



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

FERNANDA LUISA RAMALHO

**CONCENTRAÇÃO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS E RADIONUCLÍDEOS  
NOS SOLOS DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO PARQUE NACIONAL DAS EMAS**

GOIÂNIA  
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

### E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação       Tese       Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

**Exemplos:** Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

#### 2. Nome completo do autor

Fernanda Luisa Ramalho

#### 3. Título do trabalho

Concentração de elementos potencialmente tóxicos e radionuclídeos nos solos da área de influência do Parque Nacional das Emas

#### 4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

**[1]** Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

**a)** consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

**b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;

- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Fernanda Luisa Ramalho, Discente**, em 18/10/2023, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Felipe Soares Cherem, Usuário Externo**, em 19/10/2023, às 12:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4134384** e o código CRC **C4792CF8**.

**Referência:** Processo nº 23070.044513/2023-07

SEI nº 4134384

FERNANDA LUISA RAMALHO

**CONCENTRAÇÃO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS E RADIONUCLÍDEOS  
NOS SOLOS DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO PARQUE NACIONAL DAS EMAS**

Tese de Doutorado apresentada à banca examinadora no Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás (UFG), como um dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Geografia.

Linha de concentração: Natureza e Produção do Espaço

Linha de pesquisa: Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica

Orientador: Prof. Dr. Luis Felipe Soares Cherem

Coorientador: Prof. Dr. João Batista Pereira Cabral

GOIÂNIA  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Ramalho, Fernanda Luisa

Concentração de elementos potencialmente tóxicos e radionuclídeos nos solos da área de influência do Parque Nacional das Emas [manuscrito] / Fernanda Luisa Ramalho. - 2023. CLXXXI, 181 f.

Orientador: Prof. Dr. Luis Felipe Soares Cherem; co-orientador Dr. João Batista Pereira Cabral.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Socioambientais (Iesa), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Goiânia, 2023.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Solos. 2. unidade de conservação. 3. unidades da paisagem. 4. Elementos Potencialmente Tóxicos. 5. radionuclídeos. I. Cherem, Luis Felipe Soares, orient. II. Título.

CDU 911



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS  
**ATA DE DEFESA DE TESE**

Ata Nº **53/2023** da sessão de Defesa de Tese de **Fernanda Luisa Ramalho** que confere o título de Doutora em **Geografia**, na área de concentração em **Natureza e Produção do Espaço**.

Aos **seis dias do mês de setembro de dois mil e vinte e três**, a partir das **8:30**, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada “**Análise sistêmica de bacia hidrográfica na definição de padrões de qualidade de recursos hídricos na área de influência do Parque Nacional das Emas**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Luis Felipe Soares Cherem (PPGEO/IESA/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Julio Cezar Rubin de Rubin (PUC Goiás)**, membro titular externo; Professora Doutora **Leda Correia Pedro Miyazaki (ICH/UFU)**, membro titular externo; Professor Doutor **Valter Antonio Becegato (UDESC)**, membro titular externo; Professor Doutor **Guilherme Taitson Bueno (IESA/UFG)**, membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Luis Felipe Soares Cherem**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata, que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora aos **seis dias do mês de setembro de dois mil e vinte e três**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Concentração de elementos potencialmente tóxicos e radionuclídeos nos solos da área de influência do Parque Nacional das Emas



Documento assinado eletronicamente por **Luis Felipe Soares Cherem, Usuário Externo**, em 06/09/2023, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Taitson Bueno, Professor do Magistério Superior**, em 06/09/2023, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Valter Antonio Becegato, Usuário Externo**, em 06/09/2023, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Julio Cezar Rubin de Rubin, Usuário Externo**, em 06/09/2023, às 16:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



---

Documento assinado eletronicamente por **LEDA CORREIA PEDRO MIYAZAKI, Usuário Externo**, em 11/09/2023, às 16:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3995242** e o código CRC **0E01056F**.

---

Referência: Processo nº 23070.044513/2023-07

SEI nº 3995242

**COMPOSIÇÃO DA BANCA DE DEFESA**

---

**PROF. DR. LUIS FELIPE SOARES CHEREM**  
**Orientador – PPGeo/IESA**

---

**PROF. DR. GUILHERME TAITSON BUENO**  
**Membro Interno – PPGeo/IESA**

---

**PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. LEDA CORREIA PEDRO MIYAZAKI**  
**Membro Externo – UFU/FACIP**

---

**PROF. DR. VALTER ANTONIO BECEGATO**  
**Membro Externo – UDESC**

---

**PROF. DR. JÚLIO CESAR RUBIN DE RUBIN**  
**Membro Externo – PUC/GOIÁS**

*Dedicatória*

*Dedico esta tese em especial à minha mãe Nilce Elça de Azevedo Ramalho, ao meu esposo Vitor Gusson e a todos aqueles que acreditaram em mim.*

## AGRADECIMENTOS

Foram quatro projetos que se estenderam por três áreas distintas. Foram diversos campos entre Palestina, Iporá, Chapadão do Céu e Mineiros. Você pode imaginar que não será um agradecimento tão simplificado, até porque não faz pesquisa sozinha, certo?

Os agradecimentos são um conjunto de processos que ocorreram ao longo de cinco anos de doutorado, nos quais criei uma rede de apoio importante que me auxiliou na escrita, manipulação dos dados, nas análises de laboratório e na coleta em campo. Dessa forma, este cantinho da tese vai para todas as pessoas que participaram de forma direta ou indireta dessa trajetória, sejam familiares, amigos ou colegas.

A primeira pessoa a quem gostaria de agradecer é a minha mãe Nilce, que me apoiou durante toda a minha trajetória acadêmica. Ela nunca me desamparou e sempre esteve ao meu lado. Ela me ensinou, desde pequena, que eu deveria voar, ir longe e que o estudo seria o caminho. Tenho plena certeza de que meu instinto de Dora Aventureira foi de sua genética. Apesar de todas as suas limitações de acesso à informação, você sempre esteve certa. O estudo não apenas abre caminhos e possibilidades, abre também horizontes, ensina que devemos ser críticos e questionadores no nosso dia a dia.

Outra pessoa crucial neste processo é meu marido Vitor Gusson, o homem mais compreensivo que tive a oportunidade de conhecer. Agradeço por ter sido meu agente de crédito particular nas análises de solos e, o mais importante, a sua paciência e apoio nas minhas decisões.

Junto a esse elo familiar tem meus padrinhos Leandro Moro e Alaine. Obrigada por estarem sempre comigo. A minha madrinha, por estar sempre cuidando de mim com suas orações, mesmo longe. O meu padrinho, por ser um exemplo de profissional e pesquisador, como diria em uma conversa informal: queridinho o mundo precisa conhecê-lo. Você é uma das poucas pessoas fora da curva que conheço. Enfim, além do signo de libras, temos outra semelhança. Como dizia a cantora Rita Lee, somos as ovelhas negras da família.

Gostaria de expressar a minha gratidão ao meu pai Luis e ao meu irmão, Agnaldo Neto, que, apesar das nossas diferenças ideológicas, não poderia deixar de lembrá-los neste momento e dizer o quanto me deram forças para lutar, sobretudo nos últimos anos. Não bastava ser apenas uma bolsista de doutorado de escola pública lutar contra uma sociedade negacionista, tive que lutar com minha própria família.

Para finalizar o meu elo familiar, quero agradecer a um serzinho que apareceu na minha vida durante a graduação. Ele assistiu à minha dissertação e ao doutorado, estando presente em todos os meus translados, Jataí>Ipiacu ou Goiânia>Ipiacu. Sim, meu sobrinho Luis Fernando. Gostaria de dizer

que é tudo para mim e todos os nossos momentos quando você era criança ficarão registados na caixinha da saudade. A tia te ama.

Iniciando os agradecimentos acadêmicos, gostaria de expressar minha gratidão ao meu orientador Luis Cherem, que aceitou encarar este desafio junto comigo. A admiração pelo orientador vem de antes da graduação, quando assisti a uma palestra. No dia, fiquei encantada com a interação dele perante a todos naquele auditório e pensava: "Cara, um dia quero ser assim". Depois, tive a honra de vê-lo ganhar o prêmio em Manaus e, conseqüentemente, a admiração só aumentava. Quando o Programa em Goiânia apresentou o resultado da orientação, meu mundo desabou e fiquei muito feliz. Apesar de ter sido uma orientação tranquila, em diversas ocasiões, achei que havia uma lacuna entre nós. As reuniões sempre foram bastante didáticas e Luis sempre esteve 10 anos luz à nossa frente, o que me impediu de acompanhar e, conseqüentemente, perdia-me no meio do caminho. No entanto, apesar de não ter compreendido de fato onde você queria chegar, paguei para ver e isso custou muito, custou tempo e custou muito mentalmente, mas o que importa é que conseguimos encerrar esse ciclo e que minha admiração por você como pesquisador persiste e finalizo essa etapa questionando: será que foi a pandemia? Talvez tenha sido, pois perdemos a oportunidade de uma maior interação pessoal para compreendermos de forma mais clara o que cada um desejava.

Gostaria de expressar a minha gratidão ao meu co-orientador, João Cabral, com quem fiz uma amizade ao longo do mestrado e doutorado. É importante lembrar que nem tudo são flores, mas a relação a gente cria com o tempo e diálogo, o que é comum no processo, seja em casa ou no trabalho. Em suma, agradeço pela autonomia acadêmica. Você não tem ideia do quanto sou grata pelo seu apoio durante toda essa trajetória, não somente no Laboratório de Geociências, mas também pelo seu apoio psicológico e incentivo para perseguir o meu sonho. Obrigada por abrir as portas academicamente, até mesmo da sua residência junto à Regina e à Rafa, que guardo no coração.

Não posso deixar de lado minha grande equipe de campo, Assunção Barcelos e Sheyla Birro, que nunca me negou uma ida à campo e nem as furadas que me metia. Sheyla sempre esteve ao meu lado desde a graduação, amiga, comadre, companheira de choros e risadas. Já o Assunção, apesar de divergências no mestrado, conseguimos construir uma grande parceirinha nos últimos anos. Sim, vivi para ver o "Sansão" avô babão de pet e isso não tem preço.

A minha consideração especial à Maria Alice e Patrícia Gomes, que me ajudaram tanto em campo quanto em laboratório. Acredito que vocês foram fundamentais nesse processo, pois não seria possível sem vocês.

Não poderia deixar passar importância do auxílio da UFJ no que diz respeito ao transporte e os servidores que não mediram esforços para ajudar, como Edmilson e Vinícius. A disponibilidade

de vocês foi crucial durante o campo. Agradeço a sua colaboração nos translados, ao gama e, sobretudo, no trado. Obrigada por estarem presentes nessa história.

Durante o doutorado, aprendi muito sobre *softwares* e, nesse processo, tive um empurrão do Paulo Marques, que me apresentou o ArcGIS e me ensinou fazer um mapa de localização. Depois, Joelson Passos. Agradeço imensamente ao Joelson pelo tempo que concedeu para me socorrer. Foram horas, várias conexões remotas, foram lives, sempre em busca de esclarecer minhas dúvidas. Você, literalmente, foi de São Luis do Maranhão para a vida. O "garato" do coração grande e verdadeiro.

Nesse percurso teve todo um auxílio de logística em campo, como o Thiago, sua família e Valdir em Iporá, época que fiz os primeiros campos na primeira área de pesquisa, depois no Parque Nacional das Emas, tive ajuda do Marcos Cunha, diretor do Parque, no qual, não mediu esforços em ajudar no transporte, ajudar na estadia durante os campos, além de tudo parceiro de pesquisa.

Do mais, agradecer toda equipe de laboratório Geociências, como Hudson que ajudou na estatística, com confusão? Com brigas? Mas ajudou e muito, ao Wanderlúbio nas análises, Susy em campo, Marcelo e Pollyanna que virou parceiros de artigos científicos.

Agradecer a equipe de Goiânia, como o Daniel por sempre estar disposto em ajudar em trabalhos e na estatística. Agradeço por toda paciência e tempo destinado a sanar todos os meus questionamentos, sem dúvida o meio acadêmico precisa de você. Agradeço também ao Lucas em disponibilizar tutoriais, a Ana Carolina que auxiliou durante a escrita da tese e o Mateus, apesar de não conhecê-lo pessoalmente, nos tornamos colegas de apoio moral! Sim, as conversas das lamentações.. kkkkkkkkkk.. Obrigada por estar disposto a escutar aos chororos que a pesquisa nos proporciona.

Obrigada CAPES (Resolução CPG/PPGEO/IESA 02/2019) por financiar esse processo desde 2019. Sem auxílio financeira a pesquisa estaria à deriva.

*"O que é uma pesquisa científica? É olhar o que ninguém olhou, ver o que ninguém viu? É olhar o que outros já olharam e ver o que não viram? É olhar o que já olharam, ver o que já foi visto e articular dimensões que não foram compreendidas? É observar sistematicamente novos indícios sobre fenômenos já estudados com vistas a compreender suas transformações?"*

(ALMEIDA, 2009, p. 97).

## RESUMO

A pesquisa baseou-se na explanação do histórico de uso e ocupação das áreas dos chapadões do sudoeste de Goiás e, com base nessa análise, a hipótese de que os solos, que estão associados ao uso intensivo da agricultura e pecuária, podem estar enriquecidos com elementos potencialmente tóxicos (EPTs), como zinco (Zn), cádmio (Cd), cobre (Cu), chumbo (Pb), níquel (Ni), arsênio (As), fósforo (P), potássio (K) e por radionuclídeos, como urânio, tório e potássio ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ ). Com base nessa hipótese a tese como objetivo principal avaliar a qualidade ambiental dos solos das bacias hidrográficas da área de influência do PARNA das Emas através da criação de Compartimentos Ambientais que servirão de referência para as regiões de chapadas do cerrado brasileiro. Para cumprir com esse objetivo foram propostos 3 objetivos específicos, a saber: 1. Estabelecer áreas naturais análogas das bacias hidrográficas que drenam o PARNA das Emas, tendo subbacias hidrográfica como unidade de mapeamento, 2. Analisar a espacialização dos EPTs e radionuclídeos na região escolhida; 3. Analisar os níveis dos EPTs e radionuclídeos nos solos da região, com base nos Compartimentos Ambientais criados. Para cumprir com esses objetivos, apoiou-se em várias metodologias, como criação de Unidades da Paisagem (UP), análise de estatística multivariada, , análise dos componentes principais (PCA) para interpretação dos dados de ETPs e radionuclídeos, além da utilização de valores de referência com base na Resolução CONAMA n.460/2003, Cetesb (2004) e trabalho da (BOCARDI, 2019), para ajudar na fundamentação dos valores geoquímicos encontrados na área. Como resultado as UP possibilitaram a criação de oito Compartimentos Ambientais (CA) que representam bacias hidrográficas fora do Parque Nacional das Emas que são análogas às bacias hidrográficas que estão dentro do Parque. Ao comparar os resultados de EPTs dos CA com a Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014) e os elementos radiogênicos com o trabalho de Bocardi (2019) é possível verificar que os elementos que apresentaram maiores problemas foram os ETPs As e Cd, que resultaram em valores de investigação nas áreas que o uso é destinado à agricultura nos CA-2 e CA-3. No CA-4 todos os pontos resultaram em valores de investigação para As e Cd, tanto em áreas agrícolas, quanto no PARNA das Emas. Já o CA-5 exibiram valores de investigações para os ETPs As e Cd nos pontos no interior do PARNA das Emas e no CA-6 o P11 que está na área da UC apresentou valor de investigação para As e valor de prevenção para Cd. O CA-7 e 8 resultou em valor de prevenção para As e valor de investigação para Cd, ambos CA foram em áreas agrícolas. No geral, o CA-4 foi o que mais apresentou problemas em relação aos elementos analisados. A PCA mostrou que CA distintos podem ter a mesma resposta em relação na espacialização dos elementos, como os CA 8, 7 e 6 do grupo 3, que têm as mesmas características devido à formação geológica do Vale do Rio do Peixe, que vai dar origem aos solos mais arenosos da região, sendo os CA com menores problemas enquanto a adsorção dos elementos. O grupo 4 também reuni pontos que apresentam maiores porcentagens de areia em sua estrutura e os grupos 1 e 2 reuni apresentam uma maior concentração de argila e MO em sua estrutura. São pontos que apresentam influência principalmente das Coberturas Detrito-Laterítica. Através dos *outliers*, a PCA conseguiu constatar que existem CA (4, 2 e 1) que foram enriquecidos com P, Ca, Mg, além de ETPs e radionuclídeos provenientes do manejo das áreas agrícolas. Dessa forma, são CA diferentes que apresentam a mesma resposta em relação ao tipo de uso em questão. Esses pontos fazem parte das áreas de chapadões do Brasil Central, convertidas em extensas áreas de monocultura da sola, milho, cana-de-açúcar e algodão ao longo nos últimos 50 anos. Dessa forma, a PCA foi crucial para demonstrar, sobretudo, esses pontos que se distanciam radicalmente dos outros.

**Palavras-chave:** Solos, unidades da paisagem, unidade de conservação, Elementos Potencialmente Tóxicos, radionuclídeos.

## ABSTRACT

The research was based on the explanation of the history of use and occupation of the Chapadões areas in the southwest of Goiás and, based on this analysis, the hypothesis that the soils, which are associated with the intensive use of agriculture and livestock, may be enriched with potentially toxic elements (PTEs), such as zinc (Zn), cadmium (Cd), copper (Cu), lead (Pb), nickel (Ni), arsenic (As), phosphorus (P), potassium (K) and radionuclides, such as uranium, thorium and potassium ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ ). Based on this hypothesis, the main objective of the thesis is to evaluate the environmental quality of the soils of the river basins in the PARNA das Emas area of influence through the creation of Environmental Compartments that will serve as a reference for the plateau regions of the Brazilian cerrado. To achieve this objective, 3 specific objectives were proposed, namely: 1. Establish analogous natural areas of the river basins that drain the PARNA das Emas, with hydrographic sub-basins as a mapping unit, 2. Analyze the spatialization of EPTs and radionuclides in the chosen region; 3. Analyze the levels of EPTs and radionuclides in the region's soils, based on the Environmental Compartments created. To achieve these objectives, it was supported by various methodologies, such as the creation of Landscape Units (UP), multivariate statistical analysis, principal component analysis (PCA) for the interpretation of ETPs and radionuclides data, in addition to the use of values reference based on CONAMA Resolution n.460/2003, Cetesb (2004) and work by (BOCARDI, 2019), to help support the geochemical values found in the area. As a result, the UP enabled the creation of eight Environmental Compartments (CA) that represent river basins outside the Emas National Park that are analogous to the river basins inside the Park. When comparing the results of CA EPTs with CONAMA Resolution n.460/2013 and Cetesb (2014) and the radiogenic elements with the work of Bocardi (2019) it is possible to verify that the elements that presented the greatest problems were the ETPs As and Cd, which resulted in research values in areas intended for agricultural use in CA-2 and CA-3. In CA-4, all points resulted in investigational values for As and Cd, both in agricultural areas and in PARNA das Emas. CA-5 showed investigational values for the ETPs As and Cd at points inside PARNA das Emas and in CA-6, P11, which is in the UC area, presented investigational value for As and prevention value for Cd. CA-7 and 8 resulted in prevention value for As and investigational value for Cd, both CA were in agricultural areas. Overall, the CA-4 was the one that presented the most problems in relation to the elements analyzed. The PCA showed that different CAs can have the same response in relation to the spatialization of the elements, such as CA 8, 7 and 6 of group 3, which have the same characteristics due to the geological formation of the Vale do Rio do Peixe, which will give rise to the sandiest soils in the region, with CA having fewer problems regarding the adsorption of elements. Group 4 also has points that have higher percentages of sand in their structure and groups 1 and 2 have a higher concentration of clay and OM in their structure. These are points that are mainly influenced by Detritus-Lateritic Covers. Through the outliers, the PCA was able to verify that there are CA (4, 2 and 1) that were enriched with P, Ca, Mg, in addition to ETPs and radionuclides from the management of agricultural areas. Therefore, they are different CAs that present the same response in relation to the type of use in question. These points are part of the plateau areas of Central Brazil, converted into extensive monoculture areas of sole, corn, sugar cane and cotton over the last 50 years. In this way, the PCA was crucial to demonstrate, above all, these points that are radically different from the others.

**Keywords:** Soils, landscape units, conservation unit, Potentially Toxic Elements, radionuclides.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-</b>	Localização da região de análise.....	25
<b>Figura 2-</b>	Litologia da área de estudo.....	26
<b>Figura 3-</b>	Mapa do relevo da região de análise.....	28
<b>Figura 4-</b>	Depressões raras.....	29
<b>Figura 5-</b>	Planícies e terraços fluviais.....	29
<b>Figura 6-</b>	Patamares da alta bacia do Rio Verde.....	30
<b>Figura 7-</b>	Característica do relevo: hipsométrico.....	31
<b>Figura 8-</b>	Característica do relevo: declividade.....	32
<b>Figura 9-</b>	Mapa de solos.....	33
<b>Figura 10-</b>	Representação dos perfis de dois grandes grupos de Latossolos da região.	34
<b>Figura 11-</b>	Perfil topográfico da região de análise.....	37
<b>Figura 12-</b>	Fluxograma conceitual da tese.....	45
<b>Figura 13-</b>	Fluxograma da dinâmica natural dos metais pesados e elementos radiogênicos no solo.....	47
<b>Figura 14-</b>	Série radioativa natural do $^{238}\text{U}$ .....	54
<b>Figura 15-</b>	Série radioativa natural do $^{232}\text{Th}$ .....	55
<b>Figura 16-</b>	Procedimento metodológico passo 1.....	57
<b>Figura 17-</b>	Procedimento metodológico passo 2. ....	58
<b>Figura 18-</b>	Procedimento metodológico passo 3.....	59
<b>Figura 19-</b>	Procedimento metodológico passo 4. ....	61
<b>Figura 20-</b>	Procedimento metodológico passo 5. ....	62
<b>Figura 21-</b>	Procedimento metodológico passo 6. ....	64
<b>Figura 22-</b>	Espacialização dos pontos segundo os compartimentos ambientais criados.	66
<b>Figura 23-</b>	Representação das classes de textura pelo triângulo textural.....	68
<b>Figura 24-</b>	Celular e Gamaespectrômetro.....	70
<b>Figura 25-</b>	Preparação de dados.....	71
<b>Figura 26-</b>	Calibração da imagem do <i>Google Earth</i> .....	72
<b>Figura 27-</b>	Leitura em campo com o celular.....	73
<b>Figura 28-</b>	Exportando arquivos do gamespectrometro.....	73
<b>Figura 29-</b>	Localização da região de análise.....	79
<b>Figura 30-</b>	Procedimento metodológico das Unidades de Paisagem.....	81
<b>Figura 31-</b>	Procedimento metodológico da Compartimentação Ambiental.....	83
<b>Figura 32-</b>	Mapa de primeira hierarquia das unidades de paisagem.....	84

<b>Figura 33-</b>	Mapa dos Compartimentos Ambientais criado.....	<b>85</b>
<b>Figura 34-</b>	Áreas de Patamares no PARNA das Emas.....	<b>95</b>
<b>Figura 35-</b>	Característica da área de Chapadão das Emas-Taquari dentro do PARNA das Emas.....	<b>96</b>
<b>Figura 36-</b>	Localização da área de estudo.....	<b>103</b>
<b>Figura 37-</b>	Fluxograma metodológico do capítulo 2.....	<b>104</b>
<b>Figura 38-</b>	Diagrama de textura dos solos da região de análise.....	<b>105</b>
<b>Figura 39-</b>	Gráfico boxplot de K (cmolc/dm <sup>3</sup> ).....	<b>110</b>
<b>Figura 40-</b>	Gráfico boxplot de Cu e Zn.....	<b>112</b>
<b>Figura 41-</b>	Gráfico boxplot As, Cd, Pb e Ni.....	<b>115</b>
<b>Figura 42-</b>	Gráfico box plot de <sup>40</sup> K, <sup>238</sup> U e <sup>232</sup> Th em relação ao uso e tipo de solo.....	<b>117</b>
<b>Figura 43-</b>	Uso de calcário no manejo do solo.....	<b>125</b>
<b>Figura 44-</b>	Localização da área de estudo.....	<b>134</b>
<b>Figura 45-</b>	Fluxograma da análise dos ETPs e radionuclídeos à partir dos Compartimentos Ambientais.....	<b>135</b>
<b>Figura 46-</b>	Espacialização dos ETPs e elementos radionuclídeos.....	<b>137</b>
<b>Figura 47-</b>	Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-1.....	<b>138</b>
<b>Figura 48-</b>	Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-2	<b>140</b>
<b>Figura 49-</b>	Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-3.....	<b>142</b>
<b>Figura 50-</b>	Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-4.....	<b>144</b>
<b>Figura 51-</b>	Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-5.....	<b>145</b>
<b>Figura 52-</b>	Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-6.....	<b>147</b>
<b>Figura 53-</b>	Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-7.....	<b>148</b>
<b>Figura 54-</b>	Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-8.....	<b>149</b>
<b>Figura 55-</b>	Análise dos Componentes Principais dos ETPs e radionuclídeos em relação aos Compartimentos Ambientais criados.....	<b>152</b>

## LISTA DE QUADRO

<b>Quadro 1-</b>	Unidades de paisagens com base da Teoria de Bertrand.....	<b>41</b>
------------------	---	-----------

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b>	Teores médios de EPTs na crosta terrestre e em diferentes tipos de rochas.....	<b>49</b>
<b>Tabela 2-</b>	Concentrações médias de radionuclídeos em diferentes tipos de rochas. .....	<b>52</b>
<b>Tabela 3-</b>	Relação dos dados adquiridos para o banco de dados.....	<b>60</b>
<b>Tabela 4-</b>	Descrição das categorias pedológicas, geológicas e das atividades antrópicas observadas para cada ponto de amostragem das bacias hidrográficas da área de influência do PARNA das Emas.....	<b>67</b>
<b>Tabela 5-</b>	Valores orientadores de EPTs presentes nos solos conforme a Resolução CONAMA n. 460/2013 e Cetesb (2014).....	<b>75</b>
<b>Tabela 6-</b>	Média da concentração de atividade natural em Bq Kq <sup>-1</sup> dos elementos <sup>40</sup> K, <sup>238</sup> U, <sup>232</sup> Th.....	<b>75</b>
<b>Tabela 7-</b>	Representação do tamanho das unidades de paisagem nos Compartimentos Ambientais. ....	<b>86</b>
<b>Tabela 8-</b>	Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 1.	<b>87</b>
<b>Tabela 9-</b>	Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 2.	<b>88</b>
<b>Tabela 10-</b>	Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 3.	<b>89</b>
<b>Tabela 11-</b>	Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 4.	<b>90</b>
<b>Tabela 12-</b>	Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 5.	<b>90</b>
<b>Tabela 13-</b>	Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 6	<b>91</b>
<b>Tabela 14-</b>	Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 7.	<b>92</b>
<b>Tabela 15-</b>	Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 8.	<b>93</b>
<b>Tabela 16-</b>	Descrição dos parâmetros CO e MO para cada tipos de solo.....	<b>106</b>
<b>Tabela 17-</b>	Descrição do parâmetro CTC (cmolc/dm <sup>3</sup> ) para cada tipos de solo.	<b>107</b>
<b>Tabela 18-</b>	Descrição do parâmetro pH (H <sub>2</sub> O) para cada tipos de solo.....	<b>107</b>
<b>Tabela 19-</b>	Descrição do parâmetro Al (cmolc/dm <sup>3</sup> ) para cada tipos de solo.....	<b>108</b>
<b>Tabela 20-</b>	Descrição do parâmetro Ca (g/dm <sup>3</sup> ) para cada tipos de solo.....	<b>108</b>
<b>Tabela 21-</b>	Descrição do parâmetro Mg (g/dm <sup>3</sup> ) para cada tipos de solo.....	<b>109</b>
<b>Tabela 22-</b>	Descrição do parâmetro K (cmolc/dm <sup>3</sup> ) para cada tipos de solo.....	<b>109</b>
<b>Tabela 23-</b>	Descrição do parâmetro Zn (mg/dm <sup>3</sup> ) para cada tipos de solo.....	<b>111</b>
<b>Tabela 24-</b>	Descrição do parâmetro CU (mg/dm <sup>3</sup> ) para cada tipos de solo.....	<b>111</b>
<b>Tabela 25-</b>	Descrição do parâmetro As (mg/kg <sup>-1</sup> ) para cada tipos de solo.....	<b>112</b>

<b>Tabela 27-</b>	Descrição do parâmetro Ni ( $\text{mg/kg}^{-1}$ ) para cada tipos de solo.....	<b>113</b>
<b>Tabela 28-</b>	Descrição do parâmetro Pb ( $\text{mg/kg}^{-1}$ ) para cada tipos de solo.....	<b>113</b>
<b>Tabela 29-</b>	Descrição do parâmetro Cd ( $\text{mg/kg}^{-1}$ ) para cada tipos de solo.....	<b>114</b>
<b>Tabela 30-</b>	Descrição do parâmetro $^{40}\text{K}$ (pct) para cada tipos de solo.....	<b>116</b>
<b>Tabela 31-</b>	Descrição do parâmetro $^{238}\text{U}$ (ppm) para cada tipos de solo.....	<b>116</b>
<b>Tabela 32-</b>	Descrição do parâmetro $^{232}\text{Th}$ (ppm) para cada tipos de solo.....	<b>117</b>
<b>Tabela 33-</b>	Valores orientadores de EPTs presentes nos solos conforme a Resolução CONAMA n. 460/2013 e Cetesb (2014).....	<b>119</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$^{232}\text{Th}$ = Thório 232

$^{238}\text{U}$ = Urânio 238

$^{40}\text{K}$ = Potássio 40

ABRACAL= Associação brasileira dos produtores de calcário agrícola

Al= Alumínio

APP= Área de Proteção Permanente

Ar= Arsênio

BH= Bacia Hidrográfica

Ca= Cálcio

CA= Compartimento Ambiental

Cd= Cádmiio

CO= Carbono Orgânico

CTC= Capacidade de Troca de Cátions

Cu= Cobre

EPTs= Elementos Potencialmente Tóxicos

FAO= Food and agriculture organizations oh the united nations

Fe= Ferro

GM= Gleissolo Melânico

IAEA= International Atomic Energy Agency

ISA= Instituto Sócio-Ambiental

K= Potássio

LVa= LATOSSOLO VERMELHO-Amarelo

LVd= LATOSSOLO VERMELHO-Distrófico

LVw= LATOSSOLO VERMELHO-Ácrico

Mg= Magnésio

MO= Matéria Orgânica

Ni= Níquel

°C= Graus Celsius

ONU= Organização das Nações Unidas

Ox= Organossolo Háptico

P= Fósforo

PARNA das Emas- Parque Nacional das Emas

Pb= Chumbo

PCA= Análise dos Componentes Principais

pH= Potencial Hidrogeniônico

ppm= Partes por milhão

RQ= Neossolo Quartzarênico

SIG's= Sistema de Informação Geográficas

UC's = Unidades de Conservação

UNSCEAR= United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

USEPA-United States Environment

ZCAS= Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCON= Zona de Convergência de Umidade

Zn= Zinco

## SUMÁRIO

### Sumário

<b>APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>1. INTRODUÇÃO E PROBLEMÁTICA .....</b>	<b>19</b>
1.2 HIPÓTESE .....	20
1.3 JUSTIFICATIVA .....	21
1.3 OBJETIVOS .....	22
1.4 ESTRUTURA DA TESE .....	23
<b>2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA REGIÃO DE ANÁLISE .....</b>	<b>24</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>38</b>
3.1 A TEORIA GERAL DE SISTEMAS NA COMPREENSÃO DA PAISAGEM GEOGRÁFICA .....	39
3.2 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO ÂNCORA AOS ESTUDOS GEOSISTÊMICOS ...	42
3.3 QUALIDADE DOS SOLOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	46
<b>1.3.1 Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) .....</b>	<b>49</b>
<b>3.3.2 Radionuclídeos .....</b>	<b>51</b>
4.1 COMPARTIMENTAÇÃO AMBIENTAL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	56
<b>4.1.1. Definição e delimitação das bacias hidrográficas e seus interflúvios....</b>	<b>56</b>
<b>4.1.2 Unidades da Paisagem .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1.3 Compartimentação Ambiental.....</b>	<b>63</b>
4.2. ANÁLISE DOS SOLOS .....	65
4.2.1 Pontos de coletas .....	65
4.2.2 Análise de textura dos solos .....	68
4.2.3 Variáveis químicas .....	69
4.2.4 Variáveis radionuclídeos .....	69
4.2.5 Análise estatística multivariada .....	74
<b>2.4.1 Ordenamento jurídico em relação a qualidade e quantidade de EPT ...</b>	<b>74</b>

<b>CAPÍTULO 1 - UNIDADES DA PAISAGEM COMO SUBSÍDIO DA CRIAÇÃO DE COMPARTIMENTOS AMBIENTAIS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO CERRADO BRASILEIRO .....</b>	<b>76</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>76</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>76</b>
<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>77</b>
<b>2.MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>79</b>
2.1. ÁREA DE ESTUDO .....	79
2.2. DELIMITAÇÃO DE UNIDADES DA PAISAGEM .....	80
2.3. COMPARTIMENTAÇÃO AMBIENTAL.....	82
<b>3.RESULTADO E DISCUSSÕES .....</b>	<b>83</b>
<b>4.CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>97</b>
<b>CAPÍTULO 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS (ETPS) E RADIONUCLÍDEOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ÁREA DE CERRADO NO PLANALTO CENTRAL BRASILEIRO .....</b>	<b>99</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>99</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>99</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>100</b>
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>102</b>
2.1. ÁREA DE ESTUDO .....	102
2.2. VARIÁVEIS TEXTURAIS, BIOLÓGICAS, QUÍMICAS E RADIONUCLÍDEOS .....	104
<b>3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>105</b>
3.1. VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS EM RELAÇÃO A CADA TIPO DE SOLO...106	
3.2. VARIABILIDADE DOS ETPS SEGUNDO A RESOLUÇÃO CONAMA N. 460/2013 E CETESB (2014).....	118
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>120</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>129</b>

<b>CAPITULO 3- CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS E RADIONUCLÍDEOS NOS COMPARTIMENTOS AMBIENTAIS DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO PARQUE NACIONAL DAS EMAS .....</b>	<b>131</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>131</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>131</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>132</b>
<b>2. MATERIAIS E MÉTODO.....</b>	<b>134</b>
2.1. CARATERIZAÇÃO DA ÁREA.....	134
2.2. ANÁLISE DOS COMPARTIMENTOS AMBIENTAIS.....	135
<b>3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>135</b>
3.1 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 1 (CA-1) .....	138
3.2 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 2 (CA-2) .....	139
3.3 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 3 (CA-3).....	142
3.4 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 4 (CA-4) .....	143
3.5 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 5 (CA-5) .....	145
3.6 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 6 (CA-6) .....	146
3.7 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 7 (CA-7) .....	147
3.8 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 8 (CA-8) .....	149
3.9 ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS DOS ETPS E RADIONUCLÍDEOS DO SOLO .....	151
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>156</b>
<b>CONCLUSÃO DA TESE.....</b>	<b>158</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>161</b>

## APRESENTAÇÃO

### 1. INTRODUÇÃO E PROBLEMÁTICA

Nos últimos anos, o Cerrado tem sido um território privilegiado pelo agronegócio, sobretudo devido à expansão das atividades produtivas de carne e grãos. Essa condição foi alcançada através da ligação entre as atividades agrícolas e a pecuária, aliada à intensa aplicação de capital e tecnologia (SILVA, 2013). Esse modelo produtivo iniciou-se com a abertura da fronteira do Cerrado, impulsionada pela mudança da capital para Brasília em 1960. A partir daí, começaram-se os investimentos voltados para construção de estradas, à expansão da agricultura e da pecuária, que estão intimamente ao desmatamento e fragmentação da vegetação natural.

No Sudoeste de Goiás, uma região *core* do Cerrado, o uso e cobertura da terra tem como atividade principal a monocultura de soja, milho, algodão, cana-de-açúcar e pequenas áreas destinadas à criação gado de corte. Este modelo de uso é consequência das políticas públicas implementadas no estado de Goiás, como o PRODECER (Programa de Cooperação Nipo-Brasileiro para o Desenvolvimento Agrícola dos Cerrados), que favorecem a atividade agropecuária, em geral nas áreas de chapadões, onde é possível obter até duas safras anuais de grãos (BECEGATO et al., 2019; LIMA; ASSUNÇÃO; SCOPEL, 2019; RIBEIRO; FARIA; CEZARE, 2019).

Nos últimos 50 anos, foram adotadas diversas estratégias de manejo no Cerrado visando aumentar a produtividade agrícola, incluindo a utilização de plantio direto, ou a interação da cultura de grãos com o gado de corte durante o período de estiagem, visando o controle de temperatura, umidade e disponibilidade de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (CO) (BONFIM-SILVA et al., 2014; MORAES TAVARES et al., 2019).

A calagem é o método de manejo mais utilizado em áreas de Cerrado, fornecendo a neutralização da acidez do solo, fornecendo cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e melhorando o ambiente radicular da planta (CARNEIRO et al., 2018). Devido à baixa concentração de fósforo nesses solos, é utilizado a adubação fosfatada durante o manejo, além do uso de agrotóxicos que contêm concentrações significativas de compostos químicos e radionuclídeos, como Pb, Cd, <sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U, e <sup>232</sup>Th, entre outros, pode contribuir para a contaminação do meio ambiente, uma vez que são tóxicos e, até mesmo radioativos, quando sua concentração aumenta acima dos níveis normais, em associação com as atividades antrópicas (BAGHDADY; AWAD; GAD, 2018; BECEGATO et al., 2019).

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento- MAPA (2019) divulgou que o maior número de agroquímicos autorizados para uso desde o início da série permitidos para uso desde 2005, totalizando 467 produtos disponíveis para consumo. Além disso, cerca de 44% dos princípios ativos

permitidos no Brasil são proibidos na Europa (RAMOS et al., 2021). Os autores ressaltam que alguns desses ativos estão relacionados ao aparecimento de deficiência intelectual em crianças, por exemplo.

A contaminação no solo por esses aditivos pode causar danos à saúde humana, das plantas e dos animais (MOREIRA et al., 2012) e de outros compartimentos, como as águas superficiais, os sedimentos, o lençol freático e os aquíferos (GHAYORANEH; QISHLAQI, 2017). A emissão desses componentes por atividades antrópicas é três vezes maior que nos fluxos naturais (SPOSITO; PAGE, 1984), tendendo a ser mais flexível, e tornando-se mais disponíveis do que nos processos pedogênicos ou litogênicos (KUO; HEILMAN; BAKER, 1983).

No entanto, existem duas formas de contaminação: por exposição (ocupacional, alimentar e ambiental) e por intoxicação (aguda, sub-aguda e crônica). É possível encontrar pesquisas que reforçam o impacto de fertilizantes na saúde humana, como problemas respiratórios em crianças menores que 5 anos associadas ao uso do agrotóxico nas lavouras de Lucas do Rio Verde, malformação de crianças (fendas labiais e palatinas, as do aparelho osteomuscular e congênita) associadas à exposição dos pais com ao uso dos agroquímicos em cidades do Mato Grosso (UECKER, 2012; UECKER, 2012), além da contaminação no leite materno (PALMA, 2011).

Há estudos que retratam da morbimortalidade causada pelo câncer infantojuvenil (CURVO; PIGNATI; PIGNATTI, 2013; RODRIGUES, 2018). Mortalidade em adultos por câncer de próstata, mama e colo do útero e problemas na pele, ligados ao uso de agrotóxicos em regiões de monoculturas (GHAYORANEH; QISHLAQI, 2017; DUTRA et al., 2020; RAMOS et al., 2021). Reforçando essa ligação de câncer com o uso de agrotóxicos. Pedroso et al., (2022) analisaram 62 artigos de pesquisa realizados nos Estados Unidos, França, Índia e Brasil que relacionam a intoxicação por inseticidas, herbicidas e fungicidas com o câncer de bexiga, próstata, mama, linfoma e leucemia. Outro estudo recente que merece destaque foi conduzido nos municípios de Jataí, Montividiu e Silvânia no estado de Goiás. Os pesquisadores identificaram biomarcadores no DNA de trabalhadores rurais que estão relacionados ao uso de pesticidas (RAMOS et al., 2021).

## 1.2 HIPÓTESE

Desde a formação do planeta, todos os elementos metálicos e radioativos estão presentes no meio ambiente e estão distribuídos no solo em condições naturais, sendo classificados como elementos litogênicos que fazem parte dos ciclos biogeoquímicos naturais, em que sua fração é liberada das rochas por meio do processo de intemperismo. O processo é composto por uma ciclagem que ocorre por vários compartimentos, por processos bióticos e abióticos, até atingir o seu destino nas águas superficiais, sedimentos e oceanos (ALLOWAY, 1995; KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 1992; MOREIRA-NORDEMANN, 1987). Acrescido a isso, a concentração desses elementos em

diferentes tipos de solos dependerá do teor da rocha de origem e do grau de intemperização que esse material sofreu, sendo as rochas sedimentares (arenitos e calcários) as que apresentam menores concentrações em relação às rochas ígneas ultrabásicas e básicas (LÓPEZ, 2015). Portanto, podem existir sítios naturalmente enriquecidos que se apresentam colonizados por biotas adaptadas a essa condição de teores altos de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) como, zinco (Zn), cádmio (Cd), cobre (Cu), chumbo (Pb), níquel (Ni), arsênio (As), fósforo (P), potássio (K) e radionuclídeos como, urânio, tório e potássio ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ ) (TAVARES, 2013).

Embora existam lugares enriquecidos naturalmente, as atividades antrópicas são as responsáveis por grande parte dos dados ambientais relacionados à presença desses elementos, o que é denominado como processo antropogênico ou fontes contaminantes advindos das atividades industriais, urbanas e práticas de agricultura e pecuária, os quais podem ter sua toxicidade acrescida nos solos (IORDACHE et al., 2020; YANG et al., 2020). Esse aumento causado pela atividade antrópica pode causar a contaminação dos solos? Causar contaminação em outros compartimentos ambientais como nos ambientes aquáticos (água e sedimentos)? Esse aumento pode impactar a saúde humana? Pode acumular em organismos vivos?. Esses elementos (ETPs e radionuclídeos) podem ser usados como indicadores de impactos ambientais em bacias hidrográficas?

### 1.3 JUSTIFICATIVA

É importante levar em consideração que nem toda área natural convertida em algum tipo de uso antrópico estará necessariamente contaminada. Mas, ao longo dos anos, alguns elementos podem se acumular no meio ambiente, e isso é influenciado pelo tipo de manejo empregado e pelas condições físicas naturais. A área de estudo está localizada na região de Chapadas do Planalto Central Brasileiro, que representa a área central do Cerrado. Trata-se de uma massa de terra muito antiga e estável, onde o aplanamento e a erosão generalizada permitiram o desenvolvimento de uma superfície lisa extensa, intimamente associada a Latossolos profundos de textura argilosa ou muito argilosa (OLIVEIRA et al., 2023).

Dessa forma, essas áreas foram sendo convertidas para extensas áreas voltadas à monocultura, sobretudo de soja, milho, algodão e cana-de-açúcar, o que faz com que o Cerrado brasileiro perdesse mais da metade de seus 2 milhões de  $\text{km}^2$  nos últimos 55 anos e, concomitantemente, se tornasse celeiro do Brasil, com mais de 20 milhões de terras agrícolas e 56 milhões de hectares (ha) de pastagens cultivadas (FAO, 2015; MAPBIOMAS, 2017; LATRUBESSE et al., 2019). Em Goiás, 46% das bacias hidrográficas não atendem aos requisitos do Código Florestal Brasileiro, que exige 30% de área preservada, o que resultou numa extensa fragmentação da vegetação nativa e muitas das

Unidades de Conservação (UCs) não garantem a manutenção ou a representatividade de espécies vegetais e animais (LATRUBESSE et al., 2019).

Diante deste cenário, é crucial assegurar a manutenção e/ou a ampliação dessas UCs no Cerrado, uma vez que elas são consideradas áreas de conservação e proteção por manterem as características físicas naturais daquele ecossistema. O Parque Nacional das Emas (PARNA das Emas) tem uma área de 132.784 mil hectares (ISA, 2022). É uma UC que está cercada por extensas lavouras de soja, milho, algodão e cana-de-açúcar, que recobrem as terras dos municípios de Chapadão do Céu, Serranópolis, Mineiros, Alto-Taquari e Costa Rica. Todavia, a representatividade dessa UC ultrapassa os limites interestaduais, uma vez que está numa área de interflúvio de três importantes regiões hidrográficas: Paraná, Tocantins-Araguaia e Paraguai. Além disso, tem um papel importantíssimo na ciclagem de nutrientes das áreas de nascentes do rio Corrente e rio Araguaia, além de contribuir para a manutenção do aquífero Guarani por influência da Formação Botucatu.

Diante dessa relevância, o PARNA das Emas foi utilizado como referência para avaliar os níveis de contaminação e a qualidade dos solos das regiões de cerrado dos chapadões goiano, uma vez que a carência de dados no território brasileiro e ao fato de que muitos trabalhos necessitam utilizar valores amplos que não correspondem à realidade da pesquisa. No Brasil, os trabalhos que versam pela qualidade dos solos, estão ancorados pela Resolução CONAMA n.º 420 de 2009, 460 de 2013 ou pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo-CETESB (BRASIL, 2013; CETESB, 2014). Existem também trabalhos que criam áreas de referência, são áreas com vegetação natural que servirão como parâmetro para comparações com áreas convertidas para fins agropecuários ou urbano, como o trabalho de Bocardí (2019), que estabeleceu valores de referência para os radionuclídeos ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) no estado do Paraná.

### 1.3 OBJETIVOS

A tese teve como objetivo principal avaliar a qualidade ambiental dos solos das bacias hidrográficas da área de influência do PARNA das Emas através da criação de Compartimentos Ambientais que servirão de referência para as regiões de chapadas do cerrado brasileiro. Para cumprir com esse objetivo foram propostos 3 objetivos específicos, a saber: 1. Estabelecer áreas naturais análogas das bacias hidrográficas que drenam o PARNA das Emas, tendo subbacias hidrográficas como unidade de mapeamento, 2. Analisar a espacialização dos EPTs e radionuclídeos na região escolhida; 3. Analisar os níveis dos EPTs e radionuclídeos nos solos da região, com base nos Compartimentos Ambientais criados.

#### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese foi dividida em 3 sessões. A primeira sessão foi composta pela apresentação, caracterização física da área, levantamento bibliográfico que serviu de base para a estruturação dos capítulos. Teve como intuito analisar a dinâmica dos EPTs e dos radionuclídeos nas bacias hidrográficas por meio da análise sistêmica da paisagem e a descrição detalhada da metodologia da criação do Compartimento Ambiental e análise dos ETPs.

A segunda sessão engloba os três capítulos que respondem individualmente aos objetivos específicos. O Capítulo 1, intitulado *Unidades da Paisagem como subsídio da criação de Compartimentos Ambientais em bacias hidrográficas do cerrado brasileiro*, teve o objetivo de elaborar um modelo de Compartimentos Ambientais em quatro bacias hidrográficas que compreendesse as relações funcionais e estruturais das áreas fora de uma Unidade de Conservação (UC) que fossem sub-representadas na UC. O Capítulo 2 trata da *Análise estatística dos Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) e radionuclídeos nas bacias hidrográficas em área de Cerrado no Planalto Central Brasileiro*. Consiste na análise como os radionuclídeos, potássio ( $^{40}\text{K}$ ), urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e os EPTs cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu), arsênio (As), níquel (Ni), chumbo (Pb) e cádmio (Cd) se comportam nas bacias hidrográficas que fazem parte da influência do Parque Nacional das Emas. O Capítulo 3 intitulado *Concentração dos Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) e radionuclídeos nos Compartimentos Ambientais da área de influência do Parque Nacional das Emas*, teve o objetivo principal classificar os Compartimentos Ambientais que apresentam maior impacto em relação ao enriquecimento no solo a partir dos EPTs (Zn, Cu, As, Ni, Pb e Cd) e radionuclídeos ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ), com base na Resolução CONAMA n.460 e Cetesb (2004) para os valores de ETPs e radionuclídeos com base no trabalho de Bocardi (2019).

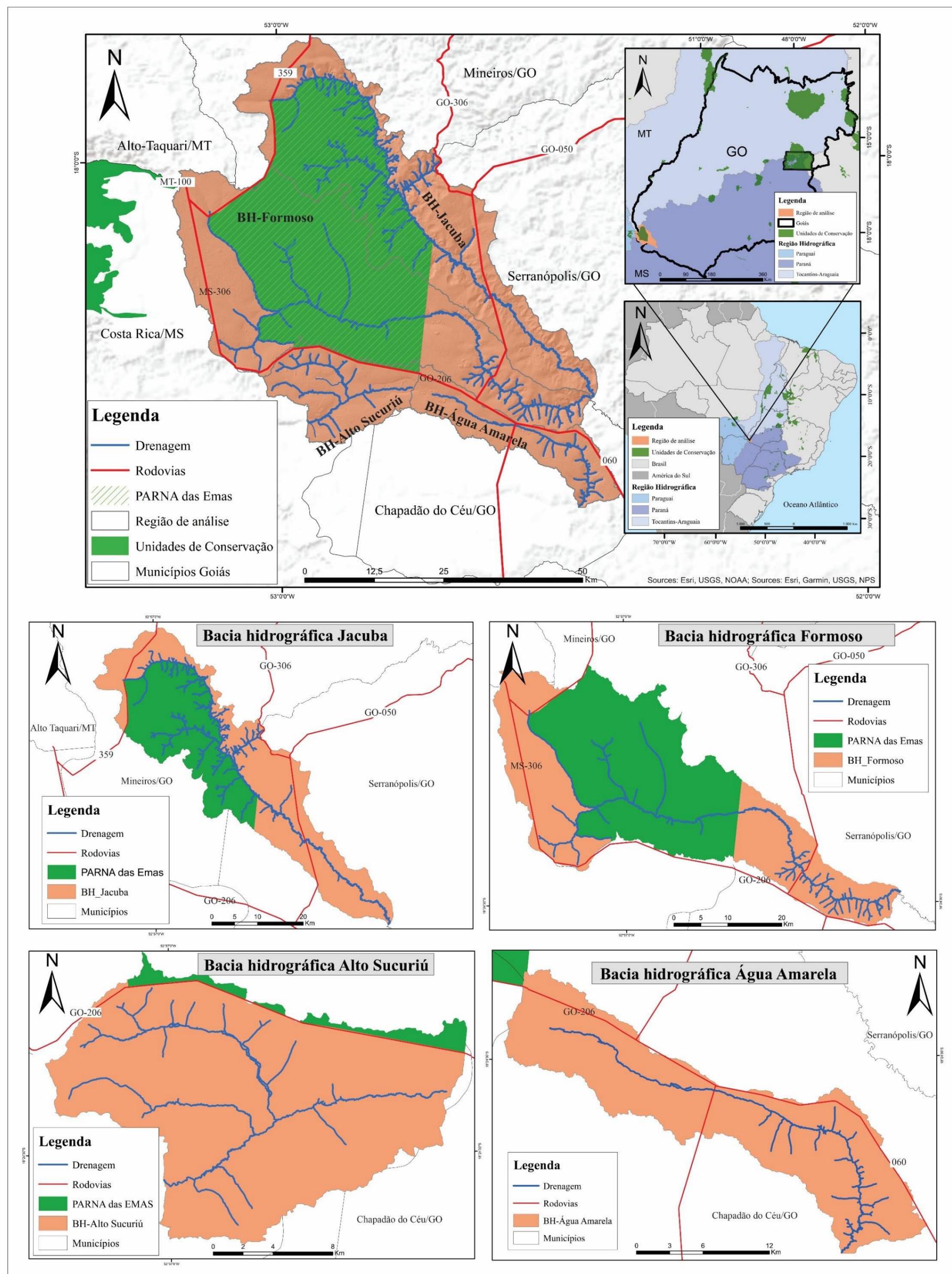
A última e terceira sessão correspondem as considerações finais da tese, integrando os resultados e dando um fechamento a discussão da hipótese. Para tal, analisou-se a eficácia da metodologia criada a partir das Unidades da Paisagem Ambientais em relação à espacialização dos EPTs e radionuclídeos na região da pesquisa.

## 2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA REGIÃO DE ANÁLISE

Localizado na área do Planalto Central do território brasileiro, o PARNA das Emas é um importante regulador ambiental das nascentes de 3 grandes regiões hidrográficas, como a bacia hidrográfica do Paraguai, Tocantins-Araguaia e Paraná, uma vez que essas áreas conservadas servem como barreira à contaminação da água utilizados nas grandes culturas emergentes hoje nos chapadões, até mesmo ajuda a impedir o desencadeamento da erosão (RESENDE et al., 2014).

A área de análise abrange quatro bacias hidrográficas (Formoso, Jacuba, Água-Amarela e Alto-Sucuriú) que correspondem a zona de influência direta e indireta com a Unidade de Conservação Federal do Parque Nacional das Emas (Figura 1). As bacias hidrográficas do Água-Amarela e Alto-Sucuriú são áreas análogas ao Parque e o rio Formoso (quadrante sudoeste) e rio Jacuba (quadrante nordeste) que nascem no interior dessa Unidade de Conservação.

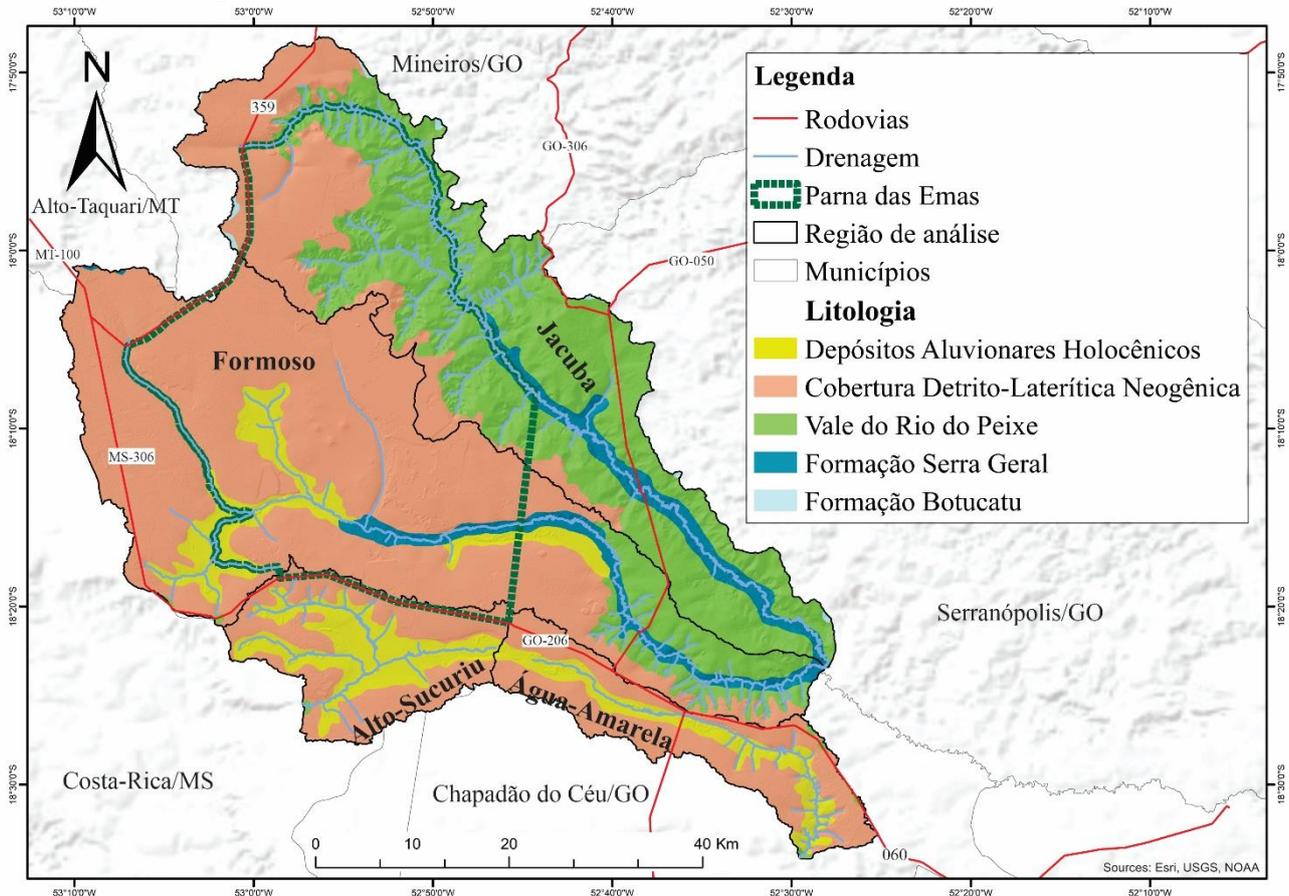
**Figura 1** – Localização da área de estudo.



**Base cartográfica:** Banco de Dados de Informações Ambientais BDIA/IBGE/SIEG/SEPLAN/IMASUL/Forest-GIS.  
**Projeção:** Sirgas 2000 UTM Zone 22S.  
**Org.:** Própria autora (2023).

Geologicamente, as áreas da drenagem principal da bacia hidrográfica do rio Jacuba (BH-J) e bacia hidrográfica do rio Formoso (BH-F) estão representadas pelas rochas basálticas do Grupo Serra Geral (Figura 2), datadas no Juro-cretáceo, que correspondem a uma área de 5% da região, sendo que 90% dos derrames são de origem predominantemente básica, com teores de sílica entre 45% e 52%, sendo 10% do volume de natureza intermediária a ácida, com mais de 52% de sílica (THEODORO et al., 2021).

**Figura 2-** Litologia da área de estudo.



**Base cartográfica:** Superintendência de Geologia e Mineração-SIC; Banco de Dados de Informações Ambientais-BDIA/IBGE/SIEG/SEPLAN/IMASUL/Forest-GIS.

**Projeção:** Sirgas\_2000\_UTM\_Zone\_22S.

**Org.:** Própria autora (2022).

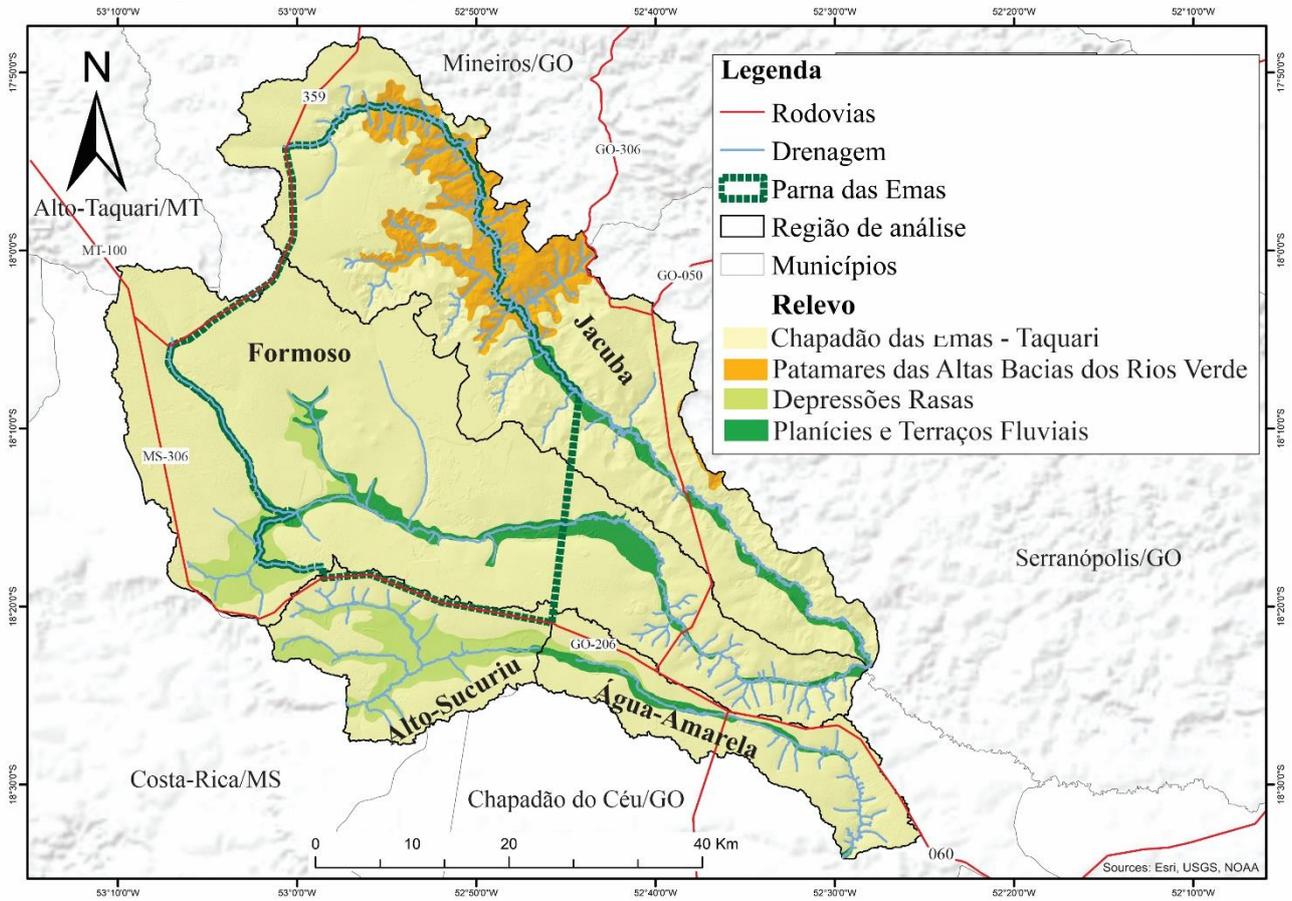
Essas rochas da Formação Serra Geral encontram-se intertrapeadas por arenitos eólicos e fluviais Juro-Cretáceo da Formação Botucatu com menos de 1% da região e são imensos campos de dunas que deram origem a arenitos médios a finos, de coloração rósea, com grãos foscas de alta esfericidade cruzada tangencial de médio a grande porte, com consistência arenosa e são extremamente frágeis no ponto de vista da resistência à erosão (ASSINE; PIRANHA; CARNEIRO, 2004; CARNEIRO, 2007; ROSA; FERREIRA, 2022). A Formação Vale do Rio do Peixe, datada no Cretáceo Superior, compreende uma área de 28%, que apresenta, segundo Fernandes (2004), arenitos de textura muito fina, de coloração marrom-claro, rosado a alaranjado, de estratificação plano-

paralelo e cruzada subordinada e estão principalmente na área das bacias hidrográficas do rio Jacuba e Formoso.

Rochas mais recentes do Terciário/Quaternário estão representadas com 56% da região pelas Coberturas Detrito-lateríticas, encontradas em áreas de chapadas, localizadas em cotas superiores a 800 metros e podem servir para a região como área de manutenção de equilíbrio hidrológico (MOREIRA; PEREZ FILHO, 2020). Além das Coberturas, nas áreas de drenagens e planície de inundação das bacias hidrográficas do rio Formoso, Alto-Sucuriú e Água-Amarela, são compostas pelos Aluviões Holocênicos, que totalizam 11% da região e o termo é uma designação genérica que engloba os depósitos recentes, de origem fluvial ou lacustre, constituídos por cascalhos, areias, siltes e argilas das planícies de inundação (LEINZ; LEONARDOS, 1977; RUBIN; SOUZA, 2019).

Em escala nacional, a região está inserida nas áreas de Chapadas das bordas da Bacia-hidrográfica do Paraná e Planalto Central da Bacia-hidrográfica do Paraná (ROSS et al., 2022), que apresentam fortes relações morfoestruturais e morfoesculturais com as rochas e os solos. Essas áreas de Chapadas (Figura 3) apresentam extensas áreas planas que atingem 900 e 1.000 metros. Nessa região, predominam relevos suaves ondulados a planos das Chapadas das Emas/Taquari com 88% da área (Figura 5), são recortadas por depressões rasas (Figura 4), planícies e terraços fluviais (Figura 5) correspondente a 5%. Localmente, na porção centro-norte da região, ocorrem parte dos Patamares da Alta bacia do Rio Verde (Figura 6), com relevo ondulado à forte ondulado, devido a processos de dissecação, sendo observada variação altimétrica e de declividade, compreendendo em torno de 7% da região de análise.

**Figura 3-** Mapa do relevo da região de análise.



**Base cartográfica:** Banco de Dados de Informações Ambientais BDIA/ IBGE/ SIEG/ SEPLAN/ IMASUL/ Forest-GIS.

**Projeção:** Sirgas\_2000\_UTM\_Zone\_22S.

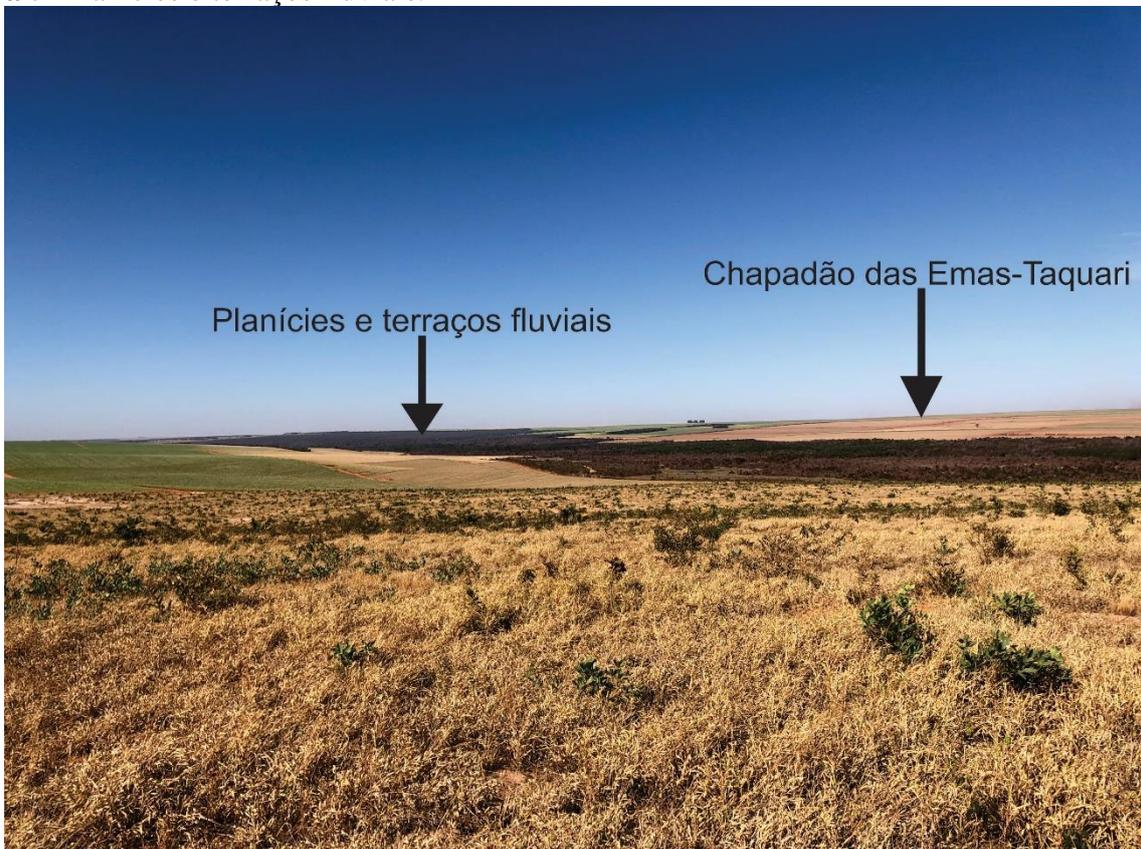
**Org.:** Própria autora (2022).

**Figura 4-** Depressões rasas.



**Org.:** Própria autora (2020).

**Figura 5-** Planícies e terraços fluviais.



**Org.:** Própria autora (2019).

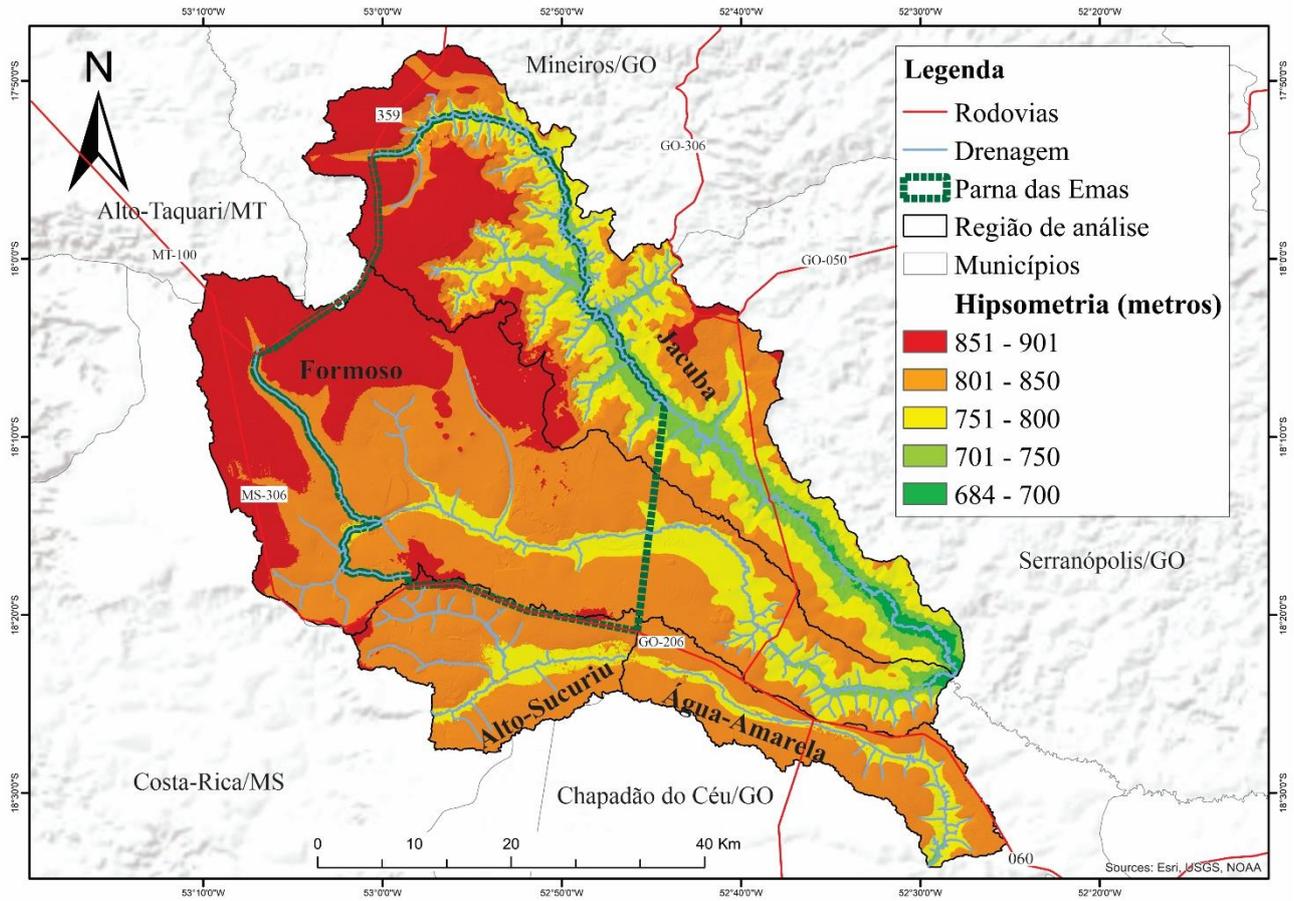
**Figura 6-** Patamares da Alta bacia do Rio Verde.



**Org.:** Própria autora (2022).

De forma geral, o relevo da região resulta em áreas com hipsometria de 661metros (m) nas áreas da foz da BH-Jacuba e Formoso e áreas com 901m na cabeceira de drenagens dessas bacias hidrográficas (Figura 7). Nas bacias hidrográficas do Alto-Sucuriú e Água-Amarela são áreas mais planas com hipsometria na maioria entre 751m e 850m. Toda essa dinâmica resulta em declividades em torno de 0-3 por cento (%) com declividades maiores nas áreas de Patamares no rio Jacuba e pequenas áreas na Foz do rio Formoso (Figura 8).

**Figura 7- Característica do relevo: hipsométrico.**

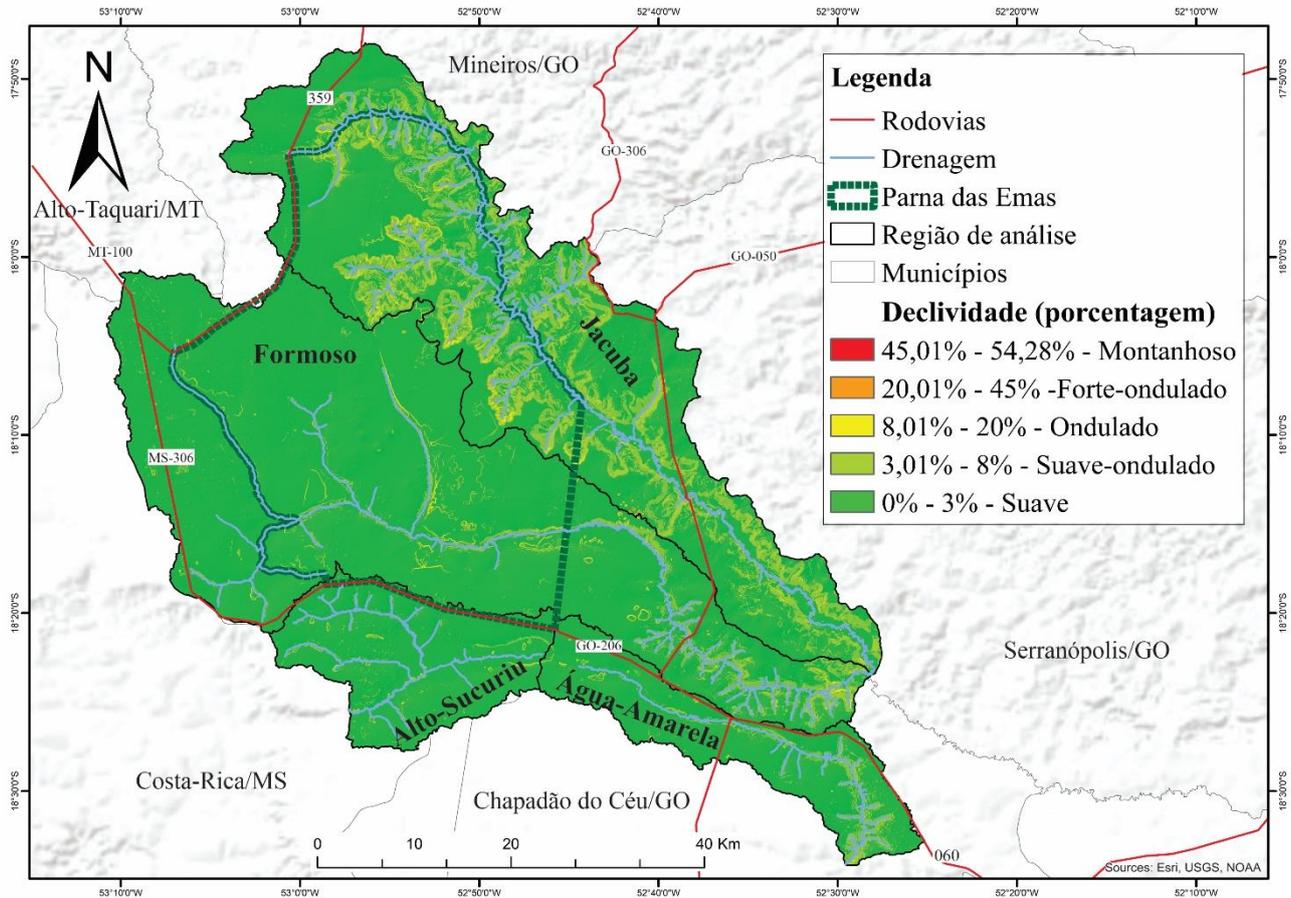


**Base cartográfica:** United States Geological Survey-USGS/IBGE/SIEG/SEPLAN/IMASUL/Forest-GIS.

**Projeção:** Sirgas\_2000\_UTM\_Zone\_22S.

**Org.:** Própria autora (2022).

**Figura 8-** Característica do relevo: declividade.



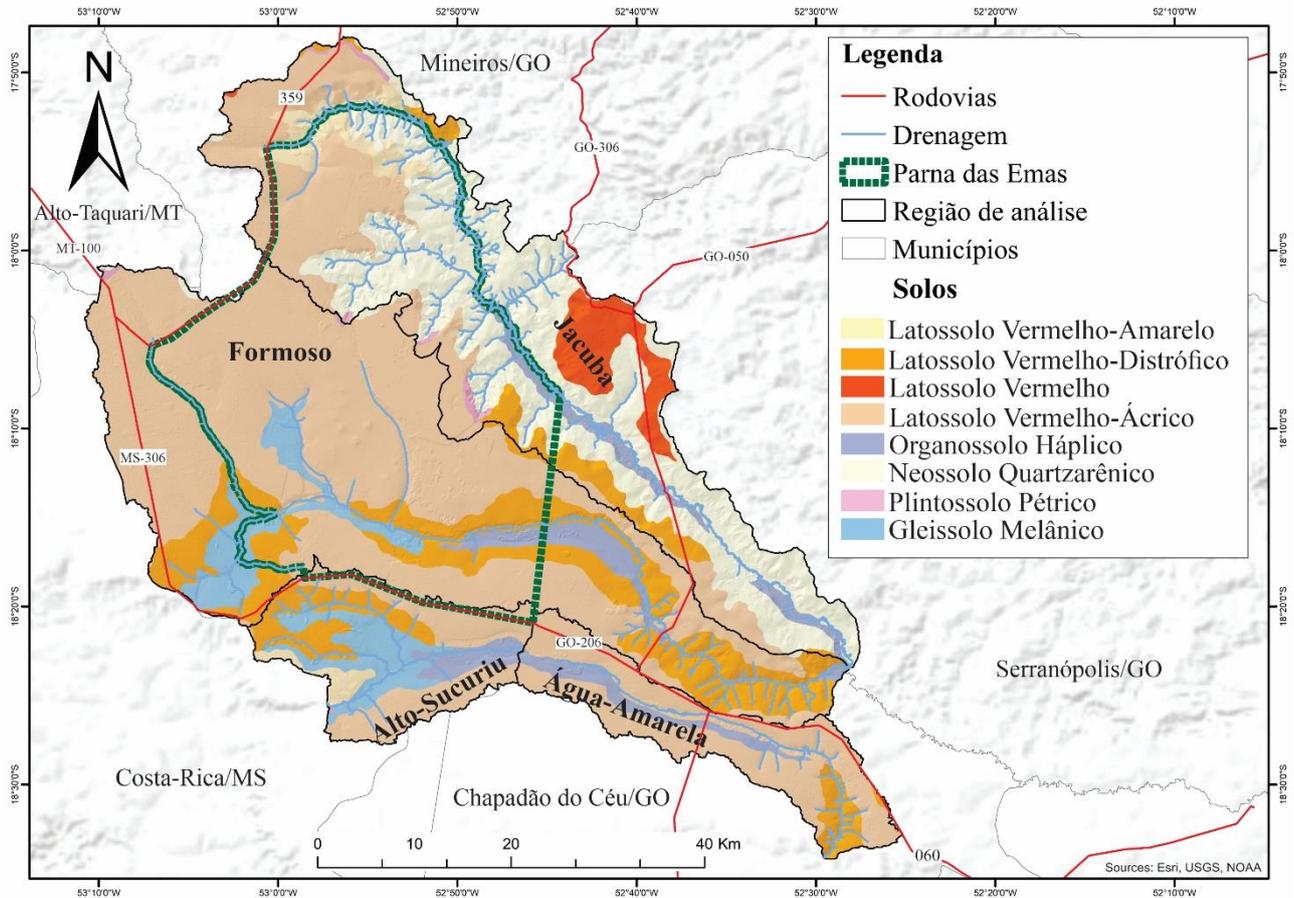
**Base cartográfica:** United States Geological Survey-USGS/IBGE/SIEG/SEPLAN/IMASUL/Forest-GIS.

**Projeção:** Sirgas\_2000\_UTM\_Zone\_22S.

**Org.:** Própria autora (2022).

Com 70,7% os Latossolos são os tipos de solos que mais ocorrem no bioma Cerrado e, conseqüentemente, nas chapadas da região central do Brasil, suas tipologias vão variar de acordo com as superfícies geomórficas (MOREIRA; PEREZ FILHO, 2020). Essas tipologias variam entre Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Distrófico, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Ácrico (Figura 9 e Figura 10-A e B).

**Figura 9-** Mapa de solos.

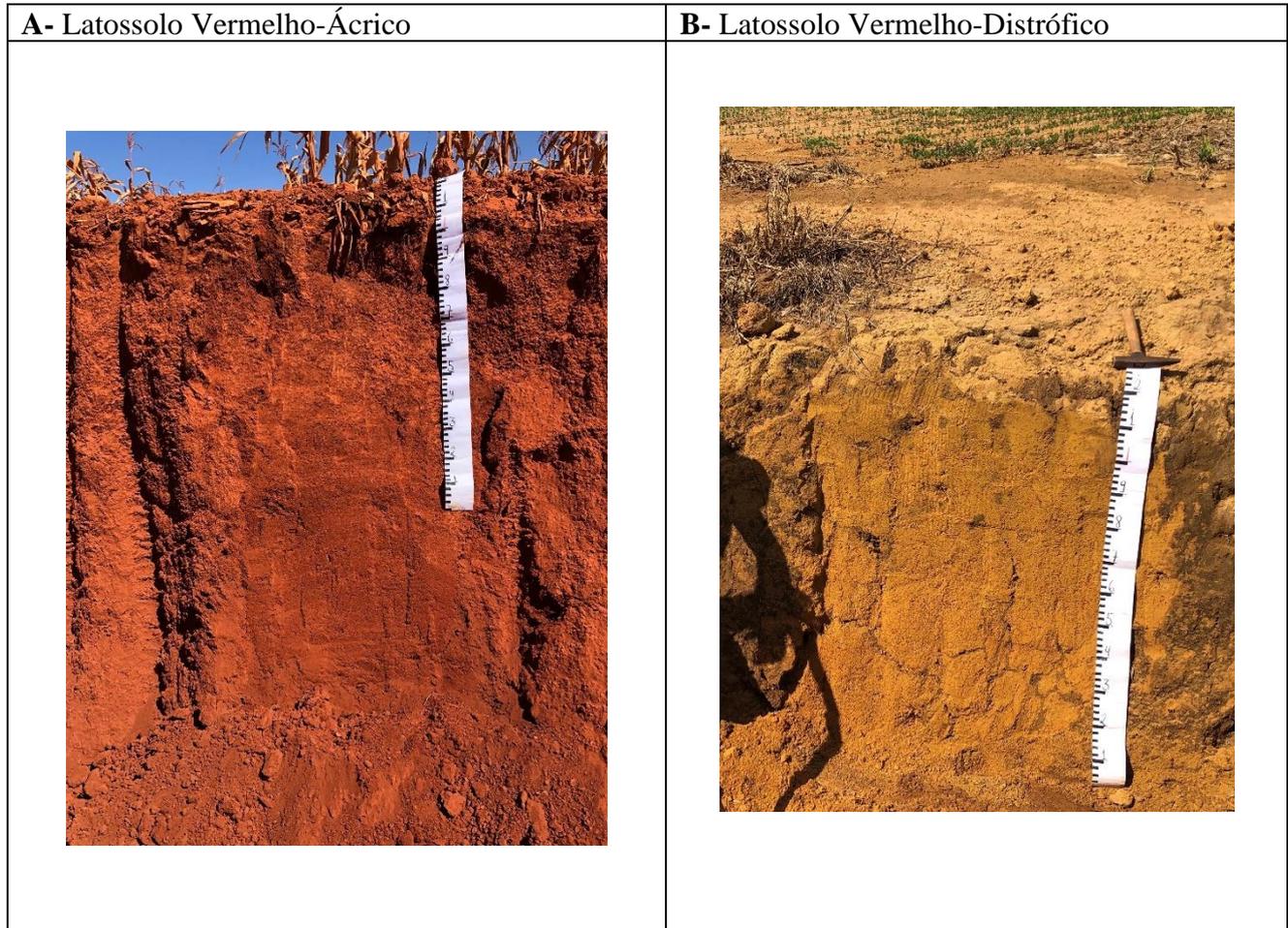


**Base cartográfica:** Banco de Dados de Informações Ambientais-BDIA/ IBGE/ SIEG/ SEPLAN/ IMASUL/ Forest-GIS.

**Projeção:** Sirgas\_2000\_UTM\_Zone\_22S.

**Org.:** Própria autora (2022).

**Figura 10-** Representação dos perfis de dois grandes grupos de Latossolos da região.



**Org.:** Própria autora (2022).

Ao longo das principais redes de drenagens da BH-Alto Sucuriú, Água-Amarela e cabeceira de drenagem da BH-Formoso pode ser encontrados os depósitos aluvionares holocênicos inconsolidados que ocorrem nas depressões rasas e planícies e terraços fluviais e dão origem a Organossolos Háplicos e Gleissolos Melânicos, solos com teor de matéria orgânica alta, em consequência, a capacidade de troca de cátions é alta, ocorrem em relevo plano de várzea (EMBRAPA, 2018).

Os Plintossolos são encontrados em áreas de rupturas do relevo, localizadas principalmente nas bordas do Chapadão das Emas/Taquari, são solos minerais, formados sob condição de restrição à percolação da água, sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade, geralmente mal drenados, com expressiva plintitização, com ou sem petroplintitas (EMBRAPA, 2018; NIKKEL; LIMA, 2020).

Os Neossolos Quartzarênicos correspondem a 19% da região, sendo mais de 18% apenas na BH-Jacuba. Esses solos refere-se a segunda classe predominante no Cerrado brasileiro na escala de 1:250.000, são formados basicamente por quartzo, com uma porcentagem de argila que não ultrapassa 15% (SANO et al., 2020). Apresentam textura excessivamente arenosa, baixa fertilidade natural,

baixa capacidade de retenção de água e são bastante susceptíveis à erosão hídrica (ALENCAR et al., 2019).

Em relação às características climáticas a região de análise encontra-se numa área tropical semiúmida, com clima bem definido, verão chuvoso e inverno seco, com variação de temperatura entre 22°C a 24°C (NOVAIS, 2019). Entre os meses da primavera e verão a região recebe influência, tanto da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), quanto da Zona de Convergência de Umidade (ZCON), possibilitando maiores concentrações de chuvas durante suas atuações, resultando na média geral entre 1400mm a 1650mm (NASCIMENTO; NOVAIS, 2020).

Esse aspecto climático resulta em uma paisagem que forma um mosaico de tipos fisionômicos e vão variar desde campos até áreas florestadas, chamado Cerrado, área que cobre entorno de 2.000.00 km<sup>2</sup>, situada nos chapadões centrais do Brasil, sendo os estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso do Sul e Distrito Federal. Inclui a parte sul de Mato Grosso, o oeste da Bahia, oeste e norte de Minas Gerais, sul do Maranhão, grande parte do Piauí e prolonga-se, em forma de corredor, até Rondônia e, de forma disjunta, ocorre em certas áreas do Nordeste brasileiro e em parte de São Paulo (BARBOSA, 2009).

O Cerrado é um dos *hotspots* para a conservação da biodiversidade mundial, sendo também uma reserva significativa de carbono, com estoque estimado em, aproximadamente, 8,23Gt de carbono orgânico, presente na biomassa e no compartimento do solo e não menos importante das 12 regiões hidrográficas do território brasileiro, 8 estão situadas no Cerrado, incluindo a segunda maior reserva subterrânea de água doce, o Aquífero Guarani (REIS et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2020; REIS et al., 2017).

Essa diversidade ambiental vem sendo apropriada e alterada por diversos ciclos econômicos de expansão do território brasileiro, ligados com a transferência da capital Brasília em 1960, políticas públicas como o Programa de Cooperação Nipo-Brasileiro para o Desenvolvimento Agrícola dos Cerrados (PRODECER) por exemplo, e outros investimentos que favorecem as atividades agropecuárias de forma geral nas áreas de chapadões, onde é possível obter até duas safras anuais de grãos (LIMA; ASSUNÇÃO; SCOPEL, 2019; RIBEIRO; FARIA; CEZARE, 2019). Toda essa dinâmica ao longo dos anos fez com que o Cerrado brasileiro perdesse mais da metade de seus 2 milhões de km<sup>2</sup> nos últimos 55 anos, tornando-se o celeiro do Brasil com mais de 20 milhões de hectares de terras agrícolas e 56 milhões de pastagens cultivadas (FAO, 2015; MAPBIOMAS, 2017; LATRUBESSE et al., 2019).

Para Ross et al., 2022, esses últimos 55 anos consolida-se, definitivamente, a ocupação do Cerrado brasileiro com a agricultura mecanizada, praticada nos chapadões com relevos planos e Latossolos argilosos. Houve também a expansão da pecuária bovina de corte e as pastagens naturais

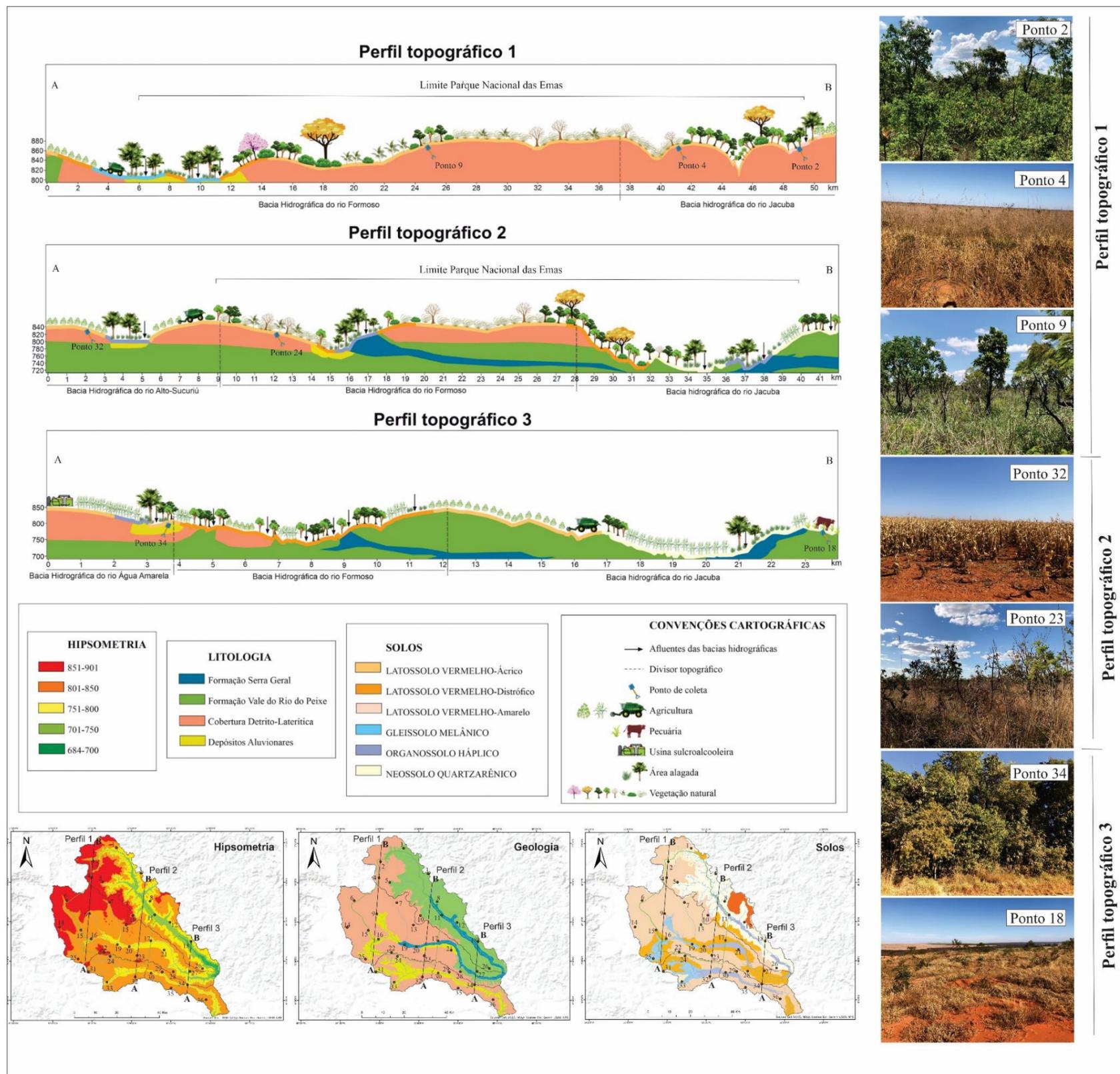
substituídas por braquiária. Com isso, toda essa caracterização física reflete a organização sistêmica de seus elementos funcionais e as regulações que determinam sua essência, sua morfologia e sua integridade, definindo como o conteúdo de elementos de um sistema e de um certo tipo de relações entre tais elementos, como pode ser observado na Figura 11. Os 3 perfis topográficos da paisagem ilustram a interação sistêmica dos elementos físicos-naturais, como relevo (hipsometria e declividade), geologia e solos atrelados com o uso e cobertura da região.

O perfil 1 mostra que as áreas mais elevadas do relevo têm pouca diferença de cota altimétrica, apresentando variação entre 800m e 880m e predomínio dos arenitos provenientes das Coberturas Detrito-Laterítica revestidos principalmente pelos Latossolos Vermelho-Ácrico e nas áreas dos Depósitos Aluvionares vão predominar os Gleissolos, sendo que este último vai estar presentes apenas na BH-Formoso e BH-Alto Sucuriú principalmente na cota altimétrica entre 801 e 850m.

O perfil 2 apresenta diferença maior de cota altimétrica com variação entre 720m e 840m de altitude, possivelmente por pegar áreas de Patamares na bacia hidrográfica do rio Jacuba e sua geologia vai apresentar um predomínio dos arenitos da Formação Vale do Rio do Peixe, sendo nas altitudes à cima de 820m as Coberturas Detrito-Laterítica, e próximos aos cursos d'água dos canais principais (Formoso e Jacuba) vão apresentar afloramento de rochas basálticas da Formação Serra Geral.

O perfil 3 o relevo apresenta um formato mais ondulado, principalmente na extensão da bacia hidrográfica do rio Formoso que nas áreas mais próximas a cabeceira de drenagem apresenta um formato mais de chapada, retilíneo. Já na bacia do rio Jacuba o relevo perde as características dos patamares deixando as vertentes mais suaves, como as áreas de chapadas. As Coberturas Detrito-Laterítica vai estar presentes nas cotas à cima de 750m na bacia hidrográfica Água-Amarela e pequena área do rio Formoso e predominantemente a Formação Vale do Rio do Peixe e próximos aos cursos d'água a Formação Serra Geral e Depósitos Aluvionares. Os solos predominantes são as classes: Latossolos, Organossolo e Neossolo Quartzarênico. Esse último prevalente na BH-Jacuba.

Figura 11 – Perfil topográfico da região de análise.



Base cartográfica: Superintendência de Geologia e Mineração-SIC; Banco de Dados de Informações Ambientais-BDIA/IBGE/SIEG/SEPLAN/IMASUL/Forest-GIS/ United States Geological Survey-USGS.

Projeção: Sirgas\_2000\_UTM\_Zone\_22S.

Org.: Própria autora (2023).

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

O objetivo deste tópico foi realizar uma análise crítica sob a perspectiva científica em relação ao tema abordado na tese. Na revisão, buscou-se organizar, explicar e apresentar as principais obras e concepções em relação ao espectro de literatura científica relevante na área de estudo. A revisão apresenta um panorama histórico do tema desenvolvido da tese.

Dessa forma, está dividido em três blocos principais, que tratam da teoria geral de sistemas na compreensão da paisagem geográfica, a bacia hidrográfica como âncora aos estudos geossistêmicos e a qualidade dos solos nas bacias hidrográficas com foco nos Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) e nos radionuclídeos.

A base das discussões foi a relação sociedade e natureza, uma vez que tudo ao nosso redor é influenciado pela natureza. Dessa forma, ao longo dos anos, a sociedade criou uma relação de interdependência social que sempre foi de exploração, ainda que numa escala reduzida. Na época do homem primitivo, as mudanças não eram consideradas significativas, uma vez que se tratava de uma relação de subsistência. Já na era inicial, predominavam pequenas áreas para plantio. Com o decorrer do tempo, as relações foram se modificando à medida que se aumentavam as populações, aumentando o consumo de vegetais, animais e água (SOBRINHO et al., 2017).

O processo de reordenamento do territorial foi proporcionado ao longo da evolução social, sobretudo devido à introdução de instrumentos técnicos, químicos, o que muitos autores denominam modernização ou Período Técnico Científico Informacional (SANTOS, 2006), o que causou mudanças significativas no meio físico natural, sobretudo no setor da agricultura, sendo o solo a base da produção.

Diante dessa relação de exploração da natureza pelo modelo econômico, surge a necessidade de se criar um paradigma que explique os fatos até então presenciados pela sociedade sob outro prisma (ALMEIDA, 2014). A autora Almeida (2014) salienta que este paradigma, o ambiental, é fundamentado numa realidade sistêmica, dinâmica e integrada, surgindo como um importante campo metodológico no entendimento dos fenômenos por uma interconectividade holística, que busca o entendimento da dinâmica do todo.

Para prosseguir com o caminho método proposto, é necessário utilizar ferramentas analíticas que permitam a divulgação do objeto de pesquisa, ou seja, uma categoria de análise que permita ao pesquisador estabelecer conexões com o objeto, bem como a interpretação dos resultados alcançados, o que permite a construção e reconstrução contínua do conhecimento.

Dessa forma, a investigação do objeto de estudo foi realizada através da análise sistêmica da paisagem, com foco na relação sociedade e natureza, uma vez que compreendeu a sua relação dialética

e dinâmica, o que permitiu a sociedade reestruturar seus sistemas de produção, criando um modelo econômico, com consequências desastrosas para a natureza e para si.

Diante desse cenário, a bacia hidrográfica é uma unidade do sistema ambiental que deve ser considerada nos estudos ambientais, quando se deseja preservar os recursos hídricos e outros recursos que compõem esse sistema, como os solos e sedimentos.

Este sistema complexo apresenta uma complexa gama de variáveis ambientais, tais como o clima, a litologia, a geomorfologia, os solos, a vegetação, os recursos hídricos e o uso antrópico, articulados numa escala espacial e temporal, tornando-o um instrumento relevante para a pesquisa, planejamento e gestão.

### 3.1 A TEORIA GERAL DE SISTEMAS NA COMPREENSÃO DA PAISAGEM GEOGRÁFICA

A Teoria Geral dos Sistemas, elaborada pelo biólogo alemão Ludwig Von Bertalanffy, aplicada nos Estados Unidos nas primeiras décadas do século XX, afirma que os sistemas são conjuntos de elementos que se relacionam entre si, com certo grau de organização, visando atingir um objetivo ou uma finalidade (BERTALANFFLY, 1973).

Christofolletti (1999) aponta que são elementos organizados dinamicamente na superfície terrestre, onde sua espacialidade se torna uma característica fundamental e necessária, e atuarão em diferentes intensidades de fluxos de matéria e energia. Esses fluxos se manifestam via água, ar/calor, de nutrientes minerais, elementos químicos, sedimentos, átomos e células (ROSS, 2009). Contudo, o calor será uma fonte de energia, enquanto a água e os fluidos permitirão a transferência constante de materiais entre as partes (*input e output*).

Para compreender a natureza, é necessário adotar uma perspectiva abrangente que se diferencie da perspectiva reducionista. Constituído de partes solidárias, de alguma forma articuladas entre si e não reunidas ao acaso, é um conjunto unificado (BRANCO, 1999). Em outras palavras, é formado por vários subsistemas, que, por sua vez, formam um sistema menor que funciona de forma autônoma (LEITE, 2011).

Essa abordagem dos sistemas integrados e seus elementos se deu devido à necessidade da ciência de superar o paradigma racionalista que ainda imperava. A proposta de uma visão sistêmica, de mundo orgânico, ultrapassa a visão de natureza inanimada, na tentativa de restaurar o pensamento holístico (SUERTEGARAY, 2005).

Essa Teoria, portanto, se apresenta como um campo metodológico relevante que propõe a compreensão dos fenômenos sob a perspectiva da interconectividade holística, suplantando a

fragmentação. Além disso, apresenta um enfoque interdisciplinar, o qual, influenciou diversos campos da ciência, como Geografia Física (ALMEIDA, 2014).

Para Macambira, Lima e Monteiro (2020), a Geografia Física utilizou a Teoria Geral dos Sistemas como um conjunto de teorias que visava repensar a dialética como um método de investigação da realidade, a partir de uma organização espacial, os quais são resultantes da dinâmica dos processos atuantes e das relações entre os elementos da natureza e a ação antrópica, que é tratada como elementos da paisagem.

A paisagem surgiu conceitualmente pelo alemão *Landschaft*, proposto por Humboldt, e, mais tarde, pelos sábios Dokuchaev, Passarge e Berg no século XIX e início do século XX, apresentando um forte significado natural. Dokuchaev, em seus estudos, apontou o solo como o espelho da natureza, uma vez que ele reflete o resultado da interação entre os elementos da paisagem: clima, vegetação, água, solo, relevo (GONÇALVES; PASSOS, 2020).

A partir da articulação entre a análise espacial da Geografia Física e a análise funcional da Ecologia em meados dos anos 60, Victor Sotchava, pela primeira vez, tentou elaborar uma Teoria dos Geossistemas, a partir da teoria sobre a paisagem elaborada pela escola Russa, que se baseou na visão da Teoria Geral dos Sistemas (RODRÍGUEZ; DA SILVA; VICENS, 2015).

Dessa forma, Sotchava (1977) define o conceito de paisagem natural como sinônimo ao de Geossistema, sendo que, para aprofundar a compreensão das relações entre os elementos naturais e suas conexões, deve-se enfatizar as relações entre os elementos naturais e suas conexões. Para o estudo das paisagens, propõe cinco características a serem consideradas: dinâmica, estrutura, evolução, funcionamento e informação.

Nessa concepção Geossistêmica deve ser compreendida não apenas como uma adição de elementos geográficos desconexos, mas sim como resultado da combinação dinâmica em um determinado espaço (FERNANDES COSTA; OLIVEIRA, 2017).

Bertrand propôs uma abordagem da natureza, seguindo a perspectiva da Escola Francesa de Geografia nos anos 60, que enfatizava a visão sistêmica da paisagem com a obra: "*Paysage et Géographie Physique Globale: esquisse méthodologique*", que foi traduzido para o português pela professora Dr<sup>a</sup> Olga Cruz, da Universidade de São Paulo em 1971 (ROSS, 2006).

Bertrand define o Geossistema como um “conceito territorial, uma unidade espacial que pode ser delimitada e analisada” (NASCIMENTO; SAMPAIO, 2004). O autor afirma que a paisagem apresenta uma integração com os fatores humanos, adicionando a noção de escala indispensável para os estudos das paisagens. Em função dessa escala, ele divide a paisagem em seis níveis espaciais e temporais, divididos em unidades superiores e inferiores (Quadro 1).

**Quadro 1** – Unidades de paisagens com base da Teoria de Bertrand.

	<b>Unidades da Paisagem</b>	<b>Descrição</b>	<b>Elementos fundamentais</b>
<b>Unidades superiores</b>	<b>ZONA</b>	Relacionado ao conceito de zonalidade planetária, é definido principalmente por seu clima e bioma, acessoriamente por megaestruturas.	Climáticos e estruturais
	<b>DOMÍNIO</b>	Conjuntos de paisagens fortemente individualizados, e sua definição deve ser maleável, de forma a permitir agrupamentos a partir de fatores diferentes.	
	<b>REGIÃO</b>	Individualização dos aspectos físicos dentro do domínio.	
<b>Unidades inferiores</b>	<b>GEOSSISTEMA</b>	Situa-se a maior parte dos fenômenos de interferência entre os elementos da paisagem e que evoluem relações funcionais. Entretanto, resulta do potencial ecológico: clima- temperatura e precipitação; fatores geomorfológicos- natureza das rochas, declive, dinâmica das vertentes, mantos superficiais, fatores hidrológicos.	Biogeográficos e antrópicos
	<b>GEOFÁCIE</b>	Corresponde a um setor fisionômico homogêneo dentro do geossistema, ou seja, representa uma pequena malha na cadeia das paisagens que se sucedem no tempo e no espaço no interior de um mesmo geossistema.	
	<b>GEÓTOPO</b>	Corresponde a menor unidade homogênea discernível no terreno, o que resulta na análise em nível de microformas, como uma cabeceira de drenagem.	

**Fonte:** Almeida (2014); Nascimento; Sampaio (2004).

**Org.:** Própria autora (2020).

Além de Bertrand, é importante considerar os estudos da Paisagem em Geografia, desenvolvidos pelo francês Jean Tricart nos anos de 1970, sistematizam e analisam o meio natural de forma sistêmica através de sua obra *Ecodinâmica* (TRICART, 1977). Visto que os meios ecodinâmicos são estabelecidos, conforme a relação morfogênese/pedogênese.

A partir dessa dinâmica, é possível compreender a ação dos fluxos hídricos ao longo da vertente e interpretar a gênese dos solos numa determinada área. Sendo a morfogênese mais atuante em declividades acentuadas e a pedogênese em áreas com declividades suaves onde se localizam os mantos pedológicos mais profundos (RUBIRA et al., 2019).

De acordo com Monteiro (1984), para compreender a paisagem sob uma perspectiva Geossistêmica, é necessário entender o processo interativo dos fatores que modelam o meio, o que favorece uma maior interação entre o meio natural e o humano. Em sua pesquisa o clima desempenha um papel central na análise do sistema geográfico da paisagem, principalmente na chamada "atmosfera-geográfica" da troposfera, devido à sua ligação direta com a dinâmica natural-antrópica superficial. Outro ponto a se destacar do autor é que ele divide o tratamento Geossistêmico por meio de quatro etapas.

(...) o referencial teórico do geossistema, aliado àquele econômico dos “nossos recursos” está associado ao referencial técnico da avaliação ambiental. Isto quer esclarecer que o tratamento geossistêmico visa a integração das variáveis “naturais” e “antrópicas” (ETAPA ANÁLISE), fundindo “recursos”, “usos” e “problemas” configurados (ETAPA INTEGRAÇÃO) em “unidades homogêneas” assumindo um papel primordial na estrutura espacial (ETAPA SÍNTESE) que conduz ao esclarecimento do estado real da qualidade do ambiente na (ETAPA APLICAÇÃO) do diagnóstico”(MONTEIRO, 2000, p.81).

O Geossistema é um sistema natural, não necessariamente homogêneo, aberto, que está ligado a um território. Ele se caracteriza por uma determinada morfologia (estruturas espaciais, verticais e horizontais), um funcionamento (energia solar, gravitacional, ciclos biogeoquímicos, processos morfogenéticos e pedogenéticos) e um comportamento específico (mudanças em sequências temporais) (BEROUTCHACHVILI; BERTRAND, 1978; NASCIMENTO; SAMPAIO, 2004; RODRÍGUEZ; DA SILVA; VICENS, 2015).

O Geossistema é uma dimensão do espaço terrestre composta por mosaicos homogêneos ou por unidades de áreas onde os diversos elementos naturais estão interligados em conexões sistêmicas, possuindo uma integridade definida, interagindo com a esfera cósmica e com a sociedade humana. (SEABRA; VICENS; CRUZ, 2013).

Essas unidades de área possuem fluxos de energia liberados e absorvidos pelos componentes de sua estrutura, além de apresentarem escalas variadas, desde que perceptíveis, em área, quanto às suas homogeneidades ou às suas características dinâmicas (BEROUTCHACHVILI; BERTRAND, 1978; SOTCHAVA, 1977, 1978; CHRISTOFOLETTI, 1999; BERTRAND; BERTRAND, 2007; OLIVEIRA, 2013; COSTA; OLIVEIRA, 2017; ).

O ensaio apresentado sobre o Geossistema não esgota a discussão, nem se apresenta como um paradigma absoluto, mas sim como uma forma de valoração de um método de análise extremamente fidedigno para a ciência geográfica, sobretudo em estudos voltados para a dinâmica espacial de bacia hidrográfica, como é tratado nesta pesquisa.

### 3.2 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO ÂNCORA AOS ESTUDOS GEOSSISTÊMICOS

A Geografia analisa a forma, função e transformação das paisagens e tenta estabelecer certas conexões entre forma e processo, a causa e o efeito. No entanto, tenta entender os elementos físicos da natureza e como eles interagem para apontar como os objetos de estudo funcionam e usam as bacias hidrográficas como objeto para uma análise sistemática das paisagens.

Dessa forma, a BH pode ser considerada um sistema não-isolado, uma vez que mantém relações com os outros sistemas do universo e um sistema aberto, uma vez que nela ocorrem constantes trocas

de energia e matéria (*inputs* e *outputs*), tanto recebendo quanto perdendo. É na área da bacia que se pode ter uma visão conjunta do comportamento das condições naturais e das atividades humanas nela desenvolvidas (CUNHA; GUERRA, 2010).

A análise das características físicas da BH deve ser feita com base nas suas características físicas, como a drenagem, os parâmetros geológicos, geomorfológicos, pedológicos, químicos, vegetais e antrópicos, de modo a demonstrar a relevância de investigar a estrutura e as interações que a delimitam (MAGESH et al., 2013).

A BH é “Entendida como unidade básica de análise ambiental, permite conhecer e avaliar os processos de interação que nela ocorrem” (BOTELHO, 1999). O que a torna na atualidade como célula dos estudos integrados da paisagem por possibilitar uma compreensão científica da funcionalidade de sistemas ambientais e dos processos de esculturação do relevo.

Para Rodrigues e Adami (2002), a BH é um sistema composto por um volume de materiais, a maioria sólidos e líquidos, situados próximos à superfície terrestre que são delimitados interna e externamente por todos os processos. O qual, afetará o fluxo de matéria e energia de um rio ou de uma rede de canais.

A BH pode ser, também, definida como um conjunto de fatores físicos, químicos e biológicos, que estão interligados pelo fluxo de água e delimitados por divisores topográficos. A hidrografia é, geralmente, afetada não apenas pela precipitação e pelas águas superficiais, mas também pelas águas subterrâneas, que desempenham um papel importante nessa dinâmica (FLOTEMERSCH et al., 2016).

Nesta perspectiva, o estudo de BH assume um papel de destaque em estudos que se concentram na análise da estrutura, funcionamento e interação entre os seus elementos, bem como na conservação dos recursos naturais sob uma perspectiva paisagística. Isso ocorre porque é uma unidade geograficamente delimitada, onde os seus fenômenos, processos e interações podem ser facilmente identificados e caracterizados (CHRISTOFOLETTI, 1979, 1980, 1999).

A análise espacial é uma ferramenta indispensável para o gerenciamento das BH, uma vez que essas análises utilizam técnicas que apresentam potencial para avaliar, determinar e interpretar a análise de dados ambientais relacionados ao espaço das BH, tais como o geoprocessamento e o Sistema de Informação Geográfica-SIGs (BABU; SREEKUMAR; ASLAM, 2016).

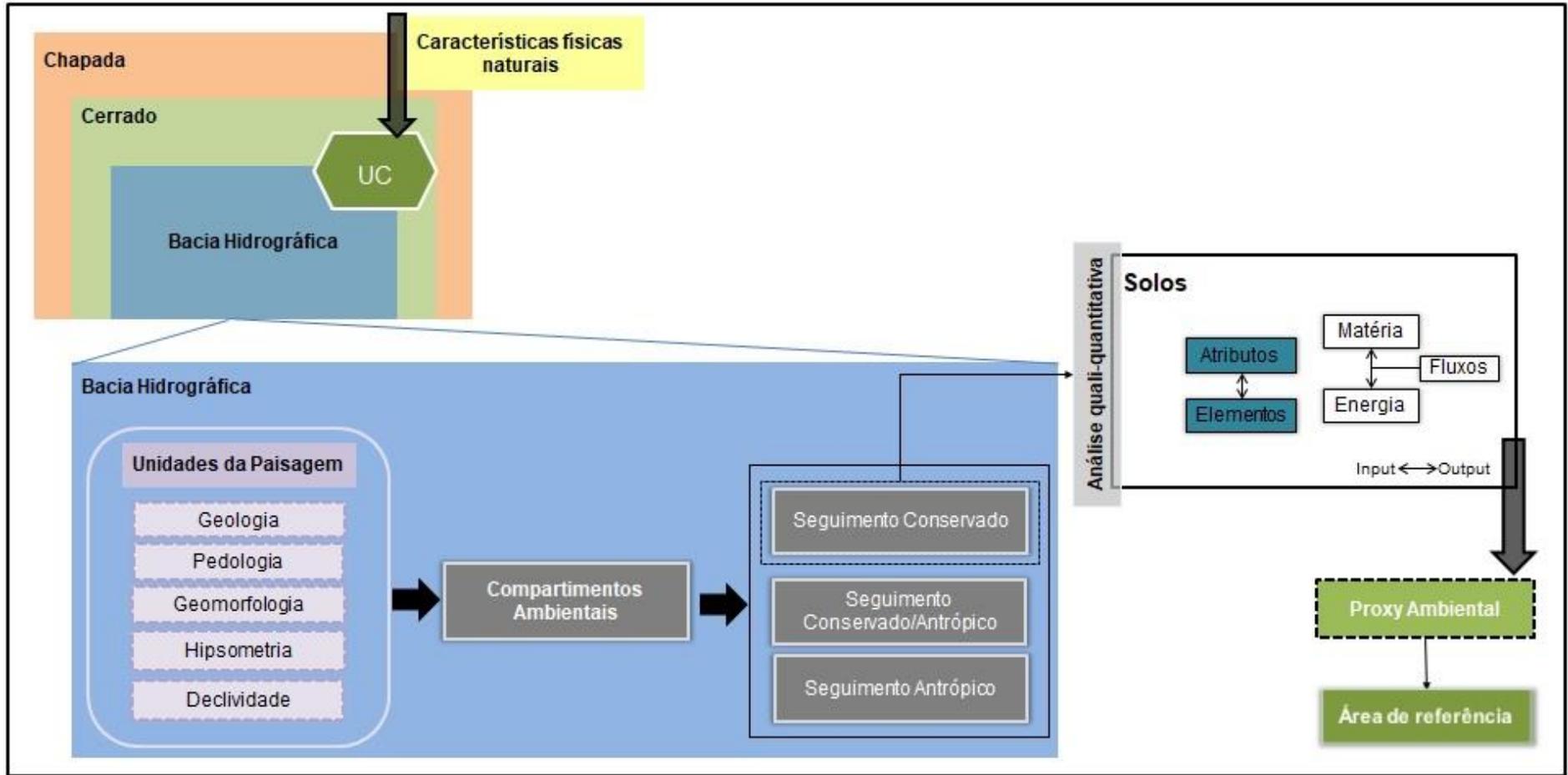
Na prática, a análise das BH adquiriu um caráter objetivo a partir de 1945, quando Robert H. Horton apresentou algumas leis de desenvolvimento dos rios e de suas bacias hidrográficas por uma abordagem quantitativa.

Além disso, é importante salientar os trabalhos desenvolvidos por Arthur N. Strahler nos anos de 1950 e, posteriormente, Richard J. Chorley na década de 1960, que, sob a influência da quantificação, desenvolveram estudos que determinam índices e parâmetros para o estudo analítico de

BH e monitoramento ambiental. A presente pesquisa teve como base os estudos de Chorley e considera os modelos análogos, que permitem estabelecer uma relação entre um conjunto de fenômenos e outros, tornando as observações mais simples e fáceis de serem realizadas (CHORLEY; HAGGETT, 1975).

Dessa forma, este modelo oferece um suporte para comparações com outras áreas consideradas semelhantes dentro da BH, permitindo generalizações mais significativas e de maior confiança sobre a área original (PÔSSAS, 2017). Isso significa que cada unidade pode ser melhor compreendida em termos de generalizações sobre uma região maior da qual faz parte (CHORLEY; HAGGETT, 1975). Com base nesse modelo foi criado um fluxograma conceitual para essa pesquisa, como observado na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma conceitual da tese.



Org.: Própria autora (2023).

Os modelos de estudo das BH são tentativas de simplificar o real para torná-lo apreensível, uma vez que, considerando a complexidade dos fenômenos no real, é necessário formular estratégias que promovam seu estudo e compreensão (ARAUJO; CHAVES; ROCHA, 2013).

É possível numa bacia hidrográfica estabelecer unidades espaciais, chamadas Unidades da Paisagem, que são resultados da interação dinâmica e, portanto, instável de fatores que reagem dialeticamente uns sobre os outros, e se manifestam em várias escalas, desde uma mais elementar, denominada de áreas homogêneas (PERUCHI TREVISAN et al., 2018; MIRANDA; NEVES; RAMOS, 2019).

Dessa forma, essas áreas homogêneas, denominadas Unidades de Paisagem, são delimitadas na bacia hidrográfica através da integração dos componentes físicos da região hidrográfica, como a litologia, relevo, solos e clima. Posteriormente, é possível identificar e compreender a dinâmica das atividades humanas que estão relacionadas ao uso dos recursos naturais.

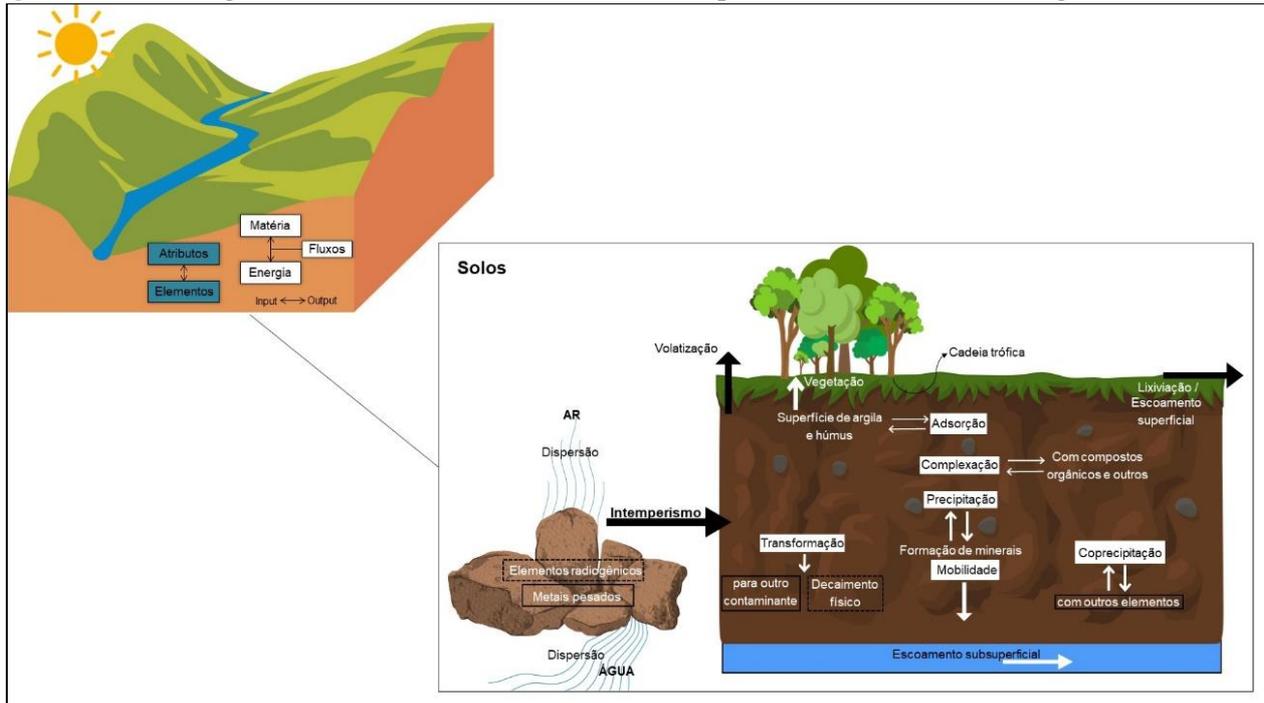
### 3.3 QUALIDADE DOS SOLOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

A qualidade do solo era associada à ideia de fertilidade, sendo considerado um solo de alta qualidade quando apresentava uma composição quimicamente rica. Com o decorrer dos anos, esses conceitos foram sendo reformulados e a qualidade do solo se estendeu à hidrosfera e à biosfera, atuando na qualidade da água, do ar e da biodiversidade (MELLONI et al., 2008; SANT'ANA; CASTRO, 2014). A capacidade do solo de fornecer nutrientes, suportar o crescimento de raízes, proporcionar uma atividade biológica adequada, proporcionar uma estabilidade estrutural, resistir à erosão e ter água para as plantas é um dos exemplos (SANT'ANA; CASTRO, 2014).

É fundamental a escolha de um conjunto mínimo de indicadores que apresentem características como a facilidade de avaliação, aplicabilidade em diferentes escalas, a integração, adequação ao nível da análise de pesquisa, a utilização num maior número possível de situações, sensibilidade às variações de manejo e clima, além de serem possíveis medições por métodos quantitativos ou qualitativos. O solo é um importante indicador da sustentabilidade, sendo possível monitorar o seu desempenho através do comportamento de indicadores ou comparando-o com valores de referência obtidos em ecossistemas naturais (DORAN; SARRANTONIO; LIEBIG, 1996; CASALINHO et al., 2007).

Para tanto é importante, compreender como este solo se desenvolveu, uma vez que ele resulta da interação de processos de naturezas distintas (física, química e biológica) e sua gênese está ligada a fatores de formação presentes na natureza, tais como o clima, o relevo, o material de origem, a atividade biológica e o tempo (OLIVEIRA; SANTOS; CALEGARI, 2020) (Figura 13). Dado que a sazonalidade climática é a responsável pelo grau de intemperização desse compartimento.

**Figura 13** – Fluxograma da dinâmica natural dos metais pesados e elementos radiogênicos no solo.



Adaptado por: (ALLOWAY, 1995).

A sazonalidade climática da região tropical, verão chuvoso e quente e inverno frio e seco, contribui no processo de formação de solos profundos e altamente intemperizados, como os Latossolos (PROCÓPIO; BARRETO, 2021). A variação climática tem um impacto significativo na formação e na estrutura dos solos, devido à baixa disponibilidade de nutrientes, à alta adsorção de fósforo, à baixa capacidade de troca catiônica (CTC), à predominância de argilas de baixa atividade (caulinitas e óxi-hidroxidos de Ferro e Alumínio) e à alta temperatura, que terá um impacto significativo na diminuição de água e matéria orgânica no solo (MO) (FRAZÃO et al., 2008; PROCÓPIO; BARRETO, 2021; TAVARES; MOURA; AMORIM, 2022).

Os solos que estão em áreas de vegetação nativa do Cerrado apresentam, como características, uma elevada acidez, uma alta saturação de alumínio e fósforo, apesar da sua baixa concentração. A disponibilidade para as plantas depende das reações de adsorção dos óxidos e da precipitação com o ferro (Fe) e alumínio (Al).

O Cerrado é o segundo bioma da América do Sul em extensão, representando cerca de 25% do território brasileiro e menos de 20% da sua vegetação nativa permanece intacta (STRASSBURG et al., 2017). Os solos de maior representatividade nesse Bioma são os Latossolos (46%), seguidos pelos Argissolos (15%) e os Neossolos Quartzarênicos (15%) (PROCÓPIO; BARRETO, 2021). Na área de estudo em particular predomina as classes de Latossolos e depois os Neossolos Quartzarênicos

Os Latossolos são compostos, em termos gerais, por material mineral, não hidromórficos, ou material orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações significativas em relação ao material original devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos (EMBRAPA, 2018; SOUSA; NASCIMENTO, 2022). Conforme a literatura, esses solos apresentam um teor de silte inferior a 20% e argila variando entre 15% e 80%. A estrutura é composta por uma grande quantidade de argilas oxídicas e silicatadas, com uma textura granulosa, o que facilita a drenagem, e, em geral, apresenta uma baixa a média capacidade de troca de cátions (EMBRAPA, 2018). A caulinita é a argila mais comum em todo o mundo, assim como os óxidos de Fe e Al, como a hematita, goethita e gibbsita. Em geral, são ácidos, com baixa saturação por bases, Distróficos ou Ácricos.

Dentre os Latossolos, os Ácricos são os solos com maior incidência na região da presente pesquisa. Para (CHAGAS, 2004), esses solos ocupam uma grande área no Brasil e apresentam textura argilosa, com valores de soma de bases abaixo da camada arável. Esses solos tropicais apresentam uma capacidade de troca de cátions efetiva ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ ) inferior a  $15 \text{ mmol}_c \text{ Kg}^{-1}$  de argila (EMBRAPA, 2018), uma soma de bases e tenção de cálcio extremamente dependente da quantidade de matéria orgânica (LANDELL et al., 2003) e uma concentração significativa de óxidos de ferro (hematita e goethita) e alumínio (gibbsita), devido ao intenso processo de dessilicização (processo de intemperização dos minerais primários) (ROCHA, 2003; SILVA, 2016).

Os Neossolos são solos menos desenvolvidos, com pouco desenvolvimento, deficiência nos atributos que definem os processos pedogenéticos, pouca diferenciação entre horizontes e ausência de horizontes subsuperficiais diagnósticos (EMBRAPA, 2018) e, em geral, estão relacionados à geologia, como as Formações Botucatu e Grupo Bauru na região sudoeste de Goiás.

Segundo Oliveira; Santos; Calegari, (2020), os Neossolos Quartzarênicos estão associados ao relevo plano ou suave ondulado, sendo compostos, principalmente, por quartzo. Apresentam baixos teores de minerais alteráveis, baixa fertilidade natural e estrutura pouco agregada, geralmente composta por grãos simples, o que os torna suscetíveis aos processos erosivos, especialmente quando associados ao uso sem a aplicação de práticas de conservação (EMBRAPA, 2018). Além de não apresentarem cargas positivas e negativas responsáveis em reter nutrientes em sua estrutura.

Tanto o Latossolo, quanto os Neossolos necessitam de práticas de manejo para o uso agropecuário, pois são solos que apresentam baixa fertilidade e podem prejudicar a produção agropecuária. Essas práticas podem ser feitas através da calagem, adubação fosfatada, fertilização, lodo orgânico para aumentar MO no solo, entre outros produtos que, por sua vez, estão enriquecidos de EPTs e possivelmente radionuclídeos.

O uso exagerado de produtos químicos para a produção agrícola contribuiu para o desprezo pela dinâmica natural dos solos (quimicamente, fisicamente e biologicamente), alterando a cobertura

da terra, rompendo com o equilíbrio dinâmico dos processos naturais, tudo para adequar o solo à planta. Além disso, houve uma alteração genética da planta para produzir de forma mais rápida ou se adaptando as regiões mais secas do Cerrado, até porque o solo não é um limitante, mas o clima sim. Tudo isso devido à lógica dos agentes de produção do espaço e o modo de produção capitalista.

### 1.3.1 Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs)

Desde a formação do planeta, todos os elementos metálicos e radioativos estão presentes no meio ambiente e estão distribuídos no solo em condições naturais, sendo classificados como elementos litogênicos que fazem parte dos ciclos biogeoquímicos naturais, em que sua fração é liberada das rochas por meio do processo de intemperismo. O processo é composto por uma ciclagem que ocorre por vários compartimentos, por processos bióticos e abióticos, até atingir o seu destino nas águas superficiais, sedimentos e oceanos (ALLOWAY, 1995; KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 1992; MOREIRA-NORDEMANN, 1987). Acrescido a isso, a concentração desses elementos em diferentes tipos de solos dependerá das características mineralógicas da rocha de origem e do grau de intemperização que esse material sofreu. Existem sítios naturalmente enriquecidos que se apresentam colonizados por biotas adaptadas a essa condição de teores altos de EPTs e radionuclídeos (TAVARES, 2013).

Para López (2015) as rochas ígneas ultrabásicas (Perioditas e Serpentinitas) apresentam os maiores teores de EPTs, seguidas pelas rochas básicas (Gabros e Basaltos). As menores concentrações se encontram nas rochas ígneas ácidas (como Granito) e nas sedimentares (Arenitos e Calcários). Em geral, os EPTs mais abundantes são o bário, o manganês, o ferro e o níquel. Em contraste, o cromo, cobalto, cobre e zinco apresentam em menores concentrações e em mínimas quantidades estão o arsênio, cádmio e mercúrio (BASCONES, 2003; KHAN et al., 2013). Na tabela 1 é possível observar as concentrações médias da crosta terrestre e de algumas rochas dos EPTs que serão analisados nessa pesquisa.

**Tabela 1-** Teores médios de EPTs na crosta terrestre e em diferentes tipos de rochas.

EPT's	Crosta da Terra	Rochas Ígneas			Rochas Sedimentares		Rochas Metamórfica
		Ultramáficas	Máficas	Granito	Calcário	Arenito	Xistos
----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----							
<b>Cu</b>	50	42	90	13	5,5	30	39
<b>Zn</b>	75	58	100	52	20	30	120
<b>As</b>	1,5	1	1,5	1,5	1	1	13
<b>Hg</b>	0,05	0,004	0,01	0,08	0,16	0,29	0,18
<b>Ni</b>	80	2000	150	0,5	7	9	68
<b>Cd</b>	0,1	0,12	0,13	0,09	0,028	0,05	0,22

**Adaptado:** (ALLOWAY, 1995).

Embora existam lugares enriquecidos naturalmente, as atividades antrópicas são as responsáveis por grande parte dos dados ambientais relacionados ao aumento desses elementos no meio ambiente, o que é denominado como processo antropogênico ou fontes contaminantes advindos das atividades industriais, urbanas e práticas de agricultura e pecuária, os quais podem ter sua toxicidade acrescida nos solos (IORDACHE et al., 2020; YANG et al., 2020). Esse aumento pode causar a contaminação dos solos, ou de ambientes aquáticos, quando um elemento é encontrado em níveis superiores ao aceitável em relação aos critérios adotados (áreas de referência, *background* ou Resoluções vigentes), provocando, assim, um impacto à qualidade ambiental e à saúde humana, pois afetam ciclos biogeoquímicos e se acumulam em organismos vivos (XU et al., 2018; BORTEY-SAM et al., 2018).

Em particular a agricultura, recorre a fertilizantes, fungicidas e pesticidas que são insumos agrícolas importantes para a produção. O teor de EPTs em fertilizantes é, geralmente, variável e diminui da seguinte forma: fertilizante fosfatado > fertilizante composto > fertilizantes com potássio > fertilizante nitrogenado (BOYD, 2010; ZHANG; JIANG; OU, 2011). Os fertilizantes fosfatados e corretivos são os principais incorporadores de EPTs para os solos tropicais ácidos e pobres em fósforo, e uma grande parte desses solos está em áreas do Cerrado (KRATZ; SCHICK; SCHNUG, 2016; SILVA; NASCIMENTO; ARAÚJO, 2017). Segundo informações da Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola-ABRACAL (2021) o Brasil consumiu cerca de 45 milhões de toneladas de calcário no ano de 2020.

Segundo dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada-CEPEA, em 2021 o consumo de fertilizantes somou 45,85 milhões de toneladas, sendo que 85% foram importados e pode-se destacar o cloreto de potássio, fertilizante nitrogenado, fosfatado e o nitrato de amônio. A produção agrícola de soja, milho e cana-de-açúcar é responsável por um consumo anual de 73% desses insumos (OSAKI, 2022).

Para Brito et al., (2020) o Cerrado brasileiro sofre diretamente com as atividades agrícolas, e sua vegetação é facilmente revertida em cultivos de soja e milho. Os solos que apresentam uso excessivo de fertilizantes, agroquímicos, lodo de esgoto, esterco suíno e podem contribuir para o aumento de EPTs nessas áreas. Essa preocupação, que surge da intensificação dos elementos no solo provocada pelas atividades antrópicas, é causada pelo fato de o solo ser um meio receptor de uma grande variedade de substâncias potencialmente poluentes e tóxicas, além dos compostos que podem ser formados, afetando toda a microbiota, vegetais e fungos presentes nesse compartimento ambiental (MAQUEDA et al., 2017; MERTENS et al., 2018).

Em outras palavras, o solo tem a capacidade de depurar e imobilizar grande parte das impurezas nele depositadas, o que é um problema sério, uma vez que a permanência desses elementos no solo é

maior do que em qualquer outro compartimento ambiental da biosfera, e ainda podem ser absorvidos pelas plantas, passando para a cadeia trófica. Além disso, uma vez que são remobilizados e lixiviados, podem atingir o compartimento aquático, com condições favoráveis ou não à sua deposição no sedimento (ALLOWAY, 1995; SOUZA; MARQUES JÚNIOR; PEREIRA, 2004; TAVARES, 2013). Toda essa dinâmica que ocorre no solo está relacionada aos aspectos mais abrangentes de características, como a biologia e os processos químicos, embora cada ciclo dos elementos apresente suas transformações específicas e únicas.

A biologia do solo é relevante devido às transformações microbianas do solo (importantes para os ciclos do nitrogênio e do enxofre) e também devido à formação de agentes quelatos orgânicos (importantes para que os microorganismos cátions se tornem disponíveis para serem adsorvidos pelas plantas). Para alguns nutrientes (por exemplo: cálcio, magnésio e potássio), os processos químicos de troca catiônica e intemperismo dos minerais controlam bastante as suas disponibilidades, para poderem ser adsorvidos pelas plantas ou lixiviados. Para outros (por exemplo: nitrogênio, enxofre, ferro e manganês) a oxidação (bio)química e as reações de redução têm papel fundamental. Finalmente, o potencial hidrogeniônico (pH) do solo afeta a solubilidade de praticamente todos os nutrientes, mas essa influência é mais intensa sobre o ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e molibdênio (Mo) (BRADY; WEIL, 2013, p.496).

Portanto, a disponibilidade dos EPTs e dos radionuclídeos nos solos está diretamente relacionada às formas geoquímicas de retenção, que por sua vez são controladas por reações químicas e processos físicos que dependem do pH, capacidade de troca catiônica e a constituição mineralógica do solo, além dos teores de argila, MO e óxidos de Fe, Al e Mn (OLIVEIRA; MARTINS, 2011).

### **3.3.2 Radionuclídeos**

A exposição dos seres humanos à radiação ionizante é atribuída à presença de radionuclídeos naturais, como  $^{40}\text{K}$ , e os da série de decaimento de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  em solos. A concentração desses elementos dependerá de diversos fatores ambientais, como litologia, clima e vegetação local. A análise do comportamento desses elementos no meio ambiente é a principal força motriz de pesquisas visam avaliar os riscos à saúde humana (UNSCEAR, 2010; LEAL et al., 2020).

O intemperismo químico e físico é responsável pelo processo de transformação dos minerais e radionuclídeos presentes nas rochas, que se transformam em regolito e, conseqüentemente, em solo. Alguns dos minerais que compõe a rocha contém radionuclídeos associados. As rochas sedimentares são compostas principalmente por arenitos, folhelhos, rocha detrítica e arenítica, sendo que as de

granulometria fina possuem maior concentração de urânio e tório associados (IVANOVICH; HARMON, 1992 apud GONÇALVES, 2019).

As rochas ígneas possuem maior concentração em relação às intermediárias, básicas e ultrabásicas e, sobretudo, são compostas por minerais acessórios levemente radioativos, como zircão e apatita. Isto é, minerais acessórios altamente radioativos, como exemplo a monazita, alanita, pirocloro, uraninita e torita, são mais escassos que estes (LARSEN; GOTTFRIED, 1957; FERREIRA, 2013).

A maior concentração de U está em minerais como uraninita e uranita, bem como traço em minerais principais como quartzo e feldspatos. O Th ocorre em minerais puros com a torianita ou torita que são raros, mas pode ocorrer em minerais que contêm urânio e terras raras como, a monazita. O potássio é um elemento vital que compõe minerais que originam de rochas, como álcali feldspatos, biotita, glauconita, leucita, microcrínio, ortoclásio, muscovita, nefelina e silvita (FERREIRA, 2013). A tabela 2 apresenta a concentração de radionuclídeos em diferentes tipos de rochas.

**Tabela 2-** Concentrações médias de radionuclídeos em diferentes tipos de rochas.

Classes de rochas	Concentrações Médias		
	eU	eTh	K
	----- (ppm) -----		-- (%) --
<b>Extrusivas ácidas</b>	4,1	11,9	3,1
<b>Intrusivas ácidas</b>	4,5	25,7	3,4
<b>Extrusivas intermediárias</b>	1,1	2,4	1,1
<b>Intrusivas intermediárias</b>	3,2	12,2	2,1
<b>Extrusivas básicas</b>	0,8	2,2	0,7
<b>Intrusivas básicas</b>	0,8	2,3	0,8
<b>Ultrabásicas</b>	0,3	1,4	0,3
<b>Extrusivas intermediárias alcalifeldspáticas</b>	29,7	133,9	6,5
<b>Intrusivas intermediárias alcalifeldspáticas</b>	55,8	132,6	4,2
<b>Extrusivas básicas alcalifeldspáticas</b>	2,4	8,2	1,9
<b>Intrusivas básicas alcalifeldspáticas</b>	2,3	8,4	1,8
<b>Rochas sedimentares químicas (incluem as carbonáticas)</b>	3,6	14,9	0,6
<b>Carbonáticas</b>	2,0	1,3	0,3
<b>Sedimentares detríticas</b>	4,8	12,4	1,5

Fonte: (BECEGATO, 2005). Adaptada de (KILLEEN, 1979).

Em geral, esses elementos estão presentes na crosta terrestre de forma bastante ampla, respondendo por cerca de 60% a 70% da radiação ionizante total que atinge o ser humano. Dados da literatura indicam que a abundância média do urânio na crosta terrestre varia entre 2 e 3 ppm, tório entre 8 e 12 ppm e a do potássio entre 2 e 2,5% (DICKSON; SCOTT, 1997; GODOY et al., 2010).

A presença de radionuclídeos naturais não indica a presença de contaminação exceto se a sua concentração seja aumentada pela atividade humana como as atividades agropecuárias tratadas com diversos produtos químicos a fim de aumentar o rendimento agrícola (ZGORELEC et al., 2021).

Ribeiro (2013) conceitua contaminação como:

“Presença de concentrações elevadas de substâncias na água, solo, sedimentos ou nos organismos, isto é, concentrações que estão acima do nível base para uma dada área e um dado organismo. Em contraste, o termo poluição deve ser definido como a introdução pelo Homem, direta ou indiretamente, de substâncias ou energia no ambiente, resultando em efeitos nocivos que prejudiquem os recursos biológicos e constituam um perigo para a saúde humana e para os ecossistemas”. (RIBEIRO, 2013, p.26).

Todavia, a disponibilidade dos contaminantes dependerá das características físicas dos solos, como a textura, o tipo do solo, e a granulometria. São essas características que terão um impacto na adsorção e, conseqüentemente, na biodisponibilidade deles, podendo ser de origem biológica, química inorgânica ou radioativo. (BRANDÃO; MOURA; RODRIGUES, 2012; RIBEIRO, 2013).

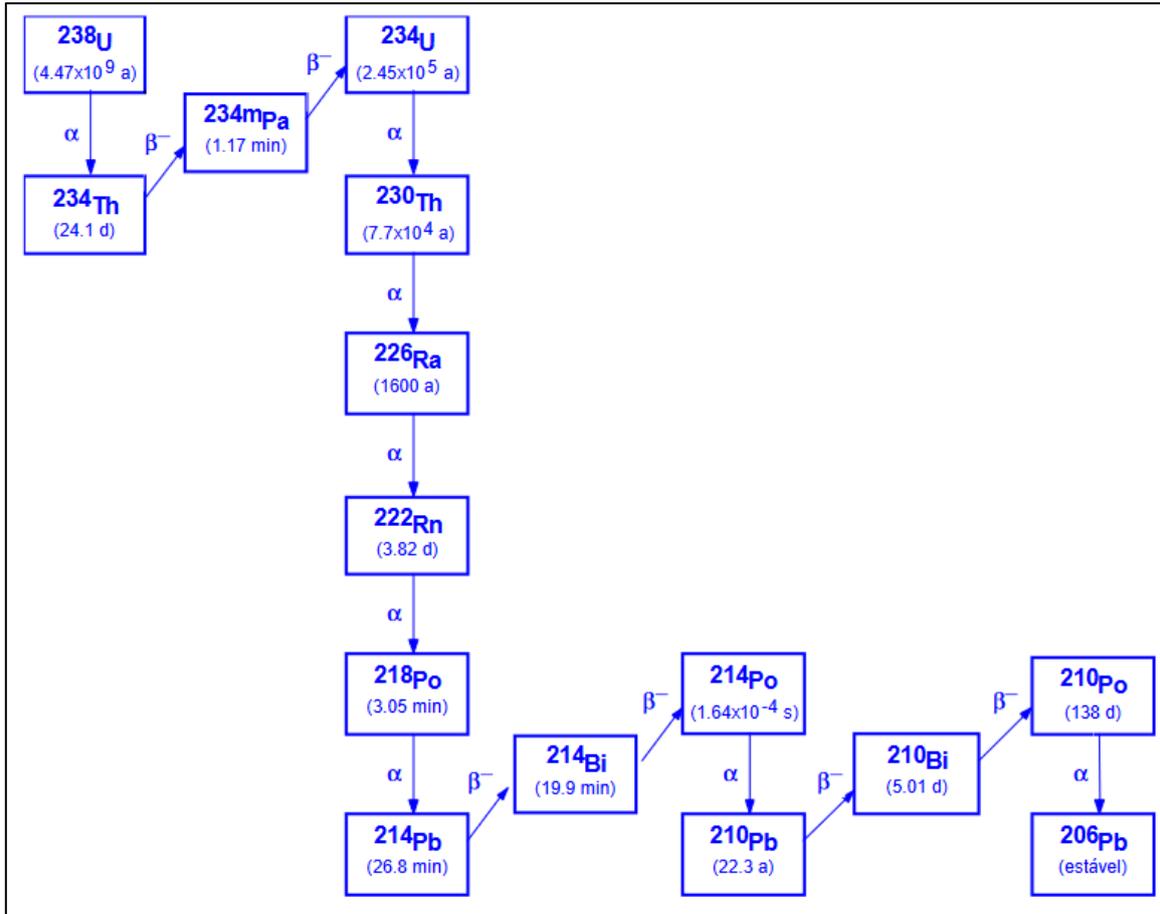
Dentre os produtos químicos, os fertilizantes e outros corretivos do solo são de interesse especial, pois podem ter origem mineral e, conseqüentemente, conter quantidades significativas de radionuclídeos naturais, e dependendo da matéria-prima utilizada (BAYRAK; KELEŞ; ATIK, 2018).

O fosfógeno é um corretivo bastante utilizado no manejo do solo, que contém cálcio, enxofre e água livre, além de uma grande quantidade de radionuclídeos de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  que podem mimetizar os elementos biogênicos do solo, de forma que sejam facilmente absorvidos por uma planta (BECEGATO et al., 2019). A detecção desses radionuclídeos pode ser feita através do levantamento gamaespectrométrico, que auxilia no conhecimento da distribuição desses radionuclídeos no meio ambiente.

Para a medição, é empregado um espectrômetro gama, um dispositivo que separa a radiação gama em dois ou mais componentes de energia. O detector é geralmente um cristal de iodeto de sódio ativado (NaI (Tl)) que absorve os raios gama e os converte em pulsos de luz ou cintilação. Essas cintilações são convertidas em sinais elétricos de intensidade proporcional à intensidade da luz, cujos volts são divididos em várias categorias para se obter o espectro de energia dos raios gama incidentes (HANSEN, 1975; NASCIMENTO, PIRES e MORAES, 2004; BECEGATO, 2005).

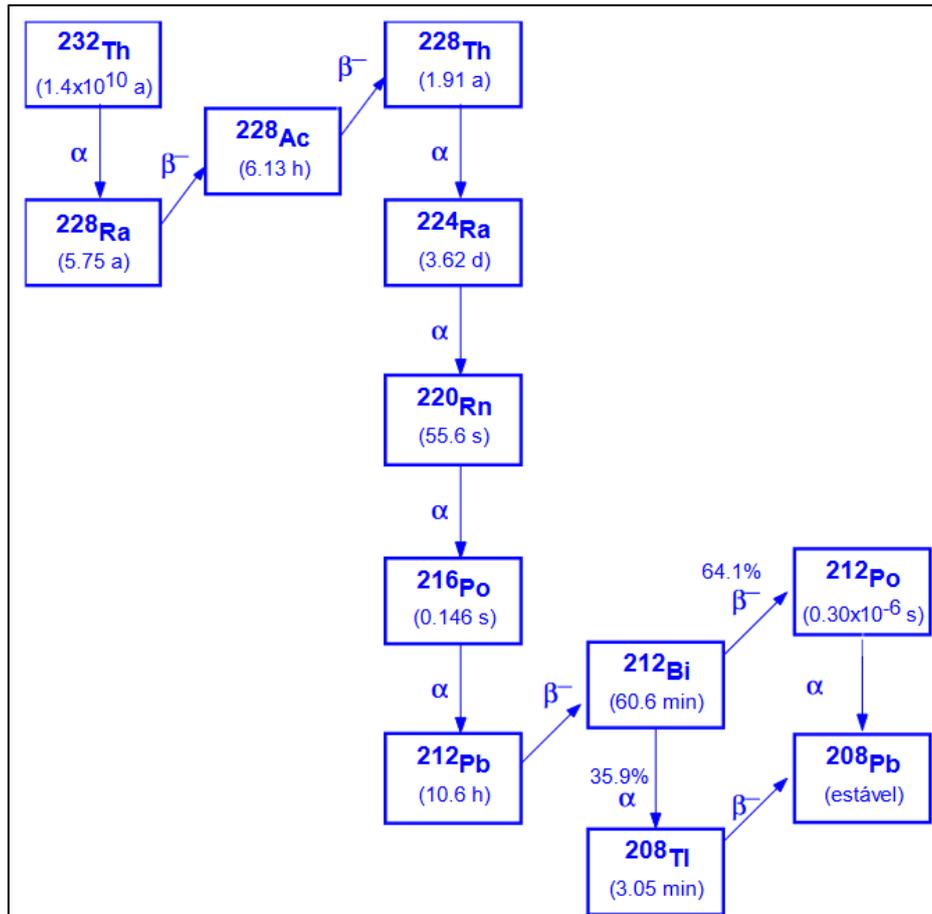
A concentração dos elementos é proporcional à intensidade da radiação gama emitida pela série ou decaimento radioativo dos isótopos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  (Figura 14) e  $^{232}\text{Th}$  (Figura 15). Normalmente os levantamentos são realizados por via aérea quanto por equipamentos terrestres.

**Figura 14** – Série radioativa natural do  $^{238}\text{U}$ .



Fonte: Damatto (2010).

**Figura 15** – Série radioativa natural do  $^{232}\text{Th}$ .



**Fonte:** Damatto (2010).

Para Becegato (2005) a capacidade de penetração dos raios gama ( $\gamma$ ) é 100 vezes superior aos raios beta ( $\beta$ ) e por não possuírem carga, não sofrem influência de campos elétricos ou magnéticos. Com isso, os raios  $\gamma$  são equivalentes aos raios X, possuem a velocidade da luz e exibem comprimentos de onda entre  $7 \times 10^{10}$  e  $4,1 \times 10^8 \text{cm}$ , ou frequências ente  $3 \times 10^{19}$  e  $3 \times 10^{21} \text{Hz}$  (BECEGATO, 2005).

A radiação gama no solo é inversamente proporcional à densidade do meio em que se propaga, e qualquer matéria contida entre o transmissor e o sensor afetará muito a detecção de raios gama. Isso torna a medição da radiação essencialmente superficial, com profundidade média variando de 30 a 40 cm (MINTY, 1988).

Ribeiro et al. (2013), listam algumas fontes de interferência do gama, tais como: a cobertura vegetal do solo, a vegetação densa, a umidade dos solos, as variações de temperatura atmosférica, a umidade relativa do ar e a presença de nuvens, o fenômeno de inversão térmica, uma grande variação topográfica, a distância entre o sensor do espectrômetro e a superfície amostrada, bem como o espaço entre as linhas de aquisição e os pontos medidos.

## 4. METODOLOGIAS PROPOSTAS

### 4.1 COMPARTIMENTAÇÃO AMBIENTAL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

A compartimentação ambiental foi dividida em 3 etapas principais: 1) Definição e delimitação das bacias hidrográficas e seus interflúvios (passo 1, passo 2 e passo 3); 2) Definição das unidades de paisagem (passo 4 e passo 5) e 3) Criação dos Compartimentos da Paisagem (passo 6).

#### 4.1.1. Definição e delimitação das bacias hidrográficas e seus interflúvios

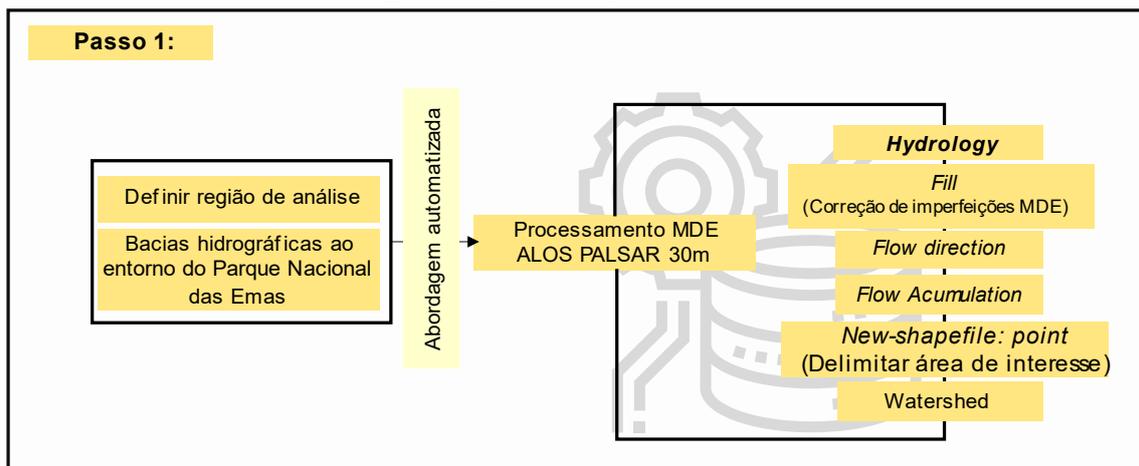
A definição da área de estudo é orientada pelo objetivo: compartimentos ambientais em quatro bacias hidrográficas que compreendessem as relações funcionais e estruturais das áreas fora de uma Unidade de Conservação (UC) que fossem sub-representadas dentro dessa UC. Assim, entende-se a bacia hidrográfica como unidade de análise geográfica para realizar um estudo de sistemas por meio da análise e modelagem de sistemas ambientais análogos espaço-temporais (CHRISTOFOLETTI, 1999; ROSS, 2006; POSSAS, 2017).

Nesse sentido, as bacias hidrográficas nas quais está contido o Parque Nacional das Emas, devem ser compartimentadas em unidades com características do meio físico análogas e, assim, tem-se a espacialização da relação espaço-temporal sociedade/natureza, conforme orienta ROSS (2006):

as pesquisas que envolvem a relação sociedade-natureza têm por objetivo não só o entendimento das potencialidades dos recursos naturais, mas também das potencialidades humanas, das fragilidades dos sistemas ambientais naturais, como também das fragilidades socioculturais das sociedades humanas. Tais diretrizes devem focalizar as necessidades de ações de preservação ambiental, de conservação da natureza e de recuperação dos ambientes degradados (ROSS, 2009, p. 20).

Dessa forma, essa etapa envolve, por sua vez, as primeiras 3 etapas dos procedimentos metodológicos: 1) Definição da região de análise e principais bacias hidrográficas; 2) Definição dos interflúvios das bacias hidrográficas; e 3) Correção topológica dos interflúvios criados.

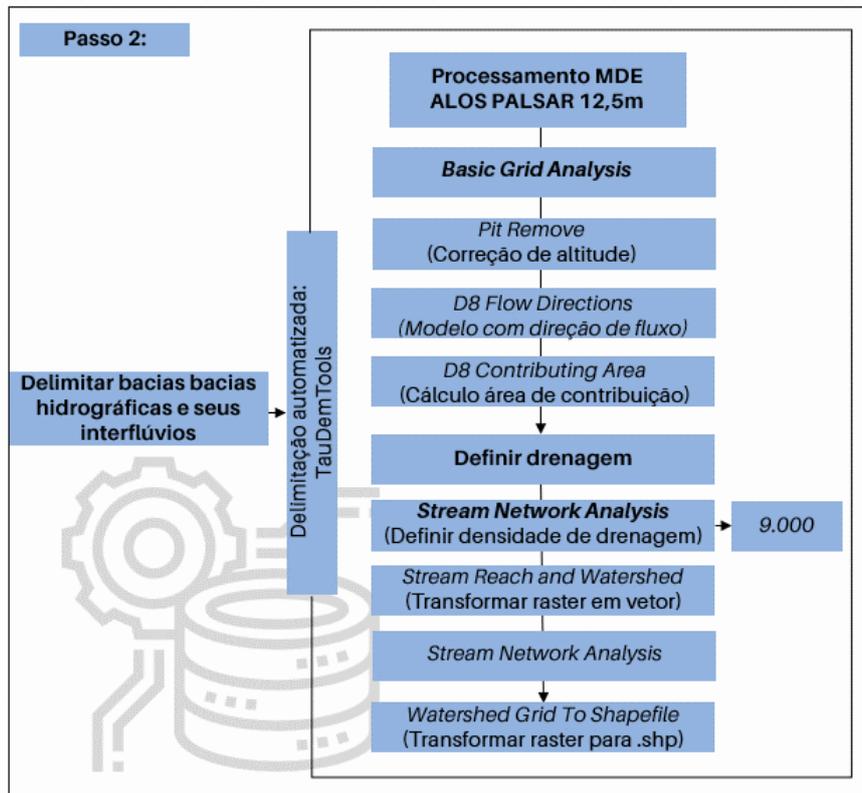
Na primeira etapa foi realizada, inicialmente, a delimitação automática em ambiente SIG a partir de algoritmo pré-definido das bacias hidrográficas que fazem parte da área de influência do Parque Nacional das Emas (Figura 16), partindo de uma proposta de escala regional, que ficou em volta das bacias hidrográficas do rio Formoso, rio Jacuba, rio Alto-Sucuriú e rio Água-Amarela.

**Figura 16-** Procedimento metodológico do primeiro passo 1.

**Org.:** Própria autora (2022).

Depois de delimitada a região de análise, foi realizado a fragmentação das bacias hidrográficas de ordem menores de maneira automatizada com a ferramenta TauDEM Tools no Arcgis (Figura 17) que é um conjunto de ferramentas para a extração e análise de informações hidrológicas da topografia, tendo como base um MDE.

**Figura 17-** Procedimento metodológico do passo 2.

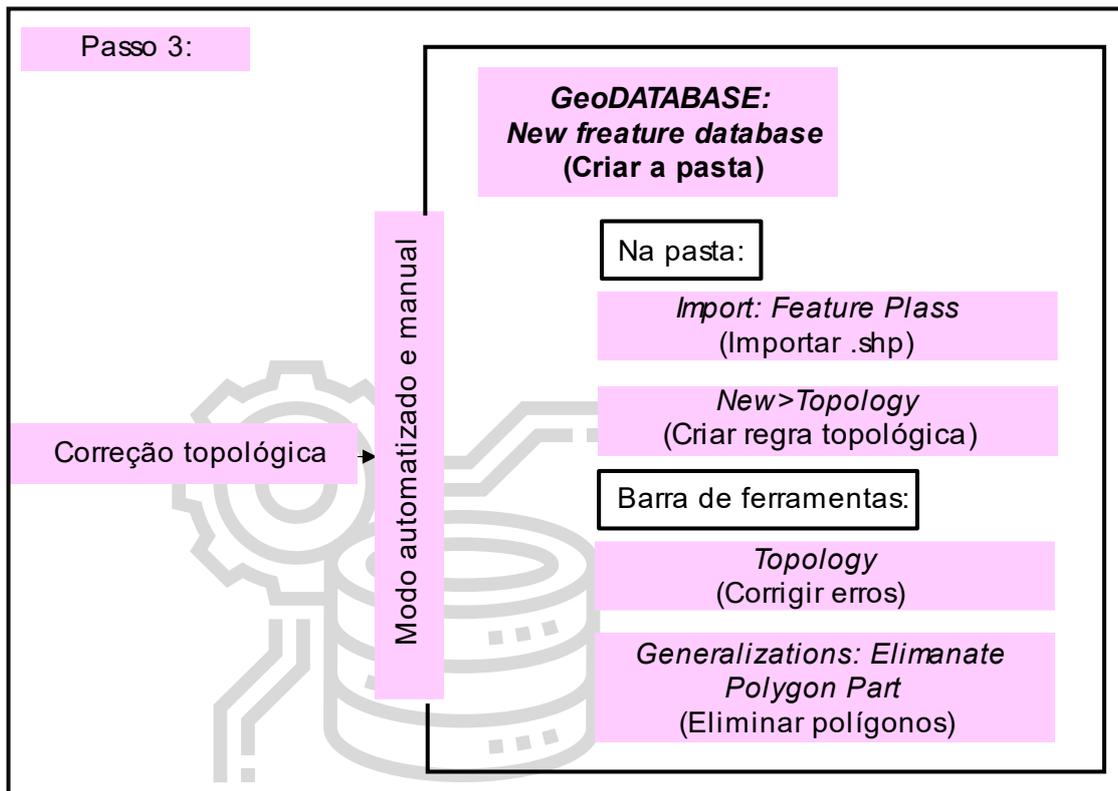


**Org.:** Própria autora (2022).

Essa ferramenta trabalha com dados vetoriais lineares e poligonais, podendo integrar as análises de terreno em dados matriciais para a extração de rede de drenagem e as bacias finais dotadas de suas características geométricas (MENDES, 2018; SILVA, 2004). Com isso, foram delimitadas todas as bacias hidrográficas e seus interflúvios (unidades hidrológicas), segundo a densidade de drenagem (9000) criada por essa ferramenta, esse valor foi escolhido depois de vários testes, sendo o valor que mais representa os cursos d'água da região de análise.

O terceiro passo metodológico implica no refinamento das delimitações criadas pela ferramenta *TauDEM Tools*, para isso aplicou-se a Correção Topológica do arquivo .shp via *Database*, tendo como objetivo identificar e corrigir inconsistências topológicas por processos automáticos ou manuais (Figura 18).

**Figura 18-** Procedimento metodológico do passo 3.



**Org.:** Própria autora (2022).

A topologia faz parte de um dos elementos que descrevem a qualidade de dados espaciais, a consistência lógica que é definida como o grau de aderência das feições às regras lógicas de estrutura de dados (FONTE et al., 2017). Ainda em ambiente SIG, foi desenvolvida para fornecer um método automático rigoroso para verificação dos dados e limpeza dos erros de entrada, garantindo uma solução automatizada, baseada em regras, para a manutenção da integridade espacial do dado em SIG (FERREIRA; PAZ, 2018; THEOBALD, 2001).

Foi realizado a delimitação da área de estudo, depois avaliação do contexto e por último a identificação dos principais contrastes observáveis (CAVALCANTI, 2018), tendo como ferramenta de aplicação a geoinformação, principalmente os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (CÂMARA; DAVIS, 2001; GOODCHILD, 2011).

#### 4.1.2 Unidades da Paisagem

Os recursos metodológicos que conduz a tese possibilitaram um estudo integrado da paisagem em bacias hidrográficas, que implica na adoção do método da análise sistêmica e abordagem holística, cuja disseminação na Geografia Física serviu de aporte teórico e metodológico para inúmeros trabalhos

que almejam fazer uma análise integrada dos sistemas ambientais a partir da conjunção de metodologias.

A análise integrada não se apresenta como um procedimento simples, sendo necessária uma rede de interações, padrões de distribuição e processos que são mais bem entendidos usando a dimensão territorial como base para a integração dos temas (OLIVEIRA, 2019a). O caráter visível da paisagem confere plena possibilidade de sua cartografia, representada pelas chamadas unidades de paisagem (BRAZ; NETO, 2021; MOURA-FÉ, 2019).

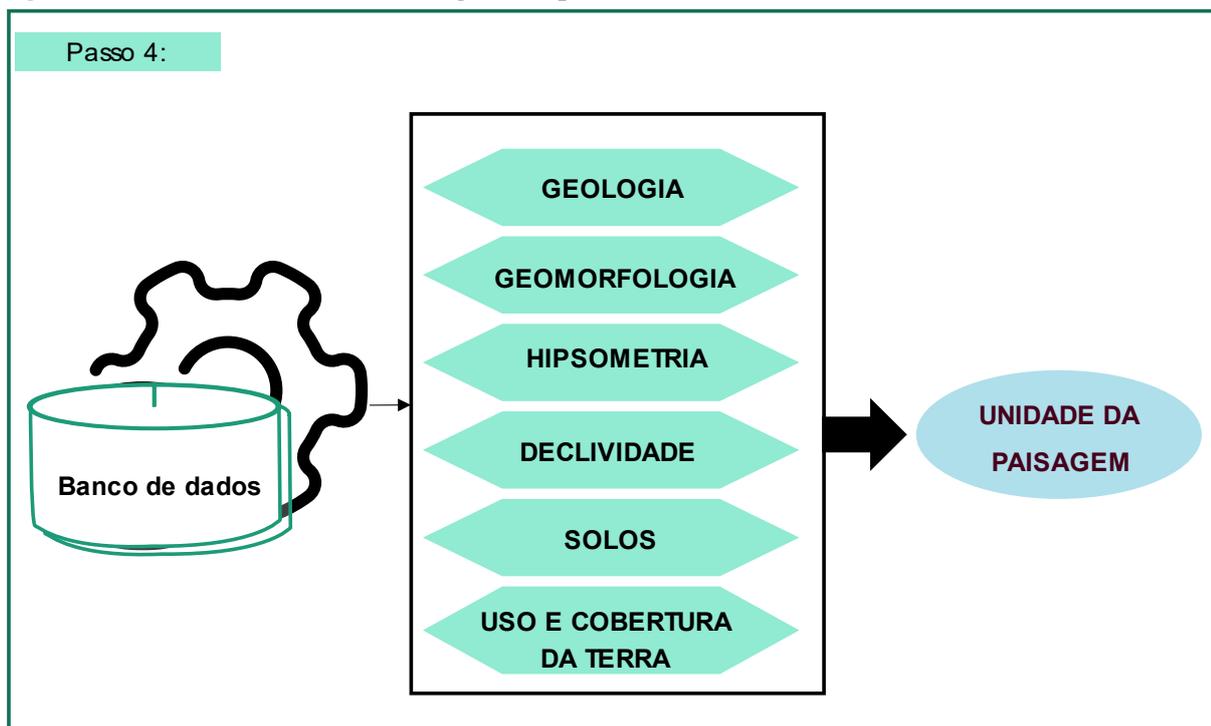
Primeiramente foi montado um banco de dados (Tabela 3) com base nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), *United States Survey* (USGS), *EarthData*, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) entre outras páginas, através do Software de geoprocessamento no ArcGIS 10.6.1<sup>®</sup>. Vale ser ressaltado que na área da pesquisa não existem mapas na escala inferior a 1:250.000.

**Tabela 3** – Relação dos dados adquiridos para o banco de dados.

<b>Arquivos</b>	<b>Fonte</b>	<b>Formato</b>	<b>Metadado</b>
Limites Políticos-Administrativos	IBGE	.shp	1:250.000
Geologia	IBGE	.shp	1:500.000
Geomorfologia	IBGE	.shp	1:250.000
Pedologia	IBGE	.shp	1:250.000
Drenagem	IBGE	.shp	1:250.000
Bioma Cerrado	IBGE	.shp	1:250.000
Imagem ALOS PALSAR	EarthData	.tiff	30m (Resolução)
Imagem Landsat 8	USGS/Earth Explorer	.tiff	Sensor OLI/ 3m e 15m. 07/09/2020
PARNA Emas	ICMBio	.shp	Levantamento topográfico

**Org.:** Própria autora (2022).

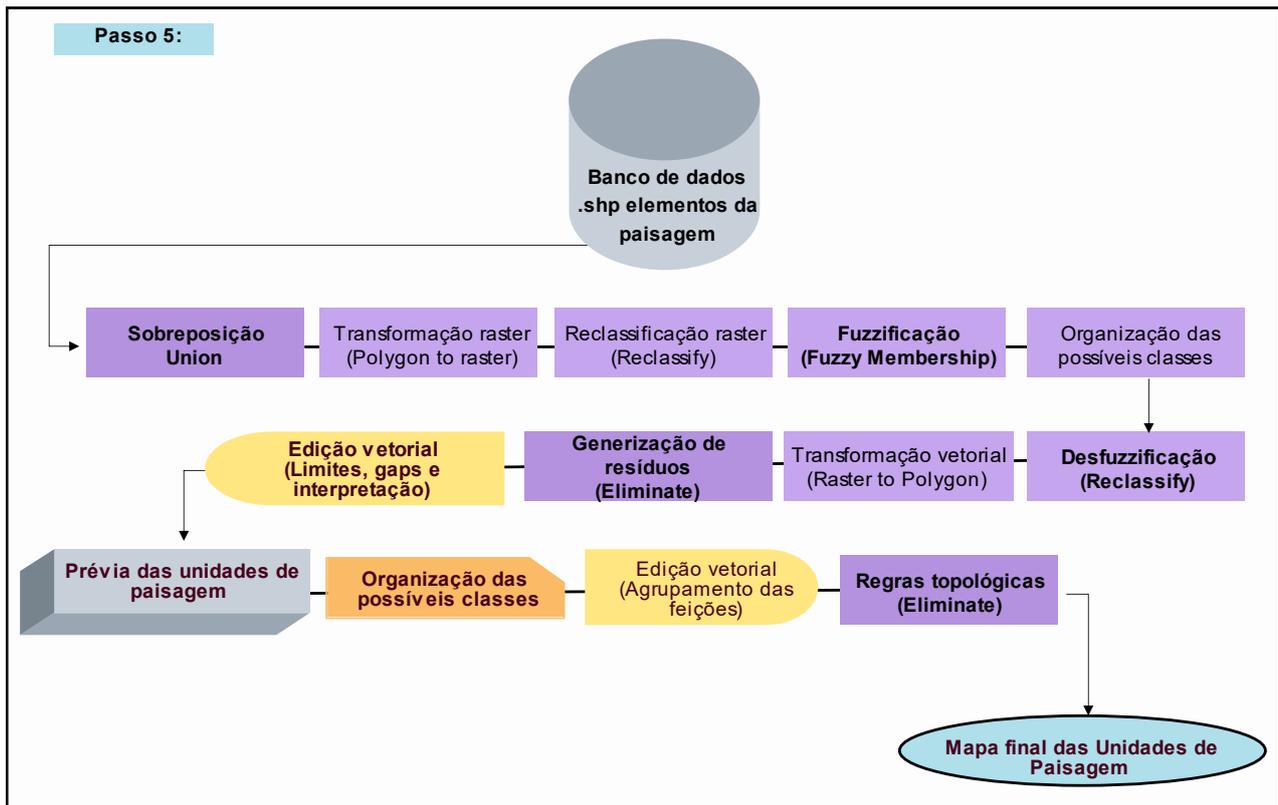
Para a delimitação e definição das unidades de paisagem na região de análise foram utilizados todos os dados temáticos disponíveis que sistematizam as informações biofísicas da área, integrando-as, como a geologia, geomorfologia, hipsometria, declividade, pedologia e uso e cobertura da terra (Figura 19).

**Figura 19-** Procedimento metodológico do passo 4.

**Org.:** Própria autora (2022).

A representação cartográfica da paisagem foi estruturada e representada de forma sintética, por ser considerada a mais adequada, uma vez que considera as unidades como um todo integral, a partir da escala regional de 1:250.000 a 1:500.000 que tem como unidade principal representar suas localidades, seus tipos e modificações antropogênicas (VICENS; RODRIGUEZ; CRONEMBERGER, 2020). A partir daí foram importados os dados do meio físico para composição das camadas (*layers*) e organização das sobreposições (Figura 20).

**Figura 20-** Procedimento metodológico do passo 5.



**Fonte:** Adaptado de (BRAZ, 2020).

A sobreposição foi realizada através da ferramenta de geoprocessamento que calcula a união geométrica dos elementos da paisagem, *Union*, em formato vetorial (.shp). Como ressaltado por Oliveira, Braz e Cavalcanti (2022), a união dos arquivos contém todas as informações (atributo) de cada um dos elementos das paisagens considerados para a síntese. Depois o resultado foi convertido para um dado raster (.tiff) (*Polygon to Raster*) e, posteriormente, teve seus valores reclassificados (*Reclassify*) e submetidos a lógica fuzzy (*Fuzzy Membership*).

A lógica *fuzzy* é de extrema importância para a próxima fase de classificação das classes de paisagem, pois a ferramenta atua com imprecisões, uma vez que os limites entre as unidades de paisagens, em algumas situações são abruptos e bem marcados e em outros casos é de modo difuso e interdigitada, ajudando assim na criação de limites dessas unidades (BRAZ, 2020; MARQUES NETO, 2016).

Depois realizou-se *desfuzzificados* que é a transformação dos graus de pertinência *fuzzy* resultados nítidos fatiados por classes. Feito esses procedimentos as classes criadas foram transformadas em vetor (shp) para tratar os resíduos e corrigir todos os erros de agrupamentos ou separação das possíveis unidades.

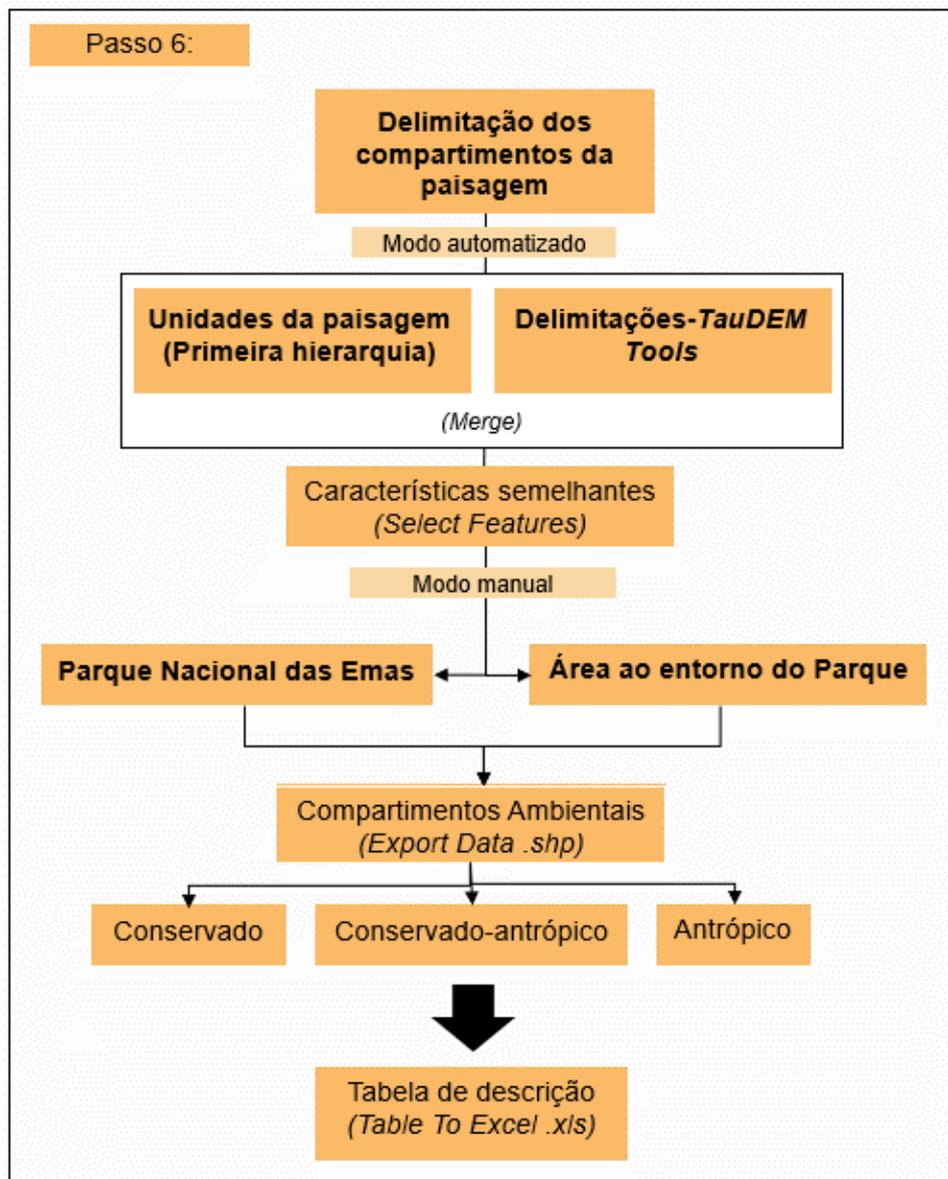
Os resíduos foram generalizados automaticamente com a ferramenta *eliminate*, em que o valor mínimo para as feições representativas (área mínima cartografável) de 5ha, ou seja, escala de 1:50.000. Esse processo de generalização deixa muitos resíduos no arquivo, necessitando uma edição do vetor (BRAZ, 2020). Esse procedimento foi realizado manualmente, onde cada polígono foi editado e verificado conforme os elementos da paisagem e finalmente obteve-se um arquivo .shp contendo 17 unidades da paisagem de primeira hierarquia e 65 unidades da paisagem de segunda hierarquia, subdividida fielmente ao uso da região, esse último não será discutido nos resultados. Cada unidade, dependendo do nível, foi descrita também de forma escrita na tabela de atributos e transferido via ArcToolbox (*Conversion Tools-Table To Excel*) para a tabela do software *Excel*.

Assim, o mapeamento das unidades de paisagem tem por base as informações ressaltadas por Rodríguez (2008) sobre as informações das paisagens a serem consideradas em SIG: 1) Estrutura vertical e horizontal dos elementos, através da representação das paisagens; 2) Inter-relação dos elementos que compõem as paisagens e a sua manifestação funcional; 3) Influências antroponaturais sobre as paisagens; 4) Dinâmica natural (ambiental) e funcional das paisagens.

#### **4.1.3 Compartimentação Ambiental**

A última e sexta etapa dos procedimentos metodológicos resultaram na compartimentação das unidades da paisagem. Essa etapa teve como objetivo delimitar as unidades de primeira hierarquia que consistem nas características naturais da região, discriminando o uso e cobertura da terra (Figura 17).

**Figura 21-** Procedimento metodológico do passo 6.



Org.: Próprios autores (2022).

A delimitação da paisagem constituiu em pegar áreas fora do PNE que são sub representadas dentro do Parque. Logo em seguida esse compartimento foi subdividido em áreas menores, como segmento conservado, segmento antrópico-conservado e segmento antrópico.

Todos esses procedimentos foram realizados em ambiente SIG no *ArcGIS*, sendo que primeiramente fez um *merge* das unidades da paisagem com as delimitações criadas no *TauDEM Tools*, em seguida usou o *select features* para criar o compartimento e depois salvou via *export data* no *ArcToolbox*.

## 4.2. ANÁLISE DOS SOLOS

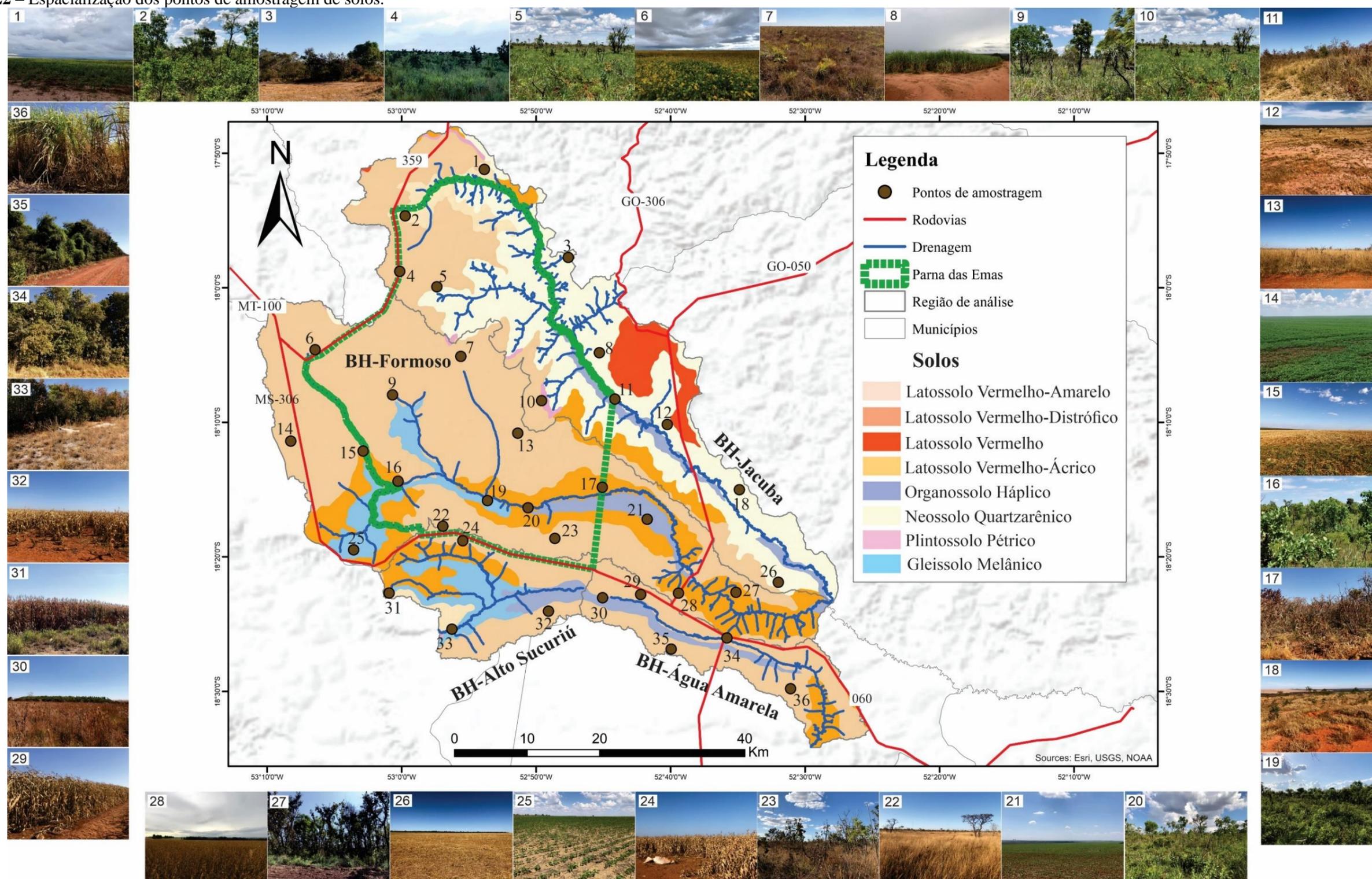
### 4.2.1 Pontos de coletas

Foram coletadas 36 amostras (Figura 22 e Tabela 4) de solo para fins de descrição das características físicas e químicas, foram coletadas na profundidade 0-20 cm da camada superficial, rica em matéria orgânica, onde são comuns os processos de laterização e pedogênese (SANTOS, 2009).

Foram coletadas três amostras de solo numa malha de amostragem de 20 m X 20 m. Obteve-se um quilo de solo superficial, aproximadamente 20 cm de profundidade. Este procedimento de composição da amostra tem o objetivo de evitar erros grosseiros, como àqueles que podem ocorrer na coleta de um único ponto (ABRAHÃO e MARQUES, 2013). Esses autores ressaltam que é preferível coletar vários pontos, minimamente compostos, localizados a longas distâncias do que fazer uma grande composição de subamostras que tente representar toda a unidade

Após a coleta, as amostras de solos foram homogeneizadas e acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e secas ao ar livre para posterior transporte ao laboratório de Geociências Aplicadas da UFJ. No laboratório as amostras foram secas em estufas de ventilação forçada a uma temperatura constante de 40 °C, destorroadas e passadas por peneiras de 2 mm para serem analisadas posteriormente.

Figura 22 – Espacialização dos pontos de amostragem de solos.



**Base cartográfica:** Banco de Dados de Informações Ambientais-BDIA/IBGE/SIEG/SEPLAN/IMASUL/Forest-GIS.

**Projeção:** Sirgas\_2000\_UTM\_Zone\_22S.

**Org.:** Própria autora (2023).

**Tabela 4-** Descrição das categorias pedológicas, geológicas e das atividades antrópicas observadas para cada ponto de amostragem das bacias hidrográficas da área de influência do PARNA das Emas.

ID	Tipos de solos	Textura	Litologia	Uso e da terra
1	LVA	Franco arenosa	Depósito arenoso	Agricultura
2	LVA	Argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural-PARNA
3	RQ	Areia	Depósito arenoso	Vegetação natural
4	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural-PARNA
5	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural-PARNA
6	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Agricultura
7	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural-PARNA
8	RQ	Areia	Depósito arenoso	Agricultura
9	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural-PARNA
10	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural-PARNA
11	OX	Franco arenosa	Depósito de areia, depósito de cascalho	Vegetação natural-PARNA
12	RQ	Areia	Depósito arenoso	Pastagem
13	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural-PARNA
14	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Agricultura
15	LVd	Argilo arenosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Agricultura
16	LVd	Argilo arenosa	Depósito de areia, depósito de cascalho	Vegetação natural-PARNA
17	LVd	Areia	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural-PARNA
18	RQ	Areia	Depósito arenoso	Pastagem
19	GM	Argila	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural-PARNA
20	LVd	argila	Arenito, argilito arenoso	Vegetação natural-PARNA
21	OX	Franco arenosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Agricultura
22	LVw	Areia franca	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural-PARNA
23	LVw	Franco argiloso Arenosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural-PARNA
24	LVw	Argila	Argilito, arenito, depósito de areia	Agricultura
25	GM	Argila	Argilito, arenito, depósito de areia	Agricultura
26	RQ	Franco arenosa	Depósito de areia, depósito de cascalho, depósito de argila	Agricultura
27	LVd	Franco argiloso arenosa	Basalto, basalto-andesito	Vegetação natural
28	LVd	Argila	Argilito, arenito, depósito de areia	Agricultura
29	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Agricultura
30	OX	Argilo arenosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Área de APP
31	GM	Argila	Argilito, arenito, depósito de areia	Agricultura
32	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Agricultura

33	GM	Areia franca	Argilito, arenito, depósito de areia	Área de APP
34	LVw	Argilo arenosa	Depósito de areia, depósito de cascalho	Vegetação natural
35	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Vegetação natural
36	LVw	Muito argilosa	Argilito, arenito, depósito de areia	Agricultura

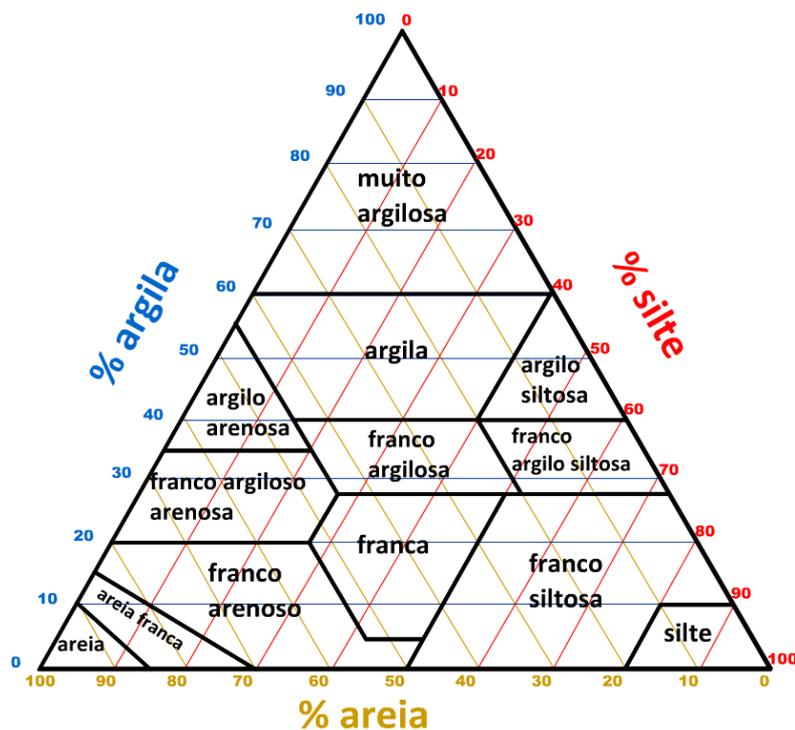
**Legenda:** LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVw - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háptico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

**Org.:** Própria autora (2022).

#### 4.2.2 Análise de textura dos solos

O triângulo textural é uma ferramenta usada para determinar a textura do solo (Figura 23), que é definida pela proporção de areia, silte e argila presentes no solo. O triângulo é formado por três vértices, cada um representando uma fração granulométrica com 100% de sua presença no solo. No entanto, é importante notar que as frações de areia grossa e areia fina são combinadas para formar a fração de areia (RESENDE et al., 2014).

**Figura 23-** Representação das classes de textura pelo triângulo textural.



Para determinar a textura do solo através do triângulo textural, é necessário determinar a proporção de cada fração granulométrica presente no solo, conforme a proposta da Embrapa (2017). As areias são separadas por peneiramento. A fração argila total (diâmetro menor que 0,002 mm) é determinada por pipetagem (Lei de Stokes) e a fração silte (diâmetro entre 0,05 e 0,002 mm) é calculada pela soma das frações areia e argila total.

Em seguida, essas proporções são inseridas no triângulo textural com o auxílio do *software R* criando um ponto que representa a textura do solo. Cada ponto no triângulo representa uma combinação única de proporções de areia, silte e argila, que determinam a textura do solo.

O triângulo textural é uma ferramenta valiosa para determinar a textura do solo e pode ajudar auxiliar na tomada de decisões relacionadas à fertilidade do solo, manejo de culturas e irrigação.

### 4.2.3 Variáveis químicas

As análises dos EPTs arsênio (AS), cádmio (Cd), cobre (Cu), chumbo (Pb), zinco (Zn) e níquel (Ni) foram realizadas por emissão plasma-óptica indutivamente acoplado Espectroscopia (ICP-OES) segundo a Referência: US-EPA-3051a.

Para a determinação do pH do solo usou-se 10 g de amostra in natura em béquer de 100 mL e adição de 50 mL de solução de cloreto de cálcio 0,01 mol/L. Após 30 minutos, com ocasional agitação, o pH foi medido (JACKSON, 1967).

Para determinação dos cátions metálicos totais trocáveis (CTC) utilizou-se 2,50 g de amostra. Em seguida adicionou-se 25,00 mL de uma solução de ácido acético 1,00 mol L<sup>-1</sup> e a suspensão foi agitada durante o período de 1 hora e então, mediu-se o pH, assim como o pH da solução de ácido acético. A determinação dos cátions metálicos totais trocáveis foi feita a partir da equação 1 (JACKSON, 1967).

$$CTC \text{ (cmolc/kg)} = [pH1 - pH2] \times 22 \quad \text{(Equação 1)}$$

onde *pH1* corresponde ao pH da suspensão, *pH2* corresponde ao pH da solução de ácido acético e 22 é uma constante logarítmica.

Os procedimentos das variáveis químicas foram realizados no laboratório de análises ambientais Venturo na cidade de Araraquara/SP.

### 4.2.4 Variáveis radionuclídeos

As concentrações dos radionuclídeos foram obtidas a partir da utilização do equipamento gamaespectrômetro portátil modelo PGIS-2 fabricado pela NUVIA *Dynamics Inc.* (Canadá) que é de posse do Laboratório de Geociências da Universidade Federal de Jataí, Goiás. Além do aparelho, foram utilizados os *softwares* desenvolvidos pelo fabricante e aparelho celular, responsável pelo controle das medições e pelo caminho realizado pelo operador (Figura 24 A e B).

**Figura 24** – Celular e Gamaespectrômetro.

**Org.:** Própria autora (2020).

Em cada ponto de coleta foi definida uma malha de amostragem, georreferenciada com GPS. A energia capturada pelo sensor reflete o comportamento dos radionuclídeos em até 30 cm de profundidade do perfil do solo, dependendo da densidade do solo e do teor de umidade (Mello et al. 2021).

#### 4.2.4.1 Procedimento para coleta do PGIS-2 - Gamma-Ray Spectrometer System- Gamaespectrômetro

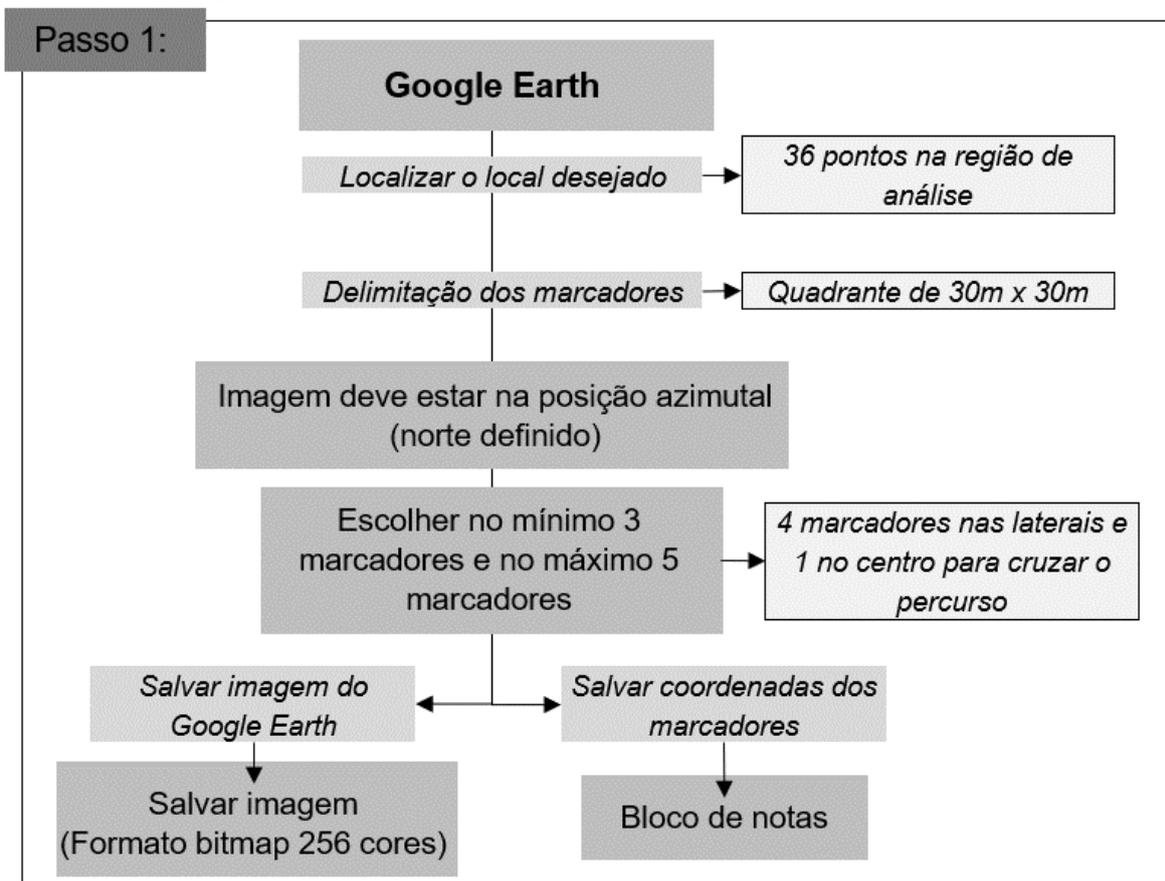
Os gamaespectrômetros são equipamentos que separam a energia da radiação gama em janelas ou faixas. O detector, normalmente é um cristal de iodeto de sódio ativado por tálio (NaI(Tl)), absorve a radiação gama e a transforma em pulsos luminosos ou cintilações. Estas cintilações são convertidas em sinais elétricos proporcionais à intensidade da luz, cujas medidas em Volts são separadas em classes, de modo a obter um espectro de energia dos raios gama incidentes (NASCIMENTO, PIRES e MORAES, 2004; BECEGATO, 2005).

Para Becegato (2005) os elementos de ocorrência natural que produzem raios gama de suficiente intensidade e energia para serem medidos por gamaespectrômetros são o potássio, o urânio e o tório. A radiação gama no solo é inversamente proporcional à densidade do meio que atravessa, sendo que qualquer matéria contida entre o emissor e o sensor pode afetar significativamente a detecção dos raios gama. No qual, a leitura funciona da seguinte maneira:

“O potássio é identificado e quantificado pelo instrumento através da absorção de uma energia de 1,46 Mev, correspondente ao único isótopo natural ( $^{40}\text{K}$ ), o qual representa 0,012 % do K total (os outros isótopos não são radioativos e representam, respectivamente, 93,26% e 6,73% do K total). Os isótopos naturais da série do urânio constituem uma mistura, principalmente de  $^{238}\text{U}$  (99,3%) e  $^{235}\text{U}$  (0,7%), representativa de complexas cadeias de decaimento, as quais terminam em isótopos estáveis de  $^{206}\text{Pb}$  e  $^{207}\text{Pb}$ , respectivamente. O urânio é detectado pela energia de 1,76 Mev, correspondente a absorção do  $^{214}\text{Bi}$  da série do  $^{238}\text{U}$ , utilizada para identificar e quantificar o urânio natural. O tório natural é essencialmente composto pelo isótopo  $^{232}\text{Th}$  e seus produtos de decaimento, representando 100% do Th total. É identificado pelo pico de  $^{208}\text{Tl}$ , correspondente a uma energia de absorção de 2,62 Mev”. (BECEGATO, 2005, p.43).

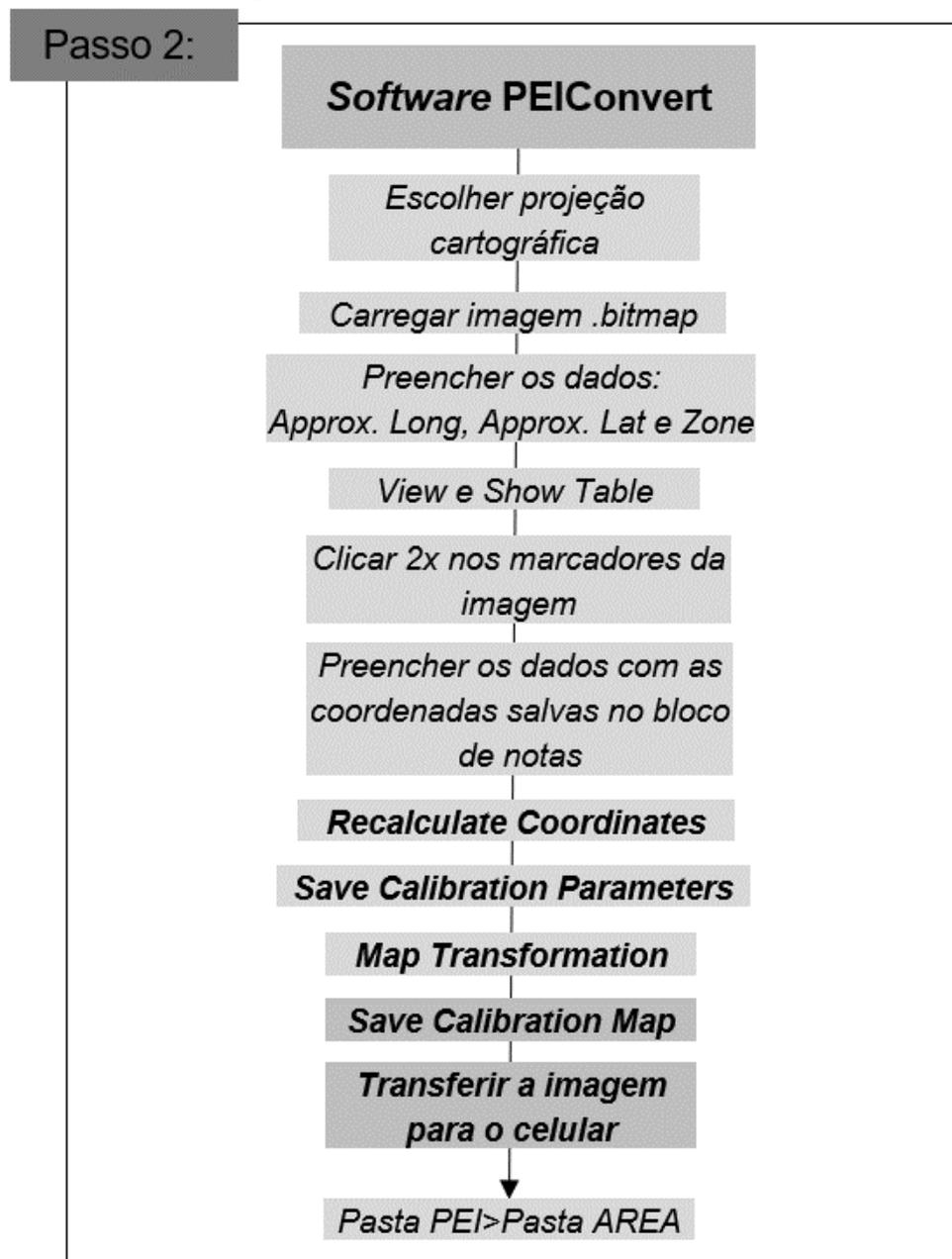
A partir desse contexto o ensaio compreendeu 4 etapas: preparação de dados, calibração da imagem, leitura em campo e transferência dos arquivos para o computador (Figura 25, 26, 27 e 28).

**Figura 25** – Preparação de dados.



Org.: Própria autora (2022).

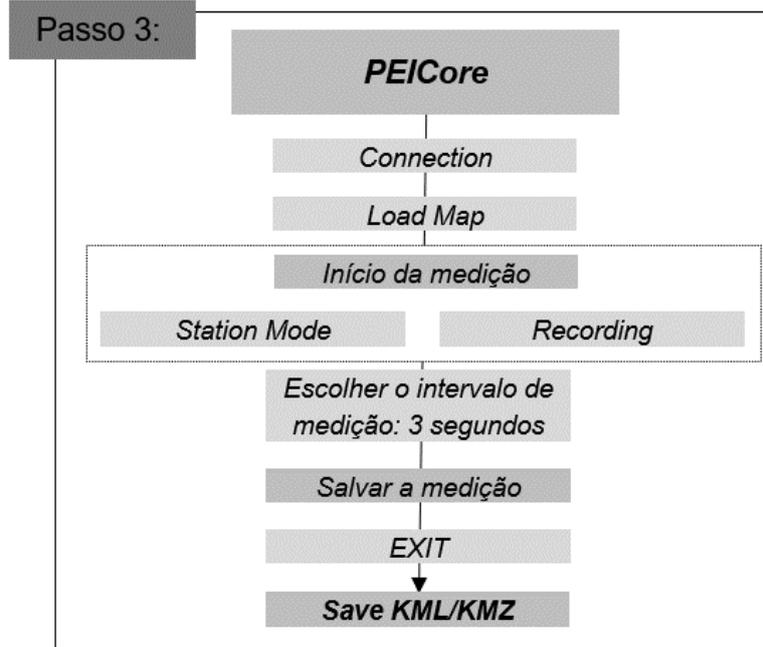
**Figura 26** – Calibração da imagem do *Google Earth*.



**Org.:** Própria autora (2022).

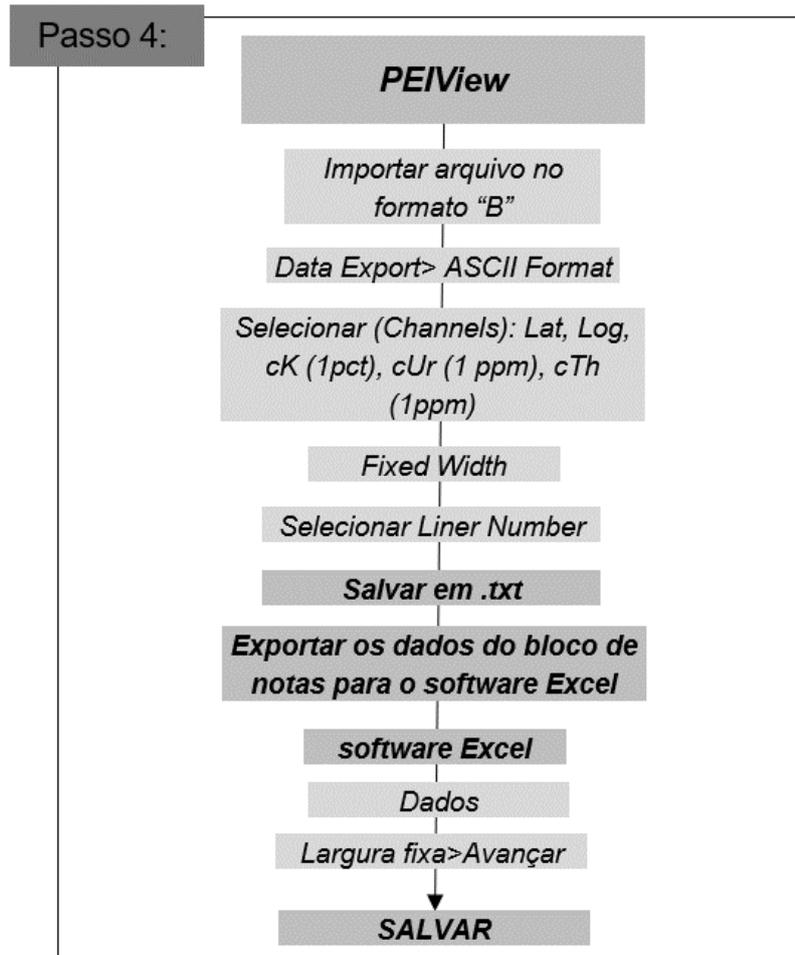
As concentrações dos elementos  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{40}\text{K}$ , foram obtidos a cada 3 segundos (Figura 26) no trajeto percorrido pelo pesquisador, buscando-se obter o maior número de amostras possíveis em toda área estabelecida e depois comparados com os valores recomendados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (USEPA). Os resultados das variáveis  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$  espectrométricas de raios gama foram convertidos para a unidade de partes por milhão (ppm) para  $\text{Bq Kq}^{-1}$  que é a unidade usada internacionalmente (HANFI et al., 2021).

**Figura 27** – Leitura em campo com o celular.



Org.: Própria autora (2022).

**Figura 28** – Exportando arquivos do gamespectrometro.



Org.: Própria autora (2022).

#### 4.2.5 Análise estatística multivariada

O *boxplot* é uma ferramenta útil para visualizar a distribuição dos dados num conjunto como todo. Ele pode ser usado para identificar valores discrepantes, a dispersão dos dados e a tendência central dos dados. A mediana é representada pela linha grossa do meio e indica o valor central dos dados. A caixa representa o intervalo interquartil (IQR), que é a diferença entre o 1º quartil e o 3º quartil. Os "bigodes" podem representar os valores máximos e mínimos dos dados, ou podem ser estendidos até 1,5 vezes o IQR para identificar valores discrepantes (PINHEIRO et al., 2009).

Os valores discrepantes são os pontos que estão fora dos limites dos "bigodes" e podem ser considerados anomalias no conjunto de dados. Eles podem ser indicativos de erros na coleta de dados ou variações extremas nos dados que não são representativos da distribuição geral.

O software R é uma ferramenta útil para a criação dos gráficos *boxplot*. Possui uma variedade de pacotes que podem ser usados para análise estatística, modelagem e visualização de dados. A combinação do Excel e do R pode ser uma ferramenta poderosa para a análise de dados em muitas áreas, incluindo a ciência do solo.

Análise dos Componentes Principais (PCA) é um componente estatístico que se inicia a partir de combinações lineares das variáveis, que tem por finalidade básica, a análise dos dados usados visando sua redução, eliminação de sobreposições e a escolha das formas mais representativas de dados a partir de combinações lineares das variáveis originais (BECEGATO et al., 2019) é feita a partir de estatística descritiva, tendo como suporte de análise o software *PaSt-Palaentological Statistics*.

## 2.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE E NÍVEIS DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO

### 2.4.1 Ordenamento jurídico em relação a qualidade e quantidade de EPT

Os solos foram analisados quanti-qualitativamente conforme os Valores de Referência de Qualidade (VRQ) da Cetesb (2014) e Resolução CONAMA n.º 460, de 2013, que estabelece diretrizes para avaliar a qualidade e quantidade de EPTs permitidos, para evitar danos ao meio ambiente e à saúde humana, estabelecendo limites, conforme apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5-** Valores orientadores de EPTs presentes nos solos conforme a Resolução CONAMA n. 460/2013 e Cetesb (2014).

Referências de qualidade	Elementos Potencialmente Tóxicos					
	Zn	Cu	As	Ni	Pb	Cd
	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----					
VRQ-Cetesb	60	35	3,5	13	17	<0,5
VP-Cetesb	86	60	15	30	72	1,3
VI*	450	200	35	70	180	3

**Fonte:** CONAMA n° 460/2013 e Cetesb (2014), adaptado pela própria autora.

Dado que o estado de Goiás não dispõe de valores de contaminação por EPT em relação aos VRQ, para fins comparativos, foram utilizados os valores orientadores segundo as normativas publicadas para solos (mg kg<sup>-1</sup>) do estado de São Paulo (CETESB, 2014) e (BRASIL, 2013b).

Os VRQ são indicadores essenciais nos estudos ambientais de contaminação e poluição do solo e representam a medida da concentração natural de elementos químicos em solos sem influência humana. Eles serviram como base de referência para os órgãos ambientais estaduais (CETESB, 2014).

O Valor de Prevenção (VP) é o valor mais restrito dos critérios estabelecidos, sendo o valor limite de determinada substância no solo e indica a qualidade de um solo capaz de sustentar as funções primárias. O Valor de Investigação (VI) é a concentração de uma substância no solo que apresenta riscos potenciais, diretos ou indiretos à saúde humana, considerando um cenário de exposição genérica.

Os elementos radiogênicos foram analisados a partir de valores de referência do trabalho de Bocardi (2019) no oeste do Paraná, que estabeleceu valores de referência para o estado, como mostra a Tabela 6.

**Tabela 6** – Média da concentração de atividade natural em Bq Kg<sup>-1</sup> dos elementos Th, U, Th.

	Concentração média de radionuclídeos (Bq Kg <sup>-1</sup> )		
	<sup>40</sup> K	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th
(BOCARDI, 2019)	59,0	28,2	47,6

**Fonte:** Bocardi (2019).

## CAPÍTULO 1 - UNIDADES DA PAISAGEM COMO SUBSÍDIO DA CRIAÇÃO DE COMPARTIMENTOS AMBIENTAIS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO CERRADO BRASILEIRO

### Resumo

A interpretação do geossistema, na geografia, adota o termo unidade de paisagem que consiste em partes do território que em geral estão intimamente ligadas as características de evolução dos recursos naturais. Ou seja, a unidade da paisagem é a uma parte do todo e expressas pela junção dos aspectos geológicos, geomorfológicos (relevo, hipsometria, declividade), pedológicos e uso e ocupação das terras, na qual agrupam-se em áreas homogêneas e possuem características próprias de estrutura e função. Com isso, o objetivo principal do trabalho é criar um modelo de Compartimentos Ambientais com base nas unidades da paisagem em quatro bacias hidrográficas que compreendessem as relações funcionais e estruturais das áreas fora de uma Unidade de Conservação (UC) e que fossem sub-representadas dentro dessa UC. Para tanto, criou-se uma composição de *layes* (geologia, geomorfologia, hipsometria, declividade, solos) e posteriormente calculou a união geométrica dos elementos para criar a classificação das classes da paisagem. O último passo foi criar os Compartimentos Ambientais, que consistiu em delimitar áreas fora do Parque que estivessem subrepresentadas no interior da UC. Os resultados apresentaram 8 Compartimentos, possibilitando a interpretação das características físicas no que tange as bacias hidrográficas. Os Compartimentos 1, 2, 3, 4, 5 são áreas de chapadões e planície fluvial, onde predominam os latossolos da região. Já os Compartimentos 6, 7, 8 são mais propícios aos efeitos erosivos, por pegarem parte das áreas de patamares e grande parte está representado por solos arenosos como o Neossolos Quartzarênicos. Apesar de apresentarem áreas mais planas, os Compartimentos de 1 a 5 tiveram toda área de chapada convertida para a agricultura desde meados dos anos de 1970. Contudo, agrupar as unidades de paisagem em Compartimentos Ambientais, por meio de unidades hidrológicas da região em questão, proporcionou identificar áreas das bacias hidrográficas análogas ao Parque Nacional das Emas. A partir desse trabalho é possível fornecer informações das condições ambientais para ajudar a delinear práticas adequadas para a gestão dessas bacias hidrográficas.

**Palavras-chave:** Unidades da paisagem; Compartimento Ambiental; Bacia Hidrográfica; e Unidade de Conservação.

### Abstract

The interpretation of the geosystem, in geography, adopts the term landscape unit that consists of parts of the territory that are generally closely linked to the characteristics of evolution of natural resources. That is, the landscape unit is a part of the whole and expressed by the combination of geological, geomorphological (relief, hypsometry, slope), pedological and land use and occupation aspects, in which they are grouped in homogeneous areas and have their own characteristics. of structure and function. With this, the main objective of the work is to create a model of Environmental Compartments based on the landscape units in four watersheds that understand the functional and structural relationships of the areas outside a Conservation Unit (UC) and that are underrepresented within of this UC. For that, a composition of *layes* was created (geology, geomorphology, hypsometry, slope, soils) and later calculated the geometric union of the elements to create the classification of the landscape classes. The last step was to create the Environmental Compartments, which consisted of delimiting areas outside the Park that were underrepresented within the UC. The results showed 8 Compartments, allowing the interpretation of the physical characteristics regarding the hydrographic basins. Compartments 1, 2, 3, 4, 5 are areas of plateaus and river plains, where the region's latosols predominate. Compartments 6, 7, 8, on the other hand, are more prone to erosive effects, as they take up part of the plateau areas and a large part is represented by sandy soils such as Neossolos Quartzarenic. Despite having flatter areas, Compartments 1 to 5 had the entire plateau area converted to agriculture since the mid-1970s. However, grouping the landscape units into Environmental Compartments, through hydrological units of the region in question, allowed to identify areas of the hydrographic basins similar to the Emas National Park. From this work it is possible to provide information on environmental conditions to help outline appropriate practices for the management of these watersheds.

**Keywords:** Landscape units; Environmental Compartment; Hydrographic basin; and Conservation Unit.

## 1. INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas (BH) são usadas como recortes espaciais no âmbito dos estudos e planejamento ambiental e são tidas como a unidade básica de análise para o desenvolvimento de ações com a perspectiva de integração entre gestão dos recursos hídricos e a gestão ambiental (CARVALHO, 2020; GARDON, 2021). Conceitualmente a BH pode ser considerada um sistema não-isolado, devido às relações mantidas com os demais sistemas do universo e um sistema aberto, porque nela ocorrem constantes trocas de energia e matéria (*inputs e outputs*), tanto recebendo como perdendo, é na área da bacia que se pode ter uma visão conjunta do comportamento das condições naturais e das atividades humanas nela desenvolvida (CUNHA; GUERRA, 2010).

No ano de 1997, por meio da Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH (Lei nº 9.433, em 08 de janeiro de 1997), a bacia hidrográfica passa a ser considerada unidade territorial para fins de planejamento da gestão hídrica do Brasil (BRASIL, 1997). Isso ocorre devido à necessidade do planejamento e monitoramento dos recursos hídricos, em virtude dos problemas enfrentados de escassez de água e qualidade, denotando assim a importância da padronização no traçado de bacias hidrográficas (AYRES et al., 2021).

Por possuírem características sistêmicas, essas unidades possibilitam avaliar, de forma integrada, os componentes, processos e interações, o que facilita na compreensão das causas e posteriormente as consequências das atividades antrópicas nas mesmas (SOUZA; NUNES; HERCULANO, 2021). Para Miranda, Neves e Ramos (2019), esse todo sistêmico compreende uma inter-relação que vai além dos elementos naturais e nela incluem os elementos econômicos, sociais e culturais, sobre um contexto abrangente de variáveis, expressando uma inter-relação homem-natureza enquanto sistema integrado no espaço geográfico, denominada de análise geossistêmica. Para uma melhor interpretação do geossistema, na geografia, por exemplo, adota o termo unidade de paisagem que consiste em partes do território que, em geral estão intimamente ligadas as características de evolução dos recursos naturais. Ou seja, a unidade da paisagem é a uma parte do todo (BERTRAND; TRICART, 1968; SOTCHAVA, 1977; SILVA; AMORIM; REGO, 2018). A interpretação sistêmica das unidades de paisagem são expressas pela junção dos aspectos geológicos, geomorfológicos (relevo, hipsometria, declividade), pedológicos e uso e ocupação das terras, na qual agrupam-se em áreas homogêneas e possuem características próprias de estrutura e função (VIDAL; MASCARENHAS, 2020).

O conhecimento acerca da estrutura e funcionamento das unidades da paisagem contribuíram para a criação da Compartimentação Ambiental nas bacias hidrográficas dessa pesquisa que, por sua

vez, servem para delimitar ou permitem criar um zoneamento de unidades paisagísticas homogêneas que poderão auxiliar em medidas protetivas futuras de uso e ocupação da região (DUTRA E SILVA; BARBOSA, 2020; RIBEIRO SOARES et al., 2020).

Contudo, existem diversos trabalhos que utilizam como apoio a análise da paisagem em bacias hidrográficas, muitos tem como base a criação de compartimentos geomorfológicos e análise de fragilidade ambiental (FURLAN; TRENTIN; ROBAINA, 2018; OLIVEIRA; VIADANA; PEREIRA, 2019; GARDON, 2021). Já outros usam como base para compreender fontes de poluição da água (WU; LU, 2019; SHEHAB et al., 2021), além de trabalhos que utilizam da compartimentação ambiental para avaliar estratégias de prevenção em áreas de riscos (CABRAL et al., 2019; LUMIATTI et al., 2022).

Portanto, a metodologia adotada nesse trabalho se torna essencial no subsídio da gestão ambiental, uma vez que colabora para a efetivação do *Proxy* Ambiental das bacias hidrográficas que estão no interior de Unidades de Conservação (UCs). Essa UC está representada pelo Parque Nacional das Emas (PARNA das Emas) que está inserido no bioma Cerrado, na região conhecida como chapadões centrais do território brasileiro e hoje encontra-se retida por grandes extensões de áreas convertidas para o setor agropecuário.

De modo geral, as mudanças de cobertura e uso da terra, desde meados dos anos de 1970, nas bacias hidrográficas da área de influência do PARNA das Emas podem ter influenciado na estrutura e funcionamento sistêmico da região. A ação de retirada da cobertura vegetal natural influencia diretamente nas transferências constantes de matéria e energia, que Ross (2009<sup>a</sup>) chama de *input* e *output*, sendo que os fluxos se manifestam através da água, ar/calor, de nutrientes minerais, elementos químicos, sedimentos, átomos e até mesmo das células, já o calor servirá de entrada de energia nesse sistema.

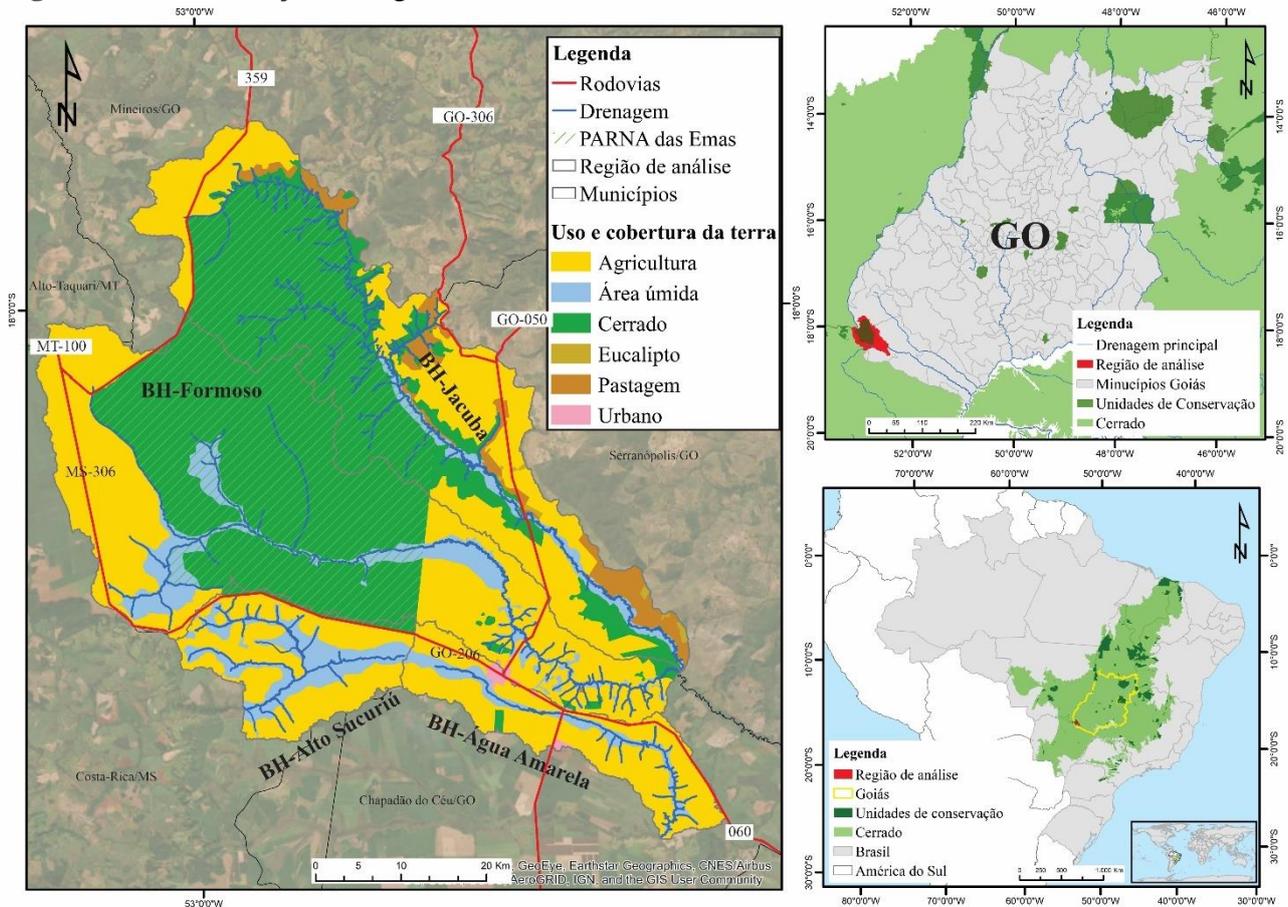
Desse modo, essa perda da vegetação natural abriu espaço para uma maior preocupação com as questões ambientais, tornando necessária a proteção ambiental, sendo uma das principais estratégias no território brasileiro. Foi por meio de um instrumento legal para a conservação da natureza, denominado Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), que foi criado o termo Unidade de Conservação (SILVA et al., 2020). Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo principal criar um modelo de Compartimentos Ambientais em quatro bacias hidrográficas que compreendessem as relações funcionais e estruturais das áreas fora de uma Unidade de Conservação (UC) e que fossem sub-representadas dentro dessa UC.

## 2.MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. ÁREA DE ESTUDO

A região de análise está inserida nas áreas do Planalto Central da bacia do Paraná no Sudoeste Goiano (ROSS et al., 2022), entre os estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e está representada pelas bacias hidrográficas do rio Formoso, rio Jacuba, rio Alto-Sucuriú e rio Água-Amarela, todas fazem parte da área de influência do PARNA das Emas (Figura 29).

**Figura 29** – Localização da região de análise.



**Base cartográfica:** Superintendência de Geologia e Mineração-SIC; Banco de Dados de Informações Ambientais-BDIA/IBGE/SIEG/SEPLAN/IMASUL/Forest-GIS/ United States Geological Survey-USGS.

**Projeção:** Sirgas\_2000\_UTM\_Zone\_22S.

**Org.:** Própria autora (2023).

O Planalto Central Brasileiro, que representa a área central do Cerrado, faz parte de uma massa de terra muito antiga e estável, onde o aplanamento e a erosão generalizados permitiram o desenvolvimento de uma superfície lisa muito extensa como a região de análise (ROSS et al., 2022). No qual, é composta por sedimentos eólicos da Formação Botucatu, Formação Vale do Rio do Peixe, Coberturas Detrito-Lateríticas, Coberturas Aluvionares e rochas basálticas da Formação Serra Geral que afloram das áreas de drenagem principal do rio Formoso e Jacuba que dão origem aos Latossolo Vermelho-

Amarelo, Latossolo Vermelho-Distrófico, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Ácrico, Organossolos Háplicos, Gleissolos Plintossolos e Neossolos Quartzarênicos.

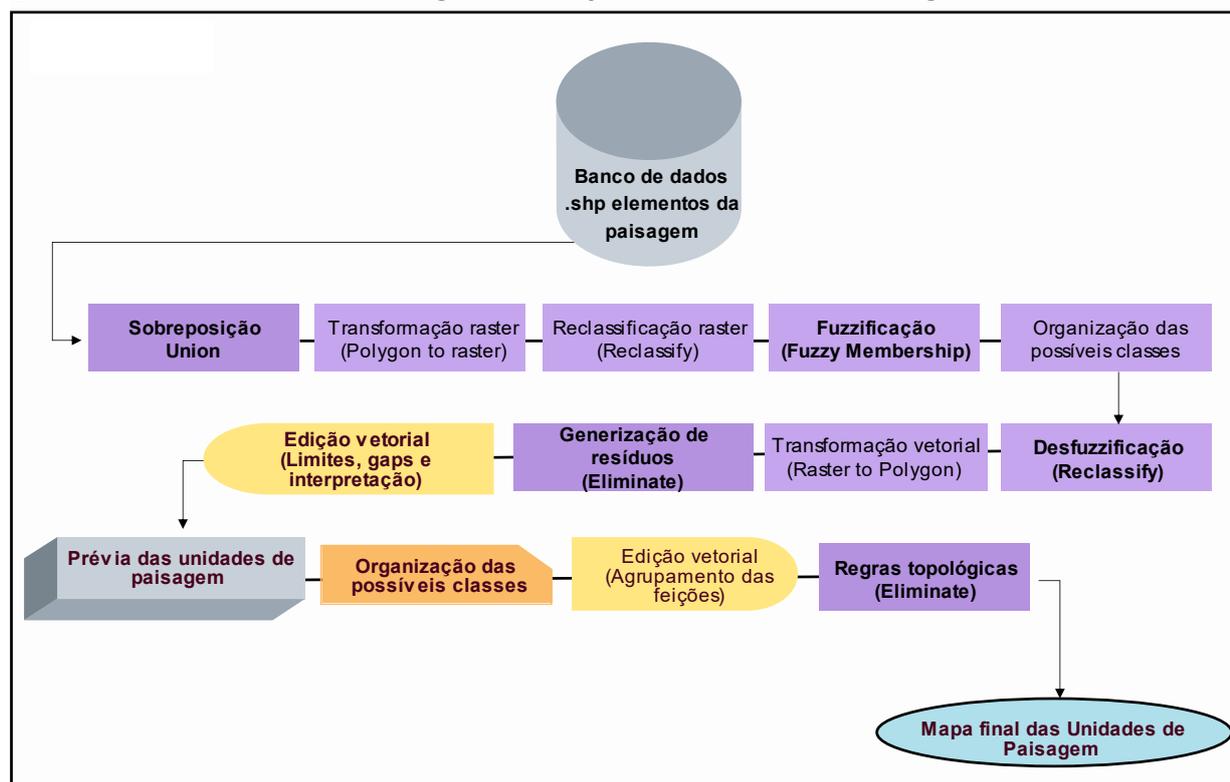
O clima da região é classificação de clima tropical semiúmida, com verão chuvoso e inverno seco, com temperatura que varia entre 22 °C – 24 °C (NOVAIS, 2019). O Chapadão Central integra a região marcada pela expansão da fronteira agrícola desde meados de 1973 que sua vegetação natural vem sendo convertida em extensas áreas voltadas para o setor agropecuário, como produção de soja, milho, algodão e cana-de-açúcar, podendo ser observado em algumas áreas em específico a pecuária extensiva (principalmente em áreas de solos mais arenosos). O uso ligado ao clima da região, é possível obter até duas safras de grãos no ano (LIMA; DA ASSUNÇÃO; SCOPEL, 2019; RIBEIRO; FARIA; CEZARE, 2019).

## 2.2. DELIMITAÇÃO DE UNIDADES DA PAISAGEM

Para a delimitação e definição das unidades de paisagem na região de análise foram utilizados todos os dados temáticos disponíveis que sistematizam as informações biofísicas da área, integrando-as, como a geologia, geomorfologia, hipsometria, declividade, pedologia e uso e cobertura da terra.

A representação cartográfica da paisagem foi estruturada e representada de forma sintética, por ser considerada a mais adequada, uma vez que considera as unidades como um todo integral, a partir da escala regional de 1:250.000 a 1:500.000 que tem como unidade principal representar suas localidades, seus tipos e modificações antropogênicas (VICENS; RODRIGUEZ; CRONEMBERGER, 2020). A partir daí foram importados os dados do meio físico para composição das camadas (*layers*) e organização das sobreposições (Figura 30).

**Figura 30-** Procedimento metodológico da criação das Unidades de Paisagem.



**Fonte:** Adaptado de (BRAZ, 2020).

A sobreposição foi realizada através da ferramenta de geoprocessamento que calcula a união geométrica dos elementos da paisagem, *Union*, em formato vetorial (.shp). Como ressaltado por Oliveira, Braz e Cavalcanti (2022), a união dos arquivos contém todas as informações (atributo) de cada um dos elementos das paisagens considerados para a síntese. Depois o resultado foi convertido para um dado raster (.tiff) (*Polygon to Raster*) e, posteriormente, teve seus valores reclassificados (*Reclassify*) e submetidos a lógica fuzzy (*Fuzzy Membership*).

A lógica *fuzzy* é de extrema importância para a próxima fase de classificação das classes de paisagem, pois a ferramenta atua com imprecisões, uma vez que os limites entre as unidades de paisagens, em algumas situações são abruptos e bem marcados e em outros casos é de modo difuso e interdigitada, ajudando assim na criação de limites dessas unidades (BRAZ, 2020; MARQUES NETO, 2016). Depois realizou-se a *desfuzzificação* que é a transformação dos graus de pertinência *fuzzy* resultados nítidos fatiados por classes. Feito esses procedimentos as classes criadas foram transformadas em vetor (shp) para tratar os resíduos e corrigir todos os erros de agrupamentos ou separação das possíveis unidades.

Os resíduos foram generalizados automaticamente com a ferramenta *eliminate*, em que o valor mínimo para as feições representativas (área mínima cartografável) de 5ha, ou seja, escala de 1:50.000. Esse processo de generalização deixa muitos resíduos no arquivo, necessitando uma edição do vetor (BRAZ, 2020). Esse procedimento foi realizado manualmente, onde cada polígono foi

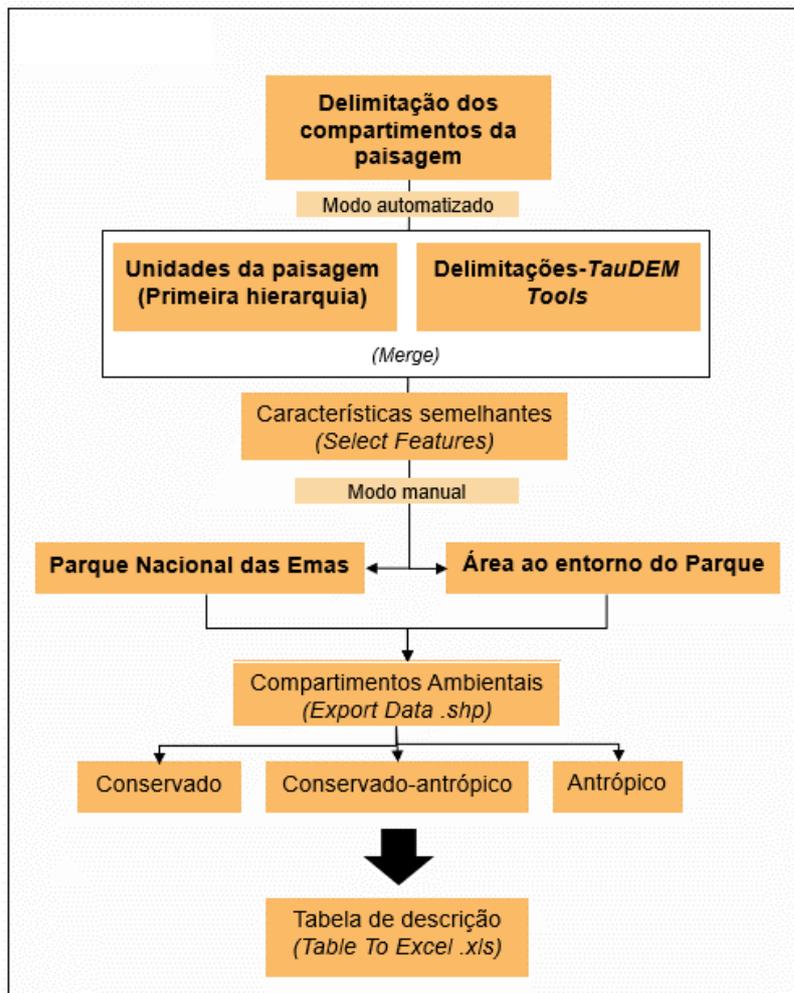
editado e verificado conforme os elementos da paisagem e finalmente obteve-se um arquivo .shp contendo 17 unidades da paisagem de primeira hierarquia e 65 unidades da paisagem de segunda hierarquia, subdividida fielmente ao uso da região, esse último não será discutido nos resultados. Cada unidade, dependendo do nível, foi descrita também de forma escrita na tabela de atributos e transferido via ArcToolbox (*Conversion Tools-Table To Excel*) para a tabela do software *Excel*.

Assim, o mapeamento das unidades de paisagem tem por base as informações ressaltadas por Rodríguez (2008) sobre as informações das paisagens a serem consideradas em SIG: 1) Estrutura vertical e horizontal dos elementos, através da representação das paisagens; 2) Inter-relação dos elementos que compõem as paisagens e a sua manifestação funcional; 3) Influências antroponaturais sobre as paisagens; 4) Dinâmica natural (ambiental) e funcional das paisagens

### 2.3. COMPARTIMENTAÇÃO AMBIENTAL

A última e sexta etapa dos procedimentos metodológicos resultaram na compartimentação das unidades da paisagem. Essa etapa teve como objetivo delimitar as unidades de primeira hierarquia que consistem nas características naturais da região, discriminando o uso e cobertura da terra (Figura 31).

**Figura 31-** Procedimento metodológico da criação do Compartimentação Ambiental.



**Org.:** Própria autora (2022).

A delimitação da paisagem constituiu em pegar áreas fora do PNE que são sub representadas dentro do Parque. Logo em seguida esse compartimento foi subdividido em áreas menores, como segmento conservado, segmento antrópico-conservado e segmento antrópico.

Todos esses procedimentos foram realizados em ambiente SIG no *ArcGIS*, sendo que primeiramente fez um *merge* das unidades da paisagem com as delimitações criadas no *TauDEM Tools*, em seguida usou o *select features* para criar o compartimento e depois salvou via *export data* no *ArcToolbox*.

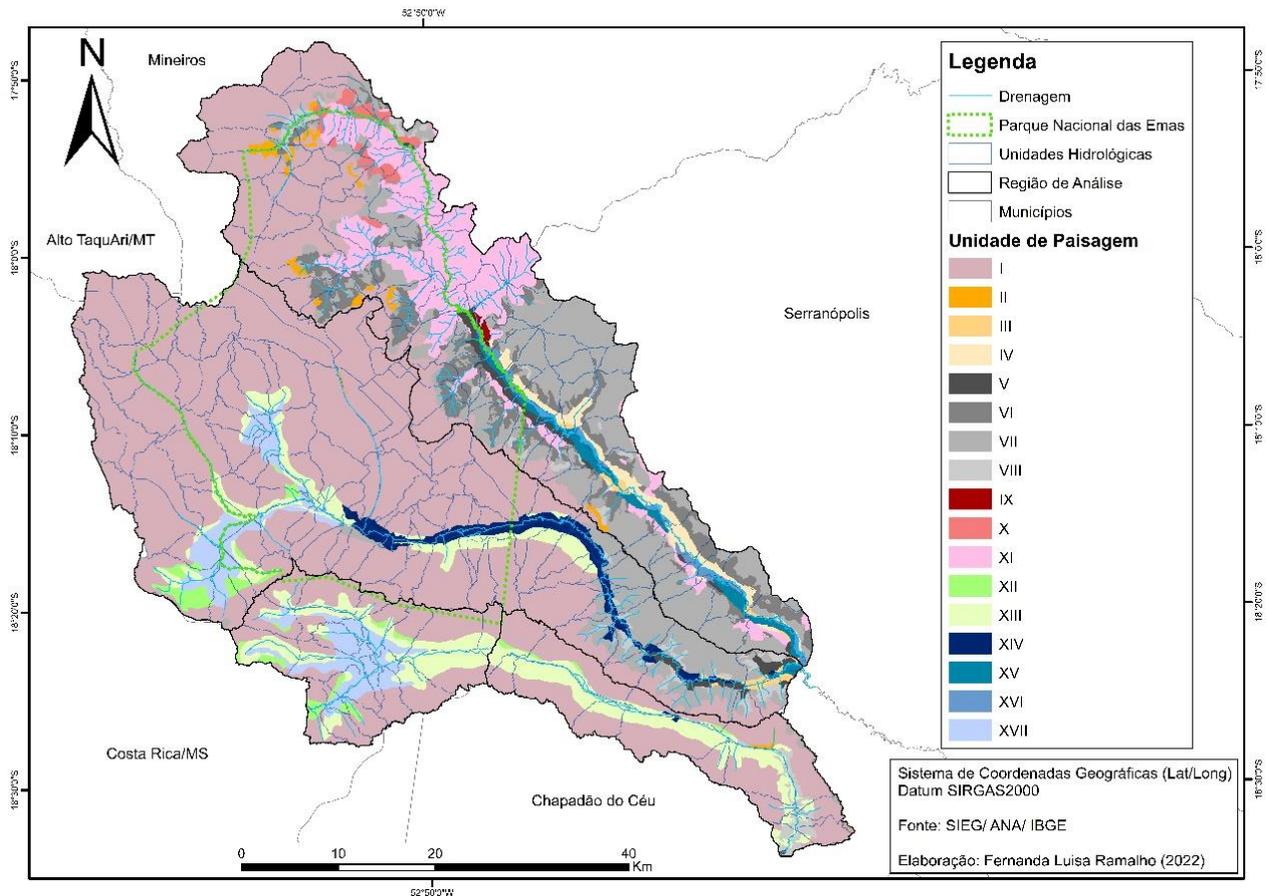
### 3.RESULTADO E DISCUSSÕES

A estrutura da paisagem é constituída por elementos e a relação entre os mesmos, estabelecendo padrões onde os atributos fundamentais são os componentes dos sistemas, as relações vizinhas, conexões e limites possibilitam estabelecer uma estrutura vertical compostas pela geologia, geomorfologia, pedologia e a estrutura horizontal resulta na interação espacial das paisagens tanto ao

nível inferior (hierarquia 2) que inclui o uso da região, quanto ao nível superior (hierarquia 1) que são as características físicas, essa última será discutida logo em seguida (RODRIGUEZ, 2017).

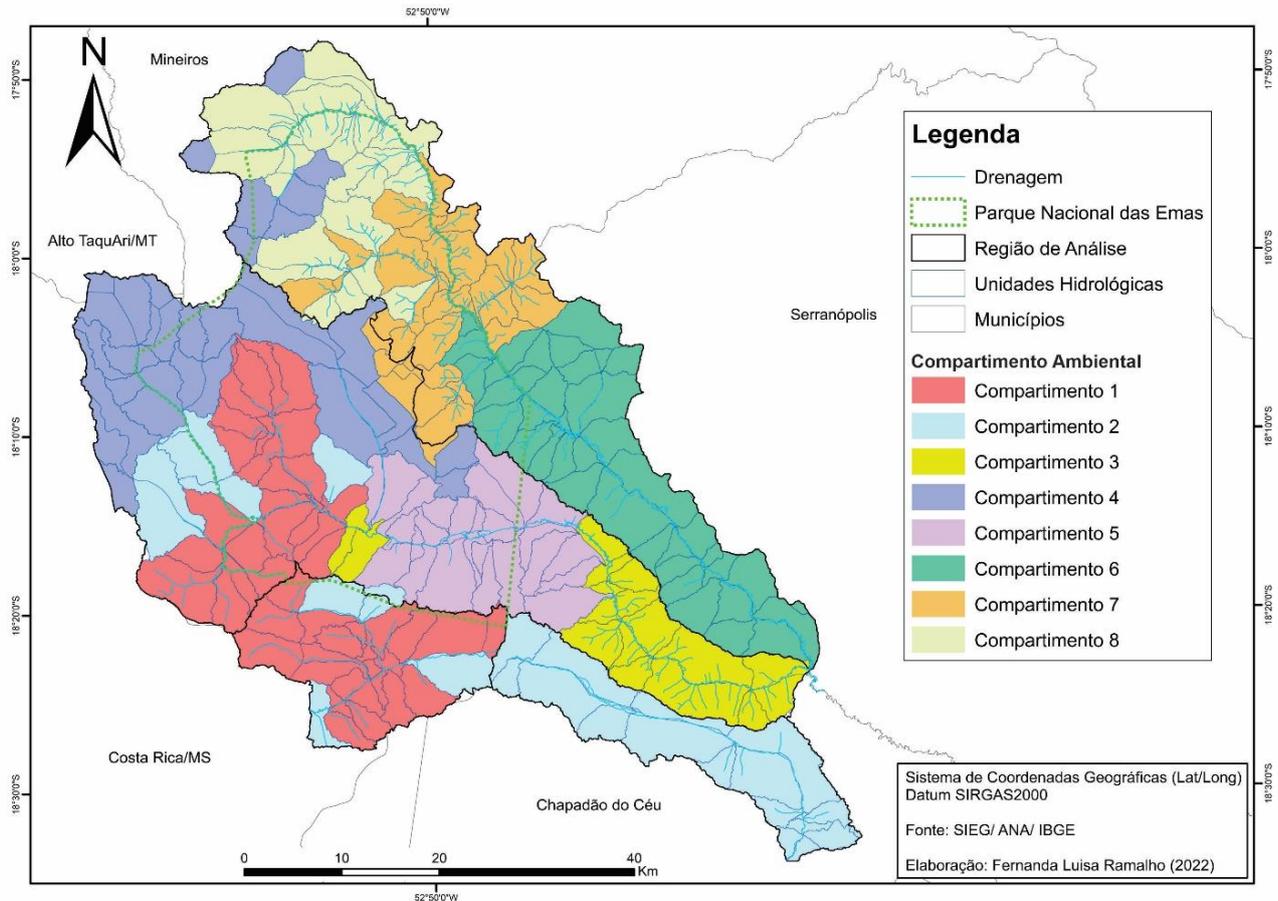
Toda essa dinâmica da estrutura da paisagem derivou em 250 unidades hidrológicas com características geológicas, geomorfológicas e pedológicas, resumando 17 unidades da paisagem de resposta como representado na Figura 32. Posteriormente essas unidades da paisagem resultaram em 8 Compartimentos Ambientais dentro da região de análise pré-estabelecida (Figura 33).

**Figura 32-** Mapa de primeira hierarquia das unidades de paisagem.



Os Compartimentos são fruto do agrupamento das Unidades de primeira hierarquia e sintetizam as características homogêneas das áreas fora do PARNA das Emas que são sub-representadas dentro do Parque (Figura 33).

**Figura 33-** Mapa dos Compartimentos Ambientais criado.



Somando a área dos Compartimentos 35% estão em área de proteção pelo PARNA das Emas totalizando uma área de 1.155,49 km<sup>2</sup>, 9% estão no limite entre área conservada e área antrópica, sendo uma área de 296,18 km<sup>2</sup> e 56% dos Compartimentos estão em áreas totalmente antropizadas no total de 1.839,99 km<sup>2</sup>.

Entre os 8 Compartimentos Ambientais criados, todos eles apresentam solos bem drenados (latossolos) sobre topos planos em chapadões das Coberturas Detrito-Lateríticas, que estão representados pela Unidade 1 (U-1), a qual possui uma área de 1.789,92 km<sup>2</sup>. Presente em todos os compartimentos, a Unidade 7 (U-7) soma uma área menor de 468,27 km<sup>2</sup> e são representados principalmente pela classe dos latossolos sobre encostas de chapadões na Formação Vale do Rio do Peixe. Seguindo uma sequência decrescente, a Unidade 13 (U-13) com uma área de 249,56 km<sup>2</sup> representa os solos bem desenvolvidos sobre planícies, depressões e terraços em Aluviões Holocênicos. A unidade 11 (U-11) tem tamanho de 234,98km<sup>2</sup> e está representada pelos solos arenosos em patamares intermediários na Formação Vale do Rio do Peixe.

Unidades menores como a unidade 6 (U-6), contém um tamanho de 134 km<sup>2</sup> e constitui solos arenosos sobre encostas de chapadões na Formação Vale do Rio do Peixe e Unidade 17 (U-17) com área de 117,32 km<sup>2</sup> que são áreas úmidas em solos hidromórficos sobre planícies, depressões em

Aluviões Holocênicos. As demais unidades ambientais podem ser conferidas na Tabela 7, essas por sua vez apresentam espacialização menor dentro dos Compartimentos Ambientais, não extinguindo sua importância em relação ao diagnóstico ou planejamento territorial da região em análise.

**Tabela 7 - Representação do tamanho das unidades de paisagem nos Compartimentos Ambientais.**

Unidades	*C- 1	C-2	C- 3	C- 4	C-5	C- 6	C- 7	C- 8	Tamanho total
	-----Km <sup>2</sup> -----								
<b>1</b>	335,41	345,83	67,38	511,72	259,63	18,37	78,69	172,89	<b>1789,92</b>
<b>2</b>	0	1,25	0	0,25	0	1,65	0	14,14	<b>17,29</b>
<b>3</b>	0	0	6,55	0	0	4,64	0,40	0	<b>11,59</b>
<b>4</b>	0	0	0	0	0	35,99	0,30	0	<b>36,28</b>
<b>5</b>	0	0,28	11,07	0	0	13,96	0,76	0,75	<b>26,81</b>
<b>6</b>	0	0	0,24	0	0	79,58	29,48	24,70	<b>134,00</b>
<b>7</b>	1,53	2,42	115,53	0,16	0,48	258,94	51,85	37,36	<b>468,27</b>
<b>8</b>	0	15,59	18,42	0	0	6,10	0	8,69	<b>48,79</b>
<b>9</b>	0	0	0	0	0	0,10	2,80	0	<b>2,90</b>
<b>10</b>	0	0	0	0	0	0	0	22,00	<b>22,00</b>
<b>11</b>	0	0	0	0	0	29,16	143,39	62,44	<b>234,98</b>
<b>12</b>	28,22	5,13	0	0	0	0	0	0	<b>33,35</b>
<b>13</b>	108,13	107,27	5,35	0	28,81	0	0	0	<b>249,56</b>
<b>14</b>	0	0,62	24,78	0	27,70	0	0	0	<b>53,10</b>
<b>15</b>	0	0	2,72	0	0	26,60	0	0	<b>29,32</b>
<b>16</b>	0	0	0,26	0	0	16,52	0,71	0	<b>17,49</b>
<b>17</b>	117,08	0,09	0,15	0	0	0	0	0	<b>117,32</b>

**Org.:** Própria autora (2022).

**Legenda:** \*Abreviação de Compartimento.

O **compartimento ambiental 1** com 590,38 km<sup>2</sup> está representado por algumas áreas da bacia hidrográfica do rio Formoso e Alto-Sucuriú. Compreendem 47 unidades hidrológicas, com predomínio de 7 unidades da paisagem. Esse compartimento está dividido em compartimento 1 conservado (SC-1) que corresponde a uma área de 209,97 km<sup>2</sup>, compartimento 1 antrópico conservado (SAC-1) com 55,09 km<sup>2</sup> e compartimento 1 antrópicas (SA-1) com 325 km<sup>2</sup> (Tabela 8).

**Tabela 8** – Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 1.

<b>Compartimento 1</b>					
<b>Unidades</b>	<b>Segmento Conservado</b>	<b>Segmento Antrópico-Conservado</b>	<b>Seguimento Antrópico</b>	<b>Tamanho Total</b>	
	-----( <b>km<sup>2</sup></b> )-----			<b>(km<sup>2</sup>)</b>	<b>(%)</b>
1	152,06	30,53	152,83	<b>335,42</b>	<b>9</b>
7	0,29	0,00	1,24	<b>1,53</b>	<b>0</b>
12	2,71	3,08	22,44	<b>28,23</b>	<b>67</b>
13	27,61	10,25	70,27	<b>108,13</b>	<b>28</b>
17	27,31	11,23	78,54	<b>117,08</b>	<b>67</b>
<b>Total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>209,97</b>	<b>55,09</b>	<b>325,31</b>		
<b>Porcentagem (%)</b>	<b>36</b>	<b>9</b>	<b>55</b>		

**Org.:** Própria autora (2022).

Geologicamente está representado pelas Cobertura Detrito-Lateríticas nas áreas de topos e vertentes, próximos aos cursos d'água estão representados pelos depósitos aluvionares holocênicos, datados no Quaternário e em pequenas áreas da foz da BH-Alto Sucuriú e interflúvio da BH-Formoso encontra-se rochas do Vale do Rio do Peixe. O relevo caracteriza-se por área de chapadão, com vertentes alongadas e altitude entre 788 a 901m, correspondendo aos níveis de declividade de 3%.

Os solos derivados das Coberturas Detrito-Lateríticas estão representados pelos Latossolos, sendo o Latossolo Vermelho-Ácrico, Latossolo Vermelho Distrófico e o Latossolo Vermelho-Amarelo Ácrico e próximos aos cursos d'água vão desenvolver os Gleissolos Melânico e uma pequena porção do Organossolo Háplico.

Por possuir uma topografia mais suave, inferior a 20% de declividade a tendência do avanço antrópico de ocupação torna-se mais favorável, principalmente para a inserção de maquinários para a agricultura.

O **compartimento ambiental 2** compreende uma área de 478,47km<sup>2</sup> é drenado principalmente pela bacia hidrográfica do rio Água-Amarela, porção SSE da região, apresentando ainda extensão na bacia Alto-Sucuriú e Formoso. Esse compartimento tem 28 unidades hidrológicas e 9 unidades de paisagem, sendo 81% correspondem ao SA-2, 14% SAC-2 e uma porcentagem pequena de 5% no SC-2 (Tabela 9).

**Tabela 9** – Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 2.

Compartimento 2					
Unidades	Segmento Conservado	Segmento Antrópico-Conservado	Seguimento Antrópico	Tamanho	
	----- (km <sup>2</sup> ) -----			(km <sup>2</sup> )	(%)
1	20,57	55,91	269,35	345,83	19
2	0	0	1,25	1,25	7
5	0	0	0,28	0,28	1
7	0	0	2,42	2,42	1
8	0	0	15,59	15,59	32
12	0	0	5,13	5,13	15
13	1,42	11,59	94,26	107,27	43
14	0	0	0	-	0
17	0	0,01	0	0,01	0
<b>Total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>21,99</b>	<b>67,5</b>	<b>388,28</b>		
<b>Porcentagem (%)</b>	<b>5</b>	<b>14</b>	<b>81</b>		

**Org.:** Própria autora (2022).

Sua geologia corresponde às Coberturas Detrito-Lateríticas nas áreas de topo e vertente, nas áreas de drenagem aos depósitos aluvionares e pequenas manchas na BH-Água Amarela e BH-Alto Sucuriú de rochas mais antigas do Vale do Rio do Peixe. Os solos são do tipo Latossolo Vermelho-Ácrico, Latossolo Vermelho-Distrófico e ao longo da alta e média BH-Água Amarela, estão os organossolos, a porção da foz da BH-Alto Sucuriú estão presentes os Latossolos Vermelho-Amarelo Ácrico, Plintossolo e o Gleissolo.

O relevo é suave ondulado, com picos altimétricos que vão de 701m na foz da BH-Água Amarela à 901m nas áreas da BH-Formoso, mas grande parte fica em torno dos 751-850m de altitude, isso reflete na declividade da área entorno de 0-3%, com exceções de alguns pontos que pode chegar no intervalo de 9,1 a 20%.

O **compartimento ambiental 3** corresponde a uma área de 242,86 km<sup>2</sup> (Tabela 10) e está especializada especificamente na bacia hidrográfica do rio Formoso. Apesar de ser o menor Compartimento ambiental em relação à extensão territorial, o mesmo apresenta uma grande diversidade de unidades da paisagem (11) como visto na Tabela 5, além de 18 unidades hidrológicas. Essas unidades vão estar dispostas principalmente no SA-3 que compreende 86% do C-3, contra 14% do SC-3.

**Tabela 10** – Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 3.

<b>Compartimento 3</b>				
<b>Unidades</b>	<b>Segmento Conservado</b>	<b>Segmento Antrópico</b>	<b>Tamanho Total</b>	
	----- (km <sup>2</sup> ) -----		(km <sup>2</sup> )	(%)
1	22,46	44,92	67,38	4
3	0	6,55	6,55	57
5	0	11,07	11,07	41
6	0	0,24	0,24	0
7	2,95	112,58	115,53	25
8	0	18,42	18,42	38
13	4,42	0,93	5,35	2
14	5,29	19,49	24,78	47
15	0	2,72	2,72	9
16	0	0,26	0,26	1
17	0,15	0	0,15	0
<b>Total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>35,27</b>	<b>217,18</b>		
<b>Porcentagem (%)</b>	<b>14</b>	<b>86</b>		

**Org.:** Própria autora (2022).

Além das Coberturas Detrito-Lateríticas e dos Depósitos Aluvionares, esse compartimento apresenta afloramento da Formação Serra Geral ao longo da drenagem principal e Formação vale do Rio do Peixe. Os solos derivados dessas formações se diferem entre o Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Vermelho-Ácrico, o Gleissolo Melânico e o Organossolo Háptico.

O relevo predominante são as áreas de chapadão das Emas-Taquari entre as cotas altimétricas de 751-850m e na área de drenagem principal estão as planícies e os terraços fluviais entre as cotas de 654m perto da foz da BH-Formoso e 800m. A declividade apresenta de 0 a 3% nas áreas de interflúvio e vertentes, variação de 3,1 a 20% nas áreas próximas aos cursos d'água.

O **compartimento ambiental 4** encontra-se na área de cabeceira de drenagem do rio Formoso e algumas áreas da cabeceira do rio Jacuba, equivalente a 16% (512,13km<sup>2</sup>) da região de análise, envolve 3 unidades da paisagem (Tabela 11) e 35 unidades hidrológicas. Esse compartimento possui maior representatividade no SC-4 com 51% contida em UC, 14% correspondem ao segmento SAC-4 e 35% estão em áreas totalmente antropizadas.

**Tabela 11** – Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 4.

Compartimento 4					
Unidades	Segmento Conservado	Segmento Antrópico-Conservado	Seguimento Antrópico	Tamanho	
				----- (km <sup>2</sup> ) -----	
				(km <sup>2</sup> )	(%)
1	260,71	73,37	177,65	511,73	29
2	0,25	0	0	0,25	1
7	0,16	0	0	0,16	0
<b>Total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>261,12</b>	<b>73,37</b>	<b>177,65</b>		
<b>Porcentagem (%)</b>	<b>51</b>	<b>14</b>	<b>35</b>		

Org.: Própria autora (2022).

Esse compartimento apresenta uma estrutura paisagística mais homogênea, geologicamente está representado por coberturas detrito-lateríticas e pequenas porções bem na área de interflúvio encontram-se a Formação Botucatu e Serra Geral, recobertos pelo Latossolo Vermelho-Ácrico e pequenas áreas de Plintossolo.

É uma região de predomínio do chapadão das Emas-Taquari, com declividade muito plana entre 0-3%, podendo ter áreas de 20° perto do curso d'água principal e cotas altimétricas de 801-901m.

O **compartimento ambiental 5** se estende por 316,62 km<sup>2</sup> da região de análise, num total de 10%, apresenta 4 unidades de Paisagem que recobrem 24 unidades hidrológicas. Esse compartimento possui maior representatividade no SC-5 (53,4%), seguido do SA-5 (27,2%) e SAC-5 com 19,4% (Tabela 12).

**Tabela 12** – Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 5.

Compartimento 5					
Unidades	Segmento Conservado	Segmento Antrópico-Conservado	Seguimento Antrópico	Tamanho Total	
				----- (km <sup>2</sup> ) -----	
				(km <sup>2</sup> )	(%)
1	140,03	57,49	62,11	259,63	15%
7	0,35	0,03	0,11	0,49	0%
13	12,93	2,38	13,49	28,80	12%
14	15,91	1,43	10,35	27,69	52%
<b>Total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>169,23</b>	<b>61,33</b>	<b>86,06</b>		
<b>Porcentagem (%)</b>	<b>53,4</b>	<b>19,4</b>	<b>27,2</b>		

Org.: Própria autora (2022).

Geologicamente está representada por Coberturas Detrito-Laterítica nas áreas de topos e vertentes, próximos aos cursos d'água, pode-se encontrar a Formação Serra Geral e Depósitos Aluvionares. Nas áreas de topo a média vertente encontra-se o Latossolo Vermelho-Ácrico, na média

à baixa vertente o Latossolo Vermelho-Distrófico e junto com os cursos d'água o Gleissolo melânico e Organossolo Háplico.

Composta pelo chapadão das Emas-Taquari nas áreas de topo, vertente, planícies e terraços fluviais ao longo da drenagem principal, esse compartimento apresenta cotas altimétricas entre 751m-850m de altitude, com graus de declividade suave entre 0-3% com exceção de algumas áreas próximas aos cursos d'água que apresentam declividade, variando entre 6,1-20%.

O **compartimento ambiental 6** corresponde a 15% da região (491,59 km<sup>2</sup>), reúne 41 unidades hidrológicas e 12 unidades da paisagem e possui apenas 12% da representatividade de área conservada, localizada na porção nordeste do PARNA das Emas especificamente na BH-Jacuba, contra 4% de SAC e 84% de SA (Tabela 13).

**Tabela 13** – Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 6.

Compartimento 6					
Unidades	Segmento Conservado	Segmento Antrópico-Conservado	Seguimento Antrópico	Tamanho Total	
				(km <sup>2</sup> )	(%)
1	3,46	2,50	12,41	18,37	1
2	0,00	0,00	1,65	1,65	10
3	0,00	0,00	4,64	4,64	40
4	0,00	0,00	35,99	35,99	99
5	7,76	2,33	3,87	13,96	52
6	16,22	4,41	58,95	79,58	59
7	20,68	4,28	233,98	258,94	55
8	0,43	1,24	4,43	6,10	13
9	0,10	0,00	0,00	0,10	3
11	5,19	1,98	21,99	29,16	12
15	2,52	2,24	21,84	26,60	91
16	1,35	1,68	13,50	16,53	95
<b>Total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>57,71</b>	<b>20,65</b>	<b>413,23</b>		
<b>Porcentagem (%)</b>	12	4	84		

**Org.:** Própria autora (2022).

Geologicamente está representada pela Formação Vale do Rio do Peixe, Serra Geral, em algumas áreas de interflúvio encontram-se a Formação Botucatu e as Coberturas Detrito-Lateríticas. Essas formações atreladas com o relevo originaram um mix solos no C-6, como o Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Vermelho Ácrico, Neossolo Quartzarênico ao longo de todo C-6 e Organossolo Háplico na drenagem principal da BH-Jacuba.

Grande parte está coberta pelo chapadão das Emas-Taquari, nas áreas de drenagem principal, tem o predomínio das planícies e terraços fluviais e pequenas áreas estão representadas pelos

Patamares das Altas Bacias dos rios Verde-Claro, com cotas altimétricas entre 684m-901m e apresenta um relevo mais ondulado devido à declividade do compartimento.

O **compartimento ambiental 7** está especializado em 30 unidades hidrológicas, formando 9 unidades da paisagem (Tabela 14), num total de 9% (308km<sup>2</sup>) da região de análise. Possui a maior representatividade no SC-7 com 63% contida em UC localizada na porção nordeste do PNE na área da BHJacuba. Já o SA-7 corresponde a 37% do compartimento 7.

**Tabela 14** – Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 7.

<b>Compartimento 7</b>				
<b>Unidades</b>	<b>Segmento Conservado</b>	<b>Segmento Antrópico</b>	<b>Tamanho Total</b>	
	<b>(km<sup>2</sup>)</b>	<b>(km<sup>2</sup>)</b>	<b>(km<sup>2</sup>)</b>	<b>(%)</b>
1	78,39	0,30	78,69	4
3	0	0,40	0,4	3
4	0	0,30	0,3	1
5	0	0,76	0,76	3
6	24,90	4,58	29,48	22
7	34,15	17,08	51,23	11
9	0	2,80	2,8	97
11	57,35	86,04	143,39	61
16	0,00	0,71	0,71	4
<b>Total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>194,78</b>	<b>112,98</b>		
<b>Porcentagem (%)</b>	<b>63</b>	<b>37</b>		

**Org.:** Própria autora (2022).

Os segmentos estão sob influência da Formação Vale do Rio do Peixe em grande parte, seguido das Coberturas Detrito Lateríticas na área de interflúvio com a BH-Formoso e uma pequena porção da Formação Serra Geral na área de drenagem principal.

Dessa geologia originou-se em algumas áreas com declividades maiores o Plintossolo Pétrico, na drenagem principal está o Organossolo Háplico, na área de interflúvio com a BH-Formoso encontra-se o Latossolo Vermelho Ácrico, com menor área tem o Latossolo Vermelho e grande parte do C-7 são os Neossolos Quartzarênicos que estruturam toda a dinâmica da paisagem.

O relevo predominante são os Patamares das Altas Bacias dos rios Verde-Claro, seguido das áreas de Chapadão das Emas-Taquari, essa dinâmica resulta em cotas altimétricas que variam entre 684-901m e um predomínio da declividade de 3,1-6%, sendo que algumas cabeceiras de drenagem apresentam um relevo mais inclinado com 20%.

O **compartimento ambiental 8** está localizado na área de cabeceira da BH-Jacuba, representando 10% (342,96km<sup>2</sup>) da região de análise. Dentro dessa espacialização o C-8 corresponde 27 unidades hidrológicas e 8 unidades da paisagem (Tabela 15).

**Tabela 15** – Tamanho das unidades em relação ao compartimento ambiental 8.

<b>Compartimento 8</b>					
<b>Unidade</b>	<b>Segmento Conservado</b>	<b>Segmento Antrópico-Conservado</b>	<b>Seguimento Antrópico</b>	<b>Tamanho Total</b>	
	----- (km <sup>2</sup> ) -----			<b>(km<sup>2</sup>)</b>	<b>(%)</b>
1	76,26	15,82	80,81	172,89	10
2	9,66	1,77	2,71	14,14	16
5	0,28	0	0,47	0,75	3
6	22,55	0,26	1,89	24,7	18
7	24,12	0,27	12,97	37,36	8
8	2,61	0,11	5,96	8,68	18
10	11,46	0	10,55	22,01	100
11	58,49	0	3,95	62,44	27
<b>Total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>205,43</b>	<b>18,23</b>	<b>119,31</b>		
<b>Porcentagem (%)</b>	<b>60</b>	<b>5</b>	<b>35</b>		

Org.: Própria autora (2022).

Podem ser encontrados 3 segmentos de Compartimentos (SC-8, SAC-8 e AS-8), sendo o segmento conservado o segundo maior em representatividade do C-8 (60%) e 6% da região de análise. Essas áreas estão cobertas geologicamente pelas Coberturas Detrito-Lateríticas, sendo que nas áreas de média vertente e fundo de vale encontra a Formação Serra Geral e pequenas áreas de interflúvio a Formação Botucatu, ligadas ao relevo vão dar origem aos grupos de Latossolos vermelhos, Latossolo Vermelho-Ácrico, Distrófico, o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, os Neossolos Quartzarênicos e pequenas áreas de Plintossolo Pétrico.

O relevo é composto apenas por Chapadão nas áreas de topo e Patamares representando as áreas da drenagem principal, com cotas altimétricas de 701m-901m e predomínio de declividade de 3,1-6% e algumas áreas de cabeceira de drenagem com 20% de declive.

Para Vidal e Mascarenhas (2020), a estrutura espacial se concebe as agrupações reais territoriais das formações naturais que se repetem ou transformam-se de forma regular, formando uma integridade que corresponde a um conjunto geral de unidades da paisagem.

Grande parte da região é composta por solos bem desenvolvidos sobre topos planos em chapadões nas Coberturas Detrito-Lateríticas, representado pela U-1. Os Latossolos derivados dessas Coberturas são ricos em hidróxido de ferro que lhe conferem a cor característica avermelhada e quando associados a áreas aplainadas, em conjunto com as intempéries, geram solos distróficos e ácidos, porosos e permeáveis, com texturas que variam de argilosas a muito argilosas (MENDONÇA et al., 2020).

Outra característica predominante na região são os solos bem desenvolvidos sobre encostas de Chapadões na Formação Vale do Rio do Peixe que representa, principalmente, os Compartimentos Ambientais 3 e 6. Esses solos são representados pelo Neossolos Quartzarênico que são solos associados a menor coesão entre as partículas do solo e que são altamente susceptíveis à erosão hídrica, necessitando de cuidados especiais quanto à reposição de matéria orgânica e demanda práticas conservacionistas mais severas (ALMEIDA; LAGOS; CASTRO, 2018).

Observa-se que as áreas conservadas dentro do PARNA das Emas, cujas condições físicas naturais são mais restritas, são as áreas do compartimento 6, 7 e 8 que representam um total de 14%. Tanto o C-7, quanto o C-8, são compostos pela área dos Patamares das altas bacias dos rios Verde-Claro (Figura 34) resultando num relevo com mais movimentos e com graus de declividade mais acentuados, além do relevo os Compartimentos se restringem, devido ao predomínio do Neossolos Quartzarênico, solo com percentual alto de areia.

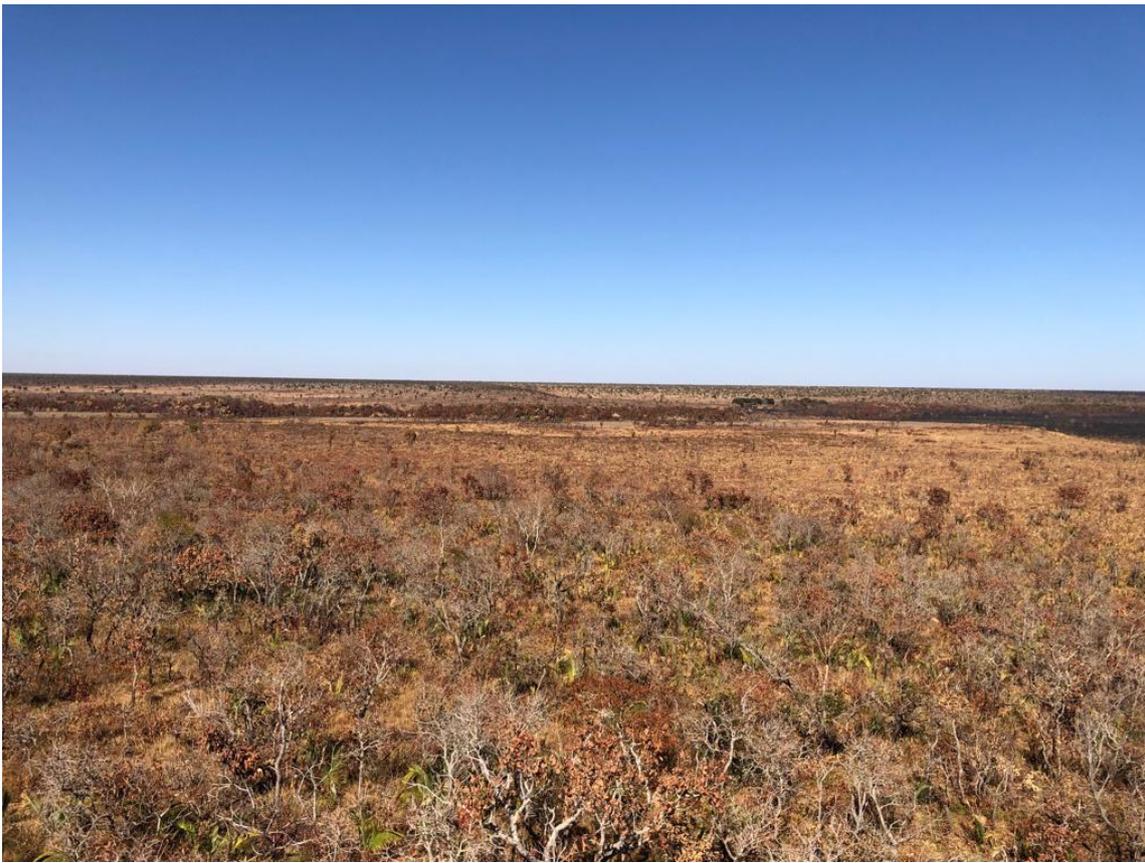
**Figura 34-** Áreas de Patamares no PARNA das Emas.



**Fonte:** Própria autora (2022).

Com 21% de área conservada dentro do PARNA das Emas, os Compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5 são os que apresentam uma tendência maior à ocupação, principalmente da agricultura, pois apresentam melhores condições para o estabelecimento dessa atividade por ser um relevo que predomina o Chapadão das Emas-Taquari, região plana com menor variação de cotas altimétricas e declividade, cujos, os solos ácidos podem ser facilmente corrigidos (Figura 35).

**Figura 35-** Característica da área de Chapadão das Emas-Taquari dentro do PARNA das Emas.



**Fonte:** Própria autora (2022).

Outro segmento a ser considerado são os de uso antrópico-conservado, que correspondem a 10% da região de análise, com exceção do C-3 e C-7, que só apresenta os segmentos conservado e antrópico. Esses segmentos apresentam a área de tensão que é o limite da UC com o uso ao entorno, tornando os locais com sérias ameaças a conservação.

Essa preocupação com esses segmentos se deve ao fato que o território brasileiro tem uma visão errônea de que é possível buscar o desenvolvimento sem a conservação das áreas naturais, as espécies e dos serviços ecossistêmicos que elas proveem (MACHADO et al., 2020). Assim, a preocupação é dobrada, uma vez que esses segmentos sofrem com o efeito de borda entre área ocupada e área preservada.

Apesar da reconhecida importância das UC's no Cerrado, a perda com a cobertura vegetal nativa desse bioma foi mais da metade de seus 2 milhões de km originais nos últimos 55 anos (LATRUBESSE et al., 2019). Na região de entorno do PARNA das Emas, encontra-se uma área impulsionada, sobretudo pela expansão da fronteira de *commodities* agropecuárias, principalmente no que tange as monoculturas da soja, milho

e cana-de-açúcar (MARTINS; DAMASCENO; OLIVEIRA, 2020; MARTINS; GALVANI, 2020; ABDALA; BARBOSA NETO, 2021).

Para Abdala e Barbosa Neto (2021), a pressão ao entorno do PARNA das Emas tem configurado um arranjo espacial caracterizado pela presença de uma diversidade de uso do solo e, apesar do Plano de Manejo e regulamentação da Zona de Amortecimento, as normas estabelecidas com relação à recomposição florestal não estão sendo cumpridas.

O PARNA das Emas hoje representa uma “ilha de vegetação”, cercado por atividades agropecuárias, mas com possibilidade para criação de corredores ecológicos e unidades de uso sustentável, que podem auxiliar na manutenção dos recursos hídricos e ao mesmo tempo minimizar os impactos providos pela ação antrópica (MARTINS; DAMASCENO; OLIVEIRA, 2020).

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este estudo mostrou que os processos de auto-organização do sistema se fazem por meio da abordagem estrutural e funcional da paisagem e que cada paisagem é composta de estruturas próprias, por meio de diferentes forças e funções que levam à disposição dos arranjos estruturais e seu funcionamento. Assim, a estrutura da paisagem é composta pelos elementos e pela relação entre eles, estabelecendo modelos em que os atributos fundamentais são os componentes dos sistemas, as formas dos contornos, as relações de vizinhança, as conexões e os limites que permitem estabelecer uma direção de estrutura vertical e/ou direção horizontal. Conseqüentemente, a estrutura é o suporte físico do sistema e permite que o mesmo desempenhe sua função.

O sistema metodológico se mostrou congruente, possibilitando e viabilizando a interpretação das características físicas no que tange as bacias hidrográficas. Ou seja, possibilitou interpretar que os Compartimentos 6, 7, 8 são mais propícios aos efeitos erosivos, por abrangerem parte das áreas de patamares e grande parte está representado por solos arenosos como o Neossolos Quartzarênicos. Já os Compartimentos 1, 2, 3, 4, 5 são áreas de chapadões e planície fluvial, onde predomina os latossolos da região, apesar de apresentar áreas mais planas, esses Compartimentos tiveram toda área de topo e vertente convertida para a agricultura, desde meados dos anos de 1970.

A partir desse contexto, agrupar as unidades de paisagem em Compartimentos Ambientais, por meio de unidades hidrológicas da região em questão, proporcionou identificar áreas das bacias hidrográficas análogas ao PARNA das Emas, o que permitirá

interpretar e descrever problemas ambientais, devido as mudanças espaciais e temporais, por meio da análise de solo. Assim, fornecer informações das condições ambientais para ajudar a delinear práticas adequadas para a gestão dessas bacias hidrográficas.

## CAPÍTULO 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS (ETPS) E RADIONUCLÍDEOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ÁREA DE CERRADO NO PLANALTO CENTRAL BRASILEIRO

### Resumo

Os Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) e os radionuclídeos estão presentes naturalmente em rochas e são liberados através do processo de intemperismo. Assim, a concentração desses elementos em diferentes tipos de solos dependerá do teor na rocha de origem e do grau de lixiviação a que esse material foi exposto. Embora existam lugares enriquecidos naturalmente, as atividades antrópicas são as responsáveis por uma grande parte dos dados ambientais relacionados à presença desses elementos denominados de como processo antropogênico ou fontes contaminantes advindas das atividades industriais, urbanas e práticas agrícolas e pecuárias, os quais podem ter um impacto significativo no solo. Com isso, o presente capítulo tem como objetivo geral avaliar a qualidade ambiental dos solos com base na análise dos radionuclídeos potássio ( $^{40}\text{K}$ ), urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e os EPTs cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu), arsênio (As), níquel (Ni), chumbo (Pb) e cádmio (Cd), com base na Resolução Conama n.º 460 de 2013, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2014) e os valores de referência a pesquisa de Bocardi (2019). Foi possível detectar que a classe de solo que apresentou maiores médias dos ETPs (Cu, As, Ni, Pb e Cd) e radionuclídeos ( $^{40}\text{K}$  e  $^{232}\text{Th}$ ) é a classe do LATOSSOLO Vermelho-Distrófico. Já a classe dos LATOSSOLOS VERMELHO-Ácrico apresentou os maiores valores de MO, CO, Ca, Zn e  $^{238}\text{U}$ . As demais classes de solos como o Gleissolo, Organossolo e Neossolo Quartzarênico apresentaram médias inferiores, até mesmo por se tratar de solos que apresentam maiores concentrações de areia em sua estrutura. Em relação aos padrões legais do CONAMA e Cetesb os elementos (Zn, Cu, Ni e Pb), estão dentro dos limites de solos com qualidade. Mas, com base nas referências utilizadas, e valores de pontos de amostragem em agrícolas, como o P6 apresentou maior resultado de Zn, Cu e Pb, indicam que são elementos que precisam de uma investigação melhor na região, pois o uso contínuo de áreas revertidas para o setor agropecuário, tendem a aumentar por bioacumulação os níveis desses elementos no solo. Ou mesmo, os níveis dessas Resoluções não conferem com a realidade da região em questão. Já os ETPs As e Cd demonstraram que, segundo essas Resoluções, na área da pesquisa, existem áreas no interior do PARNA das Emas que estão classificados como pontos de investigação (P4, P7, P11, P13, P17, P22 e P23). Em relação aos valores de referência de Bocardi (2019) para os radionuclídeos, foi possível observar que o  $^{238}\text{U}$  apresentou à cima do limite em todos os pontos das classes de solos (LVw, LVA, LVd, GM e OX), o  $^{40}\text{K}$  apresentou à cima do valor de referência nas áreas de (LVw, LVd, GM e OX). Já o  $^{232}\text{Th}$  poucos pontos apresentaram à cima do limite, mas estão entre os LVw, LVd e OX). Os pontos de amostragem dos solos derivados do RQ apresentaram níveis muito baixos, provenientes da concentração alta de areia na sua estrutura.

**Palavras-chave:** Bacia hidrográfica, Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs), radionuclídeos e unidade de conservação.

### Abstract

Potentially Toxic Elements (PTEs) and radionuclides are naturally present in rocks and are released through the weathering process. Thus, the concentration of these elements in different types of soil will depend on the content in the source rock and the degree of leaching to which this material was exposed. Although there are naturally enriched places, human activities are responsible for a large part of the environmental data related to the presence of these elements

known as anthropogenic processes or contaminant sources arising from industrial, urban activities and agricultural and livestock practices, which can have an impact significant in the soil. Therefore, the general objective of this chapter is to evaluate the environmental quality of soils based on the analysis of the radionuclides potassium ( $^{40}\text{K}$ ), uranium ( $^{238}\text{U}$ ) and thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) and the EPTs calcium (Ca), magnesium (Mg), phosphorus (P), potassium (K), copper (Cu), arsenic (As), nickel (Ni), lead (Pb) and cadmium (Cd), based on Conama Resolution No. 460 of 2013, the State Environmental Company of São Paulo (CETESB, 2014) and the reference values from research by Bocardi (2019). It was possible to detect that the soil class that presented the highest averages of ETPs (Cu, As, Ni, Pb and Cd) and radionuclides ( $^{40}\text{K}$  and  $^{232}\text{Th}$ ) is the Red-Dystrophic Oxisol class. The class of RED-Acric Oxisols presented the highest values of MO, CO, Ca, Zn and  $^{238}\text{U}$ . The other classes of soils, such as Gleisol, Organosol and Quartzarenic Neossolo, presented lower averages, even because they are soils that have higher concentrations of sand in their structure. In relation to the legal standards of CONAMA and Cetesb, the elements (Zn, Cu, Ni and Pb) are within the limits of quality soils. However, based on the references used, and values of sampling points in agricultural areas, such as P6, which presented higher results for Zn, Cu and Pb, they indicate that these are elements that need better investigation in the region, as the continued use of reverted areas for the agricultural sector, they tend to increase the levels of these elements in the soil through bioaccumulation. Or even, the levels of these Resolutions do not match the reality of the region in question. ETPs As and Cd demonstrated that, according to these Resolutions, in the research area, there are areas within the PARNA das Emas that are classified as research points (P4, P7, P11, P13, P17, P22 and P23). In relation to Bocardi's (2019) reference values for radionuclides, it was possible to observe that  $^{238}\text{U}$  presented above the limit at all points of the soil classes (LVw, LVA, LVd, GM and OX),  $^{40}\text{K}$  presented at above the reference value in the areas of (LVw, LVd, GM and OX). The  $^{232}\text{Th}$  few points were above the limit, but they are between LVw, LVd and OX). The sampling points of soils derived from RQ showed very low levels, resulting from the high concentration of sand in their structure.

**Keywords:** Watershed, Potentially Toxic Elements (PTEs), radionuclides and conservation unit.

## 1. INTRODUÇÃO

Os Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) e os radionuclídeos estão presentes naturalmente em rochas e são liberados através do processo de intemperismo (FERREIRA, 2013). Assim, a concentração desses elementos em diferentes tipos de solos dependerá do teor na rocha de origem e do grau de lixiviação a que esse material foi exposto (TAVARES, 2013).

As rochas ígneas ultrabásicas (perioditas e serpentinitas) possuem os maiores teores de EPTs, seguidas das básicas (gabros e basaltos). As menores concentrações se encontram nas rochas ígneas ácidas (como granito) e nas sedimentares (arenitos e calcários). Em geral, nas rochas, os EPTs mais abundantes são o bário, manganês, ferro e níquel, enquanto o cromo, cobalto, cobre, zinco apresentam-se em menores concentrações e, em menores quantidades, estão o arsênio, cádmio e mercúrio (BASCONES, 2003; KHAN et al., 2013). Os radionuclídeos, por outro lado, variam de

acordo com sua natureza. Em geral, as concentrações mais altas são encontradas nas rochas ígneas (graníticas) em relação às sedimentares e metamórficas (FERREIRA, 2013; LÓPEZ, 2015).

Embora existam lugares enriquecidos naturalmente, as atividades antrópicas são as responsáveis por uma grande parte dos dados ambientais relacionados à presença desses elementos denominados de como processo antropogênico ou fontes contaminantes advindas das atividades industriais, urbanas e práticas agrícolas e pecuárias, os quais podem ter um impacto significativo no solo (IORDACHE et al., 2020; YANG et al., 2020).

Em particular, nos solos do Cerrado, vem sendo utilizadas diversas técnicas de manejo para aperfeiçoar e aumentar a produtividade agrícola, como o plantio direto e a interação da cultura de grãos com a pecuária de corte durante a estiagem, visando melhorar o controle de temperatura, umidade e disponibilidade de MO e Carbono Orgânico (CO) (BONFIM-SILVA et al., 2014; MORAES TAVARES et al., 2019). Todavia, o uso de fertilizantes e agrotóxicos, contêm quantidades apreciáveis de compostos químicos e radionuclídeos, como  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ , e  $^{232}\text{Th}$ , o que pode contribuir para a contaminação do ambiente, por serem tóxicos e radioativas que aumentam acima dos níveis normais em associação com as atividades antrópicas (BAGHDADY; AWAD; GAD, 2018; BECEGATO et al., 2019). Assim, a contaminação por EPTs é um problema associado a toda a cadeia de produção de commodities agrícolas em escala global que pode causar danos tanto à saúde ambiental quanto à saúde humana em escala local. Lwin et al., (2018), por exemplo, realizaram um levantamento que mais de 10 milhões de locais são considerados solo poluído, dos quais mais de 50% estão contaminados por EPTs - Metais (Cd e Pb) ou por EPTs-metaloides (As). Com isso há uma necessidade do monitoramento para a avaliação da espacialização desses elementos nos solos, principalmente para avaliar as atividades antrópicas de uma certa região. Para isso, ocorre a necessidade do estabelecimento de valores orientadores que identifiquem áreas contaminadas. No Brasil a Resolução Conama n.º460 de 2013 (BRASIL, 2013b) e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2014), estabelecem valores orientadores para solo e água subterrânea.

Além dessas duas instituições, os trabalhos desenvolvidos no território brasileiro buscam outros valores de referência internacional, mas que não serão aplicados nessa tese, como o Fator de Enriquecimento (FE), (YONGMING et al., 2006; DRAGOVIĆ; MIHAILOVIĆ; GAJIĆ, 2008; CHEN et al., 2015; YAN et al., 2018), o Índice de

Geoacumulação (Igeo) (MÜLLER, 1969), o Fator Contaminação (FC) (TOMLINSON et al., 1980) e o Índice de Carga de Poluição (ICP) (TOMLINSON et al., 1980; TOMLINSON et al., 1980).

Dessa forma, essas Resoluções e Índices ajudam a definir estratégias de gerenciamento de áreas urbanas ou áreas agropastoris. O manejo inadequado dos solos, sobretudo pelas práticas agropastoris, é a principal causa dos processos de erosão, contribuem para perda de solos nas bacias hidrográficas, no assoreamento dos cursos d'água e na contaminação desses ambientes (PAYE et al., 2010; PRESTON et al., 2016; XIAO et al., 2019; LONGO; PENEREIRO; MENDES, 2020; RAMOS et al., 2020).

Dada a falta de estudos locais e até mesmo os regionais mais aprofundados que permitam avaliar a qualidade ambiental dos solos em termos de EPTs e elementos radionuclídeos, bem como a ausência de Programas Governamentais que promovam o desenvolvimento sustentável, este artigo tem como objetivo atender à demanda científica e social (impacto e remediação ambiental, qualidade da água e alimentos, saúde humana, políticas e regulamentações são alguns exemplos) fornecendo um diagnóstico atualizado das condições de contaminação das bacias hidrográficas da área de influência da Unidade de Conservação (UC) do Parque Nacional das Emas (PARNA das Emas) por radionuclídeos potássio ( $^{40}\text{K}$ ), urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e os EPTs cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu), arsênio (As), níquel (Ni), chumbo (Pb) e cádmio (Cd).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

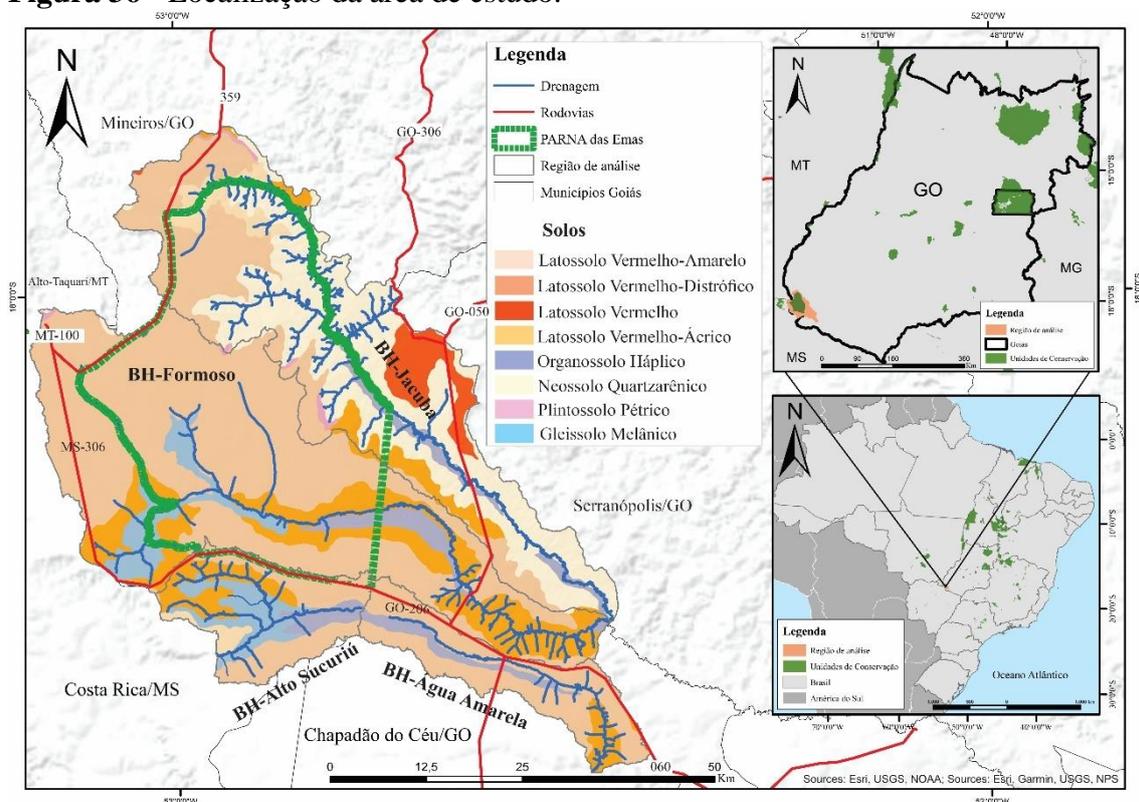
### 2.1. ÁREA DE ESTUDO

O bioma Cerrado abrange uma vasta área no Brasil Central, abrangendo os estados de Goiás, Distrito Federal, Tocantins, Bahia, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Piauí, Rondônia e São Paulo, e muitas áreas isoladas e disjuntas em todo o Brasil, ocupando mais de 2.000.000 km<sup>2</sup>(LATRUBESSE et al., 2019). Os cerrados são, principalmente, encontrados em extensos planaltos de terras altas, mas também em relevo suavemente dissecado a montanhoso (OLIVEIRA et al., 2023).

O Planalto Central Brasileiro, que compreende a área central do Cerrado, é uma área de origem bastante antiga e estável, onde o aplanamento e a erosão generalizada permitiram o desenvolvimento de uma superfície lisa de grande extensão, como a região de análise (ROSS et al., 2022). Localizado entre os estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e está representada pelas bacias hidrográficas do rio Formoso, rio Jacuba, rio Alto-Sucuriú e rio

Água-Amarela, todas elas pertencem à área de influência do PARNA das Emas (Figura 36).

**Figura 36 -** Localização da área de estudo.



**Base cartográfica:** Superintendência de Geologia e Mineração-SIC; Banco de Dados de Informações Ambientais-BDIA/IBGE/SIEG/SEPLAN/IMASUL/Forest-GIS/ United States Geological Survey-USGS.

**Projeção:** Sirgas\_2000\_UTM\_Zone\_22S.

**Org.:** Própria autora (2023).

A bacia intracratônica sul-americana é conhecida como bacia sedimentar do Paraná, composta por rochas sedimentares que estão associadas ao vulcanismo e às intrusões básicas, podendo alcançar até 7.000m de espessura (PINTO, 2019). A área de estudo é composta por sedimentos eólicos das Formações Botucatu e Vale do Rio do Peixe, Coberturas Detrito-Lateríticas, Coberturas Aluvionares e rochas basálticas da Formação Serra Geral que afloram das áreas de drenagem principal dos rios Formoso e Jacuba.

As classes de solos encontrados da pare são: Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Distrófico, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Ácrico, Organossolos Hápticos, Gleissolos Plintossolos e Neossolos Quartzarênicos.

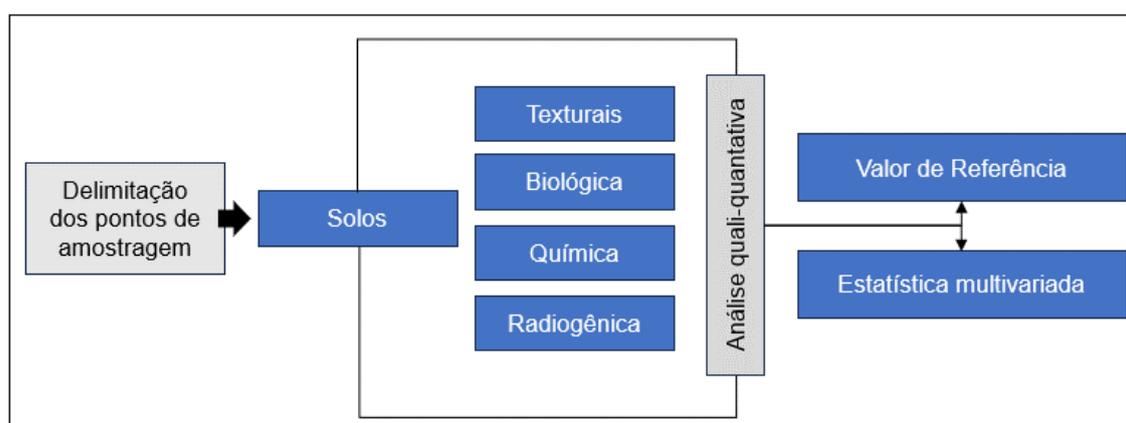
Á região é classificada como de clima tropical semiúmida, com verão chuvoso e inverno seco, com temperatura que variando entre 22 °C – 24 °C (NOVAIS, 2019). Entre os meses da primavera e verão a região recebe influência tanto da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), quanto da Zona de Convergência de Umidade (ZCON), o que permite maior concentração de chuvas durante suas atuações, resultando numa média geral entre 1400 mm a 1650 mm (NASCIMENTO; NOVAIS, 2020).

O Chapadão Central é uma região que se tornou uma fronteira agrícola desde meados de 1973. A vegetação natural tem sido convertida em extensas áreas voltadas para o setor agropecuário, como a produção de soja, milho, algodão e cana-de-açúcar. Pode-se notar, em algumas áreas, a pecuária extensiva (principalmente em áreas de solos mais arenosos). A depender do clima da região, é possível obter até duas safras anuais de grãos (LIMA; DA ASSUNÇÃO; SCOPEL, 2019; RIBEIRO; FARIA; CEZARE, 2019).

## 2.2. VARIÁVEIS TEXTURAIS, BIOLÓGICAS, QUÍMICAS E RADIONUCLÍDEOS

A Figura 37 apresenta um esquema simplificado dos métodos metodológicos empregados neste capítulo. O processo envolveu a análise da textura do solo, análise biológica, química e radiogênica. A descrição qualitativa foi baseada na Resolução Conama n.460 de 2013 (BRASIL, 2013b) e na Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2014) e no trabalho de (BOCARDI, 2019) e na descrição quantitativa, que se baseia na estatística multivariada de *boxplot*.

**Figura 37** – Fluxograma metodológico do capítulo 2.



Org.: Própria autora (2023).

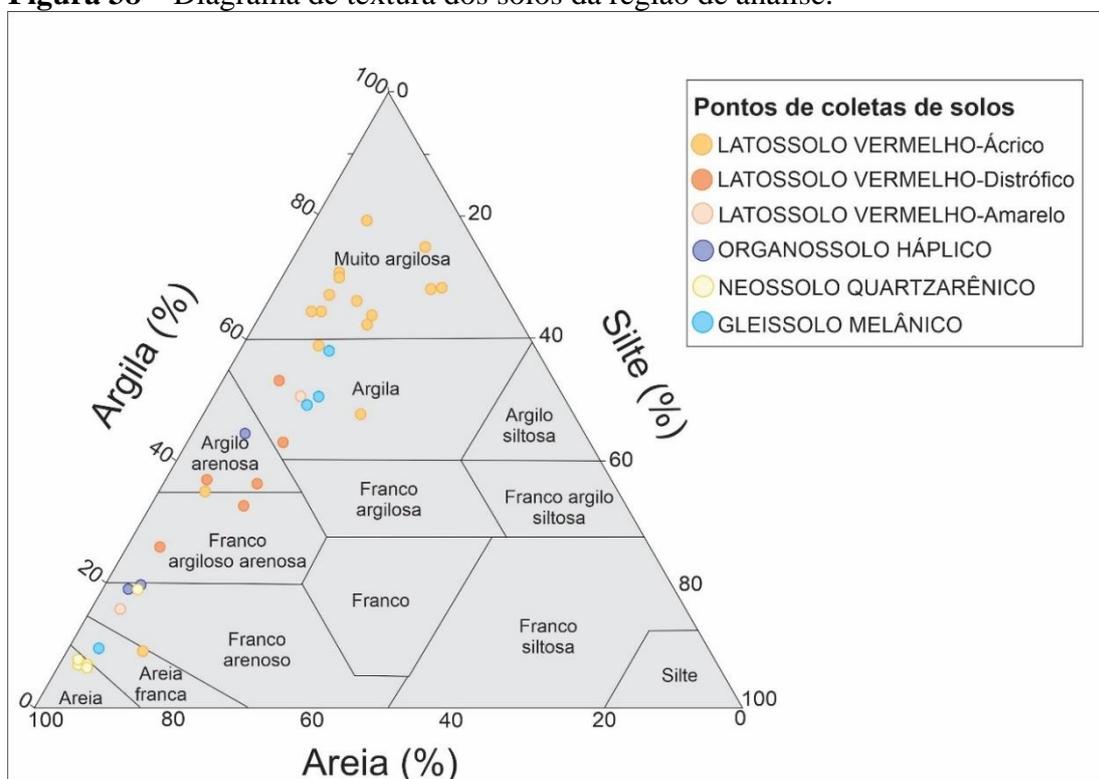
### 3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para compreender a dinâmica dos elementos nos diversos tipos de solos, é indispensável compreender sua textura é um dos principais indicadores de qualidade dos solos, uma vez que influencia na adesão e coesão entre as partículas do solo, bem como o manejo, pois está relacionada ao fluxo de água entre o solo, planta e atmosfera (CENTENO et al., 2017).

A textura dos solos, usada como fator ambiental, tem um grande impacto nos processos ecológicos, como a ciclagem de nutrientes e troca de íons (CENTENO et al., 2017). A argila, por exemplo tem um impacto significativo nas propriedades e características do solo, uma vez que apresenta uma grande área superficial específica e elevada carga, o que resulta numa elevada atividade química e capacidade de retenção de água (NOVAIS et al., 2007).

A Figura 38 apresenta as características granulométricas dos solos, que estão relacionadas às porcentagens de partículas primárias, distribuídas em tamanhos diferentes, determinadas por diâmetros específicos.

**Figura 38** – Diagrama de textura dos solos da região de análise.



Org.: Pela própria autora (2023).

Em relação à proporção do tamanho das partículas, houve um aumento nos teores da fração argila, enquanto houve um decréscimo no silte. Os pontos localizados nas áreas

dos Latossolos Vermelho-Distrófico e Latossolos Vermelho-Ácrico são caracterizados por solos de textura muito argilosa, argila, argilo arenosa, franco arenosa, franco argilo arenosa, areia franca e areia. Os Neossolos Quartzarênicos são classificados na categoria areia e franco arenosa, enquanto os Organossolos Háplico são divididos em entre franco arenosa e argilo arenosa e os Gleissolos Melânicos são caracterizados por pontos de argila e areia franco.

Essas características granulométricas terão um impacto na dinâmica dos parâmetros físico-químico e biológicos, por isso foi realizada uma descrição dos parâmetros com base em cada tipo de solo.

### 3.1. VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS EM RELAÇÃO A CADA TIPO DE SOLO

O solo que apresenta menor resultado de CO correspondem aos RQ que são solos arenosos (Tabela 16). No entanto, os LVw são os solos com maiores resultados e maior média desse parâmetro, sendo o segundo solo que apresenta a melhor homogeneidade nos resultados. Tanto o CO e MO dos LVw podem ser explicados pelo teor de argila encontrado nos pontos de amostragem, no qual, mostram uma tendência em ter como característica solos muito argilosos.

O comportamento da MO é muito parecido com o CO, onde os RQ vão apresentar os menores resultados e menor desvio padrão e o LVw apresenta os maiores resultados e o segundo solo com melhor resultado do desvio padrão.

**Tabela 16** – Descrição dos parâmetros CO e MO para cada tipo de solo.

			<b>GM</b>	<b>LVw</b>	<b>LVA</b>	<b>LVd</b>	<b>OX</b>	<b>RQ</b>
<b>CO</b>	<b>(g/dm<sup>3</sup>)</b>	Mínimo	14,15	11,02	7,7	7,3	10,3	3,9
		Máximo	21,23	29	18,27	19,66	15,72	8,7
		Média	18,72	20,02	12,99	15,55	12,87	6,96
		Mediana	19,75	20,5	12,99	17,33	12,59	8
		Desv.Pad	1,56	1,02	5,29	1,84	1,57	0,92
<b>MO</b>	<b>(g/dm<sup>3</sup>)</b>	Mínimo	24,4	19	13,2	12,6	17,8	6,8
		Máximo	36,6	50	31,5	33,9	27,1	15
		Média	32,28	34,52	22,35	26,80	22,20	12,04
		Mediana	34,05	35,3	22,35	29,85	21,7	14
		Desv.Pad	2,69	1,76	9,15	3,17	2,70	1,58

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háplico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

Os resultados da CTC (Tabela 17) variaram entre 45,9 cmolc/dm<sup>3</sup> (P3) e 110,8 cmolc/dm<sup>3</sup> (P31) para o GM; 4,74 cmolc/dm<sup>3</sup> (P4) a 279 cmolc/dm<sup>3</sup> (P24) para o LVw; 2,85 cmolc/dm<sup>3</sup> (P1) a 66,9 cmolc/dm<sup>3</sup> (P2) LVA; 5,9 cmolc/dm<sup>3</sup> (P28) a 80 cmolc/dm<sup>3</sup> (P16) LVd; 5,9 cmolc/dm<sup>3</sup> (P11) a 85,4 cmolc/dm<sup>3</sup> (P30) para OX; 2,53 cmolc/dm<sup>3</sup> (P12) a 4,2 cmolc/dm<sup>3</sup> (P8) para RQ. O desvio padrão entre os solos foram altos, principalmente no LVA (32,03), seguido do OX, LVw, GM, LVd, todavia o RQ apresentou um baixo desvio.

**Tabela 17** – Descrição do parâmetro CTC (cmolc/dm<sup>3</sup>) para cada tipo de solo.

CTC (cmolc/dm <sup>3</sup> )						
	GM	LVw	LVA	LVd	OX	RQ
Mínimo	45,9	4,74	2,85	5,9	5,9	2,53
Máximo	110,8	279	66,9	80	85,4	4,2
Média	76,73	61,55	34,88	35,03	49,60	3,42
Mediana	75,1	59,05	34,88	30	57,5	3,8
Desv.Pad	13,48	16,86	32,03	12,76	23,29	0,35

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háplico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

Os resultados do pH (Tabela 18) variaram de ácido (P19 e 33) a neutro (P25) no GM; ácido (P5, 9, 10 e 34) a alcalino (P24) no LVw; ácido (P2) a neutro (P1) no LVA; ácido (P16 e 27) a neutro (P15) no LVd; ácido (P11) a neutro (P21) para o OX e ácido (P18) a neutro (P26) no RQ, sendo essa neutralidade e alcalinidade atribuído à áreas de agricultura.

**Tabela 18** – Descrição do parâmetro pH (H<sub>2</sub>O) para cada tipos de solo.

pH (H <sub>2</sub> O)						
	GM	LVw	LVA	LVd	OX	RQ
Mínimo	4	4	4	4	3,9	4,3
Máximo	5,6	7,4	5	5,5	5,4	5,8
Média	4,62	4,83	4,5	4,52	4,43	4,84
Mediana	4,45	4,6	4,5	4,15	4	4,5
Desv.Pad	0,39	0,23	0,5	0,28	0,48	0,29

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háplico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

Os dados do Al (Tabela 19) apresentaram resultados mínimos em áreas agrícolas em todos os solos (pontos 25 e 31 GM, pontos 14, 24, 29 e 36 LVw, pontos 1 LVA, pontos 15 e 28, ponto 21 OX, pontos 8 e 26 RQ), e os maiores resultados são encontrados em áreas no interior do PARNA das Emas (P16 LVd, P19 GM, P2 LVA), área de APP

(P30 OX), área de mata fora do PARNA (P35 LVw) e no RQ o maior resultado está em área de pastagem no P12.

**Tabela 19** – Descrição do parâmetro Al (cmolc/dm<sup>3</sup>) para cada tipo de solo.

Al (cmolc/dm <sup>3</sup> )						
	GM	LVw	LVA	LVd	OX	RQ
Mínimo	0	0	0,1	0	0	0
Máximo	12,2	16,6	10,5	11,4	13,5	0,5
Média	5,75	4,33	5,3	4,59	4,77	0,23
Mediana	5,4	0,93	5,3	4,125	0,81	0,27
Desv.Pad	3,33	1,47	5,2	2,05	4,37	0,10

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háplico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

O LVw apresentou o menor resultado (P7) e maior resultado para Ca (P24) (Tabela 20) menor em área dentro do PARNA das Emas e maior em área de agricultura. Os maiores resultados foram encontrados no GM (P31) e no OX (P21). Já no LVd e LVw apresentaram a mesma dinâmica de mínimo e máximo, mas com resultados muito próximos entre agricultura e PARNA das Emas, prova disso são os resultados baixos de desvio padrão de ambos os solos e RQ menores resultados nas áreas de pastagens (P12 e P18) e maior resultado em área de agricultura P8.

**Tabela 20** – Descrição do parâmetro Ca (g/dm<sup>3</sup>) para cada tipo de solo.

Ca (g/dm <sup>3</sup> )						
	GM	LVw	LVA	LVd	OX	RQ
Mínimo	2,00	0,09	2	0,13	0,06	0,20
Máximo	54,00	246,00	2,98	4,73	30,00	1,50
Média	24,75	27,46	2,49	2,77	10,69	0,71
Mediana	21,50	2,49	2,49	2,89	2,00	0,32
Desv.Pad	13,40	15,19	0,49	0,70	9,67	0,29

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háplico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

Os resultados do macronutriente Mg (Tabela 21) variaram entre 1 (P9) e 15 (P25) no GM, o que derivou o maior desvio padrão dos resultados entre os solos. No LVw teve uma variação entre 0,09 (P7) a 22 (P24). No LVA resultados entre 0,07 (P2) e 1 (P1). LVd entre 0,07 (P17) e 2 (P27). No OX 0,07 (P11) e 7 (P21) e RQ 0,10 (P8) e 0,40 (P26). Os maiores resultados são detectados em áreas de agricultura com exceção do LVd que o

maior resultado foi na área de mata fora do PARNA das Emas, mas com base no desvio padrão (0,28) esse solo apresentou pouca variação dos resultados nos pontos de amostragem.

**Tabela 21** – Descrição do parâmetro Mg ( $\text{g/dm}^3$ ) para cada tipo de solo.

Mg ( $\text{g/dm}^3$ )						
	GM	LVw	LVA	LVd	OX	RQ
Mínimo	1,00	0,09	0,87	0,07	0,07	0,10
Máximo	15,00	22,00	1,00	2,00	7,00	0,40
Média	7,50	5,07	0,94	1,11	2,69	0,20
Mediana	7,00	1,00	0,94	1,00	1,00	0,15
Desv.Pad	3,77	1,77	0,07	0,28	2,17	0,06

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háptico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

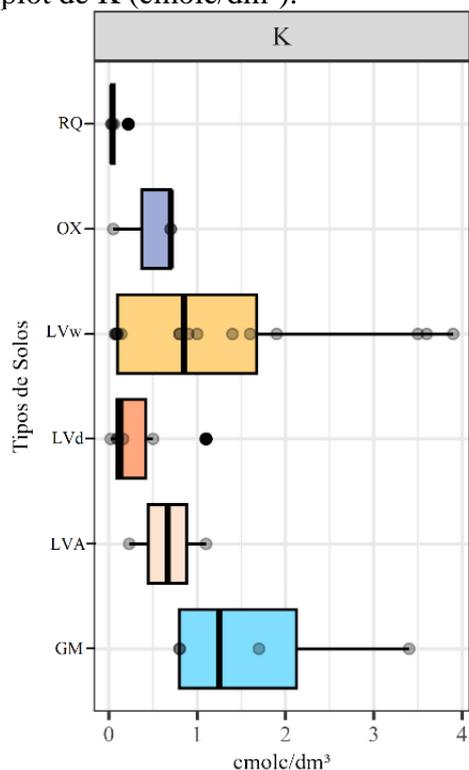
Os dados de K (Tabela 22 e Figura 39) apresentaram menor resultado no LVd no P17 no interior do PARNA das Emas e maior resultado no LVw (P14) que é área de agricultura. Todavia a maior média (1,68) é identificada no GM, o que resultou também na maior mediana. Visualmente na figura 35 percebe-se que os LVw e GM apresentam uma maior variabilidade dos dados comparados ao LVA, OX, LVd, e RQ.

**Tabela 22** – Descrição do parâmetro K ( $\text{cmolc/dm}^3$ ) para cada tipo de solo.

K ( $\text{cmolc/dm}^3$ )						
	GM	LVw	LVA	LVd	OH	RQ
Mínimo	0,8	0,07	0,03	0,02	0,05	0,03
Máximo	3,4	3,9	0,22	1,1	0,7	0,22
Média	1,68	1,25	0,08	0,33	0,48	0,08
Mediana	1,25	0,85	0,04	0,13	0,7	0,04
Desv.Pad	0,61	0,33	0,04	0,17	0,22	0,04

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háptico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

**Figura 39** – Gráfico boxplot de K (cmolc/dm<sup>3</sup>).



**Legenda:** LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háplico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

Os resultados do Zn (Tabela 23 e Figura 40) apresentaram um desvio padrão alto quando comparado aos dados do LVd (4,81), RQ (2,50), LVw (2,46) e OX (2,43), mostrando que houve uma diferença grande entre o mínimo e o máximo dos pontos de amostragem. O P1 (LVA) e P30 (OX) estão representados como o mínimo desse parâmetro nesses solos e são áreas de agricultura e os pontos máximos desses solos são o P2 e P11, respectivamente.

**Tabela 23** – Descrição do parâmetro Zn ( $\text{mg/dm}^3$ ) para cada tipo de solo.

Zn ( $\text{mg/dm}^3$ )						
	GM	LVw	LVA	LVd	OX	RQ
Mínimo	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2
Máximo	1,9	30,69	0,8	23,61	7,99	12,89
Média	0,98	7,01	0,5	7,83	3,16	2,90
Mediana	0,9	2,05	0,5	0,3	1,2	0,5
Desv.Pad	0,43	2,46	0,3	4,81	2,43	2,50

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háptico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

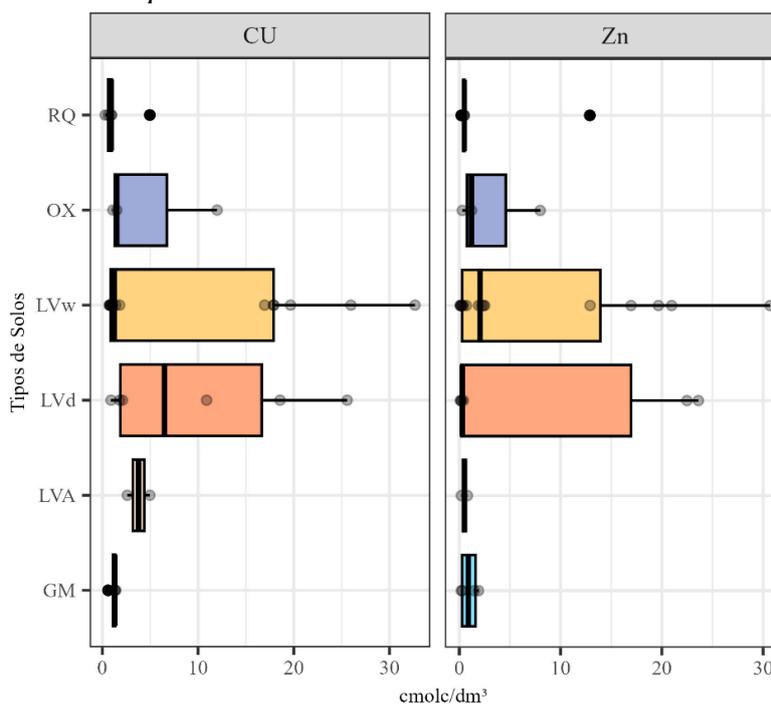
Os dados de Cu (Tabela 24) apresentaram uma variação para mínimo no P33 e máximo P31 para GM; mínimo no P14 e máximo para P6 no LVw; mínimo P1 e máximo P2 no LVA; mínimo P16 e máximo P28 no LVd; mínimo P21 e máximo P11 no OX e mínimo P18 e máximo P8 no RQ. Os dados de Zn e CU apresentaram a mesma dinâmica comparado aos solos LVA e OX.

**Tabela 24** – Descrição do parâmetro CU ( $\text{mg/dm}^3$ ) para cada tipo de solo.

CU ( $\text{mg/dm}^3$ )						
	GM	LVw	LVA	LVd	OX	RQ
Mínimo	0,6	0,7	0,3	0,9	1,1	0,3
Máximo	1,4	32,67	4,96	25,58	11,99	4,96
Média	1,15	8,84	1,55	9,97	4,86	1,55
Mediana	1,3	1,25	0,92	6,50	1,5	0,92
Desv.Pad	0,18	2,75	0,86	4,20	3,57	0,86

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háptico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

Os valores de CU e Zn indicaram uma maior variação e assimetria positiva para os LVa, LVd e OX, respectivamente. Já para os valores K apresentou uma variação no LVa, seguido do GM, LVd e OX. Sendo o LVa simétrico, o LVd e GM assimétrico positivo e OX assimétrico negativo (Figura 40).

**Figura 40** – Gráfico *boxplot* de Cu e Zn.

**Legenda:** LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háplico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

O As (Tabela 25) apresentou altos resultados para o LVd (P28), LVw (P13), LVA (P1), OH (P30) e RQ (P3). Na média geral LVd, LVA e LVw apresentam maiores médias e uma maior variação dos resultados segundo os dados de desvio padrão (LVA 5,12; LVd 4,42 e LVw 2,49).

**Tabela 25** – Descrição do parâmetro As ( $\text{mg}/\text{kg}^{-1}$ ) para cada tipo de solo.

	As ( $\text{mg}/\text{kg}$ )					
	GM	LVw	LVA	LVd	OX	RQ
Mínimo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,48
Máximo	0,5	22,61	10,74	23,21	5,19	4,66
Média	0,5	7,91	5,62	9,98	2,06	1,33
Mediana	0,5	0,5	5,62	7,28	0,5	0,5
Desv.Pad	0,00	2,49	5,12	4,42	1,56	0,83

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háplico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

Os resultados de Ni (Tabela 26) com exceção dos LVA e LVd os resultados apresentaram um desvio padrão  $<1$ , mostrando que os resultados apresentaram pouca variação dos dados. A média os menores resultados foram o RQ, OH, GM, LVA, LVw e

LVd, respectivamente. Todavia apresentaram maiores médias na classe de Latossolo, sendo o maior resultado encontrado na área de LVw (P35) que é área de vegetação natural fora do PARNA das Emas.

**Tabela 26** – Descrição do parâmetro Ni ( $\text{mg/kg}^{-1}$ ) para cada tipo de solo.

Ni ( $\text{mg/kg}^{-1}$ )						
	GM	LVw	LVA	LVd	OX	RQ
Mínimo	2,26	1,67	1,86	1,59	0,97	0,77
Máximo	5,13	12,00	4,93	8,56	3,90	1,68
Média	3,26	5,28	3,40	5,78	2,55	1,19
Mediana	2,82	3,46	3,40	6,65	2,79	1,09
Desv.Pad	0,66	0,87	1,53	1,19	0,86	0,15

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVA - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háptico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

Os menores resultados de Pb (Tabela 27) foram detectados nos GM (pontos 25 e 31), LVw (pontos 9,14,24 e 36) e LVd (ponto 16), posteriormente no P21 OX, P2 LVA e P8 RQ. Os maiores resultados foram detectados nos pontos que fazem parte dos Latossolos (LVw P6 > LVd P15 > LVA P1), todos em área de agricultura. Todavia com exceção do OX, os pontos nos Latossolos mostraram os maiores resultados de desvio padrão, mostrando que existe uma variação alta entre os resultados.

**Tabela 27** – Descrição do parâmetro Pb ( $\text{mg/kg}^{-1}$ ) para cada tipos de solo.

Pb ( $\text{mg/kg}^{-1}$ )						
	GM	LVw	LVA	LVd	OH	RQ
Mínimo	0,50	0,50	1,10	0,50	0,72	1,87
Máximo	3,06	16,44	6,60	12,41	11,39	4,86
Média	1,43	5,82	3,85	6,74	4,51	3,43
Mediana	1,07	3,03	3,85	6,33	1,41	3,75
Desv.Pad	0,61	1,42	2,75	1,89	3,45	0,58

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVA - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háptico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

Os resultados dos GM não tiveram variação entre os pontos 19, 25, 31 e 33 para o elemento Cd (Tabela 28). Já os LVw tiveram resultados mínimos em vários pontos 5, 9, 10, 14, 24, 29, 32, 34, 35 e 36 e máximo no ponto 4 e 6. O LVA o menor resultado foi no PARNA das Emas (P2) e maior resultado no P1. Ainda na classe dos latossolos o LVd apresentou menor resultado nos pontos 16, 20 e 27, todos em áreas de vegetação nativa. Os menores resultados de Cd no OX foram nos pontos 21 e 30 e maior resultado no P11 no PARNA. Já o RQ menores valores foram encontrados nos pontos 12, 18 e 26 e maior

resultado no ponto 18. Estatisticamente as variáveis apresentou pouca variação entre os resultados pegando como base o desvio padrão.

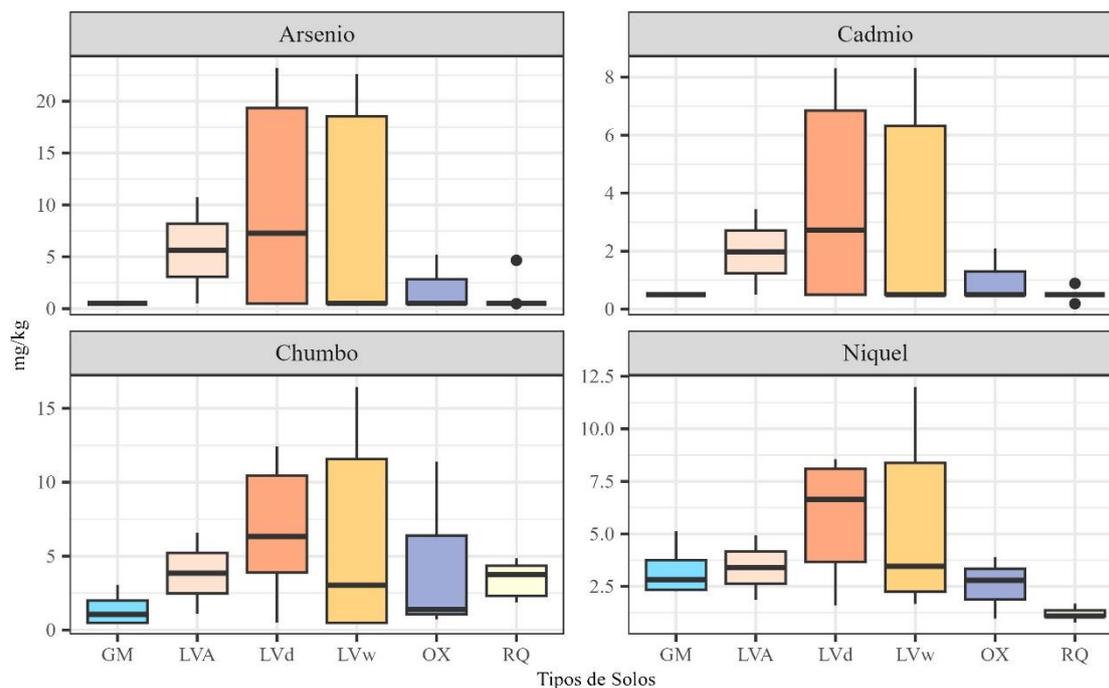
**Tabela 28** – Descrição do parâmetro Cd ( $\text{mg/kg}^{-1}$ ) para cada tipos de solo.

	<b>Cd (<math>\text{mg/kg}^{-1}</math>)</b>					
	<b>GM</b>	<b>LVw</b>	<b>LVA</b>	<b>LVd</b>	<b>OX</b>	<b>RQ</b>
Mínimo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,19
Máximo	0,5	8,32	3,5	8,31	2,1	0,89
Média	0,5	2,97	2,0	3,71	1,03	0,52
Mediana	0,5	0,5	2,0	2,73	0,5	0,5
Desv.Pad	0	0,84	1,5	1,50	0,53	0,11

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háptico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

Ao comparar ETPs e solos estatisticamente o teor médio Ar e Cd apresentaram maior variação comparado aos LVd e LVa, com assimetria positiva (Figura 41). Sendo que os quartis superior e inferior e os valores médios não diferem significativamente, quando comparado aos outros solos. Vale destacar que os valores encontrados no solo tipo OX apresentam uma assimetria positiva.

A distribuição do Pb entre os tipos de solos teve maior variabilidade dos dados em relação ao LVw, OH, LVd, RQ e GM, respectivamente. Sendo o RQ e LVd assimetria negativa e OX, LVw e GM assimetria positiva dos valores. Os dados de Ni apresenta maior variação para o LVw seguido do LVd, OX, GM e RQ. Sendo que OH e LVd apresentam assimetria negativa e RQ, LVw e GM assimetria positiva.

**Figura 41** – Gráfico do *boxplot* As, Cd, Pb e Ni.

**Legenda:** LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVA - Latossolo Vermelho árico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háplico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

As concentrações dos ETPs em  $\text{mg}/\text{kg}^{-1}$  sob área de vegetação natural no interior do Parna das Emas resultou em Zn 5,22; Cu 6,55; As 15,46; Ni 4,24; Pb 6,20 e Cd 5,37. Com apenas um ponto de amostragem no interior do PARNA das Emas na pesquisa realizada por (FALEIRO, 2013) encontrou os seguintes resultados (Zn 9; Cu 19,6; As 13; Ni 2,1; Pb 12).

Em média, os valores dos pontos de amostragem apresentam média de resultados de Cu, Zn e As menores que na pesquisa de (FADIGAS et al., 2002), que identificaram Cu –  $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Mn –  $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Ni –  $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Zn –  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , a exceção do Cd (Cd –  $0,06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Em contrapartida, os resultados de Cd dessa pesquisa apresentaram mais alto.

Quando comparado a outros locais, Zn e Ni exibiu resultados próximos dos estados de Rondônia e Mato Grosso (Zn 3 e Ni 2.1). Já os dados de Cu e Pb ficou próximo dos valores de referência do estado do Espírito Santo (Cu 5.91; Pb 4.54).

Os dados de radionuclídeos de  $^{40}\text{K}$  (pct) apresentaram um desvio padrão  $<1$  entre os solos (Tabela 29), indicando baixa variação entre os resultados. Os menores resultados foram detectados em área mais arenosa do RQ (mínimo 0,03 pct e máximo de 0,10 pct).

Na média geral, os LVw e LVd apresentaram os mesmos resultados (0,22), seguidos do GM (0,21), LVA e OH (0,16).

**Tabela 29** – Descrição do parâmetro  $^{40}\text{K}$  (pct) para cada tipo de solo.

$^{40}\text{K}$ (pct)						
	GM	LVw	LVA	LVd	OH	RQ
Mínimo	0,16	0,13	0,15	0,16	0,15	0,03
Máximo	0,29	0,31	0,16	0,32	0,17	0,10
Média	0,21	0,22	0,16	0,22	0,16	0,07
Mediana	0,19	0,23	0,16	0,20	0,16	0,07
Desv.Pad	0,03	0,02	0,01	0,03	0,00	0,02

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háptico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

A espacialização dos dados  $^{238}\text{U}$  (ppm) apresentaram maiores concentrações no LVw tanto no resultado máximo, quanto na média (Tabela 30). A menor média foi verificado no RQ, depois LVA, OH e GM. No geral o desvio padrão mostrou que os dados apresentam pouca variação entre os resultados por tipo de solo, apenas o GM que apresentou maior que  $>1$ .

**Tabela 30** – Descrição do parâmetro  $^{238}\text{U}$  (ppm) para cada tipo de solo.

$^{238}\text{U}$ (ppm)						
	GM	LVw	LVA	LVd	OH	RQ
Mínimo	2,59	2,74	2,68	2,80	2,87	0,41
Máximo	8,95	9,96	2,87	8,19	3,74	7,82
Média	4,91	6,56	2,78	5,61	3,21	2,11
Mediana	4,06	7,52	2,78	5,34	3,00	0,81
Desv.Pad	1,46	0,73	0,09	0,88	0,27	1,43

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVa - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háptico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

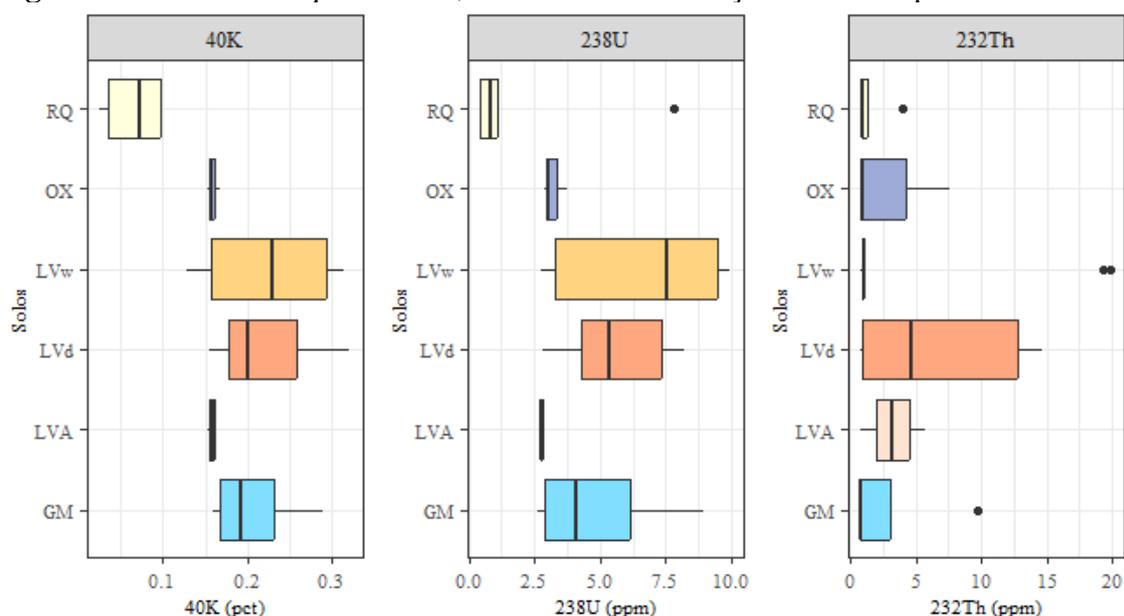
Os resultados de  $^{232}\text{Th}$  apresentaram uma dinâmica distinta de  $^{40}\text{K}$  e  $^{238}\text{U}$ . Na média (Tabela 31) os maiores resultados foi na classe dos Latossolos (LVd>LVA>LVw). O desvio padrão  $>1$  indicou uma variação grande entre os elementos em análise.

**Tabela 31** – Descrição do parâmetro  $^{232}\text{Th}$  (ppm) para cada tipo de solo.

$^{232}\text{Th}$ (ppm)						
	GM	LVw	LVA	LVd	OH	RQ
Mínimo	0,79	0,79	0,76	0,83	0,76	0,77
Máximo	9,73	19,91	5,73	14,61	7,64	3,96
Média	3,05	3,30	3,24	6,66	3,10	1,57
Mediana	0,83	1,00	3,24	4,71	0,90	0,93
Desv.Pad	2,23	1,60	2,48	2,74	2,27	0,61

**Legenda:** Desv.Pad = Desvio Padrão. LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVA - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háplico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

Ao comparar os radionuclídeos do solo, o teor médio de  $^{232}\text{Th}$  tiveram maior variação nas áreas agrícolas, quando comparado com o Gleissolo (simétrico) e Latossolo Vermelho-distrófico (assimetria negativa), já na área do Parna das Emas apresentou variação simétrica para o LVd (Figura 42). O  $^{238}\text{U}$  e  $^{40}\text{K}$  apresentou maior variação na área agrícola, quando comparado ao Parna e vegetação natural fora do Parque.

**Figura 42** – Gráfico *boxplot* de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  em relação ao uso e tipo de solo.

**Legenda:** LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVA- Latossolo Vermelho-Amarelo; LVA - Latossolo Vermelho ácrico; GM - Gleissolo Melânico; OX - Organossolo Háplico e RQ - Neossolo Quartzarênico.

### 3.2. VARIABILIDADE DOS ETPS SEGUNDO A RESOLUÇÃO CONAMA N. 460/2013 E CETESB (2014)

Com relação à variabilidade dos dados segundo as Resoluções vigentes os LVw foram os que apresentam valores de investigação para As e Cd nos pontos 4, 6, 7, 13, 22 e 23 (Tabela 32). Sendo o P6 o único em área de agricultura. Os pontos situados em áreas de LVd apresentaram valores de investigação para As e Cd nos pontos 1, 15, 17 e 28. Sendo o ponto 17 o único no interior do PARNA das Emas. O ponto 8 situado na área de RQ apresentou valores de investigação para As e Cd, enquanto no ponto 11, que está na área de influência do OX, apresentou valores de prevenção para As e valor de investigação para Cd. Os outros ETPs independentes da classe de solo indicaram valores de referência de qualidade conforme a Resolução CONAMA n.º 460 de 2013 e CETESB, 2014.

**Tabela 32** – Valores orientadores de EPTs presentes nos solos conforme a Resolução CONAMA n. 460/2013 e Cetesb (2014).

Pontos	Zn	Cu	As	Ni	Pb	Cd
	(mg/kg)					
1	0,20	4,96	10,74	4,93	6,60	3,45
2	0,80	2,60	0,5	1,86	1,10	0,5
3	0,20	0,97	0,48	0,77	2,32	0,19
4	0,20	17,91	19,41	8,76	11,84	8,32
5	0,10	0,80	0,5	2,13	2,65	0,5
6	30,69	32,67	22,57	9,50	16,44	8,32
7	20,97	25,97	17,88	8,29	13,78	6,29
8	12,89	4,96	4,66	1,09	4,86	0,89
9	0,20	0,80	0,5	2,11	0,50	0,5
10	0,10	0,80	0,5	2,28	2,22	0,5
11	7,99	11,99	5,19	3,90	11,39	2,10
12	0,40	0,62	0,5	1,68	3,75	0,5
13	19,66	19,66	22,61	8,65	12,39	6,39
14	0,70	0,70	0,5	2,43	0,50	0,5
15	22,48	18,57	21,11	8,31	12,41	8,31
16	0,20	0,90	0,5	1,59	0,50	0,5
17	0,40	10,89	14,05	5,84	7,52	4,95
18	0,50	0,30	0,5	1,36	4,35	0,5
19	0,20	1,30	0,5	5,13	3,06	0,5
20	0,10	2,10	0,5	7,46	5,13	0,5
21	1,20	1,10	0,5	0,97	0,72	0,5
22	12,92	17,89	20,87	8,05	9,04	7,06
23	16,96	16,96	18,25	7,18	11,47	6,08
24	2,20	1,00	0,5	1,67	0,50	0,5
25	1,90	1,30	0,5	2,26	0,50	0,5
26	0,50	0,92	0,5	1,07	1,87	0,5
27	0,20	1,80	0,5	2,94	3,47	0,5
28	23,61	25,58	23,21	8,56	11,41	7,48
29	2,40	1,40	0,5	3,93	3,41	0,5
30	0,30	1,50	0,5	2,79	1,41	0,5
31	1,50	1,40	0,5	3,28	0,50	0,5
32	2,50	1,10	0,5	2,62	5,16	0,5
33	0,30	0,60	0,5	2,36	1,64	0,5
34	0,30	1,00	0,5	1,89	0,50	0,5
35	0,40	0,90	0,5	12,00	2,16	0,5
36	1,90	1,80	0,5	2,98	0,50	0,5
Legenda:	VQR		VP	VI		

Org.: Própria autora (2023).

Os valores de Zn ficaram na faixa entre  $0,10 \pm 30,69$ , Cu entre  $32,67 \pm 0,30$ , Ni entre os valores  $12,00 \pm 0,77$  e Pb  $13,78 \pm 0,50$ , todos esses ETPs indicaram valores de

referência de qualidade na área de estudo segundo a Resolução CONAMA n.º 460 de 2013 e CETESB, 2014.

Já os resultados de As mostram que o ponto 1 (10,75), 8 (4,66), 11 (5,19) e 17 (14,05) apresentaram valores de prevenção (VP) nesses locais. Os pontos 4 (19,41), 6 (22,57), 7 (17,88), 13 (22,61), 15 (21,11), 22 (20,87), 23 (18,25) e 28 (23,21) apresentaram resultados mais elevados, indicando pontos a serem investigados (VI).

Os pontos 11 e 17 (VP) e pontos 4, 7, 13, 20 e 23 (VI), são pontos de amostragem dentro do PARNA das Emas, podendo indicar que os Latossolo Vermelho-Ácrico e Latossolo Vermelho-Distrófico oriundos das Coberturas Detrito-Laterítica com exceção do ponto 11 e 23 que são área de Organossolo provenientes da Formação Serra Geral, apresentam valores à cima dos valores de referência de qualidade estabelecido pelas Resoluções vigente que é 3,5 mg/kg.

#### 4. RESULTADOS

As condições climáticas da região tropical permitiram, ao longo do tempo, um estágio avançado de intemperização do material de origem e o desenvolvimento dos Latossolos, que apresentam uma pequena quantidade de minerais primários ou secundários pouco resistentes ao intemperismo e possuem baixa capacidade de troca catiônica ( $<170 \text{ mmol}_c \text{ Kg}^{-1}$ ) (EMBRAPA, 2018).

Os valores médios dos elementos encontrados na região para o LVw, quando comparados aos demais outros solos, são maiores valores de MO 34,52, CO 20,02, Ca 27,46, Zn 7,01,  $^{238}\text{U}$  5,56. Já o 2º maiores valores são os elementos CTC 61,55, pH 4,83, Mg 5,07, K 1,25, CU 8,84, As 7,81, Pb 5,82, Cd 2,97,  $^{40}\text{K}$  0,22 e  $^{232}\text{Th}$  3,30. Considerando que as áreas que o uso está destinado à agricultura estão relacionadas com os valores dessas médias.

A exploração agrícola nos solos Ácricos tem como consequência a redução do teor de MO e aumento da soma de bases devido ao manejo da camada arável. A adição de matéria orgânica é indispensável para aumentar a capacidade de retenção de cátions em subsuperfícies desses Latossolos.

A segunda classe de Latossolos mais abundante na região são os Latossolos Vermelho-Distróficos, também que apresentam elevado grau de intemperismo químico, o que resulta em uma grande causando considerável decomposição de componentes minerais, sobretudo de origem caulínica. São considerados ácidos por apresentarem

baixa saturação por base (<50%). Além de possuírem capacidade de troca catiônica menor que  $17 \text{ mmol}_c \text{ Kg}^{-1}$  de argila, a textura é arenosa (ESWARAN et al., 2003; EMBRAPA, 2018). São considerados muito argilosos ou, até mesmo, medianos, sendo que os medianos podem ser mais pobres e sofrer mais com a erosão, sendo, inclusive, mais facilmente compactados. Os LVd apresentam as maiores médias dos ETPs CU 9,97, As 9,98, Ni 5,78, Pb 6,74, Cd 3,71 e radionuclídeos  $^{40}\text{K}$  0,22 e  $^{232}\text{Th}$  6,66. O segundo maior resultado do radionuclídeo  $^{238}\text{U}$  5,61 e ETP Zn 7,83.

Os LVA apresentam menor representatividade na região, tanto pela sua ocorrência, quanto pela quantidade de amostras coletadas. No entanto, em geral, quando comparados aos LVw e LVd apresentam menor resultado de CTC, pH, Ca, Mg, K, Zn, CU, U e K. Conforme os dados da Embrapa, (2018), esses solos estão intimamente relacionados aos relevos, plano, suave ondulado ou ondulado. Em condições naturais, apresentam baixos níveis de fósforo e limitações químicas em termo de profundidade. A goethita é o mineral predominante em sua composição, em comparação à hematita, apresentando textura argilosa a muito argilosa (KER, 1997).

Os Neossolos Quartzarênicos, solos de origem eólica, são depósitos arenosos, apresentam textura de areia ou areia franca até 2m de profundidade, com teor de argila inferior a 15% (FRAZÃO et al., 2008), logo, apresentam baixo teor de matéria orgânica, baixa capacidade de retenção de água, fósforo e micronutrientes e a lixiviação de nitrato é intensa devido à sua textura e são bastante susceptíveis à erosão hídrica (ALENCAR et al., 2019; EMBRAPA, 2018).

Os Neossolos Quartzarênicos correspondem 19% da área, sendo mais de 18% apenas na BH-Jacuca. A textura de areia ou areia franca, como detectado nessa pesquisa, sendo composta, sobretudo, por grãos de quartzo. Sendo assim, são praticamente destituídos de minerais primários que são pouco resistentes à intempérie. O teor máximo de argila é de 15%, quando o silte está ausente. A granulometria da fração areia é variável e algumas situações, predominam diâmetros maiores e, em outras, menores (EMBRAPA, 2018). Representam os solos com a menor porcentagem de MO 12,04, teor de CO 6,96, CTC 3,42, Mg 0,20 do ETP Ni 1,19 e radionuclídeos  $^{40}\text{K}$  0,07,  $^{238}\text{U}$  2,11 e  $^{232}\text{Th}$  1,57, além de uma média dos resultados de pH 4,84, em comparação com os demais solos.

As principais redes de drenagem da BH-Alto Sucuriú, Água-Amarela e cabeceira de drenagem da BH-Formoso podem ser encontradas os depósitos aluvionares holocênicos inconsolidados que ocorrem nas depressões rasas e planícies e vão originam os Organossolos Háplicos e Gleissolos Melânicos. São solos com um elevado teor de matéria

orgânica, o que resulta na alta capacidade de troca de cátions. São encontrados em relevo plano de várzea (EMBRAPA, 2018). A argila pode ser de baixa atividade ou de alta atividade, variando de acordo com a textura ao longo do perfil. Os Gleissolos se desenvolvem em ambientais com materiais inconsolidados e são fortemente influenciados por ocorrências de encharcamento prolongado (LEPSCH, 2010).

Os Organossolos são solos fortemente ácidos, com uma elevada capacidade de troca de cátions e baixa saturação por bases (distróficos), apresentando, às vezes, um teor elevado de alumínio (EMBRAPA, 2018). Prova disso, foram os solos que apresentaram maior acidez com pH 4,43, mas o segundo com menor taxa de MO na sua composição, quando comparado ao GM o OX apresentou maiores resultados de Mg, K, Zn, Cu, As, Pb, Cd e  $^{238}\text{U}$ .

Em geral, o GM foi a classe que apresentou as menores médias dos resultados dos elementos, sendo menor valor em relação às demais classes de Cu, As, Pb, Cd. Contrapartida apresentou os maiores resultados de CTC, Al, Mg e K e a segunda classe com a maior porcentagem de MO e CO.

O pH, no contexto geral dos elementos em análise, exerce uma influência relevante na dinâmica dos íons metálicos catiônicos (Cu, Zn, Ni, Mn, Fe, Cr, Co, Pb e Cd). Quanto mais ácido o solo, mais mobilidade esses íons terão, sobretudo nos Latossolos com grau de intemperismo avançado, fazendo com que esses cátions sejam substituídos por cátions ácidos como o Al e  $\text{H}^+$  (FAGERIA; NASCENTE, 2014). No entanto, a área da pesquisa abrangeu uma faixa de 3,90 (área de Organossolo Háplico dentro do PARNA das Emas) e 7,40 (área de Latossolo Vermelho Ácrico destinada à agricultura).

É importante destacar que o ponto de maior acidez sofre influência do transbordamento do rio no período de maior índice pluviométrico, uma vez que esses organossolos são extremamente ácidos e encontram-se em áreas de baixadas úmidas ou alagadas, mal e muito mal drenadas (EMBRAPA, 2018). Dessa forma, o pH tem um impacto significativo tanto na mobilidade dos nutrientes, quanto na mobilidade de ETPs no solo. Exerce uma influência na adsorção dos ETPs, uma vez que, com o potencial redox, determina o equilíbrio entre as formas iônicas e hidrolisadas dos metais (MEDINA et al., 2018).

Outra característica dos solos tropicais é a tendência em acumular residualmente óxidos de ferro e alumínio. Ambos possuem alta relação com a disponibilidade de cátions metálicos e dependendo do valor do pH do solo, possuem capacidade em adsorver ânions

como o fosfato (PEREIRA et al., 2020). Para Vendrame et al., (2011), o Al tem uma influência mais significativa nos atributos físico-químicos do solo do que o Fe.

O Al apresentou concentrações na faixa de 16,60 mg/kg  $\pm$  0,00 mg/kg. As concentrações mais baixas foram nos pontos 8, 14, 15, 21, 24, 25, 26, 28, 29, 31 e 36, que estão relacionados à cultura de soja, milho e cana-de-açúcar, o que sugere que a calagem, pode ter contribuído para o aumento do pH e redução do teor de Al (VARGAS et al., 2019). O maior resultado foi no ponto 35 (16,60), área de vegetação natural, que também apresenta maior concentração de argila, matéria orgânica e níquel. Comparado ao levantamento geoquímico realizado no estado do Paraná em 41 pontos de solo em área de mata nativa (MINEROPAR, 2005) que variaram entre 1,79 a 512,62mg/kg<sup>-1</sup>, os resultados em área naturais na região da pesquisa foram baixos, podendo estar relacionado com a formação dos solos que são provenientes de rocha arenítica que vão apresentar menores teores de íons metálicos (FADIGAS et al., 2002).

Dado que o Al é um íon tóxico para determinadas culturas, é recomendado que os seus níveis no solo sejam nulos ou não superiores a 0,5 Cmolc.dm<sup>-3</sup>. Os valores entre 0,5 e 1,5 são considerados médio toxidez e < 1.5 alta toxidez, mas apenas o teor de Al trocável não é suficiente para caracterizar sua toxidez para as plantas, pois esta depende também da proporção que o Al ocupa na CTC efetiva. Dessa forma, em alguns estudos, é possível calcular a saturação por alumínio (m%) (Villar, 2007; Prezotti & Guarçoni, 2013).

A toxidez do alumínio, contudo, pode ser considerada baixa em 18 pontos de amostragem conforme a proposta de Souza e Lobato (2004). Em 5 pontos de amostragem apresenta toxidez média, enquanto em 13 pontos de amostragem, apresenta toxidez alta. Isto demonstra que a porcentagem de cargas negativas do solo, próximo ao pH natural, está sendo ocupada por Al trocável.

A CTC variou entre 279,00 cmol dm<sup>-3</sup>  $\pm$  2,53 cmol dm<sup>-3</sup>. O menor valor (2,53 cmol dm<sup>-3</sup>) foi verificado no ponto de amostragem 12, que se encontra sob influência do solo classificado como Neossolo Quartzarênico, o que demonstra uma baixa capacidade de troca de cátions do solo com o meio, devido à baixa concentração de argila (7 %) e pH (4,4 %).

A maior CTC foi verificada no ponto de amostragem 24. Este ponto está localizado em LVw com textura argila. A alta capacidade de troca de cátions do solo com o meio, é devido à concentração de material silte-argiloso (69,8 %) e MO (33,9%). Em geral, é possível notar que os solos argilosos apresentam uma CTC mais alta, enquanto os solos arenosos mais baixa retendo menos cátions trocáveis do que um solo com alto

teor de argila e MO (Prezotti & Guarçoni, 2013; Alovisei et al 2021). Dessa forma, os valores de CTC apresentados nesta pesquisa mostraram que, independentemente do tipo de solo, da cobertura da terra.

Todavia, a mobilidade vertical no solo é influenciada pelos atributos presentes em cada um, como o teor de água, o tamanho e a distribuição dos poros, a quantidade de água que percola, a intensidade de chuva, a capacidade de retenção e também pela concentração iônica na solução do solo, o pH, CTC, reações de dissolução/precipitação e as trocas iônicas entre os nutrientes (DIEROLF; ARYA; YOST, 1997; NEVES; ERNANI; SIMONETE, 2009).

Já os resultados de K apresentaram o menor resultado em área conservado/antrópico (área limítrofe do PARNA das Emas) e maior resultado em área antrópica. Podendo estar ligado ao tipo de adubação utilizada no manejo da agricultura, uma vez que, a fertilização por NPK é bastante utilizada no território brasileiro (BECEGATO et al., 2019), sendo indispensável para a fisiologia das plantas.

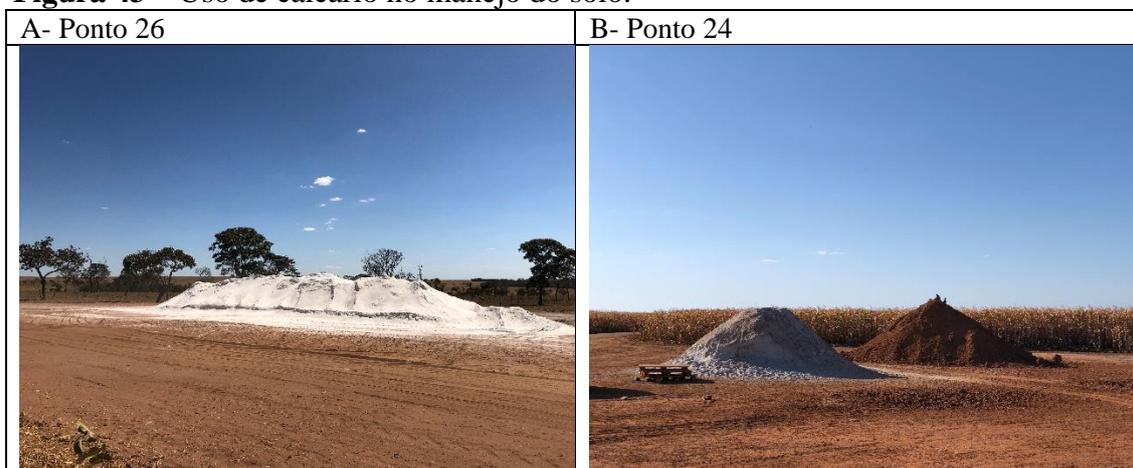
Para Lange et al., (2019), o K é o segundo elemento mais adsorvido pelas plantas e, nos últimos anos, com aumento da produtividade, é possível detectar respostas à adubação potássica em solos de baixa fertilidade, sobretudo no milho safrinha, ao contrário da soja cultivada no período de maior índice pluviométrico. O K é facilmente lixiviado com condições pluviométricas altas e até mesmo em solos com textura média a arenosa e também com baixa CTC (CAVALLI; LANGE, 2018).

Em solos de Cerrado, valores abaixo de  $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$  de Zn podem estar associados a sintomas de deficiência (SOUZA et al., 2021). É uma distinção da área de pesquisa que obteve um resultado mínimo de  $0,10 \text{ mg dm}^{-3}$  no ponto 5, que é uma área conservada no interior do PARNA das Emas. Já o resultado máximo de  $30,69 \text{ mg dm}^{-3}$ , foi detectado no ponto 6 que é uma área destinada à agricultura. Todo modo, os valores de Zn foram baixos na região de análise. Oliveira; Costa (2004) e Biondi et al., (2011) em suas pesquisas analisaram solos de origem gnaisse, arenito e sedimentos e em solos derivados de basalto e obtiveram médias entre  $22,5 \pm 11,93$ .

O Zn é um micronutriente que pode limitar à produtividade agrícola, especialmente no Cerrado, que apresenta solos naturalmente deficientes em micronutrientes (ROHR, 2021). Segundo Cavalli (2020), a expansão da agricultura, o aumento da produtividade, a utilização de calcário (Figura 43-A e B) e a maior pureza dos fertilizantes, têm causado uma diminuição dos nutrientes no solo ao longo dos anos,

resultando numa necessidade de adubação com Zn que pode ter respostas positivas e expressivas (MELLIS et al., 2018).

**Figura 43** – Uso de calcário no manejo do solo.



**Fonte:** Própria autora (2022).

O valor máximo de Cu foi encontrado no ponto 6, área destinada à monocultura de soja e milho, situada na nascente do rio Formoso, limítrofe com o PARNA das Emas. Não distinto do Zn, o Cu é um micronutriente que está sendo aplicado por meio de fertilizantes, especialmente pelo tratamento de sementes (GONÇALVES; OLIVEIRA NETO; MACHADO, 2019). Todo modo, os valores desses dois elementos (Zn e CU) ficaram dentro do limite de solos com qualidade segundo Resolução CONAMA n.º 460 de 2013 e CETESB, 2014.

Em geral, os solos do Cerrado apresentam diversas limitações na composição de nutrientes, como elevada acidez, toxidez por Al ou Mn, baixa saturação de bases, como cálcio trocável, Mg e K, e ainda baixa disponibilidade de fósforo (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005; BONFIM-SILVA et al., 2014; CARNEIRO et al., 2018). Essas características fazem com que a região em análise, utilize fertilização, adubação e calagem para manter as áreas voltadas à produção agrícola.

O As possui um comportamento diferenciado no ambiente, em comparação com os outros elementos. Como está presente na forma de ânion, sua mobilidade aumenta com o aumento do pH, ao contrário dos elementos catiônicos. Além disso, muitos elementos tóxicos são imobilizados sob condições redutoras e o As se distingue por ser relativamente móvel nestas condições (ASSIS, 2010), podendo explicar seus valores no ambiente natural do Parque, com uma acidez mais elevada, como nos pontos (P11 5,19; P4 P19,41 mg/Kg<sup>-1</sup>; P7 22,57 mg/Kg<sup>-1</sup>; P13 22,61 mg/Kg<sup>-1</sup>; P22 20,87 mg/Kg<sup>-1</sup>; P23 18,25 mg/Kg<sup>-1</sup>).

<sup>1</sup>) que resultaram em valores de investigação segundo a Resolução CONAMA n.º 460 de 2013 e CETESB, 2014, e particularmente o P11 é valor de prevenção segundo essas Resoluções.

Além de ser uma fonte natural, está presente nos minerais que formam as rochas, como os óxidos de ferro e as argilas, sobretudo, em sulfetos e pirita. O seu comportamento no solo é análogo ao fosfato, uma vez que a sua semelhança química pode formar precipitações insolúveis com o ferro, alumínio e o cálcio (MARTINS; FIGUEIREDO, 2014).

Como é perceptível, diversos pontos no PARNA das Emas mostraram alterações de Cd (P4 8,32 mg/Kg<sup>-1</sup>; P11 2,10 mg/Kg<sup>-1</sup>; P13 6,39 mg/Kg<sup>-1</sup>; P22 7,06 mg/Kg<sup>-1</sup>; P23 6,08 mg/Kg<sup>-1</sup>) enquanto os pontos de uso agrícola foram os que mais contribuíram para os maiores resultados (P1 3,45 mg/Kg<sup>-1</sup>; P6 8,32 mg/Kg<sup>-1</sup>; P8 0,89 mg/Kg<sup>-1</sup>; P15 8,31 mg/Kg<sup>-1</sup>; P28 7,48 mg/Kg<sup>-1</sup>). Com exceção do P8 que resultou em valor de prevenção, os demais, tanto em área agrícola, quanto no interior do PARNA resultaram em valores de investigação segundo Resolução CONAMA n.º 460 de 2013 e CETESB, 2014. Os resultados são superiores aos apresentados por Campos et al., (2003) que trabalharam com 19 tipos de Latossolos e encontraram níveis de Cd (0,66 mg/Kg<sup>-1</sup>), superiores aos relatados por Mineropar (2005) e Paye et al., (2010) no Espírito Santo.

Segundo a USEPA (1999), dentre os principais fertilizantes utilizados em áreas agrícolas, o fosfato é o adubo que possui os maiores níveis de metais tóxicos (especialmente Cd), seguido por adubos nitrogenados e potássicos (GONÇALVES JR et al., 2015).

É importante salientar que os solos que são derivados de rochas básicas, especialmente as máficas, como o basalto na região de análise, apresentam uma elevada concentração de metais, em comparação com as rochas sedimentares e ígneas ácidas cristalinas (PAYE et al., 2010).

Em relação aos resultados dos radionuclídeos (<sup>40</sup>K pct, <sup>238</sup>U ppm e <sup>232</sup>Th ppm), os mesmos foram convertidos para Bq Kg<sup>-1</sup> segundo os fatores de conversão da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), com intuito de facilitar a comparação com dados de outras pesquisas no âmbito nacional, quanto internacional (IAEA, 2003).

A média dos radionuclídeos de <sup>40</sup>K e <sup>238</sup>U não se ajusta às encontradas na pesquisa realizada no estado de Goiás por GUIMARAES; HAMZA; SILVA, (2013) que apresentaram valores elevados de <sup>40</sup>K entre 219±406,9 Bq kg<sup>-1</sup>; valores baixos de <sup>238</sup>U 7,4±24,7 Bq kg<sup>-1</sup>; e <sup>232</sup>Th 16,24±73,6 Bq kg<sup>-1</sup> a máxima condiz com esse trabalho. Já o

$^{232}\text{Th}$ , a menor média encontrada por esses autores, é semelhante a essa pesquisa. Segundo os valores de referência do trabalho de Bocardi, (2019), no geral, os valores dos pontos de amostragem tanto de áreas naturais, quanto de uso agropecuário da área de pesquisa ficaram à cima do limite encontrado pela autora, principalmente para o  $^{238}\text{U}$ , seguido do  $^{40}\text{K}$  e depois pelo  $^{232}\text{Th}$ . Sendo que os pontos das áreas da Formação Vale do Rio do Peixe (P3, P12, P18 e P26), que fazem parte dos Neossolos Quartzarênicos apresentaram valores à baixo da autora.

A concentração de  $^{40}\text{K}$  nas áreas agrícolas foi de 0,025 a 0,313 pct (7,851 a 100,315 Bq kg<sup>-1</sup>) na pastagem, entre 0,035 e 0,098 (10,920 a 49,315 Bq kg<sup>-1</sup>), enquanto nas áreas de vegetação permanente foi de 0,074 a 0,308 (23,075 a 96,470 Bq kg<sup>-1</sup>). As concentrações de  $^{40}\text{K}$  foram menores nas áreas de pastagem e vegetação natural, o que pode ser atribuído ao fato de os solos do cerrado serem altamente intemperizados, terem pH ácido, conterem um elevado teor de alumínio e apresentarem baixa disponibilidade de nutrientes, como o potássio, principalmente nos solos derivados de rochas areníticas e quartzíticas.

A concentração média de  $^{238}\text{U}$  foi de 5,11 ppm (o que equivale a 47,596 Bq Kg<sup>-1</sup>), sendo na área agrícola encontrados valores entre (32,096 a 123,507 Bq Kg<sup>-1</sup>), pastagem (5,370 a 46,430 Bq Kg<sup>-1</sup>), área de vegetação nativa do cerrado (10,085 a 120,611 Bq Kg<sup>-1</sup>). No geral a média é superior aos valores encontrados nos estudos de solos de Minas Gerais (Peixoto et al 2013). Em estudos realizados nos solos do Paraná (MINEROPAR, 2005; BOCARDI, 2019), São Paulo (HIROMOTO et al 2013) e Turquia (CANBAZOGLU et al, 2013), a concentração média de  $^{238}\text{U}$  é inferior a 30 Bq Kg<sup>-1</sup>, sendo que na área de estudo, 2,9% das amostras encontram-se nesta faixa, enquanto 97,1% apresentam valores superiores. Conforme Kabata-Pendias (2000), a concentração de urânio em solos varia de 9,796 Bq Kg<sup>-1</sup> a 136,0 Bq Kg<sup>-1</sup>.

Em relação ao radionuclídeo  $^{232}\text{Th}$ , verificou-se que as concentrações variam de 3,082 a 80,829 Bq Kg<sup>-1</sup>, sendo nas áreas de cerrado teve variação de 3,082 a 80,829 Bq Kg<sup>-1</sup>, pastagem 3,755 a 31,007 Bq Kg<sup>-1</sup> e áreas agrícolas 3,110 a 59,301 Bq Kg<sup>-1</sup> o que é inferior (em 94.4% das amostras) em relação aos valores médios encontrados em estudos realizados no Rio de Janeiro (RIBEIRO et al, 2018), Minas Gerais (PEIXOTO et al, 2013) e Itália (TOSITTI et al, 2016).

No entanto, os valores dos pontos 5 (78,642 Bq Kg<sup>-1</sup>), ponto 15 (59,301 Bq Kg<sup>-1</sup>), ponto 20 (57,879 Bq Kg<sup>-1</sup>) e ponto 23 (80,829 Bq Kg<sup>-1</sup>) podem ser considerado elevado

em comparação com os valores médios encontrados nos estudos realizados no Paraná (MINEROPAR, 2005), São Paulo (HIROMOTO, et al 2010) Egito (UNSCEAR, 2000) e Turquia (CANBAZOGLU et al 2013). Conforme estudo realizados por diferentes pesquisadores (KABATA-PENDIAS, 2000; BOCARDI, 2019). Durante o avanço da pedogênese, o  $^{232}\text{Th}$ , por apresentar baixa mobilidade, pode ser adsorvido por argilominerais, óxidos e hidróxidos de Fe, Al (PEIXOTO et al., 2016).

Solos que se originam da decomposição de rochas máficas, como o gabro e o basalto, tendem a apresentar uma menor concentração de  $^{232}\text{Th}$  em relação a solos com elevado teor de sílica (como aqueles derivados de rochas félsicas). Esse fato pode ser considerado uma justificativa para a maior concentração detectada no ponto 23, uma vez que o tipo de solo no local é o LVw, com textura franco-argilosa-arenosa, argila 26%, areia 69% e pH 4,2.

Considerando-se os solos analisados e suas respectivas texturas, os solos franco-arenosos, areia franca e arenoso, apresentaram concentrações de urânio entre 5,084 Bq  $\text{Kg}^{-1}$  e 11,904 Bq  $\text{Kg}^{-1}$ , enquanto os solos muito argilosos e argilosos apresentaram concentrações entre 31,992 e 123,504 Bq  $\text{Kg}^{-1}$ . A alta concentração (123,504 Bq  $\text{Kg}^{-1}$ ) observada no ponto de amostragem 14, pode estar relacionada à adsorção do  $^{238}\text{U}$  na argila (74.8%), uma vez que cátions radioativos se fixam preferencialmente, em minerais de argilas (BECEGATO e FERREIRA, 2005; PEIXOTO et al 2016), o que corrobora com os resultados obtidos no presente trabalho.

As maiores concentrações foram verificadas em áreas agrícolas, solos com textura franco-arenosa e argilosa, o que foi comprovado em outros estudos que demonstraram que áreas com influências antrópicas, como os solos agricultáveis apresentam um aumento nos teores de radionúclídeos, fato este atribuído ao uso de fertilizantes com diferentes composições de nitrogênio, fósforo e potássio em suas formulações (BECEGATO et al 2008).

Em geral, é possível notar que os aspectos químicos, mineralógicos e biológicos do solo influenciam a mobilidade dos radionúclídeos, pois solos com maior concentração de argilas e matéria orgânica tendem a adsorver o ( $^{40}\text{K}$ ), urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e tório ( $^{232}\text{Th}$ ). A bioacumulação dos radionúclídeos  $^{238}\text{U}$  e  $^{40}\text{K}$ , pode estar relacionada ao uso agrícola da região, uma vez que, o uso de fertilizantes se torna indispensável por repor os nutrientes naturais do solo perdidos pelo desgaste ou erosão. As fórmulas de fertilizantes NPK são compostas, basicamente, por nitrogênio, potássio e fósforo (SAUEIA, 1998; BECEGATO et al., 2019).

## 5. CONCLUSÃO

Verificou-se que a classe de solo que apresentou maiores médias dos ETPs (Cu, As, Ni, Pb e Cd) e radionuclídeos ( $^{40}\text{K}$  e  $^{232}\text{Th}$ ) é a classe do LATOSSOLO Vermelho-Distrófico. Já a classe dos LATOSSOLOS VERMELHO-Ácrico apresentou os maiores valores de MO, CO, Ca, Zn e  $^{238}\text{U}$ . As demais classes de solos como o Gleissolo, Organossolo e Neossolo Quartzarênico apresentaram médias inferiores, até mesmo por se tratar de solos que apresentam maiores concentrações de areia em sua estrutura.

Em relação aos padrões legais do CONAMA e Cetesb os elementos (Zn, Cu, Ni e Pb), estão dentro dos limites de solos com qualidade. Mas, com base nas referências utilizadas, e valores de pontos de amostragem em agrícolas, como o P6 apresentou maior resultado de Zn, Cu e Pb, indicam que são elementos que precisam de uma investigação melhor na região, pois o uso contínuo de áreas revertidas para o setor agropecuário, tendem a aumentar por bioacumulação os níveis desses elementos no solo. Ou mesmo, os níveis dessas Resoluções não conferem com a realidade da região em questão. Já os ETPs As e Cd demonstraram que, segundo essas Resoluções, na área da pesquisa, existem áreas no interior do PARNA das Emas que estão classificados como pontos de investigação (P4, P7, P11, P13, P17, P22 e P23). Em relação aos valores de referência de Bocardi (2019) para os radionuclídeos, foi possível observar que o  $^{238}\text{U}$  apresentou à cima do limite em todos os pontos das classes de solos (LVw, LVA, LVd, GM e OX), o  $^{40}\text{K}$  apresentou à cima do valor de referência nas áreas de (LVw, LVd, GM e OX). Já o  $^{232}\text{Th}$  poucos pontos apresentaram à cima do limite, mas estão entre os LVw, LVd e OX). Os pontos de amostragem dos solos derivados do RQ apresentaram níveis muito baixos, provenientes da concentração alta de areia na sua estrutura.

Este capítulo demonstra que as áreas de Cerrado, especialmente as áreas de chapadões, que fazem parte do Planalto Central brasileiro, necessitam de Valores de Referência que estejam de acordo com a realidade da região, uma vez que as Resolução CONAMA n. 460 de 2013 e CETESB, 2014 foram criadas com valores gerais. No entanto, os valores encontrados nas áreas do PARNA das Emas podem ser usados em outros trabalhos acadêmicos, uma vez que são pontos de amostragem em área totalmente protegida, já que não há valores de referência nem de *background*.

Em geral, quando comparados os valores da área natural com os valores da área antrópica, os impactos mais significativos são em áreas agrícolas, que correspondem as áreas de soja quanto de milho. Essas culturas podem ter a capacidade de acumular metais

pesados, como Pb, Hg, Cd e As, adsorvidos pelas raízes da planta e acumulados em diferentes partes, incluindo as sementes. A contaminação pode representar um risco para a saúde humana e animal. Já que os fertilizantes podem contribuir para a concentração de ETPs e de elementos radiogênicos no solo, dependendo de origem e composição química. Alguns desses fertilizantes, como o cloreto de potássio, podem conter pequenas quantidades de  $^{40}\text{K}$  e o  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . É relevante salientar que os órgãos reguladores de diferentes países estabelecem limites e diretrizes para a concentração desses elementos em fertilizantes e produtos agrícolas, para assegurar a segurança alimentar e a proteção da saúde humana. Sendo assim, é recomendável o uso de fertilizantes de origem confiável e conforme as regulamentações locais, além da adoção de boas práticas agrícolas para minimizar a contaminação do solo.

## CAPITULO 3- CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS E RADIONUCLÍDEOS NOS COMPARTIMENTOS AMBIENTAIS DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO PARQUE NACIONAL DAS EMAS

### Resumo

O objetivo principal deste trabalho é demonstrar quais Compartimentos Ambientais (CA) têm maior impacto no enriquecimento no solo a partir dos Elementos Potencialmente Tóxicos-ETPs (Zn, Cu, As, Ni, Pb e Cd) e radionuclídeos ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) e quais CA apresentam semelhanças entre si. Para tal, utilizou-se os valores de ETPs fornecidos pela Resolução CONAMA n.460 e Cetesb (2004), radionuclídeos do trabalho desenvolvido por Bocardi (2019) e análise de Componentes Principais (PCA). Ao comparar os resultados de ETPs dos CA com a Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014) e os elementos radiogênicos com o trabalho de Bocardi (2019) é possível verificar que os elementos que apresentaram maiores problemas foram os ETPs As e Cd, que resultaram em valores de investigação nas áreas que o uso são para agricultura nos CA-2 e CA-3. No CA-4 todos os pontos resultaram em valores de investigação para As e Cd, tanto em áreas agrícolas, quanto no PARNA das Emas. Já o CA-5 exibiram valores de investigações para os ETPs As e Cd nos pontos no interior do PARNA das Emas e no CA-6 o P11 que está na área da UC apresentou valor de investigação para As e valor de prevenção para Cd. O CA-7 e 8 resultou em valor de prevenção para As e valor de investigação para Cd, ambos CA foram em áreas agrícolas. A PCA mostrou que CA distintos podem ter a mesma resposta em relação na espacialização dos elementos, como os CA 8, 7 e 6 do grupo 3, que têm as mesmas características devido à formação geológica do Vale do Rio do Peixe, que vai dar origem aos solos mais arenosos da região, sendo os CA com menores problemas enquanto a adsorção dos elementos. O grupo 4 também reuni pontos que apresentam maiores porcentagem de areia em sua estrutura e os grupos 1 e 2 reuni apresentam uma maior concentração de argila e MO em sua estrutura. São pontos que apresentam influência principalmente das Coberturas Detrito-Laterítica. Através dos *outliers*, a PCA conseguiu constatar que existem CA (4, 2 e 1) que foram enriquecidos com P, Ca, Mg, além de ETPs e radionuclídeos provenientes do manejo das áreas agrícolas. Dessa forma, são CA diferentes que apresentam a mesma resposta em relação ao tipo de uso em questão. Esses pontos fazem parte das áreas de chapadões do Brasil Central, convertidas em extensas áreas de monocultura da sola, milho, cana-de-açúcar e algodão ao longo nos últimos 50 anos. Dessa forma, a PCA foi crucial para demonstrar, sobretudo, esses pontos que se distanciam radicalmente dos outros.

**Palavras-chave:** Compartimento Ambiental, qualidade dos solos, elementos potencialmente tóxicos, radionuclídeos e análise dos componentes principais.

### Abstract

The main objective of this work is to demonstrate which Environmental Compartments (AC) have the greatest impact on soil enrichment from Potentially Toxic Elements-ETPs (Zn, Cu, As, Ni, Pb and Cd) and radionuclides ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) and which CAs are similar to each other. For this purpose, the values of ETPs provided by CONAMA Resolution n.460 and Cetesb (2004), radionuclides from the work carried out by Bocardi (2019) and Principal Component Analysis (PCA) were used. When comparing the results of the ETPs of the CAs with Resolution CONAMA n.460/2013 and Cetesb (2014) and the radiogenic elements with the work of Bocardi (2019), it is possible to verify that the elements that presented the greatest problems were the ETPs As and Cd, which resulted in investigation values in the areas that are used for agriculture in CA-2 and CA-3. In CA-4, all points resulted in investigation values for As and Cd, both in agricultural areas and in PARNA das Emas. CA-5, on the other hand, showed investigation values for ETPs As and

Cd at the points inside the PARNA das Emas and in CA-6, P11, which is in the UC area, presented investigation value for As and prevention value for Cd. CA-7 and 8 resulted in prevention value for As and investigation value for Cd, both CA were in agricultural areas. The PCA showed that different CAs can have the same response in relation to the spatialization of the elements, such as CA 8, 7 and 6 of group 3, which have the same characteristics due to the geological formation of the Vale do Rio do Peixe, which will give rise to the more sandy soils of the region, being the CA with less problems regarding the adsorption of the elements. Group 4 also gather points that have a higher percentage of sand in their structure and groups 1 and 2 gather have a higher concentration of clay and OM in their structure. These are points that are mainly influenced by the Detritic-Lateritic Coverings. Through the outliers, the PCA was able to verify that there are CA (4, 2 and 1) that were enriched with P, Ca, Mg, in addition to ETPs and radionuclides from the management of agricultural areas. Thus, they are different CAs that present the same response in relation to the type of use in question. These points are part of the plateau areas of Central Brazil, converted into extensive areas of monoculture of sole, corn, sugar cane and cotton over the last 50 years. In this way, the PCA was crucial to demonstrate, above all, those points that are radically different from the others.

**Keywords:** Environmental Compartment, soil quality, potentially toxic elements, radionuclides and principal component analysis.

## 1. INTRODUÇÃO

O Cerrado, sozinho, ocupa um quarto do território brasileiro e, na sua maioria, é composto por solos ácidos, profundos e altamente intemperizados, como os Latossolos. Isso se deve à sazonalidade climática da região, com o verão mais chuvoso e inverno mais seco (PROCÓPIO; BARRETO, 2021). Essa característica climática tem um impacto significativo na formação e estruturação dos solos com elevado grau de intemperismo, baixa reserva de nutrientes, elevada adsorção de fósforo e baixa capacidade de troca catiônica (CTC). Além disso, as elevadas temperaturas podem interferir na diminuição da quantidade de água e matéria orgânica no solo (MO) (PROCÓPIO; BARRETO, 2021; TAVARES; MOURA; AMORIM, 2022) e no geral, apresentam elevada acidez e uma alta saturação.

Dado que esses fatores contribuem para a limitação da produção agrícola no Cerrado brasileiro, uma das técnicas de manejo mais difundidas na literatura sobre o plantio em áreas de Cerrado é a calagem, que neutraliza a acidez do solo, fornece cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e melhora o ambiente radicular da planta (CARNEIRO et al., 2018) e a adubação fosfatada, devido à baixa concentração de P e à sua interação com o solo. Nos últimos 50 anos, foram usadas diversas técnicas de manejo no Cerrado para aperfeiçoar e aumentar a produtividade agrícola, incluindo a utilização de plantio direto, ou a interação da cultura de grãos com a pecuária de corte durante a estiagem, de modo a melhorar a eficiência do controle de temperaturas, umidade e disponibilidade de MO e

carbono orgânico (CO) (BONFIM-SILVA et al., 2014; MORAES TAVARES et al., 2019).

Além das técnicas mencionadas, também são utilizados fertilizantes e defensivos agrícolas, que contém quantidades significativas de compostos químicos (Elementos Potencialmente Tóxicos-ETPs) e radionuclídeos, como  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ , e  $^{232}\text{Th}$ , o que pode causar a poluição do meio ambiente, uma vez que são tóxicos e radioativos, que aumentam acima dos níveis normais em associação com as atividades antrópicas (BAGHDADY; AWAD; GAD, 2018; BECEGATO et al., 2019).

A Organização das Nações Unidas (ONU) reconheceu, em 2015, a importância do solo como recurso para a sustentabilidade da vida e estabeleceu o Ano Internacional dos Solos. No Brasil, a legislação sobre o uso e conservação de solos agrícolas está dispersa em diversas leis ordinárias e decretos regulamentadores, os quais, muitas vezes, não foram implantados de forma completa no sistema jurídico, o que demonstra a deficiência e a dificuldade de acesso aos dados de solos no país.

A proteção dos solos está intimamente ligada à proteção das águas e do meio ambiente, uma vez que o equilíbrio ambiental entre os solos e as florestas é primordial para a manutenção da vida biológica, a produtividade agrícola mundial, a qualidade e a proteção das águas superficiais e subterrâneas, o armazenamento e reciclagem de nutrientes para as plantas e a proteção de sítios arqueológicos, uma vez que estão menos sujeitos a processos de degradação (BRASIL, 2009; BRASIL, 2013).

No estado de Goiás, não há um valor de referência para a qualidade dos solos (VRQS) como encontrado no estado de São Paulo, como apontado pela Cetesb (2004). Dessa forma, é crucial criar locais de referência para uma determinada região de análise, como as bacias hidrográficas da área de influência do Parque Nacional das Emas. Acreditamos que há uma crescente demanda por estudos de qualidade dos solos que analisem os teores dos ETPs e elementos radiogênicos em solos de vegetação natural do cerrado sem influência antrópica.

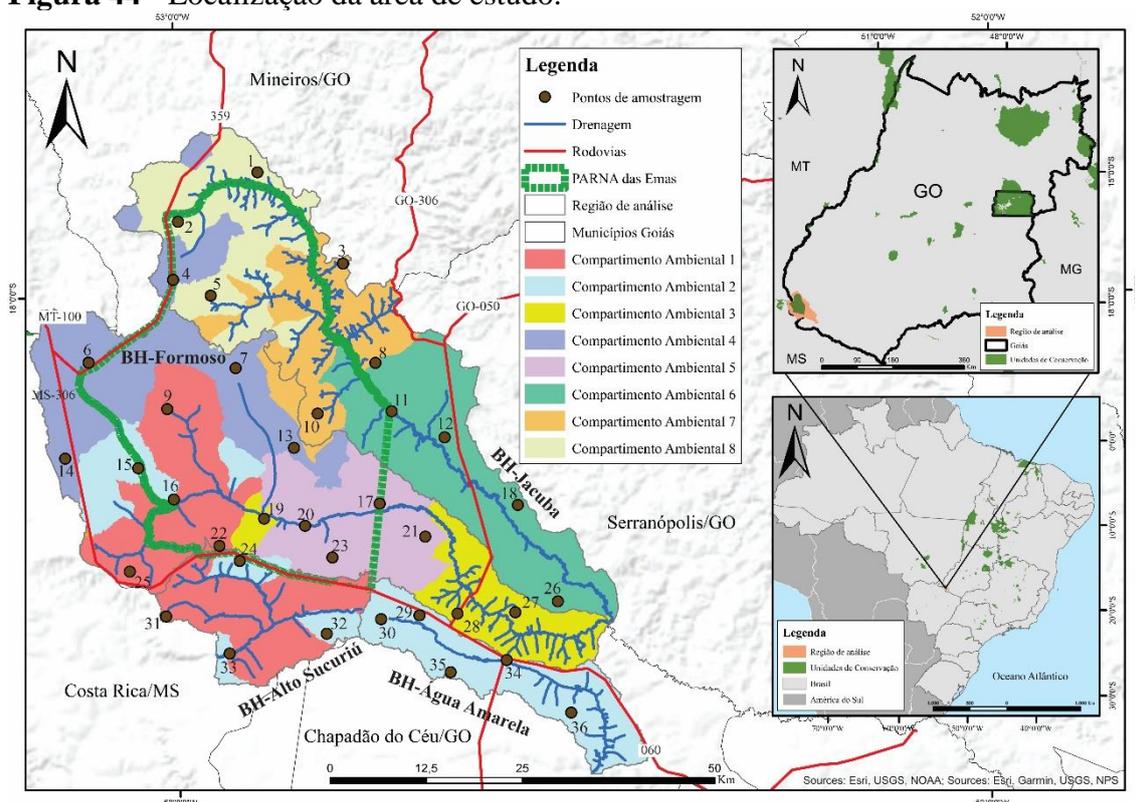
Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é demonstrar quais Compartimentos Ambientais têm maior impacto no enriquecimento no solo a partir dos ETPs (Zn, Cu, As, Ni, Pb e Cd) e radionuclídeos ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ). Para tal, utilizou-se os valores de ETPs fornecidos pela Resolução CONAMA n.460 e Cetesb (2004) e radionuclídeos do trabalho desenvolvido por Bocardi (2019).

## 2. MATERIAIS E MÉTODO

### 2.1. CARATERIZAÇÃO DA ÁREA

A região em questão está situada nas áreas do Planalto Central da bacia do Paraná no Sudoeste Goiano (ROSS et al., 2022), entre os estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. As bacias hidrográficas do rio Formoso, rio Jacuba, rio Alto-Sucuriú e rio Água-Amarela estão localizadas na área de influência do PARNA das Emas (Figura 44).

**Figura 44** - Localização da área de estudo.



**Base cartográfica:** Banco de Dados de Informações Ambientais-BDIA/IBGE/SIEG/SEPLAN/IMASUL/Forest-GIS.

**Projeção:** Sirgas\_2000\_UTM\_Zone\_22S.

**Org.:** Própria autora (2023).

O Planalto Central Brasileiro, que corresponde à área central do Cerrado, é uma massa de terra muito antiga e estável, onde o aplanamento e a erosão generalizadas permitiram o desenvolvimento de uma superfície lisa muito extensa como a região de análise (ROSS et al., 2022). É composta por sedimentos eólicos da Formação Botucatu e Vale do Rio do Peixe, Coberturas Detrito-Lateríticas, Coberturas Aluvionares e rochas basálticas da Formação Serra Geral que afloram das áreas de drenagem principal do rio Formoso e Jacuba, originando os solos denominados Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-

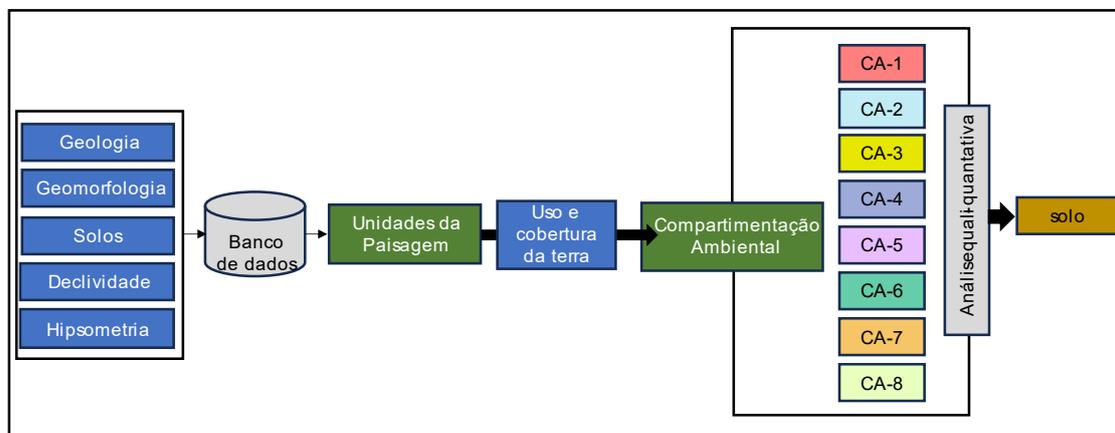
Distrófico, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Ácrico, Organossolos Hápicos, Gleissolos Plintossolos e Neossolos Quartzarênicos.

A região é classificada como clima tropical semiúmida, com verão chuvoso e inverno seco, com temperatura variando entre 22 °C – 24 °C (NOVAIS, 2019). O Chapadão Central é uma região que se tornou uma fronteira agrícola desde meados de 1973. A vegetação natural tem sido convertida em extensas áreas voltadas para o setor agropecuário, como a produção de soja, milho, algodão e cana-de-açúcar. Pode-se notar, em algumas áreas, a pecuária extensiva (principalmente em áreas de solos mais arenosos). A depender do clima da região, é possível obter até duas safras anuais de grãos (LIMA; DA ASSUNÇÃO; SCOPEL, 2019; RIBEIRO; FARIA; CEZARE, 2019).

## 2.2. ANÁLISE DOS COMPARTIMENTOS AMBIENTAIS

A partir da Compartimentação Ambiental da região em análise (Figura 45), os dados foram analisados de forma especializada e, posteriormente, foram submetidos a uma análise quali-quantitativa.

**Figura 45** – Fluxograma da análise dos ETPs e radionuclídeos à partir dos Compartimentos Ambientais.



**Legenda:** CA=Compartimento Ambiental.

**Org.:** Própria autora (2023).

## 3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

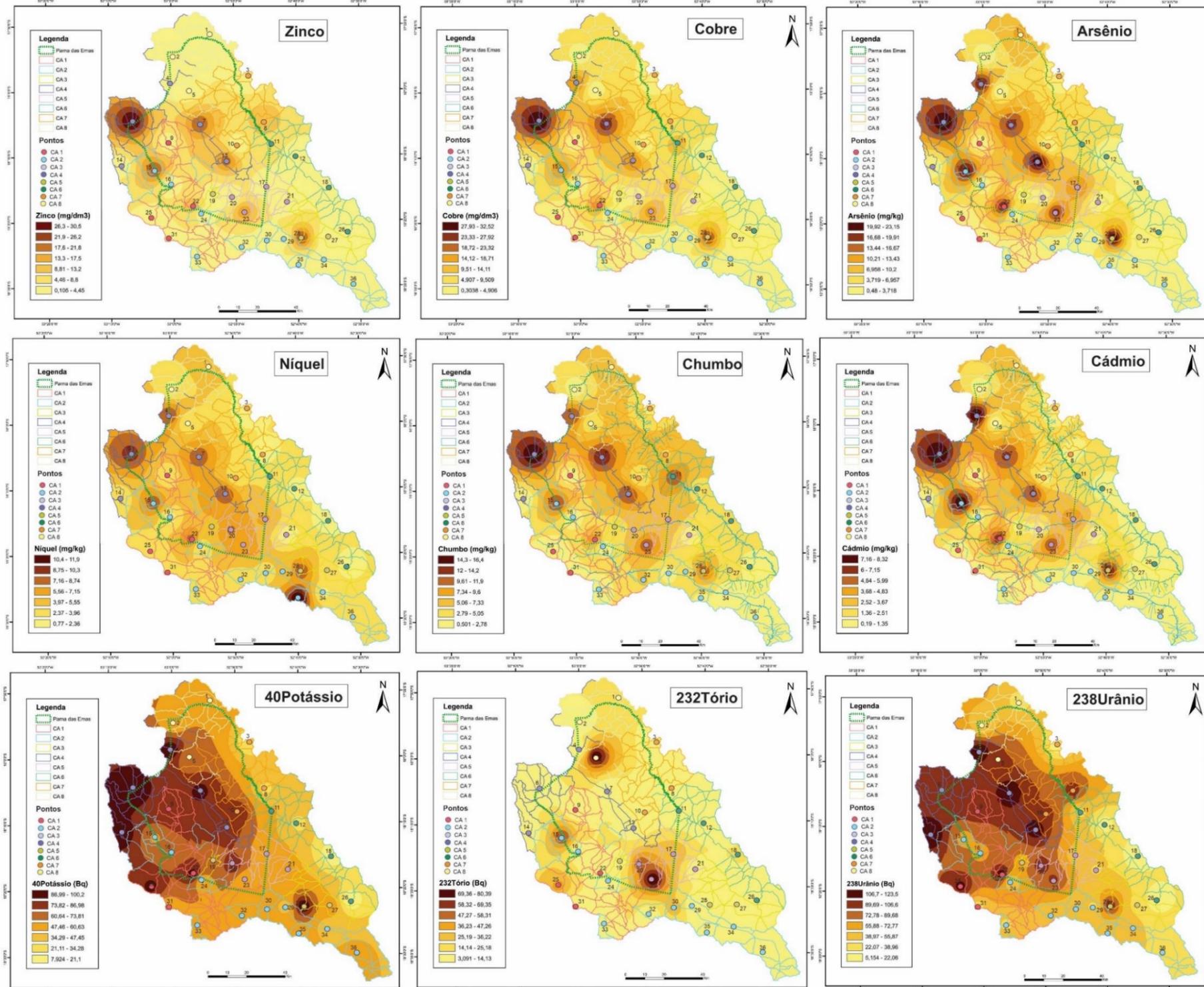
As distintas Unidades da Paisagem em bacias hidrográficas podem ser identificadas por meio de suas características físicas naturais, geologia, elementos do relevo (geomorfologia, hipsometria, declividade) e solo. Cada uma delas possui características únicas. A compreensão das diferentes áreas da paisagem em uma bacia

hidrográfica é crucial para a gestão e conservação dos recursos hídricos e da biodiversidade. A utilização de uma abordagem integrada de gestão dessas Unidades é fundamental para garantir a sustentabilidade e a saúde do ecossistema em toda a bacia hidrográfica.

Para tanto, o zoneamento dessas Unidades com base no Compartimento Ambiental reúne informações funcionais, estruturais e de uso e cobertura da terra das áreas fora do Parque Nacional das Emas, que são sub-representadas dentro do Parque, por isso, é fundamental entender a espacialização dos ETPs e radionuclídeos se faz importante na gestão ambiental e agrícola, permitindo compreender as características físicas e químicas do solo em diferentes áreas da bacia hidrográfica ou paisagem. Essa análise fornece informações essenciais para diversas finalidades, como planejamento do uso da terra, conservação, manejo sustentável dos recursos naturais e práticas agrícolas adequadas.

No geral, os CA que apresentaram menores resultados segundo o IDW representado na Figura 46, foram os CA 7, CA 6 e CA 8, respectivamente. São Compartimentos que tem como característica principal solos arenosos oriundos da Formação Vale do Rio do Peixe. Já o CA 4 apresentou as maiores concentrações dos elementos em análise, tanto dentro do Parque, quanto fora. Os solos desenvolvidos nesse Compartimento estão representados pelos Latossolo Vermelho Ácrico (LVw) de origem arenítica das Coberturas Detrito-Laterítica.

Figura 46 – Espacialização dos ETPs e elementos radionuclídeos.

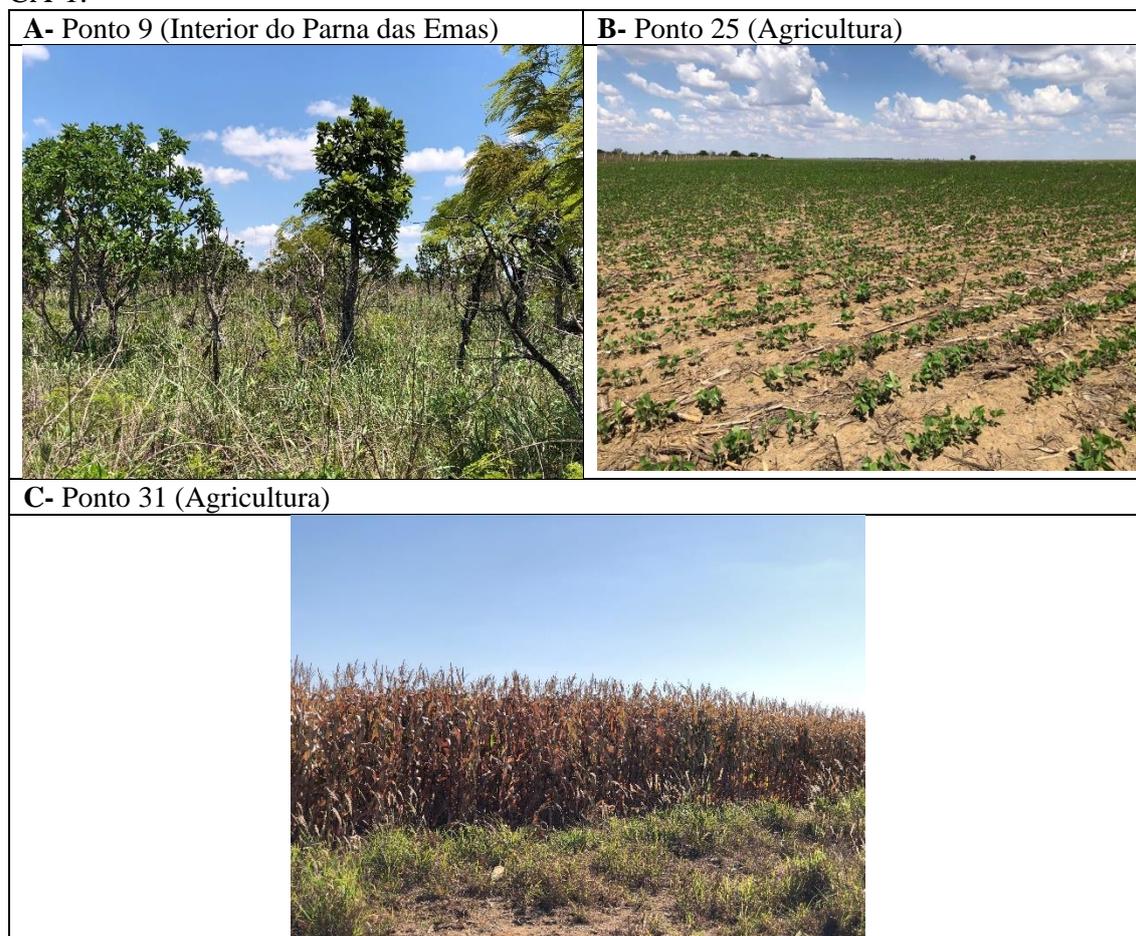


Base cartográfica: IBGE/SIEG/SEPLAN/IMASUL/Forest-GIS.  
 Projeção: Sirgas\_2000\_UTM\_Zone\_22S.  
 Org.: Própria autora (2023).

### 3.1 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 1 (CA-1)

Os pontos no CA-1 (Figura 47-A ponto 9; Figura 47-B ponto 25; Figura 47-C ponto 31) apresentam características texturais (argila, silte e areia) semelhantes (P9 argila 63,7 %, silte 15,5%, areia 20,8%; P25 argila 49,2%, silte 13,8%, areia 37%; P31 argila 58%, silte 12,42%, areia 29,58%). O ponto conservado (P9) está classificado como Latossolo Vermelho-Ácrico e de uso antrópico (P25 e P31) estão classificados como Gleissolo Melânico.

**Figura 47-** Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-1.



**Fonte:** Própria autora (2023).

Ao comparar área natural e uso antrópico é possível observar que houve uma diminuição da MO (P9-38,1 g/dm<sup>3</sup>; P25-33,9 g/dm<sup>3</sup>; P31-34,2 g/dm<sup>3</sup>), CO (P9-22,1 g/dm<sup>3</sup>; P25-19,66 g/dm<sup>3</sup>; P31-19,84 g/dm<sup>3</sup>), Al (P9-11,7 cmolc/dm<sup>3</sup>; P25-0 cmolc/dm<sup>3</sup>; P31-0 cmolc/dm<sup>3</sup>) e um aumento quando comparado ao Ca (P9-2 cmolc/dm<sup>3</sup>; P25-41 cmolc/dm<sup>3</sup>; P31-54 cmolc/dm<sup>3</sup>), Mg (P9-1 cmolc/dm<sup>3</sup>; P25-15 cmolc/dm<sup>3</sup>; P31-13 cmolc/dm<sup>3</sup>), P (P9-38,1 cmolc/dm<sup>3</sup>; P25-33,9 cmolc/dm<sup>3</sup>; P31-34,2 cmolc/dm<sup>3</sup>), Zn (P9-

38,1 cmolc/dm<sup>3</sup>; P25-33,9 cmolc/dm<sup>3</sup>; P31-34,2 cmolc/dm<sup>3</sup>), Cu (P9-38,1 mg/dm<sup>3</sup>; P25-33,9 mg/dm<sup>3</sup>; P31-34,2 mg/dm<sup>3</sup>), pH (P9-38,1 H<sub>2</sub>O; P25-33,9 H<sub>2</sub>O; P31-34,2 H<sub>2</sub>O) e Ni (P9-38,1 mg/kg<sup>-1</sup>; P25-33,9 mg/kg<sup>-1</sup>; P31-34,2 mg/kg<sup>-1</sup>). Em relação aos elementos radiogênicos o P25 obteve os maiores resultados.

Observando os valores dos ETPs entre os seguimentos (conservado, antrópico) do CA-1 com os valores estabelecidos pela Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014), observa que os resultados deram à baixo do limite estabelecidos por essa Resolução e Companhia que são (Zn-60 mg/kg<sup>-1</sup>; Cu-35 mg/kg<sup>-1</sup>; As-3,5 mg/kg<sup>-1</sup>; Ni-13 mg/kg<sup>-1</sup>; Pb-17 mg/kg<sup>-1</sup>; Cd <0,5). Os valores de <sup>40</sup>K (P9-84,413 Bq/kg<sup>-1</sup>; P25-90,457 Bq/kg<sup>-1</sup>; P31-49,699 Bq/kg<sup>-1</sup>) e <sup>238</sup>U (P9-94,883 Bq/kg<sup>-1</sup>; P25-110,918 Bq/kg<sup>-1</sup>; P31-32,096 Bq/kg<sup>-1</sup>) encontram-se à cima dos valores estabelecidos por BOCARDI (2019) que são <sup>40</sup>K 59,0 Bq/kg<sup>-1</sup> e <sup>238</sup>U 28,2 Bq/kg<sup>-1</sup> e os valores de <sup>232</sup>Th (P9-3,771 Bq/kg<sup>-1</sup>; P25-39,504 Bq/kg<sup>-1</sup>; P31-3,376 Bq/kg<sup>-1</sup>) ficaram à baixo do estabelecido pela a autora (<sup>232</sup>Th 47,6 Bq/kg<sup>-1</sup>).

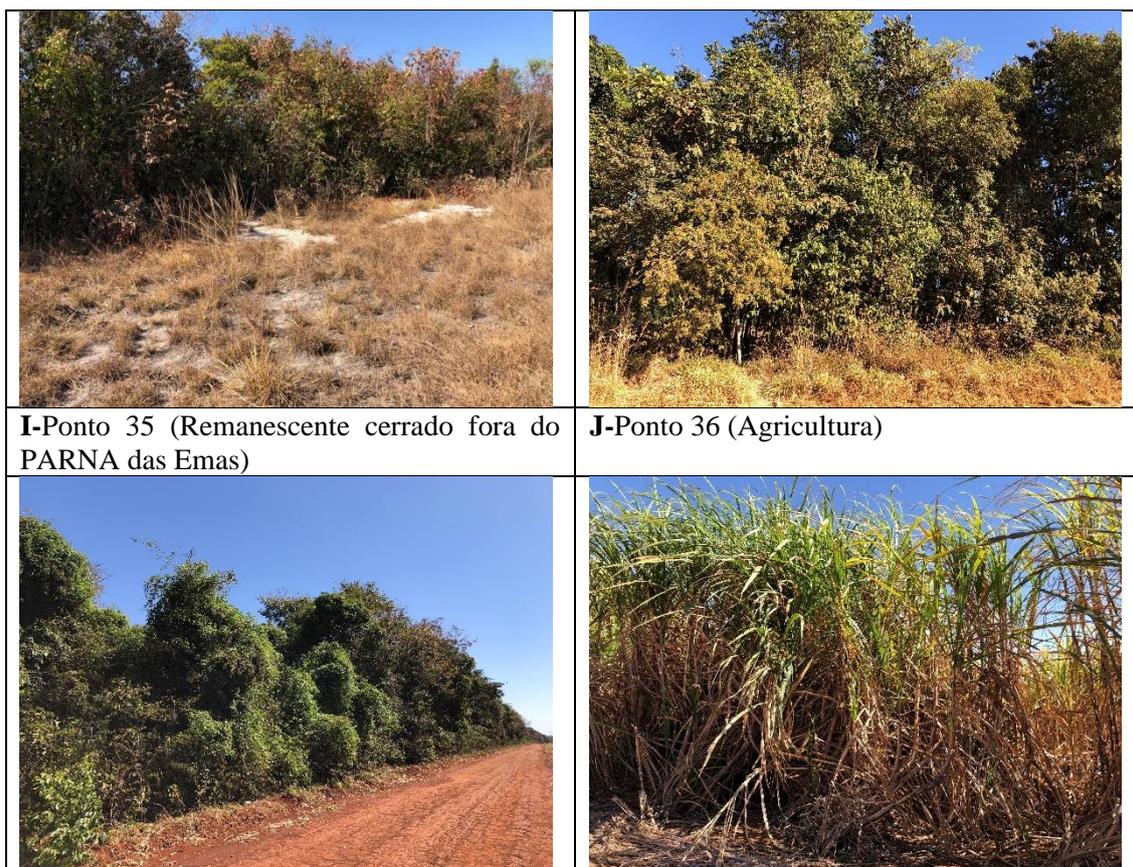
### 3.2 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 2 (CA-2)

Os pontos 15 (Figura 48-A), 16 (Figura 48-B), 24 (Figura 48-C), 29 (Figura 48-D), 30 (Figura 48-E), 32 (Figura 48-F), 33 (Figura 48-G), 34 (Figura 48-H), 35 (Figura 48-I) e 36 (Figura 48-J) fazem parte do CA-2. Ao comparar a espacialização dos dados desse CA observa-se que um ponto dentro do PARNA das Emas (P16 argila 36,30%, silte 13,30, areia 50,40%) é desproporcional à quantidade de pontos no segmento antrópico e os pontos que apresentam características granulométricas parecidas são os pontos 15 (argila 37%, silte 6, areia 57%) e ponto 34 (argila 34,83%, silte 6,61%, areia 58,56%), os demais são mais argilosos chegando a 79% de argila, por exemplo. Já o ponto 33 apresenta apenas 9% de argila por ser área de Organossolo (OX).

O P15 e P16 estão classificados como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e o P34 LATOSSOLO VERMELHO Ácrico (LVw), todos os três considerados como argilo-arenosa. O P34 em particular corresponde a um remanescente do cerrado fora do PARNA das Emas, que apresenta fitofisionomia distinta do ponto 16 (Figura 50-B), mas com características física, biológica parecida.

**Figura 48-** Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-2.

<b>A-Ponto 15 (Agricultura)</b> 	<b>B-Ponto 16 (Interior do Parna das Emas)</b> 
<b>C-Ponto 24 (Agricultura)</b> 	<b>D-Ponto 29 (Agricultura)</b> 
<b>E-Ponto 30 (Pastagem)</b> 	<b>F-Ponto 32 (Agricultura)</b> 
<b>G-Ponto 33 (Área de APP)</b>	<b>H-Ponto 34 (Remanescente cerrado fora do PARNA das Emas)</b>



**Fonte:** Própria autora (2023).

Os pontos 16 e 34 apresentaram características iguais em relação à MO, CO e pH (MO 33,9 g/dm<sup>3</sup>; CO 19,66 g/dm<sup>3</sup> e pH 4 H<sub>2</sub>O) e resultados mais elevados de Al (P16 11,40 cmolc/dm<sup>3</sup>; P34 6,60 cmolc/dm<sup>3</sup>) quando comparado ao P15 (0 cmolc/dm<sup>3</sup>). O P15 apresenta um menor valor quando comparado a MO (23,40 g/dm<sup>3</sup>), CO (13,60 g/dm<sup>3</sup>), P (2,40 cmolc/dm<sup>3</sup>) e principalmente a CTC (9,10 cmolc/dm<sup>3</sup>) e maiores valores dos elementos Ca (P16-2 cmolc/dm<sup>3</sup>; P34-2 cmolc/dm<sup>3</sup>; P15-3,77 cmolc/dm<sup>3</sup>), Zn (P16-0,2 cmolc/dm<sup>3</sup>; P34-0,3 cmolc/dm<sup>3</sup>; P15-22,48 cmolc/dm<sup>3</sup>), CU (P16-0,9 mg/dm<sup>3</sup>; P34-1 mg/dm<sup>3</sup>; P15-18,57 mg/dm<sup>3</sup>), pH (P15- 5,5 H<sub>2</sub>O), As (P16-0,5 mg/kg<sup>-1</sup>; P34-0,5 mg/kg<sup>-1</sup>; P15-21,11 mg/kg<sup>-1</sup>), Ni (P16-1,59 mg/kg<sup>-1</sup>; P34-1,89 mg/kg<sup>-1</sup>; P15-8,31 mg/kg<sup>-1</sup>), Pb (P16-0,5 mg/kg<sup>-1</sup>; P34-41 mg/kg<sup>-1</sup>; P15-12,41 mg/kg<sup>-1</sup>) Cd (P16-0,5 mg/kg<sup>-1</sup>; P34-0,5 mg/kg<sup>-1</sup>; P15-8,31 mg/kg<sup>-1</sup>). Os elementos radionuclídeos, com exceção do <sup>232</sup>Th foram maiores na área do PARNA também.

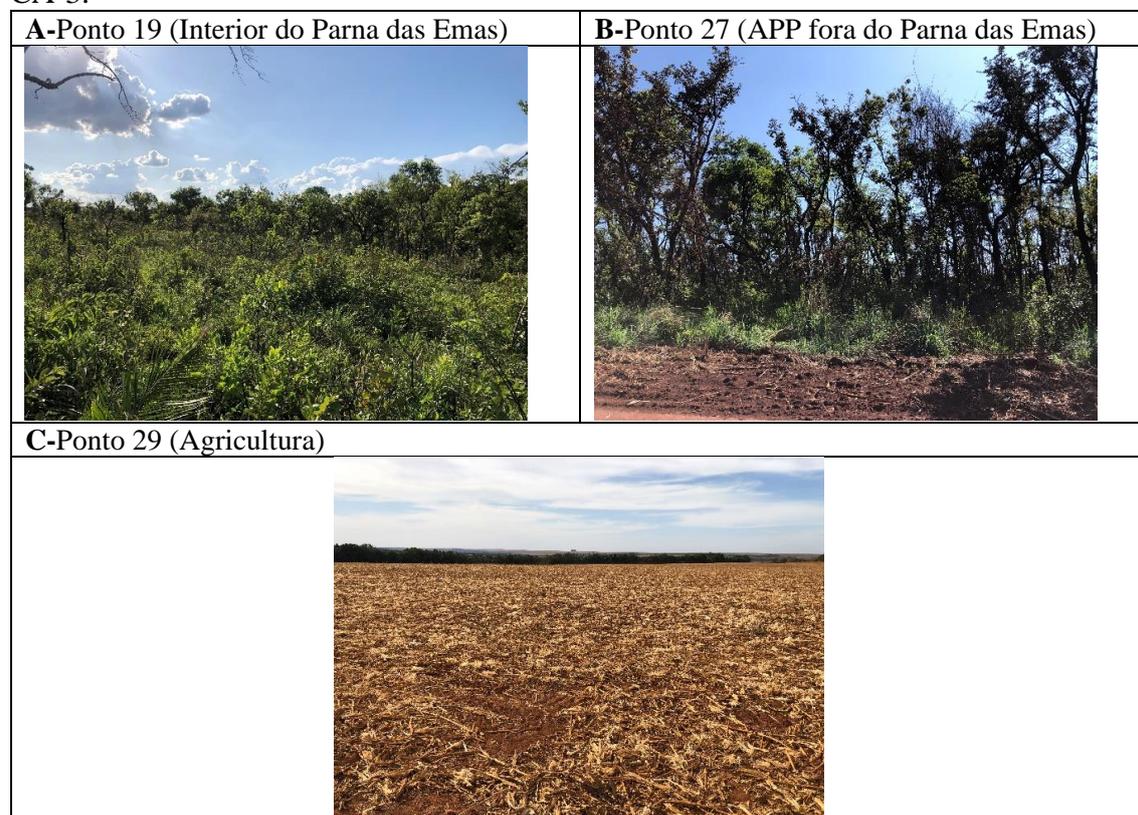
Os resultados de As (21,11 mg/kg<sup>-1</sup>) e Cd (8,31 mg/kg<sup>-1</sup>) do P15 do CA-2 que é uma área de atividade agrícola apresentou resultados à cima dos valores estabelecidos pela Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014), demonstrando que são valores que exigem investigação, pois indicam riscos potenciais à saúde humana.

Os valores de  $^{40}\text{K}$  67,252 Bq/kg<sup>-1</sup>,  $^{238}\text{U}$  66,631 Bq/kg<sup>-1</sup>,  $^{232}\text{Th}$  3,860 Bq/kg<sup>-1</sup>, no ponto 16,  $^{40}\text{K}$  57,987 Bq/kg<sup>-1</sup>,  $^{238}\text{U}$  65,743 Bq/kg<sup>-1</sup>,  $^{232}\text{Th}$  59,301 Bq/kg<sup>-1</sup> para o ponto 15 e  $^{40}\text{K}$  40,275 Bq/kg<sup>-1</sup>,  $^{238}\text{U}$  40,744 Bq/kg<sup>-1</sup>,  $^{232}\text{Th}$  3,190 Bq/kg<sup>-1</sup> no ponto 34. Os valores de  $^{40}\text{K}$  nos pontos 16 e 15 ultrapassaram o limite estabelecido por BOCARDI (2019), já o P34 apresentou resultado menor em relação à autora. Já os  $^{238}\text{U}$  para os 3 pontos de amostragem foram à cima encontram-se à cima dos valores estabelecidos por BOCARDI (2019) e os valores de  $^{232}\text{Th}$  deram à baixo da autora para todos os pontos de amostragem nesse CA.

### 3.3 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 3 (CA-3)

Os pontos de amostragem que fazem parte desse CA-3 (P19 Figura 49 A; P27 Figura 49 B; P29 Figura 49 C) estão caracterizados por LVd (P27 e P29) e Gleissolo Melânico-GM (P19). O P19 apresenta 50,60% de argila, 5% de silte e 34,60% e 36,6 g/dm<sup>3</sup> de MO. O P27 compreende 32,70% de argila, 13,10% de silte e 54,20% de areia e 31,2 g/dm<sup>3</sup> de MO. O P29 que é área de agricultura contém maior porcentagem de argila (69,63%), 7,95% de silte, 27,52% de areia e 32,70 g/dm<sup>3</sup> de MO.

**Figura 49-** Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-3.



**Fonte:** Própria autora (2023).

Todos os pontos apresentaram os mesmos valores de As e Cd ( $0,5 \text{ mg/kg}^{-1}$ ); A área dentro do PARNA das Emas apresentou maior resultado de Ni ( $5,13 \text{ mg/kg}^{-1}$ ), seguido do P29 ( $3,93 \text{ mg/kg}^{-1}$ ) e P27 ( $2,94 \text{ mg/kg}^{-1}$ ). Os valores de Pb foram maiores nas áreas de vegetação natural P19 ( $7,52 \text{ mg/kg}^{-1}$ ), P27 ( $3,47 \text{ mg/kg}^{-1}$ ), P29 ( $3,41 \text{ mg/kg}^{-1}$ ). Quando comparado aos valores estabelecidos pela Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014), os três pontos indicam valores de prevenção.

Os valores dos radionuclídeos  $^{40}\text{K}$   $66,423 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$   $64,083 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$   $3,199 \text{ Bq/kg}^{-1}$  no ponto 19,  $^{40}\text{K}$   $54,639 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$   $34,764 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$   $3,354 \text{ Bq/kg}^{-1}$  para o ponto 27 e  $^{40}\text{K}$   $40,868 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$   $3,186 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$   $3,600 \text{ Bq/kg}^{-1}$ , no ponto 29. Quando comparado aos valores de referência da BOCARDI (2019), mostra que todos os pontos apresentaram valores de  $^{38}\text{U}$  mais elevados,  $^{232}\text{Th}$  com valores mais baixos e  $^{40}\text{K}$  os pontos (19 e 27) mais altos que o trabalho da BOCARDI (2019) e P29 mais baixo.

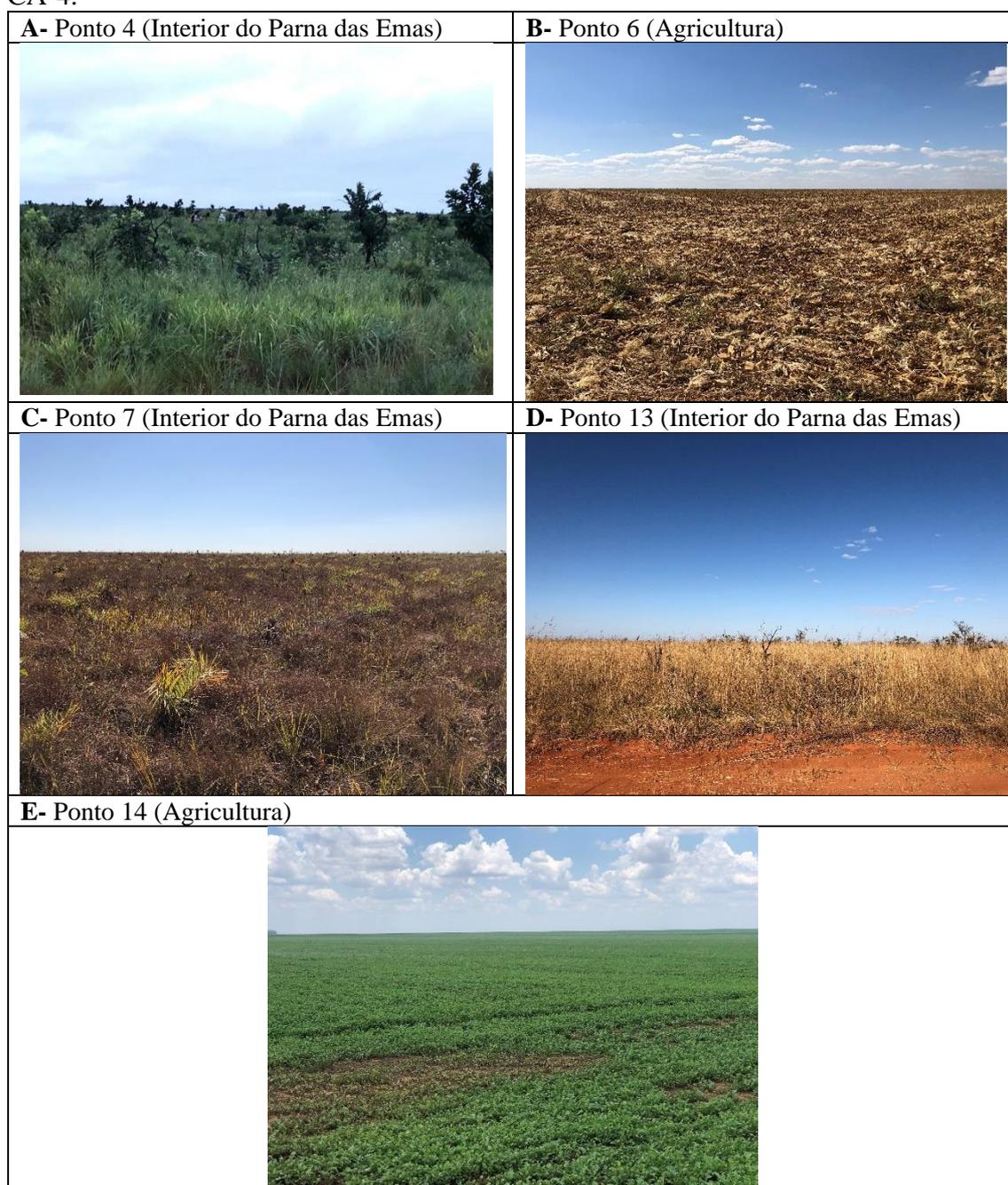
#### 3.4 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 4 (CA-4)

Os pontos do CA-4 (P4 Figura 50-A; P6 Figura 50-B; P7 Figura 50-C; P13 Figura 50-D) apresentam características texturais muito parecidas (P4 argila 64%, silte 17%, areia 29%; P6 argila 70%, silte 8%, areia 22%; P7 argila 70%, silte 8%, areia 20%; P13 argila 67%, silte 8%, areia 25% até mesmo a CTC (P4  $4,74 \text{ cmolc/dm}^3$ ; P6  $8,90 \text{ cmolc/dm}^3$ ; P7  $6,10 \text{ cmolc/dm}^3$ ; P13  $8,60 \text{ cmolc/dm}^3$ ). Fazem parte da classe dos LVw com textura muito argilosa, o que reflete na concentração de MO e CO dos pontos. A MO e CO apresenta mais elevada no P4 (MO  $36,60 \text{ g/dm}^3$ , CO  $21,20 \text{ g/dm}^3$ ) e P13 (MO  $35,80 \text{ g/dm}^3$ , CO  $20,80 \text{ g/dm}^3$ ). O P e os ETPs Zn, CU, Ni, Pb e Cd do P5 foram além dos pontos no interior do PARNA. Já o ETP Ar do P13 foi um pouco superior ao P5 e quando comparado aos valores estabelecidos pela Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014), mostram que os elementos de As e Cd indicam valores de investigação tanto para o ponto no interior do PARNA das Emas quanto para o P6 que é área de agricultura.

Ao observarem a Figura 46, os pontos do CA-4, foram que apresentaram maiores valores, como mencionados anteriormente. Os pontos 4, 7 e 13 no interior do PARNA das Emas se destacam nos valores altos de As (P4- $19,41 \text{ mg/kg}^{-1}$ ; P7- $17,88 \text{ mg/kg}^{-1}$ ; P13- $22,61 \text{ mg/kg}^{-1}$ ), Ni (P4- $8,76 \text{ mg/kg}^{-1}$ ; P7- $8,29 \text{ mg/kg}^{-1}$ ; P13- $8,65 \text{ mg/kg}^{-1}$ ), Pb (P4- $11,8 \text{ mg/kg}^{-1}$ ; P7- $13,78 \text{ mg/kg}^{-1}$ ; P13- $12,39 \text{ mg/kg}^{-1}$ ), e Cd (P4- $8,32 \text{ mg/kg}^{-1}$ ; P7- $6,29 \text{ mg/kg}^{-1}$ ; P13- $6,39 \text{ mg/kg}^{-1}$ ).

Os valores de  $^{40}\text{K}$  96,470 Bq/kg $^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$  120,611 Bq/kg $^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$  4,197 Bq/kg $^{-1}$ , no ponto 4,  $^{40}\text{K}$  97,426 Bq/kg $^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$  97,004 Bq/kg $^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$  3,211 Bq/kg $^{-1}$  no ponto 6,  $^{40}\text{K}$  91,074 Bq/kg $^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$  118,860 Bq/kg $^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$  4,130 Bq/kg $^{-1}$ , no ponto 7,  $^{40}\text{K}$  84,390 Bq/kg $^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$  119,807 Bq/kg $^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$  4,102 Bq/kg $^{-1}$  para o ponto 13 e. Os valores de  $^{40}\text{K}$  e  $^{238}\text{U}$  encontram-se muito à cima dos valores estabelecidos por Bocardi (2019) que são  $^{40}\text{K}$  59 Bq/kg $^{-1}$  e  $^{238}\text{U}$  28,2 Bq/kg $^{-1}$  principalmente os valores de  $^{238}\text{U}$  e os valores de  $^{232}\text{Th}$  deram a baixo da autora ( $^{232}\text{Th}$  47,06 Bq/kg $^{-1}$ ) para todos os pontos de amostragem nesse CA.

**Figura 50-** Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-4.

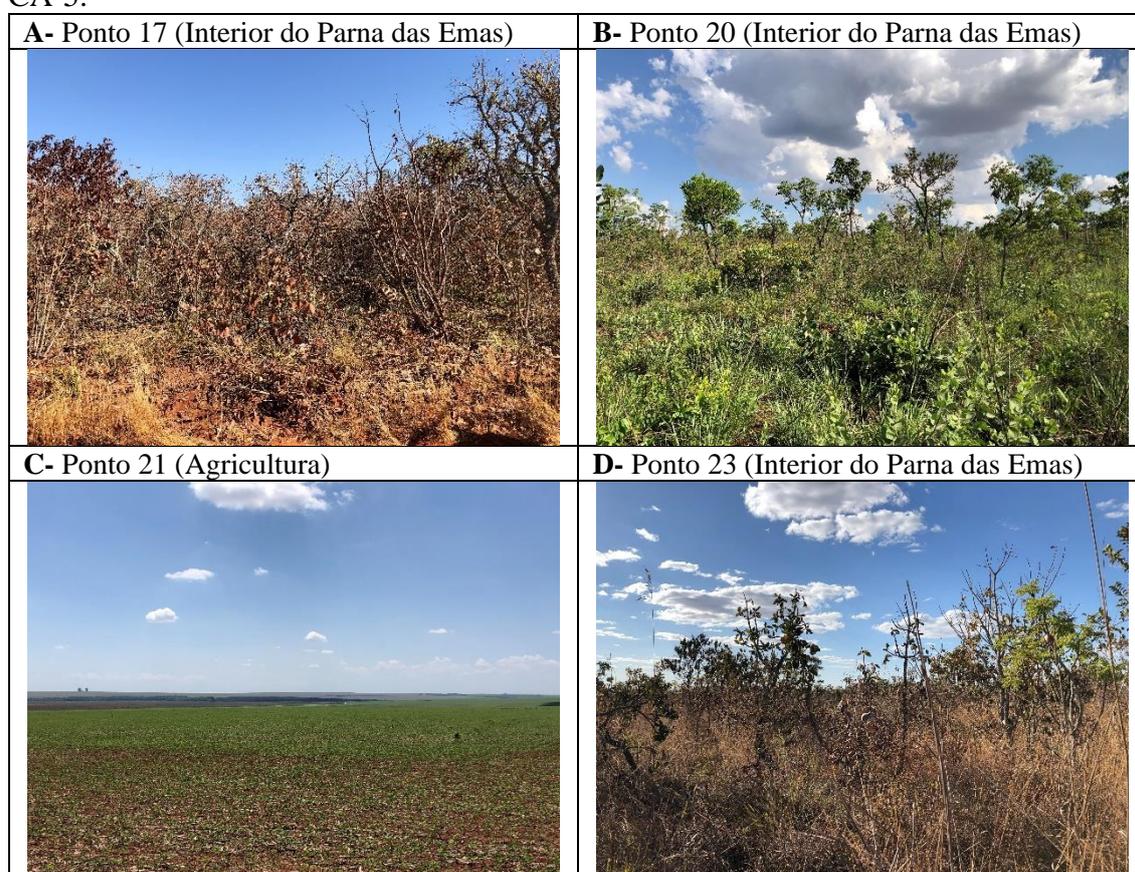


**Fonte:** Própria autora (2023).

### 3.5 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 5 (CA-5)

Na Figura 46 é possível identificar os pontos dentro do CA-5 (Figura 51-A ponto 17; Figura 51-B ponto 20; Figura 51-C ponto 21; Figura 51-D ponto 23). Os pontos 17 e 23 tem como característica solos de textura franco argiloso arenoso, todavia o P17 é LVd e P23 é LVw. O P20 que está no interior do PARNA é classificado como LVd e textura de argila e o P21 situado em área de agricultura tem como característica o OX e textura franco arenosa.

**Figura 51-** Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-5.



**Fonte:** Própria autora (2023).

Os ETPs Zn (P17-0,4 cmolc/dm<sup>3</sup>; P20-0,1 cmolc/dm<sup>3</sup>; P21-1,2 cmolc/dm<sup>3</sup>; P23-16,96 cmolc/dm<sup>3</sup>), CU (P17-10,89 mg/dm<sup>3</sup>; P20-2,1 mg/dm<sup>3</sup>; P21-1,2 mg/dm<sup>3</sup>; P23-16,96 mg/dm<sup>3</sup>), As (P17-14,05 mg/kg<sup>-1</sup>; P20-0,50 mg/kg<sup>-1</sup>; P21-18,25 mg/kg<sup>-1</sup>; P23-8,31 mg/kg<sup>-1</sup>), Pb (P17-1,59 mg/kg<sup>-1</sup>; P20-1,89 mg/kg<sup>-1</sup>; P21-8,31 mg/kg<sup>-1</sup>; P23-0,5 mg/kg<sup>-1</sup>) e Cd(P17-4,95 mg/kg<sup>-1</sup>; P20-0,5 mg/kg<sup>-1</sup>; P21-0,5 mg/kg<sup>-1</sup>; P23-6,08 mg/kg<sup>-1</sup>) foram maiores no P23 e Ni (P17-5,84 mg/kg<sup>-1</sup>; P20-7,46 mg/kg<sup>-1</sup>; P21-0,97 mg/kg<sup>-1</sup>; P23-7,18

mg/kg<sup>-1</sup>) foi maior no P20. Na média os solos no interior do PARNA foram mais elevados do que na área agrícola podendo ser explicado pela concentração de argila e MO nos pontos 20 (29,4 g/dm<sup>3</sup>) e 23 (34,8 g/dm<sup>3</sup>). Quando comparados aos valores estabelecidos pela Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014), os pontos 17 e 23 indicaram que os valores de As e Cd estão à cima do valor de investigação.

Os valores de <sup>40</sup>K 48,365 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>238</sup>U 48,766 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>232</sup>Th 34,384 Bq/kg<sup>-1</sup>, no ponto 17, <sup>40</sup>K 85,136 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>238</sup>U 99,584 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>232</sup>Th 57,879 Bq/kg<sup>-1</sup> para o ponto 20, <sup>40</sup>K 47,818 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>238</sup>U 93,132 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>232</sup>Th 80,829 Bq/kg<sup>-1</sup> no ponto 23 e <sup>40</sup>K 52,217 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>238</sup>U 37,234 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>232</sup>Th 3,667 Bq/kg<sup>-1</sup> no ponto 21. Os valores dos radionuclídeos <sup>40</sup>K e <sup>238</sup>U do ponto 20 encontram-se muito à cima dos valores estabelecidos por Bocardi (2019), já nos pontos 17 e 23, esses elementos encontram-se a baixo dos valores de referência da autora e os valores de <sup>232</sup>Th nos pontos 17 e 21 foram a baixo da média da Bocardi (2019), e os pontos 20 e 23 apresentam valores superiores da autora.

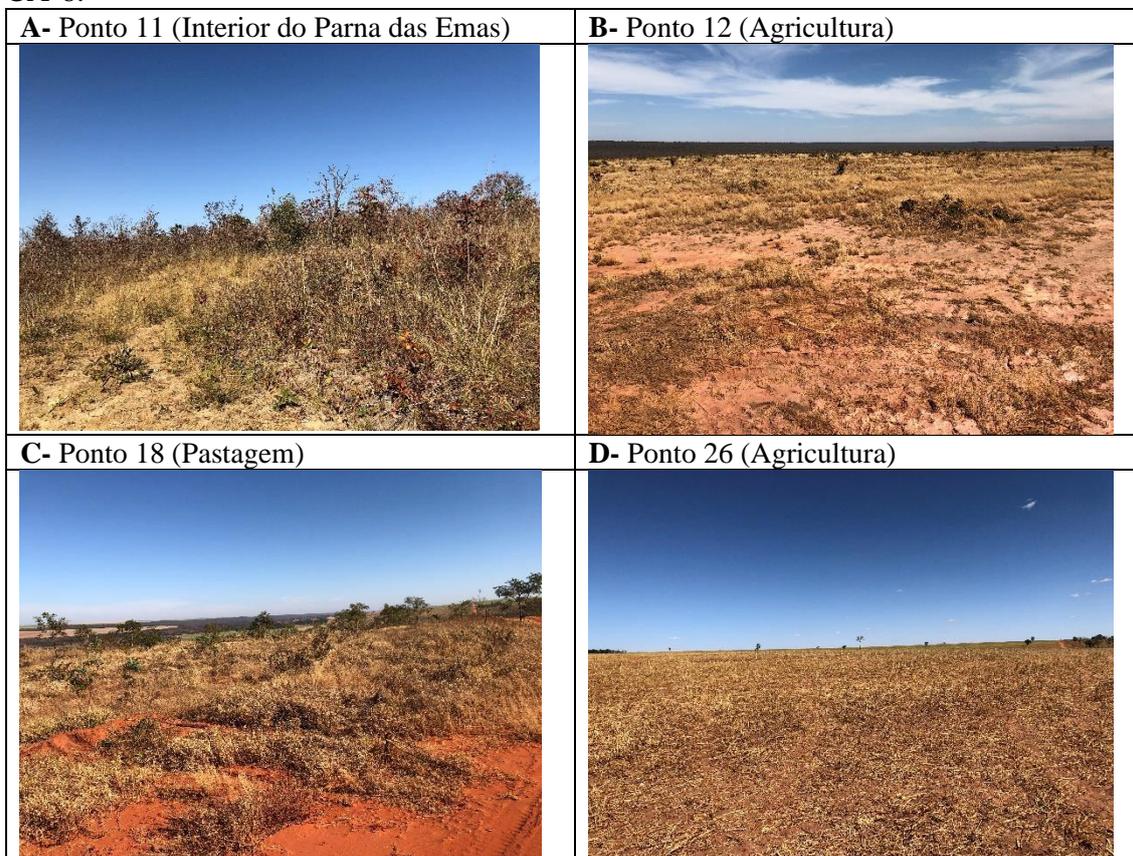
### 3.6 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 6 (CA-6)

O CA-6 está representado pelos pontos 11 (Figura 52 A), 12 (Figura 52 B), 18 (Figura 52 C) e 26 (Figura 52 D). Desses pontos os que apresentam semelhanças enquanto característica física são os pontos 11 e 26 que são de textura franco arenosa. O P11, classificado como Organossolo Háplico (OH) encontra-se dentro do PARNA das Emas num local que no período chuvoso fica alagado e P26 área de plantio classificado como RQ.

O P11 apresentou maiores resultados de MO (17,8%), CO (10,3 g/dm<sup>3</sup>), Al (0,81 cmolc/dm<sup>3</sup>), CTC (5,9 cmolc/dm<sup>3</sup>), Zn (7,99 cmolc/dm<sup>3</sup>), CU (11,99 cmolc/dm<sup>3</sup>), <sup>238</sup>U (35,594 Bq/kg<sup>-1</sup>), As (5,19 mg/kg<sup>-1</sup>), Ni (3,9 mg/kg<sup>-1</sup>), Pb (11,39 mg/kg<sup>-1</sup>) e Cd (2,1 mg/kg<sup>-1</sup>). Apesar de ser 2 pontos que seu solo é franco arenoso, ambos apresentam origem geológica distintas (ponto 11 Depósitos Aluvionares e ponto 26 Formação Vale do Rio do Peixe) podendo ter contribuído para a espacialização dos dados e quando comparado aos valores estabelecidos pela Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014), o P11 mostra que As (5,19 mg/kg<sup>-1</sup>) indica valor de prevenção e Cd (2,11 mg/kg<sup>-1</sup>) valor de investigação. Os valores de <sup>40</sup>K 47,721 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>238</sup>U 35,594 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>232</sup>Th 3,082 Bq/kg<sup>-1</sup> no ponto 11 e <sup>40</sup>K 7,851 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>238</sup>U 5,096 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>232</sup>Th 5,328 Bq/kg<sup>-1</sup> no ponto 26. Os valores de <sup>40</sup>K e <sup>232</sup>Th apresentaram valores inferiores ao trabalho de Bocardi (2019)

que é  $59,0 \text{ mg/kg}^{-1}$  e  $28,2 \text{ mg/kg}^{-1}$ , respectivamente e o  $^{238}\text{U}$  o P11 apresentou à cima do valor de referência ( $47,6 \text{ mg/kg}^{-1}$ ).

**Figura 52-** Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-6.



**Fonte:** Própria autora (2023).

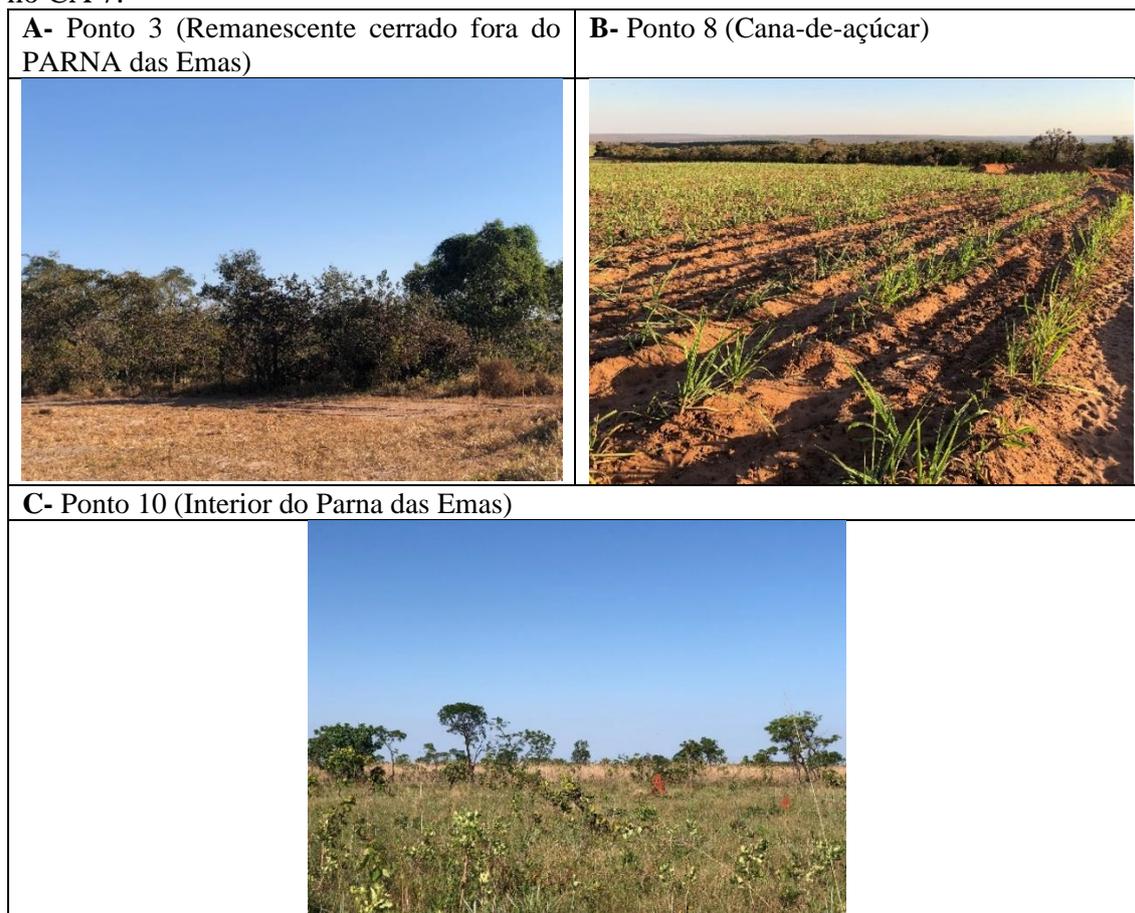
### 3.7 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 7 (CA-7)

O CA-7 está representado pelos pontos 10 interior do PARNA das Emas (Figura 53 C), ponto 3 em Área de Preservação Permanente (APP) fora do Parna (Figura 53 A) e ponto 8 em área de cultivo de cana-de-açúcar na (Figura 53 B).

O P10 quando comparado aos pontos de área de influência dos solos arenosos representados pelo Neossolo Quartzarênico (RQ), mostram valores mais elevados de MO ( $37,8\%$ ), CO ( $21,93 \text{ g/dm}^3$ ), Ca ( $2 \text{ cmolc/dm}^3$ ), Mg ( $1 \text{ cmolc/dm}^3$ ), Al ( $12,2 \text{ cmolc/dm}^3$ ), P ( $7 \text{ cmolc/dm}^3$ ), CTC ( $83 \text{ cmolc/dm}^3$ ), K ( $0,8 \text{ cmolc/dm}^3$ ),  $^{40}\text{K}$  ( $0,27 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ),  $^{232}\text{Th}$  ( $0,98 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ) e Ni ( $2,28 \text{ mg/kg}^{-1}$ ). Toda esses fatores estão diretamente relacionados com o teor de argila e MO do solo (BIONDI et al., 2011; HUGEN et al., 2013; PAVELHÃO, 2005). Uma vez que solos arenosos apresentam baixo percentual de MO, como observado no P3 em relação ao P8. Em solos arenosos destinados ao plantio (P8) durante o manejo

de preparo do solo é adicionado material orgânico para melhor aproveitamento dos nutrientes para a planta e os resultados de As ( $4,66 \text{ mg/kg}^{-1}$ ) e Cd ( $0,89 \text{ mg/kg}^{-1}$ ) desse ponto mostrou que indicam valores à cima do valor de qualidade segundo a Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014), no qual, As indica valor de prevenção e Cd valor de investigação.

**Figura 54** – Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA 7.



**Fonte:** Própria autora (2023).

Os radionuclídeos  $^{40}\text{K}$   $83,550 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$   $93,285 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$   $3,968 \text{ Bq/kg}^{-1}$  no ponto 10,  $^{40}\text{K}$   $23,075 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$   $10,085 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$   $3,527 \text{ Bq/kg}^{-1}$  para o ponto 3,  $^{40}\text{K}$   $30,933 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$   $97,004 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$   $3,110 \text{ Bq/kg}^{-1}$  no ponto 8. O valor de  $^{40}\text{K}$  do P10 exibiu resultado maior do valor de referência de Bocardi (2019) que é  $59,0 \text{ Bq/kg}^{-1}$  e os pontos 3 e 8, apresentaram resultados menores. Já para os valores de  $^{238}\text{U}$ , os pontos 10 e 8 exibiram resultados mais altos que o valor de referência ( $28,2 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ) e P3 mais baixo. O valor de  $^{232}\text{Th}$  exibiram resultados mais baixos em relação aos valores de referência ( $47,6 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ) Bocardi (2019) nesse CA.

Depois desse contexto é importante ressaltar que por conta da falta de acesso aos RQ no interior do PARNA das Emas, o P10 que faz parte das classes dos LVA de textura muito argilosa, não pode servir como parâmetro comparativo para os pontos 3 e 8. O P3 é uma área de vegetação natural, mas que tem influência do uso antrópico, uma vez que no seu interior tem presença de animais como cavalos e bois.

Essa prática é muito comum na conversão de vegetação natural para o uso antrópico no Cerrado. Primeiro os proprietários colocam o gado e com o passar do tempo destina essas áreas ao cultivo (prática muito comum na região, principalmente em áreas de depósitos aluvionares). Antes os RQ eram áreas destinadas apenas a pecuária por conta da sua textura arenosa, mas aos longos dos anos detectaram que o cultivo da cana-de-açúcar se adaptou muito bem nessas regiões.

### 3.8 COMPARTIMENTO AMBIENTAL 8 (CA-8)

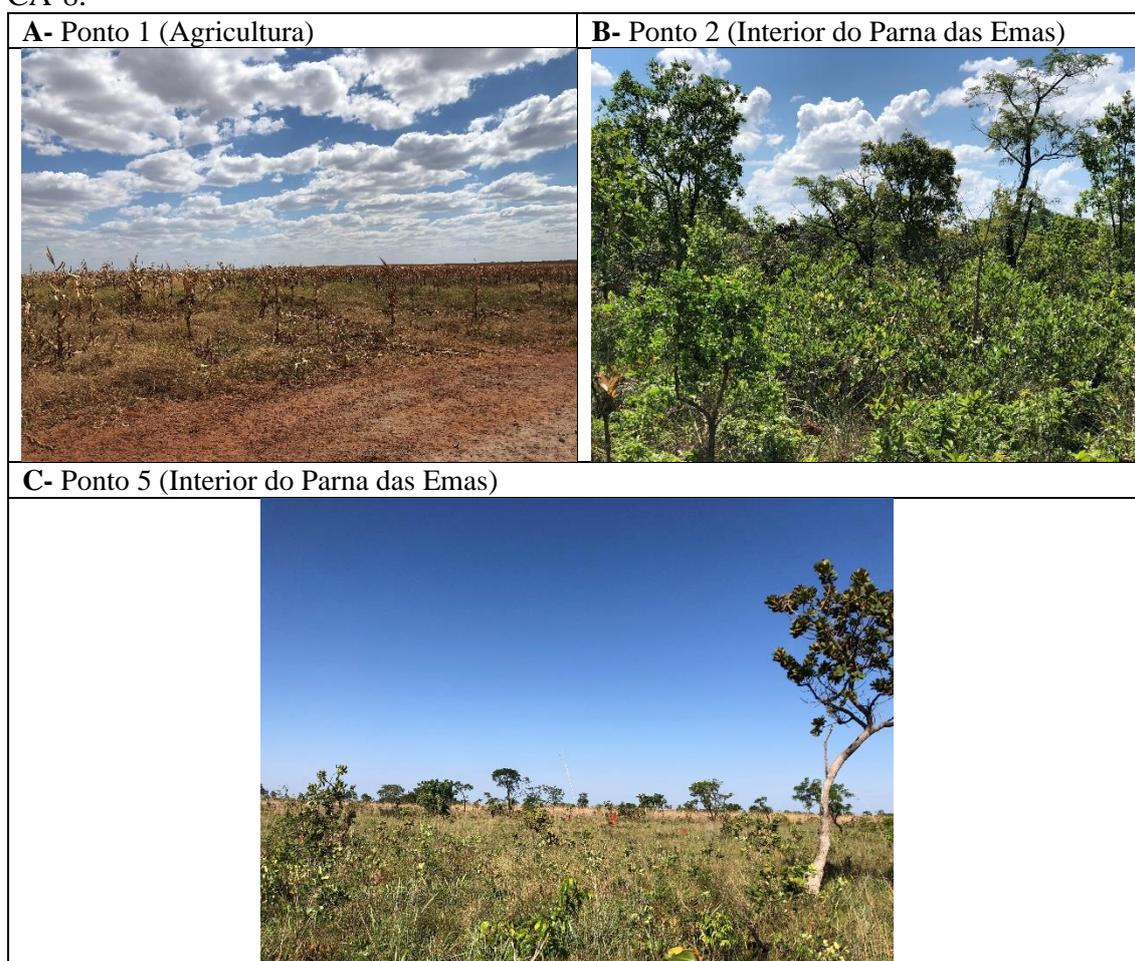
O CA-8 corresponde aos pontos 1 (Figura 55-A), 2 (Figura 55-B) e 5 (Figura 55-C), da região. O ponto 1 e 2 são áreas de Latossolo Vermelho-Amarelo. Já o P1 de textura franco arenosa e o P2 de textura argilosa. O P5 faz parte dos LATOSSOLO VERMELHO-Amarelo (LVA) de textura muito argilosa da região em análise. A característica textural dos pontos dentro do PARNA das Emas com o ponto externo pode estar relacionado com o material de origem. Apesar de todos serem de origem arenítica, o P2 e P5 são provenientes das Coberturas Detrito-Lateríticas e P1 proveniente da Formação Botucatu que por sua vez originam solos com características arenosas, resultando nesse CA em pontos no Parna das Emas que não confere segundo as características físicas com o uso antrópico.

Independentemente ao comparar os solos em vegetação natural e o ponto voltado para a agricultura (P1) é nítido que ocorre um incremento de nutrientes e ETPs, como As ( $10,74 \text{ mg/kg}^{-1}$ ), Ni ( $4,93 \text{ mg/kg}^{-1}$ ) e Pb ( $6,60 \text{ mg/kg}^{-1}$ ). Para colaborar com essa hipótese é possível a partir das características texturais solos comparar com o P3 do CA-7. Todos esses elementos no P3 apresentaram resultados menores. Quando comparado aos valores estabelecidos pela Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014), o As ( $10,74 \text{ mg/kg}^{-1}$ ) e Cd ( $3,45 \text{ mg/kg}^{-1}$ ) do P1 indicam valor de prevenção e valor de investigação, respectivamente.

Os valores dos radionuclídeos de  $^{40}\text{K}$   $47,721 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$   $35,594 \text{ Bq/kg}^{-1}$   $^{232}\text{Th}$   $3,082 \text{ Bq/kg}^{-1}$ , no ponto 2,  $^{40}\text{K}$   $60,516 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{238}\text{U}$   $92,959 \text{ Bq/kg}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$   $78,642 \text{ Bq/kg}^{-1}$

<sup>1</sup> para o ponto 5, <sup>40</sup>K 51,427 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>238</sup>U 33,274 Bq/kg<sup>-1</sup>, <sup>232</sup>Th 23,243 Bq/kg<sup>-1</sup> no ponto 1. O valor de <sup>40</sup>K do P2 (47,721 Bq/kg<sup>-1</sup>) apresentou resultado próximo do valor de referência de Bocardi (2019) e os pontos 5 e 1, apresentaram resultados menores. Já para os valores de <sup>238</sup>U, os pontos 2, 5 e 1 exibiram resultados mais altos. O valor de <sup>232</sup>Th no P2 exibiu resultado mais alto que o valor de referência, sendo o único ponto dentro do PARNA das Emas que o valor de <sup>232</sup>Th acima do valor encontrado por Bocardi (2019) e os pontos 5 e 1 exibiram a baixo do valor encontrado pela autora.

**Figura 55-** Representação da paisagem onde estão inseridos os pontos de amostragem no CA-8.



**Fonte:** Própria autora (2023).

Os solos de cada CA mostram que os elementos de As e Cd apresentaram um valor de qualidade superior ao esperado, de acordo com a Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014), com exceção do CA-1, que, em geral, apresentou valores de qualidade como previstos nessa Resolução e Companhia.

No CA-2 e 3 As e Cd resultaram em valores de investigação nas áreas que o uso é destinado à agricultura. Em todos os pontos do CA-4, tanto no interior do Parna, quanto

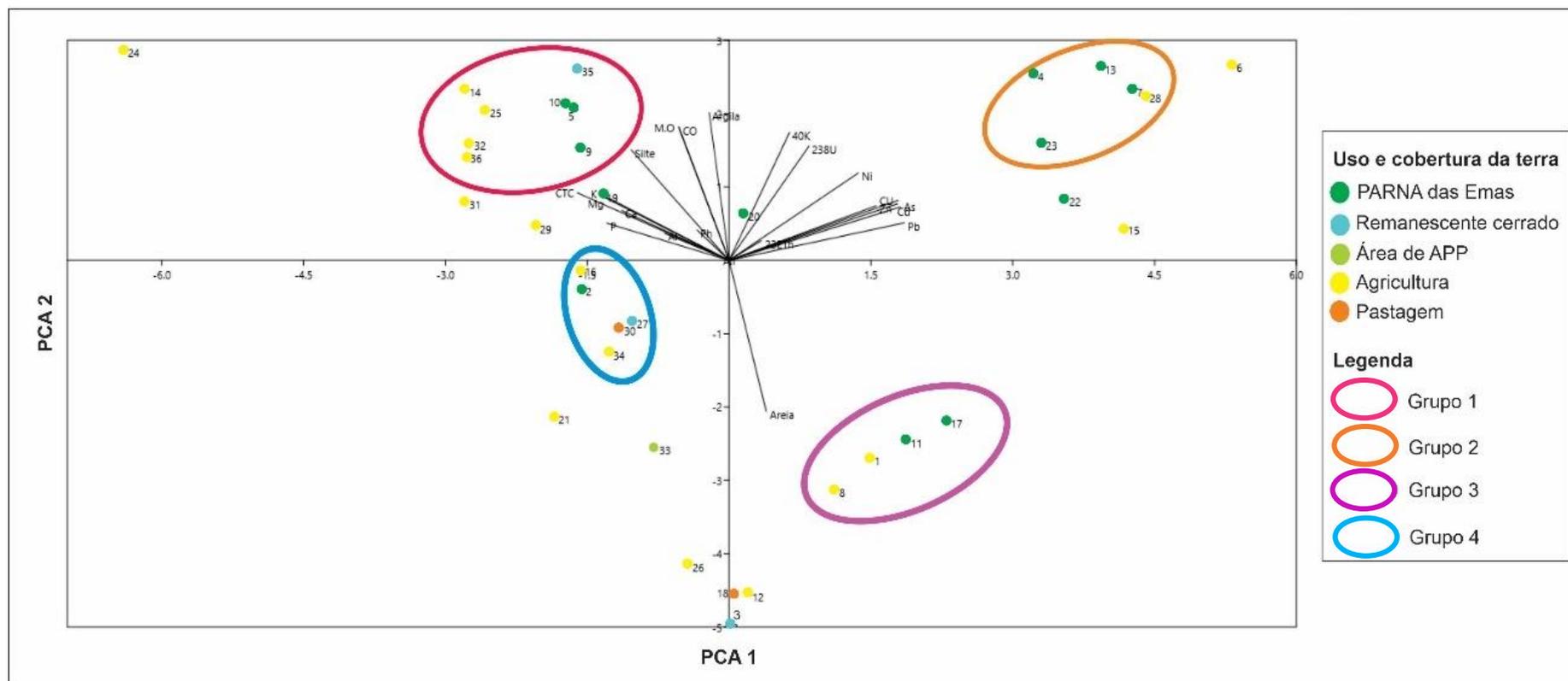
na área agrícola, esses dois elementos foram considerados como valores de investigação. Cabe salientar no CA-4 que os outros ETPs Zn, Cu, Ni e Pb apresentaram resultados maiores na área agrícola representado pelo P16, e maiores resultados em relação aos outros CA.

No CA-5, exibiram valores de investigações para os ETPs As e Cd foram nos pontos no interior do PARNA das Emas (P17 e P23) e, no CA-6, o P11 que está na área da UC, apresentou valores de investigação para As e valores de prevenção para Cd. Os CA-7 e 8 resultaram em valores de prevenção para As e valor de investigação para Cd, ambos CA ocorram em áreas agrícolas. Em geral, os CA demonstraram que as áreas agrícolas são os segmentos que apresentam alterações nos ETPs dos elementos radiogênicos, sobretudo dos elementos As e Cd.

### 3.9 ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS DOS ETPS E RADIONUCLÍDEOS DO SOLO

A fim de se compreender a relação existente entre os Compartimentos Ambientais criados com a distribuição espacial dos resultados dos ETPs e radionuclídeos foi efetuado uma análise estatística multivariada por Componentes Principais (Figura 56).

**Figura 56** – Análise dos Componentes Principais dos ETPs e radionuclídeos em relação aos Compartimentos Ambientais criados.



Org.: Própria autora (2023).

Constatou-se que a PCA 1 e a PCA 2 são responsáveis por 62,04% dos resultados dos pontos da região analisada. Há três grupos com características semelhantes entre si. O grupo 1 é composto pelos pontos 5, 9, 10, 14, 25, 32, 35 e 36 o grupo 2 pelos pontos 4, 7, 13, 23 e 28, o grupo 3 pelos pontos 1, 8, 11 e 17 e grupo 4 pelos pontos 2, 16, 27, 30 e 34.

A PCA mostrou agrupamentos distintos dos CA, uma vez que o grupo 1 apresentam pontos de vários CA (P14- CA 4; P25 e P9- CA 1; P10 CA 7; P5 CA 8; P32, P35 e P36 CA 2). São pontos que estão sob influência das Coberturas Detrito-Laterítica que variam entre LVw (pontos 14, 10, 5, 9, 32, 35 e 36) e GM (ponto 25) e vão variar de textura muito argilosa e argila no ponto 25. O grupo 2 da PCA estão representados por solos do CA 4 (ponto 7 e 14), CA 3 (ponto 28) e CA 5 (ponto 23). São solos que variam entre LVd e LVw e estão sobre influência das Coberturas Detrito-Laterítica e a textura variam entre argila e muito argilosa. O grupo 3 da PCA está caracterizado pelo CA 8 (ponto 1), CA 7 (ponto 8), CA 6 (ponto 11) e CA 5 (ponto 17). Os CA 8, 7 e 6 estão representados geologicamente pela Formação Vale do Rio do Peixe e apresentam textura franco arenosa e arenosa e vão variar entre LVA, RQ e OH. Já o CA 5 faz parte das Coberturas Detrito-Laterítica, sendo LVd com textura franco argilosa arenosa. O grupo 4 corresponde aos CA-2 (ponto 16, 30 e 34), CA-3 (P27) e CA-8 (P2), estão em áreas areníticas e variam entre LVd, LVA, OX, LVw com textura entre franco argiloso arenosa, argilo arenosa e argilosa.

Os pontos 24, 6, 15, 22, 18, 3, 12, 20, 9, 31, 29, 21, 33 e 26 estão fora dos agrupamentos realizados, sendo conhecido por *outlier*, ou seja, são os pontos com resultados discrepantes, quando comparado aos resultados dos grupos 1, 2 e 3. Portanto, a análise dos pontos de amostragem pelo método da PCA revelou que existem 4 grandes grupos que uniram diferentes CA, mas que eles apresentam a mesma resposta. Além desses grupos, foram identificados alguns pontos de *outliers*.

#### 4.RESULTADOS

O grupo 1 revelou que alguns pontos de amostragem do CA-1,2,4,7 e 8 tendem a ter uma relação enquanto a formação geológica e a CTC é um dos elementos que influencia na formação desse grupo. Uma vez que a CTC do solo, de uma argila ou do húmus representa a quantidade total de cátions retidos à superfície desses materiais em condição permutável (Ca + Mg + K + H + Al) (RONQUIM, 2020). Os pontos 14, 25, 32 e 36 que são áreas de agricultura estão ocupadas por cátions essenciais como Ca, Mg, K e indica que é um solo bom para a nutrição das plantas, que provavelmente tenha usada produtos para o manejo da lavoura(CAIXETA; DUTRA; REZENDE, 2022). Os pontos 10, 5, 9 e 35 que são áreas de cerrado tanto dentro do PARNA das Emas, quanto remanescente que é o caso do P35 a CTC está ocupada por cátions potencialmente tóxicos como o Al, resultando em solo pobre.

O grupo 2 revela que o CA-4, 3 e 5 apresentam o mesmo comportamento geoquímico, o que pode indicar que a disposição dos dados desse grupo está sendo afetada pela formação geológica (Coberturas Detrito-Lateríticas). São pontos que apresentam maiores concentrações de argila e MO e baixa CTC. Para Santos (2019) os ETPs estão ligados à fração de argila e ao MO, que oferecem alta capacidade de imobilização no solo, o que é crucial para a estabilidade produtiva dos solos do cerrado. Além disso, o CO está ligado a níveis mais elevados de fertilidade e biomassa microbiana (SÁ et al., 2015). Além dos ETPs, os radionuclídeos desse grupo apresentaram valores elevados, principalmente de  $^{40}\text{K}$  e  $^{238}\text{U}$ , e são elementos que apresentam correlação com a fração argila e MO presente no solo (BECEGATO et al., 2019).

O grupo 3, com exceção do ponto 17, apresenta pontos que estão intimamente relacionados à geoquímica da região. A Formação Vale do Rio do Peixe é uma sequência sedimentar arenosa, com baixa cimentação carbonática e pode conter fragmentos de basaltos devido à ação intempérica da rocha (CABRAL, 2006). Esses pontos são representados pela alta porcentagem de areia e pela acidez do pH, que está inversamente relacionada aos ETPs, MO e CO no gráfico da PCA. O pH ácido reduz a sorção dos metais em solo, o que resulta na elevação da disponibilidade e mobilidade dos ETPs e radionuclídeos (RIEUWERTS, 2007). A análise da PCA revela, de forma clara, que a concentração desses elementos está inversamente relacionada ao pH.

O grupo 4 revela que os CA-2, 3 e 8 apresentam uma grande variedade de solos, como LVA (P2), LVd (P16,27), LVw (P34) e OH (P30) que chegam em até 50% de

argila, com Al alto, CTC alta e pH 4. São pontos que podem ser observados na Figura 41 que apresentam, em geral baixos valores de ETPs e em relação aos radionuclídeos o P30 apresenta uma maior concentração de  $^{232}\text{Th}$  e em relação esse grupo, um desvio padrão alto, o que pode ser muito comum a concentração desse elemento em áreas de pastagem, como destaca Silva; Costa Júnior (2018).

Os pontos de *outliers*, são aqueles que apresentam uma distribuição de dados e na sua maioria estão diretamente relacionados ao uso agrícola da região, como os pontos 6 e 15, que apresentam os maiores resultados em comparação aos ETPs (P6: Zn, Cu,  $^{40}\text{K}$ , As, Ni, Pb e Cd; P15: Zn, pH,  $^{232}\text{Th}$ , Pb e Cd). Os pontos 24, 31 e 29 apresentam níveis mais elevados de Ca, Mg, P, CTC e pH. O ponto 24 e 21 apresentaram os maiores valores de P no solo.

As coletas dos pontos 15 e 16 foram realizadas no período de dissecação da soja. Em geral, o uso de herbicidas, inseticidas, algicidas, dissecantes, estimulantes do crescimento para plantas contém ETPs e radionuclídeos em sua fórmula. A maioria dos problemas ambientais relacionados a esse elemento advém da mobilidade em atividades agrícolas, como da região (MORAES, 2012), além da sua mobilidade ser limitada devido à forte sorção por argilas, óxidos e matéria orgânica (MORAES, 2012), ou seja, solos mais argilosos.

De acordo com a USEPA (1999), dentre os principais fertilizantes utilizados em campos agrícolas, o fosfato é o adubo com maiores níveis de metais tóxicos, especialmente de Cd que apresentou alterações nos P6 e P15, seguido de adubos nitrogenados e potássicos (GONÇALVES JR et al., 2015). Na pesquisa de Campos et al., (2005), identificou-se valores significativos nos adubos fosfatados de Cu, Ni, Zn, Ni, Pb e Cd.

Esses pontos (6,15) apresentaram variações nas concentrações radiogênicas, mas há diferentes concentrações radioativas de fertilizantes, gesso e fosfogesso que resultarão em diferentes bioacumulações em solos agrícolas, dependendo da porcentagem de argila, mineralogia do solo e quantidade de MO analisada (BECEGATO et al., 2019).

Dada a baixa fertilidade, o alto nível de intemperismo, os solos do Cerrado devem ser considerados quanto à capacidade de adsorção e disponibilidade de nutriente. A calagem é uma técnica indispensável na agricultura, pois eleva o pH, a CTC e melhora outros nutrientes, como o Ca e Mg (BECEGATO et al., 2019; MATIAS et al., 2019). A alteração nos nutrientes provenientes da calagem é notada nos *outliers* dos pontos 21, 29 e 31 que apresentam acréscimos dos elementos Ca, Mg, P e CTC.

Outro uso bastante usual é adubação NPK na cultura do milho, o que pode explicar os resultados do P31. O cultivo do milho na região ocorre durante a safrinha, quando é utilizada a adubação NPK. De acordo com Malaquias e Santos (2017), a cultura do milho é altamente requerida em fertilizantes químicos, o que resulta em aumento da produtividade e a qualidade dos grãos produzidos. Os autores também salientam a relevância do elemento K na cultura da soja, sendo assim, a aplicação de K em maiores quantidades no cultivo do milho pode favorecer a cultura da soja em sucessão (MALAQUIAS; SANTOS, 2017).

## 5. CONCLUSÃO

A metodologia de Compartimentação Ambiental utilizada nesta tese é relevante para a análise geoquímica do solo. Para um melhor aproveitamento e credibilidade dos resultados, é necessária uma análise de escala reduzida, uma vez que muitos solos dos CA dentro do PARNA das Emas não estão de acordo com os solos da área externa, comprometendo a análise integrada dos elementos, como no caso dos CA-7, 8 e 6.

Ao comparar os resultados de EPTs dos CA com a Resolução CONAMA n.460/2013 e Cetesb (2014) e os elementos radiogênicos com o trabalho de Bocardi (2019) é possível verificar que os elementos que apresentaram maiores problemas foram os ETPs As e Cd, que resultaram em valores de investigação nas áreas que o uso são para agricultura nos CA-2 e CA-3. No CA-4 todos os pontos resultaram em valores de investigação para As e Cd, tanto em áreas agrícolas, quanto no PARNA das Emas. Já o CA-5 exibiram valores de investigações para os ETPs As e Cd nos pontos no interior do PARNA das Emas e no CA-6 o P11 que está na área da UC apresentou valor de investigação para As e valor de prevenção para Cd. O CA-7 e 8 resultou em valor de prevenção para As e valor de investigação para Cd, ambos CA foram em áreas agrícolas. No geral, o CA-4 foi o que mais apresentou problemas em relação aos elementos analisados.

A PCA mostrou que CA distintos podem ter a mesma resposta em relação na espacialização dos elementos, como os CA 8, 7 e 6 do grupo 3, que têm as mesmas características devido à formação geológica do Vale do Rio do Peixe, que vai dar origem aos solos mais arenosos da região, sendo os CA com menores problemas enquanto a adsorção dos elementos. O grupo 4 também reuni pontos que apresentam maiores porcentagens de areia em sua estrutura e os grupos 1 e 2 reuni apresentam uma maior

concentração de argila e MO em sua estrutura. São pontos que apresentam influência principalmente das Coberturas Detrito-Laterítica.

Através dos *outliers*, a PCA conseguiu constatar que existem CA (4, 2 e 1) que foram enriquecidos com P, Ca, Mg, além de ETPs e radionuclídeos provenientes do manejo das áreas agrícolas. Dessa forma, são CA diferentes que apresentam a mesma resposta em relação ao tipo de uso em questão. Esses pontos fazem parte das áreas de chapadões do Brasil Central, convertidas em extensas áreas de monocultura da sola, milho, cana-de-açúcar e algodão ao longo nos últimos 50 anos. Dessa forma, a PCA foi crucial para demonstrar, sobretudo, esses pontos que se distanciam radicalmente dos outros.

## CONCLUSÃO DA TESE

A qualidade do solo é um fator crucial para a saúde e produtividade dos ecossistemas terrestres. Existem vários componentes e características que influenciam a qualidade do solo, incluindo sua composição química, estrutura física, teor de matéria orgânica, capacidade de retenção de água, pH, presença de poluentes e atividade biológica.

O Cerrado, em particular, é um bioma brasileiro conhecido por sua biodiversidade e pela presença de solos característicos. A qualidade dos solos do Cerrado pode variar dependendo da localização dentro do bioma e das práticas de manejo adotadas. No entanto, em geral, os solos do Cerrado apresentam algumas características e desafios específicos, como sua acidez. Isso ocorre devido à presença de minerais ácidos, como quartzo e alumínio presentes no solo e pode limitar a disponibilidade de nutrientes para as plantas, tornando necessário na pecuária e agricultura o uso de corretivos de acidez, como calcário, para neutralizar o pH.

Além da acidez no geral, os solos do Cerrado apresentam baixa fertilidade, especialmente em nutrientes como fósforo, potássio e cálcio. Portanto, a adubação é essencial para suprir essas deficiências e garantir um bom desenvolvimento das culturas agrícolas na região. Além dos fertilizantes químicos, também é possível utilizar adubos orgânicos para melhorar a fertilidade do solo do Cerrado. A aplicação de matéria orgânica, como esterco animal, compostagem e restos de culturas, pode contribuir para a melhoria da estrutura do solo e aumentar sua capacidade de retenção de água e nutrientes.

O uso prologando desses produtos geram impactos ao meio ambiente e a saúde humana e é importante ressaltar que, esses impactos podem ser amenizados por meio de boas práticas de manejo. Para tanto, conhecer as características físicas como o clima, relevo, substrato rochoso, o tipo de solo se torna essencial na análise da espacialização dos ETPs e elementos radiogênicos da região em análise.

A análise integrada da paisagem permitiu criar Compartimentos Ambientais (CAs) nas bacias hidrográficas a partir das interações entre os elementos naturais do meio, visando uma melhor compreensão da disposição e dinâmica dos elementos que compõem os solos. Cada Compartimento Ambiental foi dividido em segmentos naturais e seguimentos antrópicos.

Todo modo, a metodologia possibilitou uma análise da qualidade geoquímica dos solos das bacias hidrográficas na área influência do Parque Nacional das Emas tendo

como referência a perspectiva geossistêmica, podendo ser usada em outras pesquisas de bacias hidrográficas em uma escala menor para melhor refinação dos dados. Uma área menor possibilita o pesquisador selecionar pontos em várias Unidades da Paisagem que compõe aquele Compartimento Ambiental. Assim, reduz os erros encontrados ao longo da discussão dos elementos propostos, seja ele do solo, água ou mesmo sedimentos para quem busca uma análise completa do sistema.

Portanto, para melhor efetivação da metodologia é proposto algumas sequências de procedimentos para futuras pesquisas: 1. Recorte da bacia hidrográfica, 2. Criação via processamento de dados das Unidades da Paisagem, 3. Criação dos Compartimentos Ambientais que vão possibilitar a criação de seguimentos conservados e antrópicos e por último, 4. Delimitação dos pontos de amostragem. Pois o objetivo dessa metodologia é mostrar se os ETPs e radionuclídeos apresentam a mesma dinâmica em áreas análogas ao Parque Nacional das Emas. Caso a dinâmica seja distinta, pode estar havendo alguma alteração devido ao uso e cobertura da terra.

Verificamos que as áreas de uso agrícola em que os Compartimentos Ambientais que estão sob áreas dos arenitos das Coberturas Detrito-Lateríticas caracterizado Gleissolo, Organossolo e principalmente áreas de Latossolos que correspondem maiores porcentagens de argila e MO em sua estrutura apresentaram maiores problemas em relação à adsorção dos ETPs e elementos radiogênicos, como os CA 1, 2, 4 e 5. Já os Compartimentos Ambientais criados a partir dos arenitos da Formação Vale do Rio do Peixe, sobretudo em áreas de areias quartzosas, apresentaram menores concentrações desses elementos, mostrando que podem ser facilmente lixiviados para as camadas mais profundas dos solos.

Todo modo a delimitação em CA mostrou que existem áreas que estão enriquecidas com ETPs e elementos radiogênicos, uma vez que, algumas áreas análogas ao PARNA das Emas que estão destinados ao uso agrícola apresentaram maiores resultados desses elementos e segundo a Resolução CONAMA nº460/2013 e CETESB (2014) os elementos como As e Cd estão fora dos padrões de qualidade dos solos, podendo estar acumulando em organismos vivos e até mesmo impactando na saúde pública. Para um diagnóstico mais preciso sobre a qualidade ambiental dessas bacias hidrográficas à necessidade de uma análise integrada solo>água>sedimento. Mas para essa pesquisa os elementos analisados mostraram-se pertinentes no uso de indicadores ambientais em bacias hidrográficas, sendo importante lembrar que esses indicadores devem ser escolhidos a partir da realidade da área escolhida para desenvolver a pesquisa.

Para não finalizar, essa tese está muito longe de criar um valor de referência para áreas de Latossolo no planalto central brasileiro, mas trouxe dados de um estudo de caso que transcende as análises comparativas que as pesquisas costumam fazer a partir de resoluções de qualidade dos solos, o que, muitas vezes, não se adequa à realidade da área pesquisada. Dessa forma, buscou-se estabelecer uma delimitação da área que permita identificar áreas semelhantes de ambientes antrópicos e naturais em termos de características fisiográficas, de modo a melhor compreender a espacialização e distribuição dos elementos do solo. É importante compreender que nem todo solo de vegetação natural convertida em algum tipo de uso, como agropecuário nesse caso estará necessariamente poluído ou contaminado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALA, K. DE O.; BARBOSA NETO, M. A. Efeito da pressão agropecuária na zona de amortecimento do Parque Nacional das Emas. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. Supl. 2, p. 1–15, 1 dez. 2021.
- ALENCAR, N. M. et al. Variabilidade das perdas de solo em Neossolo Quartzarênico sob diferentes coberturas no ecótono Cerrado-Amazônia. **Agrarian**, v. 12, n. 43, p. 71–78, 12 set. 2019.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 923–934, dez. 2005.
- ALLOWAY, B. . **Heavy metals in soils**. 2. ed. Glasgow: [s.n.], 1995.
- ALMEIDA, R. F. B.; LAGOS, M. DO C. C.; CASTRO, S. S. DE. Avaliação físico-química de uma toposequência com neossolos quartzarênicos para fins de conservação, Mineiros, GO. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 3, p. 35, 3 dez. 2018.
- ALMEIDA, T. M. **Análise geossistêmica aplicada ao estudo da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio São João de Tiba, Bahia**. 267 f. Tese (Doutorado)- Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, 2014.
- ARAÚJO, O.; CHAVES, J. M.; ROCHA, W. DE J. S. Proposta Metodológica para modelagem espacial da susceptibilidade à degradação ambiental por inferência Fuzzy aplicada ao médio Jacuípe-BA. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 6, 31 dez. 2013.
- ASSINE, M. L.; PIRANHA, J. M.; CARNEIRO, C. D. R. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: ALMEIDA, F. F. M. (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra**. Beca ed. São Paulo: [s.n.]. p. 507. 2004.
- ASSIS, I. R. DE. **Adsorção e disponibilidade de arsênio em solos com diferentes composições mineralógicas**. 85f. Tese (Doutorado em Ciência)- Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade Federal de Viçosa, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CALCÁRIO AGRÍCOLA (ABRACAL) . **Consumo aparente de calcário agrícola em 2020**. Disponível em: <<http://abracal.com.br/site/wp-content/uploads/2021/04/PRODUCAO-BR-1987-A-2020.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2021.
- AYRES, F. M. et al. Bacias hidrográficas, escala de aproximação para o ordenamento territorial. **GEOFRONTER**, v. 7, n. 1, 2021.
- BABU, K. J.; SREEKUMAR, S.; ASLAM, A. Implication of drainage basin parameters of a tropical river basin of South India. **Applied Water Science**, v. 6, n. 1, p. 67–75, 8 mar. 2016.
- BAGHDADY, A.; AWAD, S.; GAD, A. Assessment of metal contamination and natural radiation hazards in different soil types near iron ore mines, Bahariya Oasis, Egypt. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 17, p. 506, 1 set. 2018.
- BARBOSA, A. S. **Saiba mais sobre o Cerrado**. Disponível em: <[http://www2.pucgoias.edu.br/hidasi/home/secao.asp?id\\_secao=303&id\\_unidade=1](http://www2.pucgoias.edu.br/hidasi/home/secao.asp?id_secao=303&id_unidade=1)>. Acesso em: 31 ago. 2022.
- BASCONES, M. I. S. **Determinación de metales pesados en suelos de Mediana del Campo (Vallodolid): contenidos extraíbles, nivel de fondo y de referencia**. [s.l.] Universidade de Vallodolid, 2003.
- BAYRAK, G.; KELEŞ, E.; ATIK, D. Estimation of Radioactivity Caused by Chemical

Fertilizers on Trakya Sub-Region Soils and Its Potential Risk on Ecosystem. **European Journal of Sustainable Development**, v. 7, n. 3, 1 jul. 2018.

BECEGATO, V. A. **Aplicação de técnicas geofísicas e geoquímicas em duas glebas agrícolas do noroeste do estado do Paraná e suas relações com fertilizantes fosfatados**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2005.

BECEGATO, V. A. et al. Multivariate statistical analysis correlating  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  equivalent activities in soil to geochemical data from an agricultural area. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 4, p. 1901–1910, 22 abr. 2019.

BEROUTCHACHVILI, N.; BERTRAND, G. Le géosystème ou «système territorial naturel». **Revue Géographique Des Pyrénées Et Du Sud-ouest**, v. 49, n. 2, p. 167–180, 1978.

BERTALANFFLY, L. V. **Teoria Geral dos Sistemas**. Pétropolis: [s.n.]. 1973.

BERTRAND, G.; BERTRAND, C. **Uma Geografia Transversal e de Travessias: o meio ambiente através dos territórios e das temporalidades**. Maringá: [s.n.]. 2007.

BERTRAND, G.; TRICART, J. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. **Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest**, v. 39, n. 3, p. 249–272, 1968.

BIONDI, C. M. et al. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni E Co em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 3, p. 1057–1066, 2011.

BOCARDI, J. M. B. **Valores de referência de qualidade de metais, macroelementos e radionuclídeos em solos do oeste do Paraná**. 119f. Tese (Doutorado)- Departamento de Química. Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2019.

BONFIM-SILVA, E. M. et al. Adubação fosfatada no desenvolvimento e produção de feijão guandu em Latossolo vermelho do Cerrado em primeiro cultivo. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 5, p. 1380–1388, 2014.

BORTEY-SAM, N. et al. Association between human exposure to heavy metals/metalloid and occurrences of respiratory diseases, lipid peroxidation and DNA damage in Kumasi, Ghana. **Environmental Pollution**, v. 235, p. 163–170, abr. 2018.

BOTELHO, R. G. M. Planejamento em micro bacia hidrográfica. *In*: BRASIL, B. (Org). **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: [s.n.]. p. 260–300. 1999.

BOYD, R. S. Heavy metal pollutants and chemical ecology: Exploring new frontiers. **Journal of Chemical Ecology**, v. 36, p. 46–58, 2010.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: [s.n.]. 2013.

BRANCO, S. M. **Ecossistêmica - Uma abordagem integrada dos problemas do Meio Ambiente**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

BRANDÃO, J.; MOURA, I.; RODRIGUES, F. **Relatório de Atividades da EP Solo e Sedimentos 2009/2011**. Plano Naci ed. Lisboa: [s.n.]. 2012.

BRASIL. **CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N 460, de 30 de dezembro de 2013**. Brasília-DF, 2013.

BRASIL. **Lei Federal 9.433, Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília-DF. Diário Oficial, , 1997. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm)>. Acesso 27 fev. 2023.

BRAZ, A. M. **Zoneamento turístico das paisagens para o município de Mineiros (GO)**,

- Brasil.** 358f. Tese (Doutorado)-Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2020.
- BRAZ, J. S.; NETO, R. M. As Unidades de Paisagem no município de Areado, sul de Minas Gerais: uma proposta de estudo ambiental integrado a partir da concepção geossistêmica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 6, p. 3406, 31 dez. 2021.
- BRITO, A. C. C. et al. Assessing the Distribution and Concentration of Heavy Metals in Soils of an Agricultural Frontier in the Brazilian Cerrado. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 231, n. 8, p. 388, 18 ago. 2020.
- CABRAL, J. B. P. **Análise da sedimentação e aplicação de métodos de previsão para tomada de medidas mitigadas quanto ao processo de assoreamento no reservatório de Cachoeira Dourada-GO/MG.** 211f. Tese (Doutorado em Geologia)- Setor Ciência da Terra. Universidade Federal do Paraná, 2006.
- CABRAL, V. C. et al. Assessment of the Influence of Rainfall and Landform on Landslide Initiation Using Physiographic Compartmentalisation. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, n. 2, p. 407–420, 9 ago. 2019.
- CAIXETA, D. C. A.; DUTRA, G. A.; REZENDE, C. F. A. Propriedade química de latossolo vermelho submetido a diferentes manejos agrícolas. **Journal of Engineering, Technology, Innovation and Sustainability**, v.4, n1, 2022.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações.** Porto Alegre-RS: Artmed, 2008.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C. Fundamentos epistemológicos da ciência da geoinformação. In: CÂMARA, G.; DAVIS C.; MONTEIRO, A. M. V.(Org.). **Introdução à ciência da geoinformação.** São José dos Campos: INPE, p. 1–16. 2001.
- CAMPOS, M. L. et al. Baseline Concentration of Heavy Metals in Brazilian Latosols. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 34, n. 3–4, p. 547–557, 5 2003.
- CAMPOS, M. L. et al. Determinação de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo e zinco em fosfatos de rocha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 4, p. 361–367, abr. 2005.
- CARNEIRO, C. D. R. Viagem virtual ao Aquífero Guarani em Botucatu (SP): Formações Pirambóia e Botucatu, Bacia do Paraná. **Terrae Didática**, v. 3, n. 1, p. 50–73, 2007.
- CARNEIRO, J. S. DA S. et al. Supercalagem: alterações em atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo distrófico. **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 16, n. 1, p. 31–38, 2018.
- CARVALHO, A. T. F. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: Discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 1, n. 42, p. 140–161, 2020.
- CASALINHO, H. D. et al. Qualidade do solo como indicador de sustentabilidade de agroecossistemas. **R. Bras. Agrociência**, v. 13, n. 2, p. 195–203, 2007.
- CAVALCANTI, L. C. DE S. **Cartografia de paisagens: fundamentos.** 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2018.
- CAVALLI, E. **Interação entre calagem e adubação com zinco em cana-de-açúcar.** 107f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical)- Programa de Pós-Graduação Agricultura Tropical e Subtropical. Instituto Agrônômico, 2020.
- CAVALLI, E.; LANGE, A. Efeito residual do potássio no sistema de cultivo soja-milho

safrinha no cerrado Mato-Grossense. **Cultura Agrônômica**, v. 27, n. 2, p. 310–326, 2018.

CENTENO, L. N. et al. Textura do solo: Conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31–37, 2017.

CETESB, C. DE T. DE S. A. **Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo**, 2014. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/solo/wp-content/uploads/sites/18/2014/12/valores-orientadores-nov2014.pdf>>. Acesso em 28 de out. 2022.

CHAGAS, A. C. **Propriedades físicas, mecânicas, químicas e micromorfológicas de um latossolo vermelho sob cerrado e submetido a dois sistemas de manejo em Dom Aquino, MT**. 81f. Tese (Doutorado em Ciência)-Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade Federal de Viçosa, 2004.

CHEN, H. et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China. **Science of The Total Environment**, v. 512–513, p. 143–153, abr. 2015.

CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. **Modelos físicos e de informação em geografia**. São Paulo: Livros Técnicos e científicos: USP, 1975.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: [s.n.]. 1979.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. Edgard Blu ed. São Paulo: [s.n.]. 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: [s.n.]. 1999.

COSTA, L. R. F. DA; OLIVEIRA, V. P. V. DE. Sistemas ambientais e indicadores de desertificação: dinâmica das paisagens semiáridas na sub-bacia hidrográfica do riacho Santa Rosa. **Ateliê Geográfico**, v. 11, n. 2, p. 238, 3 nov. 2017.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia do Brasil**. 6. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2010.

CURVO, H. R. M.; PIGNATI, W. A.; PIGNATTI, M. G. Morbimortalidade por câncer infantojuvenil associada ao uso agrícola de agrotóxicos no Estado de Mato Grosso, Brasil. **Cad. Saúde Colet.**, v. 21, n. 1, p. 10–17, 2013.

DAMATTO, S. R. **Determination of natural radionuclides from U and Th series, trace and major elements in sediment cores from baixada Santista and evaluation of impacted areas**. 254f. Tese (Doutorado)- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN. Universidade de São Paulo, 2010.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. **Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 187–200, 1997.

DIEROLF, T. S.; ARYA, L. M.; YOST, R. S. Water and Cation Movement in an Indonesian Ultisol. **Agronomy Journal**, v. 89, n. 4, p. 572–579, 1997.

DORAN, J. W.; SARRANTONIO, M.; LIEBIG, M. A. **Soil Health and Sustainability**. Advances in Agronomy. p. 1–54. 1996.

DRAGOVIĆ, S.; MIHAILOVIĆ, N.; GAJIĆ, B. Heavy metals in soils: Distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources. **Chemosphere**, v. 72, n. 3, p. 491–495, jun. 2008.

DUTRA E SILVA, S.; BARBOSA, A. S. Paisagens e fronteiras do Cerrado: ciência, biodiversidade e expansão agrícola nos chapadões centrais do Brasil. **Estudos Ibero-**

**Americanos**, v. 46, n. 1, 2020.

DUTRA, L. S. et al. Uso de agrotóxicos e mortalidade por câncer em regiões de monoculturas. **Saúde em Debate**, v. 44, n. 127, p. 1018–1035, dez. 2020.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 5. ed. Brasília-DF: Rev. e ampl, 2018.

ESWARAN, H. et al. **Soil Classification: A global desk reference**. New York, USA: [s.n.], 2003.

FADIGAS, F. DE S. et al. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. **Bragantia**, v. 61, n. 2, p. 151–159, 2002.

FADIGAS, F. DE S. et al. Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 699–705, 2006.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of Soil Acidity of South American Soils for Sustainable Crop Production. In: *Advances in Agronomy*, p. 221–275, 2014.

FALEIRO, F. F. **Análise da paisagem da bacia do rio Corrente (GO): Estudo geoquímico e implicações no uso e ocupação**. 96f. Dissertação (Mestrado em Geografia)- Instituto de Estudos Socioambientais -IESA. Universidade Federal de Goiás, 2013.

FERREIRA, A. O. **Avaliação da radioatividade natural em algumas rochas graníticas do estado do Paraná e sua utilização na construção civil**. 114f. Tese (Doutorado)- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN. Universidade de São Paulo, 2013.

FERREIRA, M. B. P.; PAZ, O. L. DE S. DA. QUALIDADE DE DADOS GEOESPACIAIS: análise da consistência topológica no mapeamento de cobertura da terra do município de Curitiba - PR. **Revista Cerrados**, v. 16, n. 01, p. 233–247, 2018.

FLOTEMERSCH, J. E. et al. A Watershed Integrity Definition and Assessment Approach to Support Strategic Management of Watersheds. **River Research and Applications**, v. 32, n. 7, p. 1654–1671, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONS OF THE UNITED NATIONS (FAO). **FAOSTAT 2015 Crops and livestock products – export quantities**. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data>>. Acesso em: 2 set. 2022.

FONTE, C. C. et al. Assessing VGI Data Quality. In: FONTE, C. C. et al. (Org.). **Mapping and the citizen sensor**. [s.l.] Ubiquity Press, p. 137–163. 2017.

FRAZÃO, L. A. et al. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado mato-grossense. **Pesq. Agropec. Bras**, v. 43, n. 5, p. 641–648, 2008.

FURLAN, A. R.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. DE S. Classificação dos elementos do relevo a partir da metodologia dos geomorphons na bacia hidrográfica do rio Apuaê-Mirim, RS. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 32, 2018.

GARÇONI, A. M.; COSTA, A. N. Influência de propriedades e características químicas dos solos na disponibilidade de metais pesados. In: COSTA, A. F. S.; COSTA, A. N. (Org.). **Valores orientadores de qualidade de solos no Espírito Santo**. 1. ed. [s.l.] Incaper, 2015.

GARDON, F. R. Land Prioritization: An Approach to the Effective Environmental Planning of Hydrographic Basins. **Environmental Management**, v. 67, n. 4, p. 623–631, 2021.

- GHAYORANEH, M.; QISHLAQI, A. Concentration, distribution and speciation of toxic metals in soils along a transect around a Zn/Pb smelter in the northwest of Iran. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 180, p. 1–14, set. 2017.
- GODOY, L. C. et al. Comportamento dos radionuclídeos potássio, urânio e tório em relação à granulção dos depósitos cenozóicos que capeiam o granito Serra do Carambeí - Pr. **Terra Plural**, v. 4, n. 1, 2010.
- GONÇALVES, A. S. F.; OLIVEIRA NETO, S. S. ; MACHADO, G. G. Uso de micronutrientes na agricultura: efeitos e aplicações. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 3, n. 3, 2019.
- GONÇALVES, D. L.; PASSOS, M. M. DOS. Da sistematização do conhecimento geográfico às diversas análises teóricas da paisagem e do geossistema. **Espaço em Revista**, v. 22, n. 2, 2020.
- GONÇALVES, P. DO N. **Caracterização química inorgânica e distribuição vertical de radionuclídeos das séries de decaimento do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em testemunhos de sedimento e perfis de solo coletados na área de influência do reservatório de Jundiá, estado de São Paulo**. 153f. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN. Universidade de São Paulo, 2019.
- GUIMARAES, S. N. P.; HAMZA, V. M.; DA SILVA, J. J. Airborne geophysical surveys in the north-central region of Goiás (Brazil): implications for radiometric characterization of tropical soils. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 116, p. 10–18, fev. 2013.
- GOODCHILD, M. F. Spatial Thinking and the GIS User Interface. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 21, p. 3–9, 2011.
- HANFI, M. Y. M. et al. The presence of radioactive heavy minerals in prospecting trenches and concomitant occupational exposure. **PLOS ONE**, v. 16, n. 3, 2021.
- HUGEN, C. et al. Teores de Cu e Zn em perfis de solos de diferentes litologias em Santa Catarina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 622–628, 2013.
- IAEA, INTERNACIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data**. Austria, 2003. Disponível em: <[https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te\\_1363\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1363_web.pdf)>. Acesso em 4 de jun. 2022.
- INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). **Parque Nacional das Emas**. Disponível em: <<https://uc.socioambiental.org/pt-br/arp/1276>>. Acesso em: 6 dez. 2022.
- IORDACHE, A. M. et al. Past and present anthropic environmental stress reflect high susceptibility of natural freshwater ecosystems in Romania. **Environmental Pollution**, v. 267, p. 115505, dez. 2020.
- IVANOVICH, M.; HARMON, R. S. **Uranium-series Disequilibrium: Application to Earth, Marine and Environmental Sciences**. Oxford: Cl ed. [s.l: s.n.]. 1992.
- JACKSON, M. L. **Soil Chemical Analysis. Prentice Hall of Englewood cliffs**. New Jersey, USA: Trace Elements from Soil to Human, 1967.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace Elements in Soils and Plants**. 2. ed. Boca Raton, Flórida: CRC Press., 1992.
- KER, J. C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 17–40, 1997.
- KHAN, K. et al. Heavy metals in agricultural soils and crops and their health risks in Swat District, northern Pakistan. **Food and Chemical Toxicology**, v. 58, p. 449–458, ago. 2013.
- KILLEEN, P. G. Gamma ray spectrometry methods in uranium exploration – Application and

- interpretation. Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores. **Geological Survey of Canada, Economic Geologic Report**, v. 58, p. 163–229, 1979.
- KRATZ, S.; SCHICK, J.; SCHNUG, E. Trace elements in rock phosphates and P containing mineral and organo-mineral fertilizers sold in Germany. **Science of The Total Environment**, v. 542, p. 1013–1019, jan. 2016.
- KUO, S.; HEILMAN, P. E.; BAKER, A. S. Distribution and forms of copper, zinc, cadmium, iron, and manganese in soils near a copper smelter. **Soil Science**, v. 135, n. 2, p. 101–109, fev. 1983.
- LANDELL, M. G. DE A. et al. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 4, p. 741–745, dez. 2003.
- LANGE, A. et al. Adubação potássica e seu efeito residual no sistema soja-milho safrinha em Mato Grosso. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 18, n. 2, p. 192–205, 19 dez. 2019.
- LARSEN, E. S. J.; GOTTFRIED, D. Uranium and Thorium in selected suites of igneous rocks. **American Journal of Science**, v. 258, p. 151–169, 1957.
- LATRUBESSE, E. M. et al. Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. **Conservation Science and Practice**, v. 1, n. 9, 7 set. 2019.
- LEAL, A. L. DO C. et al. Spatial distributions of natural radionuclides in soils of the state of Pernambuco, Brazil: Influence of bedrocks, soils types and climates. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 211, jan. 2020.
- LEINZ, V.; LEONARDOS, O. H. **Glossário Geológico**. Nacional ed. São Paulo: [s.n.]. 1977.
- LEITE, E. F. **Caracterização, Diagnóstico e Zoneamento Ambiental: O exemplo da bacia hidrográfica do Rio Formiga–TO**. 228f. Tese (Doutorado em Geografia)-Instituto de Geografia. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010.
- LIMA, E. S. A. et al. Soil heavy metal content on the hillslope region of Rio de Janeiro, Brazil: reference values. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 6, p. 364, 2018.
- LIMA, H. F.; ASSUNÇÃO, H. F.; SCOPEL, I. Simulação do efeito de uso da terra na atenuação da energia cinética da chuva sobre uma bacia hidrográfica no Sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 9 ago. 2019.
- LONGO, R. M.; PENEREIRO, J. C.; MENDES, d. r. atributos químicos e metais pesados em solos de remanescentes florestais urbanos. **Revista Cerrados**, v. 18, n. 2, p. 183–207, 2020.
- LÓPEZ, Y. P. **Metais Pesados em Solos Representativos das Principais Regiões Agrícolas de Cuba: Valores de Referência, Geoquímica e Fatores de Variabilidade**. 119f. Tese (Doutorado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2015.
- LUMIATTI, G. et al. Debris flow susceptibility mapping for prevention in risk areas: a novel physiographic compartmentalization- based approach. In: SILVEIRA, J. H. P. (Org.). **Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora Poisson, p. 146., 2022.
- LWIN, C. S. et al. Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality—a critical review. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 64, n. 2, p. 156–167, 2018.
- MACAMBIRA, D. M.; LIMA, I. M. M. F.; MONTEIRO “IN MEMORIAN”, M. D. S. L. Diálogo entre a história e a geografia sobre questões ambientais. **Geo UERJ**, n. 36, 2020.

- MACHADO, R. B. et al. As várias faces das ameaças às áreas de conservação no Brasil. **Ciência e Cultura**, v. 72, n. 2, p. 58–64, 2020.
- MAGESH, N. S. et al. Geographical information system-based morphometric analysis of Bharathapuzha river basin, Kerala, India. **Applied Water Science**, v. 3, n. 2, p. 467–477, 15 jun. 2013.
- MALAQUIAS, C. A. A.; SANTOS, A. J. M. Adubação organomineral e NPK na cultura do milho (*Zea mays* L.). **Pubvet**, v. 11, n. 5, p. 501–512, 2017.
- MAPA. **Ministério da Agricultura**. Disponível em: <[https://www.gov.br/agricultura/pt-br/search?SearchableText=USO DE AGROTÓXICO AUMENTOU EM 2019](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/search?SearchableText=USO+DE+AGROTÓXICO+AUMENTOU+EM+2019)>. Acesso em: 9 fev. 2023.
- MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomias. Cobertura e Uso do Solo Brasileiro Série Mapa**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em 15 de maio de 2022.
- MAQUEDA, C. et al. Behaviour of glyphosate in a reservoir and the surrounding agricultural soils. **Science of The Total Environment**, v. 593–594, p. 787–795, set. 2017.
- MARQUES NETO, R. Geomorfologia e geossistemas: influências do relevo na definição de unidades de paisagem no maciço alcalino do Itatiaia (MG/RJ). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 4, 15 dez. 2016.
- MARTINS, A. P.; DAMASCENO, C. E.; OLIVEIRA, B. J. S. DE. Análise da paisagem na zona de amortecimento do Parque Nacional das Emas - Brasil. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 24, p. 48, 31 dez. 2020.
- MARTINS, A. P.; GALVANI, E. Relação entre uso e cobertura da terra e parâmetros biofísicos no Cerrado Brasileiro. **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 40, p. 148–162, 24 dez. 2020.
- MARTINS, J.; FIGUEIREDO, B. R. Testes de mobilidade de chumbo e arsênio em solo contaminado em Apiaí (SP). **Geochimica Brasiliensis**, v. 28, n. 2, p. 189–200, 1 dez. 2014.
- MATIAS, S. S. R. et al. Recomendação de calagem com base na variabilidade espacial de atributos químicos do solo no Cerrado brasileiro. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 4, p. 896–907, 2019.
- MATTOS, A. G. et al. Multivariate analyses to establish reference values for soils in Médio Paraíba, state of Rio de Janeiro, Brazil. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA**, v. 49, n. 1, 2018.
- MEDINA, E. F. et al. Seleção de solos da região de viçosa para utilização como barreira química para metais pesados. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 4, n. 3, p. 0349–0352, 12018.
- MELLIS, E. V et al. Nutrição e adubação da cultura da cana-de-açúcar. In: PRADO, R. M.; CAMPOS, C. N. S. (Eds.). **Nutrição e adubação de grandes culturas**. FCAV ed. Jaboticabal: [s.n.]. p. 301–326.
- MELLONI, R. et al. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2461–2470, dez. 2008.
- MENDES, A. T. Delimitação da bacia hidrográfica do Rio Santo Antônio pela ferramenta de delimitação automática TauDEM. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 3, p. 973–987, 2018.

- MENDONÇA, A. F. DE et al. Mapeamento da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do córrego Bandeirinha em Formosa-GO. **Geoambiente On-line**, n. 36, p. 19–42, 2020.
- MERTENS, M. et al. Glyphosate, a chelating agent—relevant for ecological risk assessment? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 6, p. 5298–5317, 2 fev. 2018.
- MILHOME, M. A. L. et al. Diagnosis of Contamination of Soil by Toxic Metals from Urban Solid Waste and Influence of Organic Matter. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 1, p. 59–72, 2018.
- MINEROPAR, M. DO P. **Levantamento geoquímico multielementar do estado do Paraná: Geoquímica de solo**. 2. ed. Curitiba, 2005.
- MIRANDA, M. R. de S.; NEVES, S. M. A. de S.; RAMOS, A. W. P. Caracterização das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do rio Jauru –Mato Grosso, Brasil. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 58, 2019.
- MONTEIRO, C. A. de F. Geografia e Ambiente. **Revista Orientação**, n. 5, 1984.
- MONTEIRO, C. A. de F. **Geossistemas: A história de uma procura**. São Paulo: [s.n.]. 2000.
- MORAES TAVARES, R. L. et al. Long term application of pig manure on the chemical and physical properties of Brazilian Cerrado soil. **Carbon Management**, v. 10, n. 6, p. 541–549, 2 nov. 2019.
- MOREIRA-NORDEMANN, L. M. A. A geoquímica e o meio ambiente. **Geochimica Brasiliensis**, v. 1, p. 89–107, 1987.
- MOREIRA, J. C. et al. Contaminação de águas superficiais e de chuva por agrotóxicos em uma região do estado do Mato Grosso. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1557–1568, jun. 2012.
- MOREIRA, V. B.; PEREZ FILHO, A. Das superfícies de aplainamento aos pulsos climáticos holocênicos: a evolução da paisagem em relevos de chapada. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 176–195, 23 mar. 2020.
- MOURA-FÉ, M. M. DE. Paisagem e a aplicabilidade geomorfológica do conceito. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 4, p. 1231, 28 jun. 2019.
- MÜLLER, G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine Riv. **Geo Journal**, v. 2, p. 108–118, 1969.
- NASCIMENTO, C. W. A. et al. Fracionamento, dessorção e extração química de zinco em latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p. 599–606, 2002.
- NASCIMENTO, D. T. F.; NOVAIS, G. T. Clima do Cerrado: dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. **Élisée, Rev.Geo.UEG**, v. 9, n. 2, 2020.
- NASCIMENTO, F. R. DO; SAMPAIO, J. L. F. Geografia física, geossistemas e estudos integrados da paisagem. **Revista da Casa de Geografia de Sobral**, v. 6, n. 1, p. 11, 2004.
- NEVES, L. S. DAS; ERNANI, P. R.; SIMONETE, M. A. Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 25–32, 2009.
- NIKKEL, M.; LIMA, S. DE O. CRESCIMENTO INICIAL DE ALGODÃO CULTIVADO EM PLINTOSSOLO PÉTRICO CONCRECIONÁRIO. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 35, n. 3, p. 360–369, 29 set. 2020.
- NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2007.

- NOVAIS, G. T. **Classificação climática aplicada ao Bioma Cerrado**. UBERLÂNDIA: UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 12 jul. 2019.
- NUNES, A. N. Mudanças na paisagem e serviços dos ecossistemas. Abandono agrícola e variação no carbono orgânico dos solos. **Cadernos de Geografia**, n. 39, p. 7–16, 2019.
- OLIVEIRA, C. S. DE; BRAZ, A. M.; CAVALCANTI, L. C. DE S. Cartografia de paisagens da bacia hidrográfica do Ribeirão Paraíso-Jataí (GO). **Espaço em Revista**, v. 24, n. 1, 2022.
- OLIVEIRA, G. Geoecologia e geodiversidade: uma aplicação da análise integrada da paisagem como subsídio à gestão de áreas protegidas. **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 72, p. 402–421, 23 dez. 2019.
- OLIVEIRA, M. T. DE et al. Mapeamento da Vegetação do Cerrado – Uma Revisão das Iniciativas de Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1250–1274, 30 dez. 2020.
- OLIVEIRA, P. S. DE. **Avaliação da qualidade geoambiental dos solos presentes nos parques e jardins públicos da região metropolitana do Rio de Janeiro**. [s.l.] Universidade Federal Fluminense, 2019b.
- OLIVEIRA, T. A. **A concepção geossistêmica aplicada ao estudo da dinâmica da paisagem na bacia hidrográfica do rio Lourenço Velho, sul do estado de Minas Gerais –Brasil**. 178f. Tese (Doutorado)- Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2013.
- OLIVEIRA, J. G.; SANTOS, L. J. C.; CALEGARI, M. R. Relação solo-relevo em sistema pedológico argissolo-neossolo quartzarênico na região noroeste do estado do Paraná: caso de Amaporã. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 1 jul. 2020.
- OLIVEIRA, R. C. B.; MARTINS, R. V. Dinâmica de Metais-Traço em solo e ambiente sedimentar estuarino como um fator determinante no aporte desses contaminantes para o ambiente aquático: Revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 3, n. 2, 2011.
- OLIVEIRA, V. A. et al. Soils of Cerrados, the Brazilian Savannas. *In*: SCHAEFER, C.E.G.R (Org.). **World Soils Book Series**. p. 129–173. 2023.
- OSAKI, M. **Conflito no leste Europeu completa um mês e setor de fertilizantes segue apreensivo**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniaocpepea/conflito-no-leste-europeu-completa-um-mes-e-setor-de-fertilizantes-segue-apreensivo.aspx>>. Acesso em: 16 jan. 2022.
- PALMA, D. C. DE A. **Agrotóxicos em leite humano de mães residentes em Lucas do Rio Verde MT**. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Saúde Coletiva. Universidade Federal de Mato Grosso, 2011.
- PAVELHÃO, T. R. **Valores Orientadores De Qualidade Para Metais Pesados Em Solos Cultivados No Município De Bandeirantes – PR**. Tese (Doutorado em geografia)- Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Maringá, , 2005.
- PAYE, H. DE S. et al. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 2041–2051, dez. 2010.
- PEDROSO, T. M. A. et al. Cancer and occupational exposure to pesticides: a bibliometric study of the past 10 years. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 12, p. 17464–17475, 19 mar. 2022.
- PEIXOTO, C. M. et al., Distribuição das concentrações de atividades de <sup>238</sup>U e <sup>232</sup>Th em

amostras de solo do estado de Minas Gerais. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v.4, n.2, 2016.

PEREIRA, T. T. C. et al. A mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação com o uso e manejo. **Geonomos**, v. 28, n. 1, p. 1–14, 2020.

PERUCHI TREVISAN, D. et al. Análise das mudanças do uso e cobertura da terra entre 1988 e 2017 no município de Ibaté-SP. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 7, p. 2216–2228, 2018.

PINHEIRO, J. I. D. et al. **Estatística básica: A arte de trabalhar com dados**. Elsevier ed. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2009.

PINTO, M. L. **Arcabouço tectônico da Bacia do Paraná, uma nova abordagem com base em dados de métodos potenciais**. 107f. Tese (Doutorado em Geociências)-Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Universidade de Brasília, 2019.

PÔSSAS, I. B. **A efetividade do Refúgio de Vida Silvestre Veredas do Oeste Baiano frente ao avanço da fronteira agrícola MATOPIBA**. [s.l.] Universidade Federal de Goiás, 2017.

PRESTON, W. et al. Soil contamination by heavy metals in vineyard of a semiarid region: An approach using multivariate analysis. **Geoderma Regional**, v. 7, n. 4, p. 357–365, 2016.

PROCÓPIO, L.; BARRETO, C. The soil microbiomes of the Brazilian Cerrado. **Journal of Soils and Sediments**, v. 21, n. 6, p. 2327–2342, 24 jun. 2021.

RAMOS, J. S. A. et al. Multi-biomarker responses to pesticides in an agricultural population from Central Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 754, p. 141893, fev. 2021.

RAMOS, M. R. et al. Contaminação por metais pesados em áreas agrícolas no estado do Tocantins. **Tecno-Lógica**, v. 24, n. 2, p. 166–178, 5 jul. 2020.

REIS, T. et al. **Oportunidades e desafios climáticos no Cerrado brasileiro**. Disponível em: <[https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2017/11/PB-Cerrado-COP23-web\\_pt.pdf](https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2017/11/PB-Cerrado-COP23-web_pt.pdf)>. Acesso em: 2 set. 2022.

RESENDE, M. et al. **Pedologia: Base para distinção de Ambientes**. UFLA. Lavras: [s.n.], 2014.

RIBEIRO, H. DE F.; FARIA, K. M. S. DE; CEZARE, C. H. G. Dinâmica espaço-temporal do desmatamento nos territórios da cidadania no nordeste goiano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 1180–1196, 2019.

RIBEIRO, M. A. DO C. **Contaminação do solo por metais pesados**. 249f. Dissertação (Mestrado)- Engenharia do Ambiente. Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, 2013.

RIEUWERTS, J. S. The mobility and bioavailability of trace metals in tropical soils: a review. **Chemical Speciation & Bioavailability**, v. 19, n. 2, p. 75–85, 12 jan. 2007.

ROCHA, W. S. D. DA. **Sorção de 2,4-D e diuron nos agregados organominerais de latossolos em função dos conteúdos de matéria orgânica e de água**. 88f. Tese (Doutorado em Agronomia)- Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz. Universidade de São Paulo, 2003.

RODRIGUES, C.; ADAMI, S. Técnicas fundamentais para o estudo de bacias hidrográficas. In: VENTURI, L.A.B (Org.). **Praticando geografia: técnicas de campo e laboratório**. São Paulo: Oficina de textos, p. 147–166. 2002.

- RODRIGUES, E. C. **Taxa de mortalidade por câncer infanto-juvenil e sua relação com a densidade de cultivo agrícola em Minas Gerais: um estudo ecológico.** [s.l.] Universidade Federal de Ouro-Preto, 2018.
- RODRIGUEZ, J. M. M. **Geoecologia das Paisagens: uma visão geossistêmica da análise ambiental.** 5. ed. Fortaleza: UFC, 2017.
- RODRÍGUEZ, J. M. M. **Geografía de los paisajes: primera parte – paisajes naturales.** 2. ed. Havana: Editorial Universitaria, 2008.
- RODRÍGUEZ, J. M. M.; SILVA, E. V.; VICENS, R. S. O legado de Sochava. **GEOgraphia**, v. 17, n. 33, p. 225, 2015.
- ROHR, L. A. **Tratamento de sementes de soja com zinco: adsorção e distribuição de zinco durante a germinação e sua relação com o desempenho inicial das plantas.** 58f. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, 2021.
- RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais.** Embrapa, 2010. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31004/1/BPD-8.pdf>>. Acesso em 02 de jan.de 2023.
- ROSA, R. M.; FERREIRA, V. DE O. Aspectos morfológicos, morfométricos e de cobertura e uso da terra da bacia hidrográfica do rio Araguari, Minas Gerais, Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 2, n. 44, 2022.
- ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: Subsídios para o planejamento ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos. 2006.
- ROSS, J. L. S. Geografia e as transformações da natureza: relação sociedade-natureza. *In:* LEMOS, A.I.G. & GALVANI, E. (Org.). **Geografia, tradições e perspectivas: interdisciplinaridade, meio ambiente e representações.** Expressão ed. São Paulo: [s.n.]. p. 119–138. 2010.
- ROSS, J. L. S. et al. Trajetoria do uso e ocupação das terras. *In:* ROSS, J.L.S. et al. (Org.). **Ordenamento territorial do Brasil : potencialidades naturais e vulnerabilidades sociais.** Osasco, SP: [s.n.]. p. 585. 2022.
- RUBIN, J. C. R. DE; SOUZA, M. A. T. DE. Mineração, Quilombos e Engenhos: Análise da Paisagem em Vila Boa, Goiás, Brasil. **Revista de Geologia**, v. 32, n. 1, 2019.
- RUBIRA, F. G. et al. Pedogeomorphological systems in the interpretation of the evolution of quaternary landscapes in humid tropical climates. **Mercator**, v. 18, n. 9, p. 1–16, 15 set. 2019.
- SÁ, J. C. M. et al. Carbon Depletion by Plowing and its Restoration by No-Till Cropping Systems in Oxisols of Subtropical and Tropical Agro-Ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 26, n. 6, p. 531–543, 2015.
- SANO, E. E. et al. Características gerais da paisagem do Cerrado. *In:* BOLFE, É. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Org.). **Dinâmica agrícola no cerrado: Análises e projeções.** Embrapa ed. Brasília-DF: [s.n.]. p. 312, 2020.
- SANT'ANA, G. R. S.; CASTRO, S. S. DE. Impactos Sobre a Biota e a Qualidade de Latossolos Cultivados com Cana-de-Açúcar. **Revista Processos Químicos**, 2014.
- SANTOS, D. DA S. **Metais pesados em áreas agrícolas e cerrado nativo no oeste da Bahia.** 103f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

- SANTOS, M. A. **A natureza do espaço: técnica e tempo/razão**. 4 ed. ed. São Paulo: [s.n.], 2006.
- SAUEIA, C. H. R. **Caracterização radioquímica do fosfogesso e implicações radiológicas de sua utilização como material de construção**. 82f. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, 1998.
- SEABRA, V. DA S.; VICENS, R. S.; CRUZ, C. B. M. Conceito de Paisagem numa Perspectiva Geossistêmica. **Revista Ambientale**, v. 1, n. 4, 2013.
- SHEHAB, Z. N. et al. Spatial variation impact of landscape patterns and land use on water quality across an urbanized watershed in Bentong, Malaysia. **Ecological Indicators**, v. 122, p. 107254, mar. 2021.
- SILVA, A. C. A. et al. Análise temporal da suscetibilidade do entorno do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros – Goiás. **Geoambiente On-line**, n. 37, p. 261–281, 13 jul. 2020.
- SILVA, B. S. G. **Delimitação automática de bacias usando o programa taudem/mapwindow**. São José dos Campos, INPE, 2004.
- SILVA, C. M.; COSTA JÚNIOR, C. E. O. <sup>228</sup>Ra em forrageiras cultivadas em solo com anomalia do tório. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v.6, n.2, 2018.
- SILVA, F. B. V. DA; NASCIMENTO, C. W. A. DO; ARAÚJO, P. R. M. Environmental risk of trace elements in P-containing fertilizers marketed in Brazil. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 17, n. 3, p. 635–647, set. 2017.
- SILVA, L. S. **Mineralogia da fração argila dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista-Unesp, 2016.
- SOBRINHO, J. F. et al. NATUREZA, MEIO AMBEINTE E A TEORIA GERAL DOS SISTEMAS: Bases Ambientais, Econômicas e Jurídicas. **HOLOS**, v. 8, p. 104–125, 31 dez. 2017.
- SOTCHAVA, V. B. **Estudo de Geossistemas**. São Paulo: [s.n.], 1997.
- SOTCHAVA, V. B. **Por uma teoria de classificação de Geossistemas da vida terrestre**. Instituto ed. São Paulo: [s.n.], 1978.
- SOUSA, J. B.; NASCIMENTO, F. R.. Geologia, geomorfologia e pedologia da bacia hidrográfica do Ribeirão Areado, Minas Gerais. In: PINTO, J. B. (Org.). **Contribuições para a Geografia de Mato Grosso**. 1 ed. Rio de Janeiro: Letra Capital, 2022.
- SOUZA, H. A. DE et al. Manejo da fertilidade do solo em sistemas intensivos de produção de grãos e fibras no bioma cerrado do nordeste brasileiro. In: SOUZA, H. A. DE; LEITE, L. F. C.; MEDEIROS, J. C. (Org.). **Solos Sustentáveis para a agrivultura no nordeste**. Empresa Br ed. Brasília-DF: Embrapa, 2021.
- SOUZA, J. C. DE; NUNES, N. N. A.; HERCULANO, R. M. DA C. S. Unidades de paisagem e dinâmica temporal do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Rio das Pedras, Goiás, Brasil. **Revista Cerrados**, v. 19, n. 01, p. 03–22, 1 jan. 2021.
- SOUZA, Z. M. DE; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesq. Agropec. Bras**, v. 39, n. 5, p. 491–499, 2004.
- SPOSITO, G.; PAGE, A. L. Cycling of metal ions in the soil environment. In: **Metal Ions in Biological Systems, Circulation of Metals in the Environment**. Marcel Dek ed. New York, USA: [s.n.]. p. 287–332, 1984.

- STRASSBURG, B. B. N. et al. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 4, p. 99, 2. 2017.
- SUERTEGARAY, D. M. A. O atual e as tendências do ensino e da pesquisa em geografia do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, 2005.
- TAVARES, K. S. R.; MOURA, R. S.; AMORIM, R. R. Caracterização geossistêmica do domínio do Cerrado: subsídios a análise da paisagem. **Espaço em Revista**, v. 24, n. 1, p. 218–238, 2022.
- TAVARES, S. R. L. **Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: Conceitos básicos e fundamentos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2013.
- THEOBALD, D. F. **Qualidade de dados geospaciais: análise da consistência topológica no mapeamento de cobertura da terra do município de Curitiba - PR**. 2001. Disponível em: <<https://www.esri.com/news/arcuser/0401/topo.html>>. Acesso em: 4 jul. 2022.
- THEODORO, S. H. et al. Rochas basálticas para rejuvenescer solos intemperizados. **Revista Liberato**, p. 45–58, 2021.
- TOMLINSON, D. L. et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. **Helgoländer Meeresuntersuchungen**, v. 33, n. 1–4, p. 566–575, 1980.
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977.
- UECKER, M. E. **Exposição aos agrotóxicos em Mato Grosso e ocorrência de malformações congênitas em crianças menores de cinco anos de idade atendidas em Hospitais de Cuiabá: estudo caso-controlado**. 94f. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Saúde Coletiva. Universidade Federal de Mato Grosso, 2012.
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). **Sources and effects of ionizing radiation**. United Nat ed. New York, USA: [s.n.], 2000.
- USEPA-UNITED STATES ENVIRONMENT. **Background Report on Fertilizer Use, Contaminants and Regulations**. Columbus, 1999.
- VARGAS, J. P. R. DE et al. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth chemical attributes in long term period experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 185, p. 47–60, jan. 2019.
- VENDRAME, P. R. S. et al. Formas de ferro e alumínio e suas relações com textura, mineralogia e carbono orgânico em Latossolos do Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. Suplp, p. 1657–1666, 2011.
- VICENS, R. S.; RODRIGUEZ, J. M.; CRONEMBERGER, F. M. Paisagem Físico-Geográfica. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 64, n. 2, p. 2–17, 2020.
- VIDAL, M. R.; MASCARENHAS, A. L. DOS S. Estrutura e funcionamento das paisagens litorâneas cearenses à luz da Geoecologia das Paisagens. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 24, n. 3, p. 600–615, 2020.
- WU, J.; LU, J. Landscape patterns regulate non-point source nutrient pollution in an agricultural watershed. **Science of The Total Environment**, v. 669, p. 377–388, jun. 2019.
- XIAO, R. et al. Accumulation, ecological-health risks assessment, and source apportionment of heavy metals in paddy soils: A case study in Hanzhong, Shaanxi, China. **Environmental Pollution**, v. 248, p. 349–357, 2019.

XU, X. et al. Environmental pollution and kidney diseases. **Nature Reviews Nephrology**, v. 14, n. 5, p. 313–324, 2018.

YAN, G. et al. Enrichment and sources of trace metals in roadside soils in Shanghai, China: A case study of two urban/rural roads. **Science of The Total Environment**, v. 631–632, p. 942–950, 2018.

YANG, S. et al. Comparison of the concentrations, sources, and distributions of heavy metal(loid)s in agricultural soils of two provinces in the Yangtze River Delta, China. **Environmental Pollution**, v. 264, 2020.

YONGMING, H. et al. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China. **Science of The Total Environment**, v. 355, n. 1–3, p. 176–186, 2006.

ZGORELEC, Ž. et al. Effects of fertilisation on radionuclide uptake by maize from an acidic soil in northwestern Croatia. **Soil and Tillage Research**, v. 212, 2021.

ZHANG, W.; JIANG, F.; OU, J. Global pesticide consumption and pollution: with China as a focus. **Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences**, v. 1, n. 2, p. 125–144, 2011.