso, contendo fragmentos de tamanhos desde seixos a matações.	2.198	5,83
K2c	Grupo Caiuá	Média	Localizado na porção de médio e baixo curso da B.H.I, composto por arenito quartzoso a subarcoseano, fino a médio, arenito quartzoso a subarcoseano, fino a médio.	12.150,4	32,24
K1βsg	Formação Serra Geral	Baixa	Localizada na região de médio e alto curso da B.H.I, composta por basalto e basalto andesito de filiação toléítica, intercalam camadas de arenito, litoarenito.	21.652,5	57,45

Q2a = Depósitos Aluvionares; Qpp = Formação Ponta Porã; K2c = Grupo Caiuá; K1βsg = Formação Serra Geral  
 FONTE: \* CPRM (2006); \*\* Fortes et al. (2007).

A geologia possui relação direta com a instabilidade/estabilidade do ambiente. Assim, a depender do grau de instabilidade/estabilidade é possível atribuir pesos para cada tipo geológico, com fins de classificá-los em graus de fragilidade. Os pesos utilizados no presente estudo se baseiam em estudos anteriores que foram desenvolvidos nas mesmas geologias e no mesmo Estado (MIGUEL et al., 2013; GONÇALVES et al., 2011).

### 2.2.2 Declividade

As características do relevo imprimem condições de baixa declividade em toda a extensão da bacia, portanto, para ressaltar as áreas com maior declive, foram estabelecidos intervalos de classes específicos para a bacia em estudo (Quadro 2). Os pesos atribuídos na análise estão de acordo com Gonçalves et al. (2011), que determinaram a fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Dourados, sub-bacia do rio Ivinhema. A declividade foi elaborada a partir da imagem de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) extraída do banco de imagens do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), com resolução espacial de 30 metros. Foram utilizadas 4 cenas para abarcar toda área de estudo: s22\_w54, s21\_w55, s21\_w56 e s21\_w57. As imagens foram mosaicas no *software* ArcGIS 10.6 (código de licença ZCK210048756) e gerada a declividade através da ferramenta *Slope*.

QUADRO 2 - CLASSES DE DECLIVIDADE, GRAU DE FRAGILIDADE, CARACTERÍSTICAS E ÁREA ABRANGENTE

Declividade*		Grau de fragilidade**	Características***	Área km <sup>2</sup>	%
Plano	< 2%	Muito baixo	Constitui-se de áreas planas ou quase planas, com escoamento superficial lento. Presente de maneira mais expressiva no domínio da Formação Serra Geral e na Planície de inundação do rio Paraná. Ocorre também junto aos principais canais de drenagem.	21.785	57,81%
Plano/Suave-ondulado	2 - 4%	Baixo	Constituído por áreas planas ou levemente onduladas e escoamento superficial predominantemente lento. Presente em toda bacia, associado a áreas planas e onduladas. De modo geral, não oferece impedimentos para usos antrópicos.	7.563,70	20,07%
Suave-ondulado	4 - 6%	Médio	Formado por áreas com leve inclinação, entretanto, suscetíveis aos processos erosivos, especialmente por ocorrer em regiões de solos arenosos. Estas áreas necessitam de adoção de práticas conservacionistas, a fim de evitar o comprometimento do quadro ambiental.	8.303	22,03%
Suave-ondulado/Ondulado	6 - 12%	Alto	Compreende áreas com escoamento superficial de médio a rápido, alta suscetibilidade aos processos erosivos na ausência de cobertura do solo. A adoção de manejos conservacionistas é recomendada com fins de evitar perdas de solo e a degradação do ambiente.	27,9	0,074%
Ondulado	> 12%	Muito Alto	Abrange as áreas mais declivosas da bacia, onde o escoamento superficial é caracterizado como rápido. O risco de erosão pode ser considerado alto na ausência de cobertura do solo. Estas áreas estão associadas aos solos RL e RR, os quais demandam de manejos específicos ou mesmo serem mantidos como áreas de preservação ambiental.	7,28	0,019%

FONTE: \* Embrapa (1979); \*\* Gonçalves et al. (2011); \*\*\* Ferreira; Silva (2019).

### 2.2.3 Clima

Encontram-se dois tipos climáticos predominantes na área de estudo, o clima Aw - Clima tropical de savana e o clima Cwa – Clima temperado de inverno seco e verão quente e chuvoso. Segundo a classificação de Köppen, o clima Cwa é caracterizado por apresentar inverno seco e verão chuvoso com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e a do mês mais quente superior a 22°C. O clima Aw, por sua vez, apresenta estação chuvosa no verão (novembro a abril) e estação seca no inverno (maio a outubro), com temperatura média do mês mais frio superior a 18°C e precipitação do mês mais seco menor que 60 mm (ARAI, 2010; IVASKO JÚNIOR et al., 2020).

Informações sobre o clima são necessárias para definir a intensidade pluviométrica, variável diretamente associada a erosividade das chuvas. O valor da intensidade pluviométrica foi calculado de acordo com Crepani et al. (2001), no qual divide-se o valor da pluviosidade média anual (em mm) pela duração do período chuvoso (em meses), obtendo-se então a intensidade pluviométrica utilizada na análise.

Para espacializar a intensidade pluviométrica, foi utilizada a média anual de 23 estações próximas à área de estudo, entre os anos de 1997 e 2016. A média anual de cada estação foi adicionada nos arquivos *shapefile* que representam as estações pluviométricas (pontos). Em seguida, utilizou-se o método de interpolação por *Krigagem* ordinária para espacializar os valores de precipitação por toda B.H.I. No Quadro 3 são apresentadas as características dos tipos climáticos presentes na B.H.I, bem como seu grau de fragilidade.

QUADRO 3 - CLASSES CLIMÁTICAS, GRAU DE FRAGILIDADE E CARACTERÍSTICAS

Classe	Grau de fragilidade*	Características**
Aw – Clima Tropical de Savana***	Baixo	Localizado a Leste da B.H.I (Taquarussu, Batayporã, Jateí, Novo Horizonte, Ivinhema e Nova Andradina) o Clima Tropical de Savana (Aw), apresenta estação chuvosa no verão (novembro a abril) e estação seca no inverno (maio a outubro), com temperatura média do mês mais frio superior a 18°C e precipitação do mês mais seco menor que 60 mm.
Cwa – Clima temperado de inverno seco e verão quente e chuvoso***	Muito baixo	Da porção Central em direção ao divisor topográfico (Deodápolis, Dourados, Rio Brilhante e Sidrolândia) ocorre o clima Cwa, caracterizado por apresentar inverno seco e verão chuvoso com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e a do mês mais quente superior a 22°C.

FONTE: \* Adaptado de Crepani et al. (2001); \*\*Arai (2010); \*\*\* Ivasko Júnior et al. (2020).

#### 2.2.4 Solos

A área de estudo é recoberta por dez classes de solos, entretanto, duas classes (LV e PV), abrangem mais de 80% da área de estudo (Quadro 4). As classes de solo FT, FF, NV e RL representam cerca de 0,5% da área total da bacia.

QUADRO 4 - CLASSES DE SOLO, GRAU DE FRAGILIDADE, CARACTERÍSTICAS E ÁREA ABRANGENTE

Classes*		GF	Características*	Área km <sup>2</sup>	%
FT	Plintossolo Argilúvico	Muito alta	São solos com horizonte ou camada de acumulação de argila abaixo do horizonte A superficial. Apresentam drenagem variável, podendo ocorrer excesso de água temporário até excesso prolongado de água durante o ano.	2,34	0,006
FF	Plintossolo Pétrico	Muito alta	São solos com horizonte ou camada concrecionário ou litoplíntico, com sérias restrições ao uso agrícola devido ao enraizamento das plantas, entrave ao uso de equipamentos agrícolas e pouco volume de solo disponível para as plantas.	1,08	0,003
GX	Gleissolo Háplico	Muito alta	São solos minerais formados em condições de saturação com água, presentes principalmente em planícies ou várzeas inundáveis. As limitações mais comuns dos GX são sua elevada frequência de inundação e o longo período de solo saturado por água, consequência de cheias dos cursos d'água ou da elevação do lençol freático.	1.056	2,8
LV	Latossolo Vermelho	Baixa	São solos minerais, homogêneos, com pouca diferenciação entre os horizontes ou camadas, reconhecido facilmente pela cor quase homogênea do solo com a profundidade. São profundos, bem drenados e com fertilidade variável.	19.489	51,7
NV	Nitossolo Vermelho	Média	São solos minerais homogêneos, com diferenciação de horizontes pouco notável. São argilosos, com estrutura que favorece a retenção de água, mas que mantém boa drenagem, propriedades físicas extremamente desejáveis em condições de sazonalidade climática e estação seca prolongada.	147	0,4
PV	Argissolo Vermelho	Alta	São solos minerais com nítida diferenciação entre as camadas ou horizontes. Maior coesão, plasticidade e pegajosidade em profundidade, devido a acumulação de argila em horizonte subsuperficial.	12.343	32,8
RQ	Neossolo Quartzarênico	Muito alta	São solos com textura arenosa, estrutura fraca, grande friabilidade e altamente susceptíveis à erosão, em razão da baixa coesão entre os grãos e da baixa estabilidade de agregados. Práticas de manejo que mantenham ou aumentem os teores de matéria orgânica podem reduzir esse problema.	983,3	2,6
RL	Neossolo Litólico	Muito alta	Compreendem solos rasos, onde geralmente a soma dos horizontes sobre a rocha não ultrapassa 50 cm, estando associados normalmente a relevos mais declivosos. Estes fatores limitam o crescimento radicular, o uso de máquinas e elevam o risco de erosão.	14,3	0,04
RR	Neossolo Regolítico	Muito alta	Solos sem contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm a partir da superfície, apresentando horizonte A ou hístico sobrejacente ao horizonte C ou Cr. Admite um horizonte B em início de formação, cuja espessura não satisfaz a nenhum tipo de horizonte B diagnóstico.	2.762	7,3
SX	Planossolo Háplico	Muito alta	São solos constituídos por material mineral com horizonte A ou E seguido de horizonte B plânico. Ocorrem tipicamente em áreas de cotas baixas, planas a suave onduladas. São imperfeitamente drenados, de baixa permeabilidade e muito susceptíveis à erosão.	887,8	2,35

GF = Grau de Fragilidade; FONTE: \* Santos et al. (2018).

A identificação das unidades pedológicas teve como base o levantamento de solos elaborado pelo macrozoneamento, produzido na escala de 1:250.000, extraído do banco de dados Sistema Interativo de Suporte ao Licenciamento Ambiental (SISLA). A padronização

da nomenclatura foi realizada de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018). Quanto ao grau de fragilidade as classes de solo tiveram como base Ross (1994; 2012) com algumas modificações. As modificações foram realizadas para área específica do estudo com base em dados laboratoriais de textura, matéria orgânica e grau de floculação.

Atribuiu-se grau de fragilidade baixa para a classe de solo LV enquanto diversos estudos têm adotado grau de fragilidade muito baixa (ROSS, 1994; 2012; CUNHA; BACANI, 2016; ABRÃO; BACANI, 2018; BUENO et al., 2018). A justificativa é pautada especialmente em dados laboratoriais de grau de floculação, cujos valores médios encontrados para o solo LV foi menor que 50%. De modo geral, quanto menor for o grau de floculação do solo, maior será a argila dispersa em água e conseqüentemente menor estabilidade de agregados e a resistência do solo aos processos de degradação/erosão.

#### 2.2.5 Grau de floculação

O grau de floculação é obtido a partir da relação entre a argila dispersa em água e a argila dispersa em hidróxido de sódio. Está relacionado ao fenômeno da dispersão/floculação dos coloides do solo, que por sua vez, está associado ao balanceamento entre as cargas negativas e positivas. Segundo Teixeira et al. (2017) o grau de floculação pode ser considerado um indicador de qualidade do solo, visto que, está relacionado à agregação e à erosão do solo.

Nesse sentido, o grau de floculação pode complementar a análise de fragilidade potencial/emergente tornando-a mais fidedigna as características da área analisada, visto que, quanto maior for a incorporação de novos fatores na metodologia de análise, desde que eles estejam relacionados com a determinação da fragilidade ambiental, mais condizentes com a realidade local serão os resultados obtidos (GONÇALVES et al., 2011).

Com relação aos pesos atribuídos ao grau de floculação, partiu-se do princípio que quanto maior seu valor, maior a estabilidade dos agregados, refletindo na união entre as partículas e na resistência contra à ação dos agentes erosivos (DANTSOVA et al., 2009; BARRETO et al., 2019). Portanto, os solos com maiores valores de grau de floculação receberam os pesos mais baixos de fragilidade, ao passo que, os solos com menores valores de grau de floculação receberam pesos mais altos de fragilidade (Quadro 5).

QUADRO 5 - GRAU DE FLOCULAÇÃO DO SOLO, GRAU DE FRAGILIDADE E ÁREA ABRANGENTE

Grau de floculação do solo	Grau de fragilidade	Área km <sup>2</sup>	%
100 – 80%	Muito baixo	80,6	0,21
80 – 60%	Baixo	5.091	13,5
60 – 50%	Médio	15.540,5	41,2
50 – 40%	Alto	9.639,6	25,5
< 40%	Muito Alto	7.335	19,4

FONTE: O autor (2021).

### 2.2.6 Matéria orgânica

O conteúdo de matéria orgânica do solo pode ser um indicativo de sua qualidade, bem como de sua estabilidade. Liu et al. (2010) observaram que a erodibilidade do solo diminui linearmente com o aumento no conteúdo de carbono orgânico. Soares et al. (2018) relataram que à medida que o teor de matéria orgânica diminui, há decréscimo na estabilidade dos agregados do solo, tornando-o mais suscetível aos processos erosivos.

Nesse sentido, integrou-se os teores de matéria orgânica na análise de fragilidade potencial para área de estudo. Os critérios relacionados aos graus de fragilidade seguiram o disposto na literatura já apresentada, atribuindo-se maior fragilidade para áreas com menores teores orgânicos e menor fragilidade para áreas com maiores teores orgânicos. No Quadro 6 são apresentados os intervalos adotados para o grau de fragilidade e área abrangente.

QUADRO 6 - MATÉRIA ORGÂNICA, GRAU DE FRAGILIDADE E ÁREA ABRANGENTE

Matéria orgânica	Grau de Fragilidade	Área km <sup>2</sup>	%
> 40 g kg <sup>-1</sup>	Muito baixa	18.874,2	50,1
30 – 40 g kg <sup>-1</sup>	Baixa	11.147,8	29,5
20 - 30 g kg <sup>-1</sup>	Média	7.001,1	18,6
10 – 20 g kg <sup>-1</sup>	Alta	663,27	1,8

< 10 g kg <sup>-1</sup>	Muito Alta	0,65	0,002
-------------------------	------------	------	-------

FONTE: O autor (2021).

### 2.2.7 Argila

Os teores de argila combinados com a matéria orgânica são elementos importantes no processo de agregação do solo. Os constituintes granulométricos do solo influenciam na formação e na estabilidade de agregados, de modo que, solos com maiores teores de argila contribuem para a agregação e solos mais estáveis (SILVA et al., 2014).

Devido ao seu poder de agregação (NUNES et al., 2020), a fração granulométrica argila foi escolhida para integrar a análise. Os critérios relacionados aos graus de fragilidade seguiram o disposto na literatura apresentada, atribuindo-se maior fragilidade para áreas com menores teores de argila e menor fragilidade para áreas com maiores teores de argila. No Quadro 7 são apresentados os intervalos adotados para o teor de argila, grau de fragilidade e área abrangente.

QUADRO 7 - MATÉRIA ORGÂNICA, GRAU DE FRAGILIDADE E ÁREA ABRANGENTE

Argila	Grau de Fragilidade	Área km <sup>2</sup>	%
> 600 g kg <sup>-1</sup>	Muito baixa	80,52	0,21
600 – 400 g kg <sup>-1</sup>	Baixa	6.165,5	16,3
400 – 250 g kg <sup>-1</sup>	Média	16.738,6	44,4
250 – 150 g kg <sup>-1</sup>	Alta	10.503	27,9
< 150 g kg <sup>-1</sup>	Muito Alta	4.199,4	11,1

FONTE: O autor (2021).

Com os valores obtidos do Grau de Floculação, Matéria Orgânica e Argila dos solos amostrados na B.H.I, foi realizada a espacialização desses dados a partir dos pontos de coleta realizados em trabalho de campo (62 pontos). Com os valores adicionados para cada atributo físico e químico, foi usado o método de interpolação por *Krigagem Ordinária* para representar em formato *raster* a abrangência de cada atributo.

### 2.2.8 Uso da terra e cobertura vegetal

A análise de uso da terra e cobertura vegetal constitui-se uma excelente ferramenta para o planejamento da utilização racional dos recursos naturais, a qual pode contribuir na geração de informações para a avaliação da sustentabilidade ambiental (LOPES et. al., 2016). O conhecimento do uso da terra e cobertura vegetal é de fundamental importância em estudos de fragilidade ambiental. Essa tese se justifica pela capacidade que alguns usos têm de alterar em maior ou menor grau os sistemas naturais. Portanto, a fragilidade ambiental é diretamente correlacionada aos usos da terra.

Para elaboração do mapa de uso da terra e cobertura vegetal da B.H.I, foram utilizadas imagens do satélite *Landsat 8/OLI* com resolução espacial de 30 metros. As imagens foram extraídas do banco de imagens do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), sendo necessárias 4 cenas de diferentes órbita/ponto para cobrir toda área de estudo: 224/75, 224/76, 225/75 e 225/76. As imagens são datadas do dia 11 e 20 de agosto de 2019.

As imagens foram mosaicas, no qual formou apenas uma imagem com mesmo contraste. Logo em seguida, optou-se por realizar a classificação supervisionada, no qual deve-se coletar amostras de *pixels* em regiões de interesse na imagem para treinar o algoritmo de classificação (MOREIRA, 2007). Foram definidas as classes de uso da terra existentes para B.H.I, conforme os trabalhos de campo realizados para coleta de amostra de solo. Com as amostras coletadas, utilizou-se o algoritmo de classificação *Maximum Likelihood Classification*, que apresentou melhores resultados em relação aos demais em testes feitos anteriormente.

Para classificação dos tipos de cobertura vegetal, utilizou-se dados do mapeamento realizado pelo projeto GeoMS (SILVA et al., 2011) na escala de 1:100.000 para todo estado de Mato Grosso do Sul - MS, desenvolvido pela Embrapa Informática. Foi extraída, desse mapeamento, informações sobre a fitofisionomia da cobertura vegetal identificada pelo projeto, sendo corroborada com os dados de campo realizados na área de estudo.

O padrão de cores das classes de uso da terra e cobertura vegetal foram definidos conforme descrito nos manuais técnicos do Instituto Brasileiro Geografia e Estatística (IBGE) de uso da terra (IBGE, 2013) e vegetação brasileira (IBGE, 2012).

Na B.H.I os usos da terra mais expressivos em termos quantitativos de área geográfica são: agricultura e pastagem. Em torno de 37% da área total da bacia contempla usos agrícolas (soja e milho) e 34% pastagem (Quadro 8).

QUADRO 8 - USO DA TERRA E COBERTURA VEGETAL, GRAU DE FRAGILIDADE, CARACTERÍSTICAS E ÁREA ABRANGENTE

Uso da terra e cobertura vegetal	Grau de fragilidade	Características	Área km <sup>2</sup>	%
Cerrado Floresta Estacional Floresta Aluvial Ecótono	Muito baixo	<b>Vegetação natural:</b> são remanescentes de vegetação nativa, compostos por fitofisionomias diversas como Cerrado, Floresta Estacional e Aluvial. Geralmente em pequenos fragmentos.	1.584,2 597,8 1.399 121	4,2 1,58 3,7 0,32
Pastagem Silvicultura Cana-de-açúcar	Médio	<b>Pastagem:</b> campos naturais ou plantados, atribuídos a criação de gado de corte ou leiteiro. <b>Silvicultura:</b> áreas de reflorestamento (eucalipto ou pinus) para exploração econômica madeireira. <b>Cana-de-açúcar:</b> áreas destinadas ao plantio da cultura cana-de-açúcar.	12.752,6 98,2 2.930,3	33,8 0,26 7,8
Agricultura de ciclo curto (soja e milho)	Alto	<b>Agricultura:</b> áreas destinadas à atividade agrícola com cultivos temporários (soja e milho).	13.918,4	37
Solo exposto Área úmida Área urbana	Muito Alto	<b>Solo exposto:</b> áreas com ausência de cobertura geralmente em fase de preparo do solo para plantio. <b>Área úmida:</b> compreende a região de baixo curso da bacia, planícies com inundação frequente ou esporádica. <b>Área urbana:</b> áreas correspondentes às cidades (sedes municipais), às vilas (sedes distritais) e às áreas urbanas isoladas.	2.248,5 1.835,8 201,2	6 4,9 0,53

FONTE: O autor (2021).

Uso da terra por canaviais está presente ao longo de toda bacia, associado quase sempre a solos de textura franca ou arenosa, especialmente na região de baixo curso da bacia. Segundo Ferreira e Silva (2019), o setor sucroenergético está em expansão na região do presente estudo, fato que justifica a ocorrência de quase 8% do uso da terra pela cultura da cana-de-açúcar.

Em torno de 6% da área de estudo apresentava solo exposto no momento da amostragem. Este valor está associado ao período de entressafra da região (mês de agosto), coincidindo com a retirada do milho e preparo do solo para o plantio de soja. Neste intervalo entre uma safra e outra é fundamental que se mantenha o solo com cobertura a fim de reduzir perdas de água, solo e nutrientes e favorecer a manutenção da microbiota do solo.

Os remanescentes vegetais presentes na B.H.I são compostos predominantemente por fitofisionomias de Cerrado, Floresta Aluvial, Floresta Estacional e Áreas de transição (Ecótonos). Na planície dos rios Paraná e Ivinhema (áreas úmidas; solos mal drenados) ocorrem Formações Pioneiras de vegetação herbáceo-arbustiva a arbórea e vegetação aquática (POTT et al., 2014). Atualmente os remanescentes de vegetação nativa somam 14,7% da área total da bacia, dos quais 9,8% são remanescentes florestais e 4,9% são formações pioneiras.

Ainda com relação a ocupação florestal cerca de 0,26% da área contempla floresta plantada ou silvicultura.

As áreas urbanas distribuem-se ao longo de toda a bacia e ocupam cerca de 0,53% da unidade hidrográfica. As sedes municipais mais expressivas em termos quantitativos de área geográfica compreendem as cidades de: Dourados, Ponta Porã, Sidrolândia, Maracaju, Nova Andradina e Rio Brilhante.

### 2.3 FRAGILIDADE AMBIENTAL OU EMERGENTE

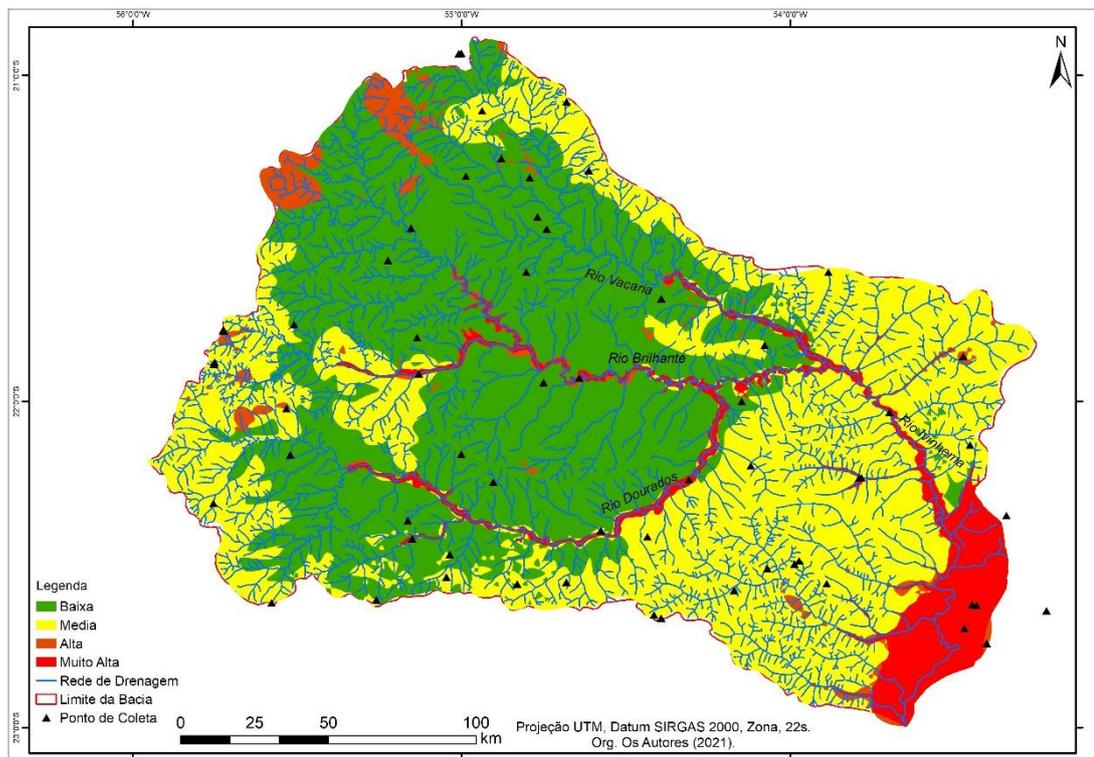
Para elaboração do mapa de fragilidade ambiental ou emergente, realizou-se a sobreposição ponderada (álgebra de mapas) entre uso da terra e cobertura vegetal do ano de 2019 com o mapa de fragilidade potencial, que culminou na fragilidade ambiental. O mapa de uso da terra e cobertura vegetal foi convertido para o formato *raster* e teve suas classes reclassificadas de acordo com os pesos de fragilidade à proteção do solo em função do uso da terra e cobertura vegetal praticado na área, conforme Ross (1994; 2012).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 FRAGILIDADE POTENCIAL

A sobreposição dos dados de geologia, declividade, erosividade da chuva, solos, teor de argila, teor de matéria orgânica e grau de floclação do solo possibilitou caracterizar a fragilidade potencial da B.H.I em quatro classes: fragilidade potencial baixa, fragilidade potencial média, fragilidade potencial alta e fragilidade potencial muito alta (Figura 1).

FIGURA 1 - MAPA DE FRAGILIDADE POTENCIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA, MS

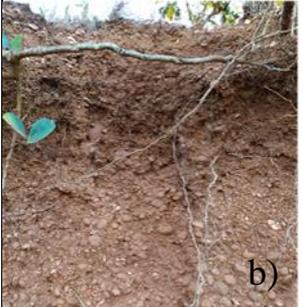


FONTE: O autor (2021).

Houve predomínio da classe de fragilidade potencial baixa na B.H.I, cerca de 17.977 km<sup>2</sup> ou 47,7% da área total da bacia (Quadro 9). A fragilidade potencial baixa está situada desde a porção central até o extremo Oeste da B.H.I, com áreas de fragilidade potencial média a Sudoeste da bacia, na fronteira com o Paraguai, e áreas de fragilidade potencial alta a Noroeste da bacia, próximo a Serra de Maracaju, no divisor topográfico da B.H.I.

De maneira geral, a fragilidade potencial baixa está associada as características geológica, pedológica e clinográfica presentes na área de estudo. A formação geológica da área com fragilidade potencial baixa é característica da Serra Geral, que contribui para formação de solos profundos e bem drenados como os solos LV e NV (Foto a). Por outro lado, os basaltos que deram origem a esses solos possuem granulometria fina a afanítica, o que contribui para formação de solos argilosos com fragilidade potencial baixa (CPRM, 2006).

QUADRO 9 - FRAGILIDADE POTENCIAL E ÁREA ABRANGENTE

Grau de fragilidade potencial	Área km <sup>2</sup>	%	Imagem
Baixo	17.977	47,7	
Médio	14.448,1	38,3	
Alto	2.335,58	6,2	
Muito Alto	2.926,32	7,8	

FONTE: O autor (2021).

A textura argilosa e muito argilosa predominante nos solos LV e NV da B.H.I contribuem para maior retenção de matéria orgânica, se comparada a solos arenosos. O acúmulo de matéria orgânica na camada superficial do solo favorece a agregação e a infiltração de água no solo, acarretando baixas taxas de perda de solo, quando em ambientes de baixa declividade (LOSS; COMIN, 2015).

Por outro lado, na medida que a declividade aumenta os solos possuem a tendência de se tornarem mais rasos (RL e RR) e suscetíveis aos processos erosivos, devido à lenta pedogênese (STORTO; COCATO, 2018). Na B.H.I em torno de 28 km<sup>2</sup> ou 0,074% da área total da bacia possui inclinação entre 6 e 12% e 7,3 km<sup>2</sup> ou 0,02% apresenta inclinação superior a 12%, condição que eleva a fragilidade potencial dessas áreas.

A classe de fragilidade potencial média abrange cerca de 14.448 km<sup>2</sup> ou 38,3% da área total da bacia. A maior área contínua de fragilidade potencial média está distribuída de

centro para Leste da B.H.I, a partir da confluência dos rios: Dourados, Brilhante e Vacaria, formadores do Rio Ivinhema. Há também a ocorrência de fragilidade potencial média ao Norte do Rio Vacaria, associada a Formação Geológica Caiuá e no extremo Oeste e Sudoeste da bacia, coincidindo com a Formação Geológica Ponta Porã (Foto b).

As áreas com grau médio de fragilidade potencial relacionam-se com a ocorrência de formações geológicas de fragilidade alta (Formação Ponta Porã) e fragilidade média (Formação Caiuá). Os solos oriundos dessas formações possuem fragilidade potencial alta (PV) e muito alta (FT, FF, GX, RQ, SX) nessas áreas. De modo geral, as formações geológicas Ponta Porã e Caiuá originam solos arenosos e francoarenosos. Do ponto de vista da fragilidade textural, esses solos são mais suscetíveis a degradação quando comparados aos argilosos, em condições ambientais semelhantes (DONAGEMMA et al., 2016).

Por outro lado, a predominância de relevo com características planas (0 a 3%), teor de matéria orgânica médio a alto e grau de floclulação acima de 50% contribuiu para redução da fragilidade potencial, gerando uma configuração geral de fragilidade potencial média. Assim, a inserção de novos fatores contribuiu para uma classificação mais pormenorizada da fragilidade potencial do ambiente, condição fundamental para o planejamento de uso e à gestão sustentável dos recursos naturais (GONÇALVES et al., 2011).

Dentre as classes de fragilidade potencial encontradas/mapeadas na BHI, a classe alta foi a menos representativa em termos quantitativos de área geográfica. Observou-se que cerca de 2.335 km<sup>2</sup> ou 6,2% da área total da bacia possui fragilidade potencial alta. De modo geral, as áreas com fragilidade potencial alta estão distribuídas ao longo de toda bacia, em pequenas áreas, se comparada as fragilidades baixa e média.

Na região do alto curso da bacia ocorrem as maiores áreas de fragilidade potencial alta, associadas a presença de declividades mais acentuadas (>12%), quando comparada com a região de médio e baixo curso. A presença de solos rasos (RL e RR) contribui para instabilidade destas áreas aumentando sua fragilidade potencial.

Segundo Santos et al. (2018), solos RL e RR apresentam camada pouco espessa, com contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm a partir da superfície, no caso do solo RL, e sem contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm a partir da superfície para a classe RR, estando associados a terrenos acidentados e pedregosos, no caso da B.H.I, estes fatores limitam o crescimento radicular, o uso de máquinas agrícolas e elevam o risco de erosão e formação de sulcos, ravinas e voçorocas (Foto d).

Fatores como tipo de solo e declividade são decisivos para se impor limitação às formas de ocupação (VALLE et al., 2016). Portanto, as recomendações mais adequadas para

áreas declivosas e com solos rasos são normalmente a preservação da flora e fauna. Wang et al. (2016) identificaram que as maiores taxas de erosão de solos estão relacionadas a ecossistemas frágeis que sofreram mudanças no uso da terra.

A cobertura vegetal natural exerce papel fundamental contra os processos erosivos de uma área, este efeito, em parte, está relacionado a ação das raízes fixadas no solo e ao aporte de restos vegetais, que evitam o impacto direto das gotas de chuva. De maneira geral, os sistemas naturais encontram-se em sua dinâmica normal de ganhos e perdas de matéria, condição que possivelmente levou milhares de anos para adquirir (Nogueira et al., 2019), portanto, qualquer intervenção em áreas de baixa estabilidade deverá ser bem dimensionada a fim de evitar impactos negativos ao ambiente.

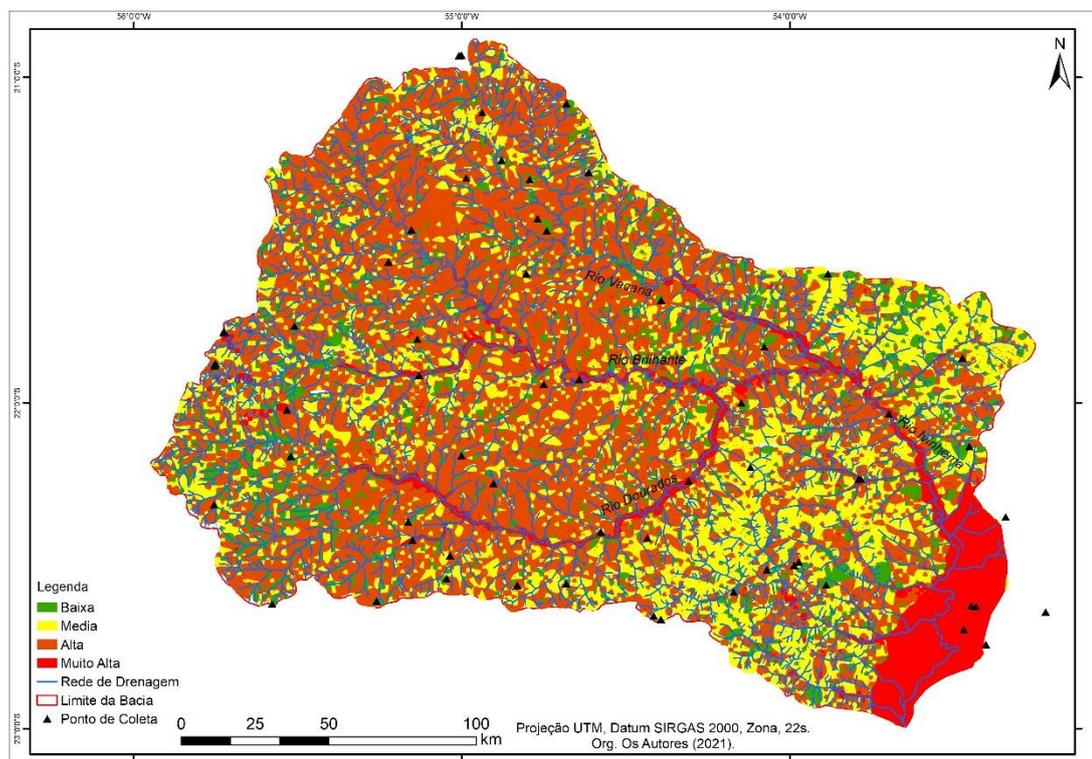
Em termos quantitativos de área geográfica a classe de fragilidade potencial muito alta ocupa a terceira maior área da B.H.I, abrangendo cerca de 2.926 km<sup>2</sup> ou 7,8% da área total da bacia. Situada próxima aos leitos fluviais dos principais rios constituintes da bacia e no extremo Leste, associada a Planícies Fluviais e Terraços Fluviais que confere condições naturais de fragilidade potencial muito alta, em função da instabilidade dos terrenos e ocorrência de inundações periódicas (ABRÃO; BACANI, 2018).

A planície do baixo curso do rio Ivinhema passa por inundações periódicas, característica que favorece a formação de uma infinidade de lagoas e vegetação fechada, ou seja, habitat ideal para perpetuação da diversidade biológica. Esta porção da bacia representa atualmente a última área de ecossistema de planície aluvial da Bacia do Rio Paraná livre de represamento (CARVALHO et al., 2019).

### 3.2 FRAGILIDADE AMBIENTAL

A sobreposição do mapa de fragilidade potencial com o mapa de uso e ocupação da terra possibilitou caracterizar a B.H.I em quatro classes de fragilidade ambiental: fragilidade ambiental baixa, fragilidade ambiental média, fragilidade ambiental alta e fragilidade ambiental muito alta (Figura 2).

FIGURA 2 - MAPA DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVINHEMA, MS



FONTE: O autor (2021).

Comparando os mapas de fragilidade potencial e ambiental pode-se observar que os usos da terra contribuíram para aumentar a fragilidade ambiental no interior da B.H.I. A fragilidade anteriormente considerada alta apenas pelos elementos físicos naturais passou de 2.335 km<sup>2</sup> ou 6,2% para 16,795 km<sup>2</sup> ou 44,6% após a inclusão do uso da terra e cobertura vegetal, especialmente tendo a agricultura como maior abrangência encontrada na bacia, conforme pode ser visto no (Quadro 10, Foto g).

Corroborando com o presente estudo, Martins et al., (2018) observaram predominância de fragilidade ambiental alta, na Bacia Hidrográfica do Rio Peruaçu, Estado de Minas Gerais. Os autores atribuíram a condição de alta fragilidade aos tipos de solos, rasos e hidromórficos, altas declividades e principalmente as classes de uso e cobertura da terra como afloramento rochoso, solo exposto e agricultura.

A presença de solo exposto em 2.248 km<sup>2</sup> ou 5,9% e agricultura em 13.918 km<sup>2</sup> ou 37% da área total da bacia contribuíram para aumentar a fragilidade. Cerca de 36% da área anteriormente classificada com fragilidade potencial baixa deu lugar a fragilidade ambiental alta. Essa conversão do grau de fragilidade revela o quanto o uso e ocupação da terra pode aumentar ou atenuar a fragilidade do ambiente.

QUADRO 10 - FRAGILIDADE AMBIENTAL E ÁREA ABRANGENTE

Grau de fragilidade ambiental	Área km <sup>2</sup>	%	Foto
Baixo	4.400	11,6	
Médio	12.865,5	34,1	
Alto	16.795,2	44,6	
Muito alto	3.626,3	9,6	

FONTE: O autor (2021).

Segundo Santos e Marchioro (2020), a cobertura vegetal fornece proteção ao solo, contribuindo para maior capacidade de infiltração de água e diminuição do escoamento superficial (*surface runoff*). Além de garantir a manutenção das relações ecológicas, estabelecendo um ponto de equilíbrio ambiental, e assim auxiliando na redução da suscetibilidade a erosão dos solos (VALLE et al., 2016).

Semelhantemente a fragilidade potencial média houve predomínio de fragilidade ambiental média de centro para Leste da BHI, a partir da confluência dos rios: Dourados, Brillante e Vacaria, formadores do Rio Ivinhema (Foto f). Todavia, nas regiões de médio e alto curso da bacia a fragilidade ambiental média ocorre, entretanto, em menores áreas se comparada a região de baixo curso da bacia.

Em termos quantitativos de área geográfica a fragilidade ambiental média abrange a segunda maior proporção de área na B.H.I, com cerca de 12.865 km<sup>2</sup> ou 34,1%. Essa classe de fragilidade associa-se com a maior parte dos elementos físicos naturais considerados na

análise com peso médio. Como exemplo pode-se destacar a Formação Geológica Caiuá, caracterizada por arenitos fino-médio avermelhados exibindo estratificação plano-paralela, normalmente com clastos de basalto de dimensões de até 1 cm e leve imbricação (MACHADO et al., 2009).

Os solos oriundos da Formação Caiuá são predominantemente da ordem dos PV, cujo grau de fragilidade adotado na análise foi alto (ROSS, 1994). Apesar de ser considerado um solo de textura frágil, por ser essencialmente arenoso, deve-se ressaltar que os teores de matéria orgânica se situaram entre 20 e 40 g kg<sup>-1</sup> e o grau de floculação entre 50 e 80%. Estes atributos associados aos teores de argila e silte, ainda que baixos se comparados a fração granulométrica predominante, areia, desempenham papel fundamental na estabilização deste ambiente. Segundo Moura-Bueno et al. (2018), a presença de matéria orgânica, silte e argila melhoram a coesão entre as partículas do solo e reduz sua suscetibilidade a desagregação.

Com relação ao uso da terra e cobertura vegetal as áreas classificadas com fragilidade ambiental média, especialmente no baixo curso da bacia, estão associadas as pastagens e cana-de-açúcar. Em estudo na Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio, Estado de Mato Grosso do Sul, Abrão e Bacani (2018), observaram que o uso da terra predominante pela pastagem influenciou o aumento da fragilidade ambiental.

A presença de agricultura de monoculturas (soja e milho) na região de baixo curso da bacia, apesar de ser menos expressiva que na região de médio e alto curso representa um fator de risco à erosão do solo. Essa ideia se justifica pela ocorrência de solos arenosos (PV, RQ e SX), com teor de matéria orgânica variando de baixa a média e maior precipitação pluviométrica comparada as outras partes da bacia.

De maneira geral, a erosão causada pela água da chuva é a forma mais significativa de degradação do solo (ANACHE et al., 2017). A ausência de cobertura do solo, baixos teores de argila e matéria orgânica e relevo dissecado potencializam os problemas de erosão do solo. Portanto, para as regiões de solos areníticos, isto é, de Centro para Leste (Arenito Caiuá e Depósitos Aluvionares) e no Sudoeste da BHI (Formação Ponta Porã) devem ser adotadas o uso de técnicas conservacionistas já desenvolvidas pelas pesquisas da agropecuária brasileira como: Sistema de Plantio Direto, Integração Lavoura Pecuária, Integração Lavoura Pecuária Floresta e Sistemas Agroflorestais (DONAGEMMA et al., 2016).

A fragilidade ambiental baixa abrangeu cerca de 4.400 km<sup>2</sup> ou 11,7% da área total da bacia. Distribui-se preponderantemente nas áreas cobertas por vegetação nativa (Foto e), elemento este da paisagem natural, que confere maior estabilidade ao ambiente, se comparado com áreas destituídas de vegetação (BUENO et al., 2018). Como a vegetação nativa em sua

maior parte está restrita a pequenos fragmentos ao longo de toda a bacia, a fragilidade ambiental baixa refletiu a intensa fragmentação da cobertura vegetal.

Estudo realizado por Storto e Cocato (2018) observaram que a existência de cobertura vegetal em estágio médio e avançado, oferece proteção muito alta aos solos, independentemente de quais sejam, e estando em declividades mais acentuadas ou não. Na mesma direção, Santos e Marchioro (2020) avaliaram os graus de fragilidade potencial e ambiental nos anos de 1970, 2008 e 2012 e demonstraram que a fragilidade ambiental baixa pode ser incrementada com a recuperação da vegetação nativa.

Por outro lado, Valle et al. (2016) relataram que da mesma forma como a cobertura florestal oferece maior proteção em relação aos processos erosivos, a atividade antrópica é capaz de potencializá-los. Esse argumento parece fazer sentido para região do presente estudo, visto que, após inserir o uso da terra e cobertura vegetal cerca de 36% da fragilidade potencial baixa foi convertida em alta fragilidade ambiental.

A fragilidade ambiental muito alta aumentou cerca de 1,8% em relação a fragilidade potencial muito alta. De modo geral, esse aumento ocorreu na região de alto curso da bacia, mais especificamente nos municípios de Ponta Porã e Maracaju, cujas características físicas naturais como a geologia, solos e declividade já sinalizavam alta fragilidade potencial, assim, ao se considerar os usos da terra (agricultura, pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto) elevou-se a instabilidade, resultando em fragilidade ambiental muito alta (Foto h).

O aumento da fragilidade ambiental caracteriza-se como resultado de usos incorretos, em relevo dissecado (>12%) com potencial de suscetibilidade aos processos erosivos, especialmente por estar associados a solos rasos como RL, RR e FF. A exposição do solo sem cobertura vegetal propicia a degradação do mesmo por processo de erosão laminar (BRAGA et al., 2017). Para Storto e Cocato (2018), o uso inadequado de áreas já frágeis devido a acentuada declividade e solos limitados podem agravar e degradar a situação da área em questão.

Em termos quantitativos de área geográfica a fragilidade ambiental muito alta abrange cerca de 3.626 km<sup>2</sup> ou 9,6% da área total da bacia. Presente em sua maior parte na planície do rio Ivinhema e as margens dos leitos fluviais, este grau de fragilidade se justifica pela alta sensibilidade destes ecossistemas, isto é, baixa capacidade de regeneração após passar por uma perturbação/degradação. Para Gouveia e Ross (2019), áreas de planície de inundação são majoritariamente consideradas de muito alta fragilidade, onde o mais recomendado é que sejam utilizadas por usos sustentáveis, com pastoreio nativo com baixas taxas de animais ou apenas agricultura de subsistência. Ressalta-se também que, essas áreas

são muito frágeis a sofrer episódios de inundações nos períodos de maior intensidade de chuvas, o que pode ocasionar perdas econômicas e até mesmo riscos para a vida humana (MANTOVANI; BACANI, 2018).

Esta classificação, no caso da B.H.I, se justifica pela presença de Várzeas e Veredas consideradas pelo código florestal brasileiro como Área de Preservação Permanente (APP) (BRASIL, 2012). A presença de artefatos arqueológicos (pontas de flechas, machados e raspadores de pedra) encontrados entre 0,8 e 1,2 m de profundidade (Fortes et al., 2007), conferem a esta área o estado de sítio de excepcional beleza ou de valor científico, cultural ou histórico de conservação de registros da ocupação no Mato Grosso do Sul, bem como é preconizado pelo código florestal brasileiro, devendo ser preservado (BRASIL, 2012).

#### **4 CONCLUSÃO**

A integração de novos atributos químicos e físicos do solo, bem como dos fatores físicos já consolidados na metodologia tradicional de Ross (1994; 2012) permitiram avaliar que há predominância da fragilidade potencial baixa na B.H.I. A fragilidade potencial baixa está relacionada às características geológica, pedológica e clinográfica presentes na área de estudo.

A maior área contínua de fragilidade potencial média está distribuída de centro para Leste da B.H.I, associada a Formação Geológica Caiuá e a ocorrência de solos arenosos, francoarenosos e hidromórficos. A predominância de relevo com características planas (0 a 3%) contribuiu para atenuação da fragilidade potencial nesta porção da B.H.I.

Situada na região de alto curso da bacia, a fragilidade potencial alta foi associada a presença de solos rasos (RL e RR) e declividade acima de 12%. Em sentido oposto da área ocorre a fragilidade potencial muito alta, associada as planícies de inundações e leitos fluviais.

Com relação a fragilidade ambiental pode-se avaliar que os tipos de uso da terra contribuíram para elevá-la. Áreas anteriormente classificadas com fragilidade potencial baixa deram lugar a fragilidade ambiental alta, devido a conversão do uso da terra que confere pouca ou nenhuma proteção ao solo, como agricultura de ciclo curto e solo exposto. Os remanescentes de vegetação nativa contribuíram para atenuar a fragilidade ambiental, demonstrando-se fundamentais à proteção do solo.

A utilização de técnicas de geoprocessamento como ferramenta de análise possibilitou mapear a fragilidade potencial/ambiental da área de forma holística. A flexibilidade da metodologia possibilita ao analista ou aos gestores do território integrar novos

fatores segundo os objetivos almejados com informações derivadas da fragilidade potencial/ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ABRÃO, C. M. R.; BACANI, V. M. Diagnóstico da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Santo Antônio, MS: subsídio ao zoneamento ambiental. **Boletim Goiano de Geografia, Goiânia**, n. 3, v. 38, p. 619-645, 2018. <https://doi.org/10.5216/bgg.v38i3.56362>.
- ALMEIDA, P. F.; SILVA, J. B. L.; NEVES, F. M. Vulnerabilidade Ambiental do Município de Teixeira de Freitas-BA. **Revista Brasileira de Geografia Física** [online], 13, 1587-1609, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.4.p1587-1609>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. C.; OLIVEIRA, P. T. S.; FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. **Catena**, v. 152, p. 29-39, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.003>
- ARAI, F. K. **Caracterização da disponibilidade hídrica na Bacia Hidrográfica do Ivinhema, MS**. 2010. 127 f. Dissertação (Agronomia). Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, Mato Grosso do Sul, 2010.
- BARRETO, A. B.; TAVARES, D. D.; SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; MARTINS, A. F.; PEREIRA, W. E. Argila dispersa em água e grau de floculação de um Latossolo sob gramíneas no Brejo da Paraíba (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**. v.7, n.3, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3575228>
- BRAGA, C. C. de.; CABRAL, J. B. P.; LOPES, S. M. F.; BATISTA, D. F. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do reservatório da UHE Caçu – Goiás. **Ciência e Natura**. v.39, Ed. Esp. PROCAD/CAPES 2017, p. 81 – 98. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X26978>
- BRASIL. Código Florestal. Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/112651.htm). Acessado em: 28 fev. 2021.
- BUENO, K.; CUNHA, J. E.; BORTOLUZZI, L. N. O entendimento da fragilidade ambiental do município de Guaíra – Paraná. **Caminhos de Geografia** Uberlândia - MG v. 19, n. 68. p. 81–100, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG196806>
- CARVALHO, E. M.; PEREIRA, N. S.; ANSILAGO, M.; GUIMARÃES, F. J. Estudo parcial do plano de manejo do parque estadual das Várzeas do Rio Ivinhema como subsídio para

ações estratégicas. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 5, n. 9, p. 14740-14760 sep. 2019. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n9-3151>

CASSOL, C. J.; de ARRUDA, E. J.; ALOVISI, A. M.T.; ABRÃO, C. M. R.; DAL CORTIVO, N. S.; GNING, A.; DAL POZZO, D. M.; RODRIGUES, R. da S. Teores de fósforo disponível em solos de textura arenosa média e argilosa. **Braz. J. Anim. Environ. Res.**, Curitiba, v. 3, n. 1, p.266-275, 2020.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial. São José dos Campos: SAE/INPE, 2001.

CPRM (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS). Mapas Geológicos 1:1.000.000 Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia\\_basica/cartografia\\_regional/mapa\\_mato\\_grosso\\_sul.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_mato_grosso_sul.pdf). Acessado em 12 de set. de 2019.

DANTSOVA, K. M.; HAYES, C.; PENNINGTON, J. C.; PORTER, B. Sorption of high explosives to waterdispersible clay: influence of organic carbon, aluminosilicate clay, and extractable iron. **Journal of environmental quality**, 38(4),1458-1465, 2009. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0183>

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBREAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAUJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesq Agropec Bras.**, vol. 51, n. 9, p. 1003-1020. 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X201600090000>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

FAO. 2019. Diretrizes Voluntárias para a Gestão Sustentável dos Solos. Roma. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i6874pt/I6874PT.pdf>. Acessado em 15 de fevereiro de 2021.

FERREIRA, P. S.; SILVA, C. A. Dinâmicas e gestão do território, a cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do Rio Brilhante – MS/Brasil. **Physis Terrae**, v. 1, n. 1, p.141-158, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21814/physisterrae.450>

FORTES E.; VOLKER S.; STEVAUX J. C.; MARQUES A. J. Anomalias de drenagem e controles morfotectônicos da evolução dos terraços do baixo curso do rio Ivinhema – MS. **Geociências, São Paulo**, v. 26, n. 3, p. 249-26, 2007. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/1762/1536>. Acessado em 15 de jul. de 2021.

- GONÇALVES, G. G. G.; DANIEL, O.; COMUNELLO, E.; VITORINO, A. C. T.; ARAI, F. K. Determinação da Fragilidade Ambiental de Bacias Hidrográficas. **Floresta**, v.41, n.4, p.797-808, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v41i4.25344>
- GOUVEIA, I. C. M. C.; ROSS, J. L. S. Fragilidade Ambiental: uma Proposta de Aplicação de Geomorphons para a Variável Relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 37, p. 123-136, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v37i0.151030>
- GUERRERO, J. V. R.; LOLLO, J. A.; MOSCHINI, L. E.; LORANDI, R. Carta de Fragilidade Ambiental como instrumento de planejamento e conservação de unidades aquíferas: o caso da bacia do rio Clarinho, SP. **Caderno de Geografia**. v. 28, n. 53, p.385-403, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2018v28n53p385-403>
- IBGE. **Manual Técnico de uso da terra**. 3 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. 171p.
- IBGE. **Manual Técnico de Vegetação**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 175p.
- IVASKO JÚNIOR, S.; MASTELLA, A. D. F.; TRES, A.; TETTO, A. F.; WENDLING, W. T.; SOARES, R. V. Classificação do estado de Mato Grosso do Sul segundo sistema de zonas de vida de Holdridge. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 26, n. 16 p. 629-645, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.61843>
- LIU, X. B.; ZHANG, X. Y.; WANG, Y. X.; SUI, Y. Y.; ZHANG, S. L.; HERBERT, S. J.; DING, G. Soil degradation: a problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China. **Plant, Soil and Environment**, v.56, p.87-97, 2010. <https://doi.org/10.17221/155/2009-PSE>
- LOPES, S. M. F.; CABRAL, J. B. P.; BRAGA, C. de C.; RAMALHO, F. L. Avaliação espaço-temporal do uso da terra nas bacias hidrográficas do ribeirão Paraíso-GO e córrego Cerrado/Cadunga-MG. **Geoambiente On-Line**. n. 27, p. 114-133, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i27.44758>
- LOSS, A.; COMIN, J. J. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. n. 4 v. 39, p.1212-1224, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140718>.
- MACHADO, F. B.; NARDY, A. J. R.; ROCHA, Jr. E. R. V.; MARQUES, L. S.; OLIVEIRA M.A.F. 2009. Geologia e litogeoquímica da Formação Serra Geral nos Estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. **Geociências**, v. 28, n. 4, p. 523-540, 2009.
- MARTINS, R. N.; COLARES, A. P. F.; ALMEIDA, S. L. H.; ZANELLA, M. A.; NERY, C. V. M. Fragilidade potencial e emergente na bacia do rio Peruaçu, região norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomática**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 99-118, abr/jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.3895/rbgeo.v6n2.7521>
- MANTOVANI, J. R. e V. M. BACANI. Uma proposta metodológica de mapeamento de áreas suscetíveis a inundação e/ ou alagamento na bacia hidrográfica do córrego Indaiá-MS. **GEOUSP Espaço e Tempo**, v. 22, n. 3, p. 687-706, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2018.146752>

MIGUEL, A. E. S.; MEDEIROS, R. B.; DECCO, H. F.; W. OLIVEIRA. Avaliação da Fragilidade Potencial da Bacia Hidrográfica do Rio Taquaruçu/MS. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, Seção Três Lagoas, v. 10, n. 18, p. 66-84, 2013.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3ª ed 1ª reimp. Ed. da UFV, 2007. 320p.

MOURA-BUENO, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; MIGUEL, P.; HORST, T. Z. Erosão em áreas de encosta com solos frágeis e sua relação com a cobertura do solo. **Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p. 102-112, 2018. <https://doi.org/10.5380/rsa.v19i1.53738>

NOGUEIRA, A. M.; TOCANTINS, N.; SALOMÃO, F. X. de T. Degradação de áreas com processo de Arenização na Bacia do Córrego Guanabara, município de Reserva do Cabaçal – MT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 12, n. 3, p. 722-737, jun. 2019. ISSN 1984-2295. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.3.p722-737>

NUNES, H. B.; KATO, E.; de SÁ, M. A. C.; NETO, J. P. S.; de CARVALHO, A. dos S. ROSA, V. A. Variações no método de yoder e suas implicações em solos de cerrados com diferentes texturas. **Braz. J. Anim. Environ. Res.**, Curitiba, v. 3, n. 4, p. 2970-2989, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34188/bjaerv3n4-019>

Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema-PRHBHRI. Campo Grande – MS, abril de 2015. Disponível em: <http://www.servicos.ms.gov.br/imasuldownloads/planosdebacia/PLANOIVINHEMA.pdf>. Acessado em 05 de novembro de 2019.

POTT, A.; da SILVA, J. dos S. V.; GOMES, E. L. Características da Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema. **Revista GeoPantanal • UFMS/AGB • Corumbá/MS • N. 16 • 109-124 • jan./jun. 2014.**

ROSS, J. L. S. Land forms and environmental planning: potentialities and fragilities. *Revista do Departamento de Geografia, FFLCH/USP, São Paulo, Volume Especial 30 anos RDG*, p. 38-51, 2012. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0112.0003>

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade ambiental dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia, FFLCH/USP, São Paulo*, p. 63-74, fev. 1994. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>

SANTOS, J. R. U.; MARCHIORO, E. Análise empírica da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, Espírito Santo, Brasil. **Revista do departamento de geografia**, 39, 72-87, 2020. <https://doi.org/10.11606/rdg.v39i0.160946>

SANTOS, H. G. dos.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos.; OLIVEIRA, V. A. de.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de.; ARAUJO FILHO, J. C. de.; OLIVEIRA, J. B. de.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SILVA, J. S. V.; POTT, A.; ABDON, M. M. POTT, V. J.; SANTOS, K, R. Projeto GeoMS: Cobertura vegetal e uso da terra do Estado de Mato Grosso do Sul. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2011. 64p.

SILVA, A. S.; SILVA, I. D. F.; BANDEIRA, L. B., DIAS, B. O.; SILVA NETO, L. D. F. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência rural**, v. 44, n. 10, p. 1783-1789, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20130789>

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; DA CUNHA, J. M.; CAMPOS MANTOVANELLI, B.; AMORIM DE OLIVEIRA, I.; GOMES DE BRITO FILHO, E.; FERREIRA LIMA LEITE, A. Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia**. v. 12, n. 2, 2018. DOI: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n2.34416>

SOUZA, D. S. L.; DELLARGNE, F. L.; MIRA, I. R. C.; SILVA, G. T. G.; SILVA, M. L. Análise e Mapeamento da Fragilidade Ambiental no Município de Inconfidentes–MG. **Revista Brasileira de Geografia Física** [online], 13, 2269-2292, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.5.p2269-2292>

STORTO, C.; COCATO, G. P. Análise de Fragilidade Ambiental a partir de Técnicas de Geoprocessamento: Área de Influência da Hidrelétrica de Mauá-PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 11, (5), 1694-1708, 2018. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.5.p1694-1708>

SUTIL, S. C.; GONÇALVES, J. A. C.; VIEIRA, E. M. Análise comparativa da fragilidade ambiental da bacia do rio Piracicaba a partir da aplicação de dois modelos metodológicos: suporte para o estabelecimento e proposição de Corredores Ecológicos. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.13, n.06, p. 3060-3077, 2020. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.6.p3060-3077>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (2017) - Manual de métodos de análise do solo. 3. ed. Brasília: Embrapa, 573 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>. Acessado em 12 de agosto de 2019.

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

VALLE, I. C.; FRANCELINO, M. R.; PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da Fragilidade Ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, 23, (2), 295-308, 2016. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.107714>

VENDRAME, P. R. S.; EBERHARDT, D. N.; BRITO, O. R.; MARCHÃO, R. L.; QUANTIN, C.; BECQUER, T. Formas de ferro e alumínio e suas relações com textura, mineralogia e carbono orgânico em Latossolos do Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 1, p. 1657-1666, 2011. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32Suplp1657>

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 213-223, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100020>

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, B.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in

China from the end of the 1980s to 2010. *Catena*, v. 137, p. 256-268, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.004>

## CONSIDERAÇÕES FINAIS GERAIS

A interferência do homem no meio ambiente e a utilização inadequada das terras vêm gerando, ao longo do tempo, a insustentabilidade dos recursos naturais. A utilização do solo de maneira sustentável, respeitando suas aptidões e limitações ao cultivo, é indispensável para a obtenção de sucesso na prática agrícola. Para garantir o uso racional dos recursos naturais devem-se considerar as classes de solo, bem como suas características físicas e químicas e os atributos morfométricos da bacia hidrográfica.

As características físicas encontradas nos solos da B.H.I são diversas, e por isso, necessitam de manejos específicos (Capítulo 2). Pode-se constatar alta sensibilidade a erosão, especialmente nos solos de origem sedimentar, os quais representam seis das dez classes de solos amostradas na B.H.I. Embora o relevo em grande parte da Bacia seja plano ou suavemente ondulado, características morfológicas como contraste textural comumente presentes em solos como PV, FT e SX reduz a infiltração e potencializa a erosão em períodos de chuvas intensas e prolongadas.

Para ambientes com essas características, a evolução da agropecuária brasileira tem apresentado novos modelos de produção, ao incorporar os princípios da agricultura conservacionista, como sistema de plantio direto, integração lavoura pecuária, integração lavoura pecuária floresta e sistemas agroflorestais, que possibilitam o uso sustentável da terra e permitem o uso eficiente dos recursos locais disponíveis.

A diversidade de solos presentes na B.H.I se reflete na variação dos atributos químicos analisados (Capítulo 1). Algumas amostras de LV, por exemplo, apresentaram teores de  $Al^{3+}$  considerados tóxicos para maioria das culturas. Entretanto, esse problema pode ser facilmente resolvido por meio da calagem, prática agrícola consolidada na região. Por outro lado, a mesma recomendação é válida para as classes de solo FT, FF, SX, PV, RQ e GX, entretanto, devido à textura desses solos ser essencialmente arenosa as doses de corretivos ou fertilizantes devem ser pequenas e parceladas para evitar a saturação da CTC com o nutriente adicionado, o que causa desbalanço nutricional para as plantas, lixiviação de outros íons e contaminação do lençol freático.

A importância das características físicas e químicas dos solos é inquestionável em todas as questões de produção de alimentos, fibras e energia, mudanças climáticas e

sustentabilidade ambiental. Assim, conhecer os solos para melhor manejá-los pela otimização da aplicação de práticas agronômicas sustentáveis, bem como para executar planejamento de uso das terras por meio de zoneamentos, tornou-se indispensável, inclusive para a definição de políticas públicas.

Com relação a políticas públicas o terceiro capítulo da presente tese mostrou-se fundamental, pois definiu níveis de fragilidade em função das características químicas e físicas dos solos e da morfometria da Bacia Hidrográfica. Os produtos cartográficos elaborados permitiram diagnosticar a fragilidade potencial/ambiental e devem subsidiar propostas de zoneamento ambiental com vista ao ordenamento territorial da B.H.I.