



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JESCE JOHN DA SILVA BORGES

SOLOS COLAPSÍVEIS E EXPANSIVOS DO BRASIL: abordagem multidisciplinar com
ênfase em cartografia de suscetibilidade, aplicações interativas e inteligência artificial

Recife

2024

JESCE JOHN DA SILVA BORGES

SOLOS COLAPSÍVEIS E EXPANSIVOS DO BRASIL: abordagem multidisciplinar com ênfase em cartografia de suscetibilidade, aplicações interativas e inteligência artificial

Tese em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de Geotecnia.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. Samuel França Amorim

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Borges, Jesce John da Silva.

Solos colapsíveis e expansivos do Brasil: abordagem multidisciplinar com ênfase em cartografia de suscetibilidade, aplicações interativas e inteligência artificial / Jesce John da Silva Borges. - Recife, 2024.

368 f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Coorientação: Prof. Dr. Samuel França Amorim.

1. Solos expansivos; 2. Solos colapsíveis; 3. Cartas de suscetibilidade; 4. Bandase; 5. Business Intelligence; 6. Aplicativos. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo. II. Amorim, Samuel França. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 624

JESCE JOHN DA SILVA BORGES

SOLOS COLAPSÍVEIS E EXPANSIVOS DO BRASIL: abordagem multidisciplinar com ênfase em cartografia de suscetibilidade, aplicações interativas e inteligência artificial

Tese em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de Geotecnia.

Aprovada em 04/03/2024

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira – UFPE

Coorientador: Prof. Dr. Samuel França Amorim - UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Kátia Vanessa Bicalho (examinadora externa)
Universidade Federal do Espírito Santo

participação por videoconferência

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior (examinador externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

participação por videoconferência

Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão (examinador externo)
Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais, Ubirajara e Josefa, pelo esforço em prol dos meus estudos.

A minha esposa, Larissa, pelo respeito, amor e companheirismo em todos os momentos pessoais e profissionais.

Ao meu irmão, James, aos meus cunhados, Laura, Rafaela e Saulo, aos meus sobrinhos, James Filho, Felipe, Marina, Rafael e Bruno, pela carinhosa presença em minha vida.

Ao meu orientador, prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira, e ao coorientador, prof. Doutor Samuel França Amorim, pelo apoio dedicado em todos os momentos.

A minha inesquecível irmã Joyce Geize da Silva Borges (*in memorian*),

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força concedida nos momentos difíceis e pela oportunidade de concluir mais uma etapa.

A toda minha família e amigos pelo apoio em todas as fases da minha vida.

Ao professor Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira pela orientação, pelas sugestões, pelas críticas e pelos conhecimentos transmitidos ao longo de toda minha formação acadêmica na UFPE.

Ao coorientador, professor Dr. Samuel França Amorim, pela atenção, pela contribuição, pelas sugestões e pelo apoio prestado durante a execução deste trabalho.

Agradeço ao Grupo de Estudos dos Solos Não Saturados da Universidade Federal de Pernambuco, especialmente às colegas Júlia Holanda, Larissa Silva, Débora Alves e Raíza Bezerra pela contribuição no desenvolvimento do Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE).

Ao Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco, pela oportunidade de desempenhar minhas atividades profissionais de modo a garantir o suporte financeiro para minha vida pessoal, subsidiando a realização dos meus objetivos acadêmicos.

À Universidade Federal de Pernambuco, por ter me concedido a oportunidade de cursar e concluir outra pós-graduação em engenharia civil.

RESUMO

Solos colapsíveis e expansivos são responsáveis por problemas em diversas obras de engenharia que podem resultar em perdas econômicas e danos ambientais. A identificação desses solos é fundamental na etapa de planejamento, permitindo orientar o uso e ocupação do solo. As inovações tecnológicas têm simplificado o processamento de grandes conjuntos de dados, fornecendo informações essenciais para embasar medidas orientativas e preventivas. Este estudo se fundamenta em tecnologias, como Sistema de Informações Geográficas (SIG), *Business Intelligence* (BI) e Computação em Nuvem (CN), com o objetivo de elaborar cartas de suscetibilidade, ampliar Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE), criar painéis de BI e desenvolver aplicativos. Os produtos cartográficos foram gerados de duas maneiras: uma abordagem objetiva, que utilizou redes neurais artificiais e dados de climatologia, pedologia e geologia; e outra abordagem subjetiva, que incluiu a opinião de especialistas com dados de climatologia e pedologia. Quanto ao banco de dados, painéis e aplicativos, foram aplicadas técnicas de análise estatística, processamento de dados e programação, respectivamente. Os resultados evidenciam um melhor desempenho para cartas oriundas do modelo matemático quanto à identificação de ocorrência dos dois solos. A carta interpretativa de solos colapsíveis apontou suscetibilidade alta em 27,8%, média em 3,4% e baixa em 16,8% do território nacional. A ausência de comportamento colapsível equivale a 49,4%. Já a carta interpretativa de solos expansivos apontou suscetibilidade alta em 35,9%, média em 9,8% e baixa em 3,7%. A ausência de comportamento expansivo representa 48,0%. Em ambos os solos, os corpos de água e as áreas urbanas correspondem ao percentual de 2,6%. Essas cartas têm apenas caráter orientativo e não devem substituir os ensaios de campo e laboratório em nenhuma circunstância. A distribuição não uniforme dos dados pelo país, aliada à variação nas escalas e fontes dos mapas, são fatores limitantes. O repositório de dados geotécnicos resultou em 267 registros de solos colapsíveis e 259 registros de solos expansivos. A análise estatística revelou que os dados são predominantemente não paramétricos. Baseado na medida de tendência central (mediana), os solos colapsíveis foram classificados como Areia Argilosa (SC), enquanto os solos expansivos foram identificados como Argila Siltosa de Alta Compressibilidade (CH - MH). Existe diferença estatisticamente significativa entre as propriedades desses solos. As tecnologias possibilitaram transformar o grande volume de dados em informações relevantes, as quais são transmitidas de maneira interativa.

Palavras-chave: Solos colapsíveis. Solos expansivos. Cartas de suscetibilidade. Bandase. *Business Intelligence*. Aplicativos.

ABSTRACT

Collapsible and expansive soils are responsible for problems in various engineering works that can result in economic losses and environmental damage. The identification of these soils is fundamental in the planning stage, allowing for guidance in soil use and occupation. Technological innovations have simplified the processing of large datasets, providing essential information to support guiding and preventive measures. This study is based on technologies such as Geographic Information Systems (GIS), Business Intelligence (BI), and Cloud Computing (CC), aiming to develop susceptibility maps, expand the Special Soils Database (BANDASE), create BI dashboards, and develop applications. The cartographic products were generated in two ways: an objective approach using artificial neural networks and data from climatology, pedology, and geology; and a subjective approach, which included expert opinion along with data from climatology and pedology. Regarding the database, dashboards, and applications, statistical analysis techniques, data processing, and programming were applied, respectively. The results show better performance for maps derived from the mathematical model regarding the identification of the occurrence of both soils. The interpretative map of collapsible soils indicated high susceptibility in 27.8%, medium in 3.4%, and low in 16.8% of the national territory. The absence of collapsible behavior accounts for 49.4%. On the other hand, the interpretative map of expansive soils indicated high susceptibility in 35.9%, medium in 9.8%, and low in 3.7%. The absence of expansive behavior represents 48.0%. In both soils, water bodies and urban areas correspond to 2.6%. These maps are only for guidance and should not replace field and laboratory tests under any circumstances. The uneven distribution of data across the country, combined with variation in map scales and sources, are limiting factors. The geotechnical data repository resulted in 267 records of collapsible soils and 259 records of expansive soils. Statistical analysis revealed that the data are predominantly non-parametric. Based on the measure of central tendency (median), collapsible soils were classified as Silty Clay (SC), while expansive soils were identified as Silty Clay of High Compressibility (CH - MH). There is a statistically significant difference between the properties of these soils. The technologies enabled the transformation of the large volume of data into relevant information, which is transmitted interactively.

Keywords: Collapsible soils. Expansive soils. Susceptibility Letters. Bandase. Business intelligence. Application.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.3	HIPÓTESES	19
1.4	DELIMITAÇÕES	19
1.5	PRESSUPOSTOS, RESSALVAS E FATORES LIMITANTES	20
1.6	ESTRUTURA DA TESE	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	SUCÇÃO EM SOLOS NÃO SATURADOS	24
2.2	SOLOS COLAPSÍVEIS	26
2.2.1	Conceito	26
2.2.2	Características	27
2.2.3	Locais de ocorrência	31
2.2.4	Métodos de identificação	36
2.2.5	Problemas em obras de engenharia registrados na literatura	44
2.3	SOLOS EXPANSIVOS	51
2.3.1	Conceito	51
2.3.2	Características	52
2.3.3	Locais de ocorrência	56
2.3.4	Métodos de identificação	62
2.3.5	Problemas em obras de engenharia registrados na literatura	67
2.4	CARTOGRAFIA DE SOLOS COLAPSÍVEIS E EXPANSIVOS	70
2.5	CONDICIONANTES	76
2.5.1	Climatologia	76
2.5.2	Pedologia	80

3	MATERIAIS E MÉTODOS	90
3.1	RECURSOS E FERRAMENTAS	90
3.1.1	Paleta de cores e ilustrações	90
3.1.2	Ferramentas utilizadas no trabalho	91
3.2	METODOLOGIA	97
3.2.1	Construção do Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE)	97
3.2.1.1	<i>Criação de Formulários</i>	100
3.2.1.2	<i>Métodos Estatísticos</i>	101
3.2.2	Elaboração das cartas de suscetibilidade	105
3.2.2.1	<i>Critérios climatológicos de suscetibilidade</i>	108
3.2.2.2	<i>Critérios pedológicos de suscetibilidade</i>	110
3.2.2.3	<i>Procedimentos adotados na elaboração dos produtos cartográficos</i>	112
3.2.2.4	<i>Procedimentos adotados na elaboração das cartas interpretativas de RNA</i>	119
3.2.3	Confecção dos painéis de BI	123
3.2.4	Criação dos aplicativos	125
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	128
4.1	BANCO DE DADOS DE SOLOS ESPECIAIS (BANDASE)	128
4.1.1	Formulários	129
4.1.2	Análise Estatística	131
4.1.3	Aplicação dos critérios de identificação	151
4.1.4	Resultados parciais do BANDASE	161
4.2	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA DE SOLOS EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS (SIGSEC)	163
4.2.1	Carta derivada de suscetibilidade com base na Climatologia	163
4.2.2	Cartas derivadas de suscetibilidade com base na Pedologia	166
4.2.2.1	<i>Critério Conservador</i>	166
4.2.2.2	<i>Critério Ponderado</i>	169
4.2.3	Cartas Interpretativas	172
4.2.3.1	<i>Critério Conservador</i>	172

4.2.3.2	<i>Critério Ponderado</i>	175
4.2.3.3	<i>Critério Inverso</i>	178
4.2.3.4	<i>Redes Neurais Artificiais</i>	180
4.2.4	Verificação da metodologia	183
4.2.4.1	<i>Carta derivada climatológica</i>	183
4.2.4.2	<i>Carta derivada pedológica</i>	184
4.2.4.3	<i>Carta interpretativa</i>	186
4.2.4.4	<i>Carta interpretativa oriunda de RNA</i>	191
4.2.5	Análise comparativa de produtos cartográficos para Pernambuco	196
4.2.5.1	<i>Carta derivada climatológica</i>	197
4.2.5.2	<i>Carta derivada pedológica</i>	198
4.2.5.3	<i>Carta interpretativa</i>	200
4.2.6	Resultados parciais do SIGSEC	205
4.3	PAINÉIS DE BUSINESS INTELLIGENCE DE SOLOS EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS (PABISEC)	207
4.4	APLICATIVO DE SOLOS EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS (APPSEC)	213
4.5	SÍTIO ELETRÔNICO DE SOLOS EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS	215
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	217
5.1	CONCLUSÕES	217
5.1.1	Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE)	217
5.1.2	Sistema de Informação Geográfica de Solos Expansivos e Colapsíveis do Brasil (SIGSECBR)	218
5.1.3	Painéis de Business Intelligence de Solos Expansivos e Colapsíveis (PABISEC)	219
5.1.4	Aplicativo de Solos Expansivos e Colapsíveis (APPSEC)	219
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	220
	REFERÊNCIAS	222
	APÊNDICE A - NOÇÕES BÁSICAS DE CARTOGRAFIA	244
	APÊNDICE B - CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA	256
	APÊNDICE C - SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	269

APÊNDICE D - BUSINESS INTELLIGENCE	280
APÊNDICE E - GOOGLE EARTH ENGINE (GEE)	290
APÊNDICE F - INFORMAÇÕES SOBRE RNA - REDE BR03	296
APÊNDICE G - SOLUÇÕES APLICADAS AOS SOLOS COLAPSÍVEIS	301
APÊNDICE H - SOLUÇÕES APLICADAS AOS SOLOS EXPANSIVOS	317
APÊNDICE I - ASPECTOS PEDOLÓGICOS	327
APÊNDICE J - DADOS TABULARES CONSOLIDADOS	348
APÊNDICE K - PRODUTOS CARTOGRÁFICOS	349
APÊNDICE L - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	368

1 INTRODUÇÃO

A compreensão sobre o comportamento dos solos não saturados representa um conhecimento importante na área da Engenharia Geotécnica, posto que é significativo o número de obras construídas sobre esses solos. As regiões tropicais, com climas áridos e semiáridos, são locais propícios para a ocorrência dos solos não saturados, principalmente nos ambientes onde o índice de evapotranspiração é superior ao da precipitação.

Dependendo dos condicionantes, das solicitações de carga ou do umedecimento, a variabilidade volumétrica pode causar o fenômeno de colapso ou de expansão. O primeiro, relacionado aos solos colapsíveis, é caracterizado pela redução de volume devido à mudança de sucção, implicando em rearranjo da estrutura do solo. Já o segundo, pertinente aos solos expansivos, tem como característica a presença de argilominerais que apresentam capacidade expansiva e mudança de umidade. A variação volumétrica, seja oriunda de comportamento colapsível ou expansivo, é responsável por diversos problemas nas edificações de obras de engenharia, podendo envolver patologias relacionadas ao estado limite de serviços e ao estado limite último da edificação. Os problemas podem resultar em perdas econômicas e humanas, assim como em danos ambientais.

Ferreira (1995), Medero (2005) e Opukumo *et al.* (2022) destacam a ocorrência de solos colapsíveis em diversos países, assim como Chen (1975) e Quispe *et al.* (2014). Por outro lado, Schreiner (1987), Murthy (2002) e Ali, Al-Taie e Al-Kalili (2022) evidenciam a presença de solos expansivos em várias nações. No Brasil, solos colapsíveis e expansivos estão presentes em diversos estados, conforme ressaltado por Sobral (1956), Ferreira (1989), e, mais recentemente, por Ferreira e Vilar (2023).

A ocorrência de solos colapsíveis e expansivos no Brasil é expressiva e objeto de ampla gama de estudos. Entretanto, sua incidência não é distribuída uniformemente nos estados ou municípios. Tais trabalhos são decorrentes dos problemas e danos estruturais ocasionados pelo comportamento diferenciado desses solos.

A instabilidade volumétrica dos solos não saturados já proporcionou as mais variadas patologias de construção civil, tais como: trincas e rachaduras em paredes das edificações, rupturas e ondulações em pavimentos rodoviários, rupturas e fissuras em canais de irrigação e reservatórios (VASCONCELOS, 2001; SILVA, M. J. R., 2003; CONCIANI, 2006; CAVALCANTE *et al.*, 2006; MENDONÇA NETO, 2011; FERREIRA, C. V. *et al.*, 2015;

BEZERRA, 2019). Nas patologias elencadas, é possível observar danos envolvendo o estado limite de serviço (fissuras) e o estado limite último (rupturas) das obras de engenharia.

Importante salientar que, na prática, grande parte dos projetos de construção, especialmente as habitações de baixo custo, não são elaborados com base em estudos geotécnicos prévios, as exceções se limitam apenas à execução de sondagens de simples reconhecimento. Embora os valores do índice de resistência à penetração (SPT) sejam utilizados como parâmetro de identificação de solo colapsível, Ferreira (1995) assevera que esse critério não é adequado, posto que valores baixos ou altos de SPT não estão relacionados à colapsibilidade do solo, sendo esse fato, posteriormente, ratificado por Fucale (2000). Os métodos tradicionais de identificação, baseados em ensaios de laboratórios e de campo, não permitem, muitas vezes, um fácil reconhecimento desses solos.

Nota-se que a identificação dos solos em tela não representa uma tarefa fácil, isto se deve a existência de diversos fatores que influenciam no comportamento de colapso ou expansão. A título de exemplo, Ferreira (1995), Souza Neto (2004), Ferreira (2008), Vilar e Ferreira (2015) citam aspectos como o estado de tensão, a estrutura, a composição mineralógica, a vazão de inundação, dentre outros. Tal conjuntura, segundo os referidos autores, torna a identificação precisa do fenômeno uma atividade complexa. Contudo, existe um conjunto de condicionantes preponderantes que, associados às características geotécnicas, permite caracterizar os solos potencialmente colapsíveis e expansivos, cabendo destaque para os condicionantes climatológicos, geológicos e pedológicos.

Do ponto de vista geral, depreende-se que ainda existe, no tocante à disponibilidade de forma prática e acessível aos profissionais, uma carência de mecanismos de identificação que permitam o reconhecimento dos locais com maior suscetibilidade ao colapso ou expansão para a totalidade da extensão territorial do Brasil. O uso da cartografia geotécnica desponta como uma ferramenta de grande contribuição no processo de identificação, posto que permite levantar e analisar os atributos que compõem o meio físico em grandes extensões do território, permitindo aos usuários o conhecimento da realidade dos locais de interesse. Tal ferramenta proporciona o estabelecimento de orientações técnicas e preventivas, minimizando os riscos e os custos que porventura possam ocorrer nas edificações assentadas sobre os solos colapsíveis e expansivos.

A praticidade e a acessibilidade podem ser alcançadas pelo uso da tecnologia de Computação em Nuvem (CN), dado que essa ferramenta permite o acesso remoto aos programas, ao armazenamento de arquivos e ao processamento de dados em ambientes

compartilhados de maneira integrada através da internet, possibilitando o seu uso em qualquer lugar. Perante o grande volume de dados decorrente da área de estudo deste trabalho, a tecnologia de *Business Intelligence* (BI) fornece recursos essenciais para transformar o significativo volume de dados em conhecimento (ELEUTÉRIO, 2015). A infraestrutura de nuvem do *Google Earth Engine* (GEE) proporciona alta capacidade de processamento de um grande conjunto de dados geoespaciais, disponibilizando interfaces amigáveis aos usuários (GORELICK *et al.*, 2017).

O uso conjunto dessas ferramentas tem o condão de reunir poderosos recursos de tratamento, processamento, análise de dados, facilidade de atualização e divulgação. Em virtude disso, vislumbra-se que o emprego dessas tecnologias resulte na disponibilização de informações relevantes pertinentes aos solos colapsíveis e expansivos para todo o território brasileiro.

1.1 JUSTIFICATIVA

Jones Jr. e Holtz (1973) constataram que, nos EUA, os prejuízos decorrentes de solos colapsíveis e expansivos já alcançaram cerca de 2,3 bilhões de dólares por ano, representando 2 (duas) vezes os valores dos danos oriundos de enchentes, furacões e terremotos.

Lawton, Frigaszy e Hetherington (1992) discorrem sobre os custos envolvidos na recuperação de danos associados ao colapso do solo de fundação em estruturas construídas no sudeste da Califórnia. Ressaltam que, em um único projeto, o custo estimado foi de US\$ 36.000.000, já em outros projetos em que esses autores estavam envolvidos, o custo total alcançou a quantia de US\$ 100 milhões. Na Bulgária, Jefferson *et al.* (2005) estimaram que, nas últimas décadas, os prejuízos superaram a marca de US\$ 100 milhões.

De acordo com Nelson e Miller (1992), a Sociedade Americana de Engenheiros Civil estima que 1 (uma) em cada 4 (quatro) casas apresenta alguma patologia causada por solos expansivos, podendo causar, em um ano típico, uma perda financeira mais significativa para os proprietários em comparação aos valores despendidos com danos causados por tremores de terra, inundações, tornados e furacões combinados.

Paiva (2016) ressalta que as companhias de seguro gastam milhões de dólares todos os anos para reparar lares afetados por solos expansivos. Segundo Morais (2017), a *New York State Division of Homeland Security and Emergency* realizou, em 2014, uma pesquisa sobre os custos relacionados aos danos causados pela expansão de solos. Desse trabalho,

verificou-se que, somente nos Estados Unidos da América, os valores acumulados alcançaram o montante de US\$ 300 milhões por ano. Estima-se que tal quantia corresponde a 25% dos problemas encontrados em casas ou edifícios dos EUA.

No Brasil, apesar de existirem na literatura vários registros sobre os danos causados pelos solos colapsíveis e expansivos, ainda é acentuada a carência em relação à totalidade dos registros de eventos e à quantificação dos custos financeiros envolvidos. Diversos autores já registraram os problemas em obras de engenharia associados aos solos em questão, podendo ser citados os seguintes: Zaine (2000), Justino da Silva (2001), Vasconcelos (2001), Oliveira (2002), Cavalcante *et al.* (2006), Conciani (2006), Rodrigues (2007), Mendonça Neto (2011), Ferreira *et al.* (2015), Pérez León (2017), Bezerra (2019) e Ferreira *et al.* (2020).

Amorim (2004) elenca algumas referências clássicas, sendo elas:

- ⇨ Conjunto Habitacional Massangana (Petrolina-PE), das 1.200 casas construídas, 600 apresentaram trincas e rachaduras devido ao colapso do solo de fundação (ARAGÃO; MELO, 1982);
- ⇨ Conjuntos habitacionais e projetos de irrigação dos municípios de Petrolândia-PE (2.121 casas) e Santa Maria da Boa Vista-PE (1.856 casas) apresentaram patologias causadas pelos solos colapsíveis (FERREIRA, S. R. M., 1988);
- ⇨ Reassentamento de Itaparica (Rodelas-BA), 15% das 5.043 casas apresentaram danos causados pelos solos expansivos;
- ⇨ Conjunto Habitacional Privê Village (Petrolina-PE), do total de 14 (quatorze) casas, 7 (sete) casas apresentaram fissuras bastante proeminentes, levando os moradores à sensação de desconforto e insegurança (SILVA, M. J. R., 2003).

Nota-se que as referências citadas estão relacionadas ao setor de habitações populares, ramo que esteve em ascensão ao longo dos anos devido aos programas do Governo Federal. Contudo, é importante frisar que a problemática causada pelos solos colapsíveis e expansivos abrange outras obras de engenharia como barragens, canais, rodovias, aeroportos, taludes, torres de transmissão, entre outras.

Perante as perdas, os custos econômicos e os incontestáveis danos causados pelos solos problemáticos, verifica-se a importância de adoção de ferramentas que possibilitem a prevenção e a correção de situações relacionadas aos desastres naturais. Nesse ponto, a cartografia geotécnica surge como uma ferramenta de grande potencial na identificação e

gestão do uso e ocupação dos solos especiais em foco, já que proporciona conhecimento sobre o meio físico de modo a subsidiar o estabelecimento de medidas para sua adequada gestão e ocupação do solo.

Na literatura, é possível constatar o uso de carta geotécnica na identificação de solos colapsíveis e expansivos. Para o Estado de Pernambuco, Vasconcelos (2001) elaborou mapas de suscetibilidade utilizando os levantamentos climatológico, pedológico e geológico, classificando as unidades de mapeamento em três níveis de suscetibilidade: alto, médio e baixo.

Posteriormente, adotando sistemática similar, Silva (2003) e Amorim (2004) elaboraram cartas de suscetibilidade para o município de Petrolina-PE e para o Estado de Pernambuco, respectivamente. Recentemente, Aquino (2020) elaborou cartas interpretativas de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos para o município de Teresina-PI.

Nessa linha, segue o objetivo desta tese, porém com uma abrangência maior, visto que visa elaborar cartas de suscetibilidade para todo o território do Brasil. Desponta, dessa forma, perante o contexto da cartografia geotécnica brasileira, como um trabalho inédito no que se refere aos solos colapsíveis e expansivos.

Somando a isso, a peculiaridade deste trabalho também é caracterizada pelo uso de linguagem de programação e das tecnologias de Computação em Nuvem (CN) e *Business Intelligence* (BI). A linguagem de programação representa o recurso utilizado para o desenvolvimento dos aplicativos web visando gerar um ambiente amigável para os usuários no acesso aos documentos cartográficos na internet. Quanto às tecnologias, o seu emprego tem papel fundamental em decorrência do grande volume de dados resultantes da área de estudo, tendo em vista tratar-se de um país continental.

A aplicação do conjunto de tecnologias mencionado almeja disponibilizar banco de dados, cartas de suscetibilidade, painéis de BI e aplicativos web para os profissionais e a comunidade acadêmica, proporcionando um ambiente de fácil acesso às informações relacionadas aos solos colapsíveis e expansivos do Brasil.

Em síntese, quanto à importância teórica, este trabalho contribui para a Cartografia Geotécnica Nacional, tendo em vista que sua área de estudo abrange espacialmente todo o território brasileiro. Já no que diz respeito à relevância prática, o emprego das tecnologias fornece praticidade por viabilizar a disponibilização de conteúdo pertinente aos solos colapsíveis e expansivos, facilitando acesso aos dados e análise pelos profissionais e pela

comunidade acadêmica, gerando conhecimento. Por fim, no que concerne à viabilidade do trabalho, a tese não requer o dispêndio de recursos financeiros, posto que envolve a utilização de ferramentas gratuitas e o uso de dados abertos.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo Geral

Elaborar cartas geotécnicas de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos do Brasil com base nos levantamentos climatológico, pedológico e geológicos; disponibilizar Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE) de forma *online*; expor resultados do trabalho por meio de painéis, gráficos e tabelas dinâmicas oriundos de tecnologia de *Business Intelligence* (BI); e desenvolver aplicativos web, com uma interface amigável ao usuário, facilitando o acesso aos produtos cartográficos resultantes.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral é necessário realizar os seguintes objetivos específicos:

- ⇒ coletar dados espaciais referentes à climatologia, geologia e pedologia do Brasil, bem como realizar a compatibilização desses documentos cartográficos;
- ⇒ estabelecer, quanto aos dados climáticos e pedológicos, os critérios de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos, visando elaborar cartas derivadas e interpretativas do Brasil;
- ⇒ realizar pesquisa bibliográfica com o intuito de reunir informações geotécnicas sobre solos colapsíveis e expansivos do Brasil, com foco na estruturação e formatação de um banco de dados adequado para a aplicação das tecnologias CN e BI, desenvolvendo painéis para gerar relatórios, tabelas dinâmicas e gráficos interativos;
- ⇒ elaborar cartas interpretativas do Brasil com base em modelo matemático desenvolvido por Holanda (2022), resultante de aplicação de Rede Neural Artificial (RNA) em atributos climatológicos, geológicos e pedológicos;
- ⇒ criar código de programação para desenvolver aplicativos web com interface amigável, permitindo acesso interativo aos produtos cartográficos;

- ⇨ desenvolver site para compartilhar os resultados deste estudo com a comunidade acadêmica e profissionais de Engenharia, bem como facilitar a atualização do banco de dados por meio de formulário integrado, com o objetivo de fortalecer as pesquisas futuras do Grupo de Estudos dos Solos Não Saturados da Universidade Federal de Pernambuco.

1.3 HIPÓTESES

A suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos do Brasil pode ser obtida por meio da elaboração de cartas geotécnicas, fundamentadas em levantamentos climatológico, pedológico e geológicos. Estas cartas, por sua vez, possuem um caráter essencialmente orientativo para o uso e ocupação do solo. Ademais, os resultados podem ser apresentados por meio de painéis de *Business Intelligence* e de aplicativos web, proporcionando uma visão geral rápida e dinâmica, além de facilitar a interação com os usuários.

1.4 DELIMITAÇÕES

Este trabalho abrange a elaboração de produtos cartográficos pertinentes à suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos para território nacional, bem como a estruturação, a consolidação e a mudança de plataforma do Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE), englobando estritamente os solos mencionados, para disponibilização aos profissionais e à comunidade acadêmica. Somando a isso, os painéis de *business intelligence* foram elaborados exclusivamente para a exposição dos resultados obtidos neste estudo. Ressalta-se que, em nenhuma hipótese, esses produtos cartográficos têm o condão de substituir os ensaios de campo e de laboratório.

Frisa-se que este trabalho se restringe apenas à implantação do BANDASE, no uso dos registros de ocorrência para a verificação da metodologia e na realização de análise estatística. Portanto, esta tese não abrange a análise pormenorizada dos dados contidos no referido banco. A carência de registros nas Regiões Centro-Oeste e Norte representa um fator limitante que impacta nas análises apresentadas neste estudo.

Registra-se que a elaboração dos produtos cartográficos apresentados neste trabalho foi realizada a partir de documentos cartográficos com escalas e fontes diversas. Sendo assim,

é imprescindível frisar que o emprego de escalas variadas, aliado à vasta extensão territorial do Brasil, apresenta desafios na representação fiel e detalhada de suas características geotécnicas. Além disso, as análises comparativas abrangem distintos condicionantes naturais e envolvem teorias de conhecimento divergentes, tais como objetividade e subjetividade.

1.5 PRESSUPOSTOS, RESSALVAS E FATORES LIMITANTES

Ressalta-se a necessidade de apresentar alguns fatores considerados no resultado deste trabalho, bem como as condições limitantes:

- ⇨ idoneidade das fontes de informação: presume-se que os mapas fundamentais e os dados espaciais utilizados neste trabalho representam fontes idôneas de informação, dado que foram coletadas de órgãos oficiais;
- ⇨ abordagem generalista: trata-se de um trabalho que envolve uma análise geral, tendo em vista a magnitude da área abrangida, que resulta em um volume expressivo de dados, não permitindo uma análise minuciosa dos inúmeros aspectos expostos nos resultados deste estudo;
- ⇨ abrangência dos resultados: exclui-se do resultado o território correspondente à ilha de Fernando de Noronha, dado que os mapas fundamentais não englobam essa extensão territorial. Ressalta-se que foram consideradas exclusivamente as feições dos polígonos contidas nos mapas fundamentais. Tal consideração também se aplica aos produtos cartográficos resultantes. Portanto, deve-se ter cautela no uso do resultado para escala com maior detalhamento;
- ⇨ informações quantitativas: buscou-se extrair informações das regiões e das unidades federativas, já que as tabelas de atributos dos mapas fundamentais não apresentam os campos referentes às delimitações supracitadas. Para isso, realizaram-se operações de geoprocessamento para coletar os quantitativos dessas áreas. Devido ao uso de bases cartográficas diferentes, reforça-se que os valores expostos são quantitativos aproximados, não devendo ser enquadrados como valores exatos;
- ⇨ cálculo de área: frisa-se que os cálculos de área das feições, necessários para obter os valores quantitativos, foram realizados em projeto separado, utilizando o Sistema de Projeção Cônica Equivalente de Albers. Em seguida, tais valores foram adicionados à tabela de atributos da camada do projeto principal usado no

QGIS, que adota o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, SIRGAS2000. Apesar dessa cautela, os quantitativos de áreas não resultaram em valores iguais aos contidos nos mapas fundamentais devido ao uso de base cartográficas diferentes;

- ⇨ banco de dados: sugere-se que, ao realizar estudos detalhados, o trabalho original seja consultado para obter informações acuradas sobre os dados. Ressalta-se que existe a pretensão de que BANDASE seja aprimorado ao longo dos anos através de atividades desempenhadas pelo Grupo de Estudos dos Solos Não Saturados da Universidade Federal de Pernambuco. Em relação às versões, caso o BANDASE tenha aceitabilidade e difusão pelos usuários, projeta-se que seja realizada a publicação semestral ou anual, dependendo do volume de incrementos e atualizações. Reitera-se que a escassez de registros nas Regiões Centro-Oeste e Norte constitui um fator limitante que influencia as análises apresentadas neste estudo;
- ⇨ corpos de água: ressalta-se que, diferentemente do mapa fundamental pedológico, as áreas correspondentes aos corpos de água não estão representadas no mapa climatológico. Em virtude disso, a carta derivada de climatologia não apresenta informações sobre os corpos de água. Portanto, registra-se que os quantitativos expostos sobre os níveis de suscetibilidade incluem tais áreas;
- ⇨ quantitativo de ferramentas: devido ao número de programas e aplicativos utilizados neste trabalho, a revisão bibliográfica ficou adstrita às temáticas relacionadas às principais ferramentas e as menos conhecidas.

1.6 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, conforme exposto a seguir.

O Capítulo 1 engloba a contextualização do trabalho com a introdução, a justificativa, os objetivos, as hipóteses, as delimitações, os pressupostos, as ressalvas e as limitações. Nessa parte, busca-se externar ao leitor informações básicas pertinentes ao tema, expondo a problemática ocasionada pelos solos colapsíveis e expansivos, bem como as tecnologias disponíveis que caracterizam, junto a abrangência da área de estudo, a particularidade desta pesquisa. Somando-se a isso, são apontados os objetivos, as suposições e as restrições envolvendo a pesquisa.

No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica envolvendo as seguintes temáticas: sucção em solos não saturados, conceitos, características, ocorrências, métodos de identificação, problemas em obras de engenharia, cartografia dos solos colapsíveis e expansivos e condicionantes.

O Capítulo 3 apresenta os recursos e as ferramentas utilizadas na execução deste trabalho, bem como a metodologia empregada para a obtenção dos resultados. Expõem-se técnicas aplicadas nesta pesquisa (cartografia, geoprocessamento, design gráfico, *business intelligence* e linguagens). Os procedimentos metodológicos estão didaticamente apresentados através de ilustrações.

No Capítulo 4 são expostos os resultados obtidos do banco de dados, os produtos cartográficos, os painéis de BI e os aplicativos. Dessa forma, esse capítulo visa apresentar ao leitor as principais descobertas do trabalho com base na análise dos dados coletados.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões relacionadas aos quatro pilares da pesquisa, ressaltando as limitações presentes, bem como a importância do trabalho para fomentação de estudos de modo a permitir o avanço do conhecimento sobre esses solos especiais. Em seguida, são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências e os apêndices. A Figura 1 apresenta a representação visual e esquemática pertinente ao mapa mental desta tese.

Figura 1 - Mapa mental da tese de doutorado.



Fonte: Autor (2024).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Após abordar o conteúdo sobre sucção em solos não saturados, são apresentados os conceitos, as características, os locais de ocorrência, os métodos de identificação e os problemas em obras de engenharia registrados na literatura referentes aos solos colapsíveis e expansivos. Em seguida, são apresentadas as aplicações de sistema de informação geográfica em solos colapsíveis e expansivos no Brasil. Por fim, são abordados os condicionantes climatológicos e pedológicos.

A complementação da revisão bibliográfica foi organizada em forma de apêndice. As noções básicas de cartografia são apresentadas no Apêndice A. O Apêndice B contém o conteúdo teórico sobre cartografia geotécnica. O Apêndice C trata do sistema de informação geográfica, enquanto o Apêndice D aborda a tecnologia de *Business Intelligence* (BI). O Apêndice E aborda o processamento de dados geoespaciais baseado em Computação em Nuvem (CN).

2.1 SUCÇÃO EM SOLOS NÃO SATURADOS

Segundo Marinho (1997), a sucção é conceituada como a pressão isotrópica da água intersticial, decorrente de condições físico-químicas. Tal fenômeno induz o sistema água/solo (água/material poroso) a absorver ou liberar água, em resposta às variações ambientais, resultando no aumento ou na redução do grau de saturação.

A sucção total, termo utilizado pelo referido autor, é composta por dois componentes distintos: a sucção matricial e a sucção osmótica. O primeiro está diretamente ligado à matriz do solo, ou seja, à combinação de tipos de partículas e ao arranjo estrutural. Já o segundo componente está relacionado à concentração química da água no solo. A sucção total do solo é inversamente proporcional ao seu grau de saturação.

Gitirana Junior, Marinho e Soto (2015) elucidam os parâmetros de cálculo da sucção da seguinte forma: a sucção total, representada por Ψ , engloba o componente matricial, associado à capilaridade, expresso como $(u_a - u_w)$, e o componente osmótico, representado por π , que decorre da concentração de sais na água. Sendo assim, a sucção total é definida como a soma desses dois tipos de sucção, conforme apresentado na Equação 1:

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (1)$$

em que:

Ψ - sucção total (kPa), representa a soma de duas parcelas de sucção, a sucção matricial e a sucção osmótica;

$(u_a - u_w)$ - sucção matricial (kPa), parcela de sucção referente à pressão isotrópica negativa da água intersticial do solo devido às forças de capilaridade e de adsorção e que depende da matriz do solo;

u_a - poropressão do ar (kPa), pressão de ar existente nos vazios de um solo não saturado;

u_w - poropressão da água (kPa), pressão de água existente nos vazios de um solo não saturado;

π - sucção osmótica (kPa), parcela de sucção relacionada à diferença de concentração química de solutos da água no solo.

Os autores mencionados afirmam que a sucção osmótica é geralmente considerada como constante em problemas com pequenas variações de umidade, o que leva a considerá-la de pouca relevância em problemas práticos. No entanto, em situações que envolvem contaminação do solo ou variações significativas de umidade devido à evaporação, a sucção osmótica pode variar. Já a capilaridade é responsável por grande parte dos fenômenos de interesse.

A sucção matricial desempenha um papel significativo no comportamento dos solos não saturados (PRESA, 1982, 1997; FERREIRA, S. R. M., 1995; BENATTI; MIGUEL; RODRIGUES, 2011). Quanto à sucção osmótica, não há evidência clara de seu efeito sobre a deformação e resistência do solo (ALONSO; GENS; HIGHT, 1987).

A medição da sucção, tanto em campo quanto em laboratório, requer o uso de técnicas apropriadas para os diferentes níveis de pressão envolvidos. Marinho (1997) apresenta as técnicas utilizadas para medição da sucção, os intervalos de medição possíveis e as tipologias de sucção, que abrangem: Psicrômetro (100 – 8000 kPa, sucção osmótica e total), Papel Filtro (0 – 29000 kPa, sucção matricial e total), Tensiômetro (0 – 90 kPa, sucção matricial e total), Translação de Eixos (0 – 1500 kPa, sucção matricial), Condutividade Térmica (0 – 400 kPa, sucção matricial) e Condutividade Elétrica (20 – 1500 kPa, sucção osmótica e matricial).

A sucção desempenha um papel crucial na formação da estrutura colapsível do solo. À medida que a umidade diminui, a sucção matricial aumenta, o que reduz o tamanho dos poros capilares e fortalece as forças de coesão entre as partículas do solo. Isso pode levar à formação de uma estrutura porosa altamente sensível à água, na qual as partículas individuais se unem mais firmemente. Quando ocorre a inundação do solo, essa estrutura se desfaz, resultando em uma variação significativa de volume.

Nesse contexto, Benatti (2010) discorre que os solos colapsíveis possuem uma estrutura porosa potencialmente instável. Quando submetidos a uma carga, experimentam uma redução brusca nos índices de vazios ao serem inundados. Para manter a estabilidade da estrutura do solo em seu estado natural, é necessária uma cimentação ou sucção. No entanto, quando expostos ao fluido de inundação, essa cimentação ou sucção se dissipa, resultando na instabilidade da estrutura do solo e no seu colapso.

No caso dos solos expansivos, a sucção também desempenha um papel significativo, induzindo variações no volume do solo que resultam em contração durante períodos de alta sucção e expansão durante períodos de baixa sucção. Essas alterações volumétricas são influenciadas pela presença de água nas bordas das partículas dos argilominerais. Além disso, outros fatores, como a distribuição das partículas de argila, a porosidade, a orientação mineralógica, o perfil estratigráfico e a espessura do solo, também têm um papel secundário em seu potencial expansivo (FERREIRA *et al*, 2017). Evidencia-se a relevância da sucção no comportamento de ambos os solos não saturados, com ênfase especial na sucção matricial.

2.2 SOLOS COLAPSÍVEIS

É apresentado um breve conteúdo teórico a respeito dos conceitos, das características, das ocorrências, dos métodos de identificação e dos problemas em obras de engenharia referentes aos solos colapsíveis.

2.2.1 Conceito

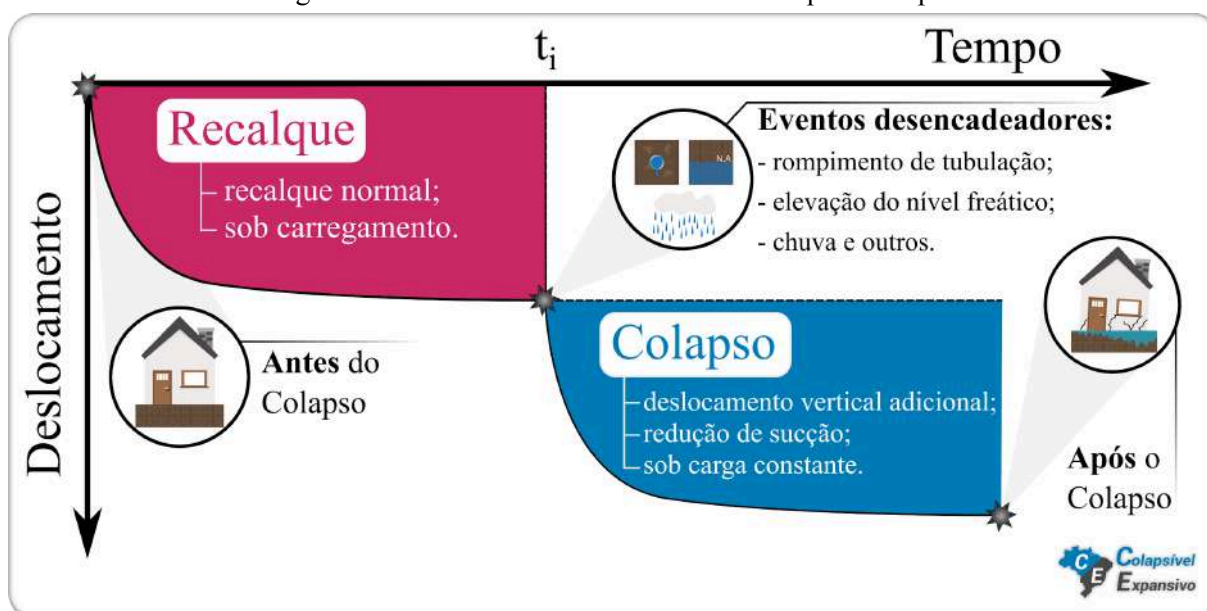
Extraí-se de Ferreira (1995) que, ao longo dos anos, a definição de solos colapsíveis foi sendo aperfeiçoada por diferentes autores, cabendo destaque para Nunes (1975) e Reginatto e Ferrero (1973). Pode-se afirmar que a definição apresentada na convenção anual da *American Society of Civil Engineers* (ASCE) em 1976, na Filadélfia, representa conceito oportuno, visto que engloba as considerações dos citados autores. Tal conceito, segundo Clemence e Finbarr (1981), estabelece que os solos colapsíveis, ou metaestáveis, são solos não saturados que experimentam um rearranjo radical de partículas e grande redução de volume quando inundados com ou sem carga adicional.

Dando continuidade ao processo de aperfeiçoamento conceitual, sugere-se que o termo relacionado à “inundação” seja substituído pelo termo relativo à “sucção”, posto que a

ocorrência do fenômeno do colapso não está necessariamente vinculada à variação da umidade. Geralmente, segundo Jennings e Knight (1957), o colapso é oriundo da redução de resistência devido à redução de sucção.

Outro aspecto que merece atenção diz respeito à distinção dos termos recalque e colapso. O primeiro consiste no movimento vertical descendente de um elemento estrutural, resultante do deslocamento vertical do solo devido à variação de umidade ou à aplicação de tensão. O segundo também está relacionado com o deslocamento vertical do solo, porém representa um fenômeno que ocorre sem aumento de tensão, oriundo da redução de sucção. Os dois termos estão apresentados de forma esquemática através da Figura 2.

Figura 2 - Conceito básico envolvendo recalque e colapso.



Fonte: Autor (2024).

2.2.2 Características

Medero (2005) discorre sobre os atributos dos solos colapsíveis naturais, destacando sua estrutura porosa, caracterizada pelo elevado índice de vazios, e a condição não saturada, caracterizada pelo baixo teor de umidade. Ressalta que, frequentemente, a estrutura porosa pode estar vinculada a um agente cimentante que, atuando simultaneamente a uma sucção elevada, estabiliza o solo na condição não saturada, proporcionando-lhe uma resistência “aparente”.

De acordo com Vilar e Ferreira (2015), existem algumas características predominantes que são indicativas da ocorrência de solos colapsíveis em virtude da sua variação de volume

quando inundados. Tais características proporcionam indicações qualitativas acerca do caráter colapsível, sendo essas apresentadas na Figura 3.

Em solos naturais ou compactados, a ocorrência do fenômeno de colapso devido à inundação engloba diversas condições que lhe podem ser favoráveis. Tais condições foram resumidas em 3 (três) grupos por Barden *et al.* (1973), sendo elas:

- a) estrutura porosa de solos não saturados potencialmente instáveis (metaestáveis);
- b) valores elevados de sucção ou agentes cimentantes que estabilizam os contatos intergranulares, mas que são enfraquecidos durante o umedecimento;
- c) aplicação de tensão externa que desestabilize o sistema.

Figura 3 - Características predominantes nos solos colapsíveis, segundo Vilar e Ferreira (2015) e Barden *et al.* (1973).



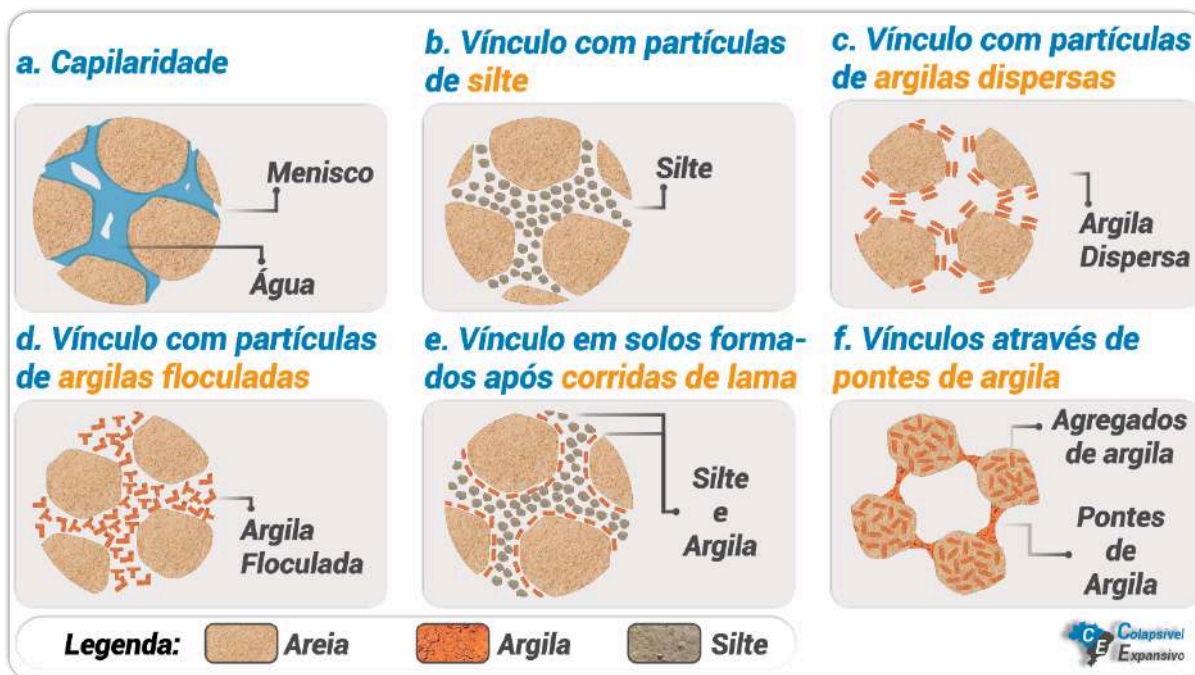
Fonte: Autor (2024).

Dudley (1970), Clemence e Finbarr (1981) apresentaram os modelos estruturais típicos dos solos colapsíveis. Na Figura 4 (a e b) são apresentados arranjos de grãos de areia mantidos por tensão capilar, atuando nos contatos areia-areia, areia-silte e silte-silte. Na Figura 4c, as partículas de areia apresentam vínculos de argilas dispersas, sendo que estas argilas podem ser formadas no local por antigênese ou podem ser transportadas. Os grãos de areia estão revestidos por uma fina camada de argila que, sob baixo teor de umidade, apresenta elevada resistência.

O cenário apresentado na Figura 4d representa uma estrutura em que os grãos de areia estão ligados através de partículas de argila floculada. Nesse caso, os grãos maiores estão

sendo mantidos no local por contrafortes formados de argilas e/ou tensões capilares. A Figura 4e apresenta outro tipo de estrutura em que os grãos de areia estão com vínculos de argilas resultantes de corrida de lama. Por fim, na Figura 4f, os agregados de argila formam grãos que se conectam entre si através de pontes de argila (FERREIRA, S. R. M., 1995).

Figura 4 - Modelos de estruturas instáveis de solos colapsíveis, adaptado de Dudley (1970), Clemence e Finbarr (1981).



Fonte: Autor (2024).

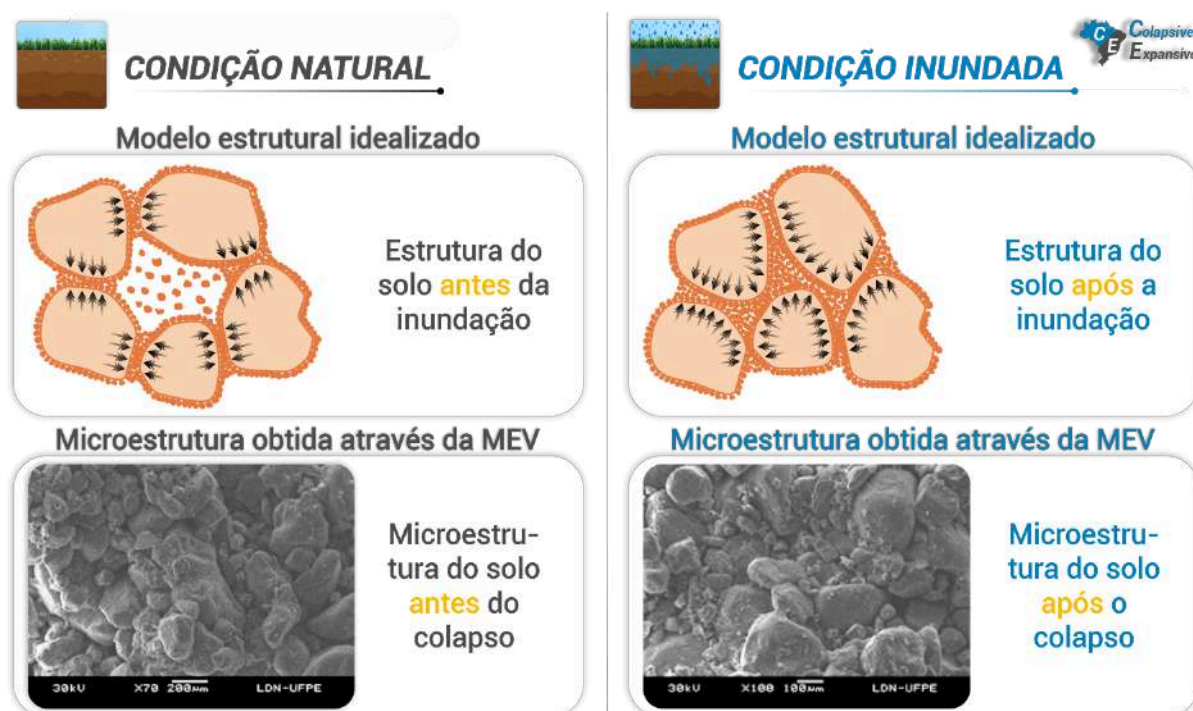
No tocante ao mecanismo do colapso, Jennings e Knight (1957) e Casagrande (1932) elucidam o fenômeno: quando o solo é submetido a um carregamento em seu estado natural, a estrutura permanece sensivelmente inalterada, ocorrendo apenas uma ligeira compressão do material de ligação sem resultar em grandes movimentos relativos dos grãos do solo. Nesse estágio, a consolidação ocorre por compressão das partículas finas entre as maiores partículas. Enquanto a umidade permanece baixa, as forças micro-cisalhantes locais nas interfaces das partículas de areia, resultantes do carregamento, são resistidas sem apreciável movimento dos grãos. Tal situação é possível devido à resistência cisalhante gerada pelo material ligante que suporta a solicitação.

Ainda segundo os referidos autores, quando ocorre o aumento da umidade no solo sob carregamento de modo a ultrapassar a uma certa umidade crítica, os vínculos não suportam as forças de deformação, resultando no colapso da estrutura do solo. Diante desse cenário, Souza Neto (2004) reconhece um problema de ruptura cisalhante ao nível microestrutural.

Nesse contexto, Veríssimo (2016) avaliou a microestrutura do solo natural antes e após da inundação através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A análise micromorfológica permitiu a observação da estrutura do solo antes e após ocorrer o colapso devido à inundação, sob a tensão de 160 kPa. A microestrutura do solo é constituída de grãos de areia quase totalmente compostos de quartzo, de tamanhos variados e de formas sub-arredondadas e angulares. No estado natural, observaram-se grãos de quartzo da dimensão de areia fina e média revestidos por partículas de argila, evidenciando os poros de empacotamento simples.

Na caracterização, após o colapso, constatou-se um rearranjo das partículas. Consequentemente, ocorreu a redução dos poros, posto que a tensão de inundação causou a lixiviação da argila e deslocamentos das partículas menores para os espaços vazios existentes entre os grãos, resultando em um solo com estrutura mais compacta e com maior entrosamento entre os grãos. A Figura 5 apresenta o modelo estrutural idealizado do solo antes e após o colapso, bem como o cenário ao nível microestrutural.

Figura 5 - Cenários do mecanismo de colapso segundo a estrutura sugerida por Casagrande (1932) e a microestrutura obtida por Veríssimo (2016) mediante observação por Microscopia Eletrônica de Varredura.



Fonte: Autor (2024).

O comportamento colapsível é influenciado por uma série de fatores intrínsecos e extrínsecos ao solo, sendo eles destacados por Ferreira (1995): trajetória de tensões, estrutura, umidade, vazão de inundação, velocidade de deformação de colapso e tipo de permeante. As particularidades envolvendo os fatores supracitados não são abordadas neste trabalho, tal conteúdo pode ser consultado no trabalho do autor mencionado.

2.2.3 Locais de ocorrência

Algumas regiões do globo terrestre apresentam condições propícias para o desenvolvimento de solos colapsíveis (DUDLEY, 1970; VILAR; RODRIGUES; NOGUEIRA, 1981). Nas regiões onde se alternam estações de relativa seca e de precipitações intensas, a lixiviação de finos dos horizontes superficiais origina solos de elevada porosidade, (FERREIRA, S. R. M., 1995; VILAR; FERREIRA, 2015; LI; VANAPALLI; LI, 2016; OPUKUMO *et al.*, 2022). Em regiões áridas e semi-áridas, constata-se solos com deficiência de umidade. O Quadro 1 apresenta a relação de países onde foram registradas ocorrências de solos colapsíveis, sendo informado o país, o continente, a referência e o tipo de solo.

Quadro 1 - Relação de países com ocorrência de solos colapsíveis no mundo. (continua)

País	Continentes	Referência	Tipo de solo
 África do Sul	África	Jennings e Knight (1957), Brink e Kantey (1961), Dudley (1970), Barden e Collins (1973)	Silte Argiloso, Silte Arenoso, Eólico, Eólico (areia vermelha)
 Alemanha	Europa	Dudley (1970)	Loess de cor avermelhada e bruno-amarela
 Angola	África	Dudley (1970), Furtado e Martins (1973)	Maceque (solo ferruginoso contendo caulinita), Areias com poucos finos
 Argentina	América do Sul	Reginatto e Ferrero (1973), Nadeo e Videla (1975), Nuñez (1975)	Loess, Siltes e Argilas com carbonatos
 Austrália	Oceania	Aitchison (1973)	Argila Arenosa
 Brasil	América do Sul	Ferreira (1989), Ferreira (1995), Aragão e Melo (1982), Mendonça (1990), Vargas (1973), Dias (1989), Benvenuto (1982), Dias e Gonçalves (1985), Riani e Barbosa (1989)	Areia porosa, Argila porosa
 China	Ásia	Dudley (1970), Derbyshire e Mellors (1988), Lin e Wang (1988), Zeng e Meng (2006)	Loess de cor avermelhada e bruno-amarela
 Espanha	Europa	Aitchison (1973)	Siltes e Argilas gipsíferos

Quadro 1 - Relação de países com ocorrência de solos colapsíveis no mundo. (conclusão)

País	Continente	Referência	Tipo de solo
 Estados Unidos	América do Norte	Peck e Peck (1948), Clevenger (1956), Holtz e Hilf (1961), Gibbs e Bara (1967), Sultan (1969), Dudley (1970), Barden e Collins (1973), Knodel (1981), Day (1990)	<i>Loess</i> , Solo aluvional bem graduado, Aluvião, Loess de cor avermelhada e bruno-amarela
 França	Europa	Dudley (1970)	<i>Loess</i> de cor avermelhada e bruno-amarela
 Hungria	Europa	Jaly (1948), Réthati (1961)	Silte Argiloso
 Índia	Ásia	Rao e Revanasiddappa (2002)	Solo Residual Vermelho
 Inglaterra	Europa	Derbyshire e Mellors (1988), Jotisankasa <i>et al</i> (2007)	<i>Loess</i> , Argila siltosa
 Israel	Ásia	Kassif (1957), Aitchison (1973)	<i>Loess</i> , Areia argilosa (hamra)
 Quênia	África	Aitchison (1973)	Argila Arenosa
 Romênia	Europa	Belles e Stanculesco (1961), Bally <i>et al</i> (1965), Popescu (1986)	<i>Loess</i>
 Rússia	Ásia	Denisov (1951), Abelev e Askalonov (1957), Dudley (1970), Sokolovich (1971)	<i>Loess</i> de cor avermelhada e bruno-amarela
 Tailândia	Ásia	Phien-wej <i>et al</i> (1992)	Argila
 Turquia	Ásia	Zorlu e Kasapoglu (2009)	“Caliche” (aglomerado cimentado de pedregulho areia, silte e argila)
 Ucrânia	Europa	Abeleff (1938), Rezenik (1995)	<i>Loess</i>
 Zimbábue	África	Dudley (1970)	Solo residual de granito

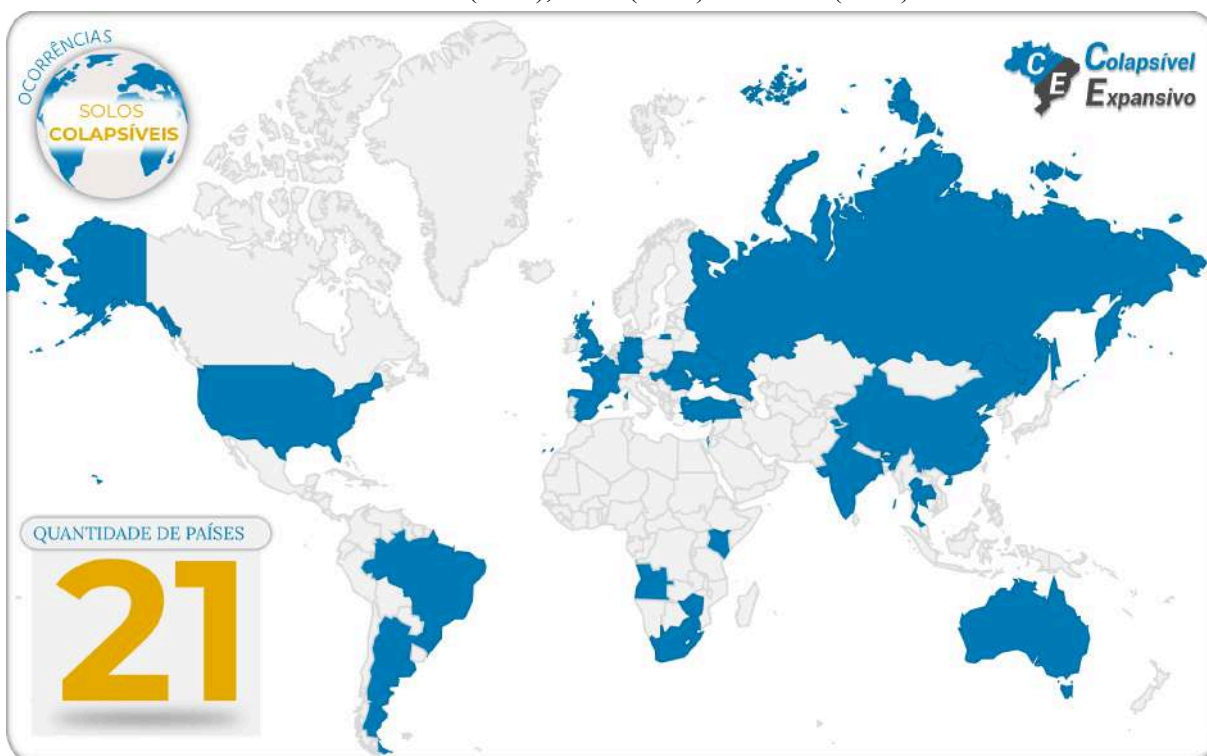
Fonte: Modificado de Vilar *et al.* (1998), Futai (1997) e Medero (2005).

Observa-se que *Loess* é o tipo de solo com maior incidência no quadro exposto. De acordo com Ferreira (1995), esse solo, de cor amarela e bruno-avermelhada, ocorre em cerca de 17% dos Estados Unidos, 17% da Europa, parte da França, Alemanha e Europa Oriental, 15% da antiga União Soviética, Sibéria e grandes áreas da China. Também é encontrado na Nova Zelândia e nas regiões planas da Argentina e Uruguai.

Medero (2005) elucida que *Loess* é constituído por partículas relativamente uniformes de silte, apresentando cimentação e alta resistência em condições secas. Tal cimentação é composta por finas películas de argila que circundam as partículas de silte. Quando as referidas películas são umedecidas, a resistência é reduzida, consequentemente o adensamento pode ocorrer com facilidade.

Baseada no quadro exposto anteriormente, a Figura 6 representa o mapa geográfico que permite uma representação visual dos países onde constam registros sobre a ocorrência de solos colapsíveis. Importante frisar que o mapa abaixo visa apenas apontar os países onde foi registrada a ocorrência de solos colapsíveis, independentemente de sua extensão de ocorrência territorial, ou seja, consiste em um mapa puramente indicativo.

Figura 6 - Mapa geográfico referente à ocorrência de solos colapsíveis no mundo, segundo Vilar *et al.* (1998), Futai (1997) e Medero (2005).



Fonte: Autor (2024).

Em relação à distribuição geográfica no Brasil, a ocorrência de solos colapsíveis já foi verificada em todas as regiões do país, podendo ser destacados os seguintes estados: Amazonas, Pará, Tocantins, Piauí, Pernambuco, Sergipe, Ceará, Paraíba, Bahia, Brasília, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul (FERREIRA, S. R. M., 2008; RODRIGUES; VILAR, 2013).

O Quadro 2 apresenta a relação de municípios do Brasil onde foram registradas ocorrências de solos colapsíveis, sendo informado a região, o estado, a referência, o município e o tipo de solo.

Quadro 2 - Relação de ocorrência de solos colapsíveis no Brasil. (continua)

Região	UF	Referência - Município	Origem Classe Pedológica
Norte	 AM	Dias e Gonzales (1985) - Manaus	Formação Barreira, Latossolo
	 PA	Santos Filho <i>et al.</i> (2005) - Belém	Formação Barreira, Latossolo
	 RR	Marco <i>et al.</i> (1986) - Boa Vista/RR	-
	 TO	Ferreira <i>et al.</i> (2002) - Palmas	Formação Pimentais, Coluvial
Nordeste	 BA	1. Ferreira (1988) - Rodelas; 2. Mendonça (1990) - Bom Jesus da Lapa; 3. Coutinho, Castro e Dourado (2010) - Eunápolis; 4. Burgos, Fonseca e Campos (2010) - Barreiras; 5. Brindeiro <i>et al.</i> (2018) - Casa Nova	1. Formação Tacaratu, Areia Quartzosa; 2. Formação Vazantes e Aluviões, Areia Quartzosa e Latossolo; 3. - ; 4. - ; 5. -
	 CE	Barbosa, Guilherme e Bandeira (2008) - Missão Velha; Moura, Silva Filho e Dantas Neto (2011) - Fortaleza; Barbosa, Bandeira e Guilherme (2016) - Brejo Santo; Rolim e Bandeira (2016) - Crato; Guilherme <i>et al.</i> (2016) - Barbalha; Gonçalves <i>et al.</i> (2018) - Juazeiro do Norte; Chagas, Moura e Carneiro (2019) - Icó	-
	 PB	Martins <i>et al.</i> (2004) - João Pessoa / Sapé / Areia	Formação São Martins / Formação Barreira / Formação Barreira
	 PE	1. Aragão e Melo (1982), Ferreira (1989) - Petrolina; 2. Ferreira (1989) - Gravatá / Carnaíba / Petrolândia; 3. Ferreira e Teixeira (1989) - Santa Maria da Boa Vista; 4. Ferreira (1997) - Recife; 5. Ferreira <i>et al.</i> (2007) - Cabrobó; 6. Feitosa, Oliveira e Ferreira (2010) - Goiana; 7. Oliveira e Ferreira (2012) - Santa Cruz do Capibaribe; 8. Araújo e Souza Neto (2014) - Floresta	1. Aluvial, Areia Quartzosa; 2. Complexo Carnaíba, Podzólico / Complexo Monteiro, Bruno Não Cálcico / Formação Marizal, Areia Quartzosa; 3. Granitoídes Diversos, Podzólicos; 4. Formação Barreira, Latossolo e Aluvial, Arenito; 5. -; 6. -; 7. -; 8. -
	 PI	1. Riani e Barbosa (1989) - Parnaíba; 2. Aquino (2020) - Teresina	1. Eólico, Areia Quartzosa; 2. -
	 RN	1. Santos Júnior e Araújo (1999) - Natal; 2. Araújo <i>et al.</i> (2018) - São Bento do Norte	1. Eólico, Areia Quartzosa; 2. -
	 SE	Geotec - Estância	-
Centro Oeste	 DF	Berberian (1982), Paixão e Carvalho (1994), Guimarães <i>et al.</i> (2002) e Silva (2006) - Brasília	Laterítico
	 GO	1. Moraes <i>et al.</i> (1994) - Goiânia; 2. Ferreira <i>et al.</i> (1989) - Itumbiara	1. Coluvial; 2. Coluvial - Basalto, Residual - Basalto
	 MT	Conciani (1997) - Campo Novo do Parecis / Rondonópolis / Barra do Bugres; Barbosa e Conciani (2000), Conciani e Dalla Rosa (2002) - Primavera do Leste;	-
Sudeste	 MG	1. Queiroz (1960) e Ferreira <i>et al.</i> (1989) - Três Marias; 2. Wolle (1978) e Bevenuto (1982) - Manga; 3. Costa (1986) e Ferreira <i>et al.</i> (1989) - Uberlândia; 4. Ferreira <i>et al.</i> (1989) - Jaíba / Sapucaí-Mirim; 5. Carvalho (1994) - Águas Vermelhas / Salinas / Jenipapo de Minas / Araçuaí / Itabira	1. Coluvial, Siltitos; 2. Aluvionar, Areia Quartzosa; 3. Coluvial - Basalto, Coluvial - Arenito; 4. Aluvial / Coluvial - Basalto, Residual - Basalto; 5. -

Quadro 2 - Relação de ocorrência de solos colapsíveis no Brasil. (conclusão)

Região	UF	Referência - Município	Origem Classe Pedológica
Sudeste	 SP	1. Vargas (1973), Ferreira <i>et al.</i> (1989), Souza (1993), Rodrigues e Lollo (2008) - Ilha Solteira; 2. Vargas (1973), Ferreira <i>et al.</i> (1989), Lobo (1991) e Agnelli (1992) - Bauru; 3. Vargas (1973), Ferreira <i>et al.</i> (1989) - São Paulo; 4. Seraphim (1978) - Limeira; 5. Lima Sobrinho (1983), Vilar <i>et al.</i> (1985) e Ferreira <i>et al.</i> (1989) - São Carlos; 6. Ferreira <i>et al.</i> (1989) e Camacho (1994) - Pereira Barreto; 7. Ferreira <i>et al.</i> (1989) - Sumaré / Paulínia / Mogi Guaçu / Itapetininga / São José dos Campos; 8. Cintra (1998) - Araraquara; 9. Alcântara Júnior (2003) - Pederneiras; 10. Cintra e Aoki (2009) - Ribeirão Preto / Taubaté / Rio Claro.	1. Colúvio - Arenito, Podzólicos e Latossolos; 2. Coluvial - Arenito Residual do Arenito do Grupo Bauru, Latossolo Vermelho Escuro; 3. Aluvial; 4. - ; 5. Coluvial - Arenito; 6. Coluvial - Arenito, Coluvial - Arenito; 7. Coluvial - Arenito / Coluvial - Arenito / Coluvial - Granito / Coluvial / Aluvial; 8. - ; 9. - ; 10. -
	 PR	1. Lopes (1987) - Terra Roxa; 2. Gutierrez <i>et al.</i> (2004) - Maringá; 3. Teixeira <i>et al.</i> (2004), Miguel e Belicanta (2004) e Gonçalves <i>et al.</i> (2006) - Londrina	1. -; 2. Basalto Latossolo Vermelho Férrico; 3. Basalto, Latossolo
Sul	 RS	1. Ferreira <i>et al.</i> (1989) - Canoas; 2. Dias (1989) - Gravataí; 3. Martins <i>et al.</i> (2002) e Medero <i>et al.</i> (2004) - São Leopoldo; 4. Feuerhaumel <i>et al.</i> (2004) - São José dos Ausentes; 5. Milititsky <i>et al.</i> (2008) - Carazinho	1. Coluvial - Basalto; 2. Formação Serra Geral, Latossolo e Podzólico; 3. Arenito Botucatu, Eólica Solo residual; 4. Coluvial Arenito; 5. -
	 SC	Feuerhaumel <i>et al.</i> (2004) - Timbé do Sul	Colúvio Basalto

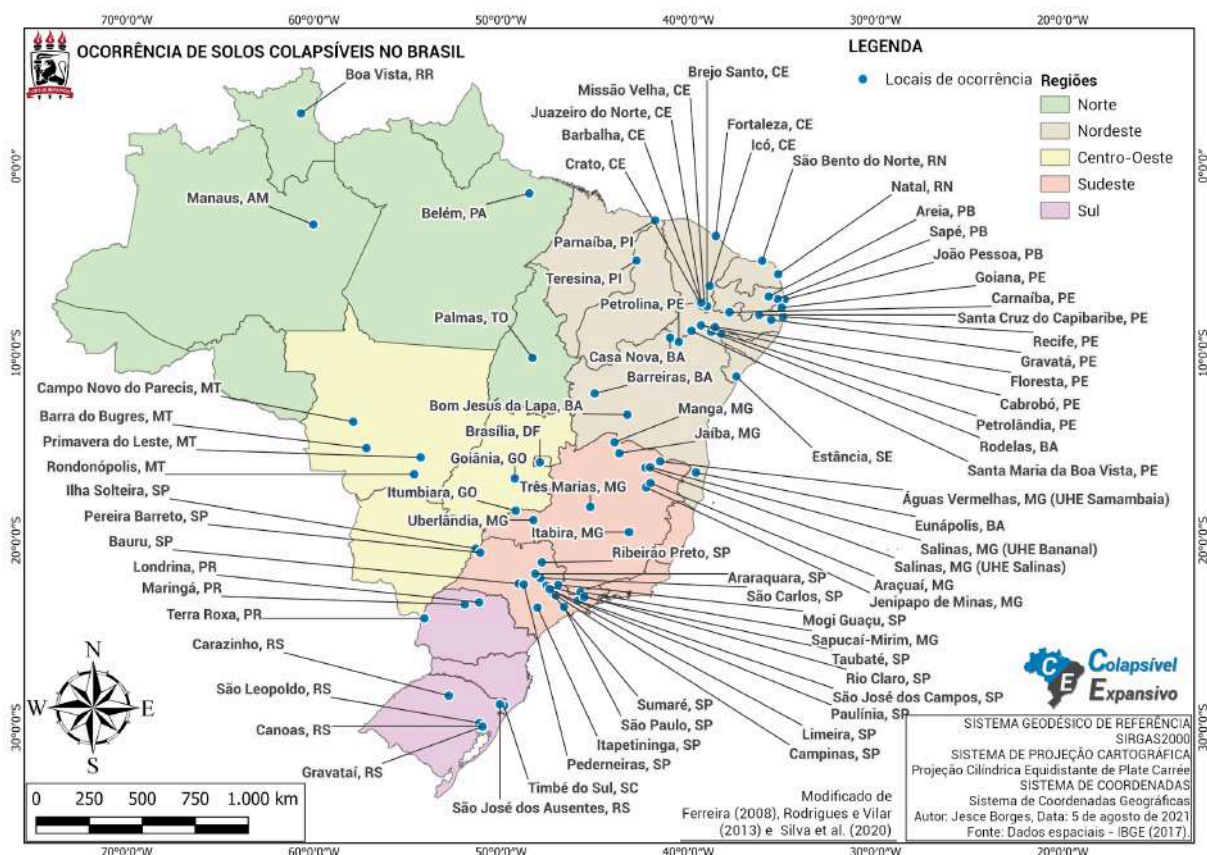
Fonte: Modificado de Ferreira (2008), Rodrigues e Vilar (2013).

A Figura 7 ilustra os municípios onde constam registros sobre a ocorrência de solos colapsíveis no Brasil, revelando variabilidade nos dados. Há indícios de áreas subnotificadas, possivelmente devido à falta de catalogação dos eventos, enquanto em outras regiões observa-se supernotificação, indicando uma ênfase maior na catalogação e publicação de estudos detalhados sobre o comportamento do solo colapsível.

Ferreira (1995) e Howayek *et al.* (2011) afirmam que os solos colapsíveis são encontrados em depósitos eólicos, aluviais, coluviais, em solos residuais e em solos vulcânicos. Asseveram que os solos eólicos ou depósitos formados pela ação do vento (*Loess*) são os mais extensos, sendo encontrados em diversas regiões do mundo.

Com base nos trabalhos citados, observa-se que os solos colapsíveis são caracterizados por estruturas fofas com tamanho dos grãos de silte e areia fina. Frisa-se que, geralmente, os problemas de solos colapsíveis estão relacionados a depósitos recentes, em climas áridos e semiáridos, não sendo raro a sua ocorrência em outros tipos de clima e em diferentes formações.

Figura 7 - Ocorrência de solos colapsíveis no Brasil, modificado de Ferreira (2008), Rodrigues e Vilar (2013) e Santos *et al.* (2020).



Fonte: Autor (2024).

2.2.4 Métodos de identificação

A identificação prévia de solos colapsíveis, segundo Ferreira (1995), representa uma etapa essencial para alcançar o sucesso em um projeto de engenharia envolvendo esse tipo de solo. Além de permitir correções preventivas no solo, ela influencia na escolha adequada das fundações, prevenindo patologias durante ou após a construção. Essa medida protege a vida útil da obra, evitando danos e prejuízos futuros.

Na literatura, encontram-se diversos critérios e métodos de identificação propostos por vários pesquisadores buscando avaliar o comportamento colapsível da estrutura de um solo. Diante da existência desses métodos, aplicando os princípios básicos utilizados por Schreiner (1987), Ferreira (1995) estabelece a divisão em dois grandes grupos: métodos diretos e indiretos, Quadro 3. Os métodos diretos consistem na medida do potencial de colapso do solo, prevendo deformações de colapso mediante ensaios edométricos. Os métodos indiretos baseiam-se na utilização dos índices físicos, dos limites de consistência e dos parâmetros

ligados à textura, obtidos em ensaios de laboratório e campo, para indicar, por correlação, a potencialidade ao colapso estrutural e as informações orientativas.

Quadro 3 - Métodos indiretos e diretos de identificação de solos colapsíveis.

Métodos	Subdivisões	Base para definição do critério	Referências Bibliográficas
Indireto	Identificativos	Microscopia eletrônica de varredura	Collins e McGown (1974), Wolle <i>et al.</i> (1978)
	Orientativos	Pedologia	Ferreira (1990) e Ferreira (1993)
		Pedologia, Geologia e Climatologia	Ferreira (1999)
		Ensaio expedito	Arman e Thornton (1972) e Jennings e Knight (1975)
	Qualitativos	Índices físicos	Denisov (1951) ¹ , Priklonsku (1952) ¹ , Gibbs e Bara (1962 e 1967), Feda (1966), Kassif e Henkin (1967), Design Of Small Dams (1960 e 1974) ² , Código de Obras da URSS (1977)
		Ensaio de campo – cone	Código de Obras ³ URSS (1977)
		Ensaio SPT-T	Décourt e Quaresma Filho (1994)
Direto	Avaliativos	Ensaio edométricos duplos	Reginatto e Ferrero (1973)
	Quantitativos	Ensaio edométricos simples	Bally <i>et al.</i> (1973), Jennings e Knight (1975), Vargas (1978), Lutenegger e Saber (1988)
		Ensaio de campo Expansocolapsômetro	Houston (1996), Ferreira e Lacerda (1993)

¹ Citado por Feda (1966), ² Citado por Bureau of Reclamation, ³ Citado por Resnik (1989)

Fonte: Adaptado de Ferreira (1995) por Souza Neto (2004).

O resumo dos critérios de identificação de solos colapsíveis foi apresentado por Souza Neto (2004), baseado em Futai (1997), posteriormente, foi adaptado por Mendonça Neto (2011). O Quadro 4 apresenta a listagem desses critérios, modificada devido aos incrementos realizados neste trabalho. Tais critérios são enquadrados como métodos indiretos qualitativos (baseados nos índices físicos e limites de Atterberg) e métodos diretos quantitativos (baseados no potencial de colapso).

Quadro 4- Critérios de identificação de solos colapsíveis, segundo Futai (1997). (continua)

Referência	Expressão	Limites
Denisov (1951) citado por Reginatto (1970)	$K = \frac{e_1}{e_0}$	$\Rightarrow 0,5 < K < 0,75$, altamente colapsível; $\Rightarrow K = 1$, não colapsível; $\Rightarrow 1,5 < K < 2$, não colapsível.
Feda (1966)	$Kl = \frac{\left(\frac{w_0}{S_0}\right) - w_p}{w_l - w_p}$	Se $S_0 > 80\%$ e $Kl > 0,85$, o solo é colapsível.

Quadro 4 - Critérios de identificação de solos colapsíveis, baseado em Futai (1997). (continuação)

Referência	Expressão	Limites
Denisov (1951) citado por Reginatto (1970)	$K = \frac{e_1}{e_0}$	$\Rightarrow 0,5 < K < 0,75$, altamente colapsível; $\Rightarrow K = 1$, não colapsível; $\Rightarrow 1,5 < K < 2$, não colapsível.
Feda (1966)	$Kl = \frac{\left(\frac{w_0}{S_0}\right) - w_p}{w_l - w_p}$	Se $S_0 > 80\%$ e $Kl > 0,85$, o solo é colapsível.
Código de obras da URSS (1962) citado por Reginatto (1970)	$\lambda = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0}$	$\lambda \geq -0,1$, o solo é colapsível.
Priklonskij (1952) citado por Feda (1966)	$Kd = \frac{w_l - w_0}{w_l - w_p}$	$\Rightarrow Kd < 0$, altamente colapsível; $\Rightarrow Kd > 0,5$, colapsível; $\Rightarrow Kd > 1$, expansivo.
Gibbs e Bara (1962)	$R = \frac{w_{sat}}{w_l}$	$R > 1$, colapsível.
Kassif e Henkin (1967)	$K = \gamma_d \cdot w$	$K < 15$, colapsível.
Jennings e Knight (1975)	Cascalho fino	$\Rightarrow Sr < 6\%$, colapsível; $\Rightarrow Sr > 10\%$, não colapsível.
	Areia fina	$\Rightarrow Sr < 50\%$, colapsível; $\Rightarrow Sr > 60\%$, não colapsível.
	Silte argiloso	$\Rightarrow Sr < 90\%$, colapsível; $\Rightarrow Sr > 95\%$, não colapsível.
Código de obras da URSS (1977) citado por Resnik (1989)	$CI = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0}$ $S_r < 80\%$	Ocorre colapso para: $\Rightarrow 1\% \text{ wp } 10\%$, $CI < 0,1$; $\Rightarrow 10\% \text{ wp } 14\%$, $CI < 0,17$; $\Rightarrow 14\% \text{ wp } 22\%$, $CI < 0,24$.
Handy (1973) citado por Lutenegeger e Saber (1988)	Teor de finos ($< 0,002 \text{ mm}$) $< 16\%$	Alta probabilidade de colapso;
	16 a 24%	Provavelmente colapsível;
	24 a 32%	Probabilidade de colapso $< 50\%$;
	$> 32\%$	Geralmente não colapsível.
Basma e Tuncer (1992)	$PC = 48,496 + 0,102 \cdot C_U - 0,457 \cdot w_0 - 3,533 \cdot \lambda_s + 2,85 \cdot \ln \sigma_{vi}$	O resultado corresponde ao potencial de colapso.
	$PC = 48,506 + 0,072 \cdot (S - C) - 0,439 \cdot w_0 - 3,123 \cdot \lambda_s + 2,85 \cdot \ln \sigma_{vi}$	
Futai (2000)	$\Delta_{ecm\acute{a}x}$ ou $PC_{m\acute{a}x} = 4,2 \cdot \left[\frac{e \sqrt{Sr}}{A(1+IP)} \right]^{0,6}$	O resultado corresponde ao potencial de colapso máximo.
Abelev (1948)	$PC = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$	$\Rightarrow PC > 2\%$, colapsível.
Vargas (1978)	$PC = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$	$\Rightarrow PC < 2\%$, não colapsível; $\Rightarrow PC > 2\%$, colapsível.

Quadro 4 - Critérios de identificação de solos colapsíveis, baseado em Futai (1997). (conclusão)

Referência	Expressão	Limites
Reznik (1989)	$K_w = \frac{P_q}{P_{q_w}}$	Solo colapsível se: $\Rightarrow K_w > 2$ para 100 kPa; $\Rightarrow K_w > 1,5$ para 200 kPa; $\Rightarrow K_w > 1,3$ para 300 kPa.

σ_{vi} - tensão de inundação no ensaio edométrico; (S-C); diferença entre teores de areia e argila; e_1 - índice de vazios (amolgado) correspondente ao limite de liquidez; S_r - grau de saturação; Δe - variação do índice de vazios; e_0 - índice de vazios natural; γ_d - peso específico seco; w , w_0 - umidade natural; w_p - limite de plasticidade; w_L - limite de liquidez; K - coeficiente de subsidência; K_1 - coeficiente de colapsividade; PC - potencial de colapso; C_u - coeficiente de uniformidade; A - teor de areia em valor absoluto; IP - índice de plasticidade; K_w - Coeficiente de colapso; P_{q_w} - resistência a penetração do cone no solo inundado; P_q - resistência a penetração do cone na condição natural.

Fonte: Modificado de Souza Neto (2004) e Mendonça Neto (2011).

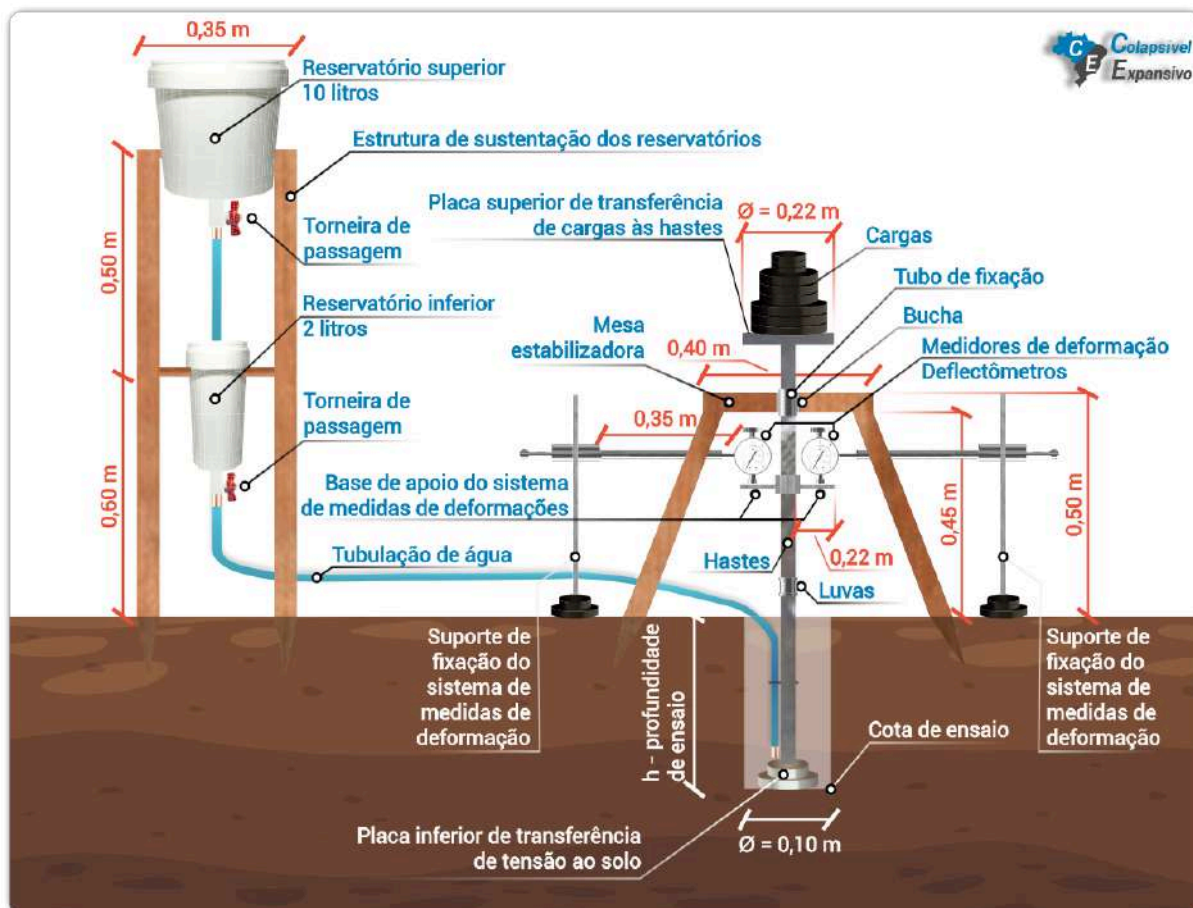
No tocante aos métodos diretos, o Expansocolapsômetro representa um equipamento que permite avaliar a variação de volume de solos em campo, colapso ou expansão, quando submetidos à aplicação de carga ou inundação. Desenvolvido por Ferreira e Lacerda (1993), esse equipamento possibilita a análise em diferentes profundidades do perfil geotécnico e com controle de vazão de inundação, sendo possível realizar em campo ensaios similares aos edométricos simples e duplos de laboratório. Somando-se a isso, o equipamento permite quantificar o inchamento livre, a pressão de expansão, o potencial de colapso e expansão. Apesar de ter uma estrutura simples, apresenta grandes recursos técnicos de modo a propiciar a realização de ensaios de placa para medir a deformação do solo com o controle de vazão.

O Expansocolapsômetro é constituído por 2 (duas) partes, sendo uma similar a um sistema de aplicação de carga ao solo, semelhante a um ensaio de placa, e outra a um sistema de inundação com controle de vazão. A primeira é constituída pelos seguintes componentes: placa, hastes metálicas, mesa estabilizadora, rolamento vertical, defletômetros e pesos para transferência de carga e aplicação de pressão, estando essa versão inicial limitada a 200 kPa. A segunda é composta de 2 (dois) pequenos reservatórios de água interligados, com torneiras de passagem que permitem regular a vazão de saída d'água (FERREIRA, S. R. M.; LACERDA, 1993; FERREIRA, S. R. M., 1995).

Na base fixa, existe uma mesa estabilizadora com um rolamento central tipo agulha com diâmetro fixo. O contato entre a placa e a haste é feito através de encaixe, formando uma espécie de rótula. No que se refere à inundação, essa é feita por um conduto fixado externamente à haste, de modo que a água é lançada sobre a placa. Nota-se que o sistema de inundação é independente do sistema de carregamento, permitindo o controle de vazão. Os

defletômetros são responsáveis pela medição dos recalques (BORGES, 2016). A Figura 8 apresenta o Expansocolapsômetro em sua 1ª (primeira) versão.

Figura 8 - Equipamento para medir a variação de volume em campo com controle da vazão de inundação, Expansocolapsômetro (FERREIRA, S. R. M., 1995; FERREIRA, S. R. M.; LACERDA, 1993).



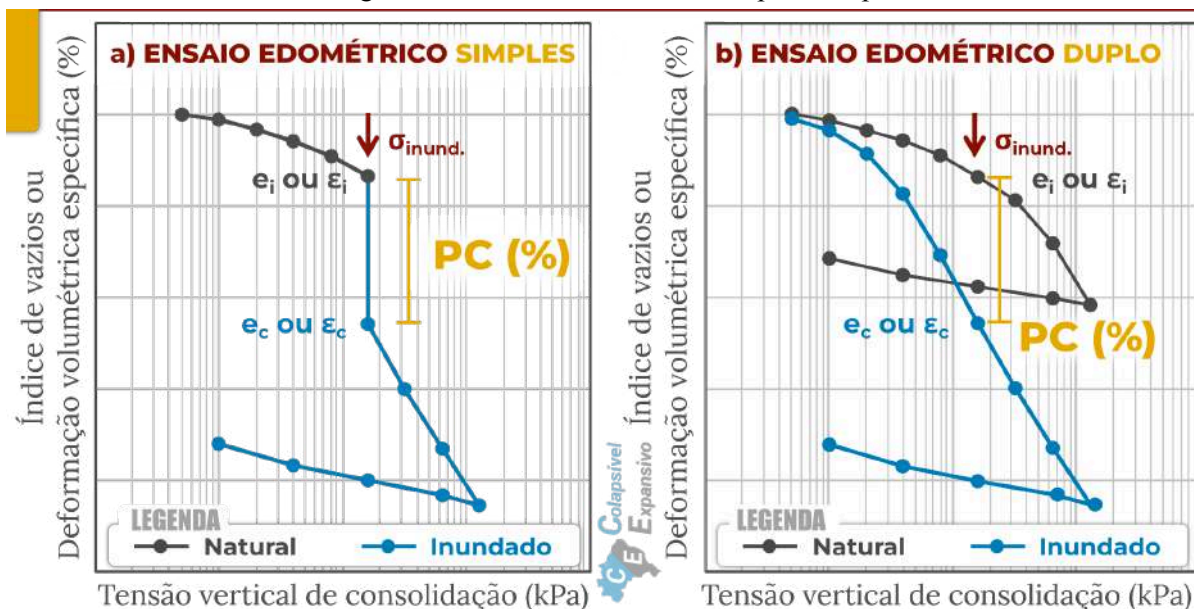
Fonte: Autor (2024).

Gon (2011) relata que os ensaios edométricos permitem avaliar a colapsibilidade de um solo, sendo esses os mais utilizados em laboratório. A vantagem desses ensaios envolve a consideração das tensões atuantes e a quantificação do potencial de colapso, sendo extensível a qualquer formação e tipo de solo. Ferreira (1995) assevera a adequação dos ensaios edométricos ao estudo da colapsibilidade, pois as deformações mensuradas servem para estimar os valores de recalques das obras.

Os ensaios edométricos para a avaliação quantitativa do colapso podem ser simples ou duplos. O primeiro é executado em uma única amostra inundada numa determinada tensão de interesse, enquanto o segundo é executado em duas amostras, sendo uma na condição natural,

e a outra, na condição previamente inundada. A Figura 9 apresenta os resultados típicos dos ensaios edométricos simples e duplos.

Figura 9 - Ensaios edométricos simples e duplos.



Fonte: Autor (2024).

Através de metodologia envolvendo ensaios edométricos simples, Jennings e Knight (1975), Vargas (1978) e Lutenegeger e Saber (1988) propuseram uma expressão para determinar o potencial de colapso (PC) para as tensões de inundação, a saber: 200 kPa, qualquer valor e 300 kPa, respectivamente. A Equação 2 apresenta a expressão proposta pelos referidos autores.

$$PC (\%) = 100 \cdot \frac{e_c - e_i}{1 + e_i} = 100 \cdot \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} = 100 \cdot \frac{H_c - H_i}{H_i} \quad (2)$$

em que:

e_i , ε_i e H_i - índice de vazios, deformação volumétrica específica e altura do corpo de prova até a tensão considerada sob umidade natural (antes da inundação);

e_c , ε_c e H_c - índice de vazios, deformação volumétrica específica e altura do corpo de prova alcançada em consequência da inundação (após a inundação).

No que se refere ao ensaio edométrico duplo, Jennings e Knight (1957) e Reginatto e Ferrero (1973), citado por Ferreira (1995), propuseram uma metodologia de identificação e de previsão da colapsibilidade do solo para uma determinada tensão vertical sob duas condições:

natural e inundada. Baseado nos resultados dos dois corpos de provas, definiram o coeficiente de colapsibilidade (C) por meio da Equação 3.

$$C = \frac{\sigma_{vps} - \sigma_{v0}}{\sigma_{vpn} - \sigma_{v0}} \quad (3)$$

em que:

σ_{vpn} - tensão de pré-consolidação virtual do solo na umidade natural;

σ_{vps} - tensão de pré-consolidação virtual do solo inundado;

σ_{v0} - tensão vertical devido ao peso próprio do solo em campo.

De acordo com Ferreira (1995), nos solos colapsíveis a tensão de pré-consolidação na condição natural é maior que a tensão de pré-consolidação na condição inundada, ou seja, $\sigma_{vpn} > \sigma_{vps}$. A verificação do perigo de colapso e a determinação do nível de tensão no momento do colapso são obtidas por comparação entre os valores de σ_{vpn} , σ_{vps} e σ_{v0} com o valor de σ_v (tensão vertical aplicada ao solo), Figura 10. São observados os seguintes cenários:

- i. caso $\sigma_{vps} < \sigma_{v0}$ e $C < 0$, o solo é considerado “verdadeiramente colapsível”, sofrendo colapso sob peso próprio quando inundado;
- ii. caso $\sigma_{vps} > \sigma_{v0}$ e $0 < C < 1$, o solo é considerado “condicionado ao colapso”, visto que é capaz de suportar certo nível de tensão na inundação, ficando o colapso dependente de σ_v nas seguintes situações:
 - ii.1 se $\sigma_v < \sigma_{vps}$, não ocorre colapso com a inundação do solo, sendo a diferença entre σ_{vps} e σ_{v0} ($\sigma_{vps} - \sigma_{v0}$) o incremento máximo de tensão vertical que o solo pode suportar em colapsar;
 - ii.2 se $\sigma_{vps} < \sigma_v < \sigma_{vpn}$, ocorrerá colapso quando o solo for inundado após o carregamento;
 - ii.3 se $\sigma_v > \sigma_{vpn}$, o colapso poderá ocorrer mesmo sem inundação do solo.
- iii. caso $\sigma_{vpn} = \sigma_{vps}$ e $C = 1$, o comportamento do solo independe do grau de saturação, ocorrendo para uma grande maioria dos solos, incluindo os solos não colapsíveis.

Figura 10 - Critério de Reginatto e Ferrero (1973).



Fonte: Autor (2024).

Baseado na metodologia do ensaio edométrico simples, considerando o potencial de colapso correspondente a uma tensão vertical de 200 kPa, Jennings e Knight (1957) apresentaram a correlação dos valores de potenciais de colapso (PC) com a gravidade dos problemas nas edificações. Dessa forma, os referidos autores estabeleceram a classificação da colapsibilidade em obras de engenharia a partir de resultados de ensaios edométricos simples, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação da colapsibilidade em obras de engenharia a partir de resultados de ensaios edométricos simples.

PC (%)	Gravidade dos problemas
0 a 1	Sem problema
1 a 5	Problema moderado
5 a 10	Problemático
10 a 20	Problema grave
> 20	Problema muito grave

Fonte: Jennings e Knight (1975).

Semelhantemente, Lutenegger e Saber (1988), para uma tensão vertical de 300 kPa, apresentaram a classificação dos valores de potenciais de colapso (PC) para os danos nas edificações, sendo esses classificados em leve, moderado e grave (Tabela 2). Os referidos autores recomendam cautela na comparação dos valores de potenciais de colapso encontrados na literatura (MOTTA, 2006).

Tabela 2 - Classificação da colapsibilidade nas obras de engenharia.

PC (%)	Gravidade dos problemas
2	Leve
6	Moderado
10	Grave

Fonte: Luteneegger e Saber (1988).

2.2.5 Problemas em obras de engenharia registrados na literatura

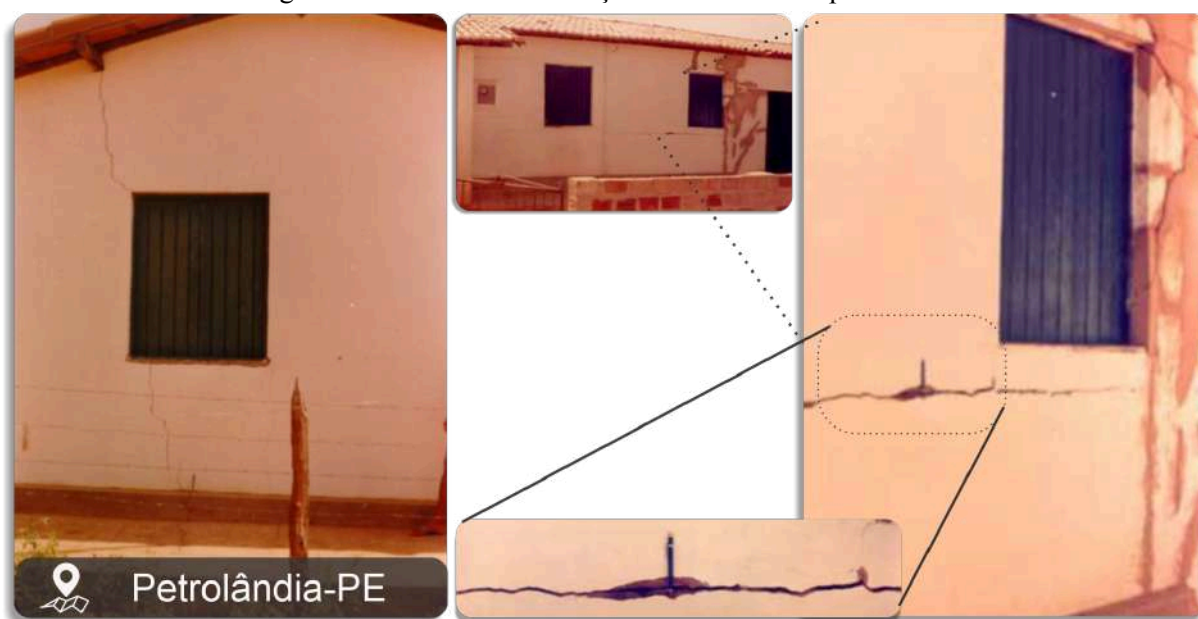
O desconhecimento, aliado à ausência de uma prévia investigação direcionada, explica os diversos registros de sérios danos nas obras de engenharia apoiadas sobre os solos colapsíveis. Os mecanismos desencadeadores do fenômeno de colapso estão relacionados ao processo de saturação do solo, sendo a infiltração de águas pluviométricas o cenário mais comum. Outros fatores também podem ser citados como: a ascensão do lençol freático, os vazamentos de reservatórios enterrados e os vazamentos de tubulações de água e esgoto.

Conforme destacado na introdução, os prejuízos decorrentes do comportamento colapsível afetam as mais variadas tipologias de obras civis, podendo ser constatados na literatura registros de danos em edifícios, canais, rodovias, barragens e outros. Considerando que o foco deste trabalho está direcionado ao âmbito nacional, são apresentados alguns registros fotográficos encontrados na literatura que expõem as patologias causadas pelos solos colapsíveis nas diferentes regiões do país, resultando não apenas prejuízos financeiros, mas também desencadeiam litígios jurídicos entre as partes envolvidas.

Vasconcelos (2001) afirma que, durante o reassentamento de Itaparica, na cidade de Petrolândia-PE (1985-1987), edificações (incluindo casas, igreja, edifícios públicos, dentre outros) apresentaram sérios problemas de fissuras e trincas resultando, em alguns casos, na completa demolição para posterior reconstrução. Tal cenário, conforme ressalta Amorim (2004), expõe a gravidade dos danos e dos prejuízos causados pelos solos colapsíveis devido à inundação, Figura 11.

No município de Cabrobó-PE, Ferreira e Vasconcelos (2008) constataram patologias nas edificações causadas pelos solos colapsíveis na forma de fissuras diagonais acima e abaixo das janelas, em cima das portas das casas, escolas e em outras edificações, bem como o abatimento de pisos nas bases das casas e fundações.

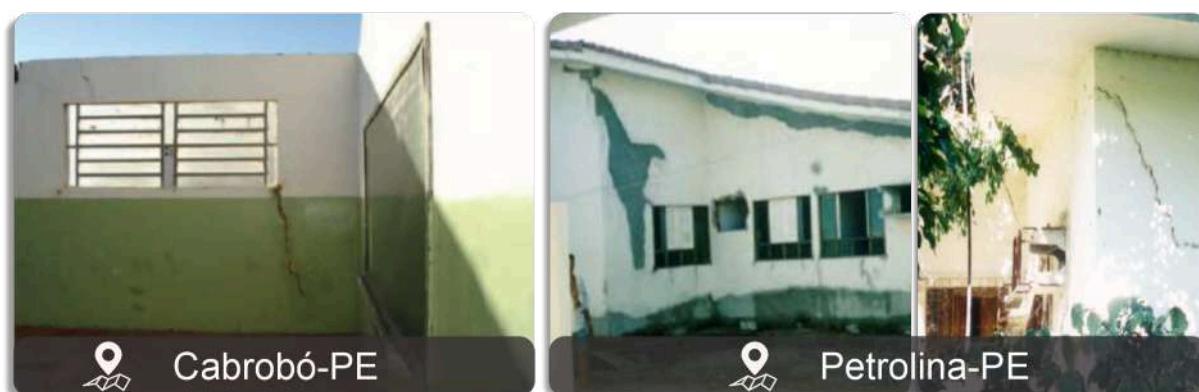
Figura 11 - Danos em edificações devido ao colapso do solo.



Fonte: Adaptado de Vasconcelos (2001).

Em Petrolina-PE, Silva (2003) afirma que, no Conjunto Habitacional Privê Village (CHPV), das 14 (quatorze) casas construídas, 8 (oito) delas apresentavam fissuras bastante proeminentes, gerando desconforto e insegurança para os moradores, Figura 12. Ainda nesse município, cabe registrar a referência de Aragão e Melo (1982) quanto ao Conjunto Habitacional Massangana onde 50% das 1.200 (mil e duzentas) casas apresentaram, devido à ocorrência de colapsabilidade dos solos de fundações das casas, aparecimento de fissuras, trincas e rachaduras.

Figura 12 - Patologias resultantes do comportamento colapsável dos solos de Cabrobó-PE e de Petrolina-PE.



Fonte: Adaptado de Ferreira e Vasconcelos (2008) e Silva (2003), respectivamente.

Mendonça Neto (2011) realizou um estudo sobre a variação de volume de solos colapsíveis devido à inundação em canais de irrigação. Ressalta que, em alguns canais pesquisados, a identificação das características de colapsividade do solo ocorreu nas etapas de investigações geotécnicas e de projeto básico.

Por outro lado, no canal do Projeto Jaíba, a identificação da colapsividade do solo ocorreu após a execução, resultando no aparecimento de fissuras e danos na estrutura. Ao longo do trabalho, o referido autor registrou diversas fissuras no revestimento de concreto do canal localizado no trecho do Eixo Leste que atravessa a BR-232, no Município de Custódia-PE, ressaltada a presença de água sobre o revestimento alcançando parte do solo de fundação, Figura 13.

Figura 13 - Canal de irrigação com fundação apoiada sobre solo colapsível.



Fonte: Adaptado de Mendonça Neto (2011).

Oliveira (2002) apresenta um trabalho de campo realizado na área urbana do município de Ilha Solteira-SP. Esse trabalho consistiu no cadastro das residências, construídas durante o início de implantação do núcleo urbano, nas quais foram observadas ocorrências de trincas resultantes do processo de colapso de solos. Os resultados da pesquisa mostraram que as rupturas de tubulações de esgoto, tanto da rede pública, quanto na rede privada, despontam como o fator desencadeador do processo de colapso do solo.

A Figura 14 apresenta os danos causados pelos solos colapsíveis devido ao processo de saturação por infiltração de água proveniente do rompimento de condutores de água e de esgoto.

Figura 14 - Patologias nas edificações residenciais da área urbana do município de Ilha Solteira-SP.



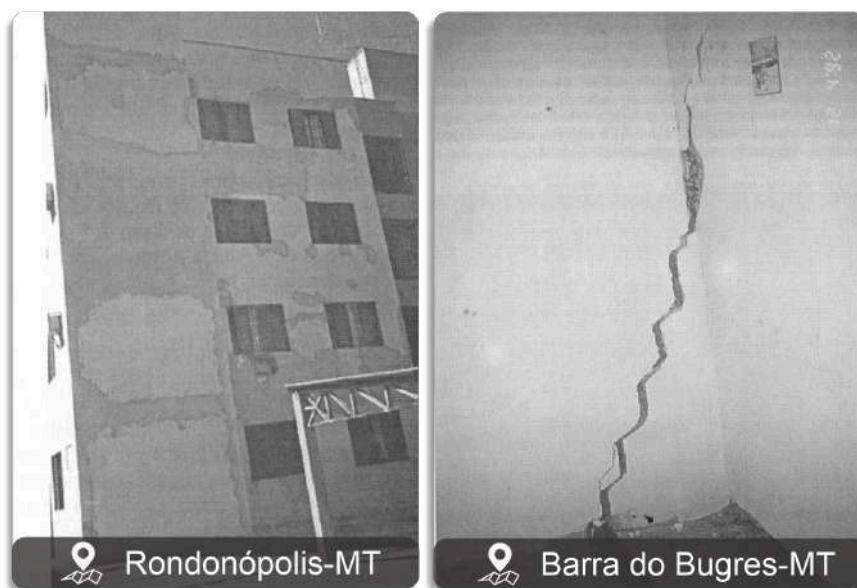
Fonte: Adaptado de Oliveira (2002).

Conciani (2006) relata os problemas ocorridos em um conjunto residencial localizado na cidade de Rondonópolis-MT. Tal empreendimento é composto por 16 (dezesesseis) prédios de 4 (quatro) andares, tendo cada andar 4 (quatro) apartamentos. O autor afirma que todos os edifícios desse conjunto apresentaram trincas e rachaduras em diferentes graus de intensidade. Apesar de terem sido realizados os reparos necessários, os problemas retornaram de forma instantânea durante uma chuva intensa e atípica no ano de 1995. Esse caso foi estudado e publicado por Conciani e Soares (1995), que atribuíram ao colapso dos solos de fundação a causa dos recalques.

Ainda segundo Conciani (2006), no município de Barra do Bugres-MT uma residência térrea apresentou patologia na sua estrutura em decorrência do fenômeno de colapso do solo de fundação. A trinca constatada na citada residência apresentava as características de sentido e direção típicas de recalques. Esses cenários narrados, ambos oriundos de danos causados pelo colapso do solo de fundação, estão expostos na Figura 15.

Albuquerque Filho *et al.* (1997), citados por Rodrigues (2007), verificaram que, através de um monitoramento efetuado sistematicamente desde 1987 até o final do ano de 1994, foram observadas elevações no lençol freático de até cerca de 20 metros, induzindo o desabamento de paredes de poços sem revestimento, recalques no solo e danos a edificações. A Figura 16 apresenta os registros das avarias nas edificações localizadas às margens do lago Três Irmãos resultantes do colapso do solo devido à ascensão do lençol freático em Pereira Barreto-SP.

Figura 15 - Visão geral do conjunto de edifícios danificados e o detalhe da trinca apresentada na residência térrea.



Fonte: Adaptado de Conciani (2006).

Figura 16 - Patologias nas edificações localizadas às margens do lago Três Irmãos.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2007).

Pérez León (2017) registra os danos causados pelo colapso do solo em uma faixa de pedestres envolvendo o trecho entre o Big Box da CLN 408 e a residência estudantil “Colina” da Universidade de Brasília, Brasília-DF. O autor ressalta que no local existem 2 (dois)

registros de esgoto com indícios de vazamentos, os quais teriam ocasionado o aumento da umidade no solo e provocado a diminuição da sucção. Consequentemente, houve a diminuição da resistência entre as partículas, resultando nos desníveis e trincamentos na faixa de pedestres. Acrescenta que as propriedades químicas do líquido percolante também podem ter exercido influência na magnitude dos danos apresentados na Figura 17.

Figura 17 - Desníveis e craqueamento decorrentes do colapso do solo por infiltração de água.



Fonte: Adaptado de Pérez León (2017).

No município de Bauru-SP, Ferreira *et al.* (2015) apresentaram um caso de obra envolvendo um condomínio comercial onde a infiltração de água no solo de fundação, de característica colapsível, resultou no aparecimento de graves anomalias, provenientes de significativos recalques de pilares.

A origem do vazamento se deu em um espelho de água localizado na praça central do referido condomínio, Figura 18. Ressaltam que a magnitude dos recalques atuantes provocou sérios danos nos 4 (quatro) pilares centrais, implicando na ruptura das vigas de ligação dos aludidos pilares, compreendendo o concreto e parte da armadura superior. Os referidos autores ressaltam a importância de se considerar, nos projetos de engenharia com fundações implantadas em solos colapsíveis, o efeito indesejável e nocivo do colapso do terreno provocado por eventuais infiltrações de água no solo de suporte das fundações.

Figura 18 - Espelho de água e os danos causados no condomínio comercial.



Fonte: Adaptado de Ferreira *et al.* (2015).

Zaine (2000) apresenta registro de danos causados pelos solos colapsáveis em 17 (dezessete) edificações residenciais localizadas na Av. 6-A, bairro Cidade Nova, Rio Claro-SP (Figura 19). O referido autor ressalta que a ocorrência de trincas nas edificações estava associada ao comportamento colapsável devido à inundação provocada pela chuva e pelos vazamentos em tubulações enterradas. A redução de volume do solo devido à inundação causou problemas de trincas na construção, comprometendo a estrutura da edificação.

Figura 19 - Edificação residencial escorada devido às patologias causadas pelo colapso do solo.



Fonte: Adaptado de Zaine (2000).

2.3 SOLOS EXPANSIVOS

São apresentados os conceitos, as características, os locais de ocorrência, os métodos de identificação e os problemas em obras de engenharia referentes aos solos expansivos.

2.3.1 Conceito

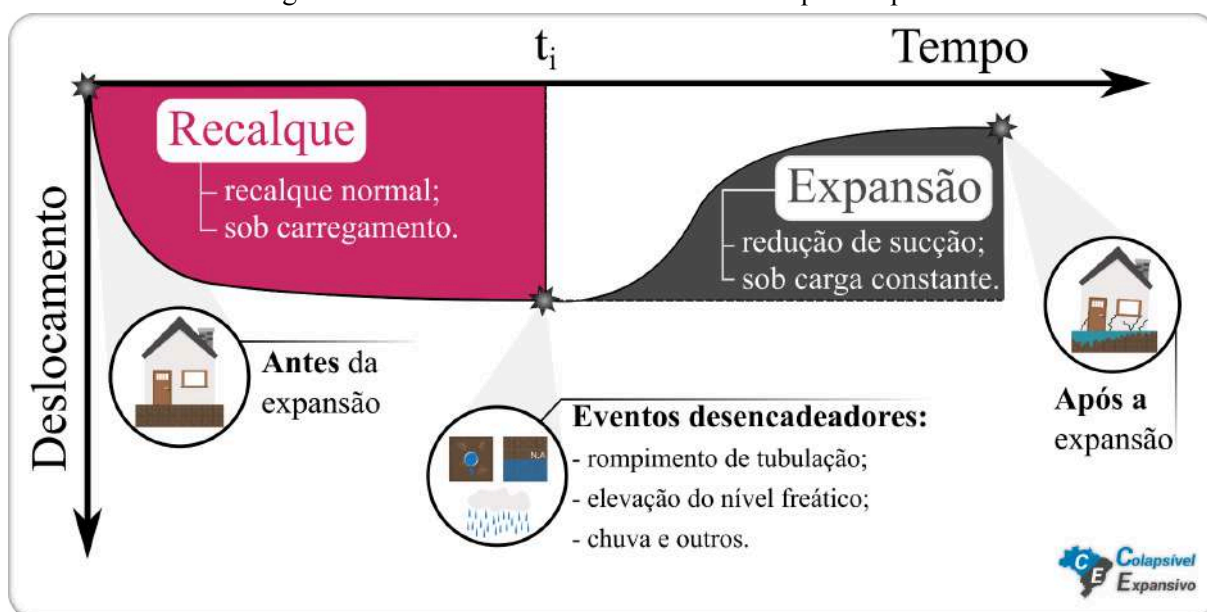
Schreiner (1987) apresenta 3 (três) conceitos relacionados à expansividade do solo, sendo eles: expansividade intrínseca, expansão e inchamento. O primeiro consiste na capacidade de um argilomineral absorver água, representando uma propriedade intrínseca da argila, posto que não é alterada pela umidade ou sucção existente em um tempo. Portanto, trata-se de uma propriedade resultante de sua composição mineralógica e da quantidade de argila que interage com a água. O segundo representa a mudança de volume devido à alteração no estado de tensões. Por fim, o terceiro consiste no deslocamento vertical de um ponto do solo ou de uma fundação, sendo decorrente de um solo expansivo intrinsecamente, parâmetro normalmente medido em campo.

Perante tais conceitos, cabe frisar que, neste trabalho, são abordados os solos expansivos que apresentam expansividade intrínseca. O caráter expansivo do solo depende primariamente do tipo de argila existente, dado que nem todos os minerais argílicos experimentam modificações de volume devido à variação de sucção. Ressalta ainda que o grupo das argilas esmectitas, com destaque para os argilominerais montmorilonita e vermiculita, são as mais representativas dessa classe (JIMENEZ SALAS, 1980; FERREIRA, S. R. M., 2008).

A terminologia “material expansivo” é utilizada para fazer referência àqueles materiais que apresentam em sua constituição preferencialmente argilominerais com estrutura laminar potencialmente instável. Acrescenta-se que tais materiais possuem limites de liquidez elevados e alta plasticidade, bem como são duros quando secos, porém perdem facilmente sua resistência quando absorvem água (PRESA, 1982, 1984).

Silva (2003) conceitua solos expansivos ou potencialmente expansivos como sendo solos não saturados que, quando sujeitos à mudança de umidade, podem aumentar ou diminuir seu volume, sendo tal fenômeno associado à presença de argilominerais do grupo 2:1, particularmente a montmorilonita e as ilitas. A Figura 20 apresenta o conceito básico envolvendo os diferentes termos de recalque e expansão.

Figura 20 - Conceito básico envolvendo recalque e expansão.



Fonte: Autor (2024).

Vargas (1978) afirma que a presença de argilominerais no solo favorece a plasticidade, a coesão e o comportamento expansivo de certos solos argilosos. Segundo Grim (1953), o fenômeno da expansão ocorre em decorrência da adsorção do cátion, pois os argilominerais apresentam capacidade de sorção de ânions e cátions em posições de troca. Tais íons, devido à quebra das ligações de borda dos minerais, podem ser substituídos por outros íons, resultando no desequilíbrio de cargas, o que consequentemente possibilita a adsorção de um cátion. Além da troca catiônica, outros fatores também estão relacionados com o referido fenômeno.

2.3.2 Características

Realizando uma comparação com os solos colapsíveis, Vilar e Ferreira (2015) entendem que o comportamento expansivo representa um fenômeno mais complexo, uma vez que envolve causas físico-químicas e que, além de aumento de volume, existe outra consequência associada, a tensão de expansão.

Os referidos autores afirmam que nos solos expansivos é possível ocorrer o comportamento de aumento de volume pelo umedecimento e posterior redução por secagem. Tal fenômeno tende a se repetir de forma cíclica no decorrer das variações sazonais de umidade ou de sucção do solo, podendo caracterizar um comportamento semelhante ao efeito sanfona, ou seja, abre e fecha. Nos períodos de estiagem, Maia *et al.* (2018) afirmam que esses solos se encontram geralmente com sucção elevada, que os confere resistência

relativamente alta, dificultando sua escavação. Contudo, existindo um aumento no teor de umidade, esses solos podem experimentar valores de expansão bastante expressivos.

O processo de retração e inchaço, oriundo de ciclagem da umidade, confere uma fadiga ao solo tornando-o erodível, provocando o fenômeno chamado empastilhamento. Mesmo em áreas planas, esse fenômeno pode movimentar grandes massas de material, bem como pode promover ruína parcial ou total, com geração de trincas, rachaduras e desabamentos nos diversos tipos de obras (MAIA *et al.*, 2018).

De modo geral, Maia *et al.* (2018) descrevem os solos expansivos como sendo aqueles que possuem a capacidade de se expandir quando estão em contato com a água e de se contrair quando secos. Tal característica é dada em função da capacidade de expansão dos argilominerais presentes em sua composição. A maior ou menor concentração de determinadas partículas em um solo depende da composição química da rocha matriz. Esses solos perdem a resistência em função do teor de umidade à que estão submetidos. O comportamento expansivo, resultante da alteração de volume, envolve um conjunto de fatores que influenciam e interagem entre si, tais como: a composição química das argilas (argilomineral), a sua estrutura e os fatores ambientais (clima da região, natureza do fluido, grau de saturação do solo, etc.).

Vilar e Ferreira (2015) descrevem os solos expansivos como sendo solos não saturados que contêm argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1, tais como as montmorilonitas e as vermiculitas. Em virtude disso, os solos oriundos de qualquer rocha, cuja decomposição enseja a formação de argilominerais expansivos, podem estar associados ao fenômeno de expansão, como é o caso de rochas ígneas básicas tais como os basaltos, diabásios e gabros, em que a decomposição do piroxênio e do feldspato possibilita a formação de montmorilonita.

Por outro lado, os autores afirmam que outras formações também dão origem a solos expansivos, como é o caso das rochas sedimentares, visto que permitem a acumulação de diferentes componentes, podendo ser citados os folhelhos, as margas e os calcários. A formação desses solos, oriunda de regiões semiáridas de clima tropical e mesmo de clima temperado, em que, comumente, a evapotranspiração excede a precipitação, é responsável pela preservação dos minerais expansivos. As características predominantes dos solos expansivos estão presentes na Figura 21. Tais características proporcionam indicações qualitativas acerca do caráter expansivo.

Baseado nas características dos solos expansivos da Espanha apresentadas por Ayala *et al.* (1986), Amorim (2004) apresenta as características comuns para os solos expansivos do

Brasil que podem contribuir na tarefa de identificação desses solos em campo, sendo elas:

- a) ausência, em geral, de árvores e arbustos caducifólios;
- b) cores primárias do solo (cinzentas, esverdeadas ou azuladas);
- c) fendas poligonais amplas, profundas e por vezes de bordas irregulares, na superfície do terreno, durante a estação de seca;
- d) fácil moldagem do solo quando umedecido, manchando os dedos;
- e) lama pegajosa que adere fortemente ao calçado e à maquinaria;
- f) os torrões de solo e deformações produzidas no terreno molhado (pegadas de calçados, rodas de veículo, etc.) são muito persistentes quando secos;
- g) quando seco o solo é resistente, sendo difícil rompê-lo com instrumentos manuais;
- h) cortes efetuados no solo úmido adquirem, ao secar, o aspecto das superfícies de ruptura produzidas em estado seco;
- i) os taludes se apresentam bem desagregados com aberturas de junções prismáticas na superfície, com queda de pequenos blocos e torrões de argila ao pé do talude;
- j) os Vertissolos podem apresentar um microrelevo característico devido aos movimentos verticais de solo ocasionados pelos ciclos de umedecimento e secagem das argilas.

Figura 21 - Características predominantes nos solos expansivos, segundo Vilar e Ferreira (2015) e Amorim (2004).



Fonte: Autor (2024).

A Figura 22 apresenta o aspecto dos solos expansivos registrados por Silva (2018) em Agrestina-PE, Nunes (2013) em Juazeiro-BA, Bezerra (2019) em Brejo da Madre de Deus-PE e Ferreira e Ferreira (2009) em Petrolândia-PE.

Figura 22 - Aspectos dos solos expansivos registrados em diferentes locais por diferentes autores.



Fonte: Adaptado de Silva (2018), Nunes (2013), Bezerra (2019) e Ferreira e Ferreira (2009).

Clemence e Finnbar (1981) entendem que a expansão dos solos está diretamente relacionada à adsorção de água, bem como afirmam que todos os solos contendo argilominerais do tipo 2:1 estão sujeitos ao fenômeno de expansão. As variações de volume são decorrentes da entrada de uma molécula de água na estrutura desses argilominerais. Tal mudança de volume pode alcançar mais de 30% do seu volume, conforme mostrado por Lambe e Whitman (1973).

Ferreira (1995) assevera que existem 2 (dois) requisitos fundamentais para que um solo possa exibir o comportamento expansivo, sendo eles:

- a) devem existir, e entrar em funcionamento, certos mecanismos que, ao nível microescalar, produzam a instabilidade volumétrica do solo;
- b) devem estar presentes forças capazes de transferir a umidade de um ponto a outro do solo. Isso implica em um desequilíbrio da umidade natural do contorno.

Conforme o referido autor, esses requisitos são classificados em intrínsecos e extrínsecos. O primeiro está relacionado às características próprias do solo (composição mineralógica, textura e estrutura), estabelecendo a capacidade teórica. O segundo é imposto por fatores externos, como, por exemplo: a climatologia, a hidrogeologia, a vegetação e a própria atuação humana. Tais fatores determinam se o potencial expansivo pode ou não ser desencadeado.

2.3.3 Locais de ocorrência

Em inúmeros países, é possível encontrar registros de ocorrência de solos expansivos. Schreiner (1987) cita ocorrência em Angola, Etiópia, Gana, Quênia, Nigéria, África do Sul, Tanzânia, Zíbia, Canadá, Argentina, Peru, Venezuela, Estados Unidos, Austrália, China, Índia, Romênia, Espanha, Reino Unido, Israel, Jordânia e Arábia Saudita. Constantino (2018) relata ocorrência de solos expansivos registrados por Chen (1975) no México, Irã, Marrocos, Cuba e Turquia. Quispe *et al.* (2014) acrescentam à lista os seguintes países: Nova Zelândia, Costa Rica, Colômbia e Equador.

Somando-se a isso, cabe destacar o registro de Murthy (2002) no Egito, bem como os países onde foram registraram problemas devido aos solos expansivos elencados por Mahler (1994), sendo eles: Arábia Saudita, Brasil, Chile, China, França, Nigéria e Zimbábue. O Quadro 5 apresenta a consolidação dos registros encontrados na literatura sobre a ocorrência de solos expansivos no mundo, informado o país, o continente e a referência.

Quadro 5 - Relação de países com ocorrência de solos expansivos no mundo. (continua)

País	Continente	Referência
 África do Sul	África	Schreiner (1987) e Mahler (1994)
 Angola	África	Schreiner (1987)
 Arábia Saudita	Ásia	Schreiner (1987) e Mahler (1994)
 Argentina	América do Sul	Schreiner (1987)
 Austrália	Oceania	Schreiner (1987) e Mahler (1994)
 Brasil	América do Sul	Ferreira (1995), Mahler (1994), Paiva (2016)
 Canadá	América do Norte	Schreiner (1987), Mahler (1994), Murthy (2003) e Quispe <i>et al.</i> (2014)

Quadro 5 - Relação de países com ocorrência de solos expansivos no mundo. (continuação)

País	Continente	Referência
 Chile	América do Sul	Mahler (1994)
 China	Ásia	Schreiner (1987), Mahler (1994), Murthy (2003), Costa e Craizer (1978),
 Colômbia	América do Sul	Quispe <i>et al.</i> (2014)
 Costa Rica	América Central	Quispe <i>et al.</i> (2014)
 Cuba	América Central	Chen (1975)
 Egito	África	Murthy (2003)
 Equador	América do Sul	Quispe <i>et al.</i> (2014)
 Espanha	Europa	Schreiner (1987) e Mahler (1994)
 Estados Unidos	América do Norte	Schreiner (1987), Mahler (1994), Quispe <i>et al.</i> (2014), Murthy (2003), Costa e Craizer (1978)
 Etiópia	África	Schreiner (1987) e Mahler (1994)
 França	Europa	Mahler (1994)
 Gana	África	Schreiner (1987) e Mahler (1994)
 Índia	Ásia	Schreiner (1987), Murthy (2003) e Mahler (1994)
 Irã	Ásia	Chen (1975) e Mahler (1994)
 Israel	Ásia	Schreiner (1987), Murthy (2003), Mahler (1994) e Quispe <i>et al.</i> (2014)
 Jordânia	Ásia	Schreiner (1987)
 Marrocos	África	Chen (1975) e Mahler (1994)
 México	América do Norte	Chen (1975) e Mahler (1994)
 Myanmar	Ásia	Mahler (1994)
 Nigéria	África	Schreiner (1987) e Mahler (1994)
 Nova Zelândia	Oceania	Quispe <i>et al.</i> (2014)
 Peru	América do Sul	Schreiner (1987)
 Quênia	África	Schreiner (1987)
 Romênia	Europa	Schreiner (1987)
 Tanzânia	África	Schreiner (1987)
 Turquia	Ásia	Chen (1975) e Mahler (1994)
 Venezuela	América do Sul	Schreiner (1987) e Mahler (1994)

Quadro 5 - Relação de países com ocorrência de solos expansivos no mundo. (conclusão)

País	Continente	Referência
 Zâmbia	África	Schreiner (1987)
 Zimbabwe	África	Mahler (1994)

Fonte: Autor (2024).

Tendo como base o quadro exposto, a Figura 23 apresenta o mapa geográfico que permite uma representação visual dos países em que foi registrada a ocorrência de solos expansivos. Ressalta-se que o referido mapa visa apenas apontar os países em que há ocorrência de solos expansivos, independentemente de sua extensão de ocorrência territorial.

Figura 23 - Mapa geográfico referente à ocorrência de solos expansivos no mundo, segundo Schreiner (1987), Chen (1975), Quispe *et al.* (2014), Murthy (2002) e Mahler (1994).



Fonte: Autor (2024).

No que se refere ao Brasil, a ocorrência de solos expansivos já foi verificada em diversas regiões do território nacional. Ferreira (2008) realizou um levantamento sobre ocorrência de solos expansivos no país, sendo constatados registros nos estados do Paraná, São Paulo, Santa Catarina, Mato Grosso, Pernambuco, Bahia, Sergipe, Ceará e Maranhão. Baseado nesse levantamento, foram acrescentados novos registros de ocorrências de solos

expansivos. A relação de municípios do Brasil está apresentada no Quadro 6, em que é informada a região, o estado, a referência, o município e o tipo de solo.

Quadro 6 - Relação de ocorrência de solos expansivos no Brasil. (continua)

Região	UF	Referência - Município	Origem Classe Pedológica
Norte	 AM	Souza, Júnior e Rezende (2010) - Coari	-
	 TO	Costa <i>et al.</i> (2019) - Monte do Carmo	-
Nordeste	 AL	Ferreira (1988) - Maceió	Bruno não Cálculo
	 BA	1. Simões e Costa Filho (1981), Simões (1986), Presa (1986), Burgos e Campos (2008), Reis <i>et al.</i> (2019) - Salvador; 2. Barreto <i>et al.</i> (1982) e Oliveira <i>et al.</i> (2006) - Simões Filho; 3. Presa (1986) - Feira de Santana; 4. Signer <i>et al.</i> (1989), Santos e Marinho (1990) - Sobradinho; 5. Ferreira (1989), Souza Neto <i>et al.</i> (2012) - Juazeiro; 6. Oliveira <i>et al.</i> (2006) - São Francisco do Conde; 7. Oliveira <i>et al.</i> (2006), Oliveira <i>et al.</i> (2018), Oliveira e Costa (2018) - Santo Amaro; 8. Burgos (2010) - Camaçari; 9. Oliveira <i>et al.</i> (2018) - Amélia Rodrigues / Candeias; 10. Oliveira <i>et al.</i> (2018), Costa Júnior e Lima (2018) - São Sebastião do Passé; 11. Jesus e Pinto (2018) - Tucano; 12. Menezes <i>et al.</i> (2018) - Vitória da Conquista 13. Silva <i>et al.</i> (2019) - Guanambi	1. Grupos Ilha e Santo Amaro e Formação São Sebastião, Vertissolo; 2. Vertissolo; 3. Solos Residuais, Vertissolo; 4. Silticos e Argilitos, Sedimentos da Bacia do Jatobá da Formação Aliança; 5. Vertissolo, Grupo Salgueiro; 6. - ; 7. Grupo Santo Amaro; 8. - ; 9. Grupo Santo Amaro / Grupo Santo Amaro; 10. Vertissolo, Grupo Santo Amaro, Formação São Sebastião; 11. - ; 12. - ; 13. -
	 CE	1. Grajeiro (2014), Souza, Bandeira e Souza (2018) - Juazeiro do Norte; 2. Chagas, Moura e Carneiro (2017) - Icó	1. - ; 2. Icó, Malhada Vermelha e Lima Campos
	 MA	Ferreira (1988) - Presidente Dutra; Gusmão Filho <i>et al.</i> (2002) - Grajaú; Sandroni e Consoli (2010) - Bacabeira	-
	 PB	Ribeiro (2019) - Sousa	-
	 PE	1. Costa Nunes <i>et al.</i> (1982), Costa Nunes <i>et al.</i> (1992), Jucá <i>et al.</i> (1992) e Medeiros <i>et al.</i> (2010) - Olinda; 2. Costa Nunes <i>et al.</i> (1982), Costa Nunes <i>et al.</i> (1992), Ferreira <i>et al.</i> (2012), Paiva <i>et al.</i> (2012) e Maia <i>et al.</i> (2018) - Cabo de Santo Agostinho; 3. Ferreira (1988) e Ferreira (1989) - Carnaíba; 4. Ferreira (1989) - Afrânio / Petrolina / Salgueiro / Serra Talhada / Ibimirim / Cedro; 5. Ferreira (1989), Paiva e Ferreira (2011) e Paiva <i>et al.</i> (2012) - Cabrobó	1. Formação Maria Farinha, Silticos; 2. Rochas Extrusivas Básicas, Formação Maria Farinha do Grupo Barreiras, Gleissolo, Terra Roxa, Sedimentos de Mangue; 3. Compl. Monteiro, Bruno não Cálculo; 4. Grupo Salgueiro, Cachoeirinha, Areia Quartzosa, Bruno não Cálculo / Grupo Salgueiro, Areia Quartzosa, Bruno não Cálculo / Complexo Monteiro, Bruno não Cálculo / Complexo Monteiro, Bruno não Cálculo / Grupo Cachoeirinha; 5. Compl. Pres. Juscelino, Bruno não Cálculo

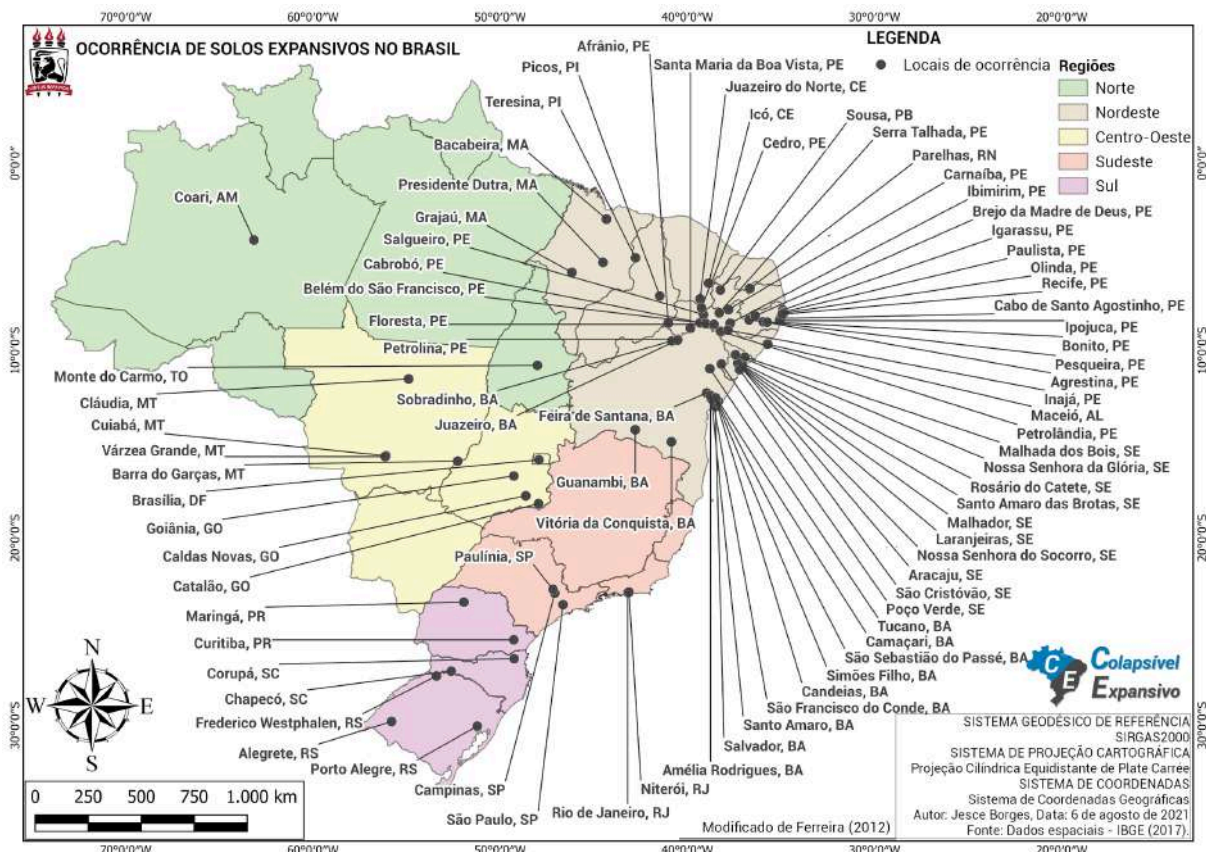
Quadro 6 - Relação de ocorrência de solos expansivos no Brasil. (conclusão)

Região	UF	Referência - Município	Origem Classe Pedológica
Nordeste	 PE	6. Santos e Marinho (1992), Ferreira (1989) e Ferreira (1995) - Petrolândia; 7. Bastos e Jucá (1994), Ferreira (1989), Ferreira <i>et al.</i> (1998), Justino da Silva e Cruz (2006), Silva e Cruz (2007), Paiva <i>et al.</i> (2012), Moraes J. (2017) e Bezerra <i>et al.</i> (2019) - Paulista; 8. Ferreira (1997) - Igarassu / Inajá / Recife; 9. Silva e Ferreira (2007) - Pesqueira; 10. Sarmento e Albuquerque (2010), Gurgel e Santos Júnior (2016) - Floresta; 11. Leite e Ferreira (2012) - Belém do São Francisco; 12. Silva e Coutinho (2012), Souza <i>et al.</i> (2014) e Coutinho <i>et al.</i> (2017) - Ipojuca; 13. Silva (2018) - Agrestina; 14. Silva (2018), Silva e Ferreira (2018) - Bonito; 15. Marinho (2018), Marinho e Ferreira (2018) - Santa Maria da Boa Vista; 16. Bezerra (2019) - Brejo da Madre de Deus	6. Formação Aliança, Areia Quartzosa; 7. Formação Maria Farinha; 8. Formação Barreiras / Formação Inajá / Formação Barreiras; 9. Planossolo; 10. Argilito, Planossolo, Formação São Sebastião; 11. Sedimento do Recôncavo, Tucano e Jatobá; 12. Formação Ipojuca, Formação Cabo; 13. - ; 14. - ; 15. - ; 16. Podzólico vermelho amarelo
	 PI	1. Oliveira <i>et al.</i> (2018) - Picos; 2. Aquino (2020) - Teresina	1. - ; 2. Grupo Balsas, Formação Pedra de Fogo e Formação Piauí
	 RN	Lins <i>et al.</i> (1986) - Parelhas	Formação Seridó
	 SE	1. Gusmão Filho <i>et al.</i> (2002) e Cavalcante Júnior <i>et al.</i> (2017) - Laranjeiras; 2. Gusmão Filho <i>et al.</i> (2002), Cavalcante Júnior <i>et al.</i> (2017), Cunha (2018), Moraes (2018), Costa <i>et al.</i> (2018) - Nossa Senhora do Socorro; 3. Cavalcante <i>et al.</i> (2007) e Alves (2013) - Aracaju; 4. Alves (2013) e Cavalcante Júnior <i>et al.</i> (2017) - Rosário do Catete; 5. Alves (2013) - Malhada dos Bois; 6. Cavalcante Júnior <i>et al.</i> (2017) - Poço Verde / Santo Amaro das Brotas / Malhador / Nossa Senhora da Glória / São Cristóvão	1. Formação Barreiras; 2. Formação Barreiras, Formação Calumbi; 3. Formação Calumbi; 4. - ; 5. - ; 6. Formação São Sebastião / - / - / - / -
Centro Oeste	 DF	Silva e Jesus (2019) - Brasília	-
	 GO	Brandão <i>et al.</i> (2009) - Caldas Novas / Goiânia; Rufo <i>et al.</i> (2009) - Catalão	-
	 MT	1. Ribeiro Júnior <i>et al.</i> (2006), Ribeiro e Júnior (2012) e Silva <i>et al.</i> (2012) - Cuiabá; 2. Amorim e Conciani (2010) - Várzea Grande; 3. Guimarães <i>et al.</i> (2019) - Cláudia / Barra do Garças	1. Grupo Cuiabá, Formação Miguel Sutil, Formação Rio Coxipó, Filito; 2. - ; 3. -
Sudeste	 RJ	Sandroni e Consoli (2010) - Rio de Janeiro; Ehrlich <i>et al.</i> (2013) - Niterói	-
	 SP	1. Sâmara (1981) - Campinas; 2. Vargas <i>et al.</i> (1989) - São Paulo; 3. Souza (2018) - Paulínia	1. Podzólico; 2. Formação Tubarão; 3. -
Sul	 PR	1. Perreira e Pejon (2004), Argenta, Avanzi e Machado (2010), Moreira <i>et al.</i> (2017) - Curitiba; 2. Marques <i>et al.</i> (2017) - Maringá	1. Formação Guabirotuba; 2. -
	 RS	1. Vargas <i>et al.</i> (1989) - Porto Alegre; 2. Tapahuasco <i>et al.</i> (2013) - Alegrete; 3. Calgaro <i>et al.</i> (2017) - Frederico Westphalen	1. Formação Rosário do Sul; 2. - ; 3. -
	 SC	Oliveira <i>et al.</i> (2017) - Corupá; Gemelli <i>et al.</i> (2017), Casagrande e Lopes (2017) - Chapecó	-

Fonte: Modificado de Ferreira (2008).

Baseada no quadro supracitado, a Figura 24 apresenta a distribuição territorial dos municípios onde constam registros sobre a ocorrência de solos expansivos no Brasil, destacadas as regiões do país. Nota-se que os solos expansivos estão presentes em todas as regiões do país, apresentando, semelhantemente aos solos colapsíveis, uma maior concentração de registros na região do Nordeste.

Figura 24 - Ocorrência de solos expansivos no Brasil, modificado de Ferreira (2008).



Fonte: Autor (2024).

Ferreira (1995) ressalta que existem vários tipos de solos sujeitos ao fenômeno de expansão, destacando os solos oriundos de rochas ígneas e de rochas sedimentares.

No tocante às rochas ígneas, é possível destacar, basicamente, os basaltos, os diabásios e os gabros, em que os feldspatos e os piroxênios se decompõem para formar montmorilonita e minerais secundários. No que se refere às rochas sedimentares, os sedimentos apresentam o constituinte argilomineral montmorilonita. A título de exemplo, o referido autor cita os folhelhos, as margas e os calcários, pois se desagregam facilmente.

2.3.4 Métodos de identificação

Paiva (2009) discorre que a identificação e a classificação de um solo expansivo podem ser realizadas em duas etapas. A primeira consiste na coleta de informações prévias quanto aos fatores de topografia, vegetação, sinais de contração do solo e fissuras nas edificações, bem como a realização de consulta junto aos moradores da região. A segunda envolve a interpretação de ensaios de laboratório e o uso de métodos de identificação, sendo essa etapa dividida em ensaios mineralógicos, métodos indiretos e métodos diretos.

Os métodos de identificação de solos expansivos foram agrupados em diretos e indiretos por Schreiner (1987), Quadro 7. Conforme visto anteriormente, os princípios básicos para agrupar os métodos de identificação foram aplicados por Ferreira (1995) nos solos colapsíveis.

Quadro 7 - Métodos indiretos e diretos de identificação de solos expansivos.

Métodos	Subdivisões	Base para definição do critério	Referências Bibliográficas
Indireto	Identificativos	Difração e Raio X Microscopia eletrônica de varredura Análise termo-diferencial Adsorção de etilenoglicol e glicerina	Ayala <i>et al.</i> (1986)
		Físico-químico	Fink <i>et al.</i> (1971)
	Qualitativos	Granulometria Consistência Índices físicos Classificação Geotécnica	Prikonskij (1952), Skempton (1953), Seed <i>et al.</i> (1962), Van Der Merwe (1964), Chen (1965), Vijayvervia e Ghazzaly (1973), Rodriguez Ortiz (1975), Cuellar (1978), Daksanamurthy e Raman (1973)
	Orientativos	Geologia Geomorfologia Pedologia Identificação visual	Patrick e Snethen (1976), Ayala <i>et al.</i> (1986), Ferreira (1990 e 1993)
Direto	Avaliativos	Ensaio de expansão de Lambe	Lambe (1960)
	Quantitativos	Expansão Livre e Tensão de Expansão Ensaio Edométrico Duplo e Simples Ensaio de placa Expansocolapsômetro	Seed <i>et al.</i> (1960), Chen (1965), Vijayverviya e Ghazzaly (1973), Rodriguez Ortiz (1975), Cuellar (1978), Jimenez Salas (1980)
		Ensaio edométrico de sucção controlada	Escario (1967 e 1969), Aitchison <i>et al.</i> (1974), Johnson (1978), Mc Keen (1980)

Fonte: Schreiner (1987) e Ferreira (1995).

No que se refere aos solos expansivos, os métodos indiretos são aqueles que recorrem à identificação mineralógica, índices físicos, limites de consistência ou parâmetros ligados à textura, composição e comportamento do solo. Já os métodos diretos são aqueles baseados na medida de expansão induzida ao solo ou da tensão necessária para impedi-lo, obtidas mediante ensaios do tipo edométrico (FERREIRA, S. R. M., 1995).

A identificação visual de solos expansivos em campo não representa uma tarefa fácil. Os índices clássicos utilizados para caracterizar os solos (SPT, granulometria e índices de consistência) não são capazes de identificar com exatidão se um solo é expansivo. Em virtude disso, muitos pesquisadores, buscando determinar a suscetibilidade da expansividade de um solo, definiram critérios para identificar o comportamento expansivo (VILAR; FERREIRA, 2015).

Constantino (2018) descreve alguns critérios de identificação de solos expansivos, esses são sucintamente expostos a seguir. O critério de Skempton (1953) envolve o índice de atividade (Ia): quanto maior a quantidade de argila, mais alto é o potencial de expansão. A gradação escolhida para identificar o potencial de expansão foi inativo, pouco inativo, ativo e muito ativo. O critério de Cuellar (1978), oriundo do estudo em argilas expansivas da Espanha, relaciona o limite de contração (WC) e o índice de plasticidade (IP). Somado a isso, Cuellar (1978) estabeleceu outro critério envolvendo uma relação entre a tensão de expansão e o inchamento livre da amostra compactada à densidade máxima e umidade ótima, sendo a amostra ressecada ao ar.

O índice de plasticidade (IP), o limite de contração (WC) e o percentual de colóides menores que 0,001 mm foram utilizados na definição do critério de Holtz (1953). Já Seed *et al.* (1962) estabeleceram um critério que correlaciona a expansão “livre” para amostras compactadas na umidade ótima e densidade máxima, na tensão vertical de 7 kPa, com o grau de expansividade do solo. O critério de Rodriguez Ortiz (1975) é oriundo de critérios práticos de expansividade de diferentes autores.

Paiva (2009) afirma que as características de contração foram utilizadas no desenvolvimento do critério de Altmeyer (1955) para a avaliação do grau de expansão dos solos, enquanto a granulometria, o limite de liquidez e o ensaio SPT foram aplicados no critério de Chen (1975). Bezerra (2019) relata que o critério Seed *et al.* (1962) tem como parâmetro o índice de plasticidade, já o critério de Dakshanamurthy e Raman (1973) foi baseado no limite de liquidez para classificar o potencial expansivo do solo.

De acordo com Silva (2018), o limite de liquidez e o índice de plasticidade foram utilizados no critério de Chen (1975), já o critério de Holtz e Gibbs (1956) teve como base apenas o índice de plasticidade. O critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973) foi baseado na expansão livre, em porcentagem, para uma tensão de sobrecarga de 10 kPa.

Dentre os termos citados anteriormente, cabe apresentar uma descrição sucinta de alguns deles. O ensaio de expansão livre consiste em acondicionar os corpos de prova cilíndricos em células do tipo edométrico convencional. Antes e após o ensaio, essas amostras são pesadas e suas alturas são anotadas (inicial e final). No topo dos corpos de prova, coloca-se um relógio comparador (micrômetro), sustentado por um braço mecânico. Esses relógios permitem leitura direta de até 0,01 mm, com capacidade para até 10 mm. Após os corpos de prova estarem acondicionados na célula, ajusta-se o relógio comparador e adiciona-se água. As deformações observadas no relógio são anotadas em intervalos de tempo que obedecem a uma progressão geométrica de razão dois (CAMPOS, 1989).

Após a estabilização, a expansão denominada “livre” é determinada em percentual. Nesse ensaio, as tensões mais utilizadas nas metodologias são 1kPa, 7 kPa e 10 kPa, aplicadas a solos não compactados, enquanto para amostras deformadas utiliza-se a tensão de 50 kPa (CHEN, 1965). Os resultados desses ensaios são expressos na forma de gráficos, obtidos através dos valores de deformação *versus* tempo. A porcentagem de expansão “livre” pode ser obtida aplicando-se a Equação 4.

$$E (\%) = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad (4)$$

em que:

E = expansão “livre”, em porcentagem;

ΔH = altura da expansão devido à saturação;

H = altura do corpo de prova antes da inundação.

No tocante à tensão de expansão, essa é determinada por diferentes trajetórias de tensão, que correspondem a diferentes métodos. Ferreira (1995) elenca 6 (seis) métodos, sendo eles: carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, expansão e colapso sob carregamento, volume constante, Rao *et al.* (1988), edométrico duplo e Justo *et al.* (1984). Para Frazão (1981), os ensaios edométricos estão entre os mais utilizados para estudar a variação volumétrica dos materiais expansivos.

No que se refere à expansão de Lambe (1960), a amostra de solo é remoldada e colocada no anel, sendo carregada com uma tensão nominal de 10 t/m². Em seguida, a

amostra é inundada, e, no final de 2 (duas) horas, mede-se a pressão alcançada em kPa. Dessa forma, a pressão mensurada representa o índice de expansividade ou índice de Lambe (1960). Os critérios são definidos após associar esse índice com o potencial expansivo do solo (BEZERRA, 2019).

O Quadro 8 apresenta a consolidação dos critérios supracitados, sendo esses enquadrados em métodos indiretos qualitativos e em métodos diretos avaliativos e quantitativos. A estrutura do referido quadro está disposta da seguinte forma: a referência do critério, o método (direto ou indireto), os índices envolvidos e a gradação aplicada para o potencial de expansão ou grau de expansividade.

Quadro 8 - Critérios de identificação de solos expansivos baseados em métodos diretos e indiretos.
(continua)

Referência	Método	Parâmetros utilizados no critério	Gradação aplicada
Lambe (1960)	Direto	$IL < 80$	não crítico;
		$80 < IL < 150$	marginal;
		$150 < IL < 230$	crítico;
		$IL > 230$	muito crítico.
Skempton (1953)	Indireto	$I_a < 0,75$	inativo;
		$0,75 < I_a < 1,25$	pouco ativo;
		$1,25 < I_a < 2,00$	ativo;
		$I_a > 2,00$	muito ativo.
Cuellar (1978)	Indireto	$WC > 15 \mid IP < 15$	baixa;
		$11 < WC < 15 \mid 15 < IP < 25$	média;
		$8 < WC < 11 \mid 25 < IP < 35$	alta;
		$WC < 10 \mid IP > 35$	muito alta.
USBR – Holtz (1953)	Indireto	$\% Col < 15 \mid IP < 18 \mid WC > 15$	baixa;
		$13 < \% Col < 23 \mid 15 < IP < 28 \mid 10 < WC < 16$	média;
		$20 < \% Col < 31 \mid 25 < IP < 41 \mid 7 < WC < 12$	alta;
		$\% Col > 28 \mid IP > 35 \mid WC < 11$	muito alta.
Seed, Woodward e Lundgren (1962)	Direto	$0 < \% EL < 1$	baixa;
		$1 < \% EL < 5$	média;
		$5 < \% EL < 25$	alta;
		$\% EL > 25$	muito alta.
Cuellar (1978)	Direto	$TE < 25 \mid \% EL1 < 1,5 \mid \% EL2 < 10$	baixa;
		$25 < TE < 125 \mid 1,5 < \% EL1 < 5 \mid 10 < \% EL2 < 20$	média;
		$125 < TE < 300 \mid 5 < \% EL1 < 10 \mid 20 < \% EL2 < 30$	alta;
		$TE > 300 \mid \% EL1 > 10 \mid \% EL2 > 30$	muito alta.

Quadro 8 - Critérios de identificação de solos expansivos baseados em métodos diretos e indiretos.
(continuação)

Referência	Método	Parâmetros utilizados no critério	Gradação aplicada
Rodriguez Ortiz (1975)	Direto	$0 < PI < 1,5 \mid IL < 80 \mid TE < 30 \mid 0 < Ip < 1 \mid \% Ip < 1$	baixa;
		$1,5 < PI < 5 \mid 80 < IL < 150 \mid 30 < TE < 120 \mid 1 < Ip < 3 \mid 1 < \% Ip < 5$	média;
		$5 < PI < 25 \mid 150 < IL < 230 \mid 120 < TE < 300 \mid 3 < Ip < 7 \mid 5 < \% Ip < 10$	alta;
		$PI > 25 \mid IL > 230 \mid TE > 300 \mid Ip > 7 \mid \% Ip > 10$	muito alta.
Altmeyer (1955)	Indireto	$CL < 5 \mid WC > 12 \mid EP < 0,5$	não crítico;
		$5 < CL < 8 \mid 10 < WC < 12 \mid 0,5 < EP < 1,5$	marginal;
		$CL > 8 \mid WC < 10 \mid EP < 10$	crítico.
Chen (1965)	Indireto	$F200 < 30 \mid LL < 30 \mid SPT < 10 \mid EP < 1$	baixa;
		$30 < F200 < 60 \mid 30 < LL < 40 \mid 10 < SPT < 20 \mid 1 < EP < 5$	média;
		$60 < F200 < 95 \mid 40 < LL < 60 \mid 20 < SPT < 30 \mid 3 < EP < 10$	alta;
		$F200 > 95 \mid LL > 60 \mid SPT > 30 \mid EP > 10$	muito alta.
Seed <i>et al.</i> (1962)	Indireto	$IP < 10$	baixa;
		$10 \leq IP \leq 20$	média;
		$20 < IP \leq 35$	alta;
		$IP > 35$	muito alta.
Daksanamurthy e Raman (1973)	Indireto	$20 \leq LL \leq 35$	baixa;
		$35 < LL \leq 50$	média;
		$50 < IP \leq 70$	alta;
		$IP > 70$	muito alta.
Chen (1975)	Indireto	$LL < 30 \mid 0 < IP < 15$	baixa;
		$30 < LL < 40 \mid 10 < IP < 35$	média;
		$40 < LL < 60 \mid 20 < IP < 55$	alta;
		$LL > 60 \mid IP > 35$	muito alta.
Holtz e Gibbs (1956)	Indireto	$IP < 20$	baixa;
		$12 < IP < 34$	média;
		$23 < IP < 45$	alta;
		$IP > 32$	muito alta.

Quadro 8 - Critérios de identificação de solos expansivos baseados em métodos diretos e indiretos. (conclusão)

Referência	Método	Parâmetros utilizados no critério	Gradação aplicada
Vijayvergiya e Ghazzaly (1973)	Direto	$\% Sp < 1$	baixa;
		$1 < \% Sp < 4$	média;
		$4 < \% Sp < 10$	alta;
		$\% Sp > 10$	muito alta.

Ia - Índice de Atividade; LL - Limite de Liquidez (%); WC - Limite de Contração (%); IP - Índice de Plasticidade (%); % Col - Percentual de Colóides < 0,001 mm; % EL - Percentual de Expansão Livre para pressão de 7 kPa; TE - Tensão de Expansão (kPa); % EL1 - Percentual de Expansão Livre para amostra compactada a densidade máxima e umidade ótima; % EL2 - Percentual de Expansão Livre para amostra ressecada ao ar; PI - Potencial de Inchamento SEED; IL - Índice de Lambe; Ip - Inchamento provável em superfície; % Ip - Percentual de Inchamento provável; CL - Contração Linear; EP - Percentual de Expansão Provável; F200 - Porcentagem que passa na peneira nº 200 (0,075 mm); SPT - *Standart Penetration Test*; % Sp - Percentual de Expansão Livre para pressão de 10 kPa.

Fonte: Autor (2024).

Jimenez Salas (1980) estabeleceu um critério que correlaciona a tensão de expansão (TE) com possíveis danos causados nas edificações, Quadro 9.

Quadro 9 - Possíveis danos nas edificações.

Tensão de Expansão (kPa)	Possíveis danos
$TE > 200$	Demolição
$100 \leq TE \leq 200$	Danos graves
$50 \leq TE < 100$	Fissuras importantes
$20 \leq TE < 50$	Fissuras pequenas
< 20	Sem danos

Fonte: Jimenez Salas (1980).

2.3.5 Problemas em obras de engenharia registrados na literatura

Vasconcelos (2001) afirma que a instabilidade volumétrica dos solos expansivos causa sérios problemas nas edificações, podendo resultar em fissuras ou fendas características nas estações secas, fissuras diagonais embaixo das janelas e acima das portas das edificações, ondulações e rupturas nos pavimentos, fissuras generalizadas longitudinais e transversais junto a bueiros, etc. A autora e Ferreira (1999) apresentaram registros dos danos ocasionados pelos solos expansivos nas edificações localizadas no município de Cabrobó-PE, Figura 25.

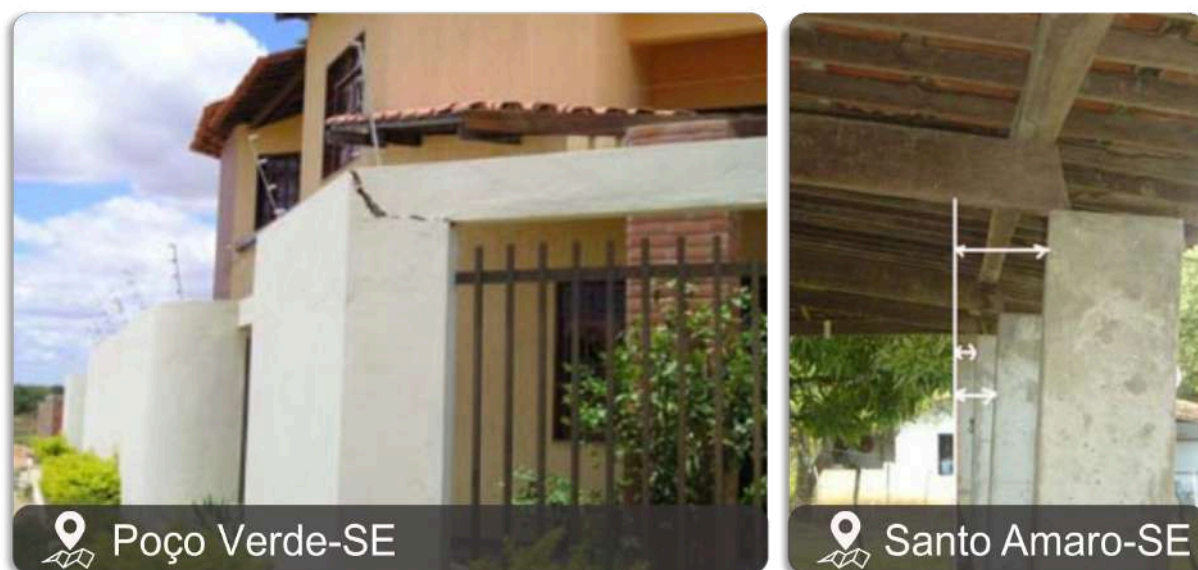
Figura 25 - Danos em edificações causados pelos solos expansivos de Cabrobó-PE.



Fonte: Adaptado de Vasconcelos (2001).

No Estado de Sergipe, residências situadas nos municípios de Poço Verde-SE e Santo Amaro-SE sofreram os efeitos do mecanismo da expansão e contração de solos (CAVALCANTE *et al.*, 2007, 2006), Figura 26. Os autores mencionados frisam ser possível identificar a presença dos solos expansivos quando as construções leves, cujas fundações estão sobre eles assentadas, sofrem levantamentos e desaprumos em períodos chuvosos, resultando no aparecimento de trincas de várias naturezas, especialmente quando retorna o período de estiagem.

Figura 26 - Ruptura de um pórtico e inclinação de pilares registrados nos municípios de Poço Verde-SE e Santo Amaro-SE, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Cavalcante *et al.* (2006).

Ao realizar um estudo no município de Brejo da Madre de Deus-PE, Bezerra (2019) registra danos em residências devido ao comportamento expansivo. O local de estudo foi escolhido em virtude da preocupação das famílias em decorrência do surgimento de trincas e fissuras nas estruturas dos imóveis rurais, Figura 27. O solo expansivo em questão é descrito como uma argila de alta plasticidade, apresentando argilomineral expansivo, com alta capacidade de troca, bem como tensão de expansão elevada, com capacidade de provocar fissuras consideráveis em edificações.

Figura 27 - Danos às estruturas dos imóveis rurais localizados no município de Brejo da Madre de Deus-PE.

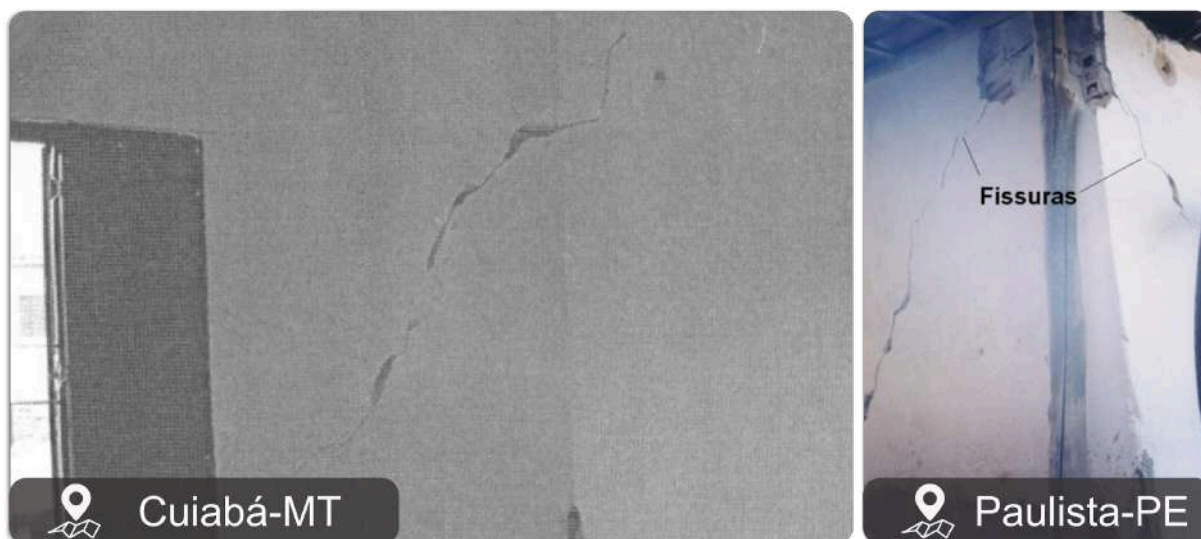


Fonte: Adaptado de Bezerra (2019).

Conciani (2006) apresenta registros de fissuras e trincas em uma obra situada em Cuiabá-MT causadas pelos solos expansivos. O referido autor ressalta que a trinca exposta na Figura 28 não apresenta sentido e direção típicos dos recalques. Na ocasião, o autor mencionado faz uma distinção entre as patologias causadas pelos solos colapsíveis e expansivos. No primeiro, a trinca nasce do vértice que sofreu o recalque, avançando em direção ao centro do painel com uma inclinação de aproximadamente 45°. Por outro lado, no segundo, a trinca tem origem no centro do painel, seguindo em direção ao seu vértice superior com inclinação de aproximadamente 45°. Segundo o autor, esse comportamento está em consonância com o observado por Peck *et al.* (1973).

Justino da Silva (2001) apresenta o registro fotográfico de fissuras em paredes de uma edificação residencial localizada no município de Paulista-PE, Figura 28. Paiva (2009) descreve a patologia como sendo resultante de deformações diferenciais na estrutura apoiada sobre o solo expansivo em que a área próxima à borda está sujeita ao ciclo de aumento e diminuição de umidade, ocasionando a variação volumétrica que, consequentemente, causa danos à edificação.

Figura 28 - Fissuras e trincas decorrentes de expansão do solo de fundação em Cuiabá-MT e Paulista-PE.



Fonte: Adaptado de Conciani (2006) e Justino da Silva (2001).

2.4 CARTOGRAFIA DE SOLOS COLAPSÍVEIS E EXPANSIVOS

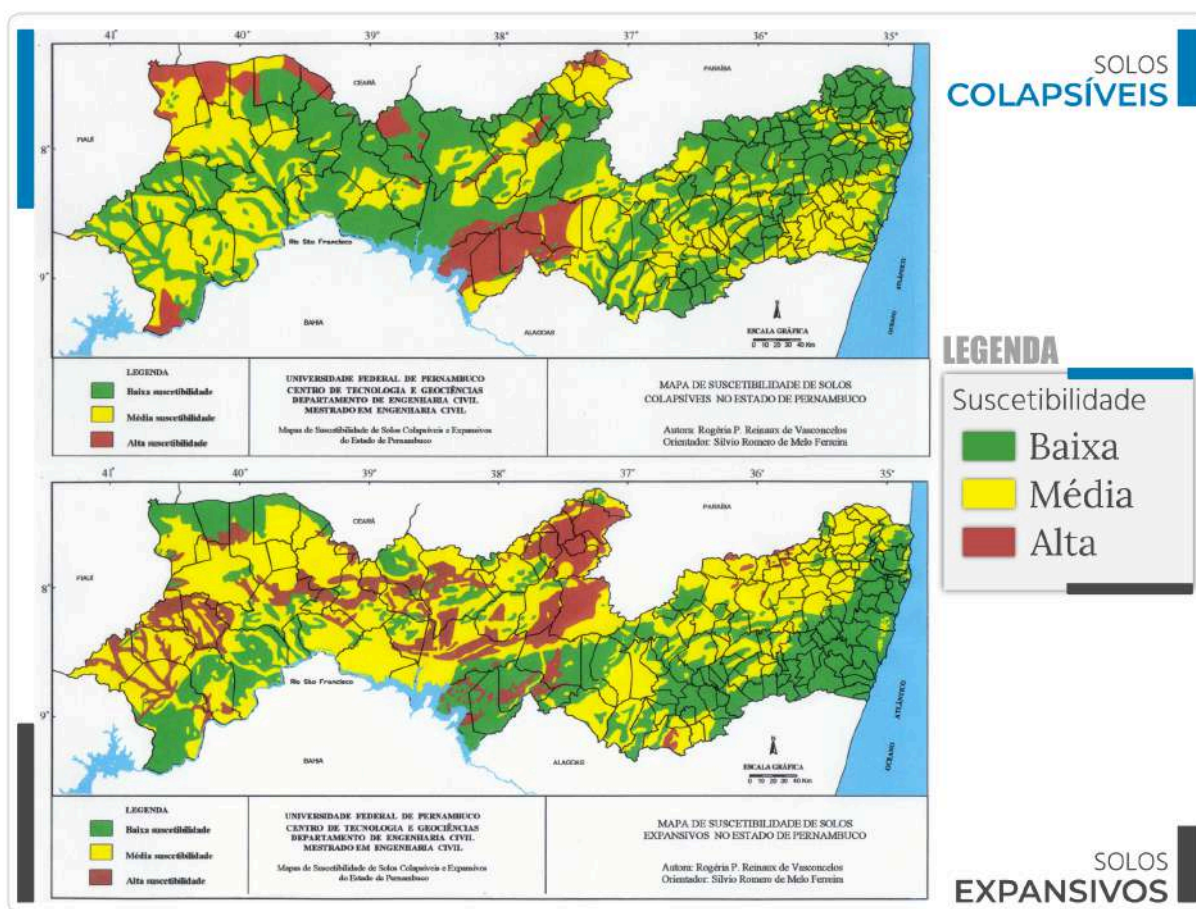
Para ampliar a compreensão sobre cartografia, o leitor é convidado a consultar os apêndices A, B e C. O Apêndice A aborda Noções Básicas de Cartografia, oferecendo uma introdução ao tema e explicando os principais conceitos cartográficos. No Apêndice B, encontram-se informações detalhadas sobre Cartografia Geotécnica, fornecendo uma visão aprofundada da aplicação da cartografia nessa área específica. Já o Apêndice C trata do Sistema de Informação Geográfica (SIG), apresentando uma visão abrangente e prática sobre essa poderosa ferramenta de análise espacial. A leitura desses apêndices proporcionará ao leitor uma base para explorar e interpretar os dados cartográficos contidos no presente trabalho.

Lollo (2012) afirma que a identificação de solos colapsíveis e o conhecimento de sua distribuição espacial constituem uma das primeiras etapas para o tratamento do problema. O autor ressalta que a cartografia permite fornecer informações essenciais para as intervenções, visando reduzir ou eliminar os danos oriundos do comportamento colapsível.

Utilizando os levantamentos climatológico (classificação segundo Thornthwaite), pedológico (classes pedológicas) e geológico (unidades geológicas), Vasconcelos (2001), com metodologia apresentada por Ferreira (1999), elaborou cartas de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos para o Estado de Pernambuco, classificando as unidades de mapeamento em três níveis de suscetibilidade: alto, médio e baixo.

Segundo a autora mencionada, os produtos cartográficos foram confrontados com ocorrência de solos colapsíveis e expansivos em 25 diferentes locais, havendo boa concordância entre a realidade e as previsões de ocorrência. Os resultados apontaram que 61% dos solos superficiais do estado de Pernambuco têm suscetibilidade de média a alta de serem colapsíveis e 65% de serem expansivos (Figura 29).

Figura 29 - Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos para o Estado de Pernambuco.

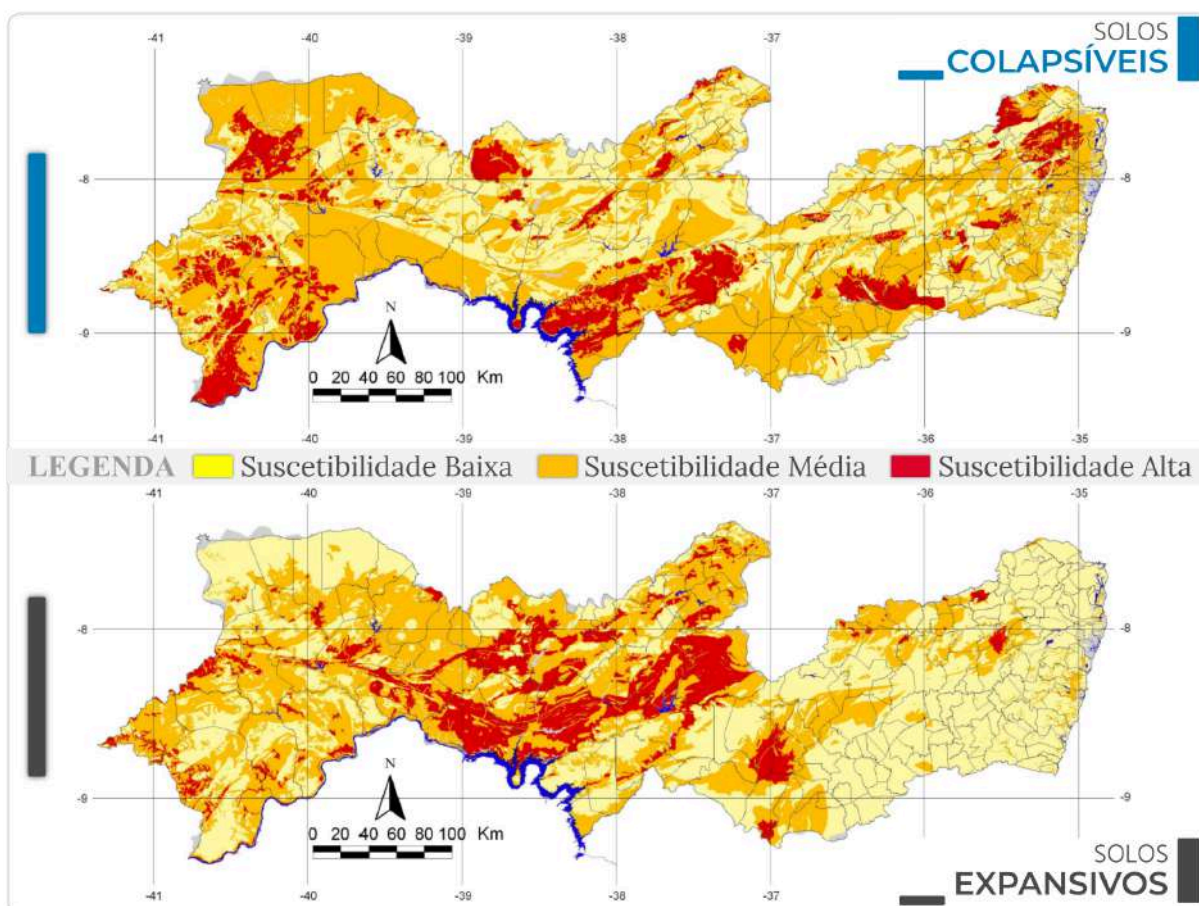


Fonte: Adaptado de Vasconcelos (2001).

Para o município de Petrolina-PE, adotando a mesma metodologia, Silva (2003) elaborou cartas de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos (Figura 30). O resultado do trabalho apontou que 50,3% da superfície do município apresenta suscetibilidade ao colapso, enquanto 48% apresenta suscetibilidade à expansão. O autor mencionado afirma que é viável identificar áreas com possíveis ocorrências de solos colapsíveis e expansivos com base nas características das classes pedológicas, unidades geológicas e classes climatológicas.

programas de SIG como ferramentas que permitem maior facilidade no acesso às informações e promovem rapidez na análise espacial e atualização dos mapas fundamentais.

Figura 31 - Carta interpretativa referente à suscetibilidade ao colapso e à expansão para o Estado de Pernambuco.



Fonte: Adaptado de Amorim (2004).

Em relação aos níveis de suscetibilidade, Amorim (2004) sugere os seguintes ensaios de campo e laboratório:

-  Suscetibilidade Baixa: ensaios convencionais da Mecânica dos Solos, tais como: caracterização geotécnica, sondagem SPT e ensaios edométricos simples;
-  Suscetibilidade Média: acrescentam-se aos cuidados apresentados pela suscetibilidade baixa os ensaios de mineralogia, edométricos duplos, determinação de expansão livre em vários teores de umidade;
-  Suscetibilidade Alta: acrescentam-se aos cuidados apresentados pela suscetibilidade média a análise de microestrutura (microscopia eletrônica de varredura e microscopia ótica), ensaios de campo com placa e

expansocolapsômetro, ensaios de sucção controlada, pressão de expansão, expansão com sobrecarga.

Para o município de Teresina-PI, Aquino (2020) elaborou cartas interpretativas de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos. Para a capital do Piauí, em relação ao colapso, os resultados do estudo apontaram a suscetibilidade alta em 9% da superfície, média em 45% e baixa em 46%. Quanto à expansão, não houve registro percentual para a suscetibilidade alta, apenas para média e baixa, sendo eles: 16% e 84%, respectivamente.

Oliveira (2002) analisou e representou cartograficamente o risco de colapso para a área urbana do município de Ilha Solteira-SP, classificando o risco em alto, médio e baixo. O trabalho resultou na elaboração das cartas de cadastramento e de zoneamento de risco de colapso, constituindo, segundo a autora, uma importante ferramenta para subsidiar os projetos e obras de ocupação, bem como a elaboração de planos de seguro de edificações. Já para a área urbana de Rio Claro-SP, Zaine (2000) estudou o mapeamento geológico-geotécnico e a representação cartográfica de unidades geotécnicas. Dentre as temáticas envolvidas, foi analisada a suscetibilidade à ocorrência do colapso e expansão. Nessa pesquisa, foi utilizada a metodologia adotada pela Escola de Engenharia de São Carlos e pelo IPT.

Seguindo a citada metodologia, Andrade (2005) elaborou o mapa de materiais inconsolidados com características colapsíveis para a área de expansão do município de Uberlândia-MG. Margoto e Aparecido Júnior (2016), com base na análise pedológica-geológica, apresentam proposta para criação de mapa de risco de colapso para a área urbana do município de Campos Gerais-MG.

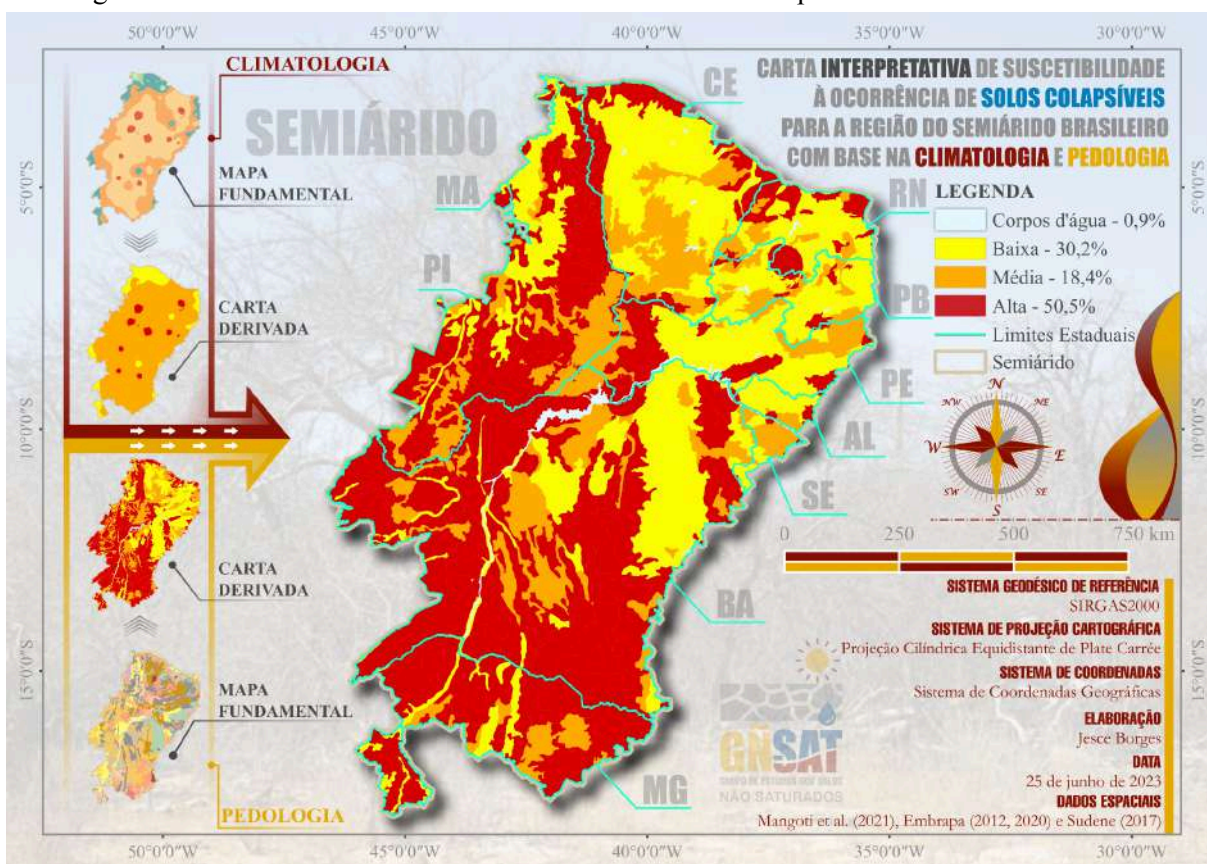
Pereira (1999) elaborou carta de predisposição à ocorrência de problemas expansivos, resultante do estudo do potencial expansivo dos sedimentos argilosos da formação Guabirotuba na região do Alto Iguaçu-PR. Christ (2014) elaborou mapas de suscetibilidade ao colapso para a região da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição-SC, sendo a caracterização das unidades geotécnicas quanto ao colapso oriunda de ensaios de laboratório com amostras indeformadas coletadas em campo.

Utilizando o método de detalhamento progressivo, Silveira (2020) e Silveira e Reis (2021) elaboraram cartas geotécnicas aplicadas a solos colapsíveis em áreas urbanas. Tavares *et al.* (2022) e Santos *et al.* (2022) desenvolveram cartas de suscetibilidade à expansão e ao

colapso para os solos dos estados do Ceará e Sergipe, respectivamente, com base nas características pedológicas.

Borges, Ferreira e Amorim (2023) apresentaram um estudo utilizando o sistema de informação geográfica para identificar solos colapsíveis na região do semiárido brasileiro. Os resultados indicaram que 50,5% da área do Semiárido apresenta alta suscetibilidade, 18,4% apresenta suscetibilidade média e 30,2% possui baixa suscetibilidade (Figura 32).

Figura 32 - Carta de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis no Semiárido do Brasil.



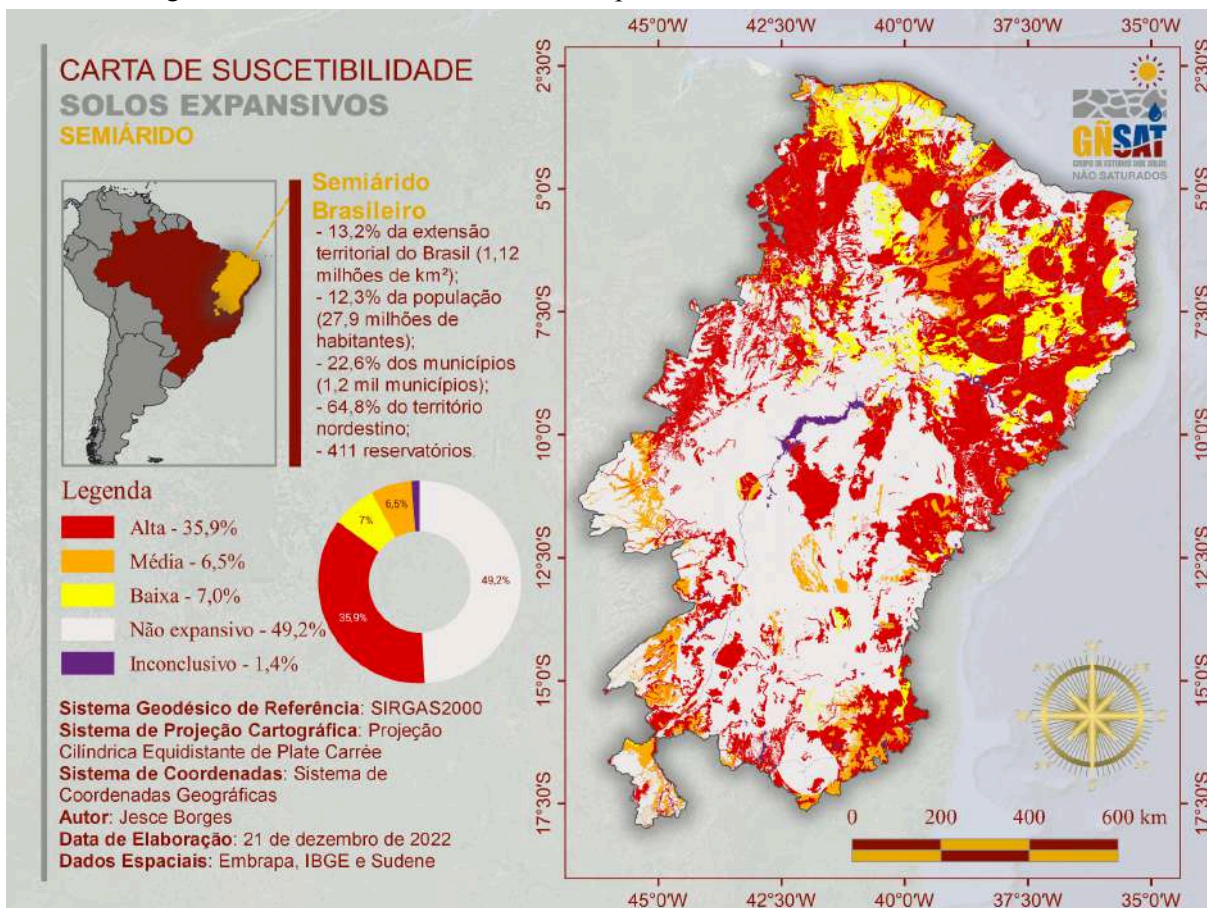
Fonte: Borges, Ferreira e Amorim (2023).

Na mesma região, Borges *et al.* (2023) elaboraram uma carta de suscetibilidade para solos expansivos utilizando uma rede neural artificial. Os resultados revelaram que 35,9% da área apresentou alta suscetibilidade, 6,5% suscetibilidade média e 7,0% suscetibilidade baixa. As áreas ocupadas por corpos de água e áreas urbanas representaram 1,4%, enquanto a ausência de comportamento expansivo correspondeu a 49,2% da região (Figura 33).

Os estudos expostos evidenciam a relevância das informações obtidas através de produtos cartográficos para subsidiar decisões e planejamento adequado em relação ao uso e ocupação do solo. A cartografia desempenha um papel fundamental nesse contexto,

permitindo a identificação e delimitação das áreas suscetíveis à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos.

Figura 33 - Carta de suscetibilidade à expansão referente ao semiárido brasileiro.



Fonte: Borges *et al.* (2023).

2.5 CONDICIONANTES

2.5.1 Climatologia

Segundo Vianello e Alvez (1991), a classificação climática de Thornthwaite consiste no modelo que compara dados de evapotranspiração potencial com dados de precipitação. Baseado nesses dados, calculam-se vários índices que compõem o balanço hídrico. O índice de umidade total – I_u visa avaliar a efetividade da precipitação devido à necessidade de saber se a precipitação é maior ou menor do que evapotranspiração. Esse índice é usado para classificar o clima em 9 tipos, numa escala de umidade que varia do seco ao muito úmido.

A classificação de Thornthwaite (1948) introduziu o conceito de balanço hídrico climatológico e de evapotranspiração potencial, bem como os métodos que possibilitaram a sua quantificação e estimação. Além disso, incorporou a eficiência da temperatura e da precipitação efetiva, assim como a classificação teve como base o índice de umidade e de evapotranspiração potencial (SAMPAIO, M. S., 2012).

Ulteriormente, o Balanço Hídrico Climatológico (BHC) e o Índice de Umidade (I_u) foram aperfeiçoados por Thornthwaite e Mather (1955). Sampaio (2012) afirma que no primeiro ocorreram modificações em relação à capacidade de armazenamento de água no solo, enquanto no segundo ocorreram modificações nos limites de umidade para os climas secos, dado que o índice de umidade passou a ser igualmente ponderado pelos índices hídricos e de aridez.

O Índice Hídrico (I_h) e o Índice de Aridez (I_a) são determinados através da Equação 5 e Equação 6, respectivamente.

$$I_h = \left(\frac{EXC}{ETP} \right) \times 100 \quad (5)$$

$$I_a = \left(\frac{DEF}{ETP} \right) \times 100 \quad (6)$$

em que:

I_h - índice hídrico;

I_a - índice de aridez;

EXC - excedente hídrico oriundo do BHC (mm);

DEF - deficiência hídrica oriunda do BHC (mm);

ETP - evapotranspiração de referência ou potencial (mm).

Segundo Vianello e Alvez (1991), o Índice de Umidade (I_u) foi definido através da Equação 7:

$$I_u = I_h - 0,6 I_a \quad (7)$$

Após alteração promovida por Thornthwaite e Mather (1955), o referido índice passou a ser determinado pela Equação 8:

$$I_u = I_h - I_a \quad (8)$$

A Tabela 3 apresenta os limites de classificação climática, estabelecidos segundo Thornthwaite (1948) e Thornthwaite e Mather (1955), com base nos índices de umidade.

Tabela 3 - Tipos climáticos, baseados no índice de umidade, segundo Thornthwaite (1948) e Thornthwaite e Mather (1955).

Tipos climáticos	Índice de Umidade (I_u)	
	Thornthwaite (1948)	Thornthwaite e Mather (1955)
A - Superúmido	$100,0 \leq I_u$	$100,0 \leq I_u$
B ₄ - Úmido	$80,0 \leq I_u < 100,0$	$80,0 \leq I_u < 100,0$
B ₃ - Úmido	$60,0 \leq I_u < 80,0$	$60,0 \leq I_u < 80,0$
B ₂ - Úmido	$40,0 \leq I_u < 60,0$	$40,0 \leq I_u < 60,0$
B ₁ - Úmido	$20,0 \leq I_u < 40,0$	$20,0 \leq I_u < 40,0$
C ₂ - Subúmido	$0,0 \leq I_u < 20,0$	$0,0 \leq I_u < 20,0$
C ₁ - Subúmido seco	$-20,0 \leq I_u < 0,0$	$-33,3 \leq I_u < 0,0$
D - Semiárido	$-40,0 \leq I_u < -20,0$	$-66,7 \leq I_u < -33,3$
E - Árido	$-60,0 \leq I_u < -40,0$	$-100,0 \leq I_u < -66,7$

Fonte: Adaptado de Vianello e Alvez (1991).

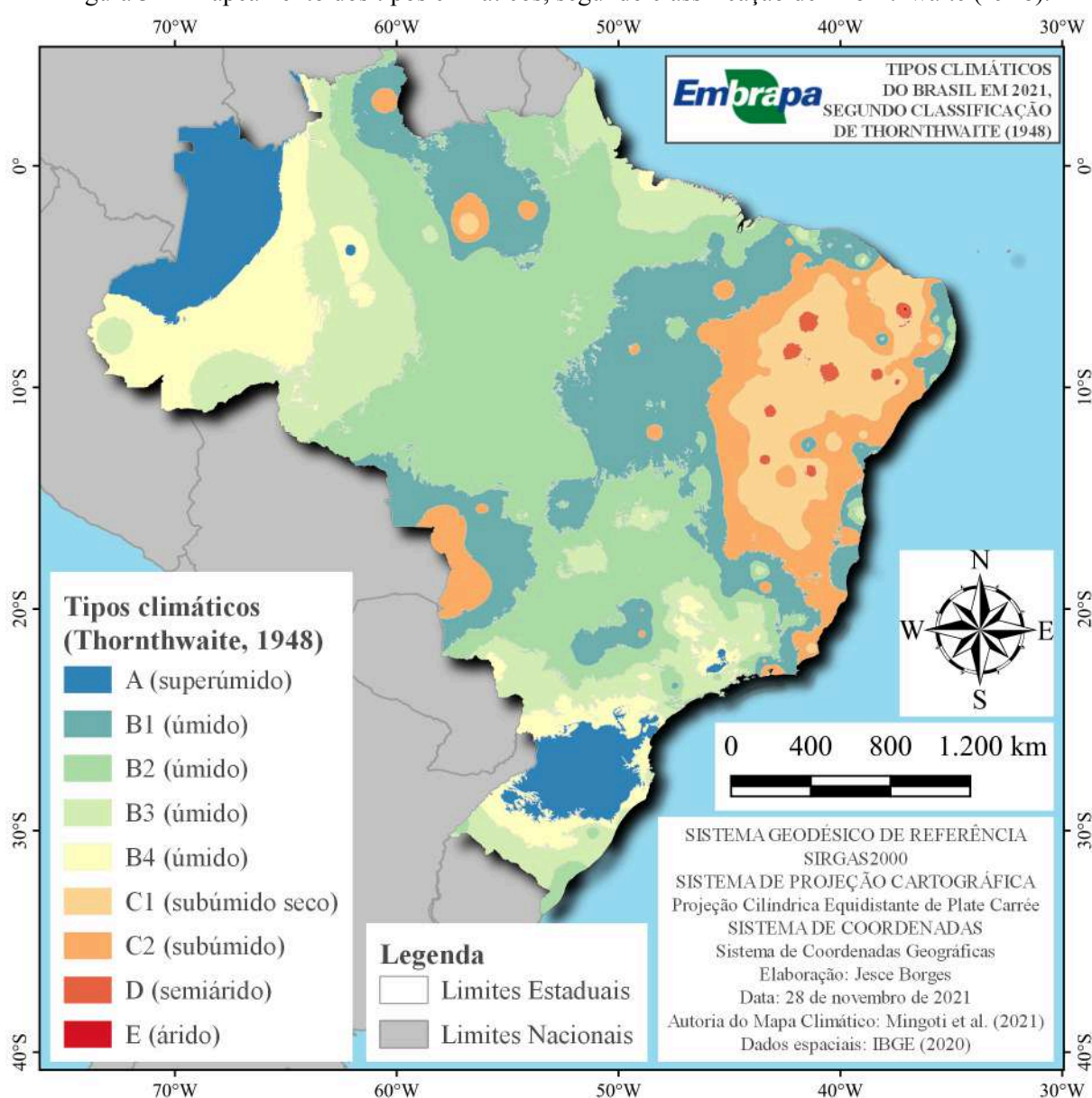
Com abrangência nacional, Mingoti *et al.* (2021) elaboraram o mapeamento de tipos climáticos, segundo classificação de Thornthwaite (1948). O mapeamento do excedente hídrico e do déficit hídrico, resultantes do balanço hídrico, foi obtido segundo Thornthwaite e Mather (1955). Esse produto cartográfico foi gerado a partir de dados mensais médios de temperatura e de pluviosidade anuais (2009 a 2018) obtidos de 263 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), espalhadas por todo o território nacional.

Ao descrever a metodologia adotada, Mingoti *et al.* (2021) afirmam que os referidos dados foram disponibilizados em formato de planilha do *Microsoft Excel* para a realização dos cálculos dos balanços hídricos em consonância com Thornthwaite e Mather (1955). Posteriormente, para cada estação, foram obtidos os valores mensais e anuais do excedente hídrico e do déficit hídrico.

Utilizando o programa ArcGIS 10.7 e adotando o método de Interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância - IDW (aplicando potência 2), os autores citados interpolaram os dados de deficiências hídricas mensais e de excedentes hídricos mensais para todo o território continental do Brasil. A partir desse resultado, em conjunto com os mapeamentos mensais de evapotranspiração potencial disponibilizados por Alvares *et al.* (2013), foram calculados, de maneira georreferenciada, os índices de umidade, aridez e hídrico, segundo a classificação climática de Thornthwaite (1948). Para isso, foram utilizados dados matriciais, em formato *raster*, para toda extensão territorial do Brasil.

Após a determinação dos índices citados, Mingoti *et al.* (2021) realizaram a classificação dos tipos climáticos e disponibilizaram o zoneamento de classes de tipo climático de Thornthwaite para o território brasileiro. Quanto ao cálculo dos perímetros e das áreas das feições unidas, utilizou-se o Sistema de Projeção Cônica Equivalente de Albers e o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS2000. O produto final foi gerado no sistema de referência WGS84 em coordenadas geográficas. O referido documento cartográfico está apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Mapeamento dos tipos climáticos, segundo classificação de Thornthwaite (1948).



Fonte: Adaptado de Mingoti *et al.* (2021).

2.5.2 Pedologia

Segundo Amorim (2004), a classificação pedológica permite extrair diversas informações, tais como: perfil típico, peculiaridades dos horizontes diagnósticos subsuperficiais e superficiais, estrutura do solo (macroestrutura), cor, mecanismo e condição hidráulica de formação, origem geológica, atividade das argilas, saturação por alumínio, por sódio e demais bases trocáveis, cátions ou íons predominantes, acidez (pH), salinidade e condutividade elétrica, presença de material orgânico, fósforo assimilável, variações e inclusões de outros solos, características intermediárias com outras classes, textura, pedregosidade, rochiosidade, drenagem, profundidade do lençol freático, relevo, declividade, vegetação, clima, material de origem, espessura dos solos superficiais, presença de mineral expansivo, dispersividade das argilas, erodibilidade, grau de laterização, plasticidade, permeabilidade dos solos porosos, profundidade da rocha, seu detalhamento quando próxima à superfície, indicações para uso agrícola, etc.

Ainda segundo o referido autor, essas informações, quando associadas à distribuição geográfica das unidades de mapeamento, possibilitam enquadrar os levantamentos pedológicos como sendo uma ferramenta relevante nas análises geotécnicas dos potenciais de erosão, deslizamento, expansão, colapso e outros fenômenos do meio físico.

Santos *et al.* (2018) asseveram que a classificação de solos no Brasil teve origem no final do século XIX. O conhecimento sobre a identificação de horizontes e os critérios diagnósticos empregados na identificação do solo é oriundo da experiência acumulada ao longo dos anos em inúmeros países. Os referidos autores detalham que o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) iniciou-se no final da década de 70 e contou, ao longo dos anos, com um esforço conjunto de diversas instituições, resultando na publicação de sua 1ª edição em 1999.

Sob responsabilidade da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) mais recente foi publicado em 2018 e corresponde a sua 5ª edição. Esse SiBCS consiste em um sistema taxonômico de solos, hierárquico, multicategórico e aberto, com a finalidade de classificar todos os solos existentes no Brasil. A chave de classificação é composta por 6 níveis categóricos:

- ⇒ 1º nível categórico: ordens;
- ⇒ 2º nível categórico: subordens;
- ⇒ 3º nível categórico: grandes grupos;

- ⇒ 4º nível categórico: subgrupos;
- ⇒ 5º nível categórico: famílias;
- ⇒ 6º nível categórico: séries (este último ainda carecendo de definição de conceitos).

Santos *et al.* (2018) elucidam que o nível categórico representa um conjunto de classes definidas segundo atributos diagnósticos em um mesmo nível de generalização ou abstração e inclui todos os solos que satisfizerem a essa definição. Ressaltam que as características utilizadas para a definição de um nível categórico são oriundas das propriedades dos solos que possam ser identificadas no campo ou que sejam inferidas de outras propriedades reconhecidas no campo ou a partir de conhecimentos da Ciência do Solo e de outras disciplinas correlatas.

Os horizontes diagnósticos são considerados para distinguir as classes de solos, dado que representam um determinado conjunto de atributos pedogenéticos inerentes às classes de solos, tratando-se especialmente dos horizontes A e B (ANTUNES; SALOMÃO, 2018). No tocante aos atributos diagnósticos, esses refletem a natureza do meio ambiente e os efeitos (sinais) dos processos de formação do solo dominante na sua gênese. Tais atributos têm maior peso para o 1º nível categórico (ordens), pois apresentam o maior número de características acessórias (SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

Segundo Santos *et al.* (2018), os atributos e os horizontes diagnósticos, superficiais e subsuperficiais, constatados no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, são os listados abaixo:

- atributos diagnósticos: material orgânico, material mineral, atividade da fração argila, saturação por bases, mudança textural abrupta, plintita, petroplintita, superfícies de fricção (*slickensides*), caráter ácrico, caráter alumínico, caráter argilúvico, caráter carbonático, caráter hipocarbonático, caráter coeso, caráter concrecionário, caráter crômico, caráter dúrico, caráter ebânico, caráter espódico, caráter êutrico, caráter flúvico, caráter litoplíntico, caráter plânico, caráter plíntico, caráter redóxico, caráter retrátil, caráter rúbico, caráter sálico, caráter salino, caráter sódico, caráter solódico, caráter sômbico, caráter vértico, contato lítico, contato lítico fragmentário, materiais sulfídricos, teor de óxidos de ferro, propriedades ândicas, grau de decomposição do material orgânico, cerosidade, superfícies de compressão, gilgai, autogranulação (*self-mulching*), relação

silte/argila, minerais alteráveis, grupamento textural, distribuição de cascalhos no perfil e constituição esquelética do solo;

- horizontes diagnósticos superficiais: horizonte hístico, horizonte A chernozêmico, horizonte A húmico, horizonte A proeminente, horizonte A antrópico, horizonte A fraco e horizonte A moderado;
- horizontes diagnósticos subsuperficiais: horizonte B textural, horizonte B latossólico, horizonte B incipiente, horizonte B nítico, horizonte B espódico, horizonte B plânico, horizonte E albico, horizonte plíntico, horizonte concrecionário, horizonte litoplíntico, horizonte glei, horizonte cálcico, horizonte petrocálcico, horizonte sulfúrico, horizonte vértico, fragipã e duripã.

O primeiro nível categórico (ordem) é composto por 13 classes e seus nomes são formados pela associação de um elemento formativo com a terminação “-ssolos”. O Quadro 10 apresenta, em ordem alfabética, os nomes das classes com seus respectivos elementos formativos e os seus significados. Santos *et al.* (2018) esclarecem que as diversas classes no 1º nível categórico são separadas pela presença ou ausência de determinados atributos, horizontes diagnósticos ou propriedades que são passíveis de serem identificadas no campo, evidenciando diferenças no tipo e grau de desenvolvimento dos processos que atuaram na formação do solo.

Quadro 10 - Elementos formativos e significados dos nomes das classes. (continua)

Classes	Elementos formativos	Termos de conotação e de memorização
ARGISSOLO	ARGI	Do latim <i>argilla</i> , “argila”; conotativo de solos com processo de acumulação de argila
CAMBISSOLO	CAMBI	Do latim <i>cambiare</i> , “trocar”, “mudar”; conotativo de solos em formação (transformação). Horizonte B incipiente
CHERNOSSOLO	CHERNO	Do russo <i>chorniy</i> , “preto”; conotativo de solos ricos em matéria orgânica, com coloração escura
ESPODOSSOLO	ESPODO	Do grego <i>spodos</i> , “cinza vegetal”; conotativo de solos com horizonte de acumulação iluvial de matéria orgânica associada à presença de alumínio. Horizonte B espódico
GLEISSOLO	GLEI	Do russo <i>gley</i> , “massa do solo pastosa”; conotativo de excesso de água. Horizonte glei
LATOSSOLO	LATO	Do latim <i>lat</i> , “tijolo”; conotativo de solos muito intemperizados. Horizonte B latossólico

Quadro 10 - Elementos formativos e significados dos nomes das classes. (conclusão)

Classes	Elementos formativos	Termos de conotação e de memorização
LUVISSOLO	LUVI	Do latim <i>luere</i> , “lavar”; conotativo de translocação de argila. Horizonte B textural com alta saturação por bases e Ta
NEOSSOLO	NEO	Do grego <i>neo</i> , “novo”; conotativo de solos com pouco desenvolvimento pedogenético
NITOSSOLO	NITO	Do latim <i>nitidus</i> , “brilhante”; conotativo de superfícies brilhantes nas unidades estruturais. Horizonte B nítico
ORGANOSSOLO	ORGANO	Do latim <i>organicus</i> , “pertinente ou próprio dos compostos de carbono”; conotativo de solos com maior expressão da constituição orgânica. Horizonte H ou O
PLANOSSOLO	PLANO	Do latim <i>planus</i> , “plano”; conotativo de solos desenvolvidos em planícies ou depressões com encharcamento estacional. Horizonte B plânico
PLINTOSSOLO	PLINTO	Do grego <i>plinthos</i> , “ladrilho”; conotativo de materiais argilosos coloridos que endurecem quando expostos ao ar. Horizonte plíntico
VERTISSOLO	VERTI	Do latim <i>vertere</i> , “virar”, “inverter”; conotativo de movimento de material de solo na superfície e que atinge a subsuperfície (expansão/contração). Horizonte vértico

Fonte: Santos *et al.* (2018).

No tocante às fichas de descrição morfológica de perfis de solos e às legendas de mapas, as classes de 1º e 2º níveis categóricos são escritas com todas as letras maiúsculas, enquanto as classes de 3º nível categórico (grandes grupos), apenas com a primeira letra maiúscula. Os nomes enquadrados no 4º nível categórico (subgrupos) são escritos com todas as letras minúsculas. As classes do 3º e do 4º níveis categóricos são redigidas preferencialmente com o sufixo “-ico” no fim do nome, conforme exemplo exposto no Quadro 11.

Quadro 11 - Exemplo de nomenclatura de solos em fichas de descrição morfológica e em legendas de mapas.

1º e 2º níveis categóricos	3º nível categórico	4º nível categórico
NEOSSOLOS FLÚVICOS	Ta Eutróficos	vertissólicos

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2018).

Em relação ao 5º nível categórico (família), o nome do solo é formado adicionando-se ao nome de subgrupo os qualificativos pertinentes, com letras minúsculas, separados por vírgula, tal como no exemplo: “Latossolo Amarelo Ácrico petroplíntico, textura argilosa

cascalhenta, endoconcrecionário, A moderado, gibbsítico–oxídico, mesoférrico”. Já para o 6º nível categórico (séries), não existe uma nomenclatura sugerida, pois ainda vem sendo objeto de discussão.

Registra-se que, em 2011, foi publicada a legenda atualizada do Mapa de Solos do Brasil na escala cartográfica de 1:5.000.000. O referido mapa, em sistema de projeção Policônica, apresenta 714 unidades de mapeamento e 2.852 polígonos, representando subdivisões de classes de solos ao nível de associações de Grandes Grupos de solos (SANTOS, H. G. *et al.*, 2011). Em outubro de 2020, foram realizadas correções na tabela de atributos do referido mapa, bem como foi verificado que a camada não possui erros topológicos. Salienta-se que essa camada vetorial foi a versão utilizada neste trabalho.

Tomando como base a estrutura de representação do aludido mapa temático, o Quadro 12 e o Quadro 13 apresentam a simbologia e os seus respectivos nomes para as classes de solos no 1º, 2º e 3º níveis categóricos (ordens, subordens e grande grupos, respectivamente) e os tipos de terreno, respectivamente.

Quadro 12 - Símbolos e nomes para as classes de solos no 1º, 2º e 3º níveis categóricos. (continua)

1º Nível Categórico		2º Nível Categórico		3º Nível Categórico	
Símbolo	Nome	Símbolo	Nome	Símbolo	Nome
C	CAMBISSOLOS	A	AMARELOS	a	Alumínicos
E	ESPODOSSOLOS	AC	ACINZENTADOS	af	Aluminoférricos
F	PLINTOSSOLOS	B	BRUNOS	b	Argila de atividade baixa
G	GLEISSOLOS	BAC	BRUNO-ACINZENTADOS	c	Concrecionários
L	LATOSSOLOS	C	CRÔMICOS	d	Distróficos
M	CHERNOSSOLOS	D	RÊNDZICOS	df	Distroférricos
N	NITOSSOLOS	E	EBÂNICOS	dx	Distrocoesos
O	ORGANOSSOLOS	F	PÉTRICOS	e	Eutróficos
P	ARGISSOLOS	G	HIDROMÓRFICOS	ef	Eutroférricos
R	NEOSSOLOS	H	HÚMICOS	ex	Eutrocoesos
S	PLANOSSOLOS	I	HÍSTICOS	f	Férricos
T	LUVISSOLOS	J	TIOMÓRFICOS	fi	Fíbricos
V	VERTISSOLOS	K	HUMILÚVICOS	g	Hidromórficos
		L	LITÓLICOS	h	Húmicos
		M	MELÂNICOS	i	Hísticos
		N	NÁTRICOS	j	Perférricos
		O	FÓLICOS	k	Carbonáticos
		Q	QUARTZARÊNICOS	l	Líticos
		R	REGOLÍTICOS	lf	Litoplínticos
		S	FERRILÚVICOS	lk	Petrocálcicos
		SK	FERRI-HUMILÚVICOS	m	Chernossólicos
		T	ARGILÚVICOS	n	Sódicos

Quadro 12 - Símbolos e nomes para as classes de solos no 1º, 2º e 3º níveis categóricos. (conclusão)

1º Nível Categórico		2º Nível Categórico		3º Nível Categórico	
Símbolo	Nome	Símbolo	Nome	Símbolo	Nome
		V	VERMELHOS	o	Órticos
		VA	VERMELHO-AMARELOS	p	Pálicos
		X	HÁPLICOS	q	Psamíticos
		Y	FLÚVICOS	r	Saprolíticos
		Z	SÁLICOS	s	Sápricos
				t	Argilúvicos
				u	Hiperessos
				v	Argila de atividade alta
				w	Ácricos
				wf	Acriférricos
				x	Coesos
				y	Hêmicos
				z	Sálicos

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2018).

Quadro 13 - Símbolos e nomes para os tipos de terreno.

Símbolo	Nome	Símbolo	Nome
AR	Afloramentos de rocha	Lx	Lixões
AE	Áreas de empréstimo	Mi	Minerações
At	Aterros	Pr	Praias
Ca	Cascalheiras	Sa	Salinas
Dn	Dunas	Sb	Sambaquis

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2018).

Antes de expor a caracterização das classes dos solos, cabe transcorrer acerca de algumas conceituações pertinentes à pedologia. Sobre unidade de mapeamento, Antunes *et al.* (2013) elucidam que pode ser constituída por uma ou mais classes de solos, que, por sua vez, são definidas por perfis representativos e correlacionadas com a paisagem. Frisam que uma unidade de mapeamento representa um conjunto de áreas de solos com relações e posições definidas na paisagem, permitindo, dessa forma, a representação cartográfica e a distribuição espacial de classes de solos.

No tocante ao perfil do solo, os referidos autores o descrevem como sendo uma seção vertical do terreno constituída por um ou mais horizontes sobre substratos variados, como rochas cristalinas, rochas sedimentares e sedimentos. Geralmente, esse perfil apresenta horizontes A-B-C ou A-C.

Segundo Santos *et al.* (2018), as fases de relevo quantificam as condições de declividade, o comprimento de encostas e a configuração superficial dos terrenos, que afetam

as formas de modelado (formas topográficas) de áreas de ocorrência das unidades de solo, reconhecidas as seguintes classes de relevo:

- ⇨ plano – superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos, com declividades variáveis de 0% a 3%;
- ⇨ suave ondulado – superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros (elevações de altitudes relativas até 50 m e de 50 m a 100 m, respectivamente), apresentando declives suaves, predominantemente variáveis de 3% a 8%;
- ⇨ ondulado – superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros, apresentando declives moderados, predominantemente variáveis de 8% a 20%;
- ⇨ forte ondulado – superfície de topografia movimentada, formada por outeiros e/ou morros (elevações de altitudes relativas de 50 m a 100 m e de 100 m a 200 m, respectivamente) e raramente colinas, com declives fortes, predominantemente variáveis de 20% a 45%;
- ⇨ montanhoso – superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes, predominantemente variáveis de 45% a 75%;
- ⇨ escarpado – áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes e escarpamentos, tais como: aparados, itaimbés, frentes de cuevas, falésias, vertentes de declives muito fortes, usualmente com declividades superiores a 75%.

Baseado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS, quanto à composição mineralógica da fração argila (fração $< 2\mu\text{m}$), Antunes *et al.* (2013) afirmam que os solos são classificados como:

- a) Cauliníticos: predominância de argilominerais do grupo da caulinita;
- b) Esmectíticos: predominância de argilominerais do grupo da esmectita;
- c) Vermiculíticos: predominância de argilominerais do grupo da vermiculita.

À luz da Pedologia, a atividade da fração argila, segundo Antunes *et al.* (2013), refere-se aos valores do complexo sortivo (T), dado pela soma dos elementos sódio, potássio, hidrogênio, cálcio, magnésio e alumínio ($T = Na^{+} + K^{+} + H^{+} + Ca^{++} + Mg^{++} + Al^{+++}$), sendo usados os termos Ta (atividade alta) e Tb (atividade baixa). Santos *et al.* (2018) discorrem sobre a atividade da fração argila como sendo a capacidade de troca de cátions relativa à fração argila, sem correção para carbono, calculada pela Equação 9:

$$Valor\ T\ (cmol_c\ kg^{-1}) \times \frac{1000}{conteúdo\ de\ argila\ (g\ kg^{-1})} \quad (9)$$

Baseado no resultado da referida equação, será considerada a atividade alta (Ta) o valor igual ou superior a 27 $cmol_c\ kg^{-1}$ de argila, enquanto a atividade baixa (Tb) corresponde a um valor inferior a 27 $cmol_c\ kg^{-1}$ de argila (Tabela 4).

Tabela 4 - Atividade da fração argila, adaptado de Santos *et al.* (2018).

Atividade	Valor T ($cmol_c\ kg^{-1}$)
Alta (Ta)	≥ 27
Baixa (Tb)	< 27

Fonte: Autor (2024).

O índice Ki consiste na relação molecular entre os teores de sílica e alumina (SiO_2/Al_2O_3), sendo usualmente utilizado como um indicador do grau de intemperismo dos solos (BAPTISTA; MADEIRA NETTO; MENESES, 1998). Segundo Embrapa (1997), o Ki é calculado em função dos valores expressos em % de SiO_2 e Al_2O_3 , divididos pelos seus respectivos pesos moleculares (Equação 10).

$$ki = \% de\ SiO_2 \times \frac{1,70}{\% de\ Al_2O_3} \quad (10)$$

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), as classes de drenagem referem-se à quantidade e à rapidez com que a água recebida pelo solo infiltra e/ou escoia, afetando as condições hídricas do solo. Santos *et al.* (2018) apresentam essas classes conforme demonstrado no Quadro 14.

Quadro 14 - Classes de drenagem, adaptado de Santos *et al.* (2018).

Classe	Descrição
Excessivamente drenado	A água é removida do solo muito rapidamente; o material de solo tem elevada porosidade e permeabilidade, sendo comum aos solos desta classe de drenagem a textura arenosa.
Fortemente drenado	A água é removida rapidamente do perfil; solos muito porosos e permeáveis, como aqueles de textura média e arenosa, pertencem a esta classe de drenagem.
Acentuadamente drenado	A água é removida rapidamente do perfil; os solos desta classe de drenagem são normalmente de textura média ou argilosa, porém sempre muito porosos e bem permeáveis.
Bem drenado	A água é removida do solo com facilidade, porém não rapidamente; os solos desta classe de drenagem comumente apresentam textura média ou argilosa, não ocorrendo normalmente mosqueados devido a processos de oxidação e redução.
Moderadamente drenado	A água é removida do solo um tanto lentamente, de modo que o perfil permanece molhado por uma pequena, porém significativa, parte do tempo. Os solos desta classe de drenagem comumente apresentam uma camada de permeabilidade lenta no <i>solum</i> ou imediatamente abaixo dele. O lençol freático acha-se imediatamente abaixo do <i>solum</i> ou afetando a parte inferior do horizonte B, por adição de água por meio de translocação lateral interna ou alguma combinação dessas condições.
Imperfeitamente drenado	A água é removida do solo lentamente, de tal modo que este permanece molhado por período significativo, mas não durante a maior parte do ano. Os solos desta classe de drenagem comumente apresentam uma camada de permeabilidade lenta no <i>solum</i> , lençol freático alto, adição de água por meio de translocação lateral interna ou alguma combinação destas condições.
Mal drenado	A água é removida do perfil tão lentamente que este permanece molhado por uma grande parte do ano. O lençol freático comumente está à superfície ou próximo dela durante uma considerável parte do ano. As condições de má drenagem são devidas a lençol freático elevado, camada lentamente permeável no perfil, adição de água por meio de translocação lateral interna ou alguma combinação destas condições. É frequente a ocorrência de mosqueado no perfil e características de gleização.
Muito mal drenado	A água é removida do perfil tão lentamente que o lençol freático permanece à superfície ou próximo dela durante a maior parte do ano. Solos desta classe de drenagem usualmente ocupam áreas planas ou depressões, onde há, frequentemente, estagnação de água. São comuns nesses solos características de gleização e/ou acúmulo, pelo menos superficial, de matéria orgânica, comumente com horizonte hístico.

Fonte: Autor (2024).

Também são qualificadas as classes de profundidade. Os termos utilizados nessa classificação representam as condições de solos nas quais um contato lítico ou lítico fragmentário ocorra conforme limites especificados na Tabela 5.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

São descritos, neste capítulo, os materiais e os métodos utilizados neste trabalho. Sucintamente, apresenta-se o conjunto de cores adotado na elaboração da tese, bem como as origens dos dados utilizados na produção das ilustrações. Em seguida, são descritas as ferramentas utilizadas na construção do trabalho, considerando o uso de diversos programas e aplicativos.

Posteriormente, são expostos os procedimentos para a construção do banco de dados. Seguidamente, detalha-se a metodologia adotada na aplicação dos critérios que originaram as cartas de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos com base nos levantamentos climatológico e pedológico. Também são expostos os procedimentos adotados na aplicação do modelo matemático de RNA para geração da carta interpretativa. Por fim, são expostos os procedimentos para a elaboração dos painéis de *Business Intelligence* e para a criação dos aplicativos.

3.1 RECURSOS E FERRAMENTAS

3.1.1 Paleta de cores e ilustrações

Buscando alcançar uma harmonia na apresentação deste trabalho, adotou-se o padrão de cores exposto na Figura 36. As cores aplicadas às unidades federativas buscaram similaridade com as contidas no Mapa Político do Brasil, elaborado pelo IBGE (BRASIL, 2020). Em relação à estrutura da tese, do painel e do site, aplicou-se a mesma paleta de cores. A identificação dos solos colapsíveis e expansivos se deu mediante o uso da tonalidade azul e cinza-escuro, respectivamente.

O logotipo, que representa a identificação deste trabalho, foi elaborado com a representação do mapa do Brasil seguido dos nomes completos dos solos em questão. No interior do mapa, de forma simbólica, constam as letras iniciais dos solos, já no preenchimento, constam as cores mencionadas anteriormente. Também foi elaborado o logotipo para o Grupo de Estudos de Solos Não Saturados da UFPE, bem como para os 4 (quatro) pilares desta tese.

A identificação dos níveis de suscetibilidade presentes nas cartas obedeceu ao estilo cromático do tipo gradiente, variando do vermelho ao amarelo-claro. Sendo assim, os 3 (três)

níveis de suscetibilidade foram identificados da seguinte forma: alta - cor vermelha, média - cor laranja e baixa - cor amarela.

Figura 36 - Padrão de cores e logotipos utilizados neste trabalho.



Fonte: Autor (2024).

As imagens acessórias utilizadas na elaboração das ilustrações expostas nesta tese são oriundas de sites gratuitos disponíveis na internet (FLATICON, 2021; FREEPIK, 2021; PIXABAY, 2021; STOCKSNAP.IO, 2021; UNSPLASH, 2021; VECTEEZY, 2021). Tais imagens são de alta qualidade, permitindo uma boa visualização do conteúdo deste trabalho. Também foram utilizadas imagens geradas por Inteligência Artificial (IA) oriunda da plataforma *Stable Diffusion*.

3.1.2 Ferramentas utilizadas no trabalho

A elaboração das referências bibliográficas foi realizada mediante o uso do *Zotero*. Trata-se de um gerenciador de referências disponibilizado gratuitamente na web. O uso ocorre mediante a criação de uma conta, cadastrando os dados do usuário. Essa ferramenta permite pesquisar, armazenar, organizar, anotar, compartilhar e citar referências. O acesso pode ser realizado através de plataforma *online* ou da versão desktop, caso o usuário deseje administrar suas referências no seu computador. Além disso, a ferramenta permite a conexão com o *Microsoft Word* e o *Google Docs* (ZOTERO, 2021).

O Zotero produz automaticamente citações e referências em diversos estilos. Também é possível a criação de pastas personalizadas e o compartilhamento das referências com outros usuários. O referido programa disponibiliza o formato de diversas categorias de documentos usuais no meio acadêmico, sendo eles: livros, dicionários, enciclopédias, teses, dissertações, artigos de revistas, artigos de jornais, *home-page* e outros.

O programa de SIG utilizado neste trabalho foi o QGIS 3.28 - “*Firenze*”, versão de longa duração - Lançamento de Longa Duração (LLD). Essa versão foi lançada em outubro de 2022, sendo a versão de longa duração mais recente em relação à data deste trabalho (QGIS, 2022). Portanto, o QGIS foi o programa utilizado para realizar a entrada de dados, o armazenamento, as edições, as análises e a exposição dos resultados envolvendo dados geográficos.

A elaboração das ilustrações se deu através do programa *Inkscape*, versão 1.2.2. Este consiste em um programa de gráficos vetoriais de qualidade profissional compatível com o sistema *Windows*, *Mac OS X* e *GNU/Linux*. Esse programa permite a criação de uma grande variedade de gráficos, tais como ilustrações, ícones, logotipos, diagramas, mapas e gráficos da web. O *Inkscape* utiliza o padrão aberto SVG (*Scalable Vector Graphics*) e tem uma aplicação de uso livre e de código aberto.

O referido programa apresenta ferramentas sofisticadas de desenho com recursos comparáveis ao *Adobe Illustrator*, *CorelDRAW* e *Xara Xtreme*. Permite importar e exportar diversos formatos de arquivo, incluindo SVG, AI, EPS, PDF, PS e PNG. Além disso, dispõe de um grande conjunto de funcionalidades, apresentadas através de uma interface simples, com suporte multi-idíomas e projetado para ser extensível (INKSCAPE, 2022).

No tocante à estatística, utilizou-se o programa *Jamovi*, versão 2.3.21. Representa uma ferramenta estatística gratuita e de código aberto. Permite realizar análises descritivas, testes de hipóteses, modelos lineares, análise fatorial, análise de sobrevivência, dentre outros. Possui uma interface intuitiva e utiliza linguagem de programação R. Suporta a importação e exportação de vários formatos de arquivos, incluindo *Excel*, CSV e SPSS. Representa uma alternativa para programas estatísticos caros, como SPSS e SAS (JAMOVI, 2023).

No que concerne às atividades envolvendo os arquivos no formato PDF, o programa utilizado foi o *Foxit PhantomPDF*, versão 10.0.0.35798 e edição *Business*. Desenvolvido pela empresa *Foxit Software Incorporated* da Califórnia (Estados Unidos), o *Foxit PhantomPDF* é apresentado em duas versões: o *Foxit PhantomPDF Express*, que atende às diferentes necessidades básicas de usuários domésticos, oferecendo recursos tais como a visualização,

criação e inserção de comentários em arquivos PDF e o *Foxit PhantomPDF Business*, que atende às necessidades de usuários profissionais e grandes empresas, com recursos que abrangem a edição de objetos, PDF Seguro, GPO, criação de formulários interativos e *JavaScript*. Ambas as versões são de licença proprietária (FOXIT, 2021). Essa ferramenta foi utilizada para realizar o processo de pesquisa através de palavras chaves para a construção do banco de dados.

O armazenamento, o documento escrito, as planilhas, os painéis, as navegações, a apresentação, o gerenciamento de pesquisa, o desenvolvimento de aplicativos e o site foram elaborados através dos aplicativos da Google, sendo eles, respectivamente: *Google Drive*, *Google Docs* (Google Documentos), *Google Sheets* (Google Planilhas), *Google Data Studio*, *Google Earth Pro*, *Google Slides* (Google Apresentações), *Google Forms* (Google Formulários), *Google Earth Engine* e *Google Sites*. Esses programas foram escolhidos por permitirem operações *online*, com salvamento automático, e interações entre si. Os resultados gerados são acessíveis via plataforma web, permitindo o acesso para toda a comunidade acadêmica e para os profissionais interessados na temática. Somando-se a isso, essas ferramentas da Google vêm sendo amplamente utilizadas tanto no âmbito do uso pessoal, quanto empresarial, incluindo, também, o meio acadêmico.

O *Google Drive* é um serviço de armazenamento e sincronização de arquivos, lançado em 24 de abril de 2012. É baseado no conceito de computação em nuvem, permitindo que os usuários armazenem e acessem os arquivos de qualquer dispositivo móvel, tablet ou computador. Basta ter uma conta de e-mail para ter acesso aos serviços deste aplicativo. Os primeiros 15 GB de armazenamento são gratuitos e o serviço funciona de forma totalmente integrada com os *apps* nativos da nuvem, tais como o *Docs* (Google Documentos), o *Sheets* (Google Planilhas) e o *Slides* (Google Apresentações), possibilitando realizar os trabalhos em tempo real.

No Drive é possível armazenar arquivos de mais de 100 (cem) tipos de formatos, bem como permite o acesso *offline*, ou seja, pode-se criar, ver e editar arquivos sem ter o acesso à internet. Além disso, essas alterações são sincronizadas automaticamente assim que o usuário tiver o acesso à Internet. São 3 (três) tipos de planos oferecidos: individual, equipes e empresas (GOOGLE, 2021a).

O *Google Docs* (Google Documentos) foi lançado em agosto de 2005 e foi baseado em AJAX (*Asynchronous Javascript and XML*), disponível em mais de cinquenta idiomas.

Inicialmente, foi disponibilizado para um número limitado de usuários, mas, em fevereiro de 2007, o aplicativo já estava disponível a todos os usuários interessados.

A ferramenta mencionada apresenta funcionalidades de um editor de texto, semelhantes ao do *Microsoft Word*, porém permite que sejam trabalhados em tempo real com outras pessoas por meio de uma plataforma *online* e gratuita. Sem causar problemas na edição, as alterações podem ser feitas ao mesmo tempo, por todos os usuários. Tal ferramenta oferece inúmeros recursos, tais como compartilhar, editar, converter tipos de arquivos, convidar usuários com restrições personalizadas, visualizar histórico de edição, traduzir para outro idioma, dentre outros (GOOGLE, 2021d). Todas as alterações são salvas automaticamente, ficando o arquivo armazenado no *Google Drive* do usuário.

O *Google Sheets* (Google Planilhas) apresenta similaridade com o *Microsoft Excel*, posto que envolve o trabalho com dados tabulares. Contudo, o Google Planilhas é disponibilizado como aplicativo da *web*, proporcionando o compartilhamento de dados de forma rápida. Lançado em 2006, a ferramenta permite que múltiplos usuários utilizem os recursos simultaneamente, bem como permite a interação no momento das atividades com as planilhas, ou seja, é possível vê-las, editá-las, compartilhá-las, comentá-las de forma *online*. Sendo assim, todas as operações são realizadas em tempo real e salvas automaticamente, proporcionando uma economia de tempo e uma segurança do conteúdo digitado, já que não necessitam de salvamento devido ao armazenamento automático (GOOGLE, 2021f).

O *Google Data Studio* foi lançado no ano de 2016 e surgiu como uma solução de painéis ou ferramenta de análise em que é possível agregar dados importantes para visualização e tomada de decisões. Trata-se de um aplicativo que permite a transformação de dados, oriundo de diversas fontes, em painéis customizáveis e interativos, atualizados em tempo real (GOOGLE, 2021b). Dentre os recursos disponíveis, podem ser destacadas as principais vantagens do *Google Data Studio*:

- atualização em tempo real;
- personalização dos painéis;
- conexão com várias fontes de dados de forma fácil;
- interação em tempo real;
- compartilhamento de visualização e edição, permitindo a exposição *online* e a colaboração da equipe de trabalho de forma simultânea;
- geração de resultados em formato amigável e otimizado.

Em outubro de 2022, o *Google* anunciou modificação na nomenclatura e no logotipo da ferramenta. Alterou-se o nome *Data Studio* para *Looker Studio*. O *Looker* representa uma plataforma corporativa de BI, aplicativos de dados e análise incorporada. Tal plataforma foi comprada pelo *Google* em 2019. Em virtude disso, buscou-se unificar ferramentas de BI, inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (ML) sob esse mesmo guarda-chuva. Permaneceu gratuito e com as mesmas funcionalidades. O *Looker Studio Pro* consiste na versão paga. A presença de recursos corporativos aprimorados e suporte técnico representa o diferencial em relação à versão gratuita (INACIO, 2022).

No tocante à navegação, o *Google Earth Pro* é um programa que permite importar e exportar dados de SIG, bem como possibilita a navegação no globo terrestre e a visualização de imagens históricas, estando disponível para PC, *Mac* ou *Linux*. Também são disponibilizadas as versões para web e para dispositivos móveis (MOORE, 2020). O produto teve origem em 2005 e facilitou a exploração de lugares ao redor do mundo, apresentando um modelo tridimensional da Terra. Apesar de similar ao *Google Maps*, os recursos oferecidos pelo *Google Earth Pro* são mais complexos, combinando fotografia aérea, imagens de satélite, topografia 3D, dados geográficos e *Street View*. Atualmente, é caracterizado como o maior repositório de imagens geográficas de acesso público do mundo (GOOGLE, 2021h).

O aplicativo *Google Slides* (Google Apresentações) tem por finalidade a criação e a edição de apresentações, funcionando semelhantemente ao *Microsoft PowerPoint*. Contudo, assim como os outros aplicativos expostos anteriormente, tem o diferencial de ser uma ferramenta *online* e multiusuário, bem como o fato de possibilitar o rastreamento das edições através de histórico de alterações (GOOGLE, 2021c).

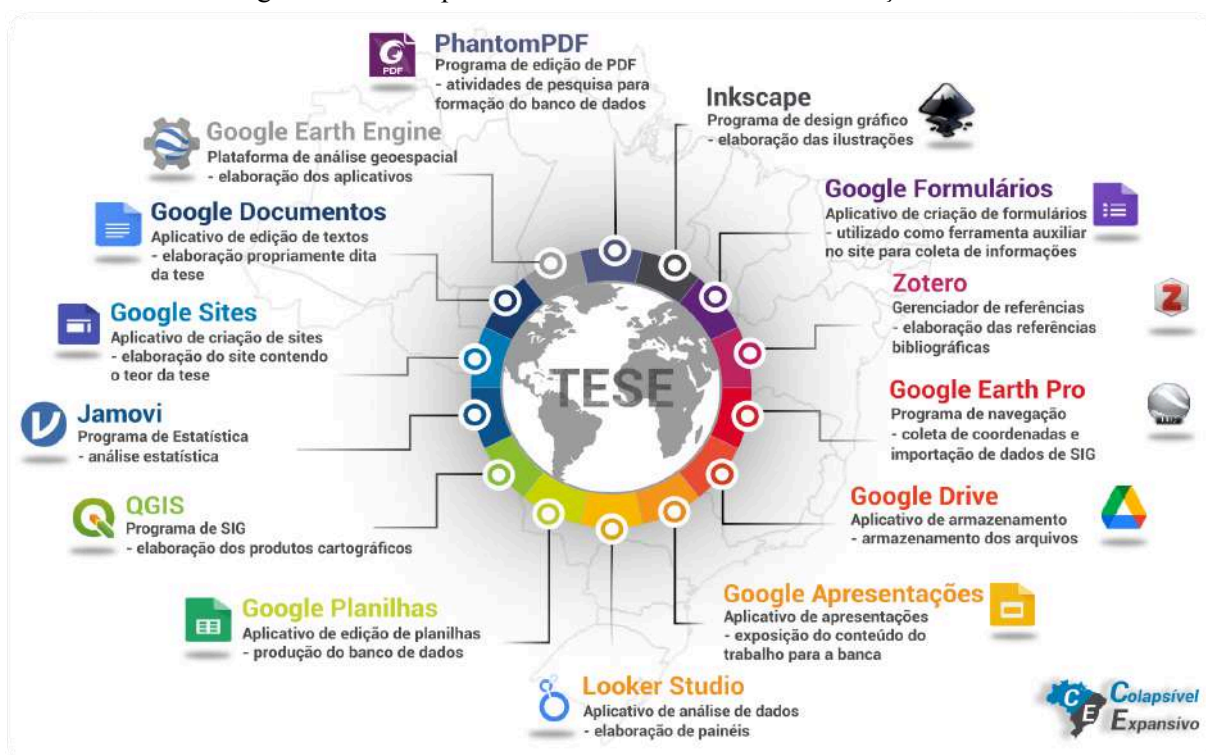
O *Google Forms* (Google Formulários) é um aplicativo de gerenciamento de pesquisas, lançado em 2008. Permite coletar informações dos usuários através de questionários e formulários personalizados de forma *online*. Após o preenchimento dos dados, os resultados são transmitidos automaticamente para o proprietário da pesquisa. A ferramenta possibilita a produção de pesquisas com múltipla escolha, questões discursivas, avaliações em escala numérica, entre outras opções (GOOGLE, 2021e).

O *Google Earth Engine* (GEE) consiste em uma plataforma de análise geoespacial baseada na nuvem. Tal plataforma permite aos usuários visualizar e analisar imagens de satélite do nosso planeta. A ferramenta é utilizada em pesquisas de sensoriamento remoto, na previsão de epidemias, no gerenciamento de recursos naturais, entre diversas outras aplicações (GOOGLE, 2022a). O detalhamento da plataforma foi exposto no Apêndice E.

Por fim, o *Google Sites* representa o último aplicativo da *Google* que foi utilizado neste trabalho. Trata-se de uma ferramenta estruturada para a criação de páginas web. O lançamento do aplicativo ocorreu em 2008 e surgiu como uma solução para as empresas criarem sites personalizados colaborativamente. A criação e a edição são simples, não exigindo conhecimento de programação e de design. Permite a colaboração com coedição em tempo real e a utilização dos mesmos controles de compartilhamento avançados usados nos demais aplicativos da *Google*. Possibilita gerenciar com facilidade as permissões de compartilhamento e a propriedade nos Sites, permitindo um controle confiável e minucioso (GOOGLE, 2021g).

De modo geral, nota-se que tais aplicativos permitem o compartilhamento, a criação, a interação e a edição por vários usuários de forma simultânea, possibilitando, ainda, a visualização das alterações realizadas ao longo de toda a construção do objeto de trabalho por meio de um histórico de versões. Além disso, é disponibilizada a opção de reverter as versões anteriores. As ferramentas são oferecidas através de uma plataforma *online* em que todas as alterações são salvas de forma automática e os resultados podem ser publicados na web. Todas as ferramentas estão disponíveis através da conta do *Google*. A Figura 37 apresenta uma representação esquemática das ferramentas utilizadas na elaboração deste trabalho.

Figura 37 - Principais ferramentas utilizadas na elaboração da tese.



Fonte: Autor (2024).

Sob o ponto de vista geral, o conhecimento do autor sobre as ferramentas, para a elaboração deste trabalho, varia do nível básico ao avançado. Perante a figura exposta, percebe-se que grande parte das ferramentas são pertencentes ao pacote do Google. Os fatores que motivaram a escolha dessas ferramentas foram: gratuidade, serviço *online*, salvamento automático, backup automático, integração dos produtos, níveis de acesso, trabalho em equipe, compartilhamento, atualizações automáticas e linguagem de programação, Figura 38.

Figura 38 - Motivos que condicionaram a escolha do pacote do Google.



Fonte: Autor (2024).

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Construção do Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE)

A confecção do banco de dados, denominado como Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE), é resultante de uma atividade de pesquisa bibliográfica realizada em diversas categorias de documentos acadêmicos, tais como: teses, dissertações, trabalho de conclusão de curso, revistas, periódicos, relatórios técnicos, artigos de congresso, dentre outros. Tal atividade teve a participação da equipe do Grupo de Estudos dos Solos Não Saturados da Universidade Federal de Pernambuco.

Ressalta-se que o BANDASE teve sua origem em 1990, durante o IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, realizado na Bahia, no qual Ferreira (1990) utilizou o *Lotus*, uma das primeiras planilhas eletrônicas, para sua criação. Posteriormente, Amorim (2004) migrou o banco de dados para o *Excel*. A fim de prosseguir com a evolução do trabalho, o Google Planilhas foi a ferramenta escolhida neste trabalho.

Primeiramente, antes de realizar a pesquisa bibliográfica, definiu-se a estruturação do banco de dados com base na escolha dos atributos relacionados às características de cada solo estudado, tais atributos correspondem aos campos do banco de dados. Sucintamente, o BANDASE é constituído pelos registros (linhas) e campos (colunas) que correspondem, respectivamente, às ocorrências materializadas nos trabalhos encontrados na literatura e aos atributos dessas ocorrências. A descrição de cada campo do BANDASE está apresentada no Apêndice J.

O *Google Drive*, o *Google Planilhas* e o *Foxit PhantomPDF* foram as ferramentas utilizadas na construção do BANDASE. O primeiro foi utilizado para o armazenamento e a sincronização dos trabalhos encontrados. O segundo representa o banco de dados propriamente dito. Por fim, o último foi utilizado para realizar o reconhecimento ótico de caracteres (*Optical Character Recognition* - OCR) dos documentos em formato .pdf, ou seja, para converter esses documentos em arquivos pesquisáveis. Tal recurso permitiu realizar a pesquisa através de palavras-chave no conteúdo dos documentos encontrados, representando um recurso importante em face da magnitude do quantitativo e do tamanho dos arquivos.

A referida pesquisa foi realizada em diversos portais de publicações científicas e acadêmicas, tais como: *ResearchGate*, *SciELO*, *Google Acadêmico*, *Oasisbr*, *Scopus*, Periódicos CAPES/MEC, biblioteca virtual da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia (ABMS), *ZoteroBib*, Sistema Integrado de Bibliotecas da UFPE e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD).

Nesses portais, o método de pesquisa se deu mediante o uso de palavras-chave pertinentes aos solos colapsíveis e expansivos, sendo elas: colap, colapso, colapsível, colapsíveis, colapsibilidade, expans, expansivo, expansivos, expansividade e expansão. Após a identificação dos trabalhos, realizava-se o *download* dos arquivos no formato disponibilizado pelo portal. No âmbito da pesquisa, os formatos .doc (*Word*) e .pdf (*Adobe*) foram as formatações encontradas, ocorrendo com expressiva frequência o último formato.

Em alguns casos, a disponibilização dos arquivos ocorreu de forma compactada, ou seja, os arquivos estavam em formato zip. Essa forma é utilizada visando juntar os arquivos em um único local, reduzindo o tamanho geral e facilitando o transporte dos arquivos. Nesses casos, utilizando o programa *WinRAR*, realizou-se a descompactação para as pastas de trabalho no *Google Drive*.

Devido à sincronização dessa ferramenta do *Google* com o Desktop, os arquivos foram processados diretamente no ambiente principal do computador, permanecendo integrado

mediante computação em nuvem. Significa que as pastas do *drive* do *Google* são acessadas como pastas do computador. Em outros termos, representa um cenário semelhante ao procedimento de incluir um *drive* externo ao computador, porém, o diferencial é que, no caso da sincronização, o acesso ocorre em nuvem, diferentemente do armazenamento externo. Frisa-se que significativa parcela de procedimentos e de operações desenvolvidas neste trabalho estiveram submetidas ao ambiente de computação em nuvem, sendo usufruídas todas as vantagens dessa ferramenta.

No tocante à pesquisa nos arquivos de texto (.doc), essa ocorreu sem complicações, por serem documentos editáveis que permitem realizar buscas com facilidade por palavras-chave. Por outro lado, os formatos mais disponibilizados pelos portais (.pdf) não apresentam essa facilidade, dado que muitos são resultantes de escaneamento, ou seja, processo que origina uma imagem do documento físico. Em virtude disso, existe a necessidade de realizar a conversão desses arquivos para que o reconhecimento dos caracteres seja possível e, conseqüentemente, tornando-os arquivos pesquisáveis.

Utilizando o *Foxit PhantomPDF*, executou-se o recurso que permite realizar o reconhecimento ótico de caracteres (OCR). Após a conversão em arquivos pesquisáveis, realizou-se a pesquisa mediante a aplicação de palavras-chave. A referida pesquisa ocorreu de duas formas: simples e avançada. A primeira foi utilizada para arquivos consolidados em um único documento. Já a segunda foi aplicada para os arquivos organizados em uma ou várias pastas. Nessa ocasião, após abrir um arquivo qualquer na pasta, executava-se o recurso de pesquisa avançada do programa apontado. Definidos os parâmetros de busca desse recurso, o programa realiza uma varredura sobre todos os arquivos contidos nas pastas, identificando as ocorrências das palavras-chave no conteúdo dos documentos.

Após identificação dos trabalhos pertinentes aos solos colapsíveis e expansivos, os dados dessas publicações foram registrados no BANDASE, bem como foram sincronizados e armazenados no *Google Drive*. Esse banco de dados foi projetado para permitir a inserção contínua de novas informações. A Figura 39 ilustra a sequência completa de procedimentos adotados na construção do BANDASE, apresentando um resumo visual do processo metodológico.

Figura 39 - Procedimento utilizado para a construção do BANDASE.



Fonte: Autor (2024).

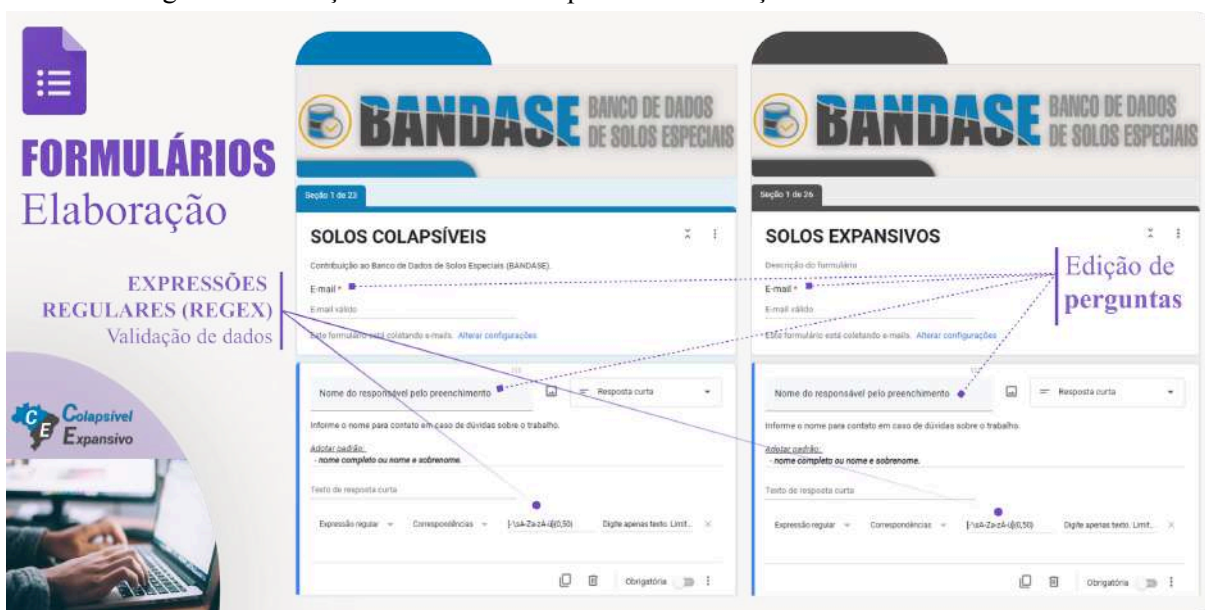
3.2.1.1 Criação de Formulários

Vislumbrando o desenvolvimento do BANDASE no decorrer dos anos, elaboraram-se formulários integrados ao site eletrônico, permitindo incrementação de dados geotécnicos decorrentes de trabalhos oriundos da literatura no que tange aos solos colapsíveis e expansivos. O *Google* Formulários foi a ferramenta utilizada para criar e realizar pesquisas *online*, coletando respostas fornecidas pelos usuários. Tais respostas são armazenadas em uma planilha (*Google* Planilhas), que pode ser facilmente compartilhada e analisada.

Nos formulários foram utilizadas diversas tipologias de perguntas, tais como campos de texto curto ou longo, lista suspensa e múltipla escolha. Buscando obter uma padronização nas respostas e evitar poluição na entrada de dados, aplicaram-se nessas perguntas recursos de expressões regulares, *Regular Expression* (*Regex*). Trata-se de uma sequência de caracteres que forma um padrão de pesquisa, verificando se o texto possui a estrutura desejada. As expressões regulares são compostas por caracteres comuns e símbolos especiais.

A utilização de expressões regulares visa realizar a validação dos dados inseridos nos formulários, possibilitando, assim, a obtenção de uma estruturação precisa das informações recebidas. A Figura 40 exemplifica a edição dos formulários de solos colapsíveis e expansivos, demonstrando os diversos tipos de perguntas e expressões regulares empregadas no instrumento de coleta de dados.

Figura 40 - Criação dos formulários para incrementação de dados ao BANDASE.



Fonte: Autor (2024).

3.2.1.2 Métodos Estatísticos

A partir dos dados contidos no BANDASE, aplicaram-se técnicas de estatística descritiva e inferencial. A primeira busca resumir dados mediante o uso de certas medidas-síntese, possibilitando a interpretação de resultados, enquanto a segunda visa, partindo de uma amostra, inferir possibilidade de generalização (PRATES, 2017).

Preliminarmente, é importante conhecer as características do estudo para serem adotadas ferramentas estatísticas adequadas para o caso concreto. Em virtude disso, adotou-se uma sequência metodológica abordando as características deste trabalho. Tais características são: tipo de estudo, tipo de variável, distribuição normal, número de grupos e pareamento de grupos, Figura 41.

No tipo de estudo, este trabalho recorreu à estatística descritiva para fornecer uma representação visual e numérica do BANDASE, elaborando tabela e gráficos. Nessa fase, além de reconhecer os tipos de variáveis presentes no banco, verificou-se a existência de distribuição normal para tais variáveis, enquadrando o procedimento estatístico como paramétrico ou não paramétrico. Definida a técnica adequada para análise de dados, aplicou-se a estatística inferencial, realizando análises descritivas, comparativas e relacionais visando apresentar informações, comparar solos e relacionar variáveis, respectivamente.

Os solos colapsíveis e expansivos representam os grupos do estudo. Quanto ao emparelhamento, técnica estatística utilizada para comparar dois grupos, o estudo apresenta

grupos independentes, visto que cada elemento do grupo não guarda relação de dependência com um elemento do outro grupo.

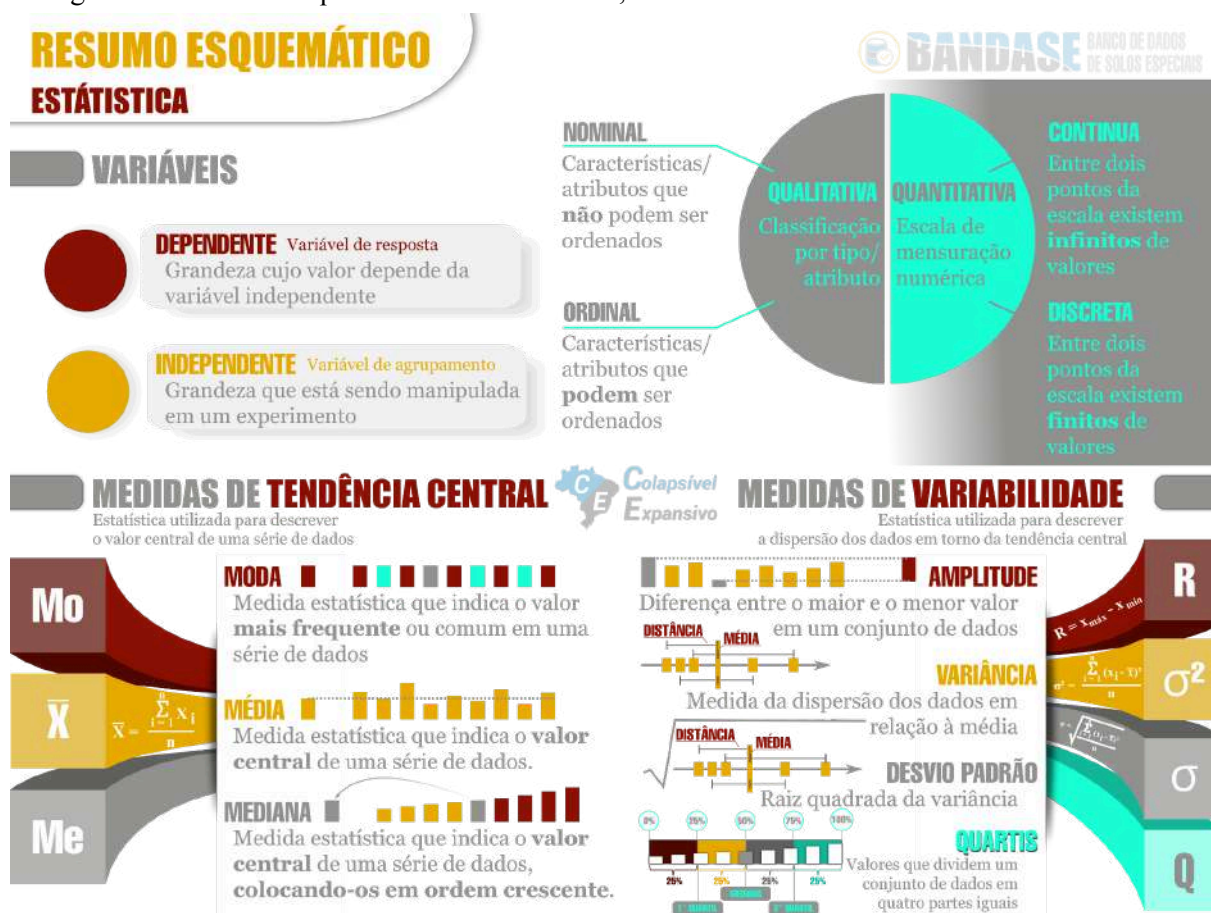
Figura 41 - Sequência metodológica adotada na verificação das características do BANDASE para uso de técnicas de estatística.



Fonte: Autor (2024).

Devido à análise estatística que será exposta no resultado deste trabalho, elaborou-se uma representação visual que apresenta concisamente as principais informações sobre variáveis, medidas de tendência central e de variabilidade. Essa representação está ilustrada na Figura 42. Na parte superior, encontram-se detalhadas as características e tipos de variáveis analisadas. Já na parte inferior, são exemplificadas graficamente as medidas de tendência central (lado esquerdo) e de variabilidade (lado direito), permitindo uma visualização mais compreensiva dessas características.

Figura 42 - Resumo esquemático sobre variáveis, medidas de tendência central e de variabilidade.

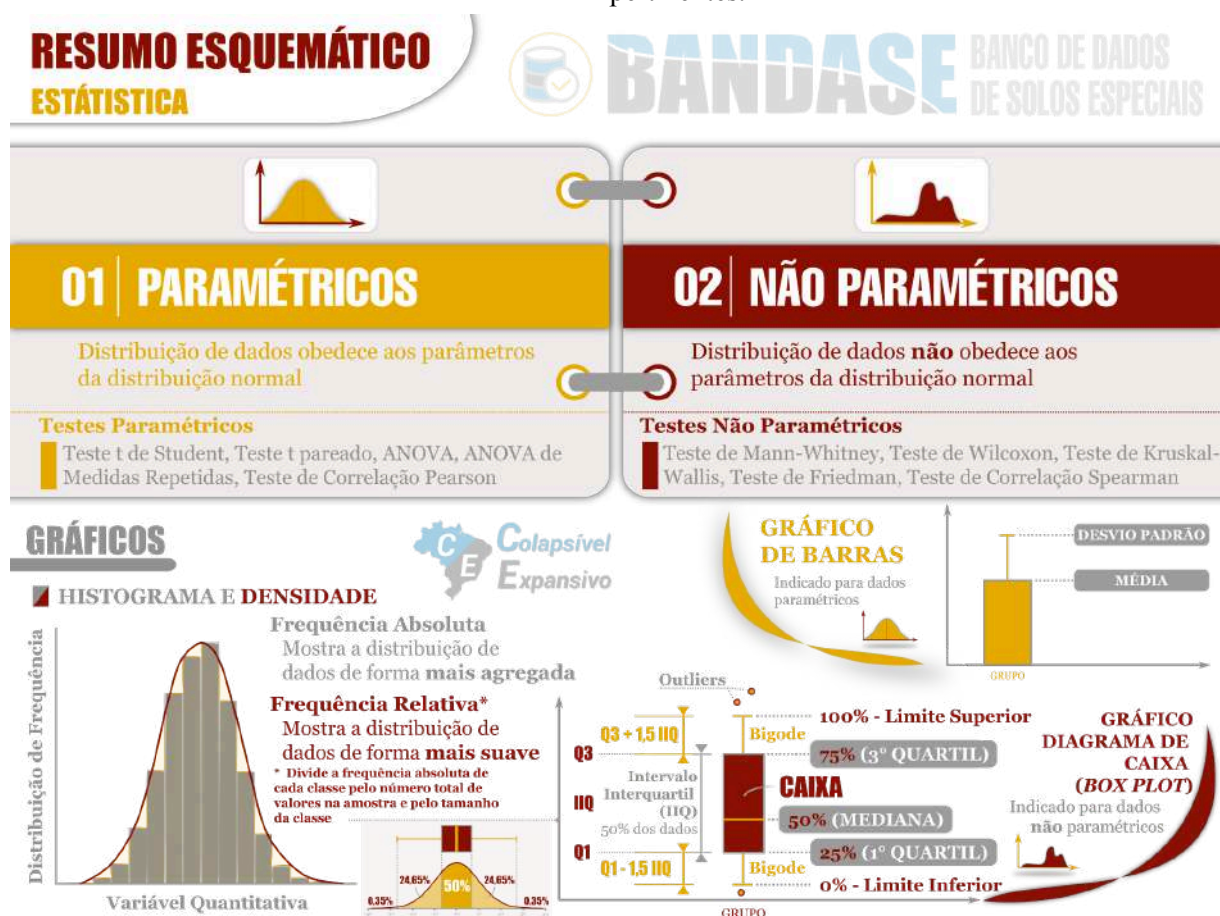


Fonte: Autor (2024).

A fim de ilustrar a diferenciação entre estatística paramétrica e não paramétrica, foi desenvolvido um resumo esquemático com base em uma abordagem similar. Essa distinção é fundamental para garantir a aplicação adequada dos testes e dos gráficos, conforme demonstrado na Figura 43. Na parte superior dessa figura, encontra-se a definição dos dados paramétricos e não paramétricos. Logo abaixo, são apresentados os respectivos testes estatísticos aplicáveis a cada tipologia. Já na parte inferior, são destacadas as ferramentas gráficas utilizadas para expor os resultados referentes a cada abordagem estatística.

Perante a explanação apresentada, os dados do BANDASE foram enquadrados na estatística não paramétrica, posto que a distribuição dos dados das variáveis não obedeceu aos parâmetros de normalidade. Diante disso, adotou-se o teste de *Mann-Whitney*, a mediana (medida de tendência central), os quartis (medida de variabilidade) e os gráficos de diagrama de caixa (*box plot*).

Figura 43 - Resumo esquemático sobre dados paramétricos e não paramétricos, testes e gráficos pertinentes.



Fonte: Autor (2024).

Os resultados obtidos na estatística descritiva dos dados contidos no BANDASE para os dois grupos de solos são expostos visualmente em formato tabular. As tabelas apresentam o número de dados (N), as medidas de tendência central (média, mediana e moda), as medidas de variabilidade (amplitude, variância, desvio padrão e quartis), a medida mínima, a medida máxima e o teste de normalidade (*Shapiro-Wilk*).

Baseado no resultado da estatística descritiva, constata-se que as variáveis referentes às propriedades dos solos do BANDASE apresentam predominantemente características de dados não paramétricos, ou seja, os dados não possuem distribuição normal ($p < 0,05$). Em virtude disso, a análise dos dados foi realizada pelo uso da mediana (medida de tendência central) e dos quartis (medida de variabilidade).

Após exibição dos dados tabulares, tal análise é externada graficamente mediante à exposição do gráfico de distribuição de frequência e gráfico de diagrama de caixa, bem como são apresentados os valores referentes ao primeiro quartil, à mediana e ao terceiro quartil. O primeiro gráfico mostra a distribuição dos valores da variável, enquanto o segundo apresenta

a mediana, a amplitude interquartil, os valores extremos e os *outliers* (valores atípicos); tais gráficos receberam recursos adicionais de visualização destinados à exposição da densidade dos dados (gráfico de curva de densidade e gráfico de violino, respectivamente). Dessa forma, esses recursos gráficos permitem uma visualização completa da distribuição dos dados do BANDASE.

Devido ao quantitativo de variáveis, a exposição dos resultados foi dividida em 4 (quatro) cenários:

- Cenário 1: variáveis referentes à granulometria (argila, silte, areia, pedregulho e fração de argila);
- Cenário 2: variáveis pertinentes aos limites de consistência (limite de liquidez, limite de plasticidade, limite de contração e índice de plasticidade);
- Cenário 3: variáveis relacionadas à atividade da argila, ao peso específico seco, à umidade ótima, à umidade natural e ao peso específico seco;
- Cenário 4: variáveis referentes ao índice de vazios, à porosidade, ao grau de saturação e à densidade real dos grãos.

3.2.2 Elaboração das cartas de suscetibilidade

Em 1986, o Grupo de Solos Não Saturados da Universidade Federal de Pernambuco deu início ao estudo de mapeamento geotécnico envolvendo os solos colapsíveis e expansivos. De modo geral, as diretrizes aplicadas são similares à metodologia de Prandini *et al.* (1995), ou seja, metodologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (ZUQUETTE; NAKAZAWA, 1998; AMORIM, 2004). Neste trabalho foi adotada a estrutura básica da referida metodologia, assim como foi realizado no trabalho de Amorim (2004).

No que concerne ao levantamento preliminar, o estudo teve foco em 2 (dois) fenômenos do meio físico: solos colapsíveis e solos expansivos. Essa etapa também envolveu o levantamento bibliográfico dos trabalhos pertinentes ao tema, reunindo informações sobre os dois processos.

Na etapa seguinte, denominada investigação orientada, foram identificados os fatores condicionantes do problema: climatologia e pedologia. Por meio de pesquisa realizada em site de instituição governamental (Embrapa), buscaram-se os mapeamentos referentes aos fatores mencionados. Ainda nessa etapa, ocorreu a definição das escalas de trabalho, as quais

obedeceram às utilizadas por cada instituição. Quanto à carta final, resultante da superposição, foi atribuída a menor escala dentre os mapas temáticos.

A compartimentação final envolveu a análise integrada dos fatores mapeados, a compatibilização e a sobreposição das cartas derivadas. Os solos que apresentavam comportamento homogêneo foram delimitados em unidades geotécnicas de suscetibilidade à ocorrência de solos expansivos e colapsíveis. A superposição das cartas derivadas gerou as cartas interpretativas de zoneamento dos solos expansivos e colapsíveis do Brasil, Figura 44.

Figura 44 - Etapas desenvolvidas para elaboração das cartas de suscetibilidade.

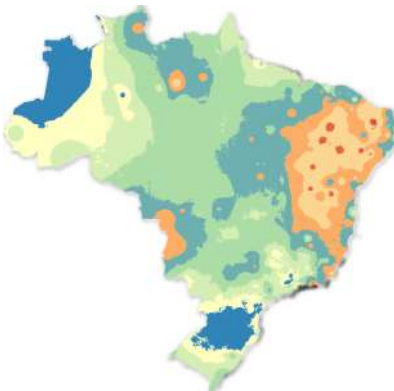


Fonte: Autor (2024).

Quanto ao estabelecimento das medidas de controle, os Apêndices G e H abordam as práticas e as técnicas encontradas na literatura, expostas as principais medidas preventivas e corretivas dos problemas oriundos do comportamento dos solos colapsíveis e expansivos, respectivamente. Por fim, apresenta-se, na etapa de representação, o produto final com as informações de natureza cartográfica transmitidas mediante o uso de recursos de cores, quadro legenda e linguagem acessível ao usuário.

Os mapas temáticos fundamentais utilizados neste trabalho estão apresentados no Quadro 15. A exposição dos dados tem similaridade com a estrutura do catálogo de metadados da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). Ao final do referido quadro, estão expostas as representações dos mapas fundamentais referentes aos condicionantes climatológicos e pedológicos.

Quadro 15 - Metadados dos mapas temáticos fundamentais.

Informações	Clima	Pedologia
Título	Tipos climáticos, segundo classificação de Thornthwaite	Mapa de solos do Brasil
Empresa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Sigla	EMBRAPA	EMBRAPA
Logotipo		
Idioma	Português	Português
Contato para o recurso	Av. Soldado Passarinho, nº 303, Fazenda Jardim Chapadão 13070-115 Campinas - SP BRA (19) 3211-6200	Rua Jardim Botânico, 1024, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 22460000, BRA +55(21) 21794500
Estado	Concluído	Concluído
Data	2021	2012 e 2020 (correções)
Tipo de representação	Vetor	Vetor
Escala	1:1.000.000	1:5.000.000
Sistema de referência de coordenadas	WGS84 (EPSG 4326)	WGS84 (EPSG 4326)
Contagem de feições	9	2.852
Geometria	Polygon (MultiPolygon)	Polygon (MultiPolygon)
Codificação de caracteres	UTF-8	UTF-8
Representação		

Fonte: Autor (2024).

Os níveis de suscetibilidade ficaram definidos da seguinte forma:

-  Alta: ocorrência evidenciada pela coincidência de propriedades geotécnicas características dos solos expansivos e colapsíveis com as características das unidades de mapeamento de cada condicionante considerado;
-  Média: situação intermediária em que algumas características favoreciam e outras não à ocorrência dos processos;
-  Baixa: possibilidade reduzida de apresentar os fenômenos de expansão e colapso dos solos externada pela pouca ou inexistente identificação das características geotécnicas específicas desses solos com as características advindas de cada condicionante.

A hierarquização de suscetibilidade obedeceu à sistemática adotada por Amorim (2004), ou seja, utilizou-se três níveis de suscetibilidade (alto, médio e baixo) visando facilitar a interpretação, bem como a definição de recomendações e diretrizes de ocupação do meio físico. Quanto ao critério de hierarquização, adotou-se a observação relativa (qualitativa) de cenários de suscetibilidade, a partir de casos extremos. Isso significa que a alta suscetibilidade foi aplicada para as situações de caráter eminente (mais críticas), enquanto a baixa suscetibilidade para as situações de caráter ausente (não suscetíveis). Consequentemente, a média suscetibilidade foi aplicada para as situações intermediárias.

3.2.2.1 Critérios climatológicos de suscetibilidade

Segundo Vasconcelos (2001), o clima representa um aspecto essencial no processo de variação de volume dos solos não saturados metaestáveis. As variações climáticas causam ciclos de ressecamento e umedecimento do solo. Os fenômenos de expansividade e colapsibilidade são manifestados em função da mudança de umidade. As zonas de suscetibilidade à expansão e ao colapso coincidem com áreas climáticas deficitárias de umidade, especialmente em climas áridos.

A referida autora afirma que, diferentemente de outros tipos climáticos existentes, esses bastante empíricos e com propósitos fitoclimáticos, o sistema de classificação climática de Thornthwaite (1948) tem uma abordagem racional e com propósitos gerais, posto que visa preferencialmente o meio físico em vez do meio biológico. Esse sistema envolve um conceito de relevante interesse no estudo de solos colapsíveis e expansivos: a evapotranspiração

potencial, que consiste no comparativo entre a quantidade de água recebida pela chuva e a quantidade perdida pela evapotranspiração.

No tocante aos índices de umidade, oriundos do sistema de classificação climática de Thornthwaite, Ayala *et al.* (1986) asseveram que os valores negativos significam um cenário em que o solo pode estar sujeito, em algum período do ano, a uma condição de evaporação superior à precipitação. Esse desequilíbrio tende a ser compensado a partir de água retida nas camadas mais profundas do solo. Em geral, quanto menor o índice de umidade, maior será o período de seca. Os referidos autores alertam que as variáveis sazonais são pouco contrastadas nos casos de seca extrema. Em virtude disso, o desequilíbrio máximo de umidade ocorre para situações em que os índices não são excessivamente negativos.

Ainda segundo os autores mencionados, as áreas suscetíveis ao comportamento expansivo coincidem com áreas climáticas com déficit de umidade, principalmente as que apresentam climatologia simplesmente seca, onde as variações sazonais são mais acentuadas. Em regiões de clima árido, as variações de umidade significativas propendem a ser registradas em períodos hiperanuais, de modo que suas consequências podem tardar vários anos.

Nesse diapasão, a influência do clima nos solos colapsíveis e expansivos foi analisada por Ferreira (1999). Baseado no sistema de classificação climática de Thornthwaite (1948), o referido autor estabeleceu, a partir do índice de umidade, o grau de suscetibilidade ao colapso e à expansão. Essa metodologia foi utilizada nos trabalhos de Vasconcelos (2001), Silva (2003), Amorim (2004) e Aquino (2020).

Ressalta-se que o tipo climático subúmido (C2) foi enquadrado, diferentemente da metodologia mencionada, na suscetibilidade média. Tal medida visa trazer coerência com o quantitativo de ocorrência registrado na literatura. Portanto, quanto ao condicionante climatológico, os critérios adotados para fins de atribuição das suscetibilidades à expansão e ao colapso obedecem aos seguintes aspectos:

-  Alta: regiões de clima árido e semiárido caracterizadas pelos períodos de grande escassez de chuvas, levando o solo a uma condição não saturada com déficit hídrico, e pelos curtos períodos de chuvas concentradas, propiciando a condição de variação de umidade do solo, essas características são fundamentais para a deflagração dos processos de expansão e colapso dos solos;
-  Média: regiões de clima subúmido e clima subúmido seco caracterizadas por apresentarem condições intermediárias entre os dois limites de suscetibilidade;

-  Baixa: regiões de clima superúmido e úmido caracterizadas pela ausência de estações contrastadas (seca e chuvosa) e pelo superávit hídrico, proporcionando teores de umidade mais elevados nas camadas superficiais do solo, que permanecem nessa condição por períodos hiperanuais.

Neste trabalho, utilizou-se o mapa fundamental climático elaborado por Mingoti *et al.* (2021) para os tipos climáticos do sistema de classificação de Thornthwaite. A Tabela 6 apresenta a aplicação do critério climatológico de suscetibilidade para os tipos climáticos estabelecidos segundo Thornthwaite (1948). Os três níveis de suscetibilidade foram aplicados para as 9 tipologias climáticas a partir de seu respectivo índice de umidade, definido conforme Thornthwaite e Mather (1955).

Tabela 6 - Critérios de suscetibilidade climática dos solos colapsíveis e expansivos, segundo os índices de umidade de Thornthwaite e Mather (1955).

Cor	Tipos climáticos	Índice de Umidade (I_u)	Suscetibilidade
	A - Superúmido	$100,0 \leq I_u$	BAIXA
	B4 - Úmido	$80,0 \leq I_u < 100,0$	BAIXA
	B3 - Úmido	$60,0 \leq I_u < 80,0$	BAIXA
	B2 - Úmido	$40,0 \leq I_u < 60,0$	BAIXA
	B1 - Úmido	$20,0 \leq I_u < 40,0$	BAIXA
	C2 - Subúmido	$0,0 \leq I_u < 20,0$	MÉDIA
	C1 - Subúmido seco	$-33,3 \leq I_u < 0,0$	MÉDIA
	D - Semiárido	$-66,7 \leq I_u < -33,3$	ALTA
	E - Árido	$-100,0 \leq I_u < -66,7$	ALTA

Fonte: Autor (2024).

3.2.2.2 Critérios pedológicos de suscetibilidade

Os critérios pedológicos de suscetibilidade adotados neste trabalho obedeceram à metodologia proposta por Ferreira (1999), essa lastreada a partir de extenso estudo bibliográfico. Sucintamente, é possível afirmar que a classificação do grau de suscetibilidade decorre de uma análise comparativa entre as características dos solos em questão e das unidades pedológicas.

Tal análise visa classificar a suscetibilidade de ocorrência dos fenômenos de colapso ou expansão perante as particularidades das classes pedológicas, estabelecendo os níveis de suscetibilidade: alta, média e baixa. Didaticamente, a Figura 45 retoma as principais

características dos solos colapsíveis e expansivos, definidas por Vilar e Ferreira (2015), que evidenciam seus comportamentos.

No tocante à análise comparativa, foram apreciados, através de uma abordagem sistemática, os seguintes atributos das classes pedológicas: grau de saturação, textura, drenagem, profundidade, relação molecular entre os teores de sílica e alumina (Ki), atividade da argila e minerais argílicos.

Figura 45 - Características predominantes dos solos colapsíveis e expansivos, segundo Vilar e Ferreira (2015).



Fonte: Autor (2024).

Os atributos dos critérios aqui aplicados consideram as propostas de Ferreira (1993), que analisou as características das classes pedológicas e tratou da aplicação da classificação e levantamentos pedológicos dos solos colapsíveis e expansivos. Ao longo do tempo, esses critérios foram aplicados e aperfeiçoados por Ferreira (1996), Vasconcelos (2001) e Amorim (2004). Com a publicação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos em 2018 e as contribuições de Antunes *et al.* (2013) e Antunes e Salomão (2018) sobre o desenvolvimento de classes e unidades geo-pedológicas a partir da interação entre a Pedologia e a Geotecnia, os critérios foram ajustados (AQUINO; FERREIRA, 2022; SILVA, T.B.; BELLO; FERREIRA, 2020).

É importante ressaltar que a atribuição dos critérios é realizada de forma qualitativa, não sendo rigorosa, como enfatiza Amorim (2004). A referida análise requer *expertise* devido às inúmeras particularidades em torno dos solos colapsíveis e expansivos. De modo geral,

quanto ao condicionante pedológico, resumem-se os critérios adotados para fins de atribuição das suscetibilidades à expansão e ao colapso da seguinte forma:

-  Alta: ocorre quando se constata compatibilidade elevada entre as características das classes pedológicas e as características dos solos especiais (colapsíveis ou expansivos);
-  Média: ocorre quando se constata uma condição intermediária entre os dois limites de suscetibilidade;
-  Baixa: ocorre quando se constata compatibilidade pequena ou ausente entre as características das classes pedológicas e as características dos solos especiais (colapsíveis ou expansivos).

Os aspectos pedológicos são apresentados no Apêndice I. Devido à significativa quantidade de dados, a tabela de atributos contendo todas as suscetibilidades atribuídas encontra-se disponível no Apêndice J.

3.2.2.3 Procedimentos adotados na elaboração dos produtos cartográficos

Resumidamente, o processo de concepção dos documentos cartográficos está apresentado mediante ilustrações esquemáticas (Figura 46 e Figura 47), visando facilitar a elucidação da metodologia adotada neste trabalho.

A Figura 46 apresenta as etapas utilizadas no ambiente do QGIS, enquanto a Figura 47 expõe os procedimentos adotados no ambiente de editores de planilhas. No tocante ao ambiente do QGIS, a primeira etapa consiste na obtenção de dados espaciais pertinentes aos condicionantes climatológicos e pedológicos, buscando esses dados nos órgãos oficiais, no caso concreto, no portal da Embrapa (mapas fundamentais) e do IBGE (limites territoriais). A aquisição dos dados pode ser realizada mediante conexão com servidores de mapas no ambiente do QGIS ou *download* no site do órgão oficial.

A segunda etapa envolve a operação de reprojetar as camadas dos mapas fundamentais para o sistema geodésico de referência utilizado oficialmente pelo Brasil, o SIRGAS2000. Além disso, o projeto também é ajustado para o referido sistema oficial. Após obter um ambiente de trabalho adequado, realizou-se a terceira etapa. Essa consiste na operação de verificar a existência de topologias com erros, tais como feições duplicadas e inválidas. Em seguida, realizou-se a correção dos erros constatados.

A divisão das feições representa a operação realizada na quarta etapa. Os limites territoriais foram separados para servir de camadas máscaras em relação às camadas dos mapas fundamentais. Inaugura-se a quinta etapa, que corresponde à operação de recorte envolvendo as referidas camadas. Feito isso, realizou-se a operação de mesclagem das camadas recortadas, caracterizando a sexta etapa.

Após realizar a consolidação dos dados, efetuou-se o cálculo de área em um projeto separado, destinado exclusivamente para essa operação. Nesse projeto, adotou-se o Sistema de Projeção Cônica Equivalente de *Albers*, dado que representa a projeção adequada para extensões superiores a 50 km, bem como é utilizada pelo IBGE na elaboração de seus documentos cartográficos. Obtidos os valores de área, esses dados quantitativos foram incrementados nas respectivas camadas do projeto principal. Esses procedimentos caracterizam a sétima etapa.

Por fim, a oitava etapa consiste nas operações matemáticas realizadas no *Google Planilhas*, essas operações são detalhadas a seguir. Após isso, realizou-se a aplicação da simbologia do tipo categorizado nos campos relacionados às suscetibilidades, permitindo a geração dos produtos cartográficos nas cores relativas aos níveis de suscetibilidade baixa (amarelo), média (laranja) e alta (vermelho).

Figura 46 - Procedimentos realizados no ambiente do QGIS.



Fonte: Autor (2024).

No tocante às operações realizadas no *Google Planilhas*, a Figura 47 apresenta a sequência de procedimentos efetuados desde os mapas fundamentais, obtidos nas etapas

anteriores, percorrendo todo o processo de exportação, conversão, criação, atribuição, reprodução e incrementação até alcançar o documento cartográfico final.

Preliminarmente, após baixar a tabela de atributos do mapa fundamental processado e transformar em planilha do *Google*, identificaram-se as unidades exclusivas presentes nos 3 (três) componentes, esses definidos até o 3º nível categórico (grandes grupos). A partir dessa exclusividade, criaram-se campos para receber os valores atribuídos para as suscetibilidades ao colapso e à expansão para cada unidade específica. Em seguida, mediante processo de automatização no *Google* Planilhas, as suscetibilidades foram reproduzidas para toda a tabela de atributos do documento cartográfico.

Posteriormente, concluídas as operações matemáticas na planilha do *Google*, os dados tabulares foram convertidos para planilha do *Excel*, visto que representam um dos formatos aceitos pelo QGIS. Por fim, os dados da referida planilha foram incrementados na tabela de atributos da camada do mapa fundamental através de chave primária. Isso possibilitou a aplicação da simbologia nos campos contendo as suscetibilidades e a geração do produto cartográfico.

Figura 47 - Procedimentos utilizados na atribuição das suscetibilidades e na incrementação dos dados.



Fonte: Autor (2024).

A partir de informações contidas na tabela de atributos do mapa fundamental pedológico, estabeleceu-se a classificação da suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos de cada unidade de mapeamento através de aplicação de três critérios: conservador, ponderado e inverso. Buscando permitir um melhor entendimento

sobre os critérios citados, foram elaboradas representações esquemáticas exteriorizadas após a narrativa desses critérios.

No que concerne ao critério conservador, este consiste na atribuição da suscetibilidade para a condição mais desfavorável dentre os três componentes formadores da unidade de mapeamento. A título de exemplo, se apenas um componente apresenta alta suscetibilidade, atribui-se o nível alto para unidade de mapeamento. Se nenhum componente apresenta alta suscetibilidade, mas algum consta média suscetibilidade, atribui-se o nível médio para unidade de mapeamento. Consequentemente, se todos os componentes apresentam baixa suscetibilidade, o nível atribuído para a unidade de mapeamento é baixo.

Didaticamente, a Figura 48 está estruturada reduzidamente quanto aos campos contidos na tabela atributos do mapa fundamental, expondo, exemplificadamente, apenas os 3 (três) componentes que compõem a unidade de mapeamento. Em seguida, são expostas as suscetibilidades atribuídas para cada componente. Por fim, adota-se a suscetibilidade resultante da aplicação do critério conservador, ou seja, prevalece a condição mais desfavorável dentre as suscetibilidades dos componentes.

Figura 48 - Representação esquemática do critério conservador.

CRITÉRIO CONSERVADOR							
COMPONENTES DA UNIDADE DE MAPEAMENTO				SUSCETIBILIDADES DAS COMPONENTES			SUSCETIBILIDADE RESULTANTE
1º COMPONENTE	2º COMPONENTE	3º COMPONENTE	UND. DE MAPEAMENTO	1º COMP.	2º COMP.	3º COMP.	SUSC. ADOTADA
Luvissolos Crômicos Pálcos	Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	Cambissolos Háplcos Ta Eutróficos	TCp4 - Luvissolos Crômicos Pálcos + Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos + Cambissolos Háplcos Ta Eutróficos	2	1	3	3
Luvissolos Crômicos Pálcos	Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	Neossolos Litólicos Distróficos	TCp5 - Luvissolos Crômicos Pálcos + Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos + Neossolos Litólicos Distróficos	2	1	1	2
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos	Cambissolos Háplcos Tb Eutróficos	PVA47 - Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Cambissolos Háplcos Tb Eutróficos	1	1	1	1

LEGENDA

1 NÍVEL DE SUSCETIBILIDADE BAIXA 2 NÍVEL DE SUSCETIBILIDADE MÉDIA 3 NÍVEL DE SUSCETIBILIDADE ALTA

 Colapsível Expansivo

Fonte: Autor (2024).

Em relação ao critério ponderado, a definição da suscetibilidade para cada unidade de mapeamento é resultante da média ponderada aplicada nas suscetibilidades atribuídas aos seus componentes. Para viabilizar essa operação matemática, atribuiu-se para cada nível de suscetibilidade um valor numérico. Sendo assim, aplicou-se para os níveis de suscetibilidade

alto, médio e baixo os valores 3, 2 e 1, respectivamente. Devido aos números fracionados oriundos dessa operação (denominados de X), realizou-se a reversão desses resultados por faixa de enquadramento nos níveis de suscetibilidade alta ($X \geq 2,33$), média ($1,67 \leq X < 2,33$) e baixa ($X < 1,67$), Figura 49.

Ressalta-se que na tabela de atributos existem componentes apresentando registros em branco. Essa ausência de registro também ocorre, simultaneamente, no segundo e no terceiro componente, estando relacionados aos corpos de água, às dunas e aos afloramentos de rochas. Os registros em branco somente no terceiro componente indicam que a unidade pedológica é formada apenas pelos dois primeiros. No caso de corpos de água, foi atribuído o valor de 0 para sua identificação, enquanto aos demais, foram atribuídos normalmente os valores de suscetibilidades após o confronto de suas características com as particularidades dos solos colapsíveis e expansivos.

Figura 49 - Representação esquemática do critério ponderado.



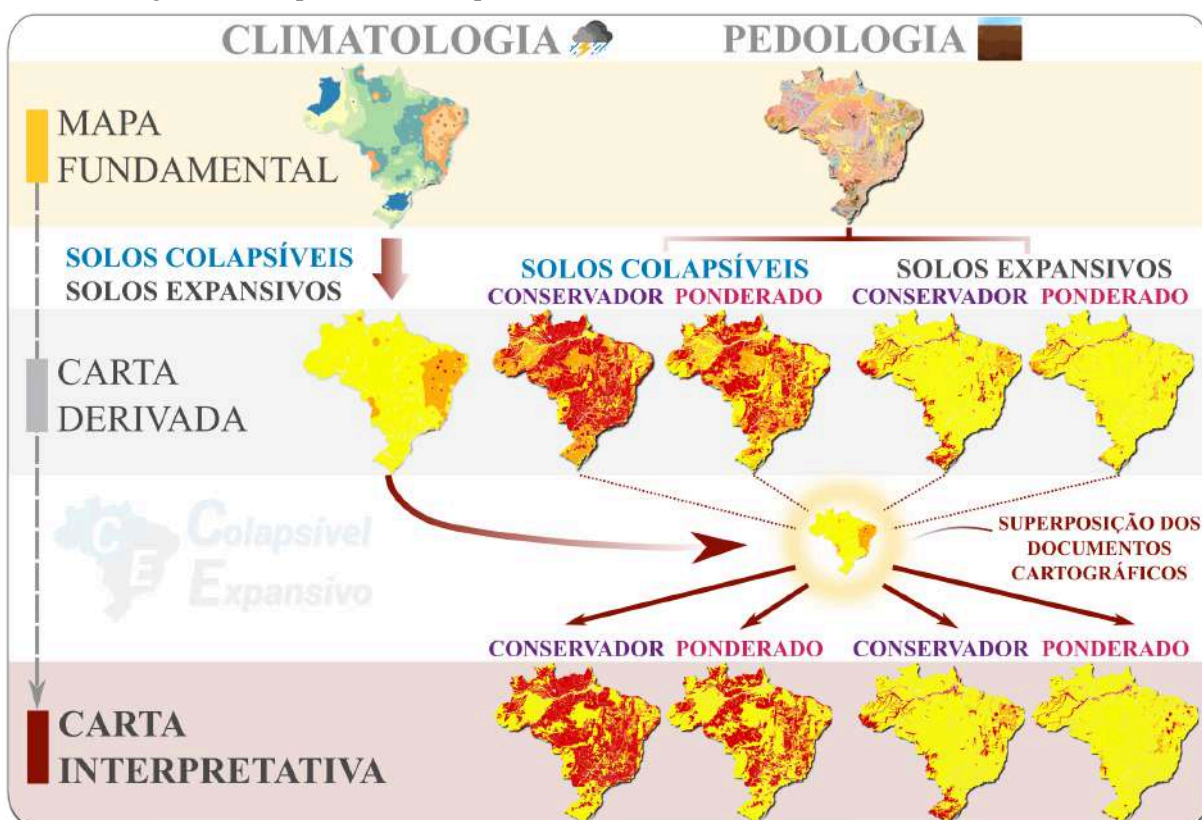
Fonte: Autor (2024).

Atribuídos os valores de suscetibilidade nos mapas fundamentais, geraram-se as cartas derivadas para os dois processos (expansão e colapso). Posteriormente, elaborou-se a carta interpretativa a partir de superposição das cartas derivadas. Essas operações de geoprocessamento foram realizadas obedecendo aos requisitos de compatibilização entre os documentos cartográficos, ou seja, as camadas utilizadas no processo apresentam as mesmas propriedades quanto aos sistemas: geodésico de referência, projeção cartográfica e coordenadas.

A Figura 50 apresenta o processo de superposição dos documentos cartográficos visando obter a carta interpretativa para os critérios conservador e ponderado.

Quanto à verificação da metodologia, realizou-se o confronto entre as cartas de suscetibilidade e os registros de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos oriundos do Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE). As coordenadas geográficas de cada local de ocorrência foram levantadas durante a construção do banco de dados. A partir dessas coordenadas, criaram-se as camadas pontuais mediante o uso do QGIS. Feito isso, executou-se a superposição desses pontos sobre as cartas de suscetibilidade, verificando a correspondência entre os locais de ocorrência e as suscetibilidades previstas nas cartas.

Figura 50 - Representação esquemática da elaboração das cartas de suscetibilidade.



Fonte: Autor (2024).

Didaticamente, a Figura 51 apresenta o procedimento adotado na verificação da metodologia. A referida figura expõe para cada solo a superposição das camadas vetoriais (polígono e ponto), resultando no processamento do documento cartográfico com as informações necessárias para analisar a correspondência entre as suscetibilidades contidas nas cartas e os registros de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos. Tal procedimento permitiu extrair o quantitativo de convergência para cada suscetibilidade.

Figura 51 - Processo de verificação da metodologia.



Fonte: Autor (2024).

Neste trabalho, também foi aplicado o critério denominado inverso, ou seja, realizou-se, em relação ao condicionante pedológico, o procedimento no sentido contrário. Primeiramente, atribuiu-se o nível de suscetibilidade alta para os registros de ocorrência. Posteriormente, ao realizar a superposição das camadas vetoriais, a camada de polígono (unidades de mapeamento) que convergiu com a camada pontual (registros de ocorrência) teve seu nível de suscetibilidade atribuído para alta. Em seguida, reproduziu-se essa suscetibilidade para as demais unidades de mapeamento com denominação idêntica, mantendo-se inalteradas as suscetibilidades das outras unidades de mapeamento que não apresentaram convergência (Figura 52).

Figura 52 - Representação esquemática do critério inverso.



Fonte: Autor (2024).

3.2.2.4 Procedimentos adotados na elaboração das cartas interpretativas de RNA

São detalhados os procedimentos aplicados na elaboração dos produtos cartográficos oriundos de RNA. A rede é decorrente da tese de Holanda (2022) e visa a identificação de solos colapsíveis e expansivos a partir de condicionantes climatológicos, pedológicos e geológicos. Essa rede foi denominada BR03. A amostra utilizada no desenvolvimento da rede consistiu em 237 dados para fase de treinamento, 78 para fase de seleção e 78 para fase de teste, totalizando 393 dados. O Apêndice F apresenta informações detalhadas sobre a mencionada rede, bem como as métricas e as ferramentas de avaliação referentes à classificação binária.

Alicerçado no modelo matemático, aplicou-se a equação da RNA nos atributos dos mapas fundamentais de clima, pedologia e geologia do Brasil, visando a elaboração de produtos cartográficos e consequentemente a disponibilização na plataforma web. O Quadro 16 apresenta os metadados dos mapas fundamentais utilizados na aplicação do modelo matemático elaborado por Holanda (2022) mediante técnicas computacionais.

Nos mapas fundamentais expostos no referido quadro, foram realizadas operações de geoprocessamento. Primeiramente, aplicou-se o Sistema Geodésico de Referência oficialmente adotado pelo Brasil (SIRGAS2000 - EPSG 4674) para o projeto e as camadas vetoriais, promovendo a compatibilização dos sistemas. Em seguida, realizou-se a verificação da topologia e a correção dos erros identificados. Posteriormente, selecionaram-se os campos da tabela de atributos que apresentam os registros utilizados como variáveis no modelo matemático gerado por Holanda (2022), excluindo os demais campos.

Quadro 16 - Metadados pertinentes aos mapas fundamentais utilizados na aplicação do modelo matemático obtido através de Rede Neural Artificial, Holanda (2022). (continua)

Informações	Clima	Pedologia	Geologia
Título	Tipos climáticos, segundo classificação de Thornthwaite	Brasil - Pedologia	Brasil - Geologia
Empresa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Sigla	EMBRAPA	IBGE	IBGE
Logotipo			
Idioma	Português	Português	Português

Quadro 16 - Metadados pertinentes aos mapas fundamentais utilizados na aplicação do modelo matemático obtido através de Rede Neural Artificial, Holanda (2022). (conclusão)

Informações	Clima	Pedologia	Geologia
Contato para o recurso	Av. Soldado Passarinho, nº 303, Fazenda Jardim Chapadão 13070-115 Campinas - SP BRA (19) 3211-6200	Av. República do Chile, 500, Centro, Rio de Janeiro - RJ. CEP 20031170 / tel.: (21) 21424990; (21) 21424997; (21) 21424998; (21) 21424999	Av. República do Chile, 500, Centro, Rio de Janeiro - RJ. CEP 20031170 / tel.: (21) 21424990; (21) 21424997; (21) 21424998; (21) 21424999
Estado	Concluído	Concluído	Concluído
Data	2021	2019	2019
Tipo de representação	Vetor	Vetor	Vetor
Escala	1:1.000.000	1:250.000	1:250.000
Sistema de referência de coordenadas	WGS84 (EPSG 4326)	SIRGAS2000 (EPSG 4674)	SIRGAS2000 (EPSG 4674)
Contagem de feições	9	114.659	123.389
Geometria	Polygon (MultiPolygon)	Polygon (MultiPolygon)	Polygon (MultiPolygon)
Codificação de caracteres	UTF-8	UTF-8	UTF-8
Representação			

Fonte: Autor (2024).

Nos mapas fundamentais de clima, pedologia e geologia, os campos selecionados foram os seguintes: tipos climáticos, ordem e províncias estruturais, respectivamente. Ulteriormente, aplicou-se a ferramenta denominada dissolve para agregar os registros com nomenclatura idêntica. Feito isso, realizou-se a superposição dos documentos cartográficos utilizando a ferramenta denominada união.

Após obter a camada vetorial contendo os três condicionantes naturais, exportou-se a tabela de atributos em formato CSV (Valores Separados por Vírgula). Esse arquivo foi lançado no programa *Neural Designer* visando aplicar a equação do modelo matemático nas três variáveis, ou seja, nos atributos de clima, pedologia e geologia.

O processamento retorna uma nova versão da tabela de atributos, visto que um novo campo é gerado. Tal campo representa o resultado da equação. Esse resultado é externado na forma de valores decimais variando de 0 a 1. A referida faixa indica a grandeza quanto aos níveis de suscetibilidade ao colapso e à expansão, ou seja, os valores próximos aos extremos correspondem aos maiores níveis de suscetibilidade para cada fenômeno.

Significa que valores próximos a 0 (zero) representam nível de suscetibilidade alta para colapso, tal nível vai decrescendo à medida que os valores aumentam. Por outro lado, valores próximos a 1 (um) indicam nível de suscetibilidade alta para expansão, esse nível vai decrescendo à medida que os valores diminuem.

A delimitação das faixas referentes aos níveis de suscetibilidade foi determinada com base no histograma resultante da superposição dos dados do BANDASE sobre a carta de suscetibilidade. Após essa sobreposição, verificaram-se os valores decimais correspondentes aos referidos dados.

Ressalta-se que foram utilizados exclusivamente os campos da tabela de atributos contendo registros com completude de informações pertinentes às três condicionantes, ou seja, foram excluídos os registros contendo ausência de informação (registros em branco), áreas urbanas sem informações de condicionantes (registros denominados como outros) e áreas de corpos d'água.

Definidos os intervalos pertinentes aos níveis de suscetibilidade, realizou-se a aplicação da simbologia, gerando as cartas de suscetibilidade ao colapso e à expansão. Adotou-se o padrão de cores para os níveis de suscetibilidade (alta, média e baixa), enquanto para as áreas sem comportamento colapsível ou expansivo foram aplicadas a tonalidade na cor cinza. Em relação aos corpos de água e às áreas urbanas, aplicou-se a tonalidade na cor roxa.

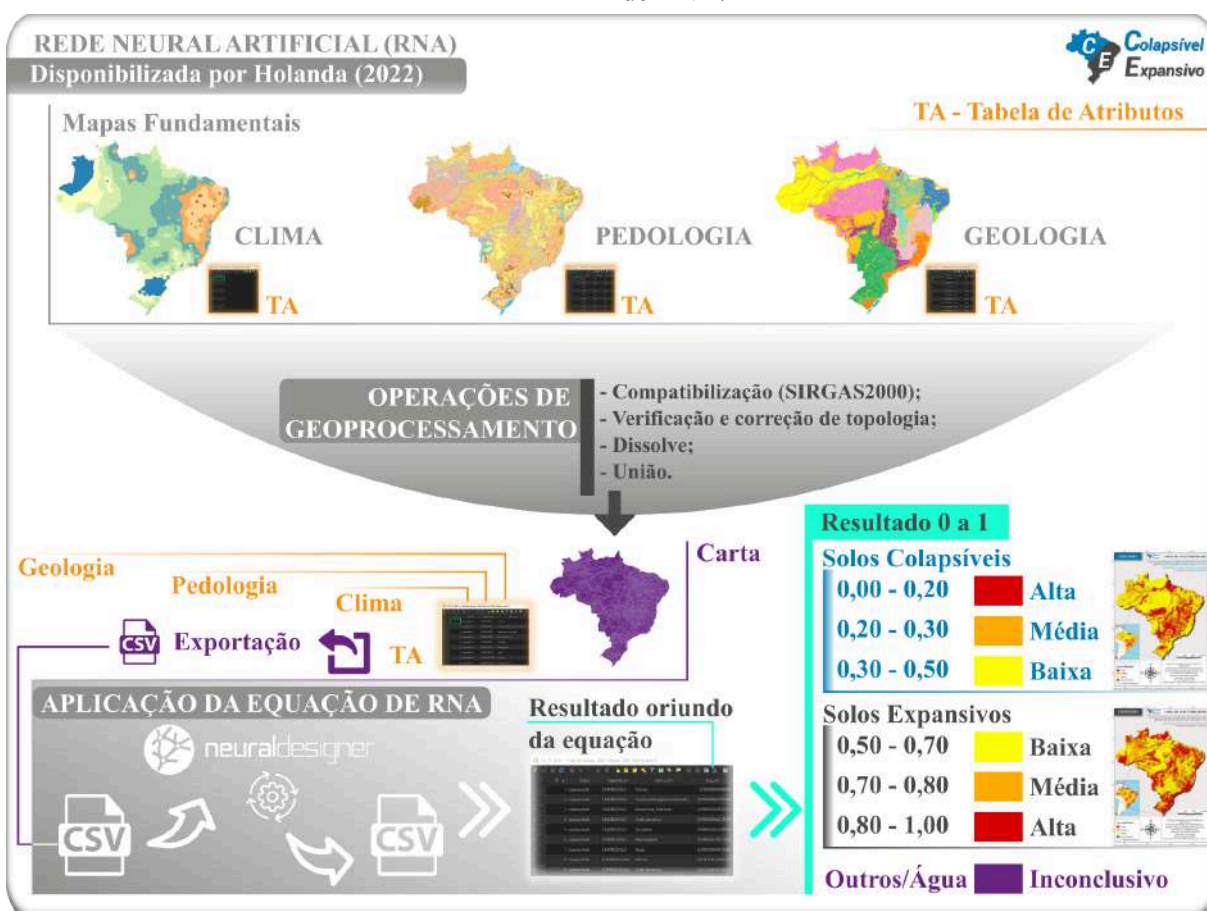
Os procedimentos metodológicos utilizados na determinação dos intervalos de suscetibilidade e nas operações de geoprocessamento para obtenção das cartas estão expostos didaticamente na Figura 53 e na Figura 54, respectivamente. Tais figuras foram elaboradas com o intuito de facilitar a compreensão das etapas e visualização dos resultados, proporcionando uma visão clara e abrangente do processo metodológico empregado.

Figura 53 - Definição dos níveis de suscetibilidade com base nos histogramas.



Fonte: Autor (2024).

Figura 54 - Procedimentos realizados na elaboração dos produtos cartográficos oriundos da equação de RNA.



Fonte: Autor (2024).

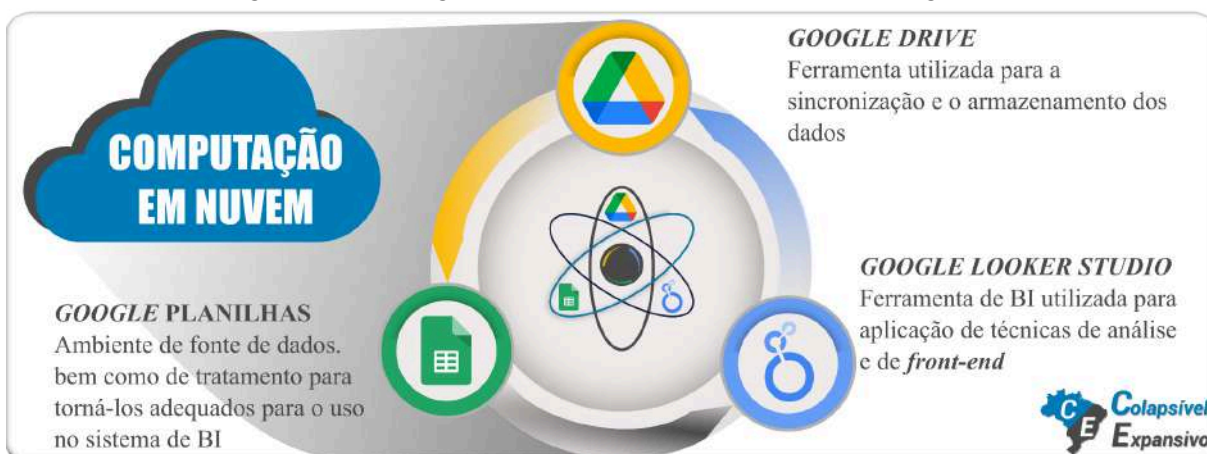
3.2.3 Confecção dos painéis de BI

Na elaboração dos painéis de *Business Intelligence* foi utilizado o pacote da *Google*. Os dados, que dão suporte ao sistema de BI, estão estruturados no *Google Planilhas*, caracterizando o ambiente de fonte de dados. Nessas planilhas foram realizados diversos procedimentos visando tornar os dados adequados para o uso no sistema de BI, tais como correções, limpeza, transformações e outros.

Apesar de ser possível o uso de uma única planilha na elaboração do painel, preferiu-se adotar uma planilha para cada tema. Sendo assim, foram elaboradas 6 (seis) planilhas, que correspondem aos seguintes assuntos: banco de dados, climatologia, pedologia, carta, carta RNA e Pernambuco. Todas essas planilhas foram tratadas quanto à formatação dos dados textuais e numéricos, correção de erros de caracteres e números, limpeza de dados, criação de campos, transformações de dados geográficos e outros. Devido à simplificação proporcionada pela computação em nuvem, esses procedimentos se agregam aos outros expostos a seguir para caracterizar o ambiente de movimentação de dados.

A sincronização e o armazenamento foram realizados mediante o uso do *Google Drive*, caracterizando repositório semelhante ao ambiente de *Data Warehouse*, porém, no caso concreto, por computação em nuvem. Os ambientes de servidores *mid-tier* e análise de negócio foram proporcionados pelo *Google Looker Studio*. Essa ferramenta foi responsável por permitir o uso de técnicas de análise para gerar informações relevantes no processo de tomada de decisão, bem como a aplicação de *front-end*, desenvolvendo uma interface gráfica para os usuários visualizar e interagir com os painéis de BI, Figura 55.

Figura 55 - Visão geral das ferramentas utilizadas e sua integração.



Fonte: Autor (2024).

No tocante ao detalhamento dos procedimentos, dividiu-se o processo de construção dos painéis de BI em 5 (cinco) passos. O primeiro envolve a origem dos dados. A criação da base de dados se deu por planilhas do *Google*, armazenadas no *Google Drive*. No processador de dados tabulares foram realizadas correções de codificação, criações de campos, formatações dos dados, transformações e conversões de unidades, exclusões de campos, dentre outros. Esse tratamento é essencial para permitir o adequado funcionamento no ambiente de BI.

A conexão da fonte de dados com o *Google Looker Studio* corresponde ao segundo passo. Ao solicitar a criação de um relatório em branco, a ferramenta de BI disponibiliza várias opções de conexão. No caso concreto, selecionou-se a opção do *Google Planilhas*, marcando o nome da planilha e da página desejada. Feito isso, inaugura-se o terceiro passo.

Na referida etapa, ocorreu outro processo de tratamento, visto que os dados textuais (dimensões) e numéricos (métricas) foram submetidos aos ajustes necessários para permitir o adequado funcionamento na etapa posterior. Sendo assim, realizaram-se as adequações de cada campo quanto à tipologia (texto, número, data, informação geográfica, etc.) e à agregação (soma, média, máximo e outros). Somando-se a isso, foram criados campos e parâmetros para subsidiar a aplicação das técnicas referentes ao passo seguinte.

O quarto passo consiste na criação do ambiente em que são aplicadas as técnicas de análise. Além de criatividade do profissional, essa etapa exige que o analista detenha conhecimento sobre os formatos de visualização e os recursos envolvidos nos elementos gráficos gerados nesses formatos. Neste trabalho, foram utilizados inúmeros formatos de visualização visando alcançar a melhor extração de conhecimento da base de dados.

Por fim, o quinto passo envolve a exibição dos painéis de BI. Buscou-se manter uma estrutura homogênea na apresentação dos painéis para torná-los amigáveis aos usuários, proporcionando uma transição sem tanta divergência entre os formatos de visualização. Utilizando cabeçalhos expostos lateralmente, organizou-se o painel de navegação mediante a nomeação dos temas abordados nos painéis. Esses assuntos estão reduzidos em seções que podem ser expandidas pelos usuários. Tal recurso evita poluir o painel de navegação com uma lista exaustiva, bem como facilita o acesso dos usuários durante o uso dos painéis de BI. Todo o detalhamento narrado está exposto esquematicamente na Figura 56.

Figura 56 - Procedimentos utilizados na elaboração dos painéis de BI.



Fonte: Autor (2024).

3.2.4 Criação dos aplicativos

Buscando disponibilizar os documentos cartográficos na plataforma web, foram desenvolvidos 3 (três) aplicativos. Em referência às letras iniciais dos termos aplicativos, solos, expansivos e colapsíveis, esses aplicativos foram denominados APPSEC, Figura 57. Somando-se a isso, foram acrescentadas as terminações relacionadas aos conteúdos expostos nos apps. Portanto, os referidos aplicativos receberam as seguintes denominações: APPSEC - PE, APPSEC - BR e APPSEC - BR RNA.

Figura 57 - Origem da nomenclatura adotada nos aplicativos.



Fonte: Autor (2024).

O primeiro aplicativo envolve produtos cartográficos gerados por Amorim (2004), enquanto o segundo e o terceiro estão relacionados com os documentos cartográficos elaborados nesta tese. Este último, refere-se às cartas interpretativas elaboradas com base no modelo matemático obtido por redes neurais artificiais, desenvolvido por Holanda (2022). A seguir, são detalhados os procedimentos realizados na elaboração dos aplicativos mencionados.

Cabe ressaltar que, apesar de ser possível disponibilizar dados vetoriais no *Google Meus Mapas* (*Google My Maps*), esse serviço não atende ao objetivo desta tese, tendo em vista que o tamanho dos arquivos, alguns alcançando capacidade superior a 490 MB, é significativamente acima do limite suportado nesse serviço do *Google* (5 MB para arquivos KML e KMZ descompactados e 40 MB para outros arquivos). Além disso, existem outras limitações de recursos, tais como o número de camadas, o número de linhas, o fato de não permitir a criação de elementos da interface do usuário, dentre outros.

Em virtude disso, o desenvolvimento dos aplicativos ocorreu na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), pois esse serviço disponibiliza armazenamento e número de arquivos de até 250 GB e 50.000, respectivamente. Ademais, existe uma maior disponibilidade de recursos se comparado ao serviço do *Google Meus Mapas*. Por outro lado, o GEE representa uma ferramenta mais complexa, uma vez que, além de entendimento sobre geoprocessamento e construtores do GEE, exige conhecimento de programação para elaboração dos aplicativos.

No que diz respeito às linguagens, *JavaScript* (JS) foi utilizada na programação, enquanto a *Cascading Style Sheets* (CSS) foi aplicada no design gráfico. Quanto às imagens contidas nos aplicativos, essas foram elaboradas utilizando técnicas de design gráfico no *Inkscape*. Em relação aos dados geográficos, foram utilizadas duas classes: vetorial e matricial. A primeira teve preferência na base de dados espaciais dos aplicativos, posto que os dados vetoriais são mais acurados quando comparados com os dados matriciais.

Devido ao quantitativo expressivo de registros na tabela de atributos, que impediu a importação no GEE, houve a necessidade de uso de dados matriciais nos documentos cartográficos relacionados a RNA, sendo eles: carta interpretativa e mapas fundamentais de pedologia e geologia. Portanto, a base de dados espaciais dos aplicativos é composta por 11 (onze) dados vetoriais e 3 (três) dados matriciais (*raster*), totalizando 14 arquivos referentes aos documentos cartográficos: mapas fundamentais, cartas derivadas, cartas interpretativas e locais de ocorrência.

Preliminarmente, os referidos dados espaciais receberam, no ambiente do QGIS, tratamento nas tabelas de atributos e no sistema geodésico de referência, bem como houve a conversão de dados vetoriais para matriciais. O tratamento envolveu a simplificação da tabela de atributos, em que foram selecionados os principais campos para exibição no aplicativo. Quanto ao sistema de referência, reprojeteram-se as camadas para o sistema padrão do GEE (*datum* WGS84), utilizando a ferramenta denominada reprojeter camada. Em relação à conversão, aplicou-se a ferramenta denominada converter vetor para *raster* (rasterizar).

Posteriormente, realizou-se a importação dos dados espaciais para o ambiente do GEE. Em seguida, foram elaborados os códigos de programação e de design gráfico no Editor de Códigos do GEE. O algoritmo de cada aplicativo é composto por aproximadamente 1 mil linhas de comando, totalizando em torno de 3 mil linhas de código de programação para a geração dos aplicativos desta tese. Na *interface* dos aplicativos foram adicionados *hiperlinks* para direcionar os usuários aos conteúdos pertinentes ao tema contido na plataforma.

A Figura 58 apresenta a sequência dos procedimentos metodológicos utilizados na elaboração dos aplicativos APPSEC, expondo a etapa de agregação dos documentos cartográficos, operações de geoprocessamento, aplicações de design gráfico nas imagens, importação de dados no GEE, elaboração dos códigos de programação e publicação dos aplicativos na plataforma web.

Figura 58 - Procedimentos utilizados na elaboração dos aplicativos APPSEC.



Fonte: Autor (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São expostos os resultados mediante a apresentação dos quatro pilares da tese: banco de dados, cartas de suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos, painéis de BI e aplicativos.

4.1 BANCO DE DADOS DE SOLOS ESPECIAIS (BANDASE)

O repositório de dados geotécnicos pertinentes aos solos colapsíveis e expansivos é composto por 267 e 259 registros que correspondem às 130 e 107 referências bibliográficas, respectivamente (Figura 59). Esses registros foram utilizados no procedimento de verificação da metodologia, conforme externado anteriormente.

Figura 59 - Composição do BANDASE quanto aos solos colapsíveis e expansivos, respectivamente.



Fonte: Autor (2024).

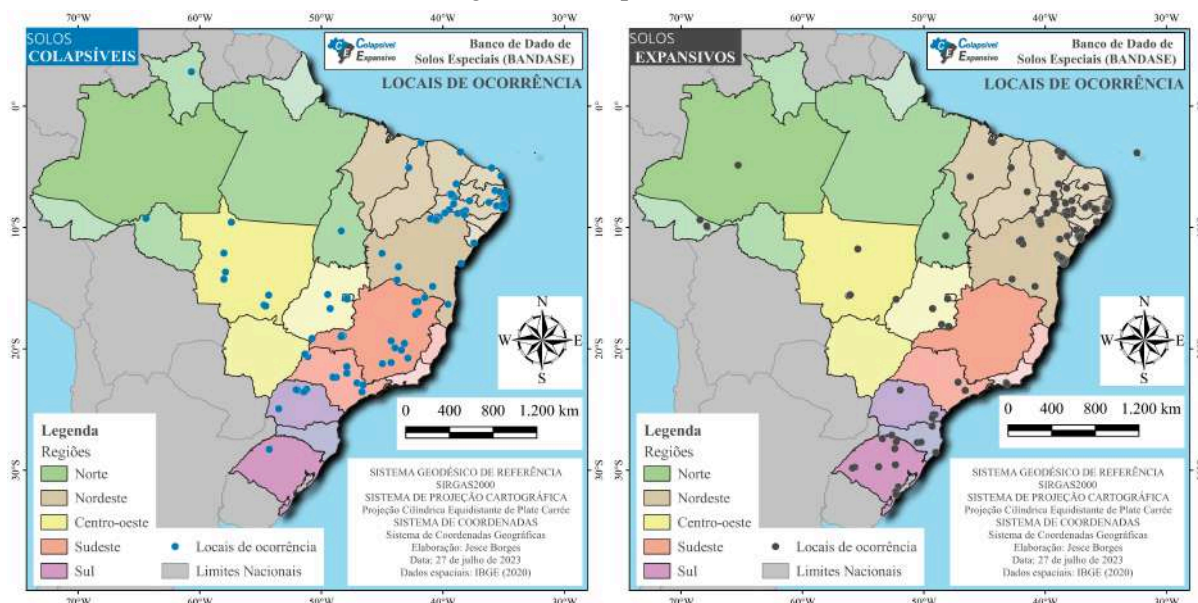
O banco de dados apresenta registros para todas as regiões do Brasil. Percebe-se que a tonalidade na cor marrom indica a predominância da região Nordeste nos números de ocorrência dos solos colapsíveis e expansivos. É possível constatar que Pernambuco é o estado com maior número de registros de ocorrência e de referências bibliográficas para os dois solos problemáticos, totalizando 80 registros de ocorrência e 34 referências bibliográficas para solos colapsíveis, bem como 77 registros de ocorrência e 33 referências bibliográficas para solos expansivos.

No que se refere aos solos expansivos, frisa-se que 3 registros, que correspondem ao território da ilha de Fernando de Noronha, não foram utilizados no referido procedimento devido à ausência dessa extensão territorial nos mapas fundamentais.

O Apêndice J apresenta a composição detalhada do BANDASE referente aos solos colapsíveis e expansivos. A espacialização dos registros de ocorrência desses solos está apresentada resumidamente na Figura 60, enquanto o detalhamento consta no Apêndice K. Somando-se a isso, o BANDASE pode ser explorado mediante o uso do painel de BI, conforme exposto em subitem posterior.

Cabe destacar a importância das ferramentas do *Google* devido às inúmeras vantagens proporcionadas na confecção do banco de dados, tais como: trabalho simultâneo, atualizações automáticas, integração das ferramentas, computação em nuvem, controle de acesso, histórico de versões, dentre outros. Tais recursos foram essenciais para o desenvolvimento do BANDASE. Além disso, vislumbra-se o aperfeiçoamento contínuo dessa base de dados ao longo dos anos, caso tenha uma boa aceitabilidade entre os usuários.

Figura 60 - Locais de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos no Brasil, respectivamente, segundo a composição do BANDASE.



Fonte: Autor (2024).

4.1.1 Formulários

A Figura 61 expõe os formulários referentes aos solos colapsíveis e expansivos (*Google* Formulários), bem como as planilhas de respostas (*Google* Planilhas), todos

armazenados no *Google Drive*. Frisa-se que o acesso pode ser realizado pelo site ou pelo QR Code exposto na referida figura.

Figura 61 - Formulários e planilhas destinadas à obtenção e ao armazenamento de dados pertinentes aos solos colapsíveis e expansivos.



Fonte: Autor (2024).

Os formulários resultantes deste trabalho proporcionam a evolução BANDASE ao longo dos anos, visto que permitem a obtenção e o armazenamento de dados fornecidos pelos usuários. Os formulários são acessíveis através de qualquer dispositivo com conexão à internet, facilitando a coleta de respostas do público interessado na temática. A presença dessa acessibilidade é fundamental para garantir a inclusão de todos os usuários.

Outra vantagem proporcionada pelos formulários eletrônicos diz respeito à análise de dados. Os resultados dos formulários (respostas) são automaticamente armazenados em planilha do *Google*, permitindo análises e visualizações avançadas. Devido à validação de dados alcançada pelo uso de expressões regulares nos formulários, tais análises podem ser potencializadas pelo uso do *Looker Studio*, facilitando a geração de painéis de BI a partir de dados consistentes. Tal conjuntura implica em tomadas de decisões mais acuradas, uma vez que erros de processamento são significativamente reduzidos em decorrência da validação de dados aplicada.

Importante também pontuar a integração existente entre as ferramentas utilizadas: *Google Sites*, *Google Formulários*, *Google Planilhas* e *Google Drive*. O primeiro incorpora o

segundo, este envia as respostas para o terceiro, enquanto o quarto realiza o armazenamento de todos mediante a tecnologia de computação em nuvem.

4.1.2 Análise Estatística

A Tabela 7 apresenta o resultado da estatística descritiva relacionado ao Cenário 1. Na análise de normalidade (teste de *Shapiro-Wilk*), com exceção da variável argila dos solos expansivos, todos os valores de p são inferiores a 0,05, indicando que os dados são não paramétricos, ou seja, não seguem uma distribuição normal.

Para os solos expansivos, a mediana da variável argila é de 43,0%, enquanto nos solos colapsíveis, esse valor é significativamente menor, registrando uma mediana de 20,0%. Em relação à fração de silte, os solos expansivos apresentam valores medianos de 26,0%, ao passo que os solos colapsíveis registram apenas 12,0% de silte. Quanto à fração de argila, também se observa uma mediana mais elevada nos solos expansivos, atingindo 45,5%, em comparação com a mediana de 18,0% nos solos colapsíveis.

A mediana da fração de areia nos solos colapsíveis é de 63,0%, enquanto nos solos expansivos é consideravelmente menor, registrando apenas 21,0%. No que diz respeito à presença de pedregulho, a mediana é de 0,6% nos solos colapsíveis e de 1,0% nos solos expansivos. Esses resultados evidenciam que os solos expansivos possuem maiores concentrações de frações finas, ao passo que os solos colapsíveis apresentam maiores concentrações de frações grossas.

Verifica-se que, de maneira geral, os solos expansivos apresentam uma maior amplitude do que os solos colapsíveis. Comparando os percentis, observa-se que os solos expansivos tendem a ter valores mais altos do que os solos colapsíveis. Ao analisar as variâncias, nota-se que, em algumas variáveis, os solos expansivos apresentam uma maior dispersão dos dados em relação aos solos colapsíveis. Esse cenário indica uma maior variabilidade nos valores dos solos expansivos.

Nas variáveis de argila, silte e fração de argila, os solos expansivos possuem uma variância maior, indicando uma maior variação dos valores quando comparados aos solos colapsíveis. No entanto, em outras variáveis, como areia e pedregulho, os solos colapsíveis apresentam uma variância ligeiramente maior, indicando uma maior dispersão dos dados nessas variáveis.

Observa-se que, no que diz respeito à análise granulométrica, os solos expansivos apresentam uma maior concentração de partículas finas e maior variação nos dados, enquanto os solos colapsíveis apresentam uma maior proporção de partículas grossas e menor variação nos dados das variáveis analisadas.

Tabela 7 - Estatística descritiva referente ao Cenário 1.

Descrição	Tipo de Solo	Argila	Silte	Areia	Pedregulho	<2µm
N	Colapsível	213	211	213	115	74
	Expansivo	192	169	176	98	82
Média	Colapsível	24,3	15,7	58,7	3,56	22,8
	Expansivo	43,2	27,3	26,6	4,20	50,7
Mediana	Colapsível	20,0	12,0	63,0	0,6	18,0
	Expansivo	43,0	26,0	21,0	1,00	45,5
Moda	Colapsível	15,0*	12,0	63,0	0,00	8,00*
	Expansivo	20,0*	0,00	16,0	0,00	34,0
Desvio padrão	Colapsível	16,3	12,8	21,9	8,49	17,2
	Expansivo	21,4	16,3	21,1	7,96	22,7
Variância	Colapsível	265	164	478	72,1	297
	Expansivo	456	267	446	63,3	516
Amplitude	Colapsível	76,7	71,9	94,0	65,0	90,2
	Expansivo	92,0	82,0	100	52,0	96,0
Mínimo	Colapsível	1,70	100	3,00	0,00	1,80
	Expansivo	2,00	0,00	0,00	0,00	4,00
Máximo	Colapsível	78,4	72,0	97,0	65,0	92,0
	Expansivo	94,0	82,0	100	52,0	100
W de Shapiro-Wilk**	Colapsível	0,903	0,863	0,958	0,462	0,873
	Expansivo	0,986	0,932	0,919	0,560	0,932
p Shapiro-Wilk***	Colapsível	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	Expansivo	0,055	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
25º percentil	Colapsível	14,0	6,00	44,0	0,00	11,3
	Expansivo	28,0	17,5	9,00	0,00	35,3
50º percentil	Colapsível	20,0	12,0	63,0	0,6	18,0
	Expansivo	43,0	26,0	21,0	1,00	45,5
75º percentil	Colapsível	30,0	20,5	75,0	3,00	28,0
	Expansivo	59,1	33,3	41,0	4,79	60,0

* Existe mais de uma moda, apenas a primeira é apresentada.

** Valor abaixo de 1 indica menor probabilidade da amostra ter uma distribuição normal.

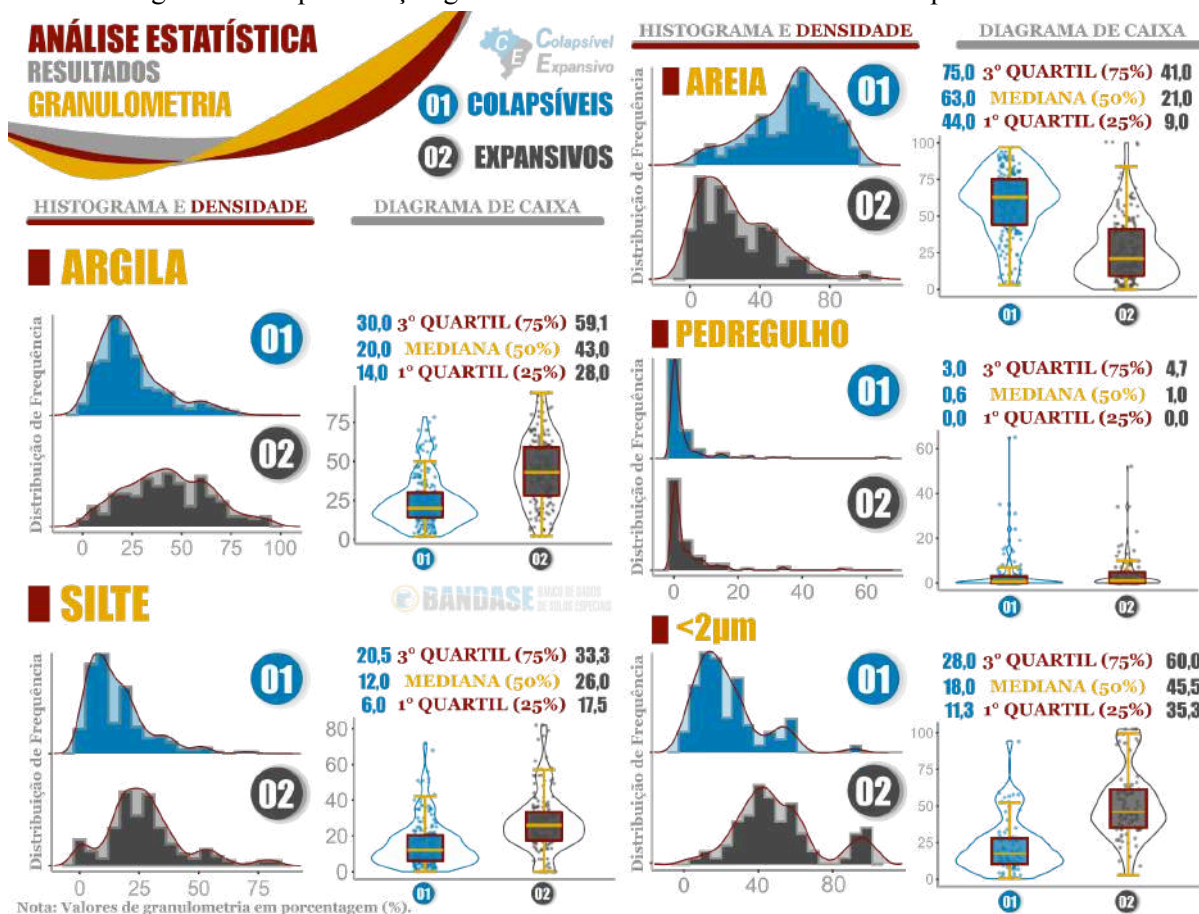
*** Valor de $p < 0,05$ indica que houve rejeição da hipótese nula, ou seja, os dados não possuem distribuição normal.

Nota: Os valores de granulometria estão em percentagem (%).

Fonte: Autor (2024).

Baseado na amplitude interquartil, que representa a concentração de 50% dos dados, os solos colapsíveis apresentam valores menores de argila, menores de silte, maiores de areia, menores de pedregulho e menores de partículas de argila em relação aos solos expansivos. Na perspectiva geral, as representações gráficas evidenciam uma maior variabilidade nas propriedades dos solos expansivos, Figura 62.

Figura 62 - Representação gráfica do resultado da análise estatística para Cenário 1.



Fonte: Autor (2024).

Ao realizar uma análise comparativa entre os quantitativos expostos e as redes neurais PE04 e PE07 de Holanda (2022), observou-se uma congruência no comportamento dos solos, uma vez que os resultados da análise estatística estão em consonância com o enquadramento dos pontos críticos estabelecidos pelas redes.

A autora constatou que a rede neural PE04 identifica comportamento colapsível para percentuais de argila inferiores a 30,78% e expansivo para percentuais superiores a esse valor. Por sua vez, a rede neural PE07 estabelece o limite em 31,31%. Na análise estatística

descritiva, os valores medianos de argila para solos colapsíveis e expansivos foram de 20,0% e 43,0%, respectivamente.

Em relação à fração de areia, as redes neurais indicam comportamento colapsível para valores acima de 48,16% (PE04) e 47,66% (PE07), enquanto valores inferiores apontam comportamento expansivo. As medianas obtidas pela análise estatística para a fração de areia foram de 63,0% para solos colapsíveis e 21,0% para solos expansivos.

A análise revela uma concordância entre os resultados da análise estatística e as classificações das Redes Neurais PE04 e PE07 de Holanda (2022), no que se refere ao comportamento dos solos estudados. As medianas obtidas corroboram com os pontos críticos estabelecidos pelas redes, demonstrando consistência na identificação dos solos com base nas frações de argila e areia.

Perante o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), as propriedades físicas dos solos colapsíveis e expansivos, representadas quantitativamente pela medida de tendência central (mediana), apontaram enquadramento na categoria de solos grossos e solos finos, respectivamente.

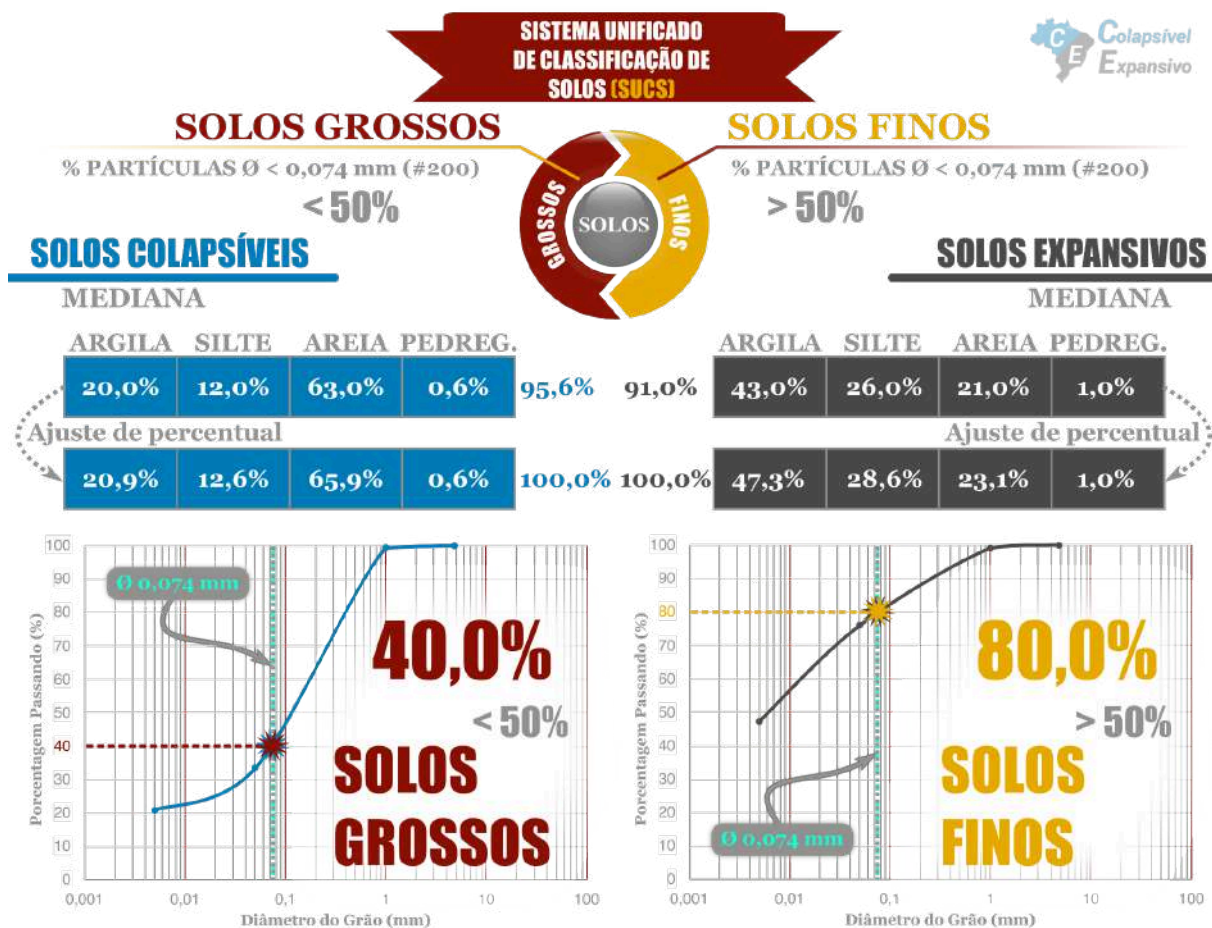
A Figura 63 apresenta a distinção entre as duas categorias, o ajuste de percentual e a representação gráfica pertinente à distribuição de tamanho de partículas do solo (curva granulométrica). Nota-se que os percentuais de partículas, que passam pela peneira #200 (0,074 mm), atingem 40,0% (< 50%, solos grossos) para os solos colapsíveis e 80,0% (> 50%, solos finos) para os solos expansivos.

Somando-se a isso, aplicou-se outro método gráfico para analisar a granulometria do solo. Trata-se da classificação triangular da *Mississippi River Commission* (Figura 64). Senço (2007) elucida que a classificação é baseada na granulometria do solo e apresentada em forma de triângulos equiláteros. Cada lado é graduado, em escala linear, de 0% a 100%, correspondendo às porcentagens das frações de solo: pedregulho mais areia, silte e argila. Um solo qualquer é representado por um ponto interno ao triângulo, localizado pelas porcentagens das frações. Basta apenas os percentuais de duas frações, pois a terceira será o complemento para atingir 100%.

Os quantitativos percentuais de areia são plotados partindo do vértice superior (0%) em direção ao inferior (100%). Em relação à argila, esses percentuais são plotados partindo do vértice inferior direito (0%) em direção ao superior (100%). Por fim, as porcentagens de silte são plotadas no vértice inferior esquerdo (0%) em direção ao direito (100%). No interior do triângulo, o encontro das projeções percentuais, que obedecem às inclinações triangulares,

resulta na classificação do solo em 9 (nove) zonas: argila, argila arenosa, argila siltosa, areia argilosa, silte argiloso, areia, areia siltosa, silte arenoso e silte.

Figura 63 - Resultado perante o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

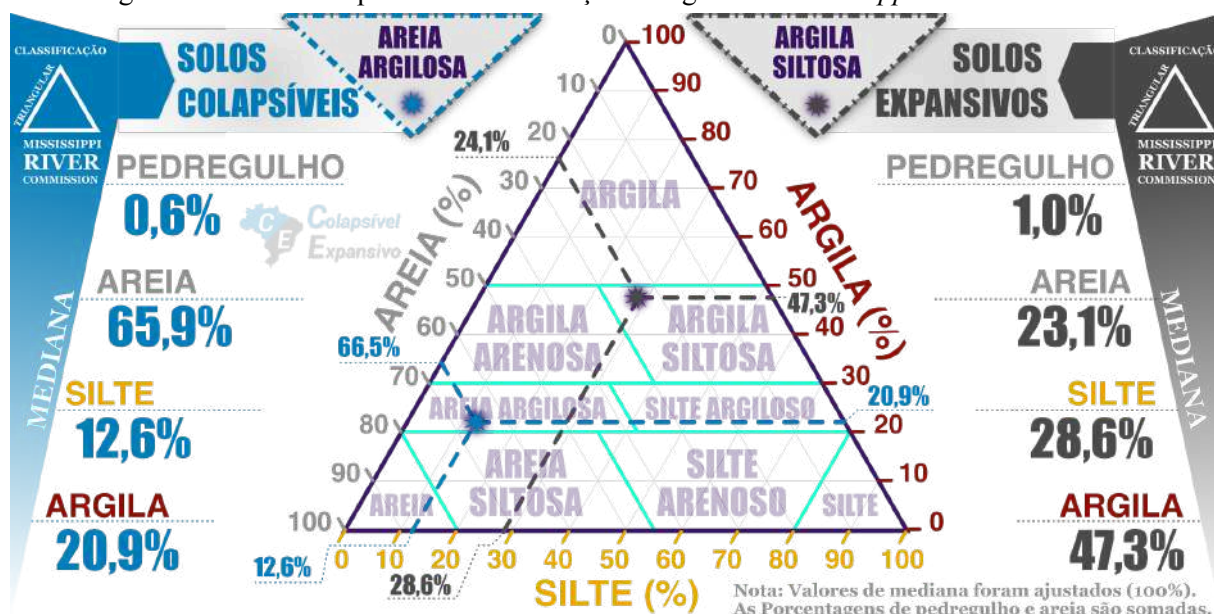


Fonte: Autor (2024).

Devido ao uso de termos diretos no tocante à identificação dos solos, a classificação triangular facilita sua utilização nos trabalhos de sondagens (SENÇO, 2007). O referido autor afirma que o técnico sondador encontra mais facilidade em associar certas características dos solos, identificáveis com próprio tato ou operações sumárias de campo, a uma nomenclatura decorrente diretamente dos termos argila, silte e areia.

Após narrativa sucinta sobre o recurso gráfico, a Figura 64 apresenta o resultado obtido na aplicação dos percentuais pertinentes aos solos colapsíveis e expansivos. As frações dos solos colapsíveis resultaram na classificação de areia argilosa, enquanto os solos expansivos foram enquadrados na classificação de argila siltosa.

Figura 64 - Resultado perante a classificação triangular da *Mississippi River Commission*.



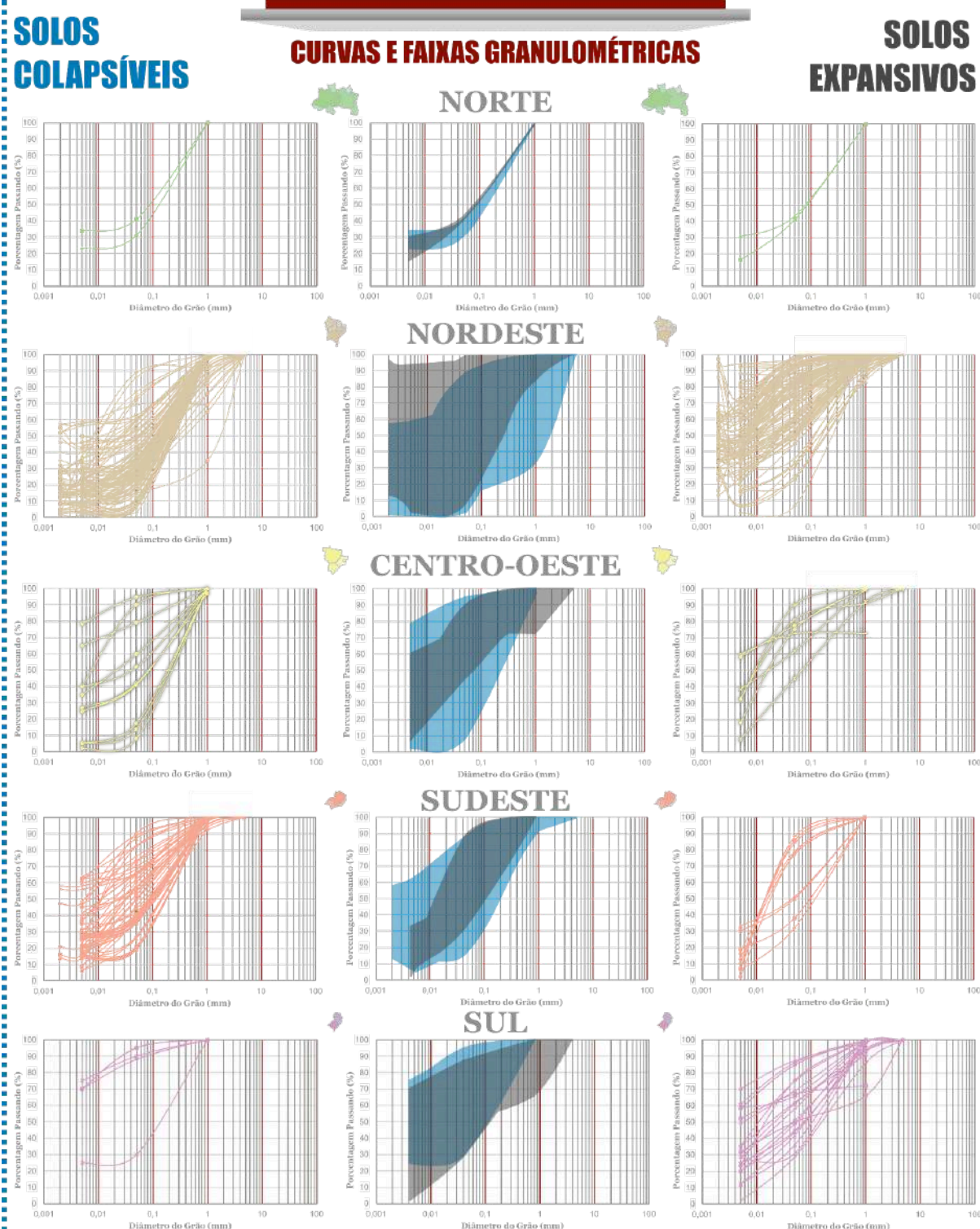
Fonte: Autor (2024).

Na Figura 65, constam as curvas granulométricas para cada região do Brasil, localizadas nos cantos extremos da ilustração em referência aos solos colapsíveis e expansivos, esses identificados pela tonalidade padrão adotada neste trabalho. Na parte central da referida figura, consta o confronto entre as faixas granulométricas dos dois solos. Percebe-se a textura grossa em ambos os solos na região Norte. Observa-se uma perceptível distinção entre textura na região Nordeste, posto que nos solos colapsíveis ocorre o predomínio da textura grossa, enquanto nos solos expansivos prevalece a textura fina.

Em relação ao Centro-Oeste, constata-se textura variando de granular a fina em ambos os solos, tal variação é maior nos solos colapsíveis. No Sudeste, os solos colapsíveis apresentam textura fina e grossa, havendo predomínio da textura granular, conforme pode ser constatado pela maior concentração de curvas. Observa-se textura grossa nos solos expansivos para a região citada. Por fim, verifica-se, na região Sul, textura variando de granular a fina em ambos os solos.

Do ponto de vista sistêmico, é possível inferir que, apesar da existência de textura grossa e fina em ambos os solos, suas características diferenciais envolvem o predomínio dessas texturas, ou seja, fina nos solos expansivos e grossa nos solos colapsíveis. Essa conclusão pode ser corroborada com o resultado da classificação triangular da *Mississippi River Commission*, Figura 64.

Figura 65 - Curvas e faixas granulométricas.



Fonte: Autor (2024).

Reitera-se que existem vários fatores que influenciam no comportamento colapsível e expansivo, tais como: grau de saturação, trajetória de tensões, tipo de permeante, estrutura, velocidade de inundação, dentre outros (FERREIRA, S. R. M., 1995, 2008). Diante dessa conjuntura de complexidade no que tange ao comportamento desses solos, justifica-se a

existência de características texturais finas em alguns solos colapsíveis e granulares em alguns expansivos, posto que o comportamento, seja colapsível ou expansivo, depende de uma série de fatores condicionantes para o desencadeamento dos fenômenos mencionados.

No que concerne aos limites de consistência (Cenário 2), o resultado da estatística descritiva está apresentado na Tabela 8. No tocante à análise de normalidade (teste de *Shapiro-Wilk*), os resultados indicam que, com exceção da variável do limite de contração, todos os valores de p foram inferiores a 0,05, o que sugere que os dados não seguem uma distribuição normal, sendo considerados não paramétricos.

Ao observar os valores medianos para as variáveis de limites de consistência, nota-se que os solos expansivos apresentam medianas mais altas em comparação aos solos colapsíveis. Especificamente, a mediana do limite de liquidez é de 55,0% para os solos expansivos, enquanto para os solos colapsíveis é de 27,0%. Quanto ao limite de plasticidade, a mediana é de 27,0% para os solos expansivos e 17,0% para os solos colapsíveis. Já para o limite de contração, os solos colapsíveis têm uma mediana de 29,3%, enquanto os solos expansivos têm 15,6%. Por fim, a mediana do índice de plasticidade é de 25,5% para os solos expansivos e 10,0% para os solos colapsíveis.

Ao analisar os resultados da estatística descritiva, pode-se constatar que os solos expansivos, de maneira geral, apresentam uma maior amplitude em comparação aos solos colapsíveis. Ao realizar a comparação dos percentis, exceto para a variável do limite de contração, é possível notar que os solos expansivos apresentam valores mais elevados do que os solos colapsíveis. Adicionalmente, ao observar os valores de variância, percebe-se que os solos expansivos exibem uma maior dispersão dos dados em relação aos solos colapsíveis. Essas medidas estatísticas revelam que os valores nos solos expansivos estão mais dispersos, abrangendo uma faixa mais ampla de variação.

Em síntese, os resultados da análise revelam que os solos expansivos possuem valores mais elevados nas variáveis de limites de consistência quando comparados aos solos colapsíveis, evidenciando a maior plasticidade desses solos. Adicionalmente, é possível observar que os solos expansivos apresentam maior variabilidade nas características dos limites de consistência. Portanto, os dados estatísticos fornecem uma valiosa compreensão das propriedades geotécnicas desses tipos de solo, o que se traduz em um conhecimento essencial para as etapas dos projetos de engenharia.

Tabela 8 - Estatística descritiva referente ao Cenário 2.

Descrição	Tipo de Solo	LL	LP	LC	IP
N	Colapsível	192	161	7	192
	Expansivo	193	164	15	192
Média	Colapsível	31,3	20,8	28,0	10,8
	Expansivo	57,3	29,2	14,4	27,5
Mediana	Colapsível	27,0	17,0	29,3	10,0
	Expansivo	55,0	27,0	15,6	25,5
Moda	Colapsível	20,0	14,0	20,6*	8,00*
	Expansivo	52,0	27,0	19,0	30,0
Desvio padrão	Colapsível	13,4	10,0	3,95	6,56
	Expansivo	18,2	10,6	4,45	13,9
Variância	Colapsível	181	100	15,6	43,0
	Expansivo	331	113	19,8	194
Amplitude	Colapsível	64,2	43,0	11,4	34,4
	Expansivo	104,0	63,3	14,0	72,0
Mínimo	Colapsível	11,0	5,00	20,6	0,00
	Expansivo	20,0	6,00	5,00	5,00
Máximo	Colapsível	75,2	48,0	32,0	34,4
	Expansivo	124	69,3	19,0	77,0
W de Shapiro-Wilk**	Colapsível	0,923	0,880	0,904	0,944
	Expansivo	0,985	0,943	0,883	0,952
p Shapiro-Wilk***	Colapsível	< 0,001	< 0,001	0,354	< 0,001
	Expansivo	0,038	< 0,001	0,052	< 0,001
25º percentil	Colapsível	20,0	13,6	26,5	7,00
	Expansivo	45,0	22,1	12,6	17,0
50º percentil	Colapsível	27,0	17,0	29,3	10,0
	Expansivo	55,0	27,0	15,6	25,5
75º percentil	Colapsível	41,6	27,5	30,5	14,1
	Expansivo	70,0	33,2	17,6	34,0

* Existe mais de uma moda, apenas a primeira é apresentada.

** Valor abaixo de 1 indica menor probabilidade da amostra ter uma distribuição normal.

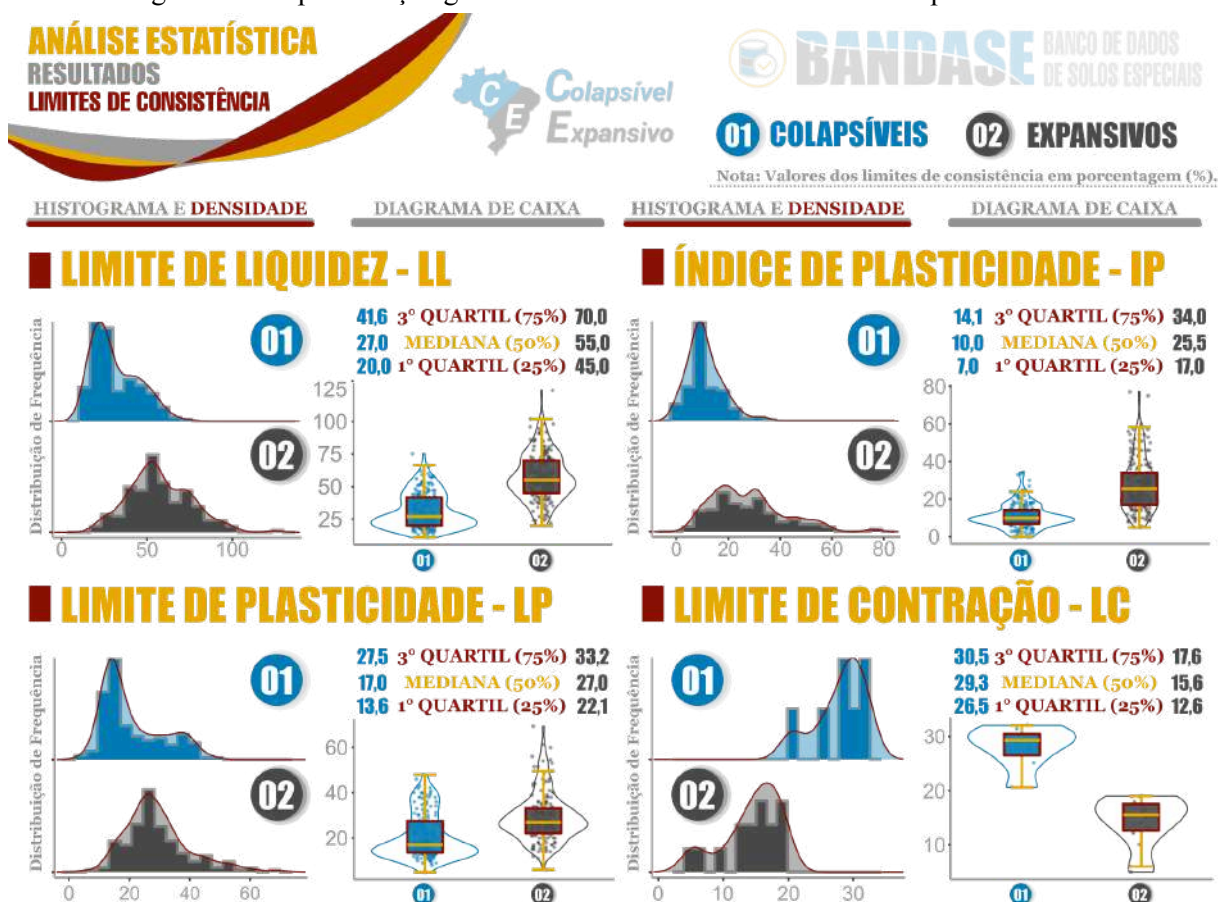
*** Valor de $p < 0,05$ indica que houve rejeição da hipótese nula, ou seja, os dados não possuem distribuição normal.

Nota: Os valores dos limites de consistência estão em porcentagem (%).

Fonte: Autor (2024).

A partir de ilustrações gráficas, extrai-se a informação de que os solos expansivos apresentam valores de limites de consistência superiores aos solos colapsíveis, exceto no que diz respeito ao limite de contração, Figura 66. Reiteradamente, nota-se maior variabilidade nos dados dos solos expansivos. Tal característica pode ser constatada na amplitude das caixas, no formato do violino e na distribuição dos dados contida no histograma.

Figura 66 - Representação gráfica do resultado da análise estatística para Cenário 2.



Fonte: Autor (2024).

Diante dos resultados de granulometria e consistência, finalizou-se a classificação dos solos para o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Devido aos quantitativos resultantes, a carta de plasticidade foi a ferramenta de análise utilizada para classificação de ambos os solos. A Figura 67 apresenta esquematicamente o resultado da classificação efetuada como base nos quantitativos de medida de tendência central (mediana), expondo nos lados extremos as características dos dois solos e no centro a carta de plasticidade com a marcação e a classificação resultante para cada solo.

Baseado na referida figura, verifica-se que os solos colapsíveis foram classificados como areia argilosa (SC). Em relação aos solos expansivos, houve dupla classificação, visto que a marcação no recurso gráfico ocorreu próximo à Linha A. Em virtude disso, tais solos foram classificados como argila siltosa de alta compressibilidade (CH - MH). Perante tal conclusão, ratifica-se o resultado da classificação triangular da *Mississippi River Commission*.

Figura 67 - Resultado da classificação dos solos colapsíveis e expansivos perante o SUCS, segundo valores de mediana oriundos do BANDASE.



Fonte: Autor (2024).

Na análise comparativa entre as redes neurais PE04 e PE07 de Holanda (2022) e os resultados da estatística descritiva, verificou-se congruência no comportamento dos solos em relação ao índice de plasticidade. A rede neural PE04 identifica que o solo possui comportamento colapsível para valores de índice de plasticidade inferiores a 18,47% e comportamento expansivo para valores superiores a esse limite. Já a rede neural PE07 estabelece o limite em 17,25%. Na análise estatística descritiva, os valores medianos de índice de plasticidade para solos colapsíveis e expansivos foram de 10,0% e 25,0%, respectivamente.

A Tabela 9 expõe o resultado da estatística descritiva pertinente ao Cenário 3. O teste de *Shapiro-Wilk* apontou que, nos solos colapsíveis, todos os valores de p foram inferiores a 0,05, indicando que as distribuições não seguem uma distribuição normal. Já nos solos expansivos, apenas as variáveis umidade ótima e umidade natural apresentaram valores de p superiores a 0,05, apontando que essas duas variáveis apresentam parâmetros de uma distribuição normal.

Observou-se que, com exceção da variável peso específico máximo, os solos expansivos apresentaram valores de mediana mais elevados em relação aos solos colapsíveis. A mediana da atividade da argila foi de 0,66 para os solos expansivos, enquanto para os solos colapsíveis foi de 0,43. Quanto ao peso específico máximo, a mediana foi de 16,1 kN/m³ para os solos expansivos e 19,1 kN/m³ para os solos colapsíveis. As medianas da umidade ótima foram de 21,7% para os solos expansivos e 11,1% para os solos colapsíveis. Em relação à umidade natural, a mediana foi de 19,7% para os solos expansivos e 10,0% para os solos

colapsíveis. Por fim, a mediana do peso específico seco foi de 21,1 kN/m³ para os solos expansivos e 15,1 kN/m³ para os solos colapsíveis.

Tabela 9 - Estatística descritiva referente ao Cenário 3.

Descrição	Tipo de Solo	Atividade da Argila	Peso Específico Máximo	Umidade Ótima	Umidade Natural	Peso Específico Seco
N	Colapsível	77	78	79	157	155
	Expansivo	122	80	95	51	88
Média	Colapsível	0,510	18,9	12,5	12,7	16,6
	Expansivo	0,706	17,2	21,6	20,8	23,0
Mediana	Colapsível	0,430	19,1	11,1	10,0	15,1
	Expansivo	0,660	16,1	21,7	19,7	21,1
Moda	Colapsível	0,440	18,5	7,30	10,0	15,0
	Expansivo	0,630	16,7	16,0	29,5*	17,2*
Desvio padrão	Colapsível	0,330	1,42	5,34	10,7	5,10
	Expansivo	0,283	3,76	7,51	11,0	8,46
Variância	Colapsível	0,109	2,01	28,5	115,0	26,1
	Expansivo	0,079	14,1	56,3	121,0	71,6
Amplitude	Colapsível	1,770	7,30	27,2	45,8	28,1
	Expansivo	1,570	14,6	35,7	49,7	49,6
Mínimo	Colapsível	0,030	13,7	7,20	0,20	1,61
	Expansivo	0,240	12,5	6,30	4,10	12,4
Máximo	Colapsível	1,800	21,0	34,4	46,0	29,7
	Expansivo	1,810	27,1	42,0	53,8	62,0
W de Shapiro-Wilk**	Colapsível	0,851	0,936	0,780	0,882	0,819
	Expansivo	0,930	0,821	0,984	0,962	0,833
p Shapiro-Wilk***	Colapsível	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	Expansivo	< 0,001	< 0,001	0,281	0,104	< 0,001
25º percentil	Colapsível	0,310	18,3	9,05	4,20	13,9
	Expansivo	0,550	14,6	16,3	12,3	17,2
50º percentil	Colapsível	0,430	19,1	11,1	10,0	15,1
	Expansivo	0,660	16,1	21,7	19,7	21,1
75º percentil	Colapsível	0,610	20,0	14,2	17,6	17,3
	Expansivo	0,818	18,4	27,1	28,0	27,4

* Existe mais de uma moda, apenas a primeira é apresentada.

** Valor abaixo de 1 indica menor probabilidade da amostra ter uma distribuição normal.

*** Valor de p < 0,05 indica que houve rejeição da hipótese nula, ou seja, os dados não possuem distribuição normal.

Nota: Atividade da Argila (adimensional), Peso Específico Máximo (kN/m³), Umidade Ótima (%), Umidade Natural (%) e Peso Específico Máximo (kN/m³).

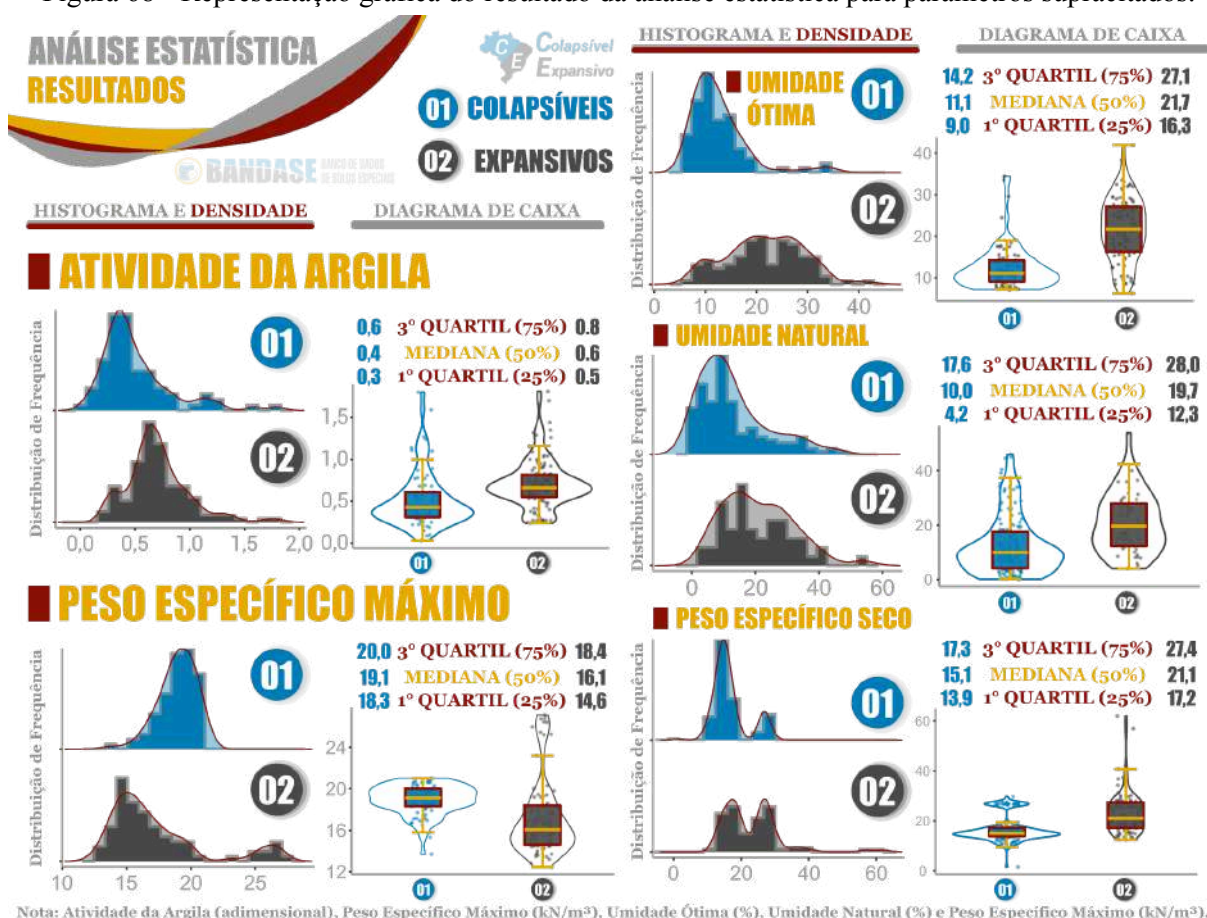
Fonte: Autor (2024).

A análise de amplitude também destacou que o solo expansivo apresenta uma variação maior nas variáveis analisadas. Quanto aos percentis, os solos expansivos apresentaram valores mais elevados em comparação com os solos colapsíveis. A variância também foi mais elevada nos solos expansivos. Tais medidas revelam que os solos expansivos apresentam uma dispersão dos dados mais significativa em relação aos solos colapsíveis.

Em resumo, a análise comparativa entre solos colapsíveis e expansivos por meio da estatística descritiva revelou diferenças entre os dois tipos de solo. Os solos expansivos demonstraram ter valores medianos mais elevados (exceto no peso específico máximo), maior amplitude e variância (exceto na atividade da argila). Novamente, os solos expansivos apresentaram maior variabilidade nas variáveis analisadas.

Adotando a amplitude interquartil como referência, percebe-se que os solos colapsíveis apresentam valores menores de atividade de argila, maiores de peso específico máximo, menores de umidade ótima, menores de umidade natural e menores de peso específico seco em relação aos solos expansivos (Figura 68).

Figura 68 - Representação gráfica do resultado da análise estatística para parâmetros supracitados.



Fonte: Autor (2024).

Na comparação entre as redes neurais PE04 e PE07 de Holanda (2022) e os resultados da estatística descritiva, observou-se uma concordância no comportamento dos solos em relação ao índice de atividade. A rede neural PE04 identifica que o solo possui comportamento colapsível para valores de índice de atividade inferiores a 0,60 e comportamento expansivo para valores superiores a esse limite. Por sua vez, a rede neural PE07 estabelece o limite em 0,66. A análise estatística descritiva revelou valores medianos de índice de atividade de 0,43 para solos colapsíveis e 0,66 para solos expansivos.

Por fim, a Tabela 10 apresenta o resultado da análise descritiva referente ao Cenário 4. Ao realizar o teste de *p Shapiro-Wilk*, constatou-se que os dados dos solos colapsíveis apresentaram valores inferiores a 0,05, indicando que não seguem uma distribuição paramétrica. Por outro lado, os dados dos solos expansivos, com exceção do grau de saturação, obtiveram valores superiores a 0,05, indicando que seguem os parâmetros de normalidade.

Em relação à mediana, nota-se que ambos os solos apresentam valores próximos, exceto no caso do grau de saturação. Essa discrepância evidencia uma relação oposta entre esses solos no que se refere ao grau de saturação. De modo geral, é possível afirmar que solos colapsíveis são mais resistentes em baixos níveis de saturação, mantendo sua estrutura devido à elevada tensão intergranular, mas tornam-se instáveis em situações de inundação. Solos expansivos são estáveis em altos níveis de saturação, com coesão aumentada e capacidade de expansão reduzida, podendo já ter passado pelo processo de expansão. Contudo, é importante ressaltar que a estabilidade desses solos depende de uma série de fatores além do grau de saturação.

Os solos colapsíveis apresentam maiores valores de amplitude nas variáveis, com exceção da densidade real dos grãos. Em relação aos percentis, observa-se que, na maioria das variáveis, os solos colapsíveis têm valores menores em relação aos solos expansivos nos percentis 25º e 50º, exceto no índice de vazios. Por outro lado, no percentil 75º, os solos colapsíveis apresentam valores maiores do que os solos expansivos no índice de vazios e porosidade.

No tocante à variância, verificou-se maior variabilidade nos dados dos solos colapsíveis para o índice de vazio e porosidade, enquanto nos solos expansivos ocorre maior variabilidade nos dados para o grau de saturação e densidade real dos grãos. Em suma, a análise estatística dos solos colapsíveis e expansivos permitiu identificar diferenças em relação à distribuição dos dados, mediana e variabilidade.

Tabela 10 - Estatística descritiva referente ao Cenário 4.

Descrição	Tipo de Solo	Índice de Vazios	Porosidade	Grau de Saturação	Densidade Real dos Grãos
N	Colapsível	153	63	142	83
	Expansivo	38	9	27	50
Média	Colapsível	0,982	51,0	33,6	2,67
	Expansivo	0,817	50,4	70,0	2,68
Mediana	Colapsível	0,855	48,0	32,0	2,65
	Expansivo	0,785	49,3	76,0	2,68
Moda	Colapsível	1,00	46,0*	46,0	2,64
	Expansivo	0,500*	49,2*	99,2	2,71
Desvio padrão	Colapsível	0,382	8,58	20,5	0,048
	Expansivo	0,266	4,55	22,0	0,816
Variância	Colapsível	0,146	73,7	420,0	0,002
	Expansivo	0,070	20,7	486,0	0,006
Amplitude	Colapsível	1,72	37,0	90,0	0,305
	Expansivo	1,08	16,2	79,7	0,361
Mínimo	Colapsível	0,430	30,0	1,41	2,60
	Expansivo	0,420	43,8	19,5	2,55
Máximo	Colapsível	2,15	67,0	91,4	2,90
	Expansivo	1,50	60,0	99,2	2,91
W de Shapiro-Wilk**	Colapsível	0,888	0,941	0,963	0,777
	Expansivo	0,951	0,903	0,880	0,956
p Shapiro-Wilk***	Colapsível	< ,001	0,005	< ,001	< ,001
	Expansivo	0,095	0,267	0,005	0,058
25º percentil	Colapsível	0,719	45,3	15,1	2,64
	Expansivo	0,600	49,2	63,1	2,63
50º percentil	Colapsível	0,855	48,0	32,0	2,65
	Expansivo	0,785	49,3	76,0	2,68
75º percentil	Colapsível	1,17	58,5	46,0	2,68
	Expansivo	0,972	52,9	84,6	2,72

* Existe mais de uma moda, apenas a primeira é apresentada.

** Valor abaixo de 1 indica menor probabilidade da amostra ter uma distribuição normal.

*** Valor de $p < 0,05$ indica que houve rejeição da hipótese nula, ou seja, os dados não possuem distribuição normal.

Nota: Índice de Vazios (adimensional), Porosidade (%), Grau de Saturação (%) e Densidade Real dos Grãos (adimensional).

Fonte: Autor (2024).

A amplitude interquartil mostra que os solos colapsíveis apresentaram maior variabilidade em relação aos solos expansivos, exceto na densidade real dos grãos. Quanto à porosidade, o baixo número de registros, constatado nos solos expansivos, prejudica a análise. Em termos quantitativos, cabe destacar a divergência no grau de saturação, Figura 69.

Figura 69 - Representação gráfica do resultado da análise estatística para parâmetros supracitados.



Fonte: Autor (2024).

Ao aplicar o teste não paramétrico de *Mann-Whitney*, o resultado apontou haver evidência suficiente para concluir que existe diferença estatisticamente significativa entre as medianas referentes às propriedades dos solos colapsíveis e expansivos, exceto no caso das variáveis porosidade e densidade real dos grãos. Infere-se que essas exceções podem ter ocorrido devido ao tamanho da amostra, posto que tem influência no teste estatístico.

No teste de *Mann-Whitney*, a hipótese nula é que não existe diferença estatisticamente significativa entre as medianas de duas amostras. A Tabela 11 apresenta o resultado da aplicação do referido teste, gerado a partir do *Jamovi*.

A interpretação da análise comparativa pode ser realizada com base nos valores de p. Quantitativos inferiores a 0,05 indicam rejeição a hipótese nula, ou seja, significa que as propriedades dos solos são estatisticamente diferentes. Nota-se que, dentre as 18 (dezoito) variáveis analisadas, a diferença estatisticamente significativa ocorre em 16 (dezesesseis) variáveis.

Tabela 11 - Resultado do teste de *Mann-Whitney* referente à análise comparativa dos solos.

Variáveis	Teste	U de Mann-Whitney*	Valor p**
Argila	Mann-Whitney	9688	< 0,001
Silte	Mann-Whitney	9317	< 0,001
Areia	Mann-Whitney	5679	< 0,001
Pedregulho	Mann-Whitney	4732	0,038
Fração de Argila (<2µm)	Mann-Whitney	886	< 0,001
Limite de Liquidez	Mann-Whitney	4645	< 0,001
Limite de Plasticidade	Mann-Whitney	6932	< 0,001
Limite de Contração	Mann-Whitney	0	< 0,001
Índice de Plasticidade	Mann-Whitney	4577	< 0,001
Atividade da Argila	Mann-Whitney	2554	< 0,001
Peso Específico Máximo	Mann-Whitney	1441	< 0,001
Umidade Ótima	Mann-Whitney	1203	< 0,001
Umidade Natural	Mann-Whitney	2194	< 0,001
Peso Específico Seco	Mann-Whitney	3120	< 0,001
Índice de Vazios	Mann-Whitney	2211	0,022
Porosidade	Mann-Whitney	263	0,727
Grau de Saturação	Mann-Whitney	501	< 0,001
Densidade Real dos Grãos	Mann-Whitney	1876	0,354

* Se o valor U observado for maior do que o valor crítico da tabela de Mann-Whitney, rejeita-se a hipótese nula.

** Valor de $p < 0,05$ indica que houve rejeição da hipótese nula, ou seja, os solos são estatisticamente diferentes.

Fonte: Autor (2024).

Utilizando as variáveis de granulometria e consistência, realizou-se o teste de correlação de *Spearman* para os solos colapsíveis e expansivos. As representações tabulares dos resultados estão materializadas na Tabela 12 e Tabela 13, bem como as representações gráficas estão concretizadas na Figura 70 e Figura 71, respectivamente.

Nos solos colapsíveis, as variáveis areia e limite de liquidez apresentaram relação estatisticamente significativa ($p < 0,001$) com forte correlação inversa (-0,728). Esse coeficiente de correlação passa para moderada no relacionamento da areia com o limite de plasticidade e o índice de plasticidade.

Nas variáveis de silte e limite de contração, foi constatada uma forte correlação positiva de 0,857. Além disso, observou-se uma relação estatisticamente significativa com moderada correlação direta entre a variável de argila e as variáveis de limite de liquidez e índice de plasticidade. Essa mesma conjuntura também foi verificada com a fração de argila (<2µm).

Tabela 12 - Resultado do teste de correlação de *Spearman* para os solos colapsíveis.

Variáveis	Spearman	Argila	Silte	Areia	Pedreg.	<2um	LL	LP	LC	IP
Argila	Rho*	—								
	p-valor**	—								
Silte	Rho	0,172	—							
	p-valor	0,012	—							
Areia	Rho	-0,750	-0,636	—						
	p-valor	< 0,001	< 0,001	—						
Pedregulho	Rho	-0,020	-0,076	-0,169	—					
	p-valor	0,833	0,423	0,071	—					
<2um	Rho	0,830	0,120	-0,598	-0,297	—				
	p-valor	< 0,001	0,314	< 0,001	0,067	—				
LL	Rho	0,607	0,320	-0,728	-0,007	0,526	—			
	p-valor	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,947	< 0,001	—			
LP	Rho	0,389	0,385	-0,589	0,118	0,216	0,853	—		
	p-valor	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,274	0,141	< 0,001	—		
LC	Rho	0,143	0,857	-0,429	-	-	0,571	0,857	—	
	p-valor	0,783	0,024	0,354	-	-	0,200	0,024	—	
IP	Rho	0,604	0,237	-0,634	-0,016	0,668	0,769	0,399	-0,214	—
	p-valor	< 0,001	0,001	< 0,001	0,874	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,662	—

* Rho representa o coeficiente de correlação de *Spearman* que mede a força e a direção da relação linear entre duas variáveis.

** Valor de $p < 0,05$ no teste de correlação de *Spearman* significa que existe uma relação estatisticamente significativa entre as duas variáveis.

Fonte: Autor (2024).

Em relação aos solos expansivos, também foi observada uma relação estatisticamente significativa com moderada correlação direta envolvendo as variáveis argila e fração de argila com as variáveis limite de liquidez e índice de plasticidade. Quanto à variável areia, no relacionamento com os índices de consistência, constatou-se conjuntura similar aos solos colapsíveis, observando relação estatisticamente significativa com moderada correlação inversa.

Tabela 13 - Resultado do teste de correlação de *Spearman* para os solos expansivos. (continua)

Variáveis	Spearman	Argila	Silte	Areia	Pedreg.	<2um	LL	LP	LC	IP
Argila	Rho	—								
	p-valor	—								
Silte	Rho	-0,288	—							
	p-valor	< 0,001	—							
Areia	Rho	-0,682	-0,354	—						
	p-valor	< 0,001	< 0,001	—						
Pedregulho	Rho	-0,461	0,056	0,414	—					
	p-valor	< 0,001	0,602	< 0,001	—					

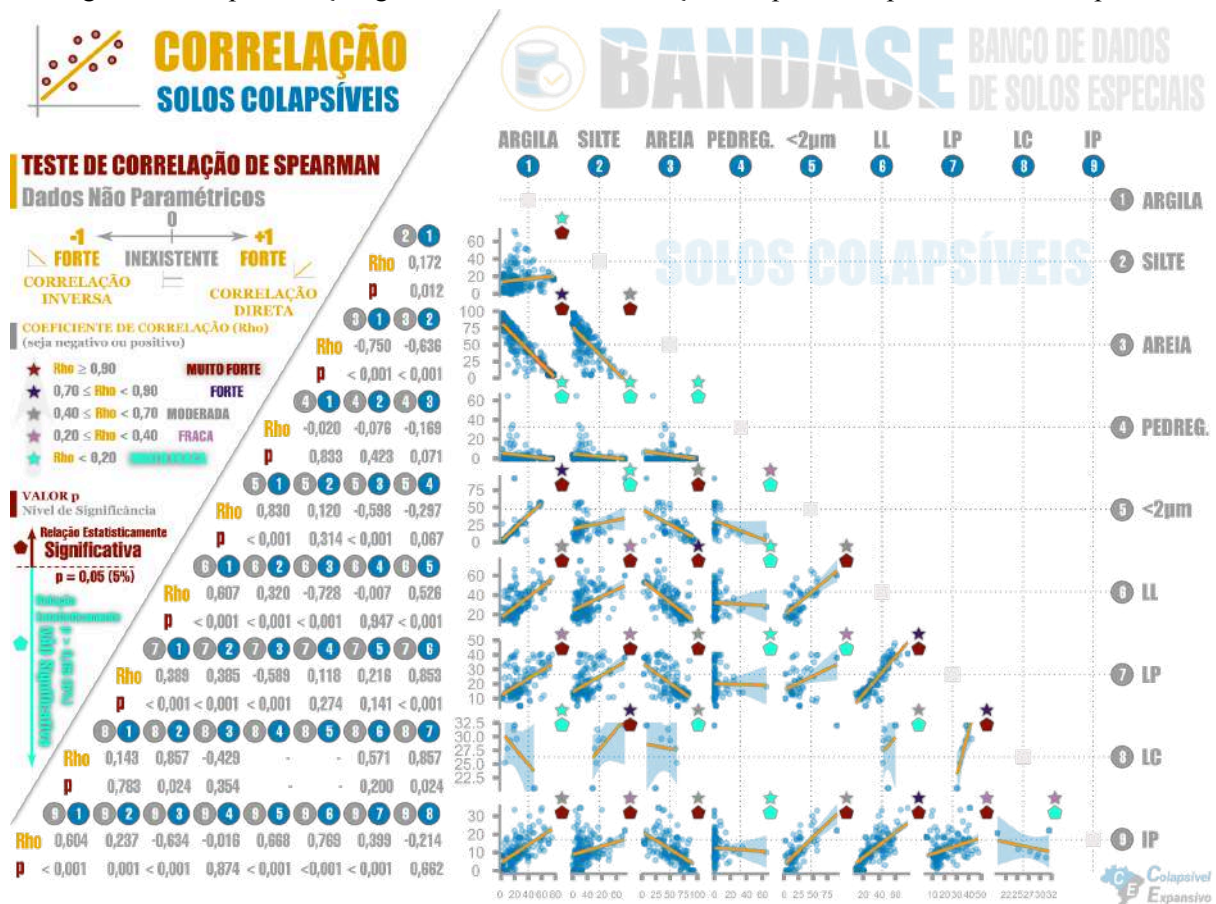
Tabela 13 - Resultado do teste de correlação de Spearman para os solos expansivos. (conclusão)

Variáveis	Spearman	Argila	Silte	Areia	Pedreg.	<2um	LL	LP	LC	IP
<2um	Rho	0,710	0,062	-0,723	-0,607	—				
	p-valor	< 0,001	0,614	< 0,001	< 0,001	—				
LL	Rho	0,671	-0,064	-0,553	-0,241	0,509	—			
	p-valor	< 0,001	0,428	< 0,001	0,022	< 0,001	—			
LP	Rho	0,467	-0,101	-0,408	-0,128	0,513	0,689	—		
	p-valor	< 0,001	0,230	< 0,001	0,240	< 0,001	< 0,001	—		
LC	Rho	0,298	-0,169	-0,138	-0,233	-0,200	0,289	0,609	—	
	p-valor	0,281	0,548	0,623	0,552	0,917	0,296	0,016	—	
IP	Rho	0,554	0,086	-0,449	-0,177	0,463	0,792	0,175	0,007	—
	p-valor	< 0,001	0,291	< 0,001	0,094	< 0,001	< 0,001	0,025	0,980	—

* Rho representa o coeficiente de correlação de *Spearman* que mede a força e a direção da relação linear entre duas variáveis.

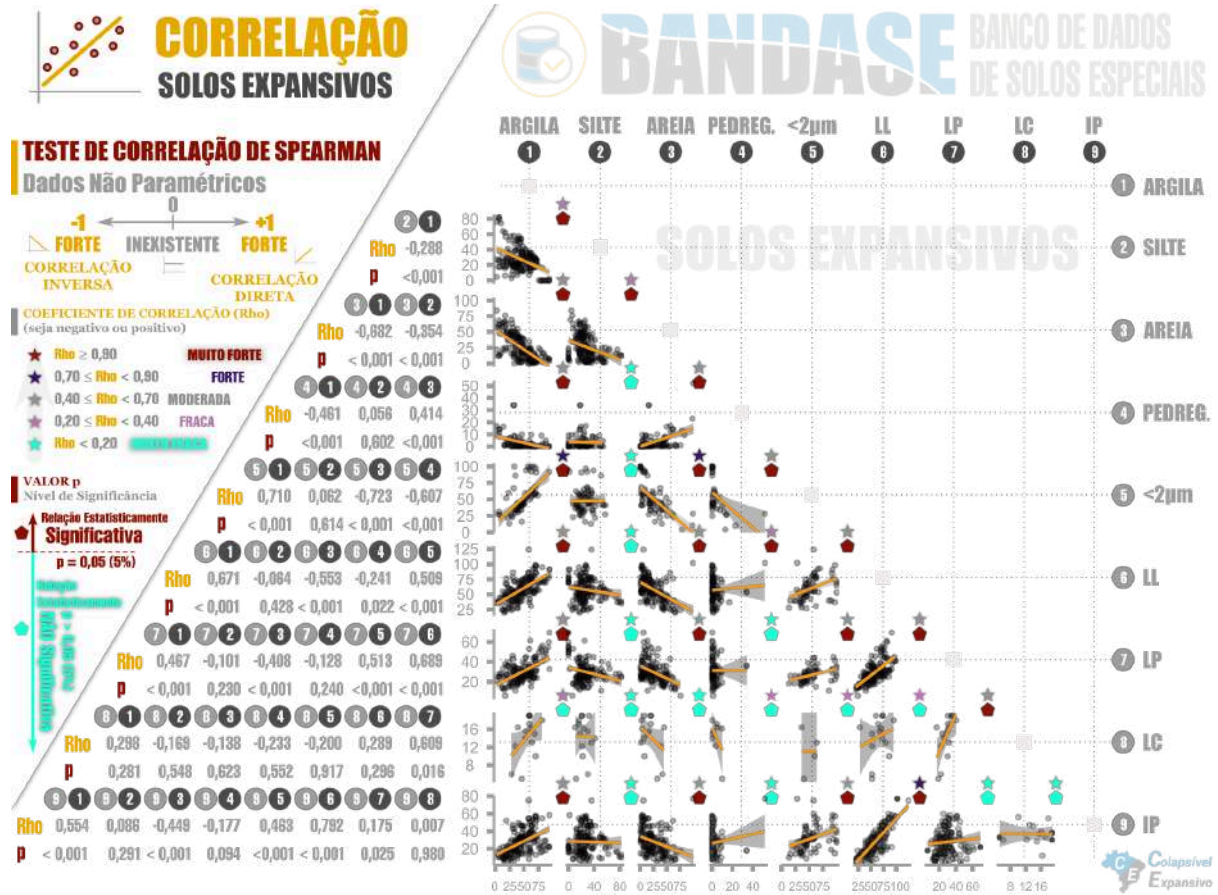
** Valor de $p < 0,05$ no teste de correlação de *Spearman* significa que existe uma relação estatisticamente significativa entre as duas variáveis.

Fonte: Autor (2024).

Figura 70 - Representação gráfica do teste de correlação de *Spearman* para os solos colapsíveis.

A Tabela 14 exhibe os resultados da análise estatística, ao passo que a Figura 72 busca auxiliar na interpretação das medidas apresentadas nesse mesmo resultado estatístico.

Figura 71 - Representação gráfica do teste de correlação de Spearman para os solos expansivos.



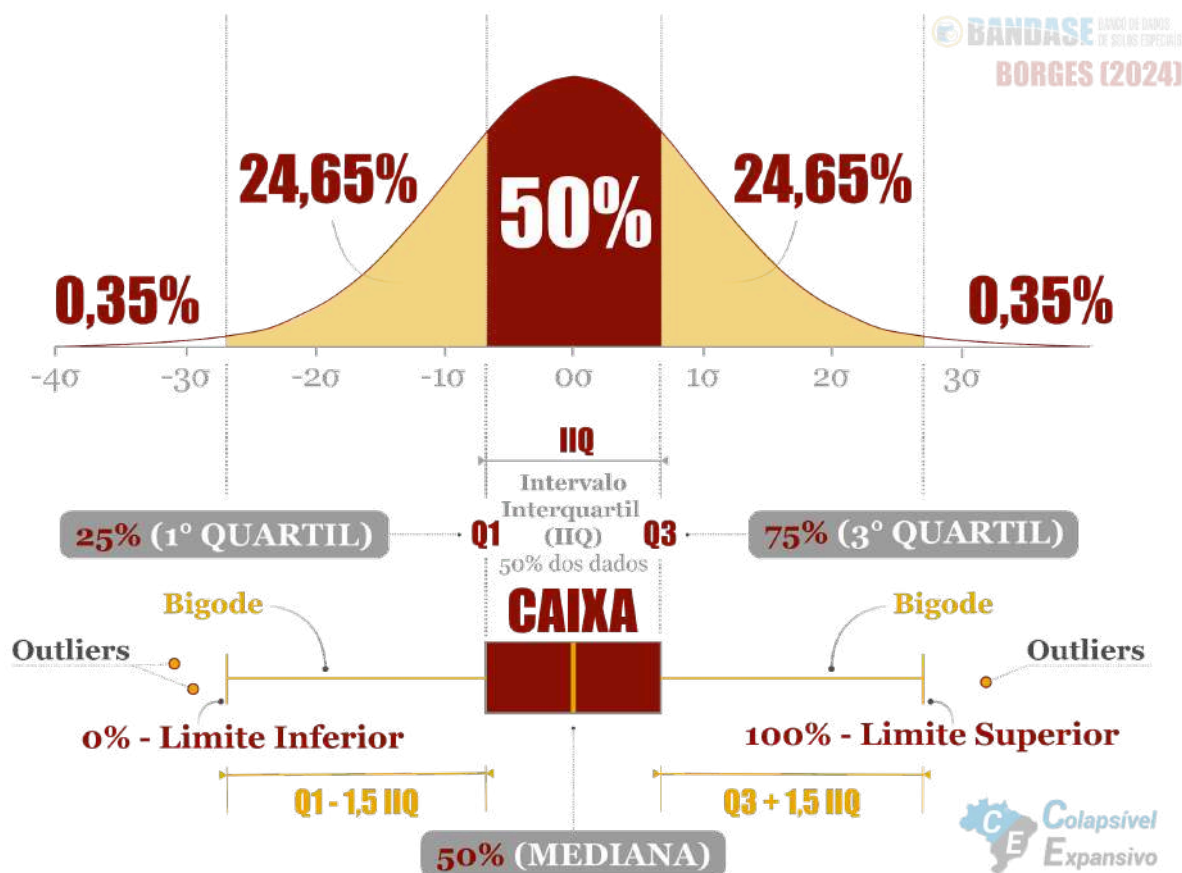
Fonte: Autor (2024).

Tabela 14 - Resumo esquemático da análise estatística.

S O L O S C O L A P S Í V E I S	1º Quartil (25%)	2º Quartil (50%) Mediana	3º Quartil (75%)	Propriedades	1º Quartil (25%)	2º Quartil (50%) Mediana	3º Quartil (75%)	S O L O S E X P A N S Í V O S
	14,0	20,0	30,0	Argila	28,0	43,0	59,1	
	6,0	12,0	20,5	Silte	17,5	26,0	33,3	
	44,0	63,0	75,0	Areia	9,0	21,0	41,0	
	0,0	0,6	3,0	Pedregulho	0,0	1,0	4,7	
	11,3	18,0	28,0	Fração Argila (<2µm)	35,3	45,5	60,0	
	20,0	27,0	41,6	Limite de Liquidez	45,0	55,0	70,0	
	13,6	17,0	27,5	Limite de Plasticidade	22,1	27,0	33,2	
	26,5	29,3	30,5	Limite de Contração	12,6	15,6	17,6	
	7,0	10,0	14,1	Índice de Plasticidade	17,0	25,5	34,0	
	0,3	0,4	0,6	Atividade da Argila	0,5	0,6	0,8	
	18,3	19,1	20,0	Peso Específico Máximo	14,6	16,1	18,4	
	9,1	11,1	14,2	Umidade Ótima	16,3	21,7	27,1	
	4,2	10,0	17,6	Umidade Natural	12,3	19,7	28,0	
	13,9	15,1	17,3	Peso Específico Seco	17,2	21,1	27,4	
	0,7	0,8	1,1	Índice de Vazios	0,6	0,7	0,9	
	45,3	48,0	58,5	Porosidade	49,2	49,3	52,9	
	15,1	32,0	46,0	Grau de Saturação	63,1	76,0	84,6	
	2,64	2,65	2,68	Densidade Real dos Grãos	2,63	2,68	2,72	

Fonte: Autor (2024).

Figura 72 - Representação esquemática para auxiliar na interpretação do resultado da análise estatística.



Fonte: Autor (2024).

4.1.3 Aplicação dos critérios de identificação

Baseados na composição do BANDASE, foram aplicados os critérios de identificação dos solos colapsíveis e expansivos. É importante destacar que as representações gráficas pertinentes podem ser melhor visualizadas no painel dedicado ao referido banco de dados (PABISEC - BANDASE). A seguir, são apresentados os resultados obtidos.

A Figura 73 apresenta a projeção dos registros de solos colapsíveis e expansivos do Brasil na carta de plasticidade e atividade, estando diferenciados pelo padrão de cores adotado neste trabalho. Utilizou-se a ferramenta gráfica Mapa de Calor, visando representar a densidade de dados de modo a identificar facilmente a maior concentração de dados nas referidas cartas. Esses recursos gráficos estão localizados na parte central da referida figura.

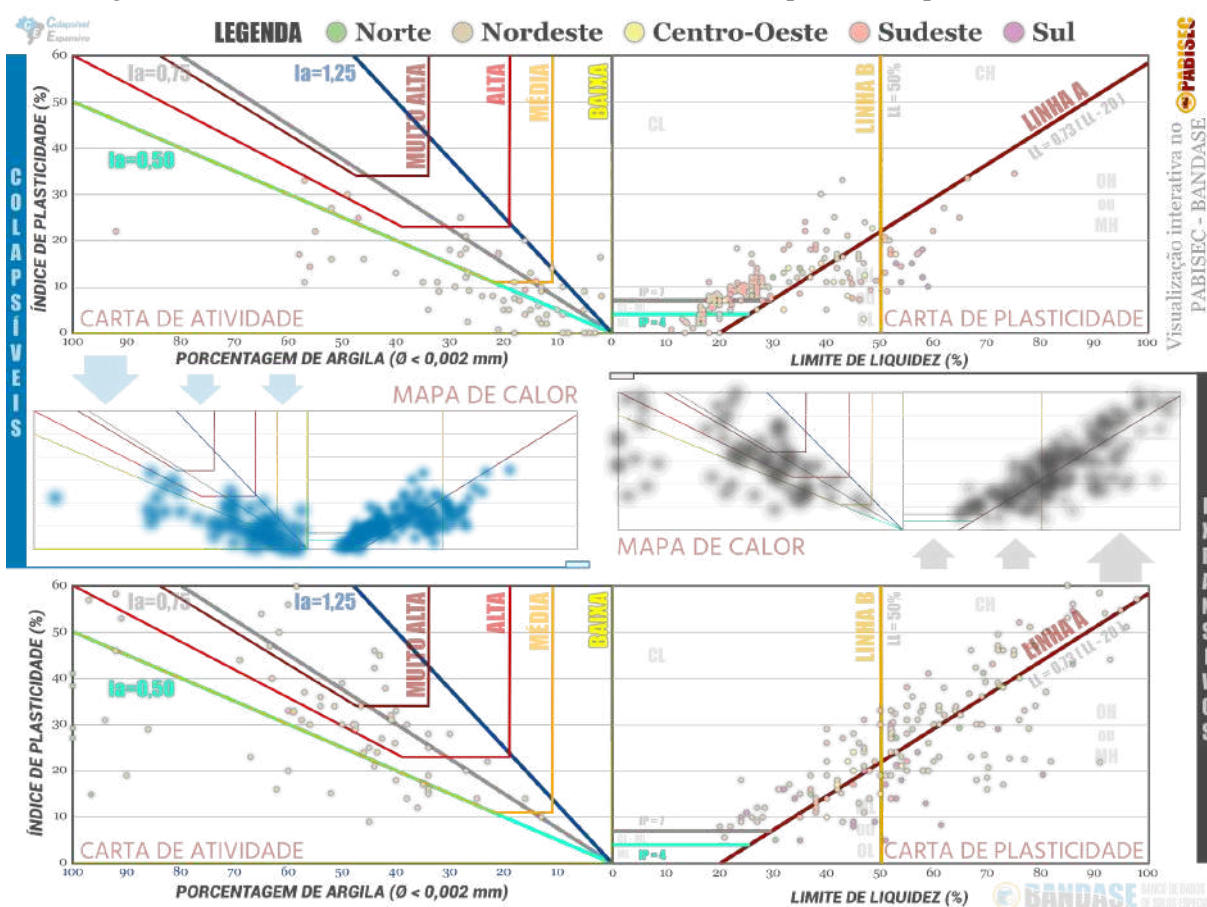
No que se refere à carta de atividade, os solos colapsíveis apresentam atividade variando de baixa a média, preponderando o nível baixo na atividade da argila (79,7%). Nos

solos expansivos, prevalecem atividades da argila variando de média a muito alta (71,8%). Tal cenário pode ser facilmente observado pela técnica visual do mapa de calor.

Quanto à carta de plasticidade, os valores dos Limites de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP) dos solos colapsíveis estão situados em torno da Linha A, ocorrendo uma maior concentração de dados na região gráfica à esquerda da Linha B (LL<50%), tal concentração equivale a 86,8% dos dados. À direita dessa linha (LL>50%), observam-se poucos registros pertinentes aos solos das regiões Sudeste e Sul.

No que diz respeito aos solos expansivos, os valores de LL e IP também apresentam uma forte tendência em direção a Linha A. Contudo, os dados abrangem toda a extensão dessa linha, havendo uma maior concentração à direita da Linha B (LL>50%), essa densidade de dados corresponde ao percentual de 67,3%. Os resultados descritos estão em consonância com as conclusões discorridas por Ferreira (2008).

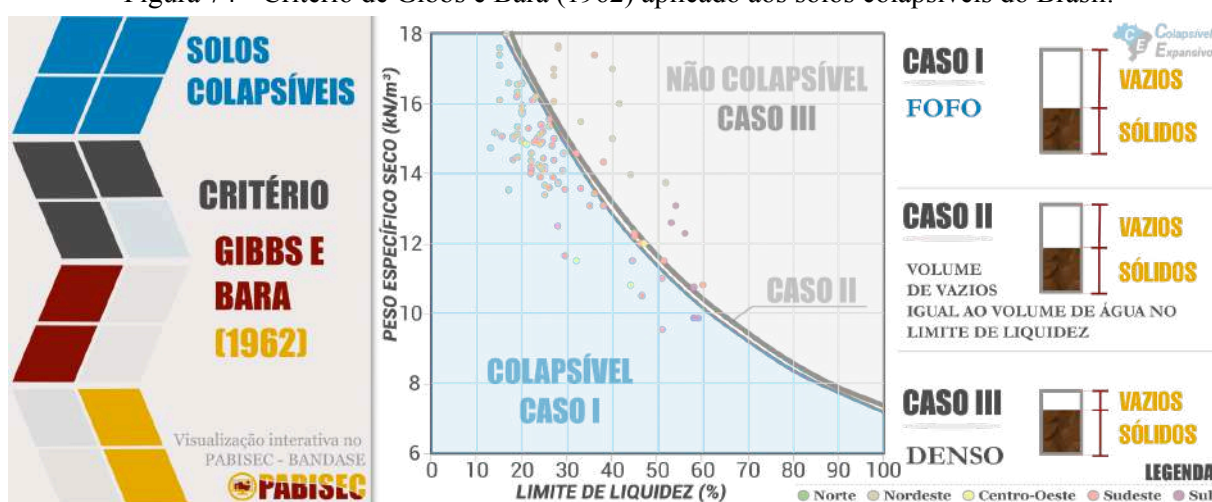
Figura 73 - Carta de Plasticidade e Atividade dos solos colapsíveis e expansivos do Brasil.



Fonte: Autor (2024).

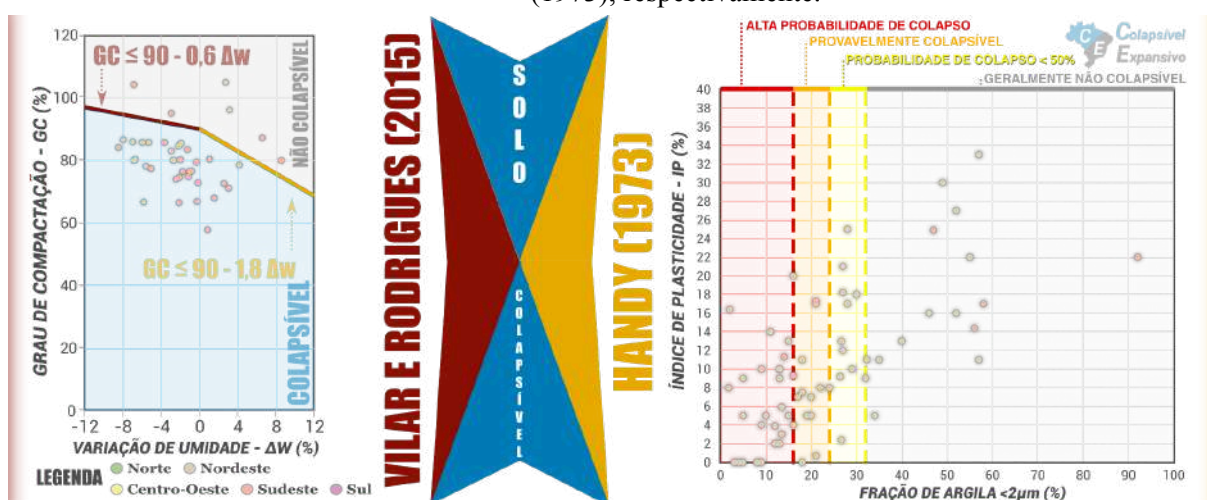
Baseado no critério Gibbs e Bara (1962), constatou-se que 80,9% dos registros foram enquadrados como colapsíveis (Caso I) e 19,1% como não colapsíveis (Caso II e III), Figura 74. Perante o critério de Vilar e Rodrigues (2015), 85,0% foram classificados como colapsíveis e 15% como não colapsíveis. No que se refere ao critério de Handy (1973), 39,1% dos registros foram classificados em alta probabilidade de colapso, 21,7% em provavelmente colapsível, 18,8% em probabilidade de colapso inferior à metade percentual e 20,3% em geralmente não colapsíveis, Figura 75.

Figura 74 - Critério de Gibbs e Bara (1962) aplicado aos solos colapsíveis do Brasil.



Fonte: Autor (2024).

Figura 75 - Critérios aplicados aos solos colapsíveis do Brasil, Vilar e Rodrigues (2015) e Handy (1973), respectivamente.

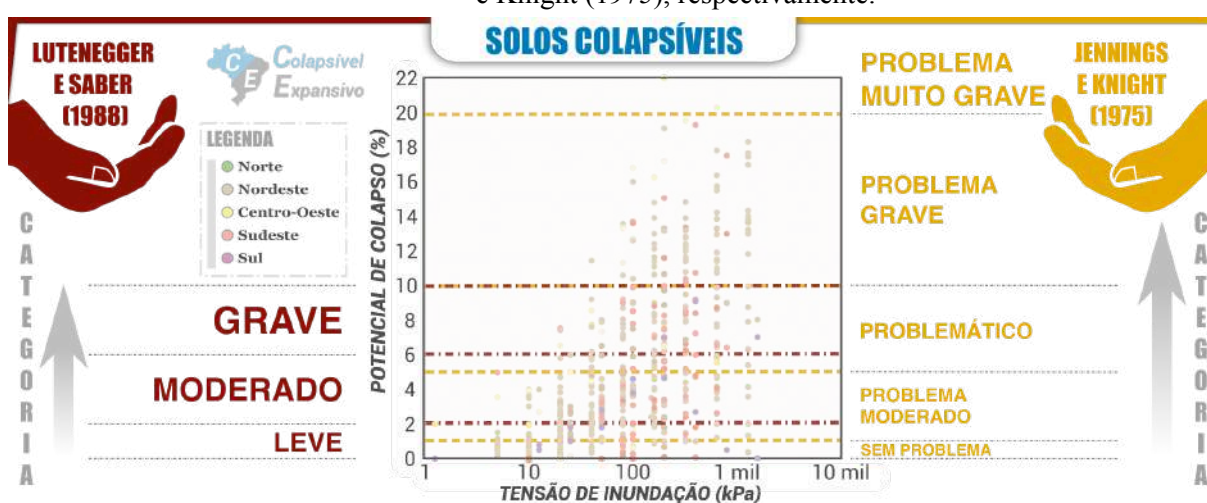


Fonte: Autor (2024).

A Figura 76 ilustra o resultado obtido ao aplicar os critérios de Lutenegeger e Saber (1988) e Jennings e Knight (1975), os quais são empregados para avaliar o potencial de

colapso para as seguintes tensões de inundação: 300 kPa e 200 kPa, respectivamente. Na referida figura, estão expostos os resultados para as tensões de 1,25 até 1.600 kPa. No primeiro critério, constatou-se que 32,8% dos registros foram enquadrados na categoria leve, 42,6% na categoria moderado e 24,6% na categoria grave. O segundo critério resultou na distribuição dos seguintes percentuais: 13,9% para sem problema, 42,3% para problema moderado, 26,0% para problemático, 15,7% para problema grave e 2,2% para problema muito grave.

Figura 76 - Critérios aplicados aos solos colapsíveis do Brasil, Lutenecker e Saber (1988) e Jennings e Knight (1975), respectivamente.



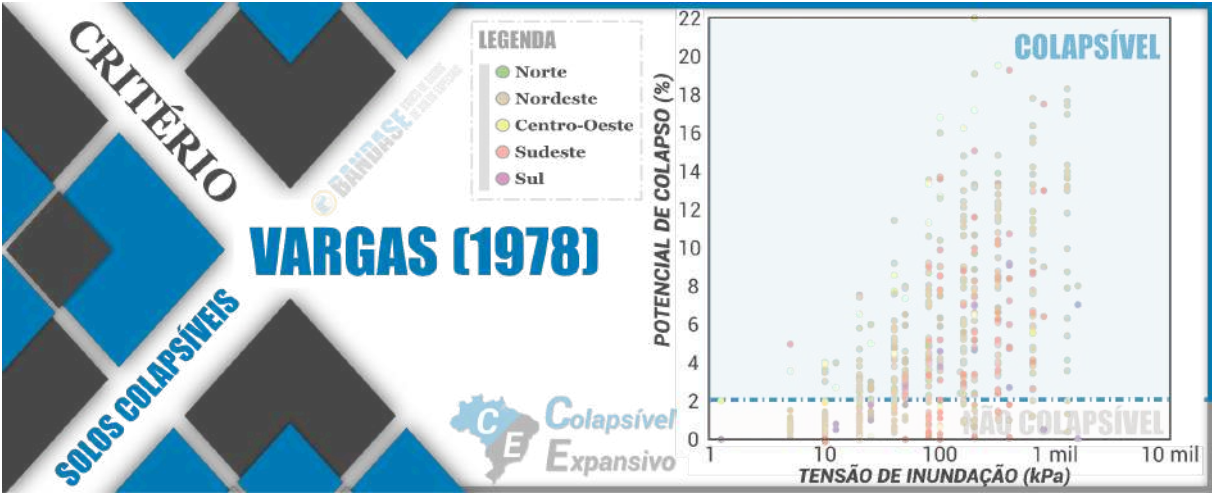
Fonte: Autor (2024).

Após uma análise abrangente do resultado exposto, depreende-se comportamento consoante com o descrito por Futai (1997) e Cintra (1998), ou seja, a conjuntura mostra que o potencial de colapso tende a aumentar com a tensão de inundação até atingir um valor crítico, a partir do qual pode permanecer constante ou até diminuir. Frisa-se que o valor de criticidade depende das características iniciais do solo.

Similarmente quanto às variáveis envolvidas, a Figura 77 expõe o resultado obtido na aplicação do critério de Vargas (1978). Constatou-se que 73,2% dos registros foram classificados como colapsíveis e 26,8% como não colapsíveis.

A organização dos resultados, obtidos na aplicação dos critérios de identificação dos solos colapsíveis, está materializada na Tabela 15. Nessa tabela, constam as autorias dos critérios, as categorizações adotadas, as contagens de registros, os quantitativos para cada categoria e os resultados percentuais alcançados neste trabalho após emprego dos dados contidos no BANDASE.

Figura 77 - Critério de Vargas (1978) aplicado aos solos colapsíveis do Brasil.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 15 - Resultados obtidos na aplicação dos critérios de identificação dos solos colapsíveis.

Critério	Categoria	Contagem	Quantitativo	Percentual
Gibbs e Bara (1962)	Caso I (Colapsível)	131	106	80,9%
	Caso II		8	6,1%
	Caso III (Não Colapsível)		17	13,0%
Vilar e Ferreira (2015)	Colapsível	40	34	85,0%
	Não Colapsível		6	15,0%
Handy (1973)	Alta Probabilidade de Colapso	69	27	39,1%
	Provavelmente Colapsível		15	21,7%
	Probabilidade de Colapso < 50%		13	18,8%
	Geralmente não Colapsível		14	20,3%
Lutenegger e Saber (1988)	Leve	411	135	32,8%
	Moderado		175	42,6%
	Grave		101	24,6%
Jennings e Knight (1975)	Sem Problema	504	70	13,9%
	Problema Moderado		213	42,3%
	Problemático		131	26,0%
	Problema Grave		79	15,7%
	Problema Muito Grave		11	2,2%
Vargas (1978)	Colapsível	504	369	73,2%
	Não Colapsível		135	26,8

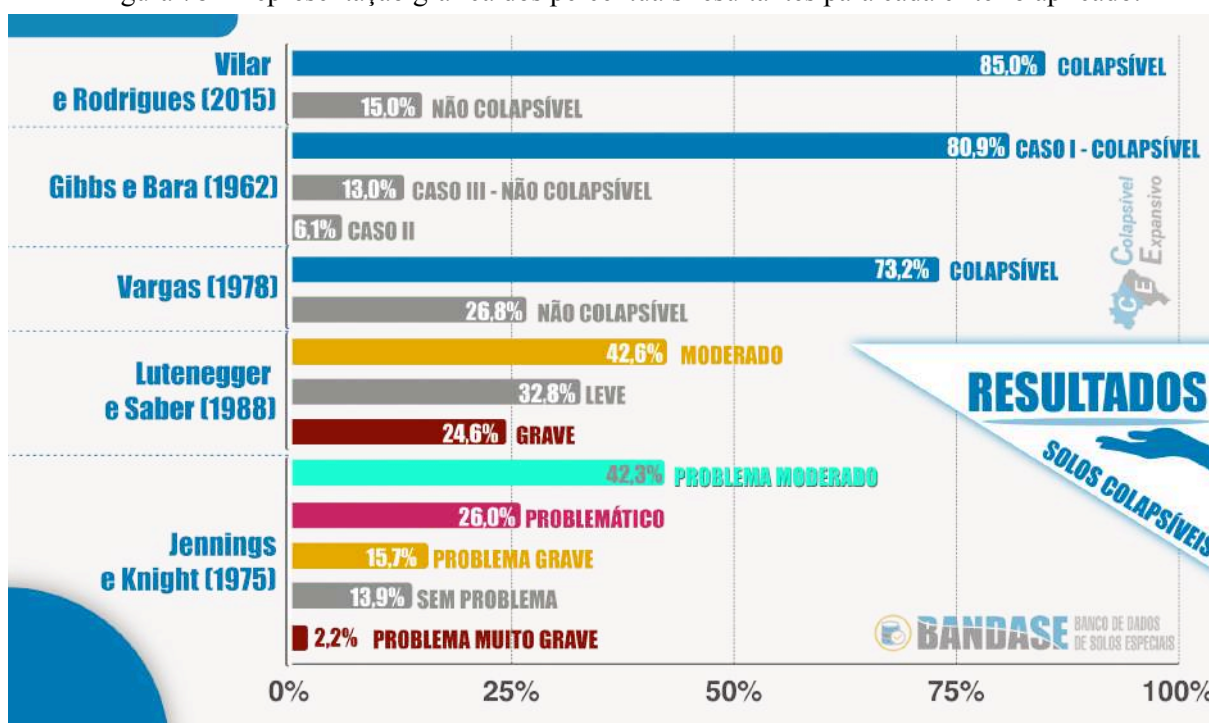
Fonte: Autor (2024).

Perante os quantitativos expostos, realizou-se a análise comparativa dos percentuais resultantes mediante aplicação do gráfico de barra horizontal, Figura 78. As barras horizontais representam os quantitativos percentuais pertinentes às categorias adotadas em cada critério de identificação. Essa técnica permite comparar quantitativos categóricos apresentando

diferentes magnitudes. Além disso, aplicou-se técnica de design gráfico para facilitar a identificação visual dos resultados.

Baseado nessa representação gráfica, constata-se o critério Vilar e Rodrigues (2015) com maior relevância percentual, 85,0% dos registros na categoria colapsível. Em seguida, constam os critérios de Gibbs e Bara (1962) e Vargas (1978), apresentando 80,9% e 73,2%, respectivamente. A categoria moderada apresentou o maior percentual no critério de Luteneegger e Saber (1988), enquanto a categoria problema moderado alcançou maior percentual no critério de Jennings e Knight (1975).

Figura 78 - Representação gráfica dos percentuais resultantes para cada critério aplicado.



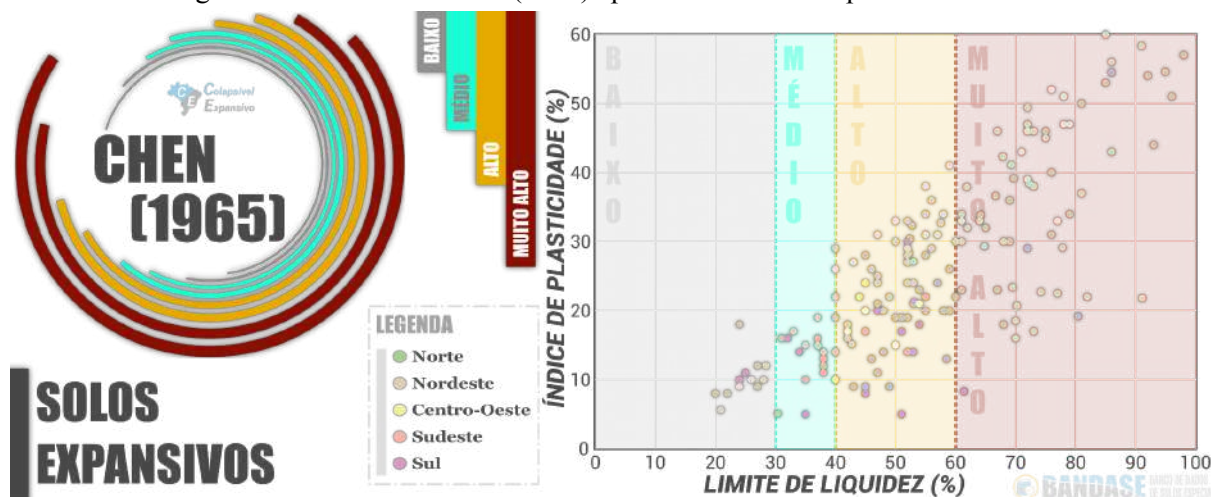
Fonte: Autor (2024).

No que diz respeito aos solos expansivos, aplicou-se o critério de Chen (1965). O enquadramento dos registros nas categorias adotadas no referido critério resultou em 6,3% na categoria baixa, 12,1% na média, 41,6% na alta e 40,0% na muito alta, Figura 79.

Também foi aplicado outro critério oriundo do autor mencionado, trata-se do critério de Chen (1975). Apesar de envolver as mesmas variáveis (IP e LL), as demarcações gráficas são definidas pelos intervalos de valores pertinentes às duas variáveis. O resultado decorrente dessas observações está exposto na Figura 80. Em termos percentuais, foram constatados 36,3% na categoria baixa, 11,1% na média, 30,0% na alta e 22,6% na muito alta. Ressalta-se

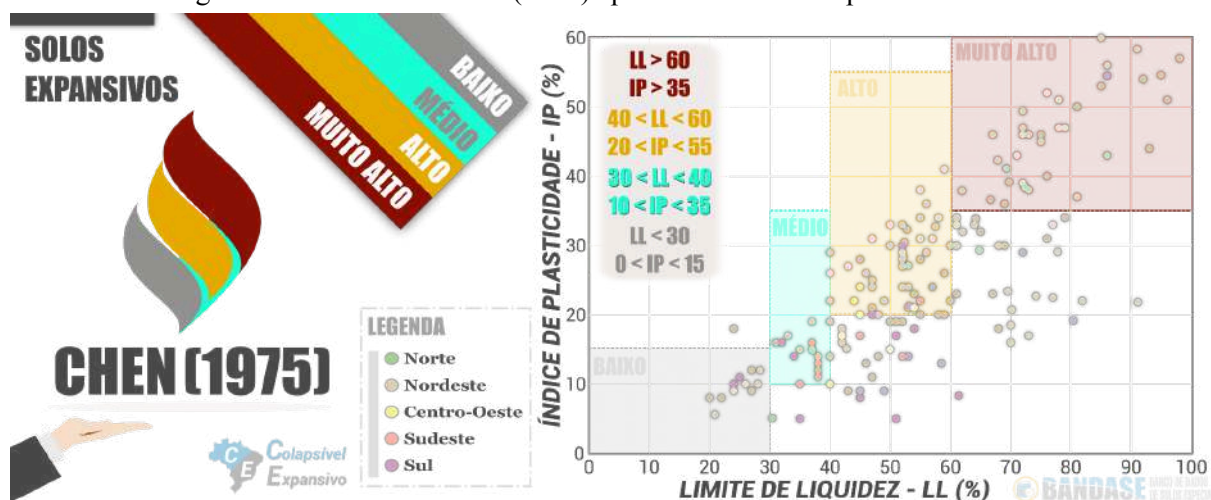
que, no percentual da categoria baixa, estão incluídos os registros que não foram enquadrados em nenhuma das categorias elencadas.

Figura 79 - Critério de Chen (1965) aplicado aos solos expansivos do Brasil.



Fonte: Autor (2024).

Figura 80 - Critério de Chen (1975) aplicado aos solos expansivos do Brasil.



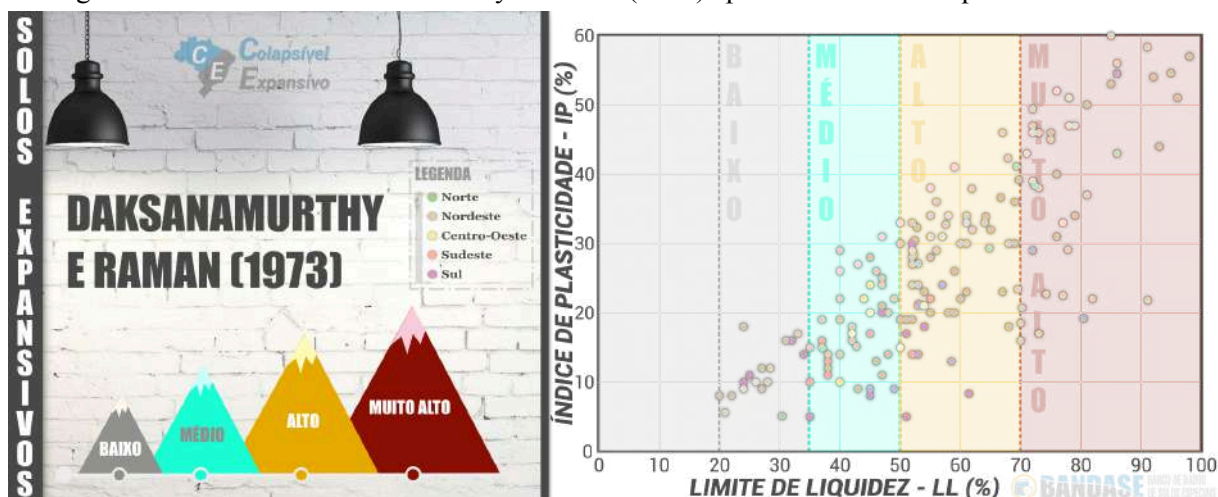
Fonte: Autor (2024).

Apresentando categorização similar ao anterior, o critério de Daksanamurthy e Raman (1973) apresentou o seguinte resultado: 10,5% na categoria baixa, 24,2% na média, 40,0% na alta e 25,3% na muito alta, Figura 81.

Baseado em patologias de edificações, a aplicação do critério de Jimenez Salas (1980) resultou nos seguintes percentuais: 11,9% para sem danos, 16,7% para fissuras pequenas, 27,4% para fissuras importantes, 11,9% para danos graves e 32,1% para demolição. Nota-se

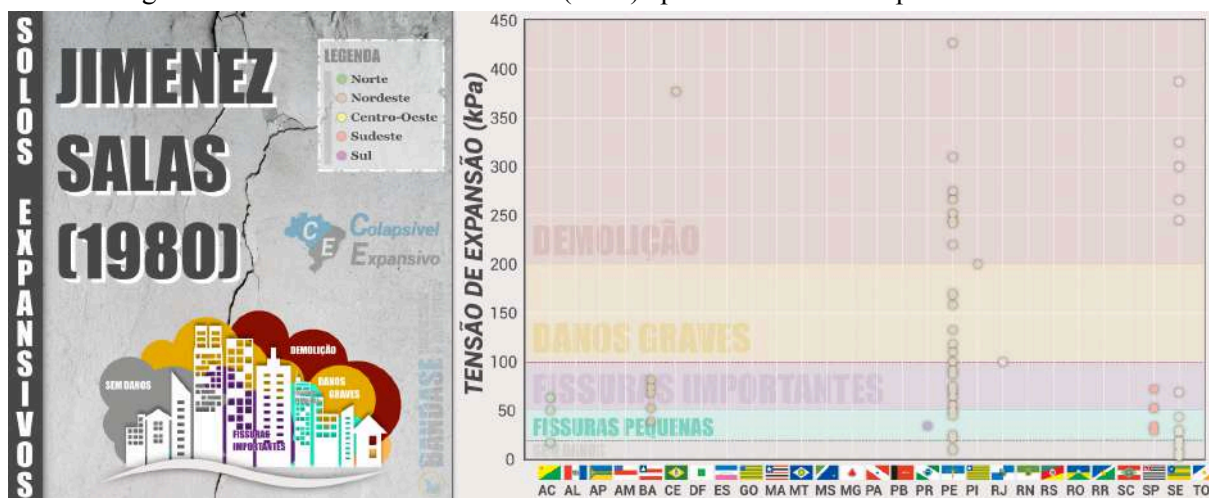
que foi constatado percentual significativo para a patologia mais crítica do critério em tela, Figura 82.

Figura 81 - Critério de Dakshanamurthy e Raman (1973) aplicado aos solos expansivos do Brasil.



Fonte: Autor (2024).

Figura 82 - Critério de Jimenez Salas (1980) aplicado aos solos expansivos do Brasil.

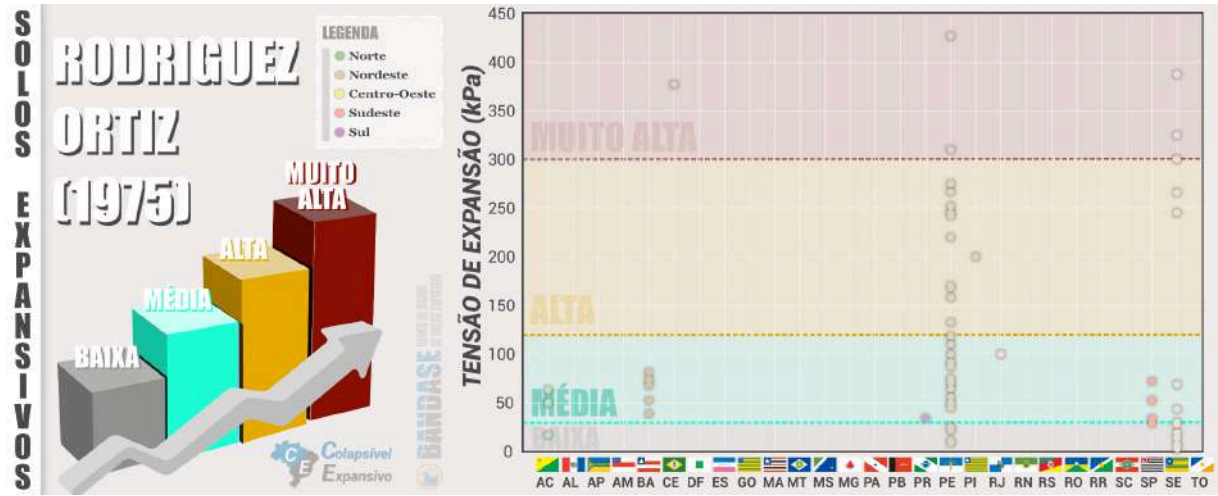


Fonte: Autor (2024).

A Figura 83 apresenta o resultado obtido na aplicação do critério de Rodriguez Ortiz (1975). Constatou-se que 17,9% estão enquadrados na categoria baixa, 44,0% na média, 29,8% na alta e 8,3% na muito alta.

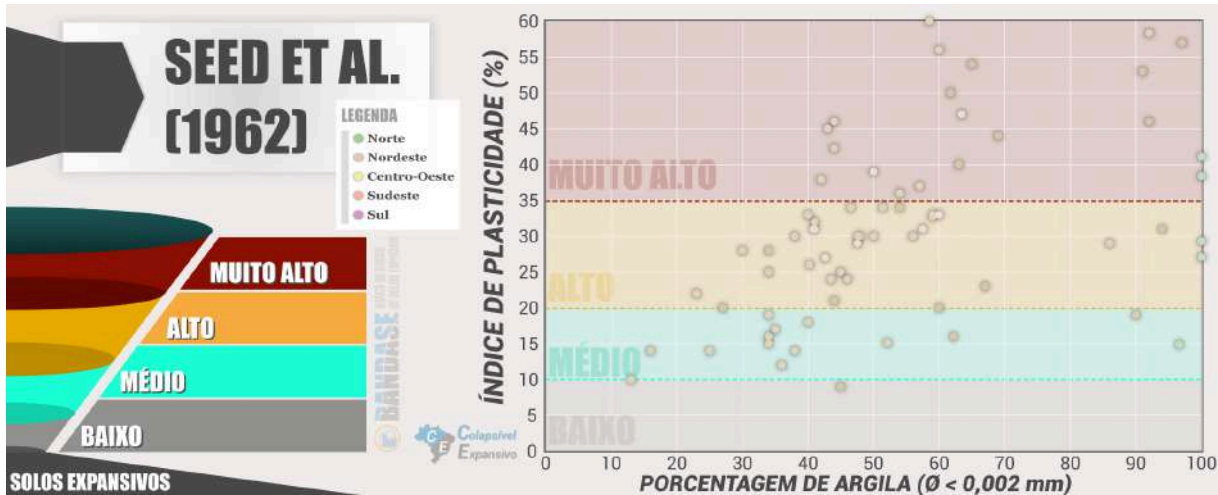
Por fim, aplicou-se o critério de Seed *et al.* (1962). Nesse critério, 1,4% dos registros estão enquadrados na categoria baixa, 22,5% na média, 45,1% na alta e 31,0% na muito alta. Esse cenário está materializado na Figura 84.

Figura 83 - Critério de Rodriguez Ortiz (1975) aplicado aos solos expansivos do Brasil.



Fonte: Autor (2024).

Figura 84 - Critério de Seed *et al.* (1962) aplicado aos solos expansivos do Brasil.



Fonte: Autor (2024).

Recorrendo às técnicas de organização de resultados, a Tabela 16 apresenta didaticamente os resultados obtidos neste trabalho quanto à aplicação dos critérios de identificação de solos expansivos, estando estruturada similarmente à tabela anterior.

Tabela 16 - Resultados obtidos na aplicação dos critérios de identificação dos solos expansivos.
(continua)

Critério	Categoria	Contagem	Quantitativo	Resultado
Chen (1965)	Baixo	190	12	6,3%
	Médio		23	12,1%
	Alto		79	41,6%
	Muito Alto		76	40,0%

Tabela 16 - Resultados obtidos na aplicação dos critérios de identificação dos solos expansivos.
(conclusão)

Critério	Categoria	Contagem	Quantitativo	Resultado
Chen (1975)	Baixo*	190	69	36,3%
	Médio		21	11,1%
	Alto		57	30,0%
	Muito Alto		43	22,6%
Daksanamurthy e Raman (1973)	Baixo	190	20	10,5%
	Médio		46	24,2%
	Alto		76	40,0%
	Muito Alto		48	25,3%
Jimenez Salas (1980)	Sem Danos	84	10	11,9%
	Fissuras Pequenas		14	16,7%
	Fissuras Importantes		23	27,4%
	Danos Graves		10	11,9%
	Demolição		27	32,1%
Rodriguez Ortiz (1975)	Baixo	84	15	17,9%
	Médio		37	44,0%
	Alto		25	29,8%
	Muito Alto		7	8,3%
Seed <i>et al.</i> (1962)	Baixo	71	1	1,4%
	Médio		16	22,5%
	Alto		32	45,1%
	Muito Alto		22	31,0%

* Incluem-se os registros que não foram enquadrados nas delimitações categóricas.

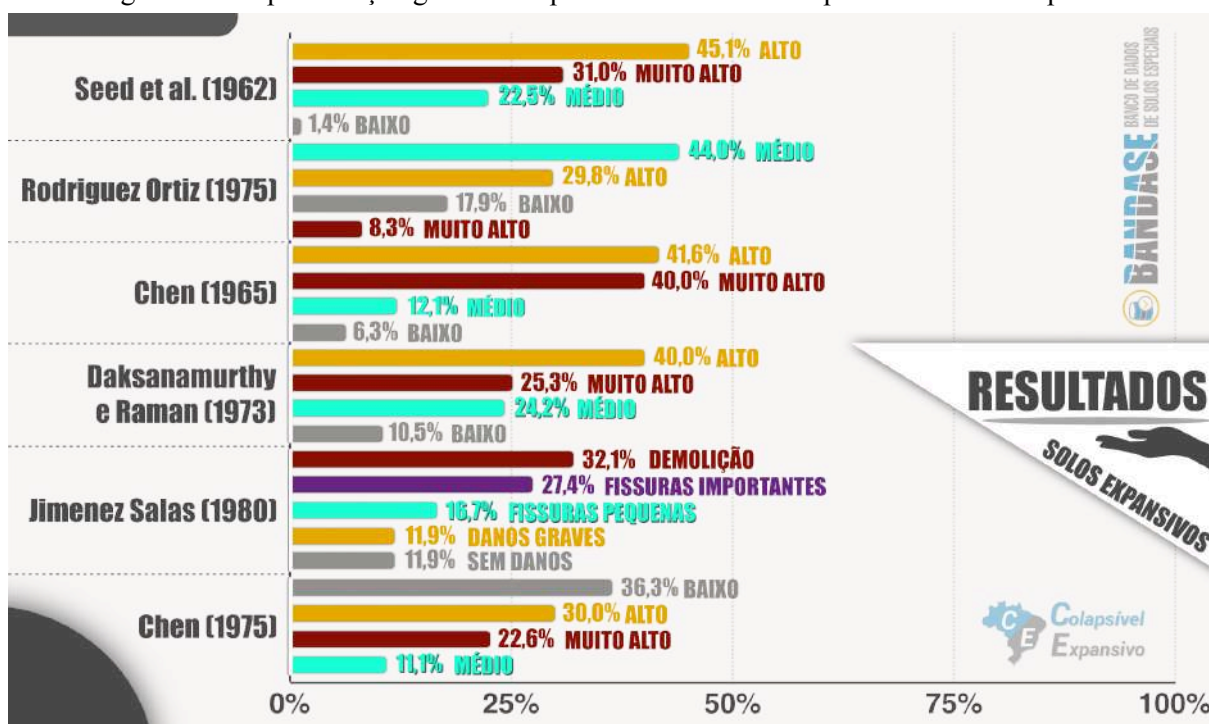
Fonte: Autor (2024).

A Figura 85 apresenta recurso gráfico que permite uma fácil visualização dos resultados percentuais para cada critério de identificação. A categorização está facilmente identificada pelas tonalidades aplicadas na representação gráfica.

Baseado na referida figura, verifica-se que a maior relevância percentual ocorre no critério de Seed *et al.* (1962), apresentando 45,1% na categoria alta. Seguidamente, observam-se os critérios de Rodriguez Ortiz (1975) e Chen (1965) alcançando 44,0% na categoria média e 41,6% na categoria alta, respectivamente. Posteriormente, constata-se o critério de Daksanamurthy e Raman (1973) com 40,0% na categoria alta.

No critério de Jimenez Salas (1980), o percentual mais relevante ocorre na patologia com maior criticidade, ou seja, 32,1% na categoria demolição. Por fim, a categoria baixa (36,3%) representou o maior percentual no critério de Chen (1975), salientando que tal percentual abrange os registros que não foram enquadrados nas demais categorias, conforme ressaltado anteriormente.

Figura 85 - Representação gráfica dos percentuais resultantes para cada critério aplicado.



Fonte: Autor (2024).

Na perspectiva geral, compreende-se que, perante os critérios de identificação de solos colapsíveis e expansivos selecionados neste trabalho, a aplicação dos registros do BANDASE resultou no enquadramento nas categorias mais críticas quanto ao comportamento colapsível e expansivo. Portanto, nessa análise sistêmica, ratificam-se as características dos dados contidos no mencionado repositório de solos colapsíveis e expansivos, visto que tais características foram identificadas com base em critérios consagrados na literatura.

4.1.4 Resultados parciais do BANDASE

Baseado no conteúdo exposto, são apresentadas os principais resultados:

- **distribuição regional e estadual das ocorrências do BANDASE:** a região Nordeste do Brasil apresenta o maior quantitativo de ocorrências de solos colapsíveis e expansivos, enquanto o estado de Pernambuco se destaca com o maior número de ocorrências desses tipos de solos;
- **recursos do Google:** as ferramentas desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento do BANDASE, possibilitando benefícios como trabalho simultâneo, atualizações automáticas, integração, computação em nuvem e controle de acesso;

- **características dos dados:** as variáveis referentes às propriedades dos solos do BANDASE apresentam predominantemente características de dados não paramétricos, ou seja, ao serem submetidos ao teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, os dados não apresentaram distribuição normal ($p < 0,05$), implicando no uso da mediana como medida de tendência central e dos quartis como medida de variabilidade;
- **variabilidade dos dados:** de forma geral, os solos expansivos apresentam maior amplitude e variância do que os solos colapsíveis, indicando uma maior dispersão nos valores das propriedades;
- **textura dos solos:** os resultados das medianas apontaram que os solos expansivos possuem uma maior concentração de frações finas, enquanto os solos colapsíveis têm maiores concentrações de frações grossas, permitindo enquadrá-los, respectivamente, na categoria de solos finos e grossos, conforme os parâmetros estabelecidos pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), e na categoria de areia argilosa e argila siltosa, segundo a classificação triangular da *Mississippi River Commission*;
- **plasticidade dos solos:** os solos expansivos apresentam valores mais elevados nas propriedades dos limites de consistência em comparação com os solos colapsíveis, sendo classificados como argila siltosa de alta compressibilidade (CH - MH), enquanto os solos colapsíveis são categorizados como areia argilosa (SC);
- **diferenças entre os solos:** a aplicação do teste não paramétrico de *Mann-Whitney* apontou que existe diferença estatisticamente significativa entre as medianas das propriedades dos solos colapsíveis e expansivos;
- **concordância com as redes neurais:** os resultados da análise estatística descritiva são compatíveis com as classificações das redes neurais PE04 e PE07 de Holanda (2022) para o comportamento dos solos estudados;
- **concordância com os critérios de identificação:** a aplicação dos registros do BANDASE segundo os critérios selecionados confirmou a classificação crítica dos solos colapsíveis e expansivos, destacando a concordância entre os dados e os critérios de identificação adotados, validando as características presentes no repositório.

4.2 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA DE SOLOS EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS (SIGSEC)

Todos os documentos cartográficos apresentam os elementos fundamentais, ou seja, estão presentes na representação gráfica o título, a orientação, o *datum* geodésico, o sistema de projeção, o sistema de coordenadas, a referência, a base de origem, a escala e as convenções. No canto superior esquerdo, consta a identificação do tipo de solo, realizada pela cor padrão adotada nesta tese.

Os produtos cartográficos que são exteriorizados neste capítulo também estão disponibilizados em maior resolução no Apêndice K, em formato A4. O conjunto desses documentos cartográficos representa o Sistema de Informação Geográfica de Solos Expansivos e Colapsíveis (SIGSEC).

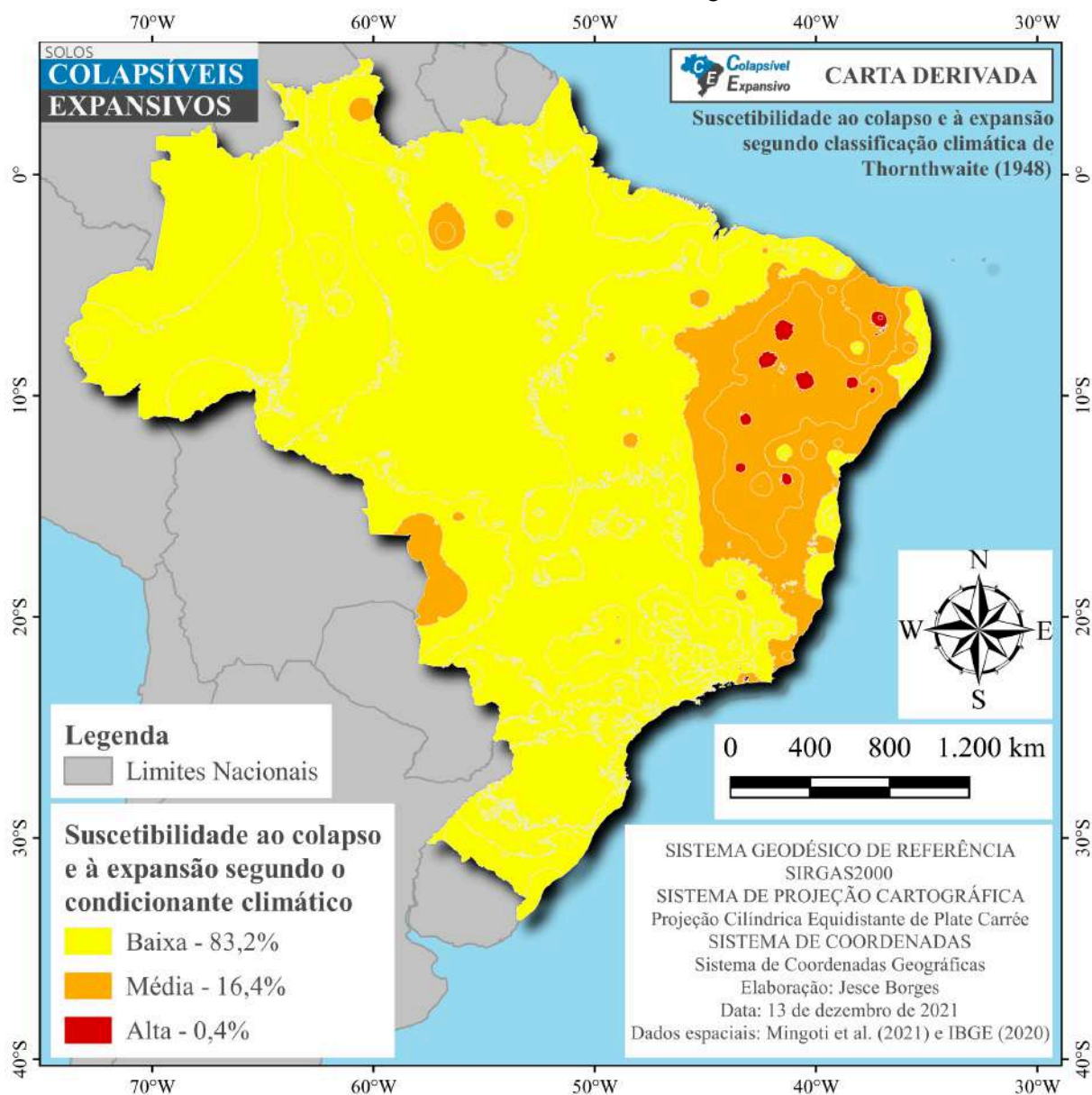
4.2.1 Carta derivada de suscetibilidade com base na Climatologia

A aplicação dos critérios de suscetibilidade resultou no produto cartográfico denominado Carta Derivada de Suscetibilidade Climática dos Solos Colapsíveis e Expansivos do Brasil. Segundo a metodologia adotada, constatou-se que o território brasileiro apresenta os seguintes níveis de suscetibilidade ao colapso e à expansão: alta em 0,4%, média em 16,4% e baixa em 83,2%, Figura 86.

Os percentuais dos níveis de suscetibilidade, detalhados por tipos climáticos e regiões, encontram-se descritos na Tabela 17 e na Tabela 18, respectivamente. A compreensão visual destas porcentagens pode ser facilmente obtida por meio da representação esquemática apresentada na Figura 87.

Quanto aos tipos climáticos, destaca-se o B2 - Úmido, com a maior proporção de suscetibilidade baixa, representando 29,94%. Na sequência, observa-se o B1 - Úmido, o B3 - Úmido, o B4 - Úmido e o A - Superúmido, com percentuais de suscetibilidade baixa de 20,91%, 14,79%, 9,71% e 7,83%, respectivamente. No que se refere à suscetibilidade média, os tipos climáticos C2 - Subúmido e C1 - Subúmido registram 9,83% e 6,99%, respectivamente. Por sua vez, a suscetibilidade alta é observada apenas nos tipos climáticos D - Semiárido e E - Árido, totalizando aproximadamente 0,45%, Tabela 17.

Figura 86 - Carta derivada referente à suscetibilidade ao colapso e à expansão, segundo o condicionante climatológico.



Fonte: Autor (2024).

Devido à predominância do tipo climático úmido no território brasileiro, nota-se que uma parcela significativa da extensão territorial apresenta nível de suscetibilidade baixa. A suscetibilidade alta, por sua vez, manifesta-se exclusivamente na região Nordeste, enquanto a categoria de suscetibilidade média é predominante no Nordeste e na parte norte do Sudeste, apresentando algumas ocorrências isoladas ao longo do país. Na região Sul, o nível de suscetibilidade baixa é o único observado. Os percentuais correspondentes a cada região estão detalhadamente apresentados na Tabela 18.

Tabela 17 - Percentuais de suscetibilidade por tipos climáticos resultantes da carta derivada.

Tipos Climáticos	Níveis de suscetibilidade			Total Geral
	Alta	Média	Baixa	
B2 - Úmido	0,00%	0,00%	29,94%	29,94%
B1 - Úmido	0,00%	0,00%	20,91%	20,91%
B3 - Úmido	0,00%	0,00%	14,79%	14,79%
B4 - Úmido	0,00%	0,00%	9,71%	9,71%
C2 - Subúmido	0,00%	9,37%	0,00%	9,37%
A - Superúmido	0,00%	0,00%	7,83%	7,83%
C1 - Subúmido seco	0,00%	6,99%	0,00%	6,99%
D - Semiárido	0,44%	0,00%	0,00%	0,44%
E - Árido	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Total Geral	0,45%	16,37%	83,19%	100,00%

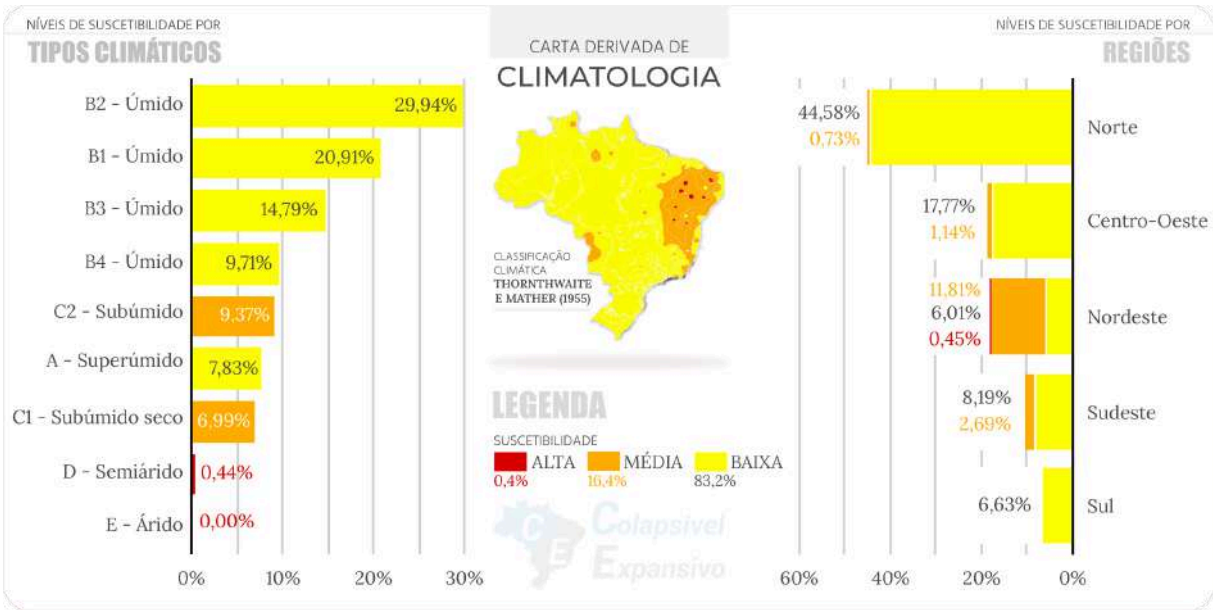
Fonte: Autor (2024).

Tabela 18 - Percentuais de suscetibilidade por região resultantes da carta derivada.

Região	Níveis de suscetibilidade			Total Geral
	Alta	Média	Baixa	
Norte	0,00%	0,73%	44,58%	45,31%
Nordeste	0,45%	11,81%	6,01%	18,27%
Centro-Oeste	0,00%	1,14%	17,77%	18,91%
Sudeste	0,00%	2,69%	8,19%	10,88%
Sul	0,00%	0,00%	6,63%	6,63%
Total Geral	0,45%	16,37%	83,18%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

Figura 87 - Representação gráfica dos níveis de suscetibilidade por tipos climáticos e regiões, respectivamente.



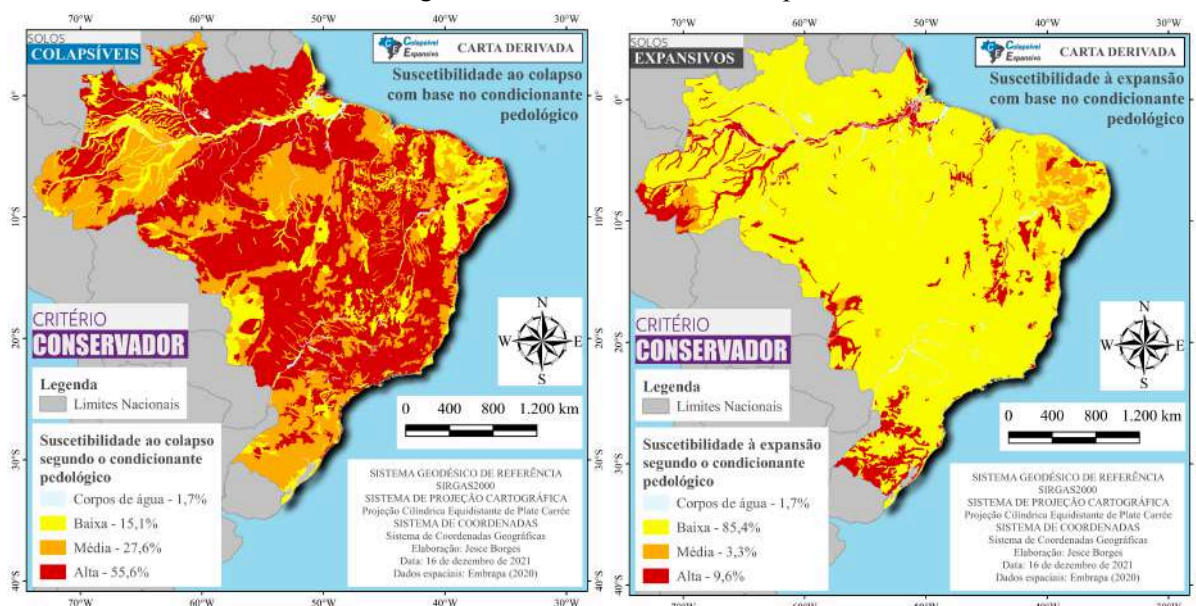
4.2.2 Cartas derivadas de suscetibilidade com base na Pedologia

Baseado no condicionante pedológico, são expostos os resultados obtidos para os solos colapsíveis e expansivos perante os critérios conservador, ponderado e inverso.

4.2.2.1 Critério Conservador

No que diz respeito aos solos colapsíveis, os resultados apontaram níveis de suscetibilidade equivalentes aos seguintes percentuais: 55,57% para alta, 27,62% para média e 15,14% para baixa. Quanto aos solos expansivos, foram observados percentuais de 9,61% para alta, 3,28% para média e 85,44% para baixa suscetibilidade. Os corpos de água correspondem ao percentual de 1,67%. Os referidos quantitativos percentuais estão materializados nos produtos cartográficos. Geradas a partir da aplicação do critério conservador, as cartas pedológicas resultantes que indicam a suscetibilidade ao colapso e à expansão estão dispostas na Figura 88, respectivamente.

Figura 88 - Cartas derivadas pedológicas referentes à suscetibilidade ao colapso e à expansão, segundo critério conservador, respectivamente.



Fonte: Autor (2024).

Nos solos colapsíveis, observa-se o predomínio do nível de suscetibilidade alta, ao passo que nos solos expansivos, a suscetibilidade baixa prevalece. Ao analisar regionalmente os solos colapsíveis, constata-se que a região Norte apresenta a maior suscetibilidade alta,

alcançando 25,01%, seguida pelo Centro-Oeste com 12,50% e o Nordeste com 9,05%. Por outro lado, nos solos expansivos, a região Norte se destaca com 39,07% de suscetibilidade baixa, seguida pelo Centro-Oeste com 17,70% e o Nordeste com 13,97%. Para uma compreensão detalhada dos percentuais por região, os dados estão disponibilizados nas tabelas abaixo.

Tabela 19 - Resultados obtidos no critério conservador para os solos colapsíveis referentes à carta derivada pedológica.

C O N S E R V A D O R	Região	Níveis de suscetibilidade			Corpos de água	Total Geral
		Alta	Média	Baixa		
	Norte	25,01%	12,42%	6,73%	1,16%	45,33%
	Nordeste	9,05%	4,63%	4,39%	0,14%	18,21%
	Centro-Oeste	12,50%	4,02%	2,32%	0,13%	18,97%
	Sudeste	7,66%	2,07%	0,98%	0,17%	10,88%
	Sul	1,34%	4,47%	0,72%	0,07%	6,60%
	Total Geral	55,57%	27,62%	15,14%	1,67%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 20 - Resultados obtidos no critério conservador para os solos expansivos referentes à carta derivada pedológica.

C O N S E R V A D O R	Região	Níveis de suscetibilidade			Corpos de água	Total Geral
		Alta	Média	Baixa		
	Norte	4,48%	0,61%	39,07%	1,16%	45,33%
	Nordeste	1,61%	2,49%	13,97%	0,14%	18,21%
	Centro-Oeste	1,00%	0,15%	17,70%	0,13%	18,97%
	Sudeste	0,41%	0,03%	10,27%	0,17%	10,88%
	Sul	2,11%	0,00%	4,43%	0,07%	6,60%
	Total Geral	9,61%	3,28%	85,44%	1,67%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

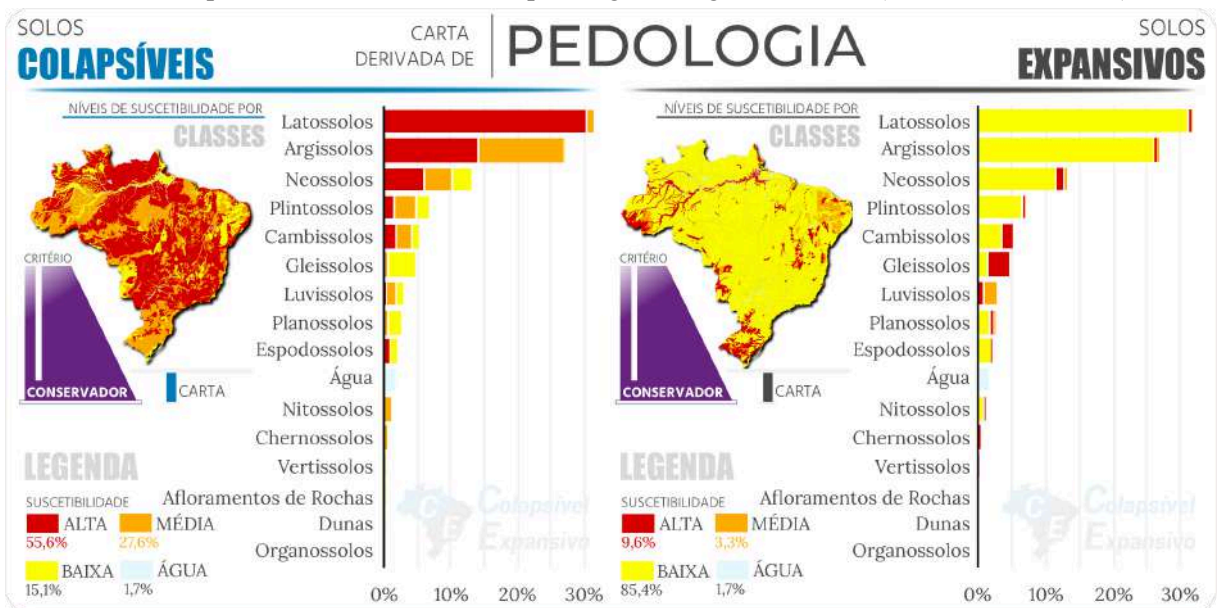
Com base na análise das classes pedológicas (ordens), destaca-se que a suscetibilidade alta predomina nos Latossolos (30,47%) e nos Gleissolos (3,12%) em relação aos solos colapsíveis e expansivos, respectivamente. No tocante à suscetibilidade média, observa-se o maior percentual nos Argissolos (12,81%) para os solos colapsíveis e nos Luvisolos (1,97%) para os solos expansivos. No contexto da baixa suscetibilidade, os Gleissolos (4,23%) apresentam o percentual mais significativo para os solos colapsíveis, ao passo que nos Latossolos esse nível atinge 31,25% em relação aos solos expansivos (Tabela 21 e Figura 89).

Tabela 21 - Percentuais de suscetibilidade para solos colapsíveis e expansivos, segundo classes pedológicas (critério conservador), referentes às cartas derivadas pedológicas.

	SOLOS COLAPSÍVEIS			Classes Pedológicas	SOLOS EXPANSIVOS			Total Geral
	Alta	Média	Baixa		Alta	Média	Baixa	
C O N S E R V A D O R	30,47%	1,22%	0,00%	Latossolos	0,34%	0,09%	31,25%	31,68%
	14,17%	12,81%	0,02%	Argissolos	0,49%	0,52%	25,99%	27,00%
	6,11%	4,15%	2,99%	Neossolos	1,43%	0,40%	11,42%	13,26%
	1,43%	3,28%	2,26%	Plintossolos	0,27%	0,06%	6,64%	6,97%
	1,96%	2,19%	1,12%	Cambissolos	1,59%	0,00%	3,68%	5,27%
	0,19%	0,26%	4,23%	Gleissolos	3,12%	0,00%	1,56%	4,68%
	0,28%	1,45%	1,12%	Luvissolos	0,88%	1,97%	0,00%	2,85%
	0,08%	0,58%	1,99%	Planossolos	0,60%	0,25%	1,81%	2,66%
	0,76%	0,05%	1,17%	Espodossolos	0,03%	0,00%	1,95%	1,98%
	0,00%	0,00%	1,67%	Água	0,00%	0,00%	1,67%	1,67%
	0,08%	1,06%	0,00%	Nitossolos	0,20%	0,00%	0,94%	1,14%
	0,03%	0,41%	0,00%	Chernossolos	0,44%	0,00%	0,00%	0,44%
	0,00%	0,07%	0,14%	Vertissolos	0,21%	0,00%	0,00%	0,21%
	0,02%	0,04%	0,07%	Afloramentos de Rochas	0,00%	0,00%	0,13%	0,13%
	0,00%	0,05%	0,00%	Dunas	0,00%	0,00%	0,05%	0,05%
	0,00%	0,00%	0,03%	Organossolos	0,02%	0,00%	0,01%	0,03%
	55,57%	27,62%	16,81%	Total Geral	9,61%	3,28%	87,11%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

Figura 89 - Representação gráfica dos níveis de suscetibilidade para solos colapsíveis e expansivos perante as cartas derivadas pedológicas, segundo classes (critério conservador).

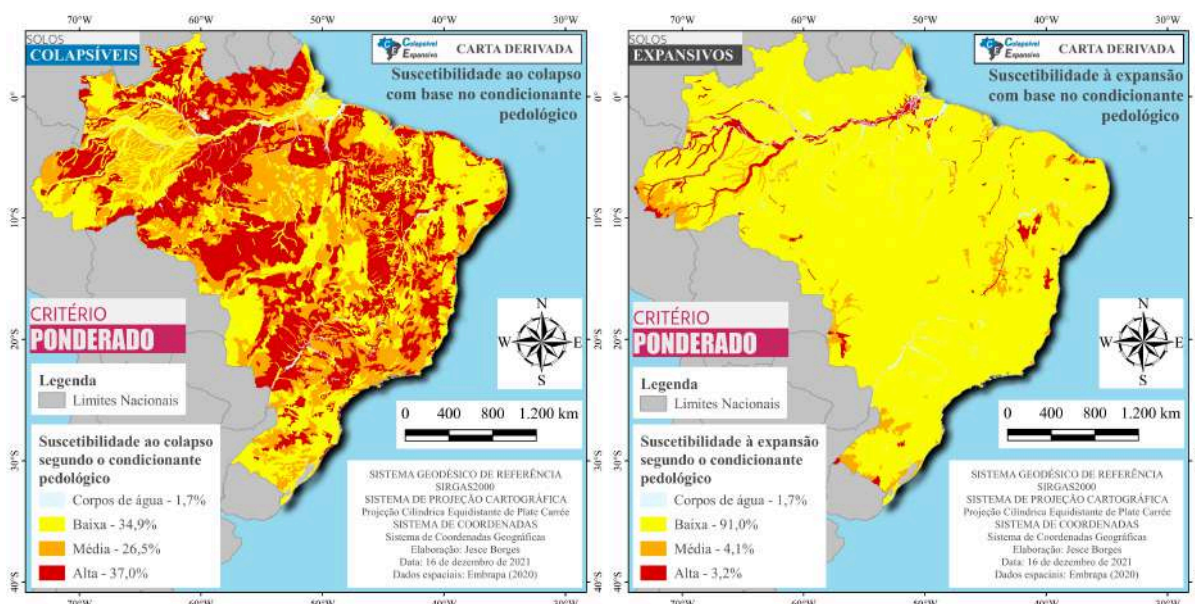


Fonte: Autor (2024).

4.2.2.2 Critério Ponderado

Em relação aos solos colapsíveis, os níveis de suscetibilidade resultaram em 36,96% de alta, 26,50% de média e 34,87% de baixa. Quanto aos solos expansivos, os resultados apontaram níveis de suscetibilidade equivalentes aos seguintes percentuais: 3,16% para alta, 4,14% para média e 91,03% para baixa. Em ambos os casos, os corpos de água correspondem ao percentual de 1,67%. A Figura 90 apresenta os percentuais de suscetibilidade ao colapso e à expansão materializados mediante produtos cartográficos oriundos da aplicação do critério ponderado.

Figura 90 - Cartas derivadas pedológicas referentes à suscetibilidade ao colapso e à expansão, segundo critério ponderado, respectivamente.



Fonte: Autor (2024).

Na região Norte, identificou-se uma distribuição moderadamente equitativa nos percentuais dos três níveis de suscetibilidade (16,77% de alta, 13,16% de média e 14,24% de baixa) em relação aos solos colapsíveis. Essa disposição de porcentagens é espelhada nos totais gerais (36,97% de alta, 26,5% de média e 34,87% de baixa). No contexto dos solos expansivos, destaca-se a predominância da suscetibilidade baixa na região Norte (39,97%), seguida pelo Centro-Oeste (18,22%) e Nordeste (16,70%). Para uma análise mais aprofundada dos resultados por região, os detalhes completos estão apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 22 - Resultados obtidos no critério ponderado para os solos colapsíveis referentes à carta derivada pedológica.

P O N D E R A D O	Região	Níveis de suscetibilidade			Corpos de água	Total Geral
		Alta	Média	Baixa		
	Norte	16,77%	13,16%	14,24%	1,16%	45,33%
	Nordeste	6,53%	2,87%	8,68%	0,14%	18,21%
	Centro-Oeste	8,58%	4,64%	5,62%	0,13%	18,97%
	Sudeste	4,04%	4,08%	2,60%	0,17%	10,88%
	Sul	1,06%	1,76%	3,73%	0,07%	6,60%
	Total Geral	36,97%	26,50%	34,87%	1,67%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 23 - Resultados obtidos no critério ponderado para os solos expansivos referentes à carta derivada pedológica.

P O N D E R A D O	Região	Níveis de suscetibilidade			Corpos de água	Total Geral
		Alta	Média	Baixa		
	Norte	2,32%	1,88%	39,97%	1,16%	45,33%
	Nordeste	0,56%	0,81%	16,70%	0,14%	18,21%
	Centro-Oeste	0,14%	0,48%	18,22%	0,13%	18,97%
	Sudeste	0,05%	0,23%	10,43%	0,17%	10,88%
	Sul	0,09%	0,74%	5,71%	0,07%	6,60%
	Total Geral	3,16%	4,14%	91,03%	1,67%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

A análise das classes pedológicas (ordens) revelou suscetibilidade alta de 25,08% nos Latossolos para solos colapsíveis e de 2,12% nos Gleissolos para os solos expansivos. No contexto da suscetibilidade média, os Argissolos representam a classe com o maior percentual para os solos colapsíveis (15,22%), enquanto os Cambissolos prevaleceram nos solos expansivos (1,31%). Já a baixa suscetibilidade apresentou uma incidência mais acentuada nos Neossolos para solos colapsíveis (7,79%) e nos Latossolos para solos expansivos (31,49%).

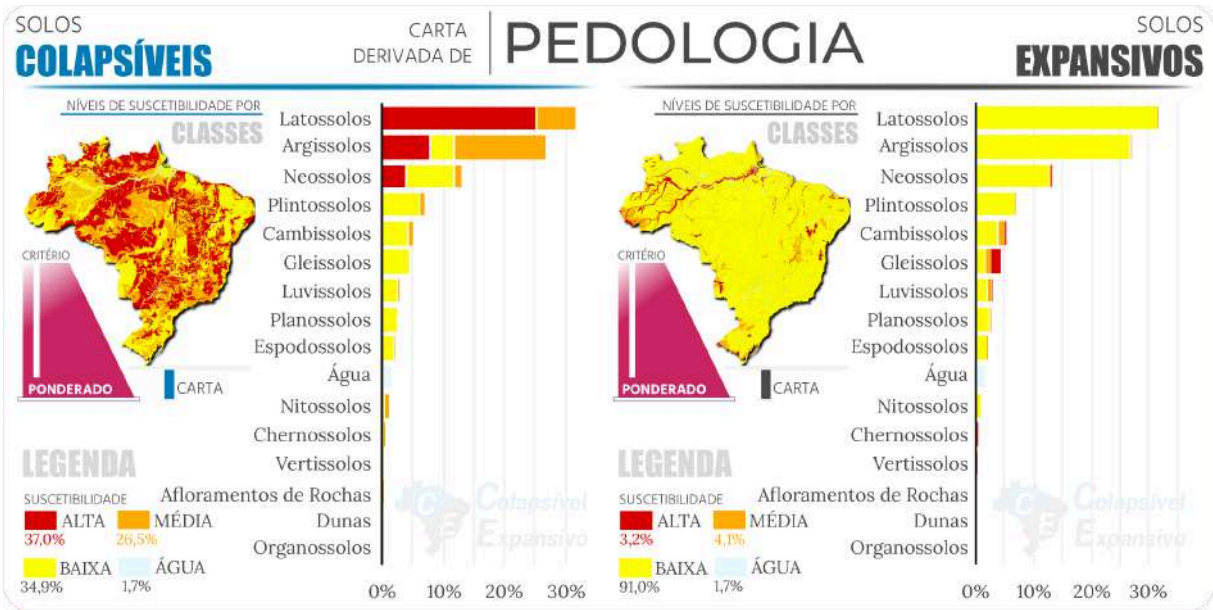
A Tabela 24, complementada pelo recurso de mapa de calor incorporado, oferece uma análise minuciosa dos percentuais, enquanto a Figura 91 ilustra de forma gráfica os resultados percentuais, proporcionando uma visão abrangente dos resultados percentuais oriundos da carta derivada de pedologia. Perante os resultados expostos, verifica-se que, em ambos os critérios (conservador e ponderado), a suscetibilidade alta demonstra maiores valores percentuais nos Latossolos em relação aos solos colapsíveis, enquanto a suscetibilidade baixa apresenta valores percentuais mais significativos nos solos expansivos.

Tabela 24 - Percentuais de suscetibilidade para solos colapsíveis e expansivos, segundo classes pedológicas (critério ponderado), referentes às cartas derivadas pedológicas.

P O N D E R A D O	SOLOS COLAPSÍVEIS			Classes Pedológicas	SOLOS EXPANSIVOS			Total Geral
	Alta	Média	Baixa		Alta	Média	Baixa	
	25,08%	6,51%	0,09%	Latossolos	0,00%	0,20%	31,49%	31,68%
	7,84%	15,22%	3,94%	Argissolos	0,00%	0,05%	26,95%	27,00%
	3,98%	1,49%	7,79%	Neossolos	0,23%	0,22%	12,80%	13,25%
	0,00%	0,89%	6,08%	Plintossolos	0,00%	0,11%	6,86%	6,97%
	0,00%	1,03%	4,24%	Cambissolos	0,28%	1,31%	3,68%	5,27%
	0,00%	0,00%	4,68%	Gleissolos	2,12%	0,97%	1,59%	4,68%
	0,00%	0,25%	2,60%	Luvissolos	0,17%	0,72%	1,97%	2,85%
	0,00%	0,00%	2,66%	Planossolos	0,00%	0,24%	2,42%	2,66%
	0,04%	0,04%	1,90%	Espodossolos	0,00%	0,03%	1,95%	1,98%
	0,00%	0,00%	1,67%	Água	0,00%	0,00%	1,67%	1,67%
	0,02%	0,85%	0,27%	Nitossolos	0,00%	0,00%	1,14%	1,14%
	0,00%	0,17%	0,27%	Chernossolos	0,25%	0,19%	0,00%	0,44%
	0,00%	0,00%	0,21%	Vertissolos	0,00%	0,00%	0,13%	0,21%
	0,00%	0,02%	0,11%	Afloramentos de Rochas	0,11%	0,10%	0,00%	0,13%
	0,00%	0,05%	0,00%	Dunas	0,00%	0,00%	0,05%	0,05%
	0,00%	0,00%	0,03%	Organossolos	0,00%	0,02%	0,01%	0,03%
	36,97%	26,50%	36,54%	Total Geral	3,16%	4,14%	92,70%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

Figura 91 - Representação gráfica dos níveis de suscetibilidade para solos colapsíveis e expansivos perante as cartas derivadas pedológicas, segundo classes (critério ponderado).



Fonte: Autor (2024).

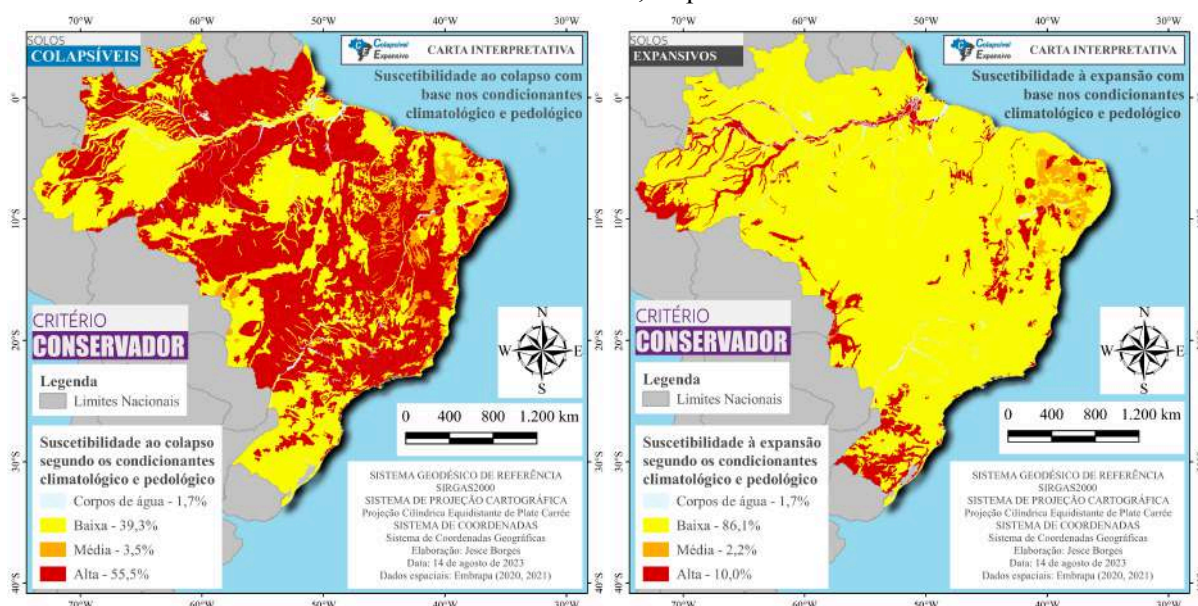
4.2.3 Cartas Interpretativas

São expostas as cartas interpretativas de suscetibilidade ao colapso e à expansão resultantes da compartimentação realizada entre os documentos cartográficos pertinentes aos condicionantes climatológico e pedológico. A exposição dos resultados está disposta em forma de tópicos segundo as denominações metodológicas adotadas neste trabalho, apresentando os produtos cartográficos de acordo com os critérios conservador, ponderado e inverso. A execução da compartimentação, que corresponde a superposição das cartas derivadas climatológica e pedológica, resultou nas cartas interpretativas de suscetibilidade ao colapso e à expansão perante os mencionados critérios.

4.2.3.1 Critério Conservador

O Brasil apresentou, em relação à suscetibilidade ao colapso, os seguintes percentuais: 55,5% para alta, 3,5% para média e 39,3% para baixa. No que concerne aos solos expansivos, a aplicação do critério conservador resultou na suscetibilidade alta em 10,0%, média em 2,2% e baixa em 86,1%. Em ambos cenários, os corpos de água correspondem ao percentual de 1,7%, Figura 92. No critério conservador, prevalece a condição mais desfavorável entre as suscetibilidades dos componentes da unidade de mapeamento.

Figura 92 - Cartas interpretativas de suscetibilidade ao colapso e à expansão, segundo critério conservador, respectivamente.



Fonte: Autor (2024).

De maneira geral, no contexto dos solos colapsíveis, todas as regiões demonstraram uma incidência mais significativa nos níveis de suscetibilidade alta e baixa, com predominância do nível alto. A suscetibilidade média foi registrada de forma discreta (Tabela 25). Em relação aos solos expansivos, a suscetibilidade baixa prevalece em todas as regiões do Brasil (Tabela 26).

Tabela 25 - Resultados obtidos no critério conservador para os solos colapsíveis referentes à carta interpretativa.

C O N S E R V A D O R	Região	Níveis de suscetibilidade			Corpos de água	Total Geral
		Alta	Média	Baixa		
	Norte	24,90%	0,04%	19,23%	1,16%	45,33%
	Nordeste	9,22%	2,62%	6,27%	0,14%	18,26%
	Centro-Oeste	12,45%	0,28%	6,05%	0,13%	18,91%
	Sudeste	7,63%	0,54%	2,54%	0,17%	10,88%
	Sul	1,34%	0,00%	5,23%	0,07%	6,63%
	Total Geral	55,54%	3,48%	39,32%	1,66%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 26 - Resultados obtidos no critério conservador para os solos expansivos referentes à carta interpretativa.

C O N S E R V A D O R	Região	Níveis de suscetibilidade			Corpos de água	Total Geral
		Alta	Média	Baixa		
	Norte	4,46%	0,00%	39,71%	1,16%	45,33%
	Nordeste	2,02%	2,09%	14,01%	0,14%	18,26%
	Centro-Oeste	0,99%	0,07%	17,72%	0,13%	18,91%
	Sudeste	0,41%	0,05%	10,25%	0,17%	10,88%
	Sul	2,10%	0,00%	4,46%	0,07%	6,63%
	Total Geral	9,98%	2,21%	86,15%	1,66%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

A Tabela 27 detalha os percentuais de suscetibilidade de acordo com os tipos climáticos. No contexto dos solos colapsíveis, o tipo climático B2 - Úmido registra os percentuais mais elevados de suscetibilidade, tanto na alta (19,49%) quanto na baixa (9,82%), enquanto o tipo C2 - Subúmido prevalece com suscetibilidade média (1,99%). Em relação aos solos expansivos, os tipos climáticos B4 - Úmido, C1 - Subúmido seco e B2 - Úmido demonstram as proporções mais significativas para suscetibilidade alta (2,42%), média (1,23%) e baixa (28,28%), respectivamente.

Em relação às classes pedológicas, Latossolos predominam na alta suscetibilidade (30,33%), enquanto Argissolos preponderam na suscetibilidade média (1,67%) e baixa (11,09%) para solos colapsíveis. Já nos solos expansivos, Gleissolos, Luvisolos e Latossolos apresentam maiores percentuais: alta (3,11%), média (0,98%) e baixa (30,99%), respectivamente (Tabela 28).

Tabela 27 - Percentuais de suscetibilidade por tipos climáticos resultantes da carta interpretativa, segundo critério conservador.

C O N S E R V A D O R	SOLOS COLAPSÍVEIS			Tipos Climáticos	SOLOS EXPANSIVOS			Total Geral
	Alta	Média	Baixa		Alta	Média	Baixa	
	19,49%	0,00%	9,82%	B2 - Úmido	1,03%	0,00%	28,28%	29,31%
	13,29%	0,00%	7,37%	B1 - Úmido	0,90%	0,00%	19,75%	20,65%
	8,06%	0,00%	6,41%	B3 - Úmido	1,60%	0,00%	12,87%	14,47%
	2,27%	0,00%	7,33%	B4 - Úmido	2,42%	0,00%	7,17%	9,60%
	4,94%	1,99%	2,37%	C2 - Subúmido	1,15%	0,98%	7,16%	9,29%
	3,65%	0,00%	4,04%	A - Superúmido	1,42%	0,00%	6,28%	7,70%
	3,42%	1,49%	1,98%	C1 - Subúmido seco	1,02%	1,23%	4,64%	6,88%
	0,00%	0,00%	1,67%	Corpos de Água	0,00%	0,00%	1,67%	1,67%
	0,43%	0,00%	0,00%	D - Semiárido	0,43%	0,00%	0,00%	0,43%
	0,00%	0,00%	0,00%	E - Árido	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	55,54%	3,48%	40,98%	Total Geral	9,98%	2,21%	87,81%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 28 - Percentuais de suscetibilidade por classes pedológicas resultantes da carta interpretativa, segundo critério conservador.

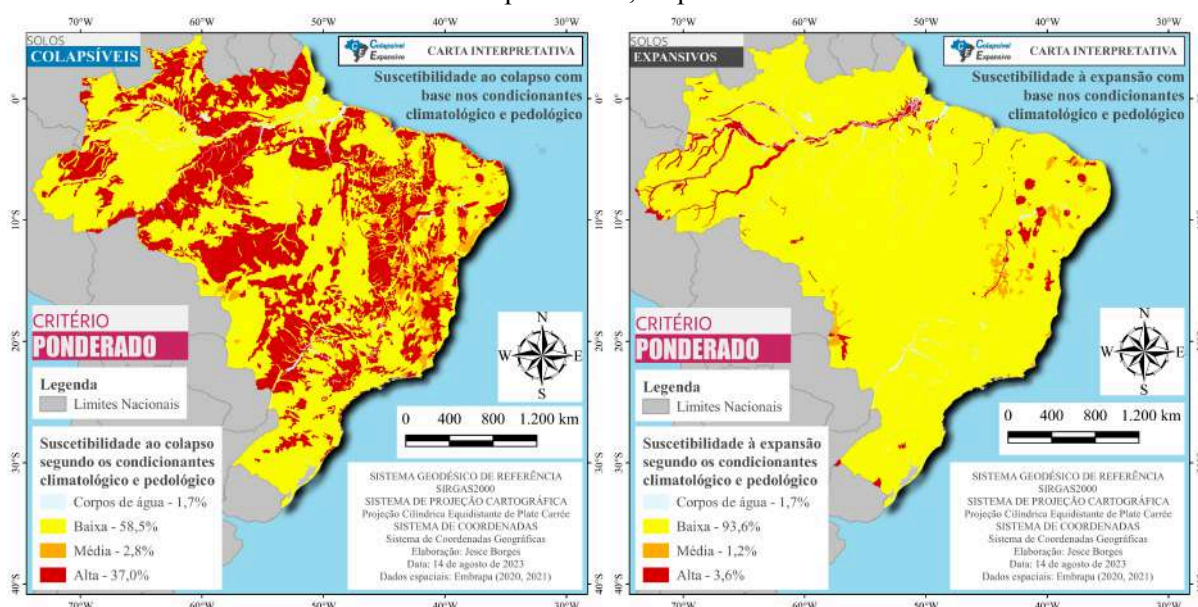
C O N S E R V A D O R	SOLOS COLAPSÍVEIS			Classes Pedológicas	SOLOS EXPANSIVOS			Total Geral
	Alta	Média	Baixa		Alta	Média	Baixa	
	30,33%	0,06%	1,16%	Latossolos	0,47%	0,09%	30,99%	31,55%
	14,12%	1,67%	11,09%	Argissolos	0,53%	0,44%	25,91%	26,88%
	6,16%	0,97%	6,07%	Neossolos	1,55%	0,39%	11,25%	13,20%
	1,42%	0,05%	5,46%	Plintossolos	0,26%	0,04%	6,63%	6,94%
	1,95%	0,12%	3,17%	Cambissolos	1,58%	0,00%	3,67%	5,24%
	0,19%	0,00%	4,47%	Gleissolos	3,11%	0,00%	1,56%	4,66%
	0,35%	0,23%	2,26%	Luvisolos	0,95%	0,98%	0,91%	2,84%
	0,12%	0,14%	2,38%	Planossolos	0,64%	0,21%	1,80%	2,65%
	0,76%	0,03%	1,18%	Espodossolos	0,03%	0,00%	1,94%	1,97%
	0,00%	0,00%	1,67%	Corpos de Água	0,00%	0,00%	1,67%	1,67%
	0,08%	0,00%	1,05%	Nitossolos	0,20%	0,00%	0,93%	1,13%
	0,00%	0,06%	0,40%	Sem Registro	0,00%	0,06%	0,40%	0,46%
	0,03%	0,13%	0,28%	Chernossolos	0,44%	0,00%	0,00%	0,44%
	0,01%	0,03%	0,17%	Vertissolos	0,21%	0,00%	0,00%	0,21%
	0,02%	0,00%	0,11%	Afloramentos de Rochas	0,00%	0,00%	0,13%	0,13%
	0,00%	0,00%	0,05%	Dunas	0,00%	0,00%	0,05%	0,05%
	0,00%	0,00%	0,03%	Organossolos	0,02%	0,00%	0,01%	0,03%
	55,54%	3,48%	40,98%	Total Geral	9,96%	2,21%	87,83%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

4.2.3.2 Critério Ponderado

Nos solos colapsíveis os resultados apontaram a suscetibilidade alta em 37,0%, média em 2,8% e baixa em 58,5% do território nacional. Em relação aos solos expansivos, constatou-se a suscetibilidade alta em 3,6%, média em 1,2% e baixa em 93,6% da extensão territorial brasileira. Os produtos cartográficos resultantes estão apresentados na Figura 93. No critério ponderado, a suscetibilidade de cada unidade de mapeamento resulta da aplicação de uma média ponderada nas suscetibilidades atribuídas aos seus componentes.

Figura 93 - Cartas interpretativas de suscetibilidade ao colapso e à expansão, segundo critério ponderado, respectivamente.



Fonte: Autor (2024).

A suscetibilidade baixa (58,5%) nos solos colapsíveis demonstrou predominância em todas as regiões, embora tenha sido observada uma relevante incidência de suscetibilidade alta (37,0%). A suscetibilidade média (2,8%) exibiu uma proporção discreta, em um cenário análogo ao critério anterior. Quanto aos solos expansivos, similarmente ao critério conservador, a suscetibilidade baixa mantém sua predominância em todas as regiões do Brasil. Os detalhes dos percentuais resultantes para os solos colapsíveis e expansivos estão apresentados na Tabela 29 e Tabela 30, respectivamente.

Quanto aos tipos climáticos (Tabela 31) e às classes pedológicas (Tabela 32), em geral, nota-se que, apesar das variações quantitativas, a predominância percentual segue um padrão semelhante ao critério conservador para solos colapsíveis e expansivos. A exceção é notada

nos níveis de suscetibilidade alta e baixa no tipo climático B2 - Úmido para solos colapsíveis, visto que houve inversão na predominância percentual.

Tabela 29 - Resultados obtidos no critério ponderado para os solos colapsíveis referentes à carta interpretativa.

P O N D E R A D O	Região	Níveis de suscetibilidade			Corpos de água	Total Geral
		Alta	Média	Baixa		
	Norte	16,69%	0,11%	27,37%	1,16%	45,33%
	Nordeste	6,74%	1,80%	9,58%	0,14%	18,26%
	Centro-Oeste	8,54%	0,18%	10,06%	0,13%	18,91%
	Sudeste	4,02%	0,69%	6,00%	0,17%	10,88%
	Sul	1,05%	0,00%	5,51%	0,07%	6,63%
	Total Geral	37,05%	2,78%	58,52%	1,66%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 30 - Resultados obtidos no critério ponderado para os solos expansivos referentes à carta interpretativa.

P O N D E R A D O	Região	Níveis de suscetibilidade			Corpos de água	Total Geral
		Alta	Média	Baixa		
	Norte	2,31%	0,00%	41,86%	1,16%	45,33%
	Nordeste	0,98%	0,73%	16,41%	0,14%	18,26%
	Centro-Oeste	0,14%	0,25%	18,38%	0,13%	18,91%
	Sudeste	0,05%	0,23%	10,43%	0,17%	10,88%
	Sul	0,09%	0,00%	6,48%	0,07%	6,63%
	Total Geral	3,57%	1,22%	93,55%	1,66%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 31 - Percentuais de suscetibilidade por tipos climáticos resultantes da carta interpretativa, segundo critério ponderado.

P O N D E R A D O	SOLOS COLAPSÍVEIS			Tipos Climáticos	SOLOS EXPANSIVOS			Total Geral
	Alta	Média	Baixa		Alta	Média	Baixa	
	14,03%	0,00%	15,28%	B2 - Úmido	0,47%	0,00%	28,84%	29,31%
	7,78%	0,00%	12,87%	B1 - Úmido	0,25%	0,00%	20,40%	20,65%
	5,56%	0,00%	8,91%	B3 - Úmido	0,43%	0,00%	14,04%	14,47%
	1,18%	0,00%	8,41%	B4 - Úmido	0,65%	0,00%	8,95%	9,60%
	3,39%	1,71%	4,19%	C2 - Subúmido	0,28%	0,63%	8,38%	9,29%
	2,36%	0,00%	5,34%	A - Superúmido	0,68%	0,00%	7,01%	7,70%
	2,30%	1,06%	3,52%	C1 - Subúmido seco	0,38%	0,59%	5,92%	6,88%
	0,00%	0,00%	1,67%	Corpos de Água	0,00%	0,00%	1,67%	1,67%
	0,43%	0,00%	0,00%	D - Semiárido	0,43%	0,00%	0,00%	0,43%
	0,00%	0,00%	0,00%	E - Árido	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	37,05%	2,78%	60,18%	Total Geral	3,57%	1,22%	95,22%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 32 - Percentuais de suscetibilidade por classes pedológicas resultantes da carta interpretativa, segundo critério ponderado.

	SOLOS COLAPSÍVEIS			Classes Pedológicas	SOLOS EXPANSIVOS			Total Geral
	Alta	Média	Baixa		Alta	Média	Baixa	
P O N D E R A D O	24,97%	0,48%	6,09%	Latossolos	0,13%	0,19%	31,23%	31,55%
	7,85%	1,50%	17,53%	Argissolos	0,04%	0,01%	26,83%	26,88%
	4,04%	0,27%	8,89%	Neossolos	0,36%	0,00%	12,84%	13,20%
	0,00%	0,03%	6,90%	Plintossolos	0,00%	0,00%	6,94%	6,94%
	0,00%	0,16%	5,08%	Cambissolos	0,28%	0,41%	4,55%	5,24%
	0,00%	0,00%	4,66%	Gleissolos	2,11%	0,14%	2,41%	4,66%
	0,07%	0,25%	2,52%	Luvissolos	0,24%	0,24%	2,35%	2,84%
	0,04%	0,00%	2,60%	Planossolos	0,04%	0,05%	2,55%	2,65%
	0,04%	0,00%	1,93%	Espodossolos	0,00%	0,00%	1,97%	1,97%
	0,00%	0,00%	1,67%	Corpos de Água	0,00%	0,00%	1,67%	1,67%
	0,02%	0,00%	1,11%	Nitossolos	0,00%	0,00%	1,13%	1,13%
	0,00%	0,06%	0,40%	Sem Registro	0,00%	0,06%	0,40%	0,46%
	0,00%	0,01%	0,43%	Chernossolos	0,24%	0,06%	0,13%	0,44%
	0,01%	0,00%	0,20%	Vertissolos	0,12%	0,05%	0,03%	0,21%
	0,00%	0,01%	0,12%	Afloramentos de Rochas	0,00%	0,00%	0,13%	0,13%
	0,00%	0,00%	0,05%	Dunas	0,00%	0,00%	0,05%	0,05%
	0,00%	0,00%	0,03%	Organossolos	0,00%	0,00%	0,03%	0,03%
	37,05%	2,78%	60,18%	Total Geral	3,57%	1,22%	95,22%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

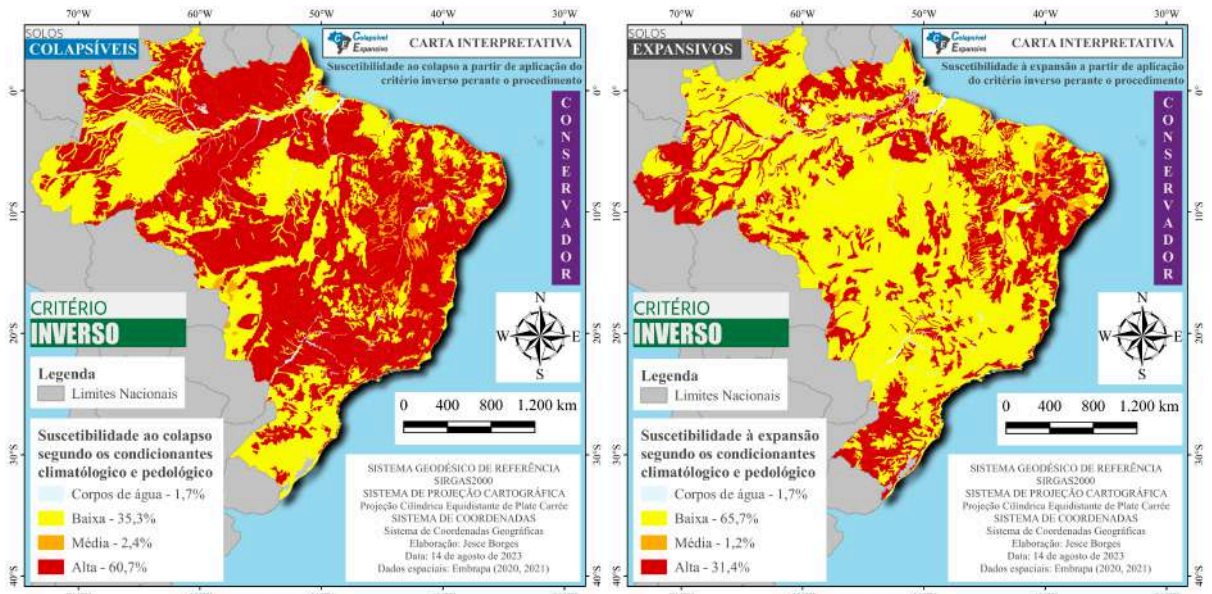
Reitera-se que a abordagem generalista e as metodologias empregadas neste trabalho não permitem exatidão na identificação do comportamento colapsível e expansivo, dado que a área abrangida neste estudo tem extensão continental, contendo um expressivo volume de dados, de modo uma análise pormenorizada seria inviável. Tal limitação é reforçada pela complexidade inerente aos referidos comportamentos, posto que existem diversos fatores envolvendo fenômenos de colapso e expansão.

Portanto, este trabalho tem caráter orientativo, visto que identifica as áreas que requerem uma maior atenção durante a fase de planejamento de um empreendimento, servindo como material de referência para a identificação de regiões com suscetibilidade média e alta. Além disso, dependendo da localização do empreendimento, permite disponibilizar, mediante o BANDASE, informações da literatura sobre os parâmetros geotécnicos dos solos estudados na região.

4.2.3.3 Critério Inverso

Com base na metodologia conservadora, a aplicação do critério inverso resultou nos seguintes níveis de suscetibilidade ao colapso: alta em 60,7%, média em 2,4% e baixa em 35,3%. Em relação aos solos expansivos, o emprego do referido critério resultou na suscetibilidade alta em 31,4%, média em 1,2% e baixa em 65,7% (Figura 94). Baseado na Tabela 33 e Tabela 34, é possível constatar um acréscimo nos percentuais de alta suscetibilidade quando contrastados com o critério conservador (subitem 4.2.3.1), corroborando com as expectativas decorrentes da abordagem do critério inverso.

Figura 94 - Cartas interpretativas resultantes da aplicação do critério inverso para a suscetibilidade ao colapso e à expansão, respectivamente (procedimento conservador).



Fonte: Autor (2024).

Tabela 33 - Resultados obtidos no critério inverso para os solos colapsíveis referentes à carta interpretativa oriunda da climatologia e pedologia (procedimento conservador).

I N V E R S O	Conservador	Níveis de suscetibilidade			Corpos de água	Total Geral
	Região	Alta	Média	Baixa		
	Norte	25,15%	0,04%	18,97%	1,16%	45,33%
	Nordeste	12,07%	1,72%	4,34%	0,14%	18,26%
	Centro-Oeste	13,10%	0,27%	5,41%	0,13%	18,91%
	Sudeste	8,52%	0,35%	1,84%	0,17%	10,88%
	Sul	1,84%	0,00%	4,72%	0,07%	6,63%
	Total Geral	60,68%	2,38%	35,27%	1,66%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

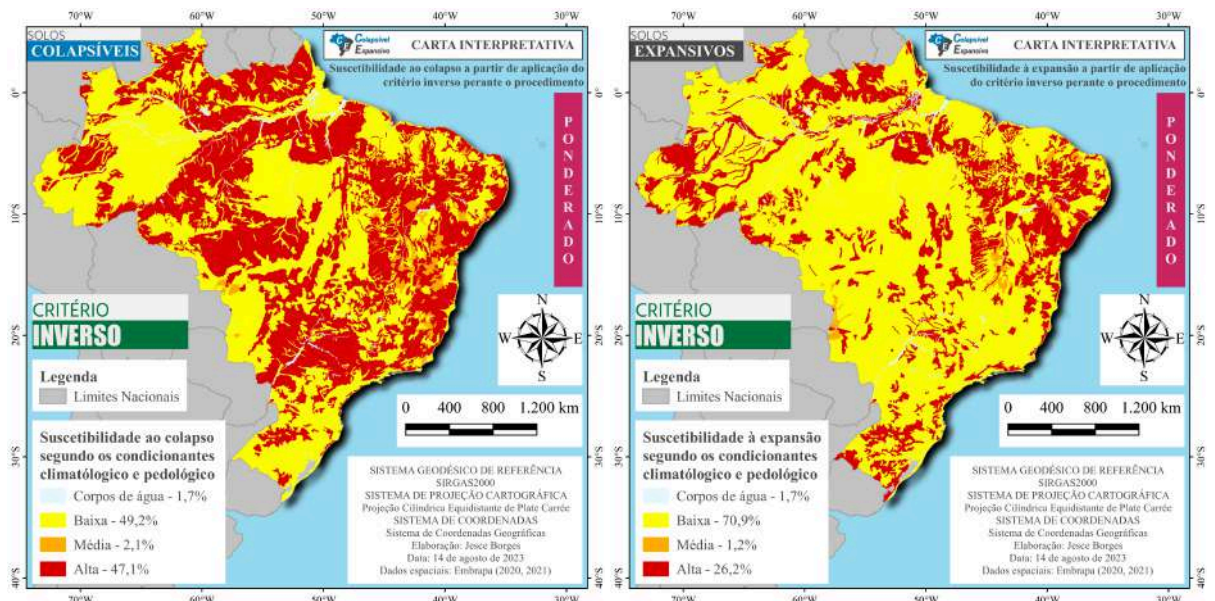
Tabela 34 - Resultados obtidos no critério inverso para os solos expansivos referentes à carta interpretativa oriunda da climatologia e pedologia (procedimento conservador).

I N V E R S O	Conservador	Níveis de suscetibilidade				Total Geral
	Região	Alta	Média	Baixa	Corpos de água	
	Norte	13,98%	0,00%	30,18%	1,16%	45,33%
	Nordeste	8,95%	1,11%	8,06%	0,14%	18,26%
	Centro-Oeste	3,10%	0,07%	15,60%	0,13%	18,91%
	Sudeste	2,17%	0,05%	8,49%	0,17%	10,88%
	Sul	3,23%	0,00%	3,33%	0,07%	6,63%
	Total Geral	31,44%	1,23%	65,67%	1,66%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

No contexto do critério ponderado, os níveis de suscetibilidade ao colapso resultaram nos seguintes percentuais: 47,1% para alta, 2,1% para média e 49,2% para baixa. Quanto aos solos expansivos, constatou-se a suscetibilidade alta em 26,2%, média em 1,2% e baixa em 70,9%. Os corpos de água correspondem ao percentual de 1,7%, Figura 95. As informações detalhadas por região estão contidas na Tabela 35 e Tabela 36. Novamente, observa-se um aumento nos percentuais de suscetibilidade alta, resultante da natureza metodológica inerente ao critério inverso.

Figura 95 - Cartas interpretativas resultantes da aplicação do critério inverso para a suscetibilidade ao colapso e à expansão, respectivamente (procedimento ponderado).



Fonte: Autor (2024).

Tabela 35 - Resultados obtidos no critério inverso para os solos colapsíveis referentes à carta interpretativa oriunda da climatologia e pedologia (procedimento ponderado).

I N V E R S O	Ponderado	Níveis de suscetibilidade				Total Geral
	Região	Alta	Média	Baixa	Corpos de água	
	Norte	19,05%	0,05%	25,07%	1,16%	45,33%
	Nordeste	10,07%	1,42%	6,63%	0,14%	18,26%
	Centro-Oeste	9,67%	0,18%	8,93%	0,13%	18,91%
	Sudeste	6,58%	0,44%	3,69%	0,17%	10,88%
	Sul	1,72%	0,00%	4,84%	0,07%	6,63%
	Total Geral	47,10%	2,08%	49,16%	1,66%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 36 - Resultados obtidos no critério inverso para os solos expansivos referentes à carta interpretativa oriunda da climatologia e pedologia (procedimento ponderado).

I N V E R S O	Ponderado	Níveis de suscetibilidade				Total Geral
	Região	Alta	Média	Baixa	Corpos de água	
	Norte	12,21%	0,00%	31,96%	1,16%	45,33%
	Nordeste	8,00%	0,72%	9,40%	0,14%	18,26%
	Centro-Oeste	2,25%	0,25%	16,27%	0,13%	18,91%
	Sudeste	1,82%	0,23%	8,66%	0,17%	10,88%
	Sul	1,95%	0,00%	4,61%	0,07%	6,63%
	Total Geral	26,23%	1,21%	70,90%	1,66%	100,00%

Fonte: Autor (2024).

4.2.3.4 Redes Neurais Artificiais

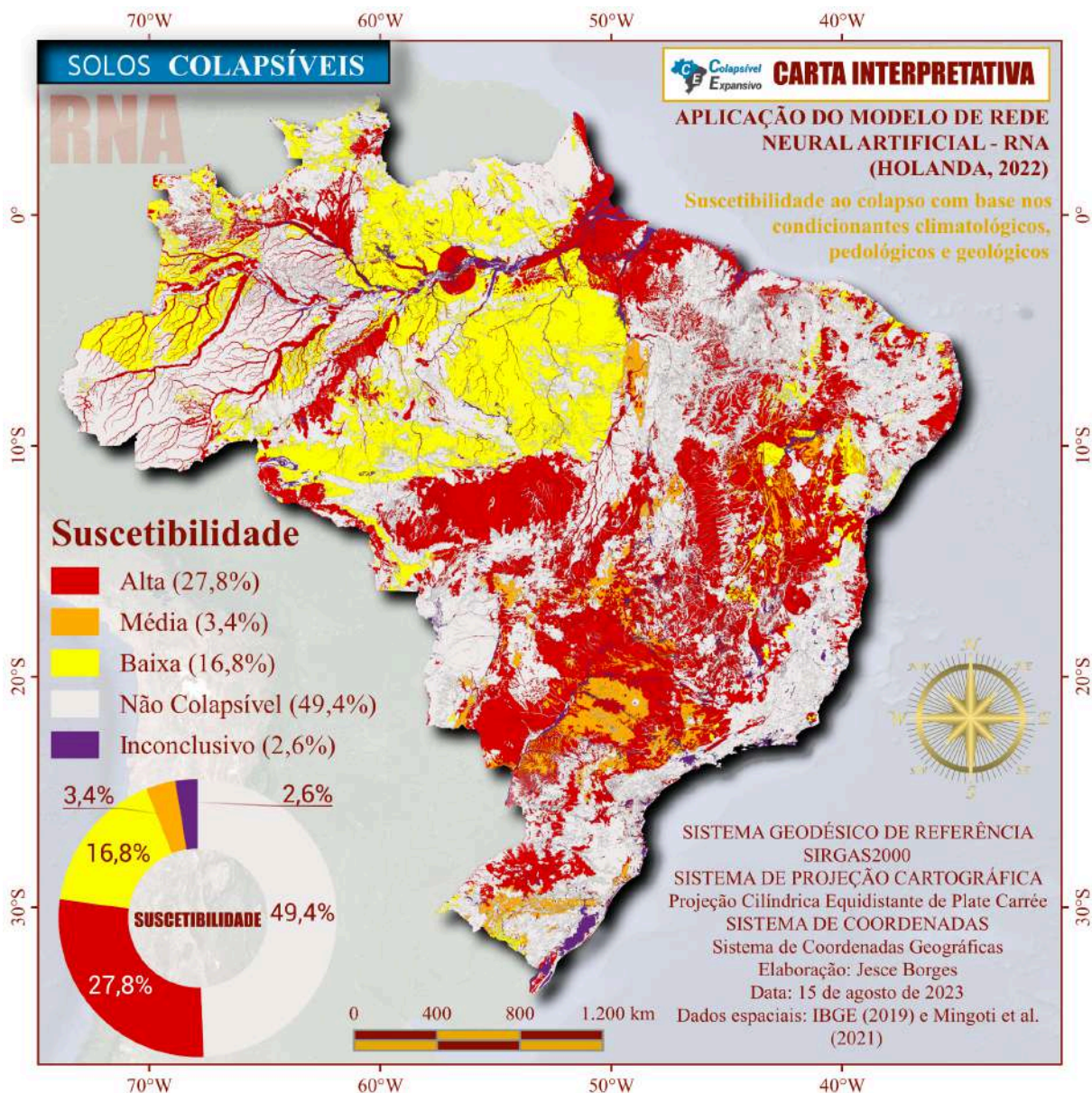
O processo de elaboração de documentos cartográficos, a partir da aplicação do modelo de RNA elaborado por Holanda (2022), resultou em 2 (duas) cartas interpretativas de suscetibilidade do Brasil, uma destinada aos solos colapsíveis e outra aos solos expansivos.

No que diz respeito aos solos colapsíveis, a carta interpretativa apontou suscetibilidade alta em 27,8%, média em 3,4% e baixa em 16,8% da área do território nacional. A ausência de comportamento colapsível foi constatada em 49,4%. Os corpos de água, as áreas urbanas e os registros incompletos correspondem ao percentual de 2,6%, Figura 96.

Ao analisar os produtos cartográficos expostos, percebe-se que, quanto aos solos colapsíveis, a alta suscetibilidade teve maior concentração na região Centro-Oeste, com destaque para o centro do Mato Grosso (MT), o sul do Mato Grosso do Sul (MS) e sul de Goiás (GO). Na região Sudeste, prevalecem as suscetibilidades média e alta na parte oeste da

região, cabendo destaque para o estado de São Paulo (SP). No nordeste da região Norte, observa-se alta suscetibilidade, especificamente no norte do Pará (PA).

Figura 96 - Carta interpretativa resultante da aplicação de RNA para solos colapsíveis.



Fonte: Autor (2024).

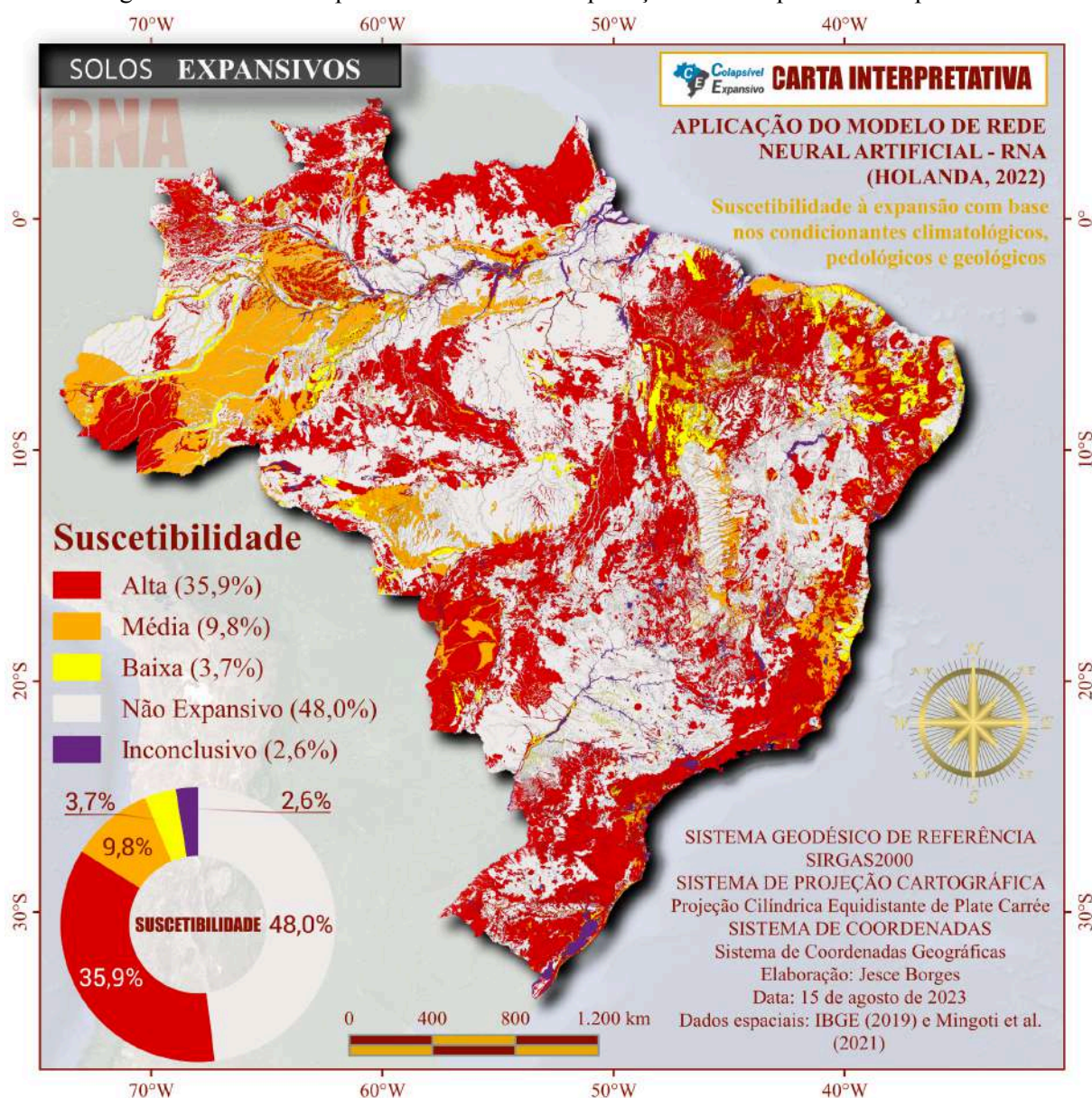
Em relação aos solos expansivos, constatou-se suscetibilidade alta em 35,9%, média em 9,8% e baixa em 3,7% da área do território brasileiro. A ausência de comportamento expansivo representa 48,0%, enquanto os corpos de água, as áreas urbanas e os registros incompletos equivalem a 2,6% do território nacional, Figura 97.

A alta suscetibilidade predominou nas regiões Nordeste e Sul, com destaque também para a parte sudoeste da região Centro-Oeste e a faixa litorânea da região Sudeste, de São

Paulo (SP) a Espírito Santo (ES). Cabe destacar os estados do Acre (AC), Amapá (AP), Roraima (RR) e Rio de Janeiro (RJ), nos quais a alta suscetibilidade prevaleceu. A concentração de alta suscetibilidade na Região Nordeste e no Pantanal Mato-Grossense coincide exatamente com as áreas de ocorrência da classe Vertissolo (Quadro I.13).

Na categoria de alta suscetibilidade, os percentuais mais elevados estão no tipo climático Úmido, na classe Neossolo e na unidade geológica Amazônia. Quanto à média de suscetibilidade, há variação na classe (Argissolo) e na unidade geológica (Amazonas-Solimões). Já a suscetibilidade baixa é mais predominante nas seguintes classificações: Úmido, Argissolo e Cobertura Cenozóica.

Figura 97 - Carta interpretativa resultante da aplicação de RNA para solos expansivos.



Fonte: Autor (2024).

4.2.4 Verificação da metodologia

Resultante da superposição dos locais de ocorrência sobre os documentos cartográficos, o procedimento de verificação metodológica apresentou os resultados a seguir.

4.2.4.1 Carta derivada climatológica

No tocante aos solos colapsíveis, ao realizar a superposição dos registros de ocorrência sobre a carta derivada de suscetibilidade climática, constatou-se que 29 registros apresentaram convergência na suscetibilidade alta, 91 na média e 147 na baixa. Tomando como referência a quantidade de acertos condicionada à área ocupada por suscetibilidades médias e altas, constata-se o percentual de acertos equivalente a 44,9%, Figura 98.

Figura 98 - Resultados obtidos na verificação da metodologia para os solos colapsíveis, segundo a carta derivada climatológica.



Fonte: Autor (2024).

Em relação aos solos expansivos, verificou-se o seguinte resultado quanto à convergência: 7 registros na suscetibilidade alta, 101 na média e 148 na baixa. Utilizando o referencial citado anteriormente, verifica-se o percentual de 42,1% referente aos acertos, Figura 99. Percebe-se que na região Nordeste prepondera as suscetibilidades alta e média.

Figura 99 - Resultados obtidos na verificação da metodologia para os solos expansivos, segundo a carta derivada climatológica.

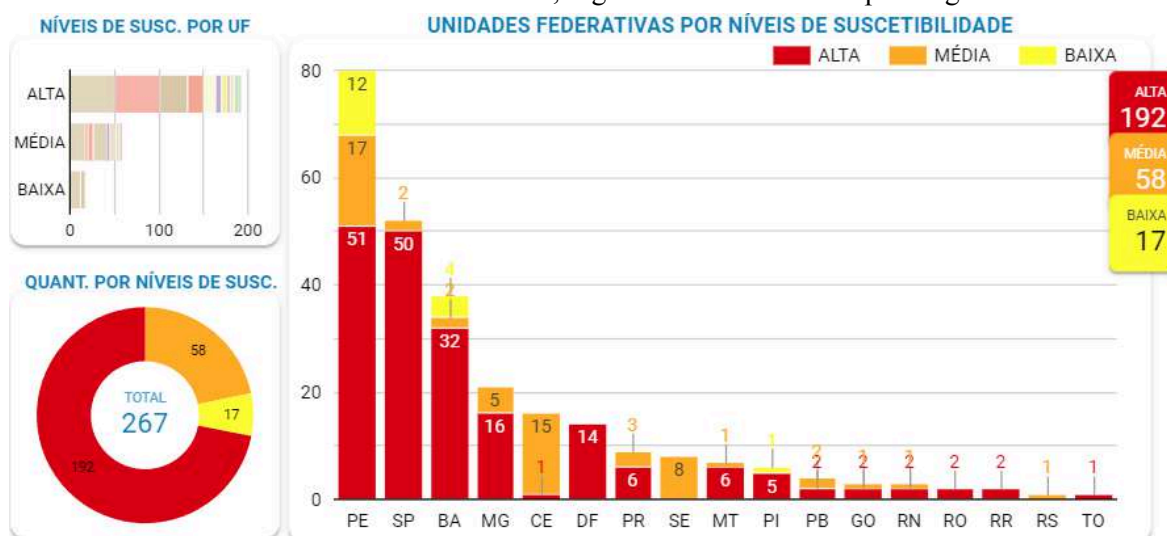


Fonte: Autor (2024).

4.2.4.2 Carta derivada pedológica

No tocante ao critério conservador, a superposição dos registros de ocorrência sobre a carta derivada de suscetibilidade pedológica resultou em 192 registros convergindo na suscetibilidade alta, 58 na média e 17 na baixa, Figura 100. Tal conjuntura implica em 93,6% de acertos perante o referencial adotado, ou seja, acertos equivalem às suscetibilidades alta e média.

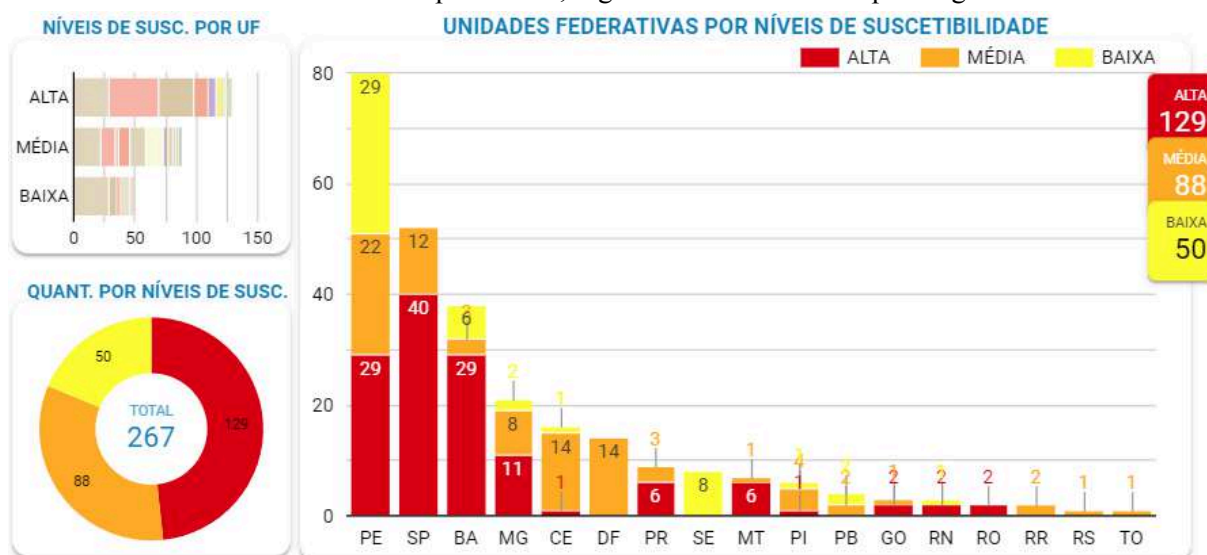
Figura 100 - Resultados obtidos na verificação da metodologia para os solos colapsíveis perante o critério conservador, segundo a carta derivada pedológica.



Fonte: Autor (2024).

Ainda em relação aos solos colapsíveis, a aplicação do critério ponderado resultou na convergência de 129 registros na suscetibilidade alta, 88 na média e 50 na baixa, perfazendo o percentual de acertos correspondente a 81,2%, Figura 101.

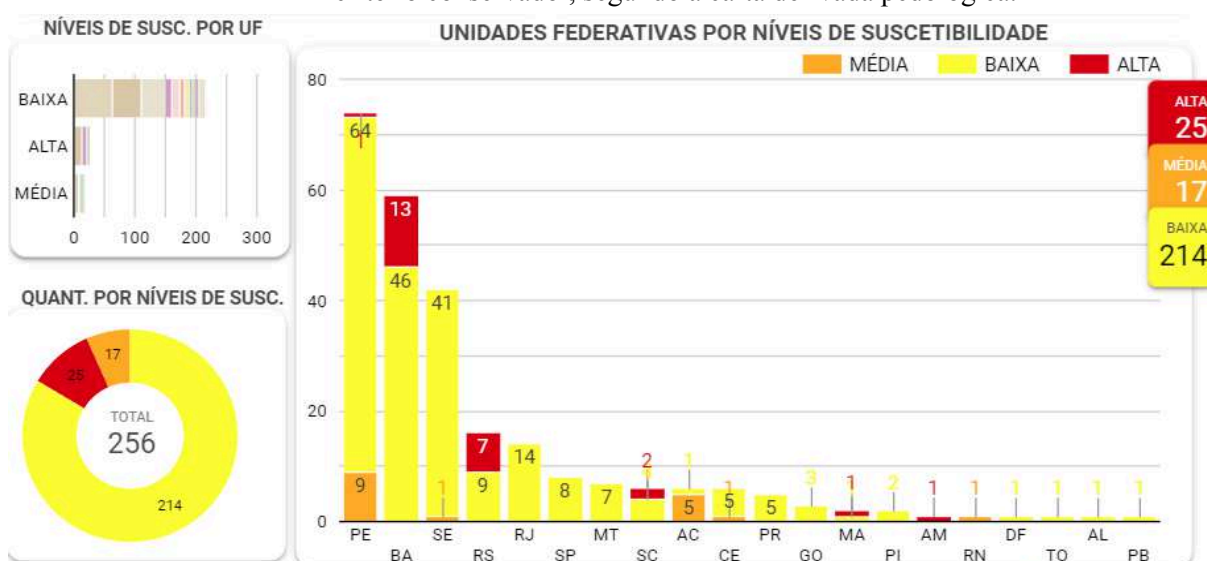
Figura 101 - Resultados obtidos na verificação da metodologia para os solos colapsíveis perante o critério ponderado, segundo a carta derivada pedológica.



Fonte: Autor (2024).

No que se refere aos solos expansivos, o emprego do critério conservador resultou em 25 registros convergindo na suscetibilidade alta, 17 na média e 214 na baixa, perfazendo 16,4% de acertos, Figura 102.

Figura 102 - Resultados obtidos na verificação da metodologia para os solos expansivos perante o critério conservador, segundo a carta derivada pedológica.



Fonte: Autor (2024).

Na abordagem do critério ponderado, identificaram-se 3 registros convergentes na suscetibilidade alta, ao passo que 20 registros se encontraram inseridos na suscetibilidade média e 233 na suscetibilidade baixa. A análise culminou em um índice de acertos correspondente a 8,9%, conforme ilustrado na Figura 103.

Figura 103 - Resultados obtidos na verificação da metodologia para os solos expansivos perante o critério ponderado, segundo a carta derivada pedológica.



Fonte: Autor (2024).

4.2.4.3 Carta interpretativa

Seguindo a mesma sistemática de apresentação dos resultados, a superposição dos registros de ocorrência de solos colapsíveis sobre as cartas interpretativas resultou, no que diz respeito ao critério conservador, em uma convergência de 211 registros na categoria de suscetibilidade alta, 30 na categoria média e 26 na categoria baixa, totalizando um índice de acerto de 90,2%, conforme ilustrado na Figura 104.

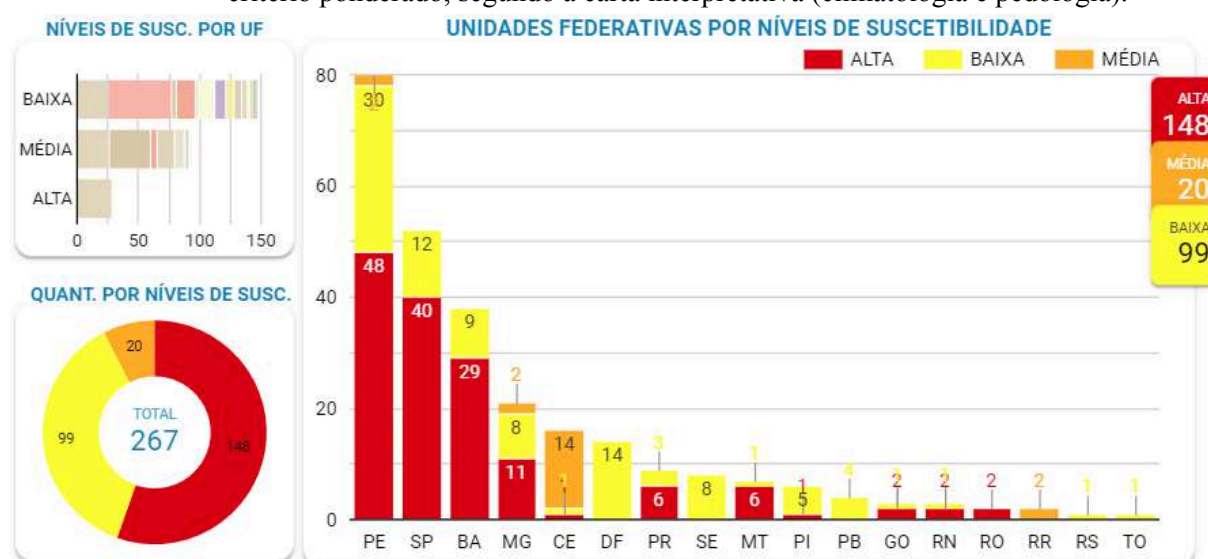
Quanto ao critério ponderado, verificou-se a convergência de 148 registros na categoria de suscetibilidade alta, 20 na categoria média e 99 na categoria baixa. Esse processo de convergência resultou no percentual de acertos de 62,9%, como evidenciado na representação visual da Figura 105.

Figura 104 - Resultados obtidos na verificação da metodologia para os solos colapsíveis perante o critério conservador, segundo a carta interpretativa (climatologia e pedologia).



Fonte: Autor (2024).

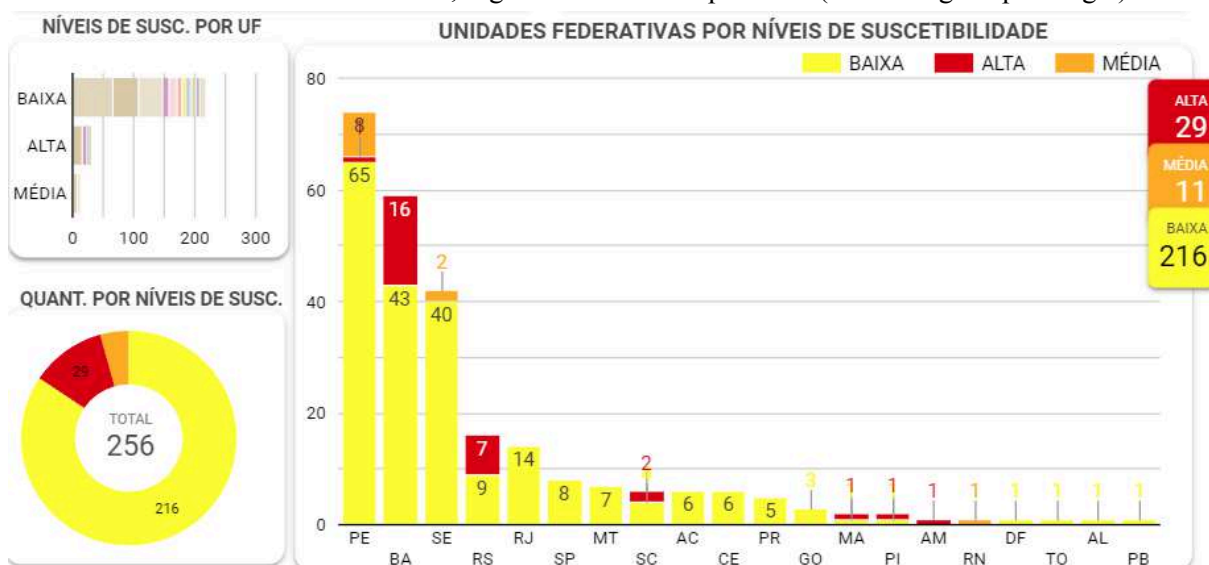
Figura 105 - Resultados obtidos na verificação da metodologia para os solos colapsíveis perante o critério ponderado, segundo a carta interpretativa (climatologia e pedologia).



Fonte: Autor (2024).

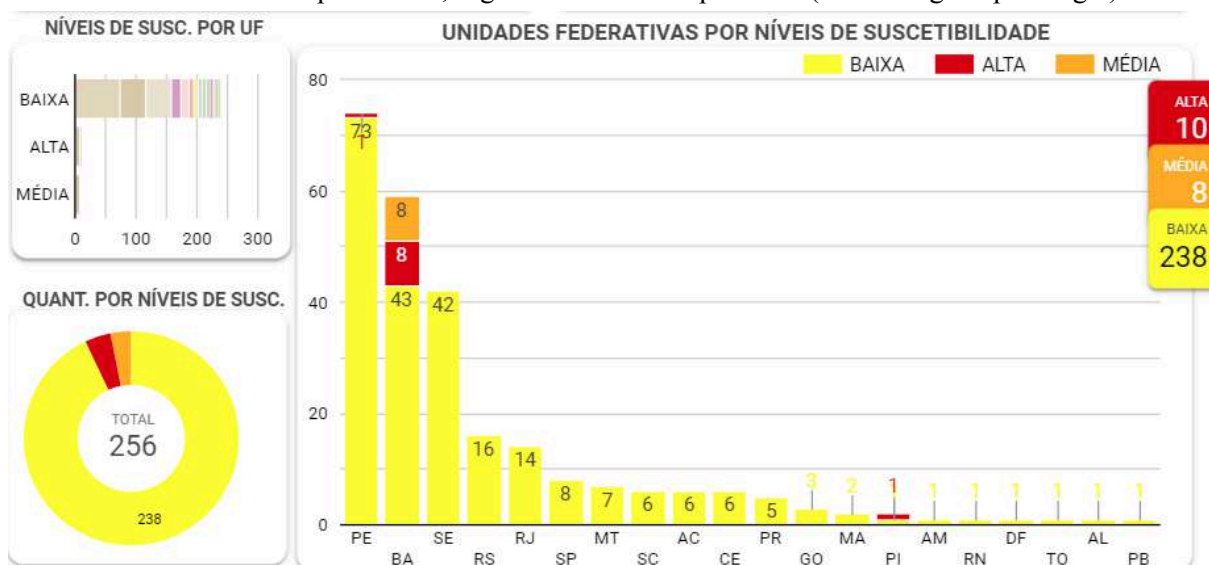
Nos solos expansivos, constataram-se, no critério conservador, 29 registros convergindo na suscetibilidade alta, 11 na média e 216 na baixa. Em relação ao critério ponderado, 10 registros convergiram na suscetibilidade alta, 8 na média e 238 na baixa. Os percentuais de acertos nos referidos critérios resultaram em 15,6% e 7,0%, respectivamente. Graficamente, esses resultados estão externados para cada critério nas figuras abaixo.

Figura 106 - Resultados obtidos na verificação da metodologia para os solos expansivos perante o critério conservador, segundo a carta interpretativa (climatologia e pedologia).



Fonte: Autor (2024).

Figura 107 - Resultados obtidos na verificação da metodologia para os solos expansivos perante o critério ponderado, segundo a carta interpretativa (climatologia e pedologia).



Fonte: Autor (2024).

Perante todo o exposto, a Tabela 37 apresenta resumidamente os resultados externados anteriormente. A referida tabela apresenta na primeira coluna os produtos cartográficos; na segunda, os solos especiais e, na terceira, os critérios adotados. Da quarta a sétima coluna, constam os percentuais de área para cada nível de suscetibilidade. Da oitava a décima primeira, constam os quantitativos de registros que convergiram em cada nível de suscetibilidade. Por fim, as últimas colunas apresentam os percentuais de acertos condicionados às suscetibilidades alta e média.

Tabela 37 - Resumo dos resultados consolidados.

Produto Cartográfico	Solo	Critério	Percentuais				Verificação Metodológica				Acertos	
			Alta	Média	Baixa	Água	Alta	Média	Baixa	Total	Alta	Média
Carta derivada climatológica	Colapsível	-	0,4%	16,4%	83,2%	-	29	91	147	267	44,94%	
	Expansivo	-					7	101	148	256	42,19%	
Carta derivada pedológica	Colapsível	Conservador	55,6%	27,6%	15,1%	1,7%	192	58	17	267	93,63%	
		Ponderado	36,9%	26,5%	34,9%	1,7%	129	88	50	267	81,27%	
	Expansivo	Conservador	9,6%	3,3%	85,4%	1,7%	25	17	214	256	16,41%	
		Ponderado	3,2%	4,1%	91,0%	1,7%	3	20	233	256	8,98%	
Carta interpretativa	Colapsível	Conservador	55,5%	3,5%	39,3%	1,7%	211	30	26	267	90,26%	
		Ponderado	37,0%	2,8%	58,5%	1,7%	148	20	99	267	62,92%	
	Expansivo	Conservador	10,0%	2,2%	86,1%	1,7%	29	11	216	256	15,63%	
		Ponderado	3,6%	1,2%	93,6%	1,7%	10	8	238	256	7,03%	
Carta interpretativa (Critério Inverso)	Colapsível	Conservador	60,7%	2,4%	35,3%	1,7%	-	-	-	-	-	-
		Ponderado	47,1%	2,1%	49,2%	1,7%	-	-	-	-	-	-
	Expansivo	Conservador	31,4%	1,2%	65,7%	1,7%	-	-	-	-	-	-
		Ponderado	26,2%	1,2%	70,9%	1,7%	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor (2024).

No que se refere à carta derivada climatológica, os percentuais de acertos para os solos colapsíveis e expansivos alcançaram valores próximos ao ponto médio. Em relação à carta derivada pedológica e à carta interpretativa, na sinopse dos solos colapsíveis constata-se percentuais elevados em ambos os critérios. Tal cenário não ocorreu com os solos expansivos.

Perante a conjuntura exposta, depreende-se que, apesar de baixos valores percentuais de suscetibilidade alta e média na carta derivada climatológica, o maior quantitativo de acertos ocorreu nas áreas que apresentam as referidas suscetibilidades. Esse cenário representa uma evidência sobre a adequabilidade da metodologia posto que, mesmo diante de um território continental com elevado percentual de área com suscetibilidade baixa, constatarem-se percentuais de acerto razoáveis frente ao cenário desfavorável no que tange à convergência em área de suscetibilidade alta e média.

Na carta derivada pedológica e na carta interpretativa, infere-se que os percentuais elevados obtidos para os solos colapsíveis têm relação com a expressiva parcela de área do território nacional (31,7%) ocupada pela classe dos latossolos. Essa classe pedológica apresenta características favoráveis ao comportamento dos solos colapsíveis, implicando na atribuição da suscetibilidade alta e média para os componentes que contêm esse nível categórico (ordem).

No tocante aos solos expansivos, depreende-se que a constatação de percentuais baixos está relacionada à pequena presença de componentes constituídos por argilominerais do grupo 2:1. A presença desses minerais, constituídos por silicatos hidratados de alumínio e

ferro, representa uma característica preponderante dos solos expansivos, dado que são responsáveis pelo comportamento de expansão desses solos.

Visando analisar o desempenho dos critérios, realizou-se a plotagem da matriz de confusão para cartas derivadas pedológicas e cartas interpretativas. Na análise comparativa, constatou-se que as métricas do critério conservador alcançaram melhores valores em relação ao critério ponderado.

Em relação às cartas derivadas e interpretativas, a adoção do critério conservador resultou, respectivamente, na acurácia de 55,8% e 53,7%, na taxa de erros de 44,2% e 46,3%, na precisão de 16,4% e 15,6%, no valor preditivo negativo de 93,6% e 90,3%, na sensibilidade de 71,2% e 60,6% e na especificidade de 53,9% e 52,7%, Figura 108.

Figura 108 - Matrizes de confusão referentes às cartas derivadas e interpretativas.



Fonte: Autor (2024).

Nota-se que os Valores Preditivos Negativos (VPN) apontam o critério conservador com percentuais elevados na identificação de solos colapsíveis. Por outro lado, os Valores

Preditivos Positivos (VPP), métrica também conhecida como precisão, indicam cenário oposto na identificação dos solos expansivos.

Uma congruência nos resultados das métricas se faz presente, uma vez que o VPN avalia a capacidade do modelo em corretamente identificar classificações negativas, enquanto o VPP quantifica a habilidade do modelo em acertar classificações positivas. Nota-se que as classificações negativas estão associadas aos solos colapsíveis (VN e FN) e apresentam números consideráveis nos verdadeiros negativos, ao passo que as classificações positivas correspondem aos solos expansivos (VP e FP) e exibem quantidades significativas nos falsos positivos.

Conforme descrito anteriormente, depreende-se que tais cenários têm relação com a alta parcela de área do território nacional ocupada pela classe dos latossolos e a baixa parcela de área ocupada por argilominerais do grupo 2:1, respectivamente.

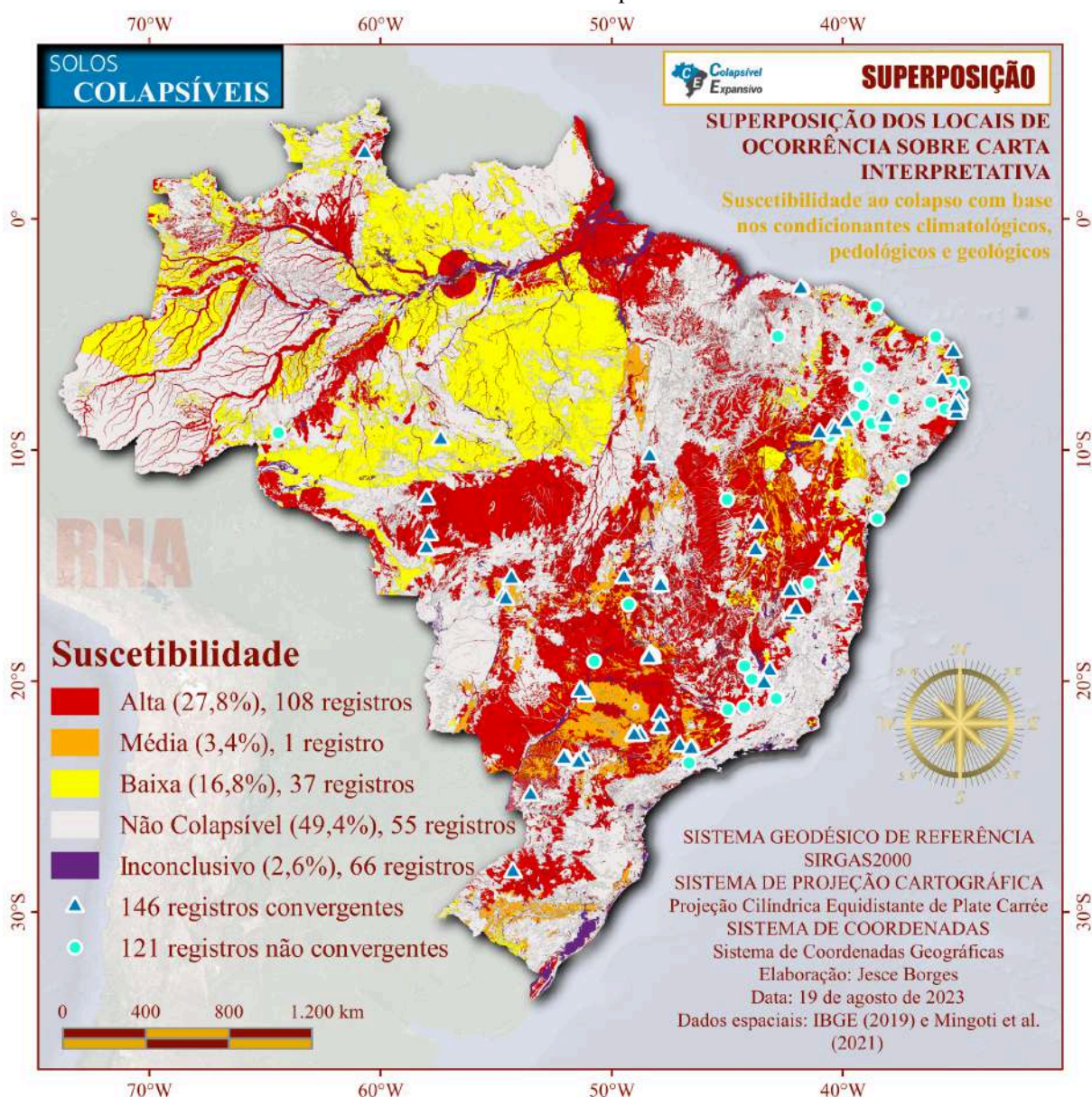
4.2.4.4 Carta interpretativa oriunda de RNA

No contexto das redes neurais artificiais, procedeu-se à superposição dos dados contidos no BANDASE (composto por 267 registros de solos colapsíveis e 259 registros de solos expansivos) sobre as cartas interpretativas relacionadas aos solos colapsíveis e expansivos.

Na análise interpretativa da suscetibilidade ao colapso, o resultado da sobreposição revelou o seguinte: 108 registros (40,4%) na alta suscetibilidade, 1 registro (0,4%) na média suscetibilidade, 37 registros (13,9%) na baixa suscetibilidade, 55 registros (20,6%) correspondem a áreas sem comportamento colapsível, e 66 registros (24,7%) foram localizados em áreas urbanas, corpos d'água ou em locais sem informação.

Os percentuais de 27,8%, 3,4%, 16,8%, 49,4% e 2,6% estão relacionados à área territorial, respectivamente. Portanto, dos 267 registros totais, observou-se que 146 deles apresentam convergência com algum nível de suscetibilidade (54,7%), enquanto 121 não demonstram convergência com qualquer suscetibilidade (45,3%). Essa análise é visualmente representada no produto cartográfico da Figura 109.

Figura 109 - Superposição dos locais de ocorrências sobre a carta interpretativa de RNA referente aos solos colapsíveis.

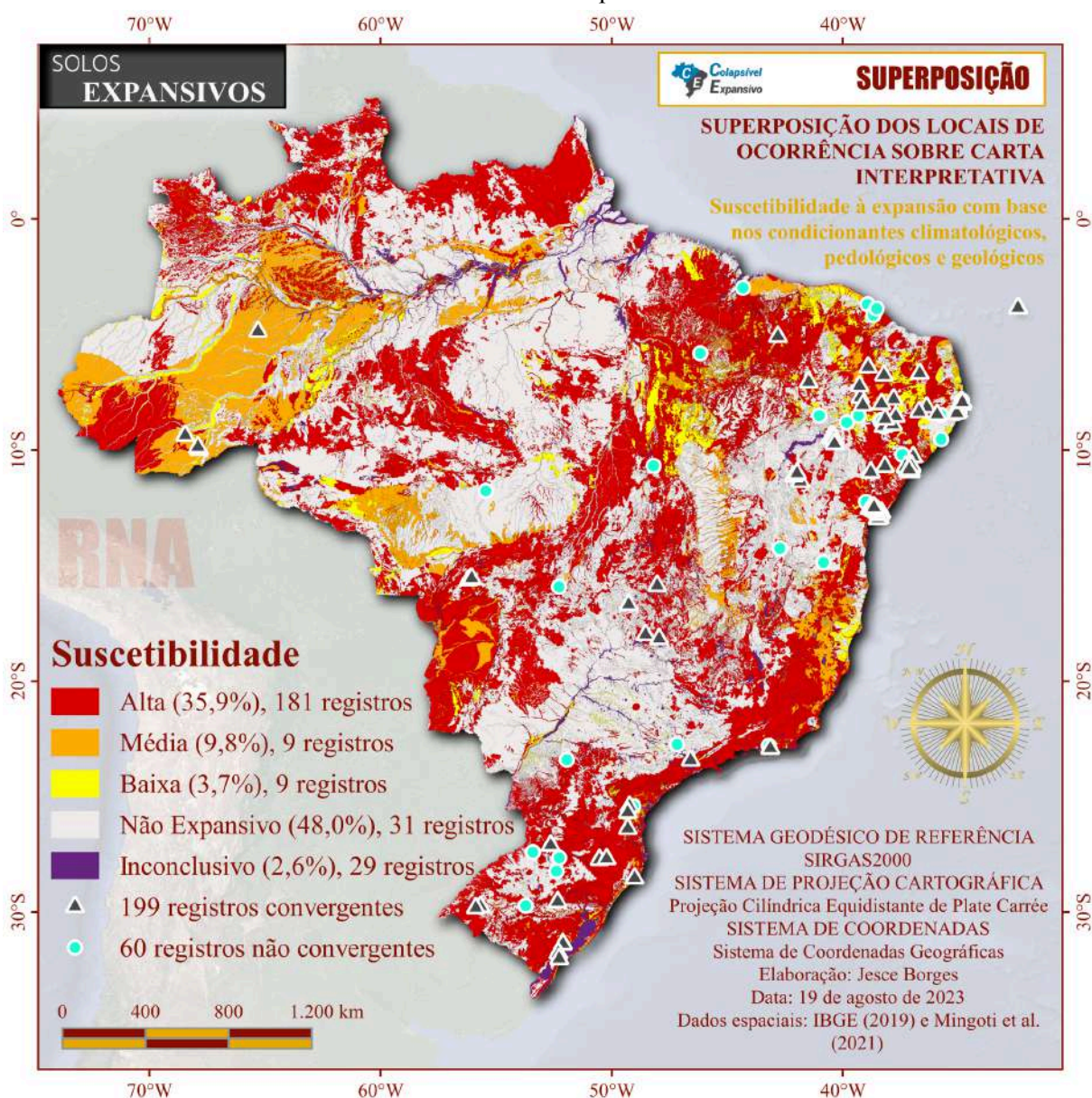


Fonte: Autor (2024).

Em relação à carta interpretativa de suscetibilidade à expansão, o processo de sobreposição resultou em 181 registros na alta suscetibilidade (69,9%), 9 registros na média (3,5%), 9 registros na baixa (3,5%), 31 registros em área sem comportamento expansivo (12,0%) e 29 registros em área urbana, corpos de água ou sem informação (11,2%). Os percentuais de 35,9,8%, 9,8%, 3,7%, 48,0% e 2,6% são pertinentes à área territorial, respectivamente (BORGES *et al.*, 2024). Portanto, do total de 259 registros, constata-se 199 enquadrados em algum nível de suscetibilidade (76,8%), implicando em 60 enquadrados em

áreas sem suscetibilidade (23,2%). A Figura 110 apresenta o produto cartográfico que expõe o cenário referente às mensurações narradas.

Figura 110 - Superposição dos locais de ocorrências sobre a carta interpretativa de RNA referente aos solos expansivos.



Fonte: Autor (2024).

Os percentuais e quantitativos mencionados anteriormente estão disponíveis na Tabela 38. No centro desta tabela, encontram-se as categorias adotadas, com informações quantitativas de registros convergentes, seus respectivos percentuais e os nomes dos solos dispostos nas extremidades da mesma.

Tabela 38 - Resultados obtidos na verificação da metodologia.

Solo	Porcentagem	Quantitativos	Categorias	Quantitativos	Porcentagem	Solo
Colapsível	40,4%	108	Alto	181	69,9%	Expansivo
	0,4%	1	Médio	9	3,5%	
	13,9%	37	Baixo	9	3,5%	
	20,6%	55	Não Colapsível/Expansivo	31	12,0%	
	24,7%	66	Inconclusivo	29	11,2%	
	100,0%	267	Total	259	100,0%	

Fonte: Autor (2024).

Os quantitativos supracitados foram plotados na estrutura de matriz de confusão, gerando métricas decorrentes dessa ferramenta de avaliação. Quanto ao instrumento de mensuração, constatou-se acurácia de 65,6%. A confiabilidade alcançou 76,8% de precisão. Nos instrumentos de avaliação, verificaram-se os percentuais de 62,2% e 70,9% referentes à sensibilidade e à especificidade, respectivamente. Essas informações estão externadas na Figura 111.

Figura 111 - Matriz de confusão resultante da superposição dos registros do BANDASE sobre as cartas interpretativas oriundas de aplicação de RNA.



Fonte: Autor (2024).

Utilizando exclusivamente registros contendo a completude de informações quanto aos condicionantes naturais (clima, pedologia e geologia), ou seja, excluindo-se registros contendo ausência de informação (registros em branco), áreas urbanas sem informações de condicionantes (registros denominados como outros) e áreas de corpos d'água, verificaram-se métricas com valores superiores, Figura 112. Seguindo uma estrutura semelhante à tabela

anterior, a Tabela 39 detalha os quantitativos referentes aos registros que apresentam informações completas sobre os condicionantes naturais.

Tabela 39 - Resultados obtidos na verificação da metodologia referentes aos registros que possuem informações completas sobre os condicionantes naturais.

Solo	Porcentagem	Quantitativos	Categorias	Quantitativos	Porcentagem	Solo
Colapsível	63,0%	102	Alto	113	64,2%	Expansivo
	0,0%	0	Médio	6	3,4%	
	2,5%	4	Baixo	26	14,8%	
	34,6%	56	Não Colapsível/Expansivo	31	17,6%	
	100,0%	162	Total	176	100,0%	

Fonte: Autor (2024).

Figura 112 - Matriz de confusão resultante da superposição, utilizando registros com completude de informações quanto aos condicionantes naturais.

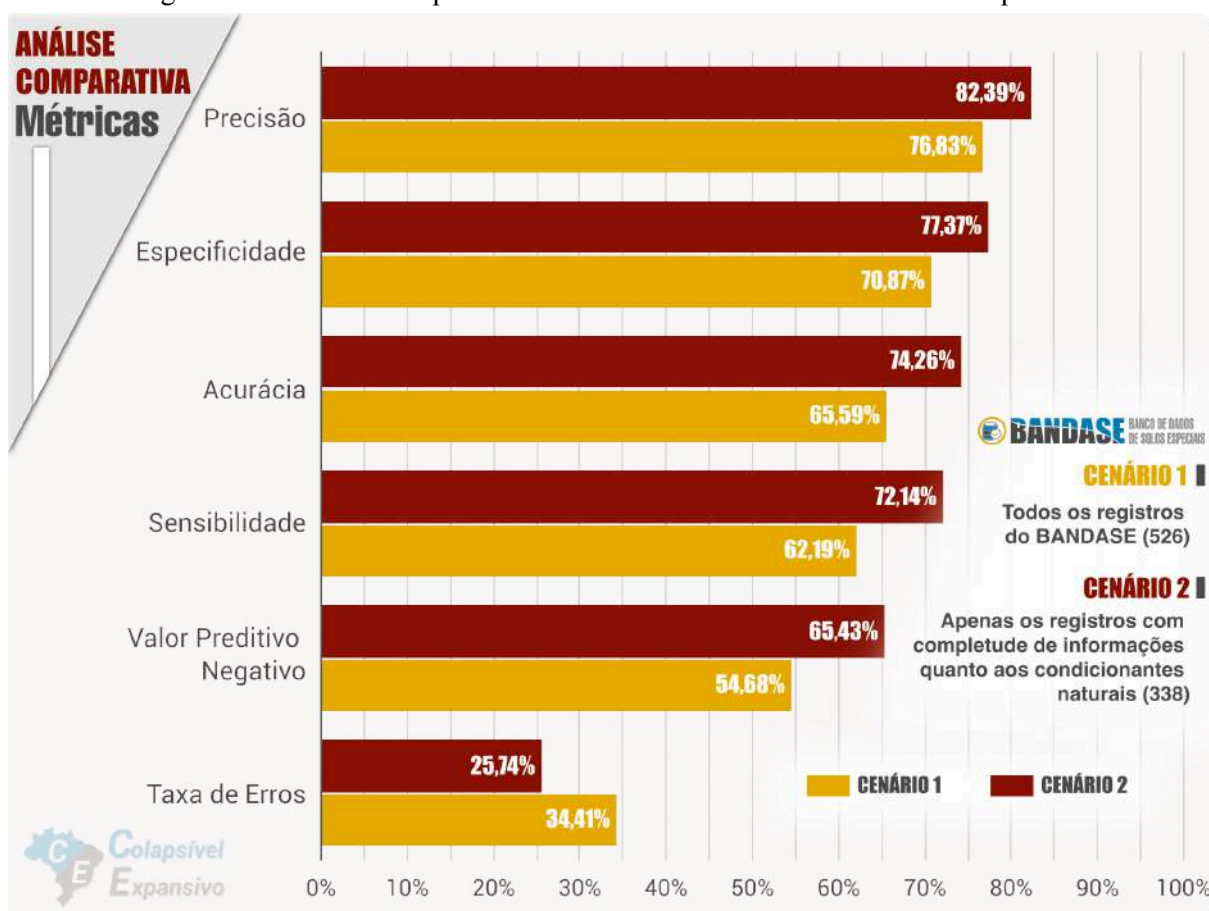


Fonte: Autor (2024).

Nota-se que, no tocante à métrica de mensuração, houve aumento de 8,7% na acurácia, implicando na diminuição da taxa de erros na mesma proporção. Na precisão, ocorreu a elevação de 5,6%. O Valor Preditivo Negativo (VPN) aumentou 10,7%. Quanto às métricas de avaliação, constatou-se aumento de percentuais equivalente a 9,9% e 6,5% referentes à sensibilidade e à especificidade, respectivamente.

A Figura 113 apresenta a análise comparativa referente às métricas resultantes dos cenários expostos. Tal ilustração permite verificar que o uso de dados consistentes, registros contendo todas as informações referentes aos condicionantes, implicou em melhores métricas tanto de mensuração quanto de avaliação do modelo de classificação binária.

Figura 113 - Análise comparativa das métricas resultantes dos cenários expostos.



Fonte: Autor (2024).

Perante tal conjuntura, ratifica-se o bom desempenho do modelo de RNA no processo de identificação dos solos expansivos e colapsíveis. Os produtos cartográficos oriundos deste modelo surgem como uma importante ferramenta na etapa preliminar dos projetos de engenharia, podendo servir de material orientativo no uso e ocupação do solo. Portanto, as cartas interpretativas expostas neste trabalho são enquadradas no método indireto e na subdivisão orientativa.

4.2.5 Análise comparativa de produtos cartográficos para Pernambuco

No âmbito do estado de Pernambuco, realizou-se uma análise comparativa entre os produtos cartográficos desenvolvidos nesta tese e os produtos cartográficos obtidos por Amorim (2004). Esses produtos surgiram de diferentes abordagens de conhecimento: subjetiva e objetiva. Enquanto o primeiro se baseia em opiniões e perspectivas individuais de especialistas no assunto, o segundo é construído a partir de evidências objetivas e verificáveis.

Perante a Teoria do Conhecimento, esses documentos cartográficos são classificados, respectivamente, nas seguintes qualidades do conhecimento: objetividade e subjetividade.

Neste trabalho, intitulado na análise como Borges (2024), foram elaborados produtos cartográficos que englobam tanto o conhecimento subjetivo quanto o objetivo (Redes Neurais Artificiais - RNA). Por sua vez, Amorim (2004) produziu produtos cartográficos exclusivamente por meio da abordagem do conhecimento subjetivo.

Tal análise consiste na superposição dos registros contidos no BANDASE sobre as cartas interpretativas, verificando a convergência de locais de ocorrência e das áreas de suscetibilidade definidas nos produtos cartográficos. Perante a delimitação do estado de Pernambuco, constataram-se 80 e 74 registros pertinentes aos solos colapsíveis e expansivos, respectivamente. Frisa-se que, devido à ausência da extensão territorial de Fernando de Noronha nos documentos cartográficos, não foram utilizados 3 (três) registros de solos expansivos.

É fundamental enfatizar as ressalvas inerentes à análise comparativa. Salienta-se que os documentos cartográficos empregados nesta análise exibem particularidades relacionadas aos seguintes elementos: escala, teoria do conhecimento, abordagem metodológica e base cartográfica. Dito isso, são apresentadas as análises comparativas envolvendo as cartas derivadas climatológicas e pedológicas, bem como as cartas interpretativas.

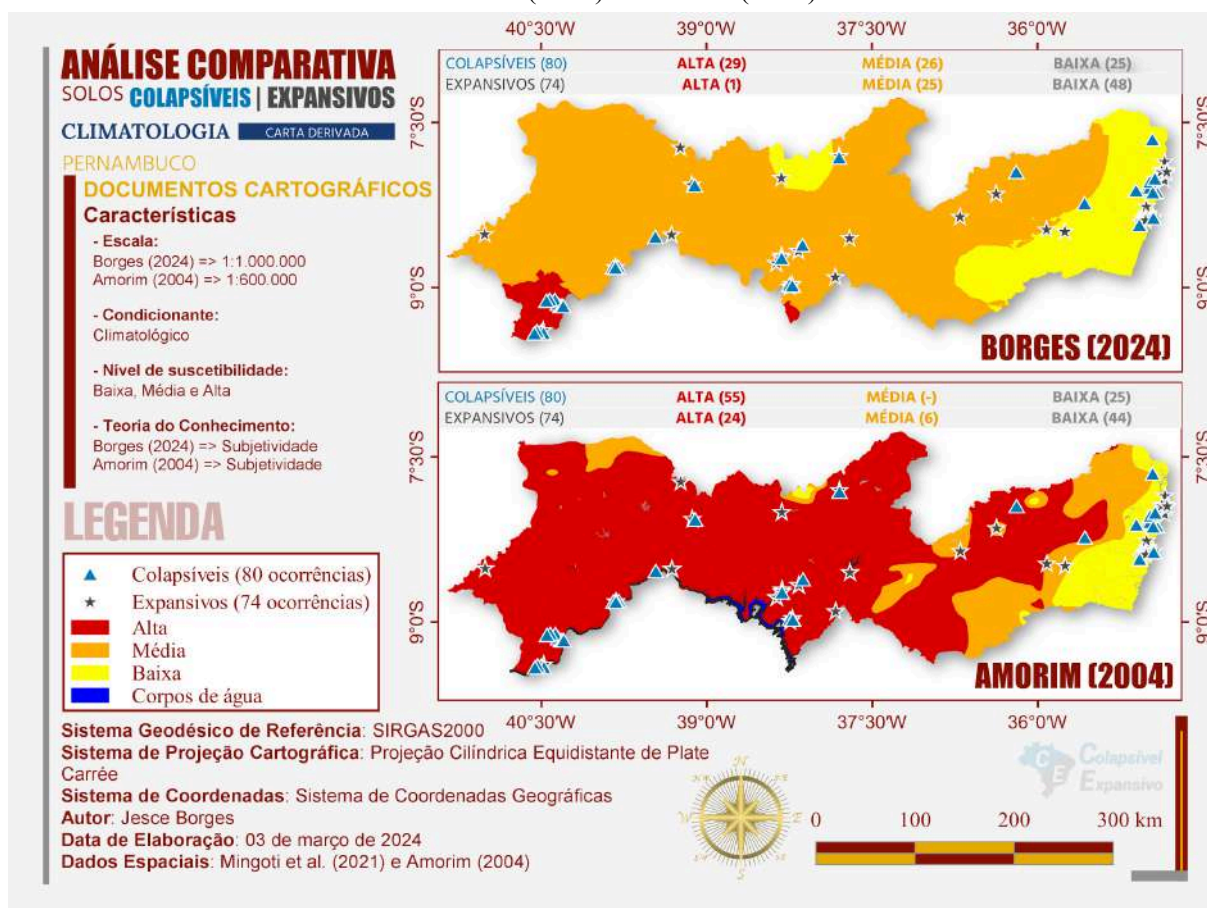
4.2.5.1 Carta derivada climatológica

No caso dos solos colapsíveis, a carta elaborada neste trabalho mostrou que, dos 80 registros, 29 registros convergiram na alta suscetibilidade (36,25%), 26 na suscetibilidade média (32,50%) e 25 na baixa suscetibilidade (31,25%). Por outro lado, ao analisar a carta elaborada por Amorim (2004), constatou-se o seguinte panorama: 55 registros convergiram para a alta suscetibilidade (68,75%), enquanto 25 registros convergiram para a baixa suscetibilidade (31,25%).

No que se refere aos solos expansivos, verificou-se que, considerando os 74 registros, em relação às cartas climatológicas derivadas de Borges (2024) e Amorim (2004), ocorreu a convergência de 1 (1,35%) e 24 (32,43%) registros para alta suscetibilidade, 25 (33,78%) e 6 (8,11%) registros para média suscetibilidade, e 48 (64,86%) e 44 (59,46%) registros para baixa suscetibilidade, respectivamente.

Ressalta-se que, diferentemente das cartas derivadas pedológicas, as características climatológicas aplicam-se de maneira similar a ambos os solos quanto à suscetibilidade. Em virtude disso, o produto cartográfico apresentado na Figura 114 expõe os cenários descritos anteriormente para os solos colapsíveis e expansivos.

Figura 114 - Análise comparativa entre as cartas derivadas climatológicas desenvolvidas por Borges (2024) e Amorim (2004).



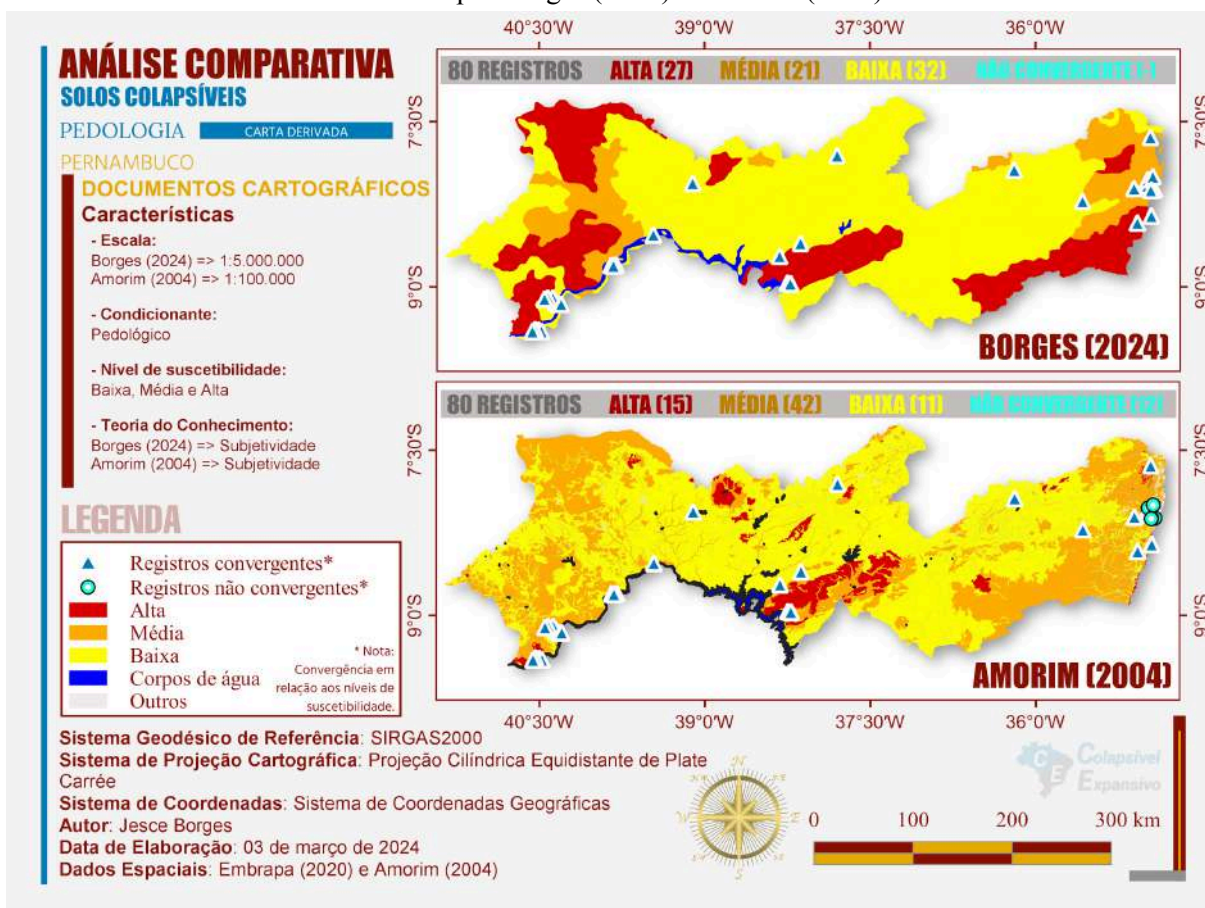
Fonte: Autor (2024).

4.2.5.2 Carta derivada pedológica

Diante dos 80 registros empregados na análise, os resultados demonstraram que, no caso dos solos colapsíveis, 27 (33,75%) apresentaram convergência em alta suscetibilidade, 21 (26,25%) em média suscetibilidade e 32 (40,00%) em baixa suscetibilidade. Já na carta de Amorim (2004), verifica-se o seguinte cenário de convergência: 15 registros na categoria de alta suscetibilidade (18,75%), 42 registros na categoria de média suscetibilidade (52,50%), 11 registros na categoria de baixa suscetibilidade (13,75%) e 12 registros sem convergência em algum nível de suscetibilidade (15,00%). Importante frisar que esses registros sem

convergência estão associados às áreas urbanas identificadas na carta de Amorim (2004), diferentemente da carta obtida neste trabalho (Figura 115).

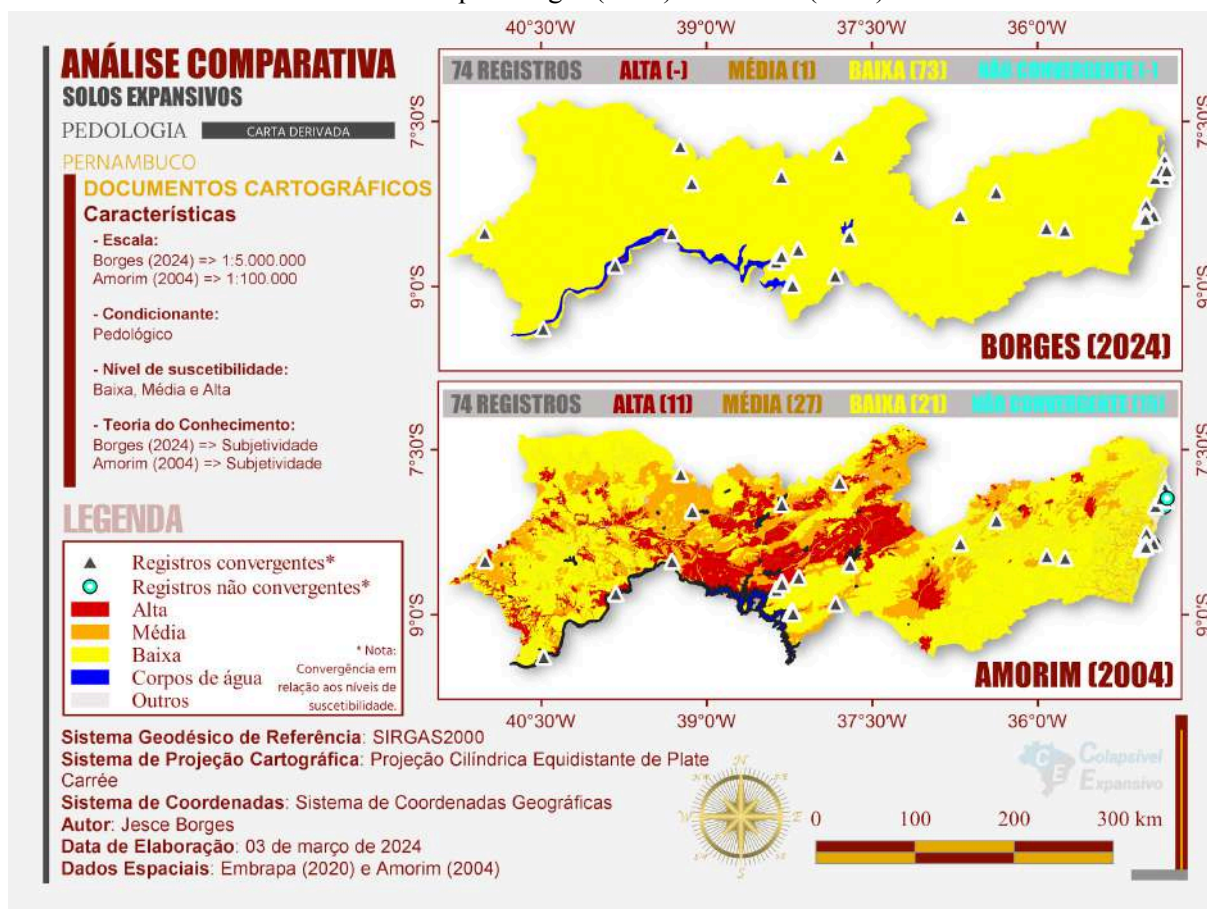
Figura 115 - Análise comparativa das cartas derivadas pedológicas para solos colapsíveis elaboradas por Borges (2024) e Amorim (2004).



Fonte: Autor (2024).

No que diz respeito aos solos expansivos, constatou-se que, dentre os 74 registros analisados, apenas 1 registro convergiu para média suscetibilidade (1,35%), enquanto 73 registros convergiram para suscetibilidade baixa (98,65%). Na carta de Amorim (2004), a convergência resultou no seguinte cenário: 11 registros na categoria de alta suscetibilidade (14,86%), 27 registros na categoria de média suscetibilidade (36,49%), 21 registros na categoria de baixa suscetibilidade (28,38%) e 15 registros sem convergência em algum nível de suscetibilidade (20,27%), Figura 116. Ressalta-se que foram utilizadas cartas derivadas com base no critério ponderado, a fim de se alinhar com os produtos de Amorim (2004), que também adotou essa abordagem.

Figura 116 - Análise comparativa das cartas derivadas pedológicas para solos expansivos elaboradas por Borges (2024) e Amorim (2004).

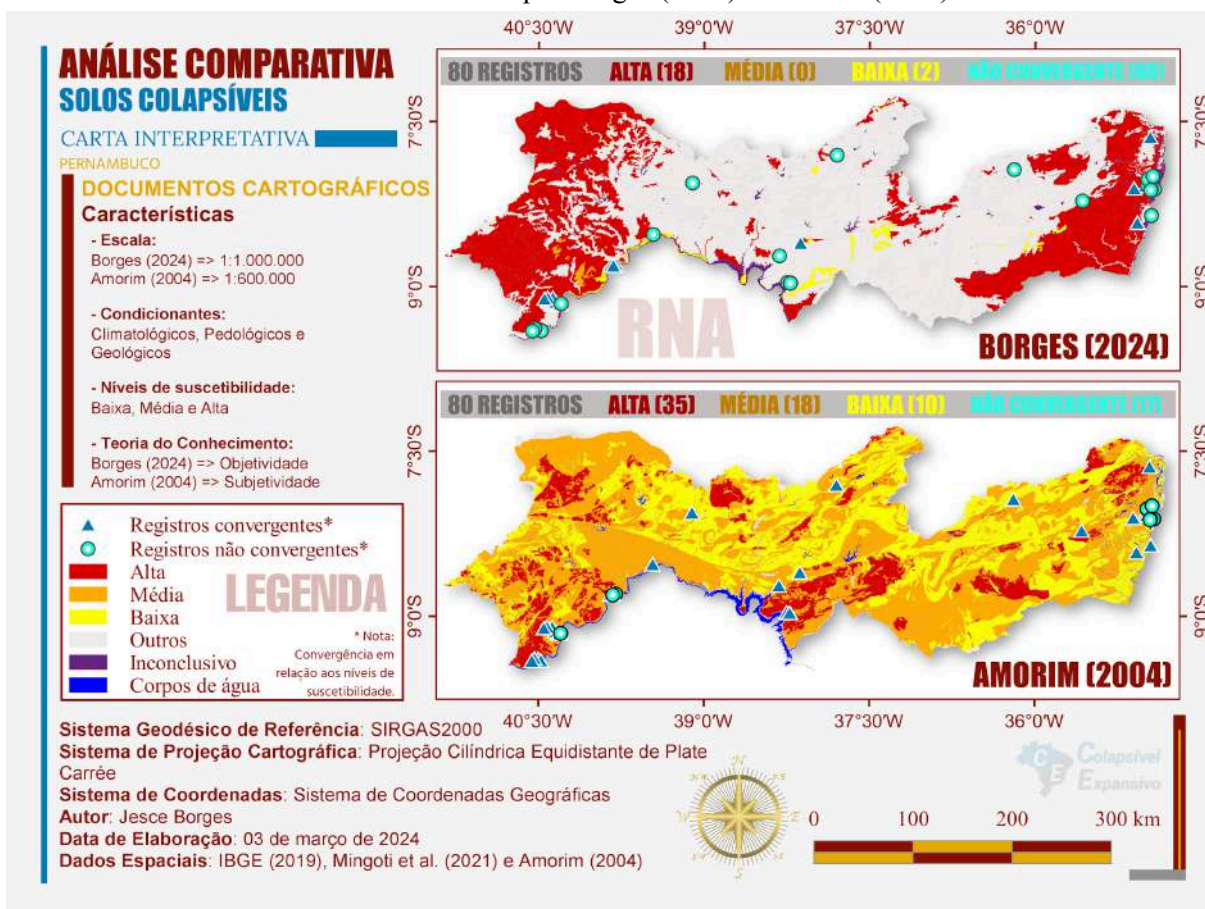


Fonte: Autor (2024).

4.2.5.3 Carta interpretativa

Quanto aos solos colapsíveis, os resultados apontaram que, dos 80 registros, 18 convergiram na alta suscetibilidade (22,5%), 2 na baixa suscetibilidade (2,5%) e 60 nas áreas sem comportamento colapsível (75,0%). Na carta elaborada por Amorim (2004), constatarem-se 35 registros enquadrados na suscetibilidade alta (43,8%), 18 na média (22,5%), 10 na baixa (12,5%) e 17 nas áreas sem comportamento colapsível (21,2%), Figura 117.

Figura 117 - Análise comparativa referente às cartas interpretativas de suscetibilidade ao colapso, elaboradas por Borges (2024) e Amorim (2004).

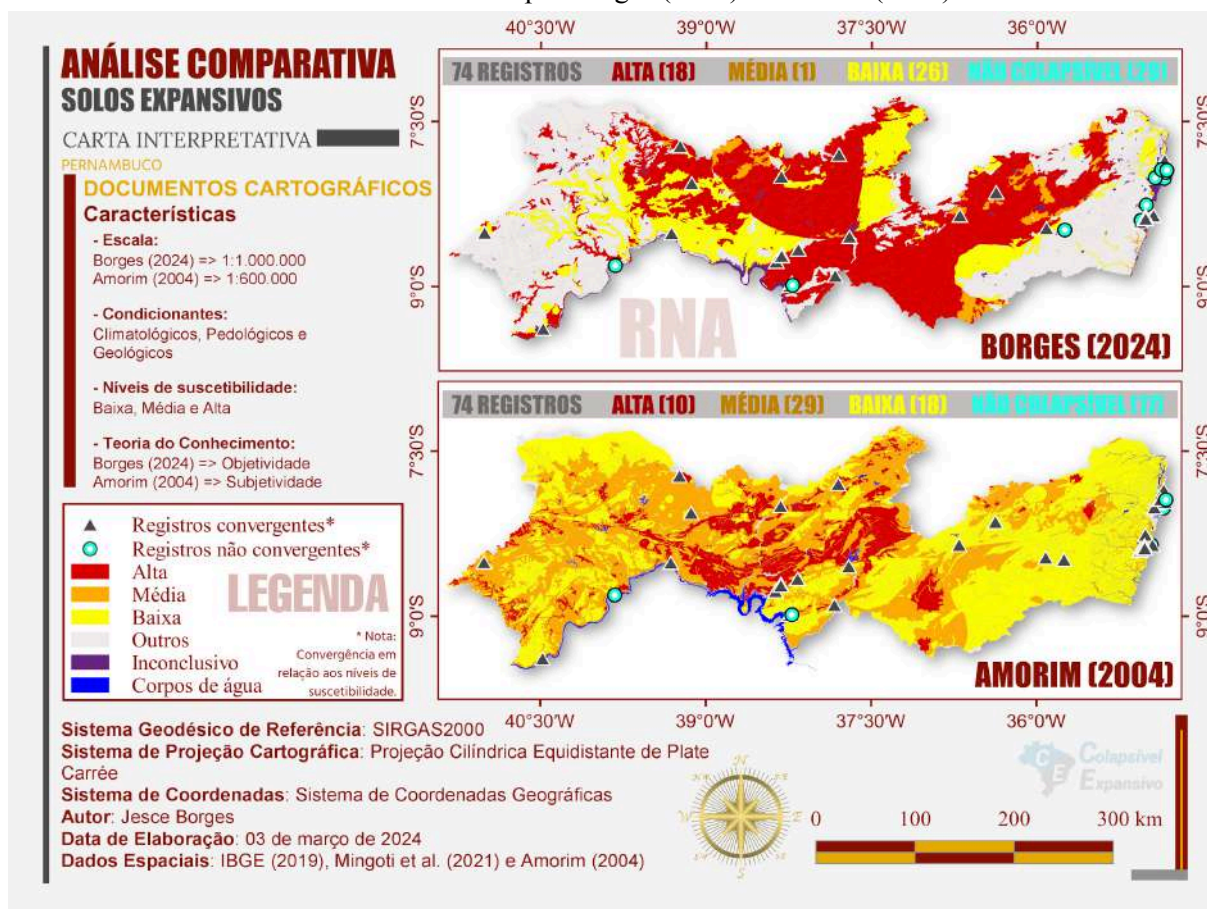


Fonte: Autor (2024).

No que se refere aos solos expansivos, verificou-se que, dos 74 registros, 18 convergiram na suscetibilidade alta (24,3%), 1 na média (1,4%), 26 na baixa (35,1%) e 29 nas áreas com ausência de comportamento expansivo (39,2%). Em relação à carta interpretativa elaborada por Amorim (2004), constataram 10 registros enquadrados na suscetibilidade alta (13,5%), 29 na média (39,2%), 18 na baixa (24,3%) e 17 nas áreas sem comportamento expansivo (23,0%), Figura 118.

Mesmo diante de abordagens metodológicas distintas, foram criadas matrizes de confusão com o propósito de avaliar o desempenho da classificação. Os quantitativos pertinentes às suscetibilidades alta e média foram enquadrados nas células verdadeiras, enquanto que os demais quantitativos foram enquadrados nas células falsas.

Figura 118 - Análise comparativa referente às cartas interpretativas de suscetibilidade à expansão, elaboradas por Borges (2024) e Amorim (2004).



Fonte: Autor (2024).

Na mensuração dos resultados obtidos na análise comparativa, aplicada aos produtos cartográficos elaborados nesta tese e no trabalho de Amorim (2004), constatarem os seguintes percentuais, respectivamente: 24,0% e 59,7% de acurácia; 76,0% e 40,3% de taxa de erros, 25,7% e 52,7% de precisão; 22,5% e 66,3% de Valor Preditivo Negativo (VPN); 23,5% e 59,1% de sensibilidade; e 24,7% e 60,2% de especificidade, Figura 119.

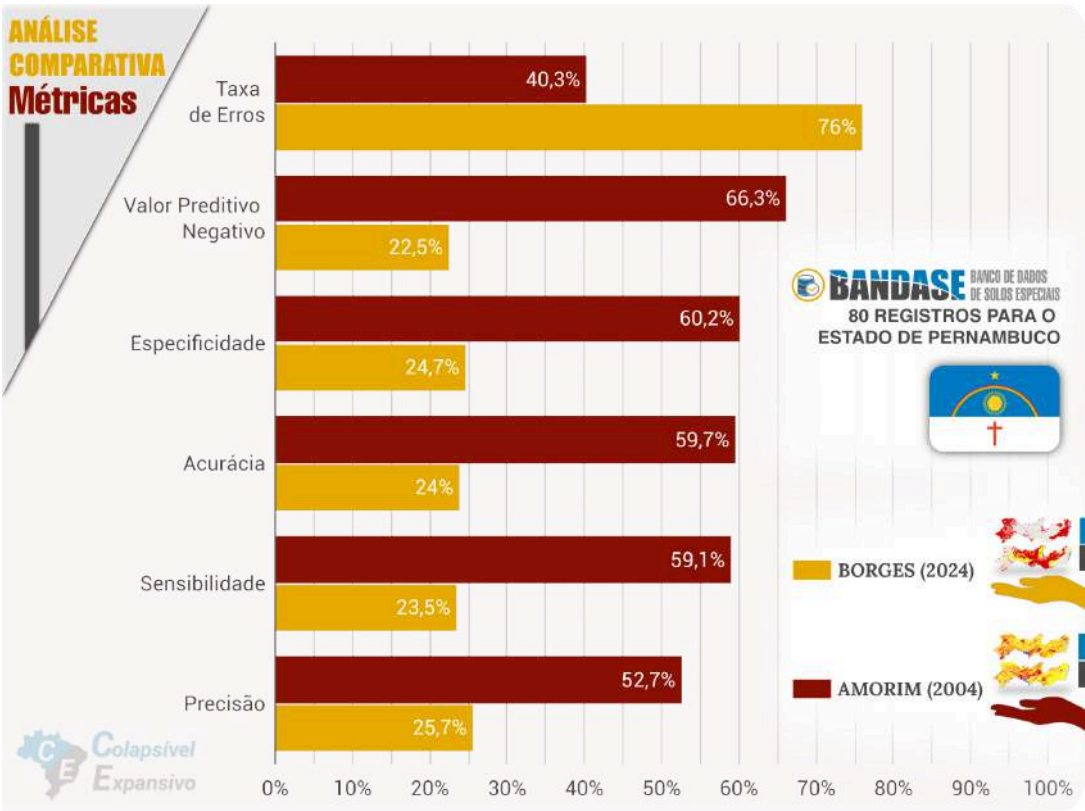
Ao analisar as métricas em uma perspectiva abrangente, verifica-se o desempenho superior das métricas nas cartas de Amorim (2004), evidenciando uma maior capacidade de identificação de solos colapsíveis e expansivos em Pernambuco, Figura 120. Isso pode ser associado ao uso de escala maior (1:600.000), que proporciona uma representação mais detalhada em comparação com a escala menor (1:1.000.000) do Brasil. Além disso, a minuciosidade na descrição dos atributos das unidades de mapeamento, incluindo a mensuração das porcentagens de cada classe pedológica, contribui para uma precisão aprimorada na aplicação dos critérios de suscetibilidade. Nesse contexto, é pertinente sugerir a adoção do produto cartográfico elaborado por Amorim (2004) para uso em âmbito estadual.

Figura 119 - Matriz de confusão pertinente à análise comparativa.



Fonte: Autor (2024).

Figura 120 - Métricas resultantes das matrizes de confusão de Borges (2024) e Amorim (2004).



Fonte: Autor (2024).

A Tabela 40 apresenta de forma esquemática a síntese dos resultados obtidos na análise comparativa dos produtos cartográficos. A primeira coluna apresenta as cartas, enquanto a segunda registra os tipos de solo. Na sexta coluna, estão expostos os níveis de suscetibilidade. Os resultados provenientes das cartas elaboradas por Borges (2024) e Amorim (2004) situam-se à esquerda e à direita dessa sexta coluna, respectivamente.

Tabela 40 - Resultados consolidados esquematicamente mediante tabela resumo.

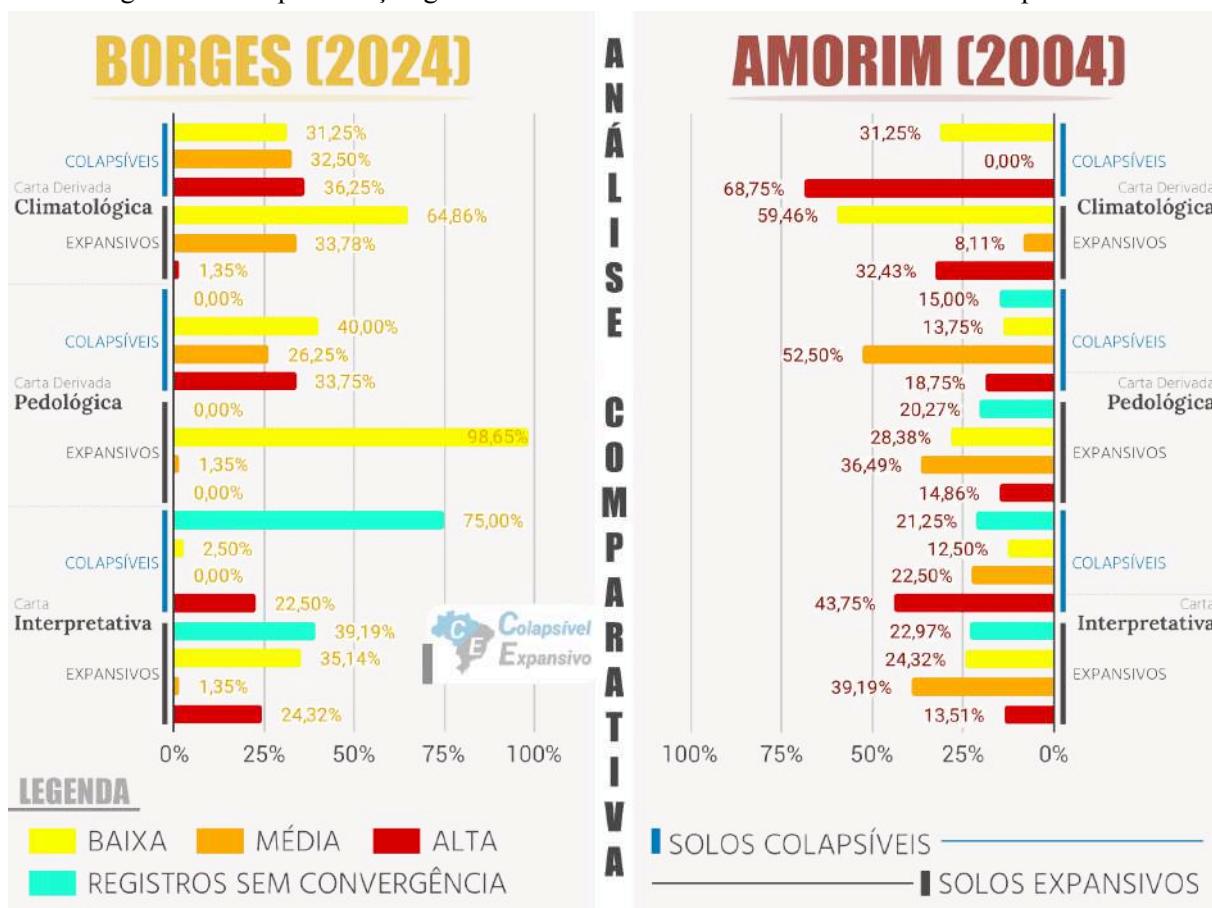
Carta	Solo	Autor	Quantitativo	Resultado	Suscetibilidade	Resultado	Quantitativo	Autor
Derivada Climatológica	Colapsível	B	25	31,25%	Baixo	31,25%	25	A
			26	32,50%	Médio	0,00%	0	
			29	36,25%	Alto	68,75%	55	
	Expansivo	O	48	64,86%	Baixo	59,46%	44	
			25	33,78%	Médio	8,11%	6	
			1	1,35%	Alto	32,43%	24	
Derivada Pedológica	Colapsível	R	0	0,00%	Sem Convergência	15,00%	12	R
			32	40,00%	Baixo	13,75%	11	
			21	26,25%	Médio	52,50%	42	
			27	33,75%	Alto	18,75%	15	
	Expansivo	S	0	0,00%	Sem Convergência	20,27%	15	
			73	98,65%	Baixo	28,38%	21	
			1	1,35%	Médio	36,49%	27	
			0	0,00%	Alto	14,86%	11	
Interpretativa	Colapsível	2	60	75,00%	Sem Convergência	21,25%	17	2
			2	2,50%	Baixo	12,50%	10	
			0	0,00%	Médio	22,50%	18	
			18	22,50%	Alto	43,75%	35	
	Expansivo	2	29	39,19%	Sem Convergência	22,97%	17	
			26	35,14%	Baixo	24,32%	18	
			1	1,35%	Médio	39,19%	29	
			18	24,32%	Alto	13,51%	10	

Fonte: Autor (2024).

A representação gráfica destes percentuais resultantes da análise comparativa é exposta de maneira clara na Figura 121. Com base nesta ilustração, é possível constatar o desempenho superior dos produtos cartográficos de Amorim (2004) na identificação dos solos colapsíveis e expansivos no Estado de Pernambuco. Isso é evidenciado pelo fato de que, de maneira geral, os níveis mais críticos de suscetibilidade (média e alta) alcançaram maiores

percentuais de acertos no processo de convergência entre os registros de ocorrência e as cartas.

Figura 121 - Representação gráfica dos resultados consolidados da análise comparativa.



Fonte: Autor (2024).

4.2.6 Resultados parciais do SIGSEC

Perante o conteúdo exposto, são apresentadas os principais resultados:

- **predomínio do tipo climático Úmido:** a predominância desse tipo climático na extensão territorial do Brasil resultou em extensa área de baixa suscetibilidade;
- **suscetibilidades mais críticas na região Nordeste:** a alta e a média suscetibilidade, na carta derivada de Climatologia, preponderaram na região Nordeste;
- **predominância da classe pedológica Latossolos:** na perspectiva geral, os elevados percentuais de alta suscetibilidade constatados nos solos colapsíveis

estão relacionados com o predomínio da classe pedológica Latossolos que ocupa parcela significativa do território nacional;

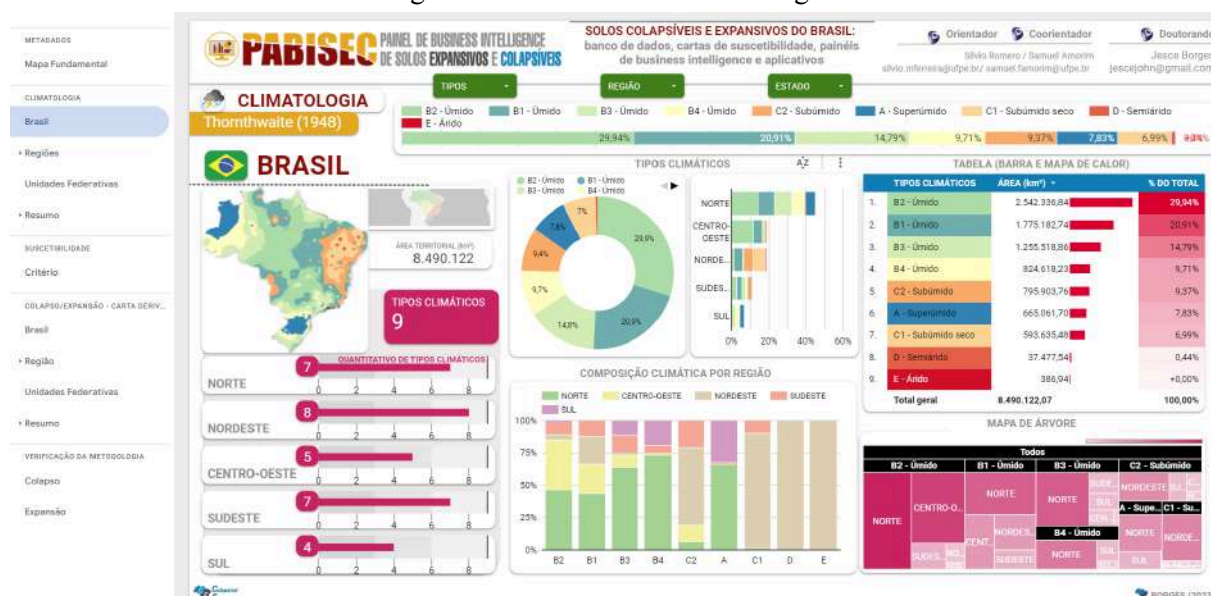
- **baixa incidência de argilominerais do grupo 2:1 no território brasileiro:** a baixa suscetibilidade verificada nos solos expansivos tem relação com a menor parcela de área do território brasileiro ocupada por argilominerais do grupo 2:1;
- **coerência nos critérios de suscetibilidade:** de maneira geral, o critério conservador resultou em percentuais mais elevados de suscetibilidade alta em comparação ao critério ponderado, enquanto o critério inverso implicou em um aumento dessa suscetibilidade nas cartas geradas a partir dos critérios mencionados, tais cenários são coerentes com a natureza metodológica intrínseca de cada critério;
- **desempenho das cartas resultantes de RNA:** os produtos cartográficos gerados a partir de redes neurais artificiais obtiveram bom desempenho na verificação metodológica, que consiste na superposição dos locais de ocorrência do sobre as cartas, resultando em métricas que ratificam o nível de excelência obtido no modelo matemático gerado por Holanda (2022);
- **aplicação de Amorim (2004) para Pernambuco:** a análise comparativa evidenciou que os produtos cartográficos desenvolvidos por Amorim (2004) demonstram uma maior eficácia na identificação de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos no Estado de Pernambuco;
- **seleção de produtos cartográficos:** baseado nos resultados alcançados neste trabalho, sugere-se a utilização das cartas geradas a partir de RNA para o Brasil e dos produtos cartográficos de Amorim (2004) para o Estado de Pernambuco;
- **uso orientativo dos produtos cartográficos:** os documentos cartográficos fornecem orientação para a identificação de áreas suscetíveis ao colapso e à expansão, porém, em nenhuma circunstância, esses recursos gráficos substituem os ensaios de campo e laboratório;
- **recomendações geotécnicas e soluções técnicas:** sugere-se a realização de investigações geotécnicas específicas para cada nível de suscetibilidade, conforme descrito na seção 2.3, e a implementação das soluções técnicas apresentadas nos Apêndices G e H para minimizar os impactos dos solos colapsíveis e expansivos, respectivamente.

4.3 PAINÉIS DE BUSINESS INTELLIGENCE DE SOLOS EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS (PABISEC)

Em decorrência do grande volume de dados envolvidos neste trabalho, aplicou-se a tecnologia *Business Intelligence*, que resultou na elaboração de 6 (seis) painéis de BI denominados da seguinte forma: PABISEC - Climatologia, PABISEC - Pedologia, PABISEC - Cartas Interpretativas, PABISEC - Cartas RNA, PABISEC - BANDASE e PABISEC - Pernambuco. Esses painéis são disponibilizados na plataforma web, permitindo o acesso *online* dos usuários interessados na temática deste trabalho.

O PABISEC - Climatologia proporcionou a exposição dos resultados obtidos nas operações de geoprocessamento. O referido painel está estruturado na exteriorização dos seguintes pontos: exposição dos metadados e das informações climáticas do mapa fundamental, apresentação dos critérios adotados, exibição dos resultados obtidos para a carta derivada e a verificação da metodologia, Figura 122.

Figura 122 - PABISEC - Climatologia.



Fonte: Autor (2024).

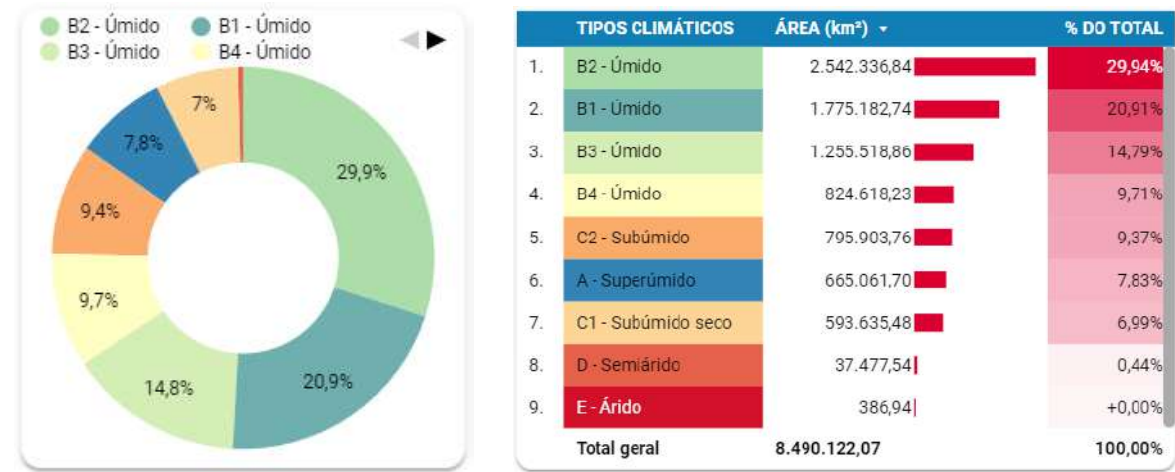
O uso da tecnologia *Business Intelligence* promoveu uma série de vantagens na exposição das informações climáticas, evidenciando a potencialidade dessa ferramenta. Através de diversos formatos de visualizações, é possível extrair conhecimento sobre a climatologia do Brasil perante a classificação de Thornthwaite (1948). O painel de BI oferece

ao usuário inúmeras possibilidades de análise, permitindo uma abordagem dos dados sobre diferentes ângulos de apreciação.

Baseado no referido painel, verificou-se que no território brasileiro predomina o tipo climático úmido, correspondendo ao percentual de 75,35% da extensão territorial. A participação de cada tipo climático, segundo a classificação de Thornthwaite (1948), pode ser constatada na Figura 123. Ressalta-se que diversos resultados podem ser extraídos do painel de BI, possibilitando, por exemplo, realizar análises comparativas entre regiões e unidades federativas, análises cruzadas de dados, análise geográficas, dentre outros.

A estruturação dos painéis obedece a uma sequência de segmentação, partindo da visão geral do Brasil, passando pelas regiões e concluindo nas unidades federativas. Em todos os cenários, buscou-se manter uma estrutura uniforme de apresentação de resultados visando obter uma facilidade no processo de adaptação do usuário com a interface do painel. Apesar dessa uniformização, garantiu-se uma boa variabilidade nos formatos de visualização. Perante a variedade de resultados que poderiam ser externados, devido à potencialidade da ferramenta de BI, são expostos os mais evidentes na abordagem generalista.

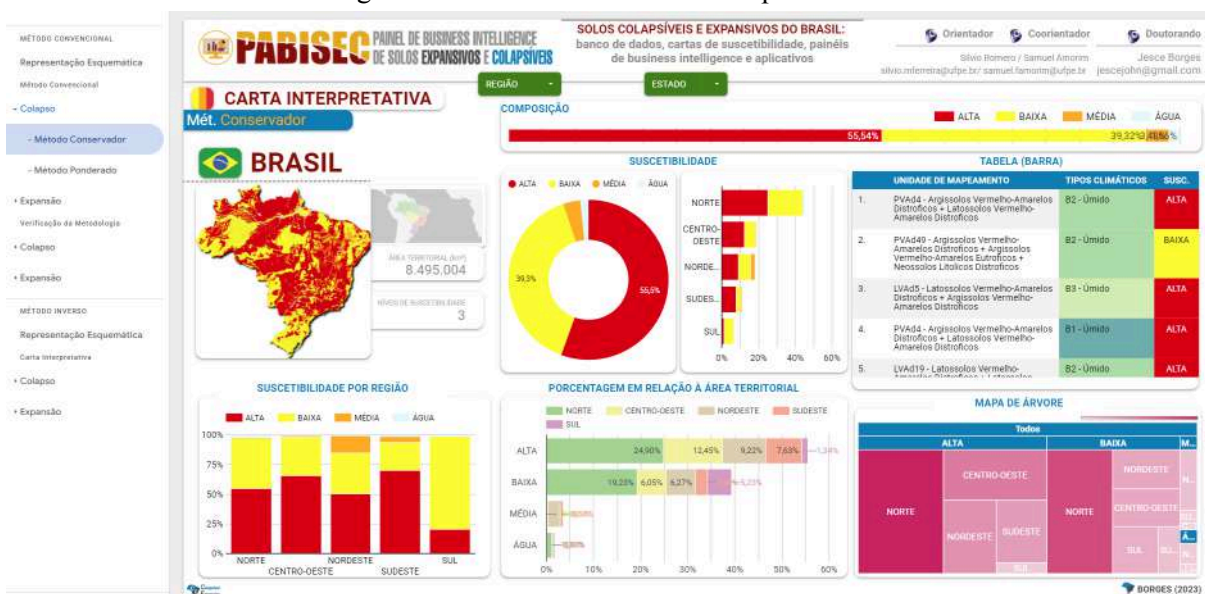
Figura 123 - Percentuais dos tipos climáticos do Brasil, segundo a classificação de Thornthwaite (1948).



Fonte: Autor (2024).

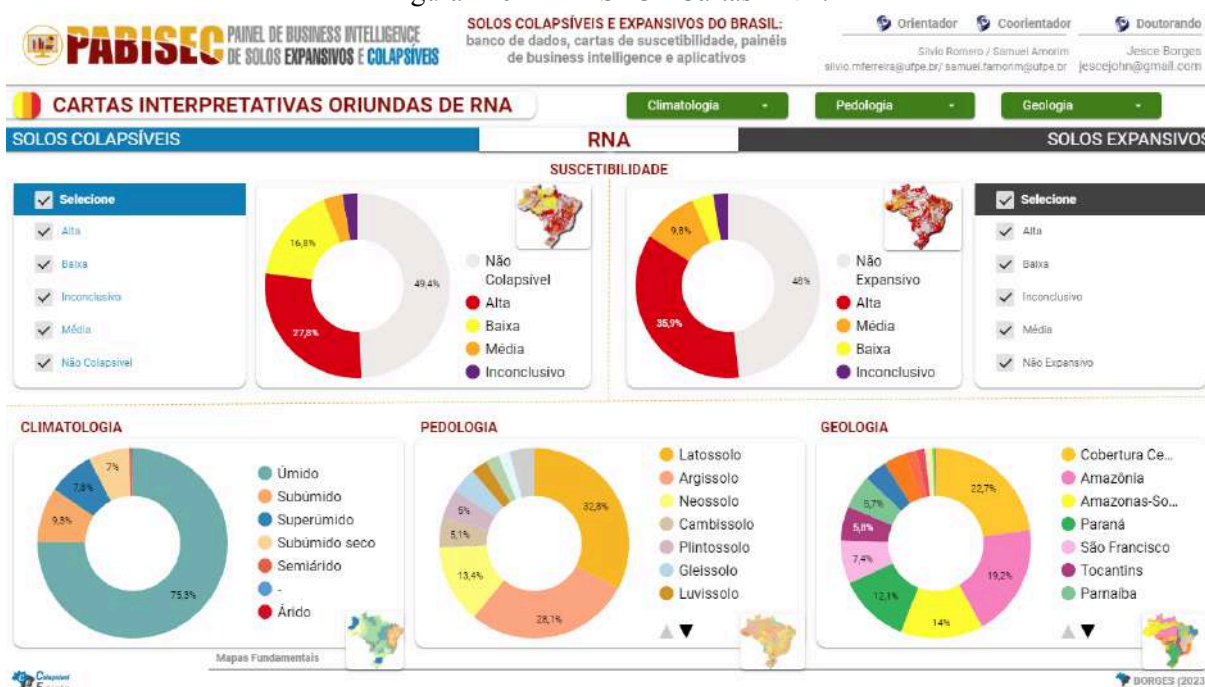
No PABISEC - Pedologia, adotou-se a mesma sistemática utilizada no painel de climatologia. A ferramenta de BI permitiu expor a participação dos diversos aspectos pedológicos envolvendo as unidades de mapeamento, tais como as ordens (1º nível categórico), subordens (2º nível categórico), grandes grupos (3º nível categórico) e os componentes, Figura 124.

Figura 125 - PABISEC - Cartas Interpretativas.



Fonte: Autor (2024).

Figura 126 - PABISEC - Cartas RNA.



Fonte: Autor (2024).

O PABISEC - BANDASE expõe os resultados alcançados no trabalho de pesquisa e de consolidação de dados atinentes aos solos colapsíveis e expansivos, Figura 127. Neste painel, também foi disponibilizado ao usuário o recurso de gerar sua própria carta de plasticidade e carta de atividade a partir de fornecimento de 5 (cinco) dados referentes aos parâmetros de índice de plasticidade, limite de liquidez e porcentagem de argila. Além disso, expõe interativamente a aplicação dos critérios de identificação.

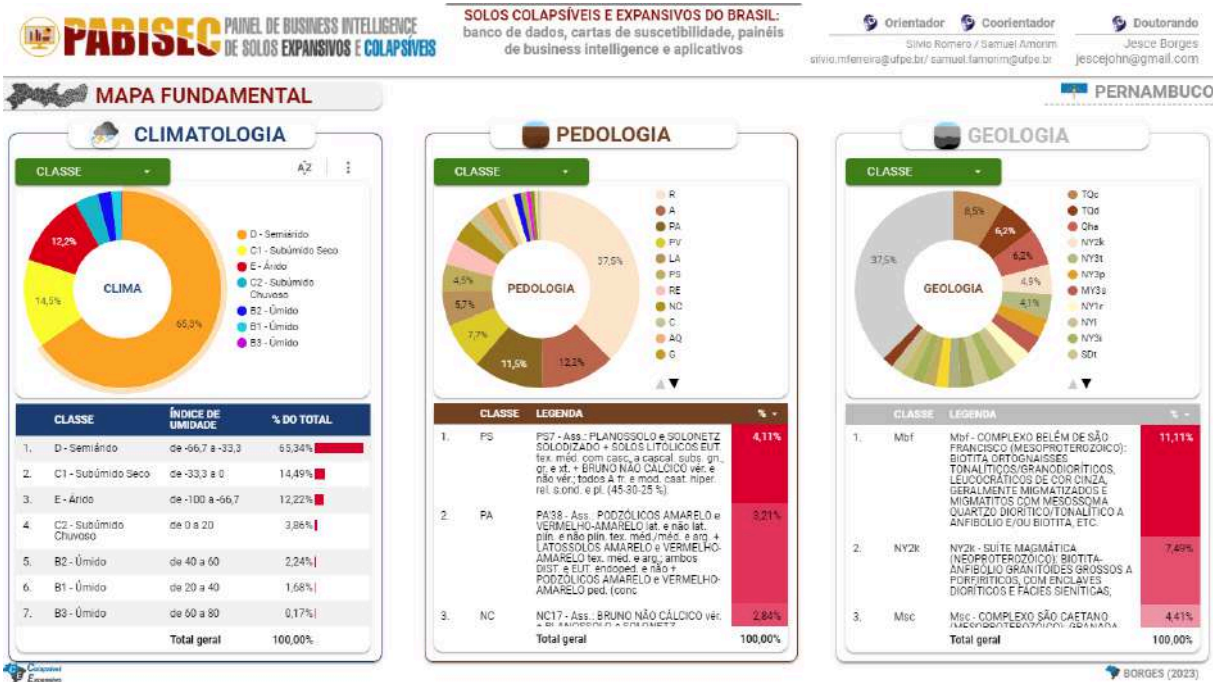
Figura 127- PABISEC - BANDASE.



Fonte: Autor (2024).

Por fim, o PABISEC - Pernambuco apresenta os resultados obtidos por Amorim (2004) para o estado pernambucano, expondo interativamente os atributos dos mapas fundamentais, das cartas derivadas e das cartas interpretativas (Figura 128).

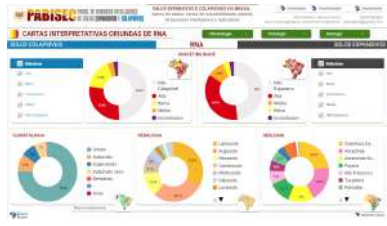
Figura 128- PABISEC - Pernambuco.



Fonte: Autor (2024).

O Quadro 17 disponibiliza as formas de acesso aos painéis de BI elaborados neste trabalho. Esse acesso pode ser realizado mediante clique na imagem ilustrativa, no link ou leitura de QR Code.

Quadro 17 - Disponibilização dos painéis de BI elaborados neste trabalho.

Painel	Ilustração	Link	QR Code
PABISEC - Climatologia		https://lookerstudio.google.com/reporting/001c4bcf-968d-405b-8145-d8c3ab0a483f	
PABISEC - Pedologia		https://lookerstudio.google.com/reporting/587dfefc-389d-4a60-a46f-0c6f833c865c	
PABISEC - Cartas Interpretativas		https://lookerstudio.google.com/reporting/1c3f2bb4-361b-4ec0-a270-5865a47e3d52	
PABISEC - Cartas Interpretativas RNA		https://lookerstudio.google.com/reporting/c69856b4-386d-4f80-9fec-12959871d067	
PABISEC - BANDASE		https://lookerstudio.google.com/reporting/159b6267-6430-4c4f-90e8-cc0fb933cbf9	
PABISEC - Pernambuco		https://lookerstudio.google.com/s/v0ZN7vp15So	

Fonte: Autor (2024).

Ante o exposto, é possível afirmar que a aplicação da tecnologia *Business Intelligence* permitiu transformar um grande volume de dados em conhecimento, integralizando as informações de modo a proporcionar benefícios aos usuários interessados na temática deste trabalho. Constataram-se os benefícios quanto às facilidades de acesso, à economicidade de tempo, à visibilidade do contexto geral, à análise multidimensional (forma representativa do cruzamento de informações), à interatividade dos painéis, à facilidade na identificação de falhas, à efetividade na obtenção de dados relevantes, dentre outros.

4.4 APLICATIVO DE SOLOS EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS (APPSEC)

Processados no serviço de computação em nuvem e desenvolvidos por linguagens de programação (*JavaScript*) e de design gráfico (CSS), os aplicativos resultantes são: APPSEC-PE, APPSEC-BR e APPSEC-BR RNA, Figura 129. Tais aplicativos podem ser acessados mediante conexão à internet, funcionando independentemente do sistema operacional do dispositivo em que são acessados.

Figura 129 - Aplicativos de Solos Expansivos e Colapsíveis (APPSEC).



Fonte: Autor (2024).

Esses aplicativos permitem acessar interativamente os produtos cartográficos elaborados por Amorim (2004), bem como os produzidos nesta tese. Dentre os principais benefícios para os usuários, podem ser citados:

- acessibilidade: os aplicativos podem ser acessados de qualquer dispositivo com uma conexão à internet e um navegador web;
- praticidade: os aplicativos do *Google Earth Engine* são projetados para serem fáceis de usar, mesmo para usuários sem experiência prévia em processamento de dados geoespaciais;
- gratuidade: os apps são gratuitos, possibilitando o acesso a uma ampla variedade de usuários, incluindo pesquisadores, estudantes e profissionais;
- ausência de instalação: não é necessário baixar e instalar qualquer programa, economizando tempo e espaço no disco do computador do usuário;
- atualização fácil: as atualizações podem ser feitas centralmente, sem a necessidade de ação do usuário;
- compatibilidade: são compatíveis com vários sistemas operacionais e dispositivos;
- interatividade: os usuários podem explorar e navegar pelos documentos cartográficos, bem como podem acessar outras páginas (tese, painéis de BI, site, tutoriais, dentre outros);
- efetividade: os usuários podem adicionar marcadores em pontos específicos no mapa para indicar locais de interesse, obtendo resultados automaticamente quanto às informações sobre os atributos das cartas de suscetibilidade e dos mapas fundamentais;
- utilidade: os aplicativos despontam como uma ferramenta útil para pesquisadores, estudantes e profissionais, podendo ser utilizados na etapa preliminar dos projetos de engenharia para identificação de áreas suscetíveis ao comportamento colapsível e expansivo.

Ante todo o exposto, elaborou-se uma representação visual que destaca a frequência e a importância das palavras contidas neste trabalho, Figura 130. Essa representação gráfica é conhecida como Nuvem de Palavras e visa proporcionar uma visão rápida e intuitiva das palavras mais relevantes abordadas na tese. Essa ferramenta ajuda os leitores a identificarem de maneira eficaz os temas centrais e a ênfase do conteúdo deste trabalho.

compreensão mais didática do estudo realizado, contribuindo assim para a disseminação do conhecimento acadêmico sobre solos colapsíveis e expansivos.

Figura 131 - Sítio eletrônico destinado à divulgação dos resultados da tese.



Fonte: Autor (2024).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

É apresentada a síntese dos principais resultados e conclusões obtidos neste trabalho, bem como são elencadas sugestões para pesquisas futuras.

5.1 CONCLUSÕES

5.1.1 Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE)

O BANDASE é um repositório de dados geotécnicos pertinentes aos solos colapsíveis e expansivos do Brasil, constituído por 267 e 259 registros, que correspondem a 130 e 107 referências bibliográficas, respectivamente.

A Região Nordeste se sobressai em relação ao quantitativo de ocorrências. Esse protagonismo regional se deve principalmente à ênfase nos fatores climatológicos, que criam um ambiente propício para a manifestação desses fenômenos. Pernambuco apresenta o maior número de registros de ocorrências para ambos os tipos de solos problemáticos.

A análise da distribuição espacial dos locais de ocorrência revelou que os registros no território brasileiro não são uniformemente distribuídos, havendo uma carência de dados, especialmente nas Regiões Centro-Oeste e Norte. O pequeno quantitativo de dados nessas áreas não indica ausência de solos colapsíveis e expansivos, mas sim uma falta de catalogação ou compartilhamento de informações sobre eventos envolvendo esses solos. Cabe registrar que tal conjuntura repercute nos produtos resultantes deste trabalho.

A análise estatística descritiva revelou que as variáveis relacionadas às propriedades dos solos do BANDASE apresentam predominantemente características de dados não paramétricos, implicando na adoção da mediana (medida de tendência central) e dos quartis (medida de variabilidade) para a realização de análise estatística.

Perante o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), as medidas de tendência central classificaram os solos colapsíveis e expansivos nas categorias de solos grossos e finos, respectivamente. Quanto à textura, a partir da análise da carta de plasticidade, os solos colapsíveis foram classificados como areia argilosa (SC). Nos solos expansivos, houve dupla classificação, visto que a marcação no recurso gráfico ocorreu próximo à Linha A. Sendo assim, esses solos foram classificados como argila siltosa de alta compressibilidade (CH - MH).

O teste não paramétrico de *Mann-Whitney* apontou haver evidência suficiente para concluir que existe diferença estatisticamente significativa entre as medianas referentes às propriedades dos solos colapsíveis e expansivos, exceto no caso das variáveis porosidade e densidade real dos grãos devido ao quantitativo de dados nessas variáveis.

Os resultados da análise estatística demonstram consonância com as classificações das redes neurais PE04 e PE07 de Holanda (2022) em relação ao comportamento dos solos estudados.

5.1.2 Sistema de Informação Geográfica de Solos Expansivos e Colapsíveis do Brasil (SIGSECBR)

Os produtos cartográficos conseguiram externar as áreas suscetíveis ao colapso e à expansão no território do Brasil. Representam uma valiosa ferramenta para orientar o uso e ocupação do solo em projetos de engenharia e planejamento urbano.

A aplicação dos critérios de suscetibilidade ao colapso e à expansão perante a classificação climática de *Thornthwaite* (1948) resulta na suscetibilidade alta em 0,4%, média em 16,4% e baixa em 83,2% do território. A suscetibilidade alta ocorre somente na região Nordeste, enquanto a média prevalece na região nordeste e na parte norte do Sudeste, havendo algumas ocorrências isoladas ao longo do país. Na região Sul ocorre somente o nível de suscetibilidade baixa. Ressalta-se que o mapa climatológico fundamental é elaborado a partir de dados mensais médios de temperatura e de pluviosidade anuais. É importante destacar que dentro desse intervalo anual podem ocorrer períodos mais secos ou mais úmidos.

No condicionante pedológico, o qual foi utilizado o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), verifica-se que os percentuais elevados têm relação com a expressiva parcela de área do território nacional (31,7%) ocupada pela classe dos latossolos. Quanto aos solos expansivos, depreende-se que os elevados percentuais de suscetibilidade baixa estão relacionados com a pequena parcela de componentes da unidade de mapeamento constituídos por argilominerais do grupo 2:1.

A carta interpretativa resultante da aplicação de RNA para solos colapsíveis apontou suscetibilidade alta em 27,8%, média em 3,4% e baixa em 16,8% da área do território nacional. A ausência de comportamento colapsível equivale a 49,4%. Em relação aos solos expansivos, constatou-se suscetibilidade alta em 35,9%, média em 9,8% e baixa em 3,7% da área do território brasileiro. A ausência de comportamento expansivo representa 48,0%. Em

ambos os solos, os corpos de água, as áreas urbanas e os registros incompletos correspondem ao percentual de 2,6%.

Sugerem-se as investigações geotécnicas recomendadas para cada grau de suscetibilidade, conforme estabelecidas por Amorim (2004). Semelhantemente ao referido autor, são apresentadas, resumidamente, as principais soluções técnicas adotadas para evitar ou minimizar os efeitos dos solos colapsíveis e expansivos na obra (Apêndices G e H, respectivamente).

É imprescindível frisar que os documentos cartográficos possuem caráter meramente orientativo. Portanto, em circunstância alguma, esses produtos cartográficos podem substituir os ensaios de campo e de laboratório, nem servir como justificativa para o descumprimento de exigências normativas e das boas práticas de Engenharia Civil.

Reitera-se que a elaboração dos produtos cartográficos apresentados neste estudo baseou-se em documentos cartográficos de escalas e fontes diversas. Dessa forma, salienta-se que a utilização de escalas variadas, em conjunto com a vasta extensão territorial do Brasil, implica desafios na representação precisa e detalhada de suas características geotécnicas. Além disso, as análises comparativas envolvem teorias de conhecimento distintas, tais como objetividade e subjetividade.

5.1.3 Painéis de *Business Intelligence* de Solos Expansivos e Colapsíveis (PABISEC)

Os painéis de (BI) demonstraram ser uma ferramenta eficaz para processar grandes volumes de dados geotécnicos, transformando-os em informações relevantes e acessíveis. Esses painéis possibilitam a rápida exposição e interpretação dos resultados, oferecendo uma visão abrangente dos condicionantes naturais e das suscetibilidades de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos do Brasil.

5.1.4 Aplicativo de Solos Expansivos e Colapsíveis (APPSEC)

Os aplicativos web desenvolvidos mostraram-se uma solução prática e ágil para acessar informações sobre suscetibilidade ao colapso e à expansão em diferentes localidades do Brasil. Sua interface amigável, aliada à capacidade de processamento em nuvem, resultou em uma experiência de uso acessível e intuitiva. Essa conclusão enfatiza a relevância dos

aplicativos como uma ferramenta de grande utilidade para profissionais da área de geotecnia, especialmente durante a fase preliminar de projetos de engenharia.

Este trabalho resulta em um material inovador na área de solos colapsíveis e expansivos. A combinação de recursos, englobando banco de dados, produtos cartográficos, tecnologias de *Business Intelligence* e aplicativos web, oferece um conjunto de ferramentas valiosas para lidar com esses desafios geotécnicos, bem como que permite fomentar estudos para o avanço do conhecimento nesse campo de pesquisa. Essa série de instrumentos está acessível de maneira prática tanto para a comunidade acadêmica quanto para os profissionais da Engenharia, através do sítio eletrônico dedicado à divulgação dos resultados obtidos neste estudo.

A pesquisa confirmou que a elaboração de cartas geotécnicas, fundamentadas em levantamentos climatológico, pedológico e geológico, é eficaz na identificação da suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos no Brasil. A utilização de painéis de *Business Intelligence* e aplicativos web proporciona uma visão dinâmica e facilita a interação com os usuários. Dessa forma, as hipóteses iniciais são confirmadas, ressaltando a importância dessa metodologia para orientar o uso do solo, reduzir riscos e fomentar práticas de ocupação sustentável.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Perante os resultados obtidos neste trabalho, sugerem-se as seguintes análises para serem desenvolvidas em trabalhos futuros:

- ⇒ realizar análises pormenorizadas de áreas correspondentes aos limites territoriais do Brasil a partir de documentos cartográficos com escala maiores e com compatibilidade quanto aos sistemas: geodésico de referência, projeção cartográfica e coordenadas;
- ⇒ aplicar outros condicionantes para a determinação dos níveis de suscetibilidades ao colapso e à expansão;
- ⇒ realizar análises comparativas entre as unidades federativas a partir de informações do BANDASE;
- ⇒ efetuar estudos sobre a caracterização física e química dos dados geotécnicos decorrentes do BANDASE;

- ⇒ aplicar metodologias científicas (redes neurais artificiais e regressão linear múltipla) nos dados oriundos do BANDASE, buscando identificar padrões de comportamento a partir de valores dos atributos desses solos;
- ⇒ desenvolver aplicativos para exposição dos produtos cartográficos oriundos de outros condicionantes;
- ⇒ incrementar registros de ocorrência para a área de estudo de modo a obter resultados satisfatórios na verificação metodológica.

REFERÊNCIAS

- ACKOFF, R. L. From data to wisdom. **Jornal of Applied Systems Analysis**, v. 16, p. 3–9, 1989.
- ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SILVA, A. L. B.; BORIN JÚNIOR, T.; CORRÊA, W. A. G. Alterações do nível freático induzidas pelo enchimento do reservatório de Três Irmãos, em Pereira Barreto, SP. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE*, 1997. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABGE, 1997. p. 190–192. Disponível em: <http://www.sbgeo.org.br/home/pages/44>. Acesso em: 31 jul. 2021.
- ALI, A.; AL-TAIE, A. J.; AL-KALILI, A. Expansive Soils and Identification Methods. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 39–37, 11 nov. 2022.
- AL-RAWAS, A. A. State-of-the-Art-Review of Collapsible Soils. **Sultan Qaboos University Journal for Science [SQUJS]**, v. 5, p. 115, 1 dez. 2000. <https://doi.org/10.24200/squjs.vol5iss0pp115-135>.
- ALONSO, E. E.; GENS, A.; HIGHT, D.W. Special problem soils. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, 9., 1987. **Proceedings [...]**. Dublin: General report, 1987. v. 3, p. 1087-1146.
- ALSHABA, A. A.; ABDELAZIZ, T. M.; RAGHEB, A. M. Treatment of collapsible soils by mixing with iron powder. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 4, p. 3737–3745, dez. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.07.019>.
- ALTMAYER, W. T. Discussion of engineering properties of expansive clays. *In: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS*, 81., 1955. **Proceedings [...]**. New York: ASCE, 1955. v. 81, p. 17–19.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- AMORIM, S. F. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsáveis do Estado de Pernambuco**. 2004. 244 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.
- ANDRADE, R. F. **Mapeamento Geotécnico preliminar em escala de semi-detalle (1:25.000) da área de expansão urbana de Uberlândia-MG**. 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14105>. Acesso em: 4 maio 2021.
- ANTUNES, F. S.; CAMPOS, T. M. P.; POLIVANOV, H.; CALDERANO, S. B.; ANDRADE, A. G. Desenvolvimento de classes e unidades geo-pedológicas a partir da interação entre a pedologia e a geotecnia. **Revista Geotecnia**, v. 127, p. 61–79, 2013.
- ANTUNES, F. S.; SALOMÃO, F. X. T. Solos em pedologia. *In: OLIVEIRA, A. M. S.; MONTICELI, J. J. (eds.). Geologia de Engenharia e Ambiental*. São Paulo: ABGE, 2018. v.

2, p. 71–85.

AQUINO, A. E. B. **Contribuição à cartografia geotécnica no município de Teresina-PI:** cartas de suscetibilidade à ocorrência de solos problemáticos e prática de fundação com uso de geoprocessamento. 2020. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/38375>. Acesso em: 1 maio 2021.

AQUINO, A. E. B.; FERREIRA, S. R. M. **Contribuição à cartografia geotécnica no município de Teresina-PI.** São Paulo: Dialética, 2022.

ARAGÃO, C. J. G.; MELO, A. C. Fundações rasas em solo colapsável um caso no semiárido de Pernambuco. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 1982., ABMS. **Anais [...]**. Olinda: ABMS, 1982. p. 19–40. Disponível em: <https://philos.sophia.com.br/terminal/8530/acervo/detalhe/734?guid=1627819653110&returnUrl=%2fterminal%2f8530%2fresultado%2fresultar%3fguid%3d1627819653110%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d734%23734&i=1>. Acesso em: 29 jul. 2021.

ARONOFF, S. **Geographic Information Systems: A Management Perspective.** Ottawa: WDL Publications, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122:** projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=426719>. Acesso em: 7 ago. 2021.

ATAÍDE, S. O. F. **Análise o comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia.** 2017. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29710>. Acesso em: 29 ago. 2021.

AUGUSTO FILHO, O. Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Ambiental. *In*: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. (orgs.). **Engenharia ambiental:** conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. p. 643–666.

AYADAT, T.; HANNA, A. M. Encapsulated stone columns as a soil improvement technique for collapsible soil. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, v. 9, n. 4, p. 137–147, 1 out. 2005. <https://doi.org/10.1680/grim.2005.9.4.137>.

AYALA, F. J.; GIJÓN, M. F.; MAZO, C. O.; RODRÍGUEZ, J. L. S. **Mapa previsor de riesgos por expansividad de arcillas en España a escala 1: 1.000. 000.** Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 1986. Disponível em: <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/mapa.aspx?parent=../tematica/tematicossingulares.aspx&Id=16&language=es>. Acesso em: 4 jul. 2021.

BAPTISTA, G. M. M.; MADEIRA NETTO, J. S.; MENESES, P. R. Determinação da relação sílica–alumina a partir dos dados do sensor AVIRIS (JPL/NASA) para discretização espacial do grau de intemperismo de solos tropicais. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1998. **Anais [...]**. São Paulo: INPE, 1998. p. 1345–1355. Disponível em: http://mart.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.08.16.41/doc/6_73o.pdf.

Acesso em: 6 ago. 2021.

BARBIERI, C. **BI2 - Business intelligence**: modelagem e qualidade. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/12488>. Acesso em: 29 ago. 2021.

BARDEN, L.; MCGOWN, A.; COLLINS, K. The collapse mechanism in partly saturated soil. **Engineering Geology**, v. 7, n. 1, p. 49–60, jun. 1973. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90006-9).

BENATTI, J. C. B. **Colapsibilidade com sucção controlada de um solo coluvionar e laterítico de Campinas/SP**. 2010. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

BENATTI, J. C. B.; MIGUEL, M. G.; RODRIGUES, R. A. Influência da sucção matricial e do processo de formação na compressibilidade de amostras de um solo colapsível de Campinas/SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 2011. **Anais [...]**. Goiânia: Kelps, 2011. p. 395-402.

BEZERRA, A. L. **Análise da expansão de um solo no estado natural e compactado com adição de cinza de casca de arroz do município de Brejo da Madre de Deus – PE**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BITAR, O. Y.; CERRI, L. F. S.; NAKAZAWA, V. A. Carta de risco geológico e carta geotécnica: uma diferenciação a partir de casos em áreas urbanas no Brasil. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1992. **Anais [...]**. São Paulo: ABGE, 1992. p. 35–41.

BORGES, J. J. S. **Avaliação do módulo de elasticidade, resistência de ponta e variação de volume em campo com e sem inundação em solo colapsível**. 2016. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/17142>. Acesso em: 2 mar. 2021.

BORGES, J. J. S.; FERREIRA, S. R. M.; AMORIM, S. F. Utilização do sistema de informação geográfica para identificar solos colapsíveis na região do semiárido brasileiro. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 8, n. 2, p. 140–155, 29 jun. 2023. <https://doi.org/10.24221/jeap.8.2.2023.5681.140-155>.

BORGES, J. J. S.; HOLANDA, M. J. O.; FERREIRA, S. R. M.; AMORIM, S. F. Carta de suscetibilidade de solos expansivos para região do semiárido brasileiro utilizando Rede Neural Artificial - RNA. In: 18º CONGRESSO NACIONAL GEOTECNIA, 2023. **Anais [...]**. Évora: Universidade de Évora, 2023.

BORGES, J. J. S.; HOLANDA, M. J. O.; FERREIRA, S. R. M.; AMORIM, S. F. Solos expansivos: carta de suscetibilidade de ocorrência no Brasil utilizando Rede Neural Artificial

- RNA. **Revista de Geografia**, v. 40, n. 3, p. 119–140, 10 jan. 2024.
<https://doi.org/10.51359/2238-6211.2023.258626>.

BRAGHITTONI, R. **Business intelligence**: implementar do jeito certo e a custo zero. São Paulo: Casa do Código, 2017.

BRASIL. **Acesso e uso de dados geoespaciais**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2019. Disponível em:
<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101675.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2021.

BRASIL. **Atlas geográfico escolar**. 5. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2009. Disponível em:
<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=244152>. Acesso em: 25 nov. 2021.

BRASIL. **Introdução ao ambiente SIG QGIS**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2018. Disponível em:
http://geofpt.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/introducao_sig_qgis/Introducao_ao_ambiente_SIG_QGIS_2edicao.pdf. Acesso em: 5 jul. 2021.

BRASIL. **Mapa Político do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2020. Disponível em:
https://geofpt.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/mapas_do_brasil/politico/brasil_politico5000k_2020.pdf. Acesso em: 9 jun. 2021.

BRASIL. **Noções Básicas de Cartografia**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 1999. Disponível em:
<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/ManualdeGeociencias/Nocoess%20basicas%20de%20cartografia.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2021.

BRASIL. **Nota Técnica**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2015. Disponível em:
https://geofpt.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/nota_tecnica_termo_perodo_transicao_sirgas2000.pdf. Acesso em: 22 nov. 2021.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. V. (orgs.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1–5. Disponível em:
<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2021.

CÂMARA, G.; QUEIROZ, G. R. Arquitetura de sistemas de informação geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. V. (orgs.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1–35. Disponível em:
<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 15 maio 2021.

CAMPOS, J. O. **A desagregabilidade dos siltitos da Formação Corumbataí: consequências práticas, fenomenologia provável e experimentação pertinente**. 1989. Tese (Concurso Público para Livre Docência) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 1989.

CANIL, K.; FREITAS, C. G. L.; SOBREIRA, F. G.; COLLARES, E. G. Cartografia geotécnica e geoambiental. *In*: OLIVEIRA, A. M. S.; MONTICELI, J. J. (eds.). **Geologia de engenharia e ambiental**. 1. ed. São Paulo: ABGE, 2018. p. 422–437.

CASAGRANDE, A. The structure of clay and its importance in foundation engineering. **Boston Society Civil Engineers Journal**, p. 168–209, 1932.

CAVALCANTE, E. H.; CAVALCANTE JÚNIOR, D. A.; SANTOS, W. J.; CARDOSO JÚNIOR, C. R. Caracterização de um solo expansivo, não saturado, de Sergipe. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 2007. **Anais [...]**. Salvador: ABMS, 2007. p. 133–139. Disponível em: <https://philos.sophia.com.br/terminal/8530/acervo/detalhe/5182?guid=1627931996589&returnUrl=%2fterminal%2f8530%2fresultado%2flistar%3fguid%3d1627931996589%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d5182%235182&i=1>. Acesso em: 2 ago. 2021.

CAVALCANTE, E. H.; CAVALCANTI JÚNIOR, D. A.; SANTOS, W. J.; SOUZA NETO, J. B. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo de Sergipe. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS, 2006. **Anais [...]**. Nova Friburgo: ABMS, 2006.

CELESTINO, T. B.; DINIZ, N. C. Informática. *In*: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (orgs.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 227–241.

CERRI, L. E. S. Carta geotécnica: contribuições para uma concepção voltada às necessidades brasileiras. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6., 1990. **Anais [...]**. Salvador: ABGE, 1990. v. 6, p. 309–317.

CERRI, L. E. S.; AMARAL, C. P. Riscos Geológicos. *In*: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (orgs.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 301–310.

CHAUDHURI, S.; DAYAL, U.; NARASAYYA, V. An overview of business intelligence technology. **Communications of the ACM**, v. 54, n. 8, p. 88–98, ago. 2011. <https://doi.org/10.1145/1978542.1978562>.

CHEN, F. H. **Foundations on expansive soils**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 1975. Disponível em: <https://www.elsevier.com/books/foundations-on-expansive-soils/chen/978-0-444-41393-2>. Acesso em: 1 ago. 2021.

CHEN, F. H. The use of piers to prevent the uplifting of lightly loaded structures founded on expansive soils. *In*: INTERNATIONAL RESEARCH AND ENGINEERING CONFERENCE ON EXPANSIVE CLAY SOILS, 1965. **Proceedings [...]**. Texas: A & M Press, 1965. p. 152–171.

CHRIST, C. E. **Mapeamento de áreas suscetíveis ao colapso na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição**. 2014. 1–174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/129260>. Acesso em: 14 abr. 2021.

CINTRA, J. C. A. **Fundações em solos colapsíveis**. 1. ed. São Carlos: Serviço Gráfico da EESC/USP, 1998.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Projeto de Fundações em solos colapsíveis**. São Carlos: EESC/USP, 2009.

CLEMENCE, S. P.; FINBARR, A. O. Design Considerations for Collapsible Soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, v. 107, n. 3, p. 305–317, mar. 1981. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001102>.

CLICKGEO. Lista dos Códigos EPSG mais Usados no Brasil. 2016. **Download**. Disponível em: <https://www.clickgeo.com.br/codigos-epsg-brasil/>. Acesso em: 26 nov. 2021.

CONCIANI, W. **Fundação para Construção de Habitações de Interesse Social no Mato Grosso**. Cuiabá: CEFETMT, 2006.

CONCIANI, W.; SOARES, M. M. A simple in situ test to measure soil collapse. *In*: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1., 1995. **Proceedings** [...]. Gualajara: ISSMFE, 1995. v. 1, p. 90–101.

CONSTANTINO, C. S. **Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz**. 2018. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33985>. Acesso em: 25 maio 2021.

COWEN, D. J. GIS versus CAD Versus DBMS: what are the Difference? **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, ed. 11, p. 1551–1555, nov. 1988.

CUELLAR, V. **Analisis crítico de los métodos existentes para el empleo de arcillas expansives en obras de carreteras y recomendaciones sobre las técnicas más idóneas para su uso habitual em España**. Madrid: Laboratorio del Transporte y Mecanica del suelo, 1978.

DAKSHANAMURTHY, V.; RAMAN, V. A Simple Method of Identifying an Expansive Soil. **Soils and Foundations**, v. 13, n. 1, p. 97–104, 1 mar. 1973. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.13.97>.

DALLA CORTE, A. P.; SILVA, C. A.; SANQUETTA, C. R.; REX, F. E.; PFUTZ, I. F. P.; MACEDO, R. C. **Explorando o QGIS 3.X**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2020. Disponível em: <https://www.ufpr.br/portalufpr/noticias/pesquisadores-lancam-livro-gratuito-sobre-software-d-e-sistem>. Acesso em: 1 jul. 2021.

DINIZ, N. C. **Automação da cartografia geotécnica**: uma ferramenta de estudos e projetos para avaliação ambiental. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

DINIZ, N. C. Cartografia geotécnica por classificação de unidade de terreno e avaliação de

suscetibilidade e aptidão. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 29–77, 2012.

DINIZ, N. C.; FREITAS, C. G. L. Cartografia Geotécnica. In: COUTINHO, R. Q. (org.). **Parâmetros para a cartografia geotécnica e diretrizes para medidas de intervenção de áreas sujeitas**. Recife: GEGEP/UFPE, 2013.

DUDLEY, J. H. Review of Collapsing Soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, New York, v. 96, n. 3, p. 925–947, maio 1970.
<https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001426>.

EASTMANN, J. R. **IDRISI for Windows**: introdução e exercícios tutoriais. Porto Alegre: Centro de Recursos IDRISI da UFRGS, 1998. Disponível em:
http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/arquivos/downloads/Tutorial_Idrisi_for_Windows_2.pdf. Acesso em: 4 ago. 2021.

EASTMANN, J. R. **IDRISI user's guide**. Massachusetts: Clark University Graduate School of Geography, 1992.

ECKERSON, W. Smart companies in the 21st century: The secrets of creating successful business intelligence solutions. **TDWI Report Series**, v. 7, p. 1–38, 2003.

ELEUTÉRIO, M. A. M. **Sistemas de informações gerenciais na atualidade**. Curitiba: Intersaberes, 2015.

EMBRAPA. Argissolo. 2021a. **Portal Embrapa**. Disponível em:
<https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/4050001/argissolo>. Acesso em: 13 set. 2021.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1997. Disponível em:
https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf. Acesso em: 6 ago. 2021.

EMBRAPA. Portal Embrapa. 2012. **Embrapa Lança Versão Atualizada do Mapa de Solos do Brasil**. Disponível em:
<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/1463338/embrapa-lanca-versao-atualizada-do-mapa-de-solos-do-brasil>. Acesso em: 3 out. 2021.

EMBRAPA. Solos do Brasil. 2021b. **Portal Embrapa**. Disponível em:
<https://www.embrapa.br/solos/sibcs/solos-do-brasil>. Acesso em: 13 set. 2021.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. **Getting to Know ArcView GIS**: The Geographic Information System (GIS) for Everyone. California: GeoInformation International, 1997.

FEITOSA, M. C. A. **Lodo de esgoto**: algumas aplicações em engenharia. 2009. 12 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2009. Disponível em: <http://tede2.unicap.br:8080/handle/tede/41>. Acesso em: 8 ago. 2021.

FERREIRA, C. V.; LOBO, A. S.; RENOFIO, A.; ALBIERO, J. H. Danos em edificações provenientes de patologias de fundações, implantadas em solos colapsíveis. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS*, 2015. *Anais [...]*. Belo Horizonte: IBAPE, 2015. p. 1–27. Disponível em: <http://www.mrcl.com.br/xiicobreap/pe07.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2021.

FERREIRA, S. R. M. Aplicações da classificação e levantamentos pedológicos aos estudos dos solos colapsíveis e expansivos. *Revista Ciência e Engenharia*, v. 2, p. 119–136, 1993.

FERREIRA, S. R. M. Banco de dados de solos especiais: colapsíveis do estado de Pernambuco. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES*, 1990. *Anais [...]*. Salvador: ABMS, 1990. p. 81–86.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação**. 1995. 379 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343493963_Colapso_e_Expansao_em_Solos_Naturais_nao_Saturados_Devido_a_Inundacao. Acesso em: 8 ago. 2021.

FERREIRA, S. R. M. Expansão e colapso em solos do Semi-Árido de Pernambuco. *In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA*, 1996. *Anais [...]*. Rio de Janeiro: ABMS, 1996. p. 299–310.

FERREIRA, S. R. M. **Mapa de risco a colapsibilidade e expansividade de solos do estado de Pernambuco–Geotecnia Ambiental**. Relatório Técnico. Recife: CNPQ, 1999.

FERREIRA, S. R. M. Microestrutura de Solos Colapsíveis e Técnicas de Melhoramento. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 2010. *Anais [...]*. Gramado: ABMS, 2010. p. 1–8. Disponível em: <https://philos.sophia.com.br/terminal/8530/acervo/detalhe/2255?guid=1628421970126&returnUrl=%2fterminal%2f8530%2fresultado%2flistar%3fguid%3d1628421970126%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d2255%232255&i=1>. Acesso em: 8 ago. 2021.

FERREIRA, S. R. M. **Relatório de pesquisa de solos especiais**: colapsíveis, dispersivos e expansivos. Relatório Técnico. Recife: CNPQ, 1989.

FERREIRA, S. R. M. Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS*, 2008. *Anais [...]*. Salvador: ABMS, 2008. Disponível em: <https://philos.sophia.com.br/terminal/8530/acervo/detalhe/5577?guid=1627819444367&returnUrl=%2fterminal%2f8530%2fresultado%2flistar%3fguid%3d1627819444367%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d5577%235577&i=1>. Acesso em: 1 ago. 2021.

FERREIRA, S. R. M. **Solos especiais**: colapsíveis, dispersíveis, expansíveis. Relatório Final. Recife: CNPQ, 1988.

FERREIRA, S. R. M.; ARAÚJO, A. G. D.; BARBOSA, F. A. S.; SILVA, T. C. R.; BEZERRA, I. M. L. Analysis of changes in volume and propagation of cracks in expansive soil due to changes in water content. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, p. e0190169, 25 nov. 2020. <https://doi.org/10.36783/18069657rbs20190169>.

FERREIRA, S. R. M.; FERREIRA, M. G. V. X. Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um vertissolo no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 779–791, 2009.
<https://doi.org/10.1590/s0100-06832009000400004>.

FERREIRA, S. R. M.; LACERDA, W. A. Fatores que influenciam a variação de volume devido à inundação de solos colapsíveis. **Revista Solos e Rochas**, v. 16, n. 4, p. 245–253, dez. 1993.

FERREIRA, S. R. M.; PAIVA, S. C.; MORAIS, J. J. O.; VIANA, R.B. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista PE melhorado com cal. **Revista Matéria**, 22, Supl. 1, e11930. 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0266>

FERREIRA, S. R. M.; VASCONCELOS, R. P. R. Características de colapsibilidade de um solo no município de Cabrobó-PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2008. **Anais [...]**. Búzios: ABMS, 2008. p. 1543–1548.

FERREIRA, S. R. M.; VILAR, O. M. Solos colapsíveis e expansivos. In: CARVALHO, J. C.; JUNIOR, G. F. N. G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; FILHO, F. C. S.; RODRIGUES, R. A. (orgs.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 2. ed. São Paulo: ABMS, 2023. v. 1, p. 559–595.

FITZ, P. R. **Cartografia básica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FLATICON. Acesse +5.1M figurinhas e ícones vetoriais. 2021. **Flaticon**. Disponível em: <https://www.flaticon.com/br/>. Acesso em: 29 jun. 2021.

FOXIT. Foxit PDF Reader Industry's most powerful PDF reader. 2021. **Foxit Do More With Documents**. Disponível em: <https://www.foxit.com/pdf-reader/>. Acesso em: 23 jun. 2021.

FRANCO, G. B.; MARQUES, E. A. G.; CALIJURI, M. L.; GOMES, R. L. Cartografia geotécnica: estágio atual do conhecimento. **Caminhos de Geografia**, v. 11, n. 35, p. 158–172, nov. 2010.

FRAZÃO, E. B. **Contribuição à metodologia para determinação da pressão de expansão em solos e rochas**. 1981. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981. DOI 10.11606/D.44.2016.tde-02022016-130932. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44131/tde-02022016-130932/>. Acesso em: 2 ago. 2021.

FREEPIK. Recursos gráficos para todos: Encontre Vetores, PSD e Fotos grátis. 2021. **Freepik**. Disponível em: <https://br.freepik.com/>. Acesso em: 28 jul. 2021.

FREITAS, C. G. L. **Cartografia geotécnica de planejamento e gestão territorial**: proposta teórica e metodológica. 2000. 238 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

FUCALE, S. P. **Comportamento de variação de volume devido à inundação em alguns solos colapsíveis do Estado de Pernambuco**. 2000. 138 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2000.

FUTAI, M. M. **Análise de ensaios edométricos com sucção controlada em solos colapsíveis**. 1997. 255 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997. DOI 10.13140/RG.2.1.3848.3920. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283568129_Analise_de_ensaios_edometricos_com_succao_controlada_em_solos_colapsiveis. Acesso em: 29 jul. 2021.

GAO, C.; DU, G.; LIU, S.; HE, H.; ZHANG, D. The microscopic mechanisms of treating collapsible loess with vibratory probe compaction method. **Transportation Geotechnics**, v. 27, p. 100492, mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100492>.

GAO, C.; DU, G.; LIU, S.; ZHANG, D.; ZHANG, K.; ZENG, B. Field study on the treatment of collapsible loess using vibratory probe compaction method. **Engineering Geology**, v. 274, p. 105715, set. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105715>.

GARTNER. Magic Quadrant Research Methodology. 2021. **Gartner**. [Gartner]. Disponível em: <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/magic-quadrants-research>. Acesso em: 4 dez. 2021.

GIBBS, H. J.; BARA, J. P. Predicting surface subsidence from basic soil tests. **Field Testing of Soils**. Filadélfia: ASTM Special Technical Publication, 1962.

GITIRANA JUNIOR, G.F.N.; MARINHO, F. A.M.; SOTO, M.A.A. A curva de retenção de água de materiais porosos. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JÚNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHAS, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (orgs.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. p. 205–226.

GOMES, P. C. T. Gartner | O que é o quadrante mágico do Gartner e qual sua importância? 27 abr. 2016. **OpServices | Gerenciamento de TI & Dashboards em tempo real**. Disponível em: <https://www.opservices.com.br/o-que-e-o-quadrante-magico-do-gartner/>. Acesso em: 4 dez. 2021.

GON, F. S. **Caracterização geotécnica através de ensaios de laboratórios de um solo de diabásio da região de Campinas**. 2011. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/258759>. Acesso em: 20 jan. 2021.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do Baixo Jaguaribe - Estado do Ceará**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/1704>. Acesso em: 29 ago. 2021.

GOOGLE. Acesso fácil e seguro a todo o conteúdo. 2021a. **Google Drive**. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/drive/>. Acesso em: 13 jul. 2021.

GOOGLE. Análise de todo o planeta na nuvem do Google. 2022a. **Google Earth Engine**. Disponível em: https://www.google.com/intl/pt_in/earth/education/tools/google-earth-engine/. Acesso em: 5 nov. 2022.

GOOGLE. Conheça o Data Studio. 2021b. **Google Data Studio**. Disponível em: <https://support.google.com/datastudio/answer/6283323?hl=pt-BR>. Acesso em: 13 jul. 2021.

GOOGLE. Crie apresentações elegantes. 2021c. **Google Apresentações**. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/slides/about/>. Acesso em: 23 jun. 2021.

GOOGLE. Crie documentos impactantes. 2021d. **Google Documentos**. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/docs/about/>. Acesso em: 13 jul. 2021.

GOOGLE. Crie lindos formulários. 2021e. **Google Formulários**. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/forms/about/>. Acesso em: 13 jul. 2021.

GOOGLE. Crie planilhas avançadas. 2021f. **Google Planilhas**. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/sheets/about/>. Acesso em: 13 jul. 2021.

GOOGLE. Crie sites de equipe impactantes com facilidade. 2021g. **Google Sites**. Disponível em: <https://workspace.google.com/intl/pt-BR/products/sites/>. Acesso em: 13 jul. 2021.

GOOGLE. Earth Engine Apps. 2022b. **Google Earth Engine**. Disponível em: <https://developers.google.com/earth-engine/guides/apps>. Acesso em: 7 nov. 2022.

GOOGLE. O globo terrestre mais detalhado do mundo. 2021h. **Google Earth**. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>. Acesso em: 15 jun. 2021.

GOOGLE. Perguntas frequentes. 2022c. **Google Earth Engine**. Disponível em: <https://earthengine.google.com/faq/>. Acesso em: 5 nov. 2022.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences. v. 202, p. 18–27, 1 dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 1953.

GROHMANN, C. H. **Geoprocessamento com Software Livre: GRASS-GIS e QGIS**. São Paulo: USP, 2012.

GUIMARÃES NETO, J. S. F.; FERREIRA, S. R. M. Colapso devido à inundação em solos compactados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 1998. **Anais [...]**. Brasília: ABMS, 1998. p. 165–170. Disponível em:

<https://philos.sophia.com.br/terminal/8530/acervo/detalhe/823?guid=1627820040186&returnUrl=%2fterminal%2f8530%2fresultado%2flistar%3fguid%3d1627820040186%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d823%23823&i=1>. Acesso em: 1 ago. 2021.

HAERI, S. M.; VALISHZADEH, A. Evaluation of Using Different Nanomaterials to Stabilize the Collapsible Loessial Soil. **International Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 5, p. 583–594, maio 2021. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00583-8>.

HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. V. **Introdução ao Geoprocessamento**: princípios

básicos e aplicação. Jaguariúna: Empraba, 2007. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/15316/introducao-ao-geoprocessamento-principios-basicos-e-aplicacao>. Acesso em: 4 abr. 2021.

HANDY, R. L. Collapsible Loess in Iowa. **Soil Science Society of America journal**, , p. 281–284, 1973.

HOLANDA, M. J. O. **Solos colapsíveis e expansivos no Brasil**: classificação da suscetibilidade de ocorrência aplicando redes neurais artificiais. 2022. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/49238>.

HOLTZ, W. G.; GIBBS, H. J. Engineering Properties of Expansive Clays. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 121, n. 1, p. 641–663, 1 jan. 1956. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007325>.

HOUSTON, S. L.; HOUSTON, W. N. Collapsible soils engineering. *In*: UNSATURATED SOIL ENGINEERING PRATICE, 1997. **Proceedings** [...]. Logan: Geotechnical Special Publication, 1997. p. 199–232.

HOWAYEK, A. E.; HUANG, P. T.; BISNETT, R.; SANTAGATA, M. **Identification and Behavior of Collapsible Soils**. West Lafayette: Joint Transportation Research Program, 2011. DOI 10.5703/1288284314625. Disponível em: <http://docs.lib.purdue.edu/jtrp/1481/>. Acesso em: 29 jun. 2021.

INACIO, A. Data Studio agora é Looker Studio - Aylton Inacio. 17 out. 2022. **Aylton Inacio - Sites Otimizados, Web Analytics e Marketing Digital**. Disponível em: <https://ayltoninacio.com.br/blog/data-studio-agora-e-looker-studio>. Acesso em: 28 dez. 2022.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization**: principles and practice. London: Butterworth and Company Publishers Limited, 1972.

INKSCAPE. Inkscape é um editor profissional de gráficos vetoriais para Linux, Windows e macOS. É gratuito e de código aberto. 2022. **Inkscape Desenhe livremente**. Disponível em: <https://inkscape.org/pt-br/>. Acesso em: 15 jul. 2021.

JAMOVI. Stats open now. 2023. **Open statistical software for the desktop and cloud**. Disponível em: <https://www.jamovi.org/>. Acesso em: 12 abr. 2023.

JEFFERSON, I.; ROGERS, C.; EVSTATIEV, D.; KARASTANEV, D. Treatment of metastable loess soils: Lessons from Eastern Europe. **Elsevier Geo-Engineering Book Series**. Elsevier, 2005. v. 3, p. 723–762. DOI 10.1016/S1571-9960(05)80028-X. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S157199600580028X>. Acesso em: 23 mar. 2023.

JENNINGS, J. E.; KNIGHT, K. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. *In*: REGIONAL CONFERENCE FOR AFRICA ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12., set. 1975., publisher-place: Durban. **Proceedings** [...]. Durban: SMFE, set. 1975. v. 12, p. 131. DOI 10.1016/0148-9062(75)91203-6. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0148906275912036>. Acesso em: 12 fev. 2021.

JENNINGS, J. E.; KNIGHT, K. The Additional Settlement of Foundations due to a Collapse of Structure of Sand Subsoils on Wetting. *In*: PROC. OF THE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1957. **Proceedings** [...]. London: ISSMGE, 1957. p. 316–319. Disponível em: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/41/1957_01_0066.pdf. Acesso em: 2 maio 2021.

JIMENEZ SALAS, J. A. Cimentaciones en terrenos expansivos o colasables. *In*: JIMENEZ SALAS, J. A.; PERATE, L. D. C.; UBARRI, V. E.; MUNOZ, C. F.; TELLO, L. F. L.; ALPNAES, J. L. de J.; ALCON, M. L. (orgs.). **Geotecnia y Cimientos III: cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia**. Madrid: Rueda, 1980. p. 533–650.

JONES JR, D. E.; HOLTZ, W. G. Expansive Soils: hidden disaster. **Civil Engineering**, v. 43, n. 8, ago. 1973. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/133235>. Acesso em: 27 jul. 2021.

JUCÁ, J. F. T.; PONTES FILHO, I. D. S. Comportamento de solos expansivos. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 2., 1997. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: ABMS, 1997. v. 2, p. 461–489. Disponível em: <https://philos.sophia.com.br/terminal/8530/acervo/detalhe/4996?guid=1628445340988&returnUrl=%2fterminal%2f8530%2fresultado%2flistar%3fguid%3d1628445340988%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d4996%234996&i=2>. Acesso em: 3 maio 2021.

JUSTINO DA SILVA, J. M. **Variação volumétrica de uma argila contráctil-expansiva não saturada submetida a diferentes condições climáticas**. 2001. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

JUSTO, J.; DELGADO TRUJILLO, A.; RUIZ, J. The influence of stress-path in the collapse-swelling of soils at the laboratory. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 21 maio 1984. **Proceedings** [...]. Adelaide: Australian Geomechanics Society, 21 maio 1984. p. 67–71. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/285472306_The_influence_of_stress-path_in_the_collapse-swelling_of_soils_at_the_laboratory. Acesso em: 2 ago. 2021.

KUMAR, L.; MUTANGA, O. **Google Earth Engine Applications**. Austrália: MDPI, Basel, 2019. DOI 10.3390/books978-3-03897-885-5. Disponível em: <https://www.mdpi.com/books/book/1262>. Acesso em: 6 nov. 2022.

LAMBE, T. W. A mechanistic picture of the shear strength of clay. *In*: RESEARCH CONFERENCE ON SHEAR STRENGTH OF COHESIVE SOILS, 1960. **Proceedings** [...]. Colorado: ASCE, 1960. p. 555–580.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1973.

LAWTON, E. C.; FRAGASZY, R. J.; HETHERINGTON, M. D. Review of Wetting-Induced Collapse in Compacted Soil. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 118, n. 9, p. 1376–1394, 1 set. 1992. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:9\(1376\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:9(1376)).

LI, P.; VANAPALLI, S.; LI, T. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils

due to wetting. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 256–274, abr. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.002>.

LOLLO, J. A. Revisão dos métodos de cartografia geotécnica de materiais geológicos colapsíveis. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 99–115, 2012.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic Information Science and Systems**. 4. ed. United States Of America: John Wiley and Sons, 2015.

LUTENEGGER, A. J.; SABER, R. T. Determination of Collapse Potential of Soils. **Geotechnical Testing Journal**, v. 11, n. 3, p. 173–178, 1 set. 1988. <https://doi.org/10.1520/GTJ10003J>.

MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. W. **Geographical Information Systems: Principles and Applications**. New York: Longman Scientific and Technical, 1991.

MAHLER, C. F. **Análise de obras assentes em solos colapsíveis e expansivos**. 1994. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994. Disponível em: <http://www.coc.ufjr.br/pt/teses-de-doutorado/138-1994/794-claudio-fernando-mahler>. Acesso em: 26 jul. 2021.

MAIA, I. G.; COUTINHO, R. Q.; DA SILVA, B. Q.; CAVALCANTE, F. P. Trincas Longitudinais Longas em Pavimentos Assentes Sobre Solos Expansivos no Município de Cabo de Santo Agostinho / PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2018. **Anais [...]**. Salvador: ABMS, 2018. Disponível em: <https://philos.sophia.com.br/terminal/8530/acervo/detalhe/4494?guid=1628423006320&returnUrl=%2fterminal%2f8530%2fresultado%2flistar%3fguid%3d1628423006320%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d4494%234494&i=1>. Acesso em: 8 ago. 2021.

MARINHO, F.A.M. Medição de Sucção em Solos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 1997. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: POLI, 1997. p. 373–397.

MARGOTO, L. O.; APARECIDO JÚNIOR, L. G. Caracterização e análise de solos colapsíveis na área urbana do município de Campos Gerais. In: JORNADA CIENTÍFICA DA GEOGRAFIA, 2016. **Anais [...]**. Alfenas: UNIFAL, 2016. p. 192–195. Disponível em: https://www.unifal-mg.edu.br/4jornadageo/system/files/anexos/leonardo192_196.pdf. Acesso em: 24 jun. 2021.

MARQUES, F. A.; NASCIMENTO, A. F.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B. **Solos do nordeste**. Recife: Embrapa Solos, 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1003864/solos-do-nordeste>. Acesso em: 7 set. 2021.

MARTINEZ, B. Microsoft é líder em plataformas de BI e Analytics no quadrante mágico Gartner em 2021. 2021. **Showmetech**. Disponível em: <https://www.showmetech.com.br/microsoft-e-lider-em-plataformas-de-bi-e-analytics-no-quad>

rante-magico-gartner/. Acesso em: 4 dez. 2021.

MEDEIROS, L. D.; FERREIRA, S. R. M.; BELLO, M. I. M. C. V. Evolução da estabilização química em solos expansivos. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 8, n. 2, p. 123–139, 15 jun. 2023. <https://doi.org/10.24221/jeap.8.2.2023.5294.123-139>.

MEDERO, G. M. **Comportamento de um solo colapsível artificialmente cimentado**. 2005. 319 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/6085>. Acesso em: 2 mar. 2021.

MENDONÇA, M. B. **Comportamento de solos colapsíveis da região de Bom Jesus da Lapa - Bahia**. 1990. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/3958/1/172222.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2021.

MENDONÇA NETO, H. C. **Análise de volume devido à inundação de um solo colapsível utilizado em um canal de irrigação**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

METZ, C. E. Basic principles of ROC analysis. **Seminars in Nuclear Medicine**, v. 8, n. 4, p. 283–298, out. 1978. [https://doi.org/10.1016/S0001-2998\(78\)80014-2](https://doi.org/10.1016/S0001-2998(78)80014-2).

MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; DAMACENO, T. G.; SIQUEIRA, C. A.; JACOMO, B. O. Tipos climáticos, segundo classificação de Thornthwaite. 2021. **Geoinfo Embrapa Territorial**. Disponível em: http://geoinfo.cnpem.embrapa.br/layers/geonode%3Atiposclimaticos_v1_thornthwaite_mingotietal2021. Acesso em: 6 out. 2021.

MOORE, R. Here's to you: 15 years of Google Earth stories. 2020. **Blog Google**. Disponível em: <https://blog.google/products/earth/special-stories-from-15-years-of-google-earth/>. Acesso em: 7 ago. 2021.

MORAIS, J. J. O. **Caracterização geotécnica da expansividade de um solo argiloso do município de Paulista-PE**. 2017. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/26786>. Acesso em: 8 ago. 2021.

MOTTA, E. Q. **Análise do colapso de um solo compactado devido à inundação e à interação solo-líquido contaminante**. 2006. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5475>. Acesso em: 12 nov. 2020.

MURTHY, V. N. S. **Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering**. New York: CRC press, 2002.

NAKAZAWA, V. A.; FREITAS, C. G. L.; DINIZ, N. C. **Carta geotécnica do Estado de São Paulo, escala 1:500.000**. São Paulo: Departamento de Ciência e Tecnologia : Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1994.

NELSON, J. D.; MILLER, D. J. **Expansive Soils**: problems and practice in foundation and pavement engineering. New York: John Wiley and Sons, 1992.

NUNES, S. M. **Estudo dos solos expansivos no município de Juazeiro/BA e na Região de Lapão/BA**: identificação, determinação da expansibilidade linear e classificação geotécnica. 2013. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2013. Disponível em: [http://www.univasf.edu.br/\\$\sim\\$stcc/000002/000002AA.pdf](http://www.univasf.edu.br/$\sim$stcc/000002/000002AA.pdf). Acesso em: 26 maio 2021.

OLIVEIRA, C. M. G. **Carta de risco de colapso de solos para a área urbana do município de Ilha Solteira-SP**. 2002. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/98094>. Acesso em: 2 fev. 2021.

OLIVEIRA, L. P.; SANTOS, S. M. Análise multitemporal dos padrões de uso e cobertura da terra a partir de dados da plataforma Google Earth Engine para a ilha de Itaparica, Bahia, Brasil. **Revista AYIKA**, v. 1, n. 1, p. 29–49, 29 dez. 2021.

OLIVEIRA, M. G. **Implantação de tecnologia de Business Intelligence na Diretoria Regional de Saúde Norte de Belo Horizonte**: um estudo de caso. 2020. 121 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Serviços de Saúde) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/33674>. Acesso em: 1 dez. 2021.

OLSZAK, C. M.; ZIEMBA, E. Approach to building and implementing business intelligence systems. **Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management**, v. 2, n. 1, p. 135–148, 2007.

OPUKUMO, A. W.; DAVIE, C. T.; GLENDINNING, S.; OBORIE, E. A review of the identification methods and types of collapsible soils. **Journal of Engineering and Applied Science**, v. 69, n. 1, p. 17, dez. 2022. <https://doi.org/10.1186/s44147-021-00064-2>.

PAIVA, S. C. **Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca-PE e de suas misturas com cal**. 2016. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/25101>. Acesso em: 3 maio 2021.

PAIVA, W. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo**. 2009. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5019/1/arquivo2264_1.pdf. Acesso em: 2 ago. 2021.

PECK, R. B.; HANSON, W. E.; THORNBURN, T. H. **Foundation Engineering**. 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1973.

PEREIRA, E. M. **Estudo do potencial expansivo dos materiais argilosos da Formação Guabirotuba na região do Alto Iguaçu - PR**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. DOI 10.11606/D.18.2018.tde-23082018-150849. Disponível em:

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-23082018-150849/>. Acesso em: 12 set. 2022.

PÉREZ LEÓN, R. F. **Inclusões rígidas para o controle de recalques nos solos colapsíveis do Distrito Federal**. 2017. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/24065>. Acesso em: 5 jan. 2021.

PIXABAY. Use o nosso banco de imagens Royalty Free Mais de 1 milhão de imagens, fotos e vídeos em alta qualidade para seus projetos. 2021. **Pixabay**. Disponível em: <https://pixabay.com/pt/>. Acesso em: 1 jan. 2021.

PRANDINI, F. L.; NAKAZAWA, V. A.; FREITAS, C. D.; DINIZ, N. C. Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. In: BITAR, O. Y. (ed.). **Curso de Geologia de Engenharia aplicada ao meio ambiente**. São Paulo: ABGE, 1995. Disponível em: <https://www.abge.org.br/curso-de-geologia-aplicada-ao-meio-ambiente>. Acesso em: 3 ago. 2021.

PRATES, W. O. **Estatísticas para ciências sociais aplicadas I**. Salvador: Faculdade de Ciências Contábeis, 2017.

PRESA, E. P. **Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada**. 1982. 663 f. Thesis (Doctoral in Ingeniería) – Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, 1982. Disponível em: <http://oa.upm.es/508/>. Acesso em: 1 ago. 2021.

PRESA, E. P. **Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada**. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 1984. Disponível em: https://www.todostuslibros.com/libros/deformabilidad-de-las-arcillas-expansivas-bajo-succion-controlada-c-8_978-84-398-2554-8. Acesso em: 1 ago. 2021.

PRESA, E. P. Deformabilidade de Solos Não Saturados Colapsíveis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 1997. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: POLI, 1997. p. 451–460.

QGIS. Bem-vindo ao projeto QGIS. 2022. **QGIS**. Disponível em: https://www.qgis.org/pt_BR/site/. Acesso em: 8 abr. 2023.

QUISPE, R. T.; TAIPE, R. B. N.; GUERREIROS, J. L. C. **Mecánica de Suelos II – Suelos Expansivos, Suelos Dispersivos y Colapsables**. 2014. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/yordidipasganboa/copia-de-exposicin-suelos-ii-grupo>. Acesso em: 1 ago. 2021.

RAO, R. R.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, D. G. Closed-Form Heave Solutions for Expansive Soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 114, n. 5, p. 573–588, 1 maio 1988. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:5\(573\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:5(573)).

REGINATTO, A. R.; FERRERO, J. C. Collapse potential of soils and soil-water chemistry. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF ROCK MECHANICS AND MINING SCIENCES & GEOMECHANICS ABSTRACTS, 12., 1973. **Proceedings [...]**. Moscow: Pergamon, 1973. v. 12, p. 177–183.

REIS, E. S.; ANGELONI, M. T. Business Intelligence como Tecnologia de Suporte a Definição de Estratégias para a Melhoria da Qualidade do Ensino. *In: ENCONTRO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO*, 1., 2006. **Anais [...]**. Salvador: ANPAD, 2006. v. 1, p. 1–16. Acesso em: 29 nov. 2021.

RODRIGUES, R. A. **Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático**. 2007. 298 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-22012008-145832/publico/TESE_rogger_augusto_rodrigues.pdf. Acesso em: 12 dez. 2020.

RODRIGUES, R. A.; VILAR, O. M. Colapso de solo desencadeado pela elevação do nível d'água. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 1, n. 6, p. 13–27, 2013. <https://doi.org/10.17271/23188472162013521>.

RODRIGUEZ ORTIZ, J. M. Las arcillas expansivas: su estudio y tratamiento. **Boletín de Información del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo**, Madrid, n. 108, p. 3–30, 1975.

ROMÃO, P. A.; GONÇALVES, T. D.; SOUZA, N. M. Uso da cartografia geotécnica na análise de umidade dos solos. *In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JÚNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHAS, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (orgs.). Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: ABMS, 2015. p. 125–144.

ROSA, R. **Introdução ao geoprocessamento**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2013. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/posgraduacao/wp-content/uploads/sites/33/2016/12/Introdu%C3%A7%C3%A3o-ao-Geoprocessamento-Roberto-Rosa.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2021.

ROWLEY, J. The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy. **Journal of Information Science**, v. 33, n. 2, p. 163–180, abr. 2007. <https://doi.org/10.1177/0165551506070706>.

SAMPAIO, M. S. **Desenvolvimento, avaliação e aplicação de um algoritmo para espacialização global dos climas árido, tropical e temperado**. 2012. 79 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2012. Disponível em: <https://ufmt.br/ppgrh/dissertacao/desenvolvimento-avaliacao-e-aplicacao-de-um-algoritmo-para-espacializacao-global-dos-climas-arido-tropical-e-temperado/>. Acesso em: 2 out. 2021.

SAMPAIO, M. S.; CARVALHO, M. C.; CARVALHO, L. G.; SANCHES, L. Uso de Sistema de Informação Geográfica para comparar a classificação climática de Koppen-Geiger e de Thornthwaite. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR*, 2011. **Anais [...]**. Curitiba: INPE, 2011. p. 8857–8864. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.25.13.54/doc/p0988.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2021.

SAMPAIO, T. V. M.; BRANDALIZE, M. C. B. **Cartografia geral, digital e temática**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2018.

- SANTOS, C. P. **Estudo dos fatores influenciadores da intenção de uso da informação dos sistemas de Business Intelligence em empresas brasileiras**. 2014. Tese (Doutorado em Administração) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. DOI 10.11606/T.12.2014.tde-21012015-105911. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12139/tde-21012015-105911/>. Acesso em: 4 dez. 2021.
- SANTOS, D. S.; DRUMOND, M. A. M. M.; FERREIRA, S. R. M. Avaliação de suscetibilidade à ocorrência de solos expansivos e colapsíveis no estado de Sergipe com base na pedologia. *In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE GEOTÉCNICA*, 2022. **Anais [...]**. Campinas: ABMS, 2022.
- SANTOS, H. G.; CARVALHO JÚNIOR, W.; DART, R. O.; ÁGILO, M. L. D.; SOUSA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/920267/o-novo-mapa-de-solos-do-brasil-legenda-atualizada>. Acesso em: 6 ago. 2021.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 1 jul. 2021.
- SANTOS, M.; LIMA, D.; BUENO, B. Estabilização dos solos com cal e betume. *In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA*, 1995. **Anais [...]**. Santos: ABPv, 1995. p. 74–97.
- SCHREINER, H. D. State of the art review on expansive soils. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 24, n. 6, p. 232, dez. 1987. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(87\)92393-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(87)92393-X)
- SEED, H. B.; WOODWARD, J.; LUNDGREN, R. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 88, n. 3, p. 53–87, 1962.
- SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.
- SILVA, J. A. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes**. 2018. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32236>. Acesso em: 8 ago. 2021.
- SILVA, L. A.; PERES, S. M.; BOSCARIOLI, C. **Introdução à mineração de dados: com aplicação em R**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.
- SILVA, M. J. R. **Comportamento geomecânico de solos colapsíveis e expansivos em Petrolina-PE: cartas de suscetibilidade**. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003. Disponível em:

<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5388>. Acesso em: 3 maio 2021.

SILVA, T. B.; BELLO, M. I. M. C. V.; FERREIRA, S. R. M. Correlações das classes pedológicas com características geotécnicas aplicadas ao uso e ocupação do solo. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 3, p. 346–358, 21 set. 2020. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.3327.346-358>.

SILVEIRA, P. E. M. **Procedimentos para elaboração de cartas geotécnicas aplicadas a solos colapsíveis em áreas urbanas utilizando o método de detalhamento progressivo**. 2020. 243 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/193101>. Acesso em: 3 ago. 2020.

SILVEIRA, P. E. M.; REIS, F. A. G. V. Elaboração de cartas geotécnicas aplicadas a solos colapsíveis em áreas urbanas utilizando o método do detalhamento progressivo. **Geologia USP. Série Científica**, v. 21, n. 2, p. 91–106, 19 ago. 2021. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-174359>.

SKEMPTON, A. W. The collodial activity of clays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS, 1., 1953. **Proceedings** [...]. Zurich: ISSMGE, 1953. v. 1, p. 57–61. Disponível em: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/42/1953_01_0014.pdf. Acesso em: 2 ago. 2021.

SOBRAL, H. S. **Contribuição ao Estudo do Massapê como solo para Construção**. 1956. Tese (Concurso Público para Livre Docência) – Universidade Federal da Bahia, 1956.

SOUZA, A. Fundações em Solos Colapsíveis. In: LOLLO, J. A. (org.). **Solos Colapsíveis: identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2008. p. 175–201.

SOUZA, Adriano; CINTRA, J. C. A. Fundações rasas no solo colapsível de Ilha Solteira-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 1994. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu: ABMS, 1994. p. 223–230. Disponível em: <https://philos.sophia.com.br/terminal/8530/acervo/detalhe/872?guid=1627819963642&returnUrl=%2fterminal%2f8530%2fresultado%2flistar%3fguid%3d1627819963642%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d872%23872&i=1>. Acesso em: 1 ago. 2021.

SOUZA NETO, J. B. **Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso)**. 2004. 432 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: http://www.coc.ufjf.br/pt/component/docman/?task=doc_download&gid=767&Itemid=. Acesso em: 16 fev. 2021.

STOCKSNAP.IO. Truly CC0 Free Stock Photos Hundreds of high resolution images added weekly. Free from copyright restrictions. 2021. **Free Stock Photos and Images**. Disponível em: <https://stocksnap.io/>. Acesso em: 15 jun. 2021.

STRINGFIXER. Lista de projeções do mapa. 2021. **Download milion images for free**.

Disponível em: http://stringfixer.com/pt/List_of_map_projections. Acesso em: 26 nov. 2021.

TAVARES, C. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. I.; CALADO, A. C. A.; FERREIRA, S. R. M. Utilização de SIG aplicada aos estudos de solos expansivos e colapsíveis do Estado do Ceará. *In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 2022. **Anais** [...]. Campinas: ABMS, 2022.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948. <https://doi.org/10.2307/210739>.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. 1. ed. Centerton: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1955.

TURBAN, E.; SHARDA, R.; ARONSON, J. E.; KING, D. **Business intelligence: um enfoque gerencial para a inteligência do negócio**. Porto Alegre: Bookman, 2009.

UNSPLASH. Unsplash The internet's source of freely-usable images. Powered by creators everywhere. 2021. **Unsplash Photos for everyone**. Disponível em: <https://unsplash.com/>. Acesso em: 6 fev. 2021.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Mcgraw-Hill, Editora da Universidade de São Paulo, 1978.

VASCONCELOS, R. P. R. **Mapas de suscetibilidade de solos colapsíveis e expansivos do Estado de Pernambuco**. 2001. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2001.

VECTEEZY. Baixe vetores, fotos e vídeos de stock grátis. Recursos criativos de qualidade profissional para realizar seus projetos com mais rapidez. 2021. **Vecteezy**. Disponível em: <https://pt.vecteezy.com/>. Acesso em: 9 fev. 2021.

VERÍSSIMO, K. J. S. **Avaliação da colapsibilidade e resistência de ponta em um solo arenoso compactado de Petrolina-PE com e sem inundação**. 2016. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/18059>. Acesso em: 15 fev. 2021.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1991.

VIJAYVERGIYA, V. N.; GHAZZALY, O. I. Prediction of swelling potential for natural clays. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS*, 1., 1973. **Proceedings** [...]. Haifa: Academic Press, 1973. v. 1, p. 227–236.

VILAR, O. M.; FERREIRA, S. R. M. Solos colapsíveis e expansivos. *In: DE CARVALHO, J. C.; JUNIOR, G. F. N. G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; FILHO, F. C. S. (orgs.). Solos não saturados no contexto geotécnico*. 1. ed. São Paulo: ABMS, 2015. p. 415–440.

VILAR, O. M.; MACHADO, S. L.; BUENO, B. S. Collapse behavior of a compacted lateritic soil. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS*, 1998.

Proceedings [...]. Beijing: International Academic, 1998. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000993562>. Acesso em: 29 jul. 2021.

VILAR, O. M.; RODRIGUES, J. E.; NOGUEIRA, J. B. Solos Colapsíveis: um problema para a engenharia de solos tropicais. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA*, 1., 1981., COPPE/UFRJ. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1981. v. 1, p. 209–224.

VILAR, O. M.; RODRIGUES, R. A. Revisiting classical methods to identify collapsible soils. **Soils and Rocks**, v. 38, n. 3, p. 265–278, 2015.

ZAINE, J. E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo**: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP). 2000. 149 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/102900>. Acesso em: 4 abr. 2021.

ZIANI, H.; ABBÈCHE, K.; MESSAOUDENE, I.; ANDRADE PAIS, L. J. Treatment of Collapsible Soils by Additions of Granulated Slag and Natural Pozzolan. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 23, n. 3, p. 1028–1042, mar. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0051-0>.

ZIMBARDO, M.; ERCOLI, L.; MISTRETTA, M. C.; SCAFFARO, R.; MEGNA, B. Collapsible intact soil stabilisation using non-aqueous polymeric vehicle. **Engineering Geology**, v. 264, p. 105334, jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105334>.

ZOTERO. Your personal research assistant Zotero is a free, easy-to-use tool to help you collect, organize, cite, and share research. 2021. **Zotero**. Disponível em: <https://www.zotero.org/>. Acesso em: 7 ago. 2021.

ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras**. 1987. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987. DOI 10.11606/T.18.2019.tde-19092019-101848. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-19092019-101848/>. Acesso em: 1 maio 2021.

ZUQUETTE, L. V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio-físico**: fundamentos e guia para elaboração. 1993. Tese de doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993. DOI 10.11606/T.18.2019.tde-27092019-143236. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/18/tde-27092019-143236/>.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Cartografia geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

ZUQUETTE, L. V.; NAKAZAWA, V. A. Cartas de geologia de engenharia. *In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (orgs.). Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998. p. 283–300.

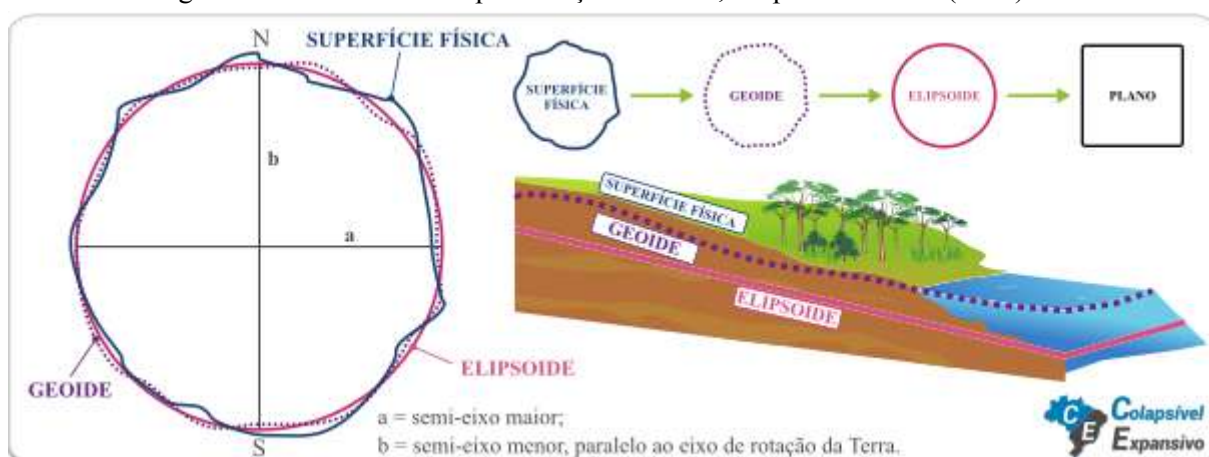
APÊNDICE A - NOÇÕES BÁSICAS DE CARTOGRAFIA

A.1 INTRODUÇÃO

Em suma, são expostos alguns conceitos envolvendo a Cartografia Básica. Segundo Brasil (2019), a Cartografia é definida como sendo a ciência e a arte de representar o conhecimento da superfície terrestre através de mapas e cartas, enquanto a Geodésia representa a ciência que estuda a forma e as dimensões da Terra.

No tocante à classificação das representações terrestres, podem ser citados dois modelos: geoide e elipsoide de revolução (Figura A.1).

Figura A.1 - Modelos de representação da Terra, adaptado de Rosa (2013).



Fonte: Autor (2024).

Segundo Fitz (2008), o geoide consiste em uma superfície coincidente com o nível médio e inalterado dos mares. O elipsoide de revolução representa o modelo matemático que mais se aproxima da forma do geoide, bem como corresponde à superfície mais utilizada para a realização de seus levantamentos.

Devido às particularidades físicas, existem diversos elipsoides de referência adotados por inúmeros países para atender suas necessidades de representação. O Quadro A.1 apresenta alguns dos elipsoides encontrados na literatura. De acordo com Fitz (2008), para obter a relação entre um ponto determinado do terreno e um elipsoide, é necessário ter um sistema específico que permita esse relacionamento. Essa função é realizada pelos sistemas geodésicos de referência.

Quadro A.1 - Elipsoides encontrados na literatura.

Elipsoide	Datum	País
Bessel (1841)	<i>Bukit Rimpah</i>	Alemanha
Clarke (1866)	<i>American Samoa</i> 1962	EUA
Krassovsky (1940)	<i>Afgooye</i>	URSS
<i>Hayford</i> (Internacional 1924)	Córrego Alegre	Brasil (antigo)
UGGI-67	<i>South American</i> 1969	Brasil (antigo)
GRS-80	SIRGAS2000	América do Sul Brasil (atual)
UGGI-79	WGS-84	Globo

Fonte: Autor (2024).

A.2 SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA

A forma e o tamanho do elipsoide, bem como sua posição em relação ao geóide, constituem um conjunto de parâmetros denominados Sistema Geodésico, também conhecido como *Datum* Geodésico (ROSA, 2013; SAMPAIO, T. V. M.; BRANDALIZE, 2018). Sucintamente, pode-se afirmar que *datum* consiste em um modelo matemático teórico de referência para a representação da superfície da Terra utilizado em um determinado mapa ou carta.

Através da Resolução PR nº 01/2015 - IBGE, publicada em 24 de fevereiro de 2015, o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), com sua realização no ano de 2000, passou a ser o sistema geodésico de referência oficial do Brasil, após uma transição de 10 anos (2005 a 2015). Portanto, a partir de 25 de fevereiro de 2015, todos os usuários no Brasil devem adotar exclusivamente o SIRGAS2000 em suas atividades, bem como os órgãos oficiais são obrigados a publicar produtos cartográficos no novo sistema (BRASIL, 2015). Os parâmetros que caracterizam o SIRGAS2000 estão apresentados no Quadro A.2.

Quadro A.2 - Caracterização do SIRGAS2000. (continua)

Características	Descrição
Sistema Geodésico de Referência:	Sistema de Referência Terrestre Internacional – ITRS (<i>International Terrestrial Reference System</i>)
Figura geométrica da superfície terrestre:	Elipsóide do Sistema Geodésico de Referência de 1980 (<i>Geodetic Reference System</i> 1980 – GRS80) - Semi-eixo maior $a = 6.378.137$ m - Achatamento $f = 1/298,257222101$
Origem:	Centro de massa da Terra

Quadro A.2 - Caracterização do SIRGAS2000. (conclusão)

Características	Descrição
Orientação:	Pólos e meridiano de referência consistentes em $\pm 0,005''$ com as direções definidas pelo BIH (<i>Bureau International de l'Heure</i>)
Época de referência das coordenadas:	2000,4

Fonte: Brasil (2015).

A.3 SISTEMA DE PROJEÇÃO CARTOGRÁFICA

Consiste em formas e técnicas de representar a superfície terrestre em mapas. Tais técnicas permitem amenizar a problemática do arredondamento do planeta na elaboração de mapas, ou seja, possibilitam representar uma realidade esférica numa superfície plana (ROSA, 2013). Ressalta-se que, apesar de facilitarem os cálculos das propriedades geométricas, todas as projeções apresentam distorções, cabendo ao profissional escolher aquela que melhor represente a superfície desejada.

Segundo Brasil (2019), toda projeção apresenta vantagens e desvantagens, não existindo a melhor projeção. Sendo assim, deve-se selecionar a mais adequada de modo a reduzir as distorções das feições mais importantes. Dessa forma, compreende-se que um produto cartográfico não será, em sua plenitude, a representação fiel da superfície terrestre devido às deformações presentes nas projeções cartográficas.

Brasil (1999) e Fitz (2008) ressaltam que as projeções cartográficas são classificadas a partir de diferentes metodologias que visam sempre um melhor ajuste da superfície a ser representada. O Quadro A.3 apresenta resumidamente as diversas classificações elencadas pelos referidos autores.

Para Rosa (2013), as projeções cartográficas mais usadas na elaboração de mapas são: *Mercator*, Plana ou Polar, *Peters*, *Aitof*, Policônica (afilática) e Cônica Conforme de *Lambert*. Em relação à representação do território brasileiro, segundo Brasil (2019), são utilizadas as seguintes projeções cilíndricas equatoriais: policônica e *Mercator*. A primeira, adequada para o uso em países ou regiões de extensão predominantemente norte-sul e com menor extensão leste-oeste, é empregada na elaboração dos mapas da série Brasil, regionais, estaduais e temáticos. A segunda, adequada para uso na produção das cartas do Sistema Cartográfico Nacional, é adotada pelo IBGE e pela Diretoria de Serviço Geográfico-DSG para o mapeamento sistemático brasileiro.

Quadro A.3 - Classificação das projeções, segundo Brasil (1999) e Fitz (2008).

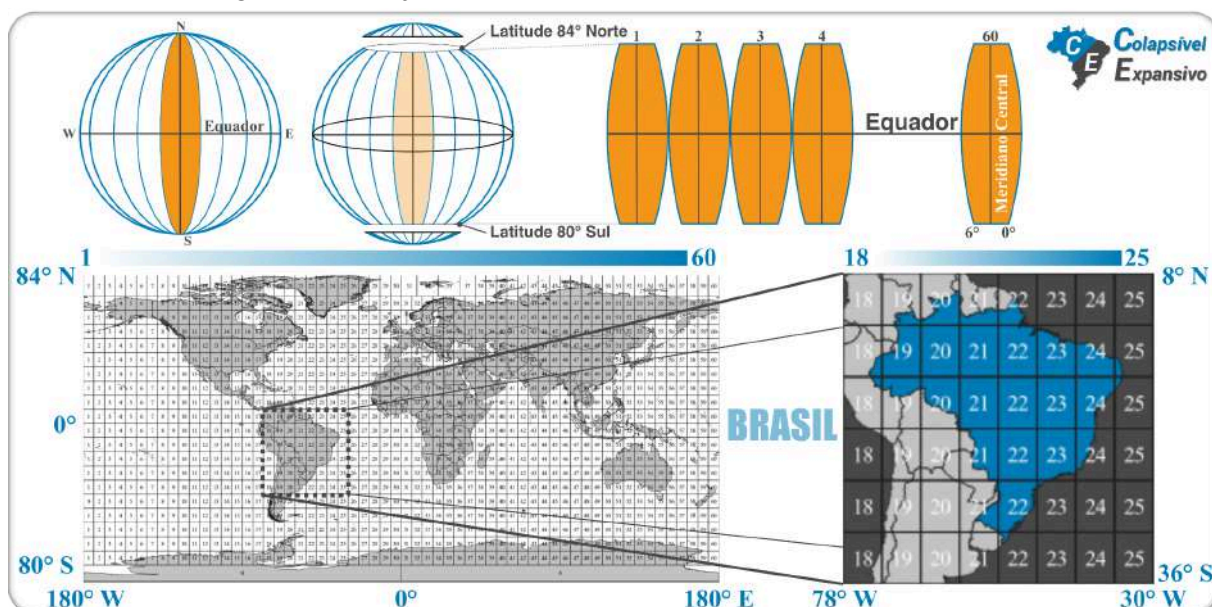
Classificação	Nome	Descrição
Quanto ao método	Geométricas	baseiam-se em princípios geométricos projetivos.
	Analíticas	baseiam-se em formulações matemáticas obtidas com o objetivo de se atenderem às condições previamente estabelecidas.
Quanto às deformações apresentadas	Conformes ou Semelhantes	mantêm a verdadeira forma das áreas a serem representadas, não deformando os ângulos existentes no mapa.
	Equidistantes	apresentam constância entre as distâncias representadas, ou seja, não possuem deformações lineares.
	Equivalentes	possuem a propriedade de manter constantes as dimensões relativas das áreas representadas, isto é, não as deformam.
	Azimutais ou Zenitais	são destinadas a finalidades bem específicas, quando nem as projeções conformes ou equivalentes satisfazem.
	Afiláticas ou Arbitrárias	não possuem nenhuma das propriedades das anteriores, isto é, não conservam áreas, ângulos, distâncias nem os azimutes.
Quanto à localização do ponto de vista	Gnômica ou Central	quando o ponto de vista está situado no centro do elipsoide.
	Estereográfica	quando o ponto de vista se localiza na extremidade diametralmente oposta à superfície de projeção.
	Ortográfica	quando o ponto de vista se situa no infinito.
Quanto ao tipo de superfície de projeção	Plana	quando a superfície de projeção é um plano.
	Cônica	quando a superfície de projeção é um cone.
	Cilíndrica	quando a superfície de projeção é um cilindro.
	Poliédrica	quando se utilizam vários planos de projeção que, reunidos, formam um poliedro.
Quanto à posição da superfície de projeção	Equatorial	quando o centro da superfície de projeção se situa no equador terrestre.
	Polar	quando o centro do plano de projeção é um polo.
	Transversa	quando o eixo da superfície de projeção se encontra perpendicular ao eixo de rotação da Terra.
	Obliqua	quando está em qualquer outra posição.
Quanto à situação da superfície de projeção	Tangente	quando a superfície de projeção tangencia o elipsoide em um ponto (planas) ou em uma linha (cilíndrica ou cônica).
	Secante	quando a superfície de projeção corta o elipsoide em dois pontos (planas) ou em duas linhas (cilíndricas ou cônicas) de secância.

Fonte: Autor (2024).

Na projeção *Universal Transversa de Mercator* - UTM, o elipsoide foi dividido em zonas com 6° de amplitude, cada uma delas constituindo um fuso UTM. Dessa forma, foram necessários 60 fusos para cobrir toda a superfície do elipsoide. Esses fusos foram numerados de um a sessenta, estendendo de 180° W a 180° E (BRASIL, 1999, 2019). Devido às distorções nas áreas próximas aos polos, a projeção UTM foi originalmente limitada às

latitudes de 84° Norte e 80° Sul. O território brasileiro abrange 8 fusos (18 a 25). A Figura A.2 apresenta esquematicamente as características da projeção UTM e os fusos abrangidos pelo Brasil.

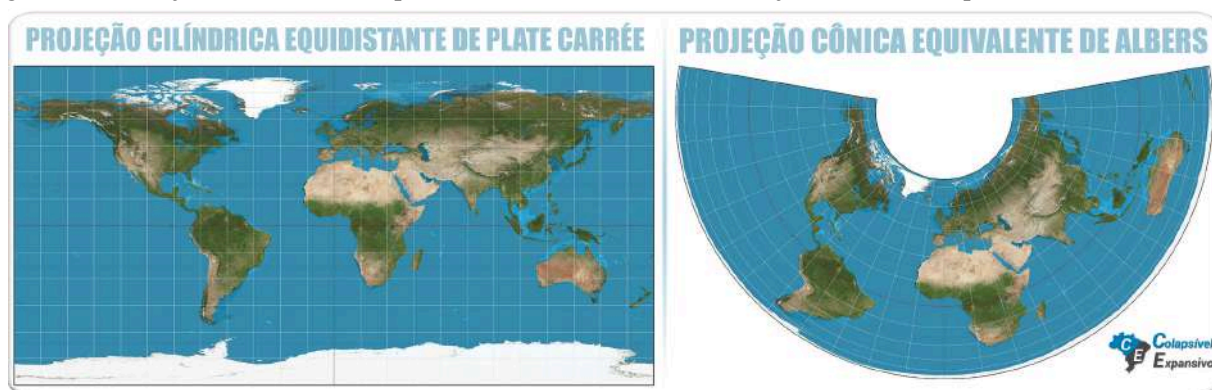
Figura A.2 - Projeção *Universal Transversa de Mercator* - UTM.



Fonte: Autor (2024).

Dentre as projeções cartográficas existentes, cabe destacar a Projeção Cilíndrica Equidistante de *Plate Carrée* e a Projeção Cônica Equivalente de *Albers*, Figura A.3.

Figura A.3 - Projeção Cilíndrica Equidistante de *Plate Carrée* e Projeção Cônica Equivalente de *Albers*.



Fonte: Adaptado de Stringfixer (2021).

Segundo Grohmann (2012), a primeira, também chamada equiretangular, os meridianos e os paralelos são igualmente espaçados e a escala N-S é constante. Dessa forma, a longitude e a latitude são mapeadas diretamente para x e y. A referida projeção, criada por

Marinus of Tyre, permite que o mapa-múndi seja representado por um retângulo com proporção 2:1. Em relação à segunda projeção, Brasil (2019) frisa que sua utilização é recomendada para o cálculo de área quando a extensão da superfície é superior a 50 km.

A.4 SISTEMA DE REFERÊNCIA DE COORDENADAS

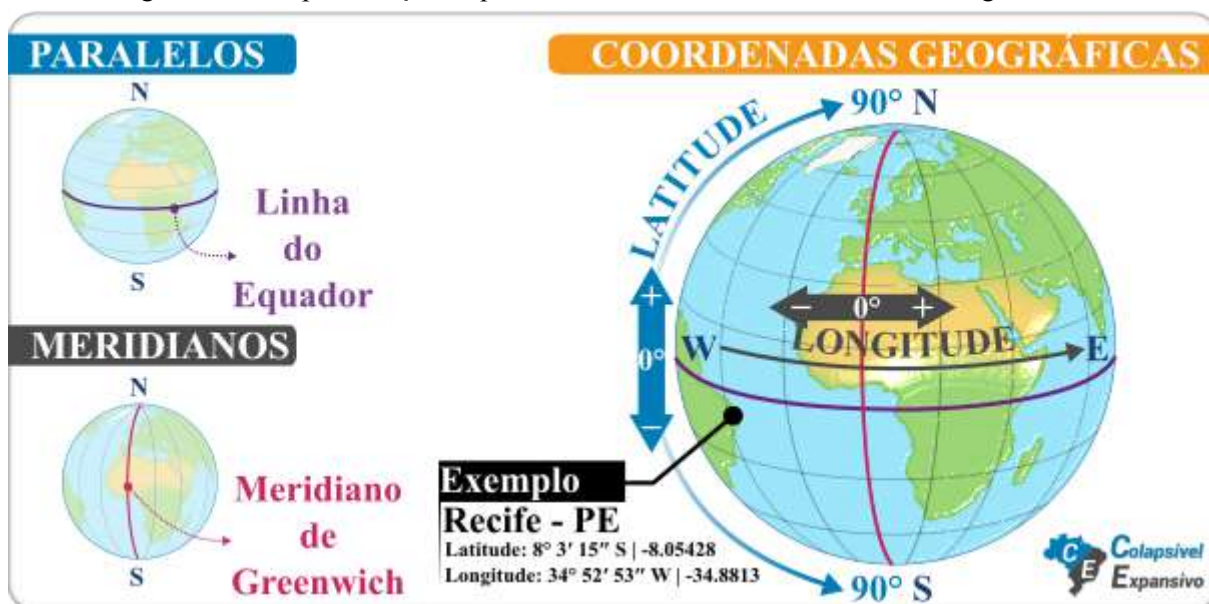
Segundo Rosa (2013), os sistemas de coordenadas mais usados para representar os dados espaciais são: latitude/longitude e UTM (*Universal Transversa de Mercator*). Em relação ao primeiro, denominado Sistema de Coordenadas Geográficas, Fitz (2008) elucida que os valores dos pontos localizados na superfície da Terra são expressos por suas coordenadas geográficas (latitude e longitude), contendo unidades de medida angular, ou seja, graus (°), minutos (') e segundos (").

O sistema mencionado permite localizar diretamente qualquer ponto sobre a superfície terrestre, não havendo necessidade de indicação complementar, como ocorre no caso do sistema UTM. Sendo assim, basta colocar, junto ao valor de cada coordenada, o hemisfério Norte (N) ou Sul (S) e Leste (E - *East*) ou Oeste (W - *West*). Também podem ser utilizados os sinais + ou - para indicação das coordenadas: N e E sinal positivo, e S e W sinal negativo. Portanto, resumidamente, pode-se afirmar que, quando o ponto estiver situado ao sul do equador, a leitura da latitude será negativa, e ao norte, positiva.

Importante esclarecer os conceitos de meridianos e paralelos. Brasil (2009) elucida que os meridianos são linhas imaginárias que cortam a Terra no sentido norte-sul, ligando um polo ao outro, enquanto os paralelos são linhas imaginárias que circulam a Terra no sentido leste-oeste. Paralelos e meridianos são definidos por suas dimensões de latitude e longitude, respectivamente.

Ainda segundo o autor, os paralelos indicam a latitude, que é a distância, em graus, da linha do Equador até o paralelo de um determinado lugar. No tocante aos valores de latitude, esses variam de 0° (linha do Equador) a 90° (polos), devendo ser indicada também a posição: no hemisfério sul (S) ou no hemisfério norte (N). A longitude é a distância, em graus, entre o meridiano de origem e o meridiano local. Por convenção, adotou-se como origem o Meridiano de *Greenwich*, que passa pelo observatório de *Greenwich* na Inglaterra. No que concerne aos valores de longitude, esses variam de 0° (*Greenwich*) a 180° a leste e a oeste de *Greenwich*. Os referidos valores são considerados negativos a oeste de *Greenwich* (hemisfério ocidental) e positivos a leste de *Greenwich* (hemisfério oriental), Figura A.4.

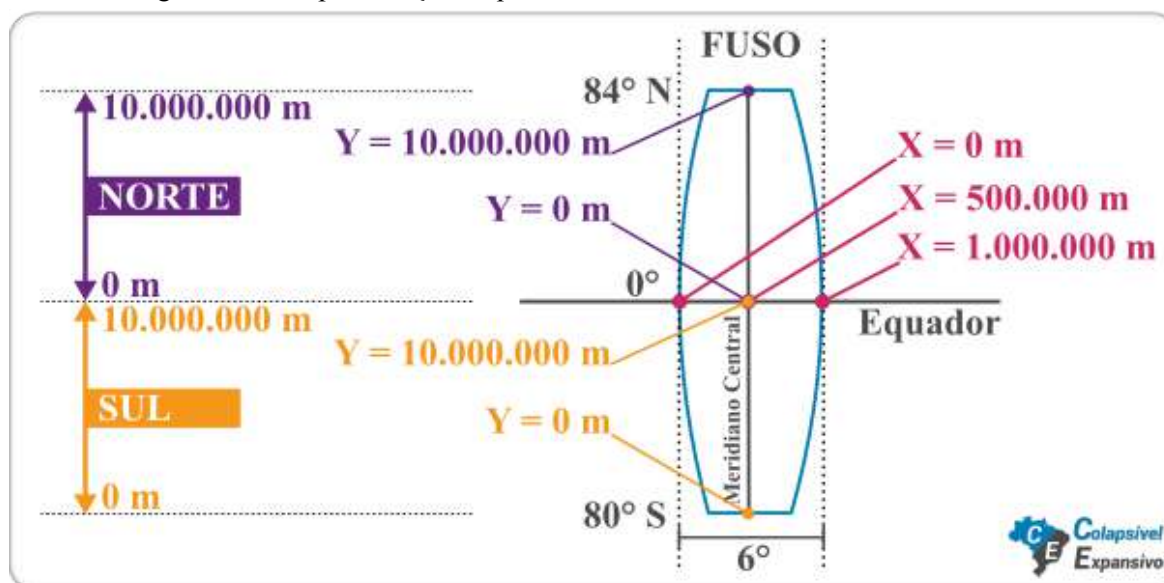
Figura A.4 - Representação esquemática do Sistema de Coordenadas Geográfica.



Fonte: Autor (2024).

No tocante ao Sistema *Universal Transversa de Mercator*, associa-se, a cada fuso, um sistema cartesiano métrico de referência, atribuindo à origem (interseção da linha do Equador com o meridiano central) as coordenadas 500.000 m para contagem de coordenadas ao longo do Equador, e 10.000.000 m ou 0 m para contagem de coordenadas ao longo do meridiano central, para os hemisférios sul e norte, respectivamente. Tal configuração elimina a ocorrência de valores negativos de coordenadas (BRASIL, 2019), Figura A.5.

Figura A.5 - Representação esquemática do Sistema de Coordenadas UTM.



Fonte: Autor (2024).

Nota-se que, no sistema de coordenada UTM, além da indicação do polo (Norte ou Sul), é necessário informar o número do fuso (1 a 60), ou seja, existe a necessidade de uma indicação complementar para permitir a localização correta do ponto sobre a superfície terrestre. Buscando organizar as informações pertinentes aos Sistemas de Referência de Coordenadas (SRC), o Grupo de Pesquisa Petrolífera Europeia (*European Petroleum Survey Group*) sistematizou os SRCs do mundo através de códigos numéricos, conhecidos como Códigos EPSG. No que se refere ao Brasil, os códigos mais utilizados estão expostos na Tabela A.1.

Tabela A.1 - Relação de códigos mais utilizados no Brasil.

CÓDIGO	PROJEÇÃO/DATUM	CÓDIGO	PROJEÇÃO/DATUM
4225	GCS Córrego Alegre	31978	SIRGAS 2000 / UTM zone 18S
4618	GCS SAD69	31973	SIRGAS 2000 / UTM zone 19N
4674	GCS SIRGAS 2000	31979	SIRGAS 2000 / UTM zone 19S
4326	GCS WGS84	31974	SIRGAS 2000 / UTM zone 20N
22521	Córrego Alegre / UTM zone 21S	31980	SIRGAS 2000 / UTM zone 20S
22522	Córrego Alegre / UTM zone 22S	31981	SIRGAS 2000 / UTM zone 21S
22523	Córrego Alegre / UTM zone 23S	31982	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S
22524	Córrego Alegre / UTM zone 24S	31983	SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
22525	Córrego Alegre / UTM zone 25S	31984	SIRGAS 2000 / UTM zone 24S
29168	SAD69 / UTM zone 18N	31985	SIRGAS 2000 / UTM zone 25S
29188	SAD69 / UTM zone 18S	32618	WGS 84 / UTM zone 18N
29169	SAD69 / UTM zone 19N	32718	WGS 84 / UTM zone 18S
29189	SAD69 / UTM zone 19S	32619	WGS 84 / UTM zone 19N
29170	SAD69 / UTM zone 20N	32719	WGS 84 / UTM zone 19S
29190	SAD69 / UTM zone 20S	32620	WGS 84 / UTM zone 20N
29191	SAD69 / UTM zone 21S	32720	WGS 84 / UTM zone 20S
29192	SAD69 / UTM zone 22S	32721	WGS 84 / UTM zone 21S
29193	SAD69 / UTM zone 23S	32722	WGS 84 / UTM zone 22S
29194	SAD69 / UTM zone 24S	32723	WGS 84 / UTM zone 23S
29195	SAD69 / UTM zone 25S	32724	WGS 84 / UTM zone 24S
31972	SIRGAS 2000 / UTM zone 18N	32725	WGS 84 / UTM zone 25S

Fonte: Adaptado de ClickGeo (2016).

A.5 ESCALA

A relação de proporcionalidade entre as distâncias lineares num desenho (mapa) e as distâncias correspondentes no ambiente real é estabelecida pela escala cartográfica. A

indicação da escala pode ser feita diretamente por expressão numérica ou gráfica exteriorizada junto à legenda. Também pode ser feita indiretamente, quando a relação é estabelecida através de elementos de grandeza conhecida. As escalas podem apresentar as seguintes tipologias: numéricas, gráficas e de cores (BRASIL, 2019), Figura A.6.

Figura A.6 - Tipos de escalas cartográficas.



Fonte: Modificado de Brasil (2019).

Quanto maior o denominador, menor será a escala. Consequentemente, quanto menor o denominador, maior será a escala. Portanto, quanto menor o denominador (maior escala), maior será o detalhamento da representação cartográfica.

Brasil (1999) elucida que a precisão gráfica consiste na menor grandeza medida no terreno capaz de ser representada no mapa em sua escala especificada. Esse limite determina o erro tolerável nas medições realizadas em uma determinada escala. O cálculo é realizado através da Equação 12.

$$E = \frac{1}{N} \quad (11)$$

$$e_m = 2 \times 10^{-4} \times N \text{ (em metros)} \quad (12)$$

em que:

E = escala do mapa;

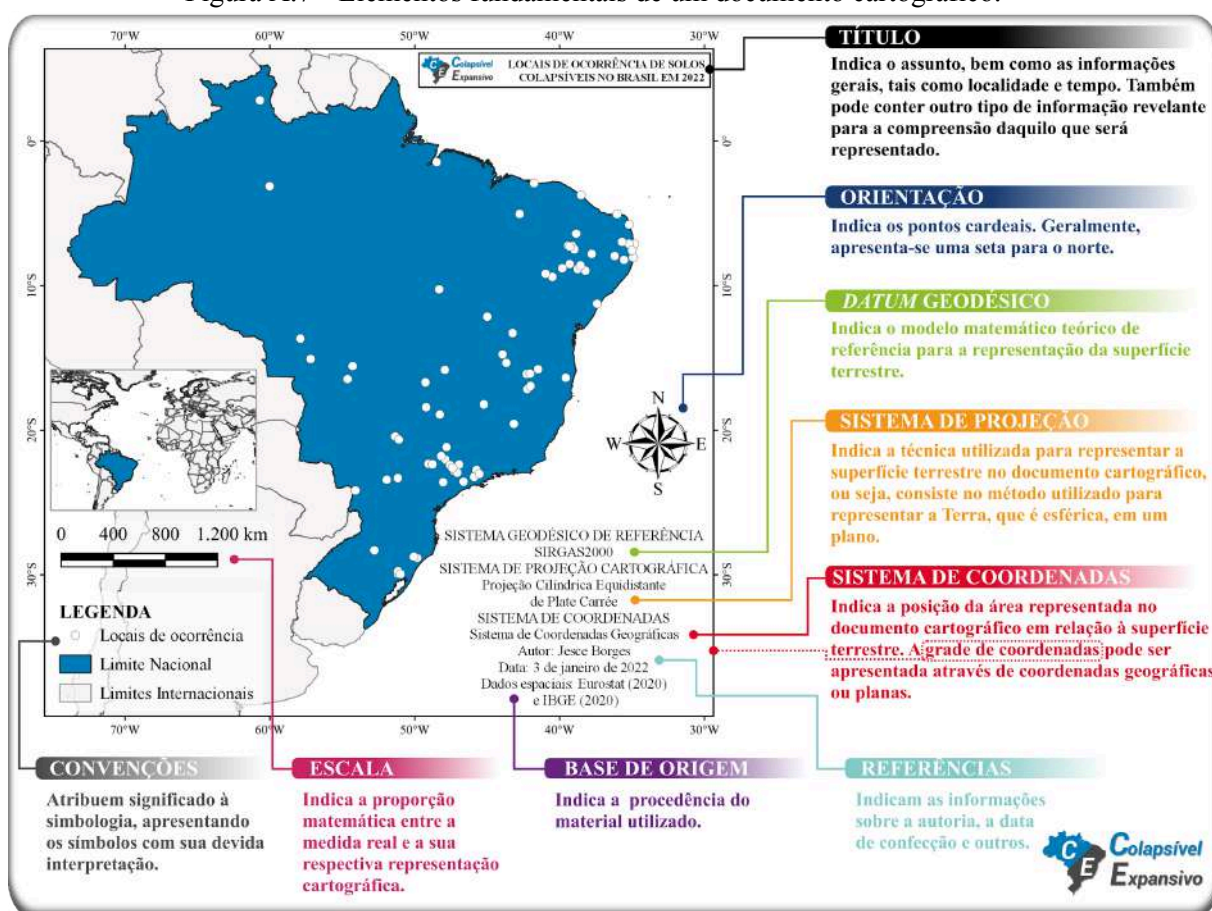
N = denominador da escala do mapa;

e_m = erro tolerável em metros.

A.6 ELEMENTOS FUNDAMENTAIS DE UM DOCUMENTO CARTOGRÁFICO

Fitz (2008) apresenta o detalhamento dos elementos que constituem um documento cartográfico, sendo eles: título, convenções, base de origem, referências, orientação, escala, sistema de projeção e sistema de coordenadas. Em suma, será apresentada uma descrição de cada um desses elementos. A Figura A.7 apresenta uma representação esquemática dos elementos fundamentais de um documento cartográfico.

Figura A.7 - Elementos fundamentais de um documento cartográfico.



Fonte: Autor (2024).

O título consiste em uma descrição sucinta do que está sendo representado no documento cartográfico. Esse título deve ser realçado, preciso e conciso. No que se refere às convenções, a legenda representa um elemento que atribui significado à simbologia, apresentando os símbolos com sua devida interpretação. A base de origem está relacionada com a procedência do material utilizado, tais como o mapa base, os dados e outros.

A orientação corresponde a indicação dos pontos cardeais, que pode ser representada através de uma rosa dos ventos ou de uma seta apontando para o norte. No tocante às referências, essas envolvem as informações sobre autoria, data da confecção, fontes, dentre outras. Conforme externado anteriormente, a escala representa a proporção matemática entre a medida real e a sua respectiva representação cartográfica, podendo ser gráfica, numérica ou de cores.

Os sistemas de projeção são técnicas utilizadas para representar a superfície terrestre no documento cartográfico. Por fim, os sistemas de coordenadas permitem identificar a posição da área representada no documento cartográfico em relação à superfície terrestre. Geralmente, a grade de coordenadas é apresentada através de coordenadas geográficas ou planas. Acrescenta-se a lista de elementos, o *datum* geodésico.

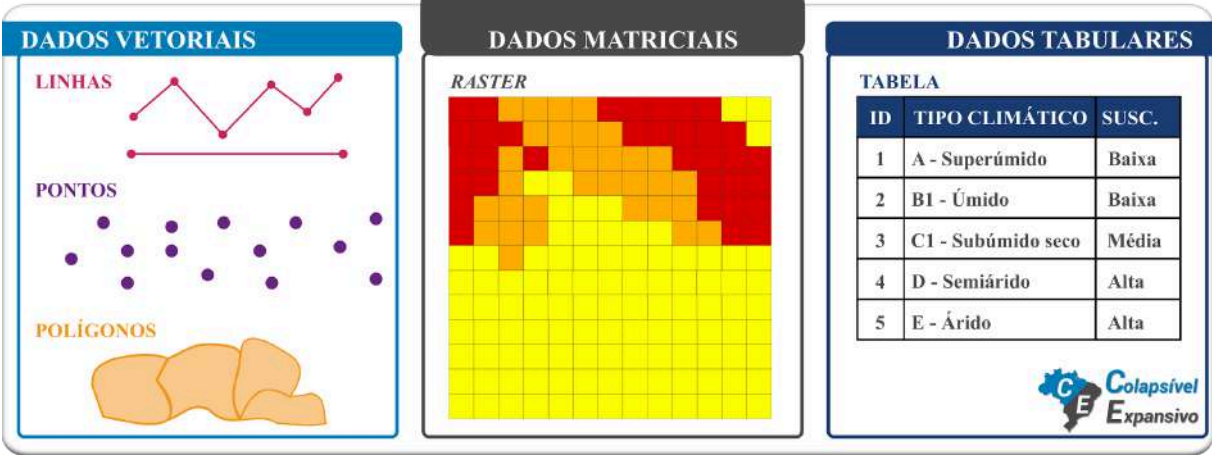
A.7 ESTRUTURA DOS DADOS

Os dados geográficos com representação gráfica são agrupados em duas classes: vetorial e matricial, este último também é conhecido como dado *raster*. Segundo Fitz (2008), a estrutura vetorial é composta por pontos, linhas e polígonos, utilizando um sistema de coordenada XY para sua representação. Esses elementos gráficos podem apresentar também uma estrutura associada, relacionando cada entidade a um atributo digital ou mesmo a um banco de dados. A título de exemplo, o referido autor cita as curvas de níveis contendo a sua altitude e os polígonos demarcando manchas de solo.

Em relação à estrutura matricial, a representação é feita através de uma matriz composta de um certo número de linhas e colunas em que cada célula, denominada *pixel*, que possui um valor correspondente ao atributo analisado. As imagens de satélites e fotografias aéreas digitalizadas são exemplos de estruturas matriciais (FITZ, 2008).

Também cabe destacar outra tipologia, os dados tabulares. Segundo Brasil (2019), esses dados são associados ou não aos dados gráficos ou espaciais, na estrutura vetorial, que podem contemplar diferentes informações descritivas e complementares das entidades espaciais. A Figura A.8 apresenta ilustrativamente a estrutura dos dados.

Figura A.8 - Estrutura dos dados.



Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE B - CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

B.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo Zuquette e Nakazawa (1998), os primeiros trabalhos de Cartografia Geotécnica foram desenvolvidos na década de 1970 devido ao período próspero na construção de grandes obras de infraestrutura, sendo a produção intensificada a partir dos anos de 1980.

Para os anos de 1970, Canil *et al.* (2018) destacam os trabalhos de Coulon (1973), Maciel Filho (1978), Seignemartin (1979) e Cabral (1979), visto que ilustram áreas extensas e foram elaborados com escalas iguais ou menores que 1:50.000. Nos anos 1980, são destacados os trabalhos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT (1980) e de Carvalho (1982) que resultaram na Carta Geotécnica dos Morros de Santos e São Vicente em escala 1:5.000 e na Carta Geotécnica de Ouro Preto em escala 1:2.000, respectivamente.

Os referidos autores afirmam que, em virtude do desenvolvimento de entidades (universidades e institutos) responsáveis pelo avanço de metodologias aplicadas à Cartografia Geotécnica, os trabalhos realizados nas décadas de 1980 e 1990 tiveram um cunho acadêmico e de pesquisa. Zuquette e Gandolfi (2004) ressaltam que diversos trabalhos foram desenvolvidos a partir de 1988, sendo contabilizada a produção em mais de duzentas áreas, resultando em diferentes tipos de cartas e mapas. Contudo, cerca de 20% da produção apresenta conteúdo geotécnico.

B.2 ASPECTOS CONCEITUAIS DA CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

Diniz (2012) define a Cartografia Geotécnica como sendo uma técnica de integração, síntese e representação de informações temáticas da área de geologia de engenharia direcionada para o planejamento, gestão ambiental urbana e territorial. A análise dos dados geológicos do meio físico permite a elaboração de modelos de previsibilidade do comportamento dos terrenos, bem como o estudo de soluções de problemas em face da ocupação antrópica.

De acordo com Romão *et al.* (2015), a cartografia geotécnica representa, especialmente na fase pré-projeto, um importante instrumento de planejamento e implantação de obras civis, uma vez que disponibiliza informações sobre os fenômenos relacionados à superfície terrestre.

A Cartografia Geotécnica, segundo Zuquette (1987), pode ser definida como um processo que permite levantar, avaliar e analisar os atributos que compõem o meio físico. O autor apresenta os conceitos cartográficos referentes aos mapas, às plantas e às cartas geotécnicas, sendo eles assim descritos:

- i. mapa geotécnico é uma representação dos atributos geotécnicos levantados sem realização de análise interpretativa e sempre para escalas inferiores a 1:10.000. Ex: mapa topográfico e geológico;
- ii. planta geotécnica é a representação gráfica realizada em grandes escalas, maiores que 1:10.000, normalmente voltada para locais onde serão executadas obras específicas;
- iii. carta geotécnica constitui a representação dos resultados da interpretação dos atributos que estão num mapa. Ex: carta clinométrica obtida a partir do mapa topográfico, carta de escavabilidade, etc.

Franco *et al.* (2010) apresentam uma revisão dos conceitos e metodologias sobre a Cartografia Geotécnica, expondo a diversificação de seus objetivos, o aperfeiçoamento em termos de conteúdo e o modo de tratamento das informações em função do desenvolvimento das tecnologias de geoprocessamento. Segundo os referidos autores, tais evidências caracterizam o avanço da cartografia geotécnica.

B.3 APLICAÇÕES E TIPOS DE CARTAS GEOTÉCNICAS

Zuquete e Nakazawa (1998) asseveram que as cartas geotécnicas, pelo seu papel de expressão prática do conhecimento geológico, têm como principais propósitos:

- prever o desempenho da interação entre o meio físico e sua ocupação, bem como os conflitos entre as diversas formas de uso do solo;
- estabelecer orientações técnicas, preventivas e corretivas dos problemas identificados para minimizar custos e riscos nos empreendimentos de uso do solo.

Os documentos cartográficos, mapas e cartas são utilizados para as mais diversas finalidades, tais como: obras civis, planejamento urbano, territorial e ambiental, desenvolvimento, conservação e gestão do ambiente, avaliação de eventos perigosos e riscos associados. Esses documentos reúnem informações pertinentes a um ou mais aspectos do meio, podendo ser físico, biótico e antrópico (ZUQUETTE, 1993; ZUQUETTE; GANDOLFI, 2004).

No que se refere às aplicações, os autores classificam os documentos cartográficos quanto ao conteúdo e à finalidade. Em relação ao conteúdo, podem ser:

- a) mapas fundamentais são documentos gráficos que registram as informações sobre os diferentes componentes do meio físico;
- b) cartas derivadas são aquelas elaboradas a partir de um mapa fundamental, atendendo a uma determinada finalidade;
- c) cartas interpretativas são desenvolvidas a partir de atributos registrados em diferentes mapas fundamentais.

Quanto à finalidade, podem ser:

- a) cartas para usos múltiplos: visam atender a um grupo de objetivos vindos de diferentes usuários;
- b) cartas para usos específicos: elaboradas para atender a situações específicas ou especiais.

Segundo Zuquette e Gandolfi (2004), o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) realizou trabalhos com base em problemas e situações específicas envolvendo o meio físico em busca de uma solução rápida. Ressalta-se que o conceito e a abordagem metodológica é oriunda de Prandini *et al.* (1995), destacando o geólogo Fernando Prandini como um marco na Cartografia Geotécnica do Brasil. O fruto do seu trabalho resultou em produtos geotécnicos que foram agrupados nas seguintes categorias:

- a) cartas geotécnicas propriamente ditas: expõem limitações e potencialidades dos terrenos e definem diretrizes de ocupação para um ou mais usos do solo;
- b) cartas de risco: destacam a avaliação de dano potencial à ocupação diante de uma ou mais características, ou fenômenos naturais, ou induzidos por essa mesma ocupação;
- c) cartas de suscetibilidade: têm gradações de probabilidade de desencadeamento de um ou mais fenômenos naturais, ou induzidos pela ocupação;

- d) cartas de atributos ou de parâmetros: limitam-se à distribuição espacial de uma ou mais características (geotécnicas, geológicas etc.) do terreno.

Com foco no uso urbano do solo, Bitar *et al.* (1992) apresentam 4 (quatro) tipos de cartas geotécnicas:

- a) cartas geotécnicas dirigidas: expõem as limitações e potencialidades dos terrenos a partir da identificação de problemas de natureza geológico-geotécnica decorrentes do uso do solo;
- b) cartas geotécnicas convencionais: apresentam a distribuição geográfica das características dos terrenos a partir de atributos do meio físico, muitas vezes sem considerar as interações existentes entre o meio físico e as diferentes formas de uso urbano do solo;
- c) cartas de suscetibilidade: indicam a potencialidade de ocorrência de processos geológicos naturais e induzidos em áreas de interesse ao uso urbano do solo, expressando as suscetibilidades segundo classes de probabilidade de ocorrência;
- d) cartas de risco geológico: prepondera a avaliação de dano potencial à ocupação, expresso segundo diferentes graus de risco, resultantes da conjugação da probabilidade de ocorrência de manifestações geológicas naturais e induzidas e das consequências sociais e econômicas delas decorrentes.

Cerri (1990) reconhece 3 (três) tipos de cartas geotécnicas, sendo elas: cartas geotécnicas clássicas, cartas de suscetibilidade e cartas de risco. Somando-se a isso, o autor sugere a elaboração de um cartograma chamado “Carta de conflito de uso”.

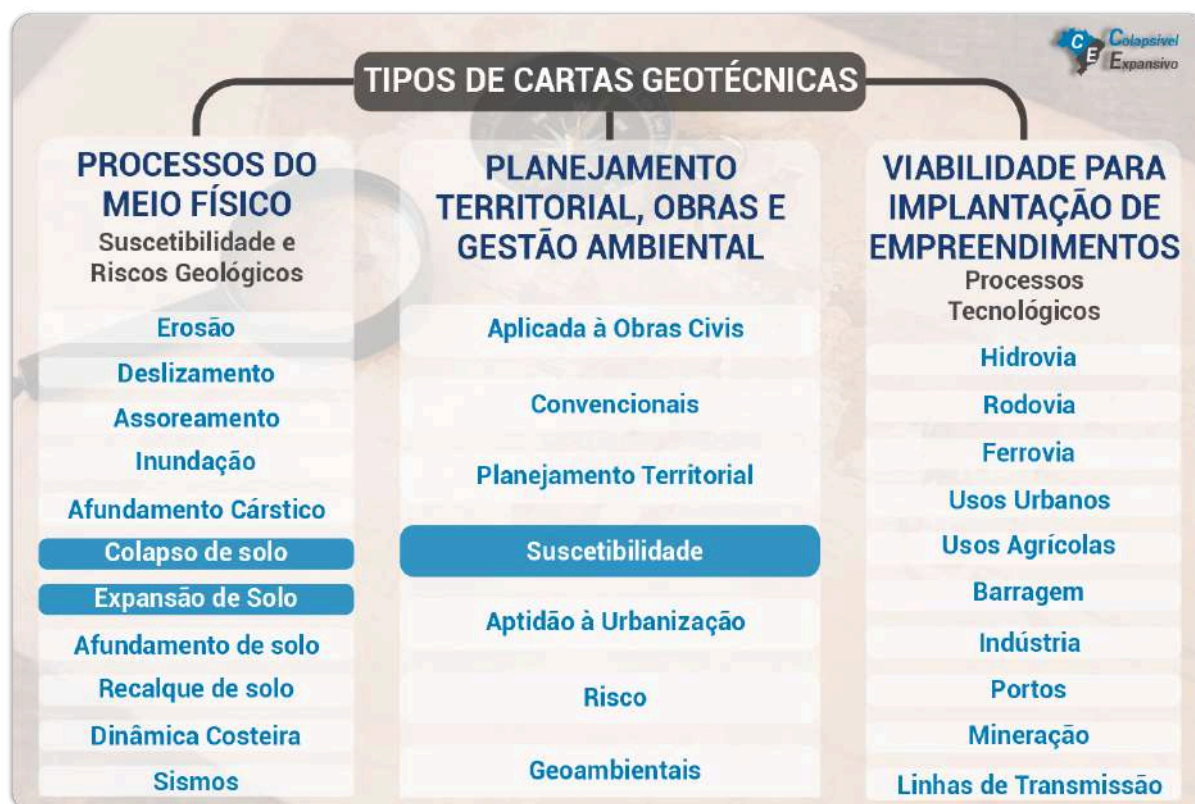
No tocante à finalidade, Diniz (1998) classifica as cartas geotécnicas em três tipos gerais: ordenamento territorial, avaliação de processos do meio físico e estudos de implantação de empreendimentos. Segundo Canil *et al.* (2018), o uso preponderante das cartas geotécnicas ocorre em Planejamento Territorial, Obras e Gestão Ambiental, Figura B.1. Após afirmar que as cartas possuem diversas finalidades, os referidos autores resumem em 7 (sete) tipos principais, a saber:

- a. aplicadas a obras civis;
- b. convencionais;
- c. planejamento territorial;
- d. suscetibilidade;

- e. aptidão à urbanização;
- f. risco;
- g. geoambientais.

Em relação aos tipos de cartas geotécnicas, nota-se que, em ambas as classificações, as cartas de suscetibilidade se fazem presentes na categorização dos autores mencionados. Sobre esse tipo de carta, a palavra “suscetibilidade”, segundo Cerri e Amaral (1998), representa a possibilidade de ocorrência de um fenômeno geológico (evento), podendo ser induzido ou não, bem como são situações que não geram perdas e danos.

Figura B.1 - Tipos de Cartas Geotécnicas, segundo Diniz (1998, 2012) e Canil *et al.* (2018).



Fonte: Modificado de Diniz (1998, 2012) e Canil *et al.* (2018).

Os referidos autores elucidam que quando o fenômeno geológico gera perdas e danos é denominado acidente, quando não, é chamado de evento. O Quadro B.1 apresenta as definições dos termos utilizados pelos autores.

Quadro B.1 - Conceitos dos termos: acidente, evento e risco.

Termo	Conceito
Acidente	Fato já ocorrido em que foram registradas consequências sociais e econômicas (perdas e danos).
Evento	Fato já ocorrido em que não foram registradas consequências sociais e econômicas relacionadas diretamente a ele.
Risco	Possibilidade de ocorrência de um acidente.

Fonte: Adaptado de Cerri e Amaral (1998).

Perante esses conceitos, é possível realizar uma distinção entre a suscetibilidade e o risco. Nota-se que o risco envolve a possibilidade de que o fenômeno seja acompanhado de danos e perdas (acidente). Os referidos autores apresentam as equações relacionadas à suscetibilidade e ao risco, sendo elas exteriorizadas pela Equação 13 e Equação 14, respectivamente:

$$S = P \quad (13)$$

em que:

S = suscetibilidade;

P = possibilidade de ocorrência de um evento.

$$R = P \times C \quad (14)$$

em que:

R = risco;

P = possibilidade de ocorrência de um evento;

C = consequências sociais e/ou econômicas potencias.

B.4 METODOLOGIA DO IPT

No âmbito internacional, Zuquette (1993), Zuquette e Nakazawa (1998), Zaine (2000), Canil *et al.* (2018) e Silveira (2020) citam as metodologias da Associação Internacional de Geologia de Engenharia - IAEG (ANON, 1972 e 1976), da escola francesa (SANEJOUAND, 1972), da *Pattern Unit Component Evaluation* - PUCE da Austrália (GRANT, 1975; AITCHON e GRANT, 1976), da *Zermos* da França (CHAZAN, 1973; HUMBERT, 1975 e 1977; ANTOINE, 1977), da espanhola (ZUQUETTE E GANDOLFI, 1988), da americana (MATHEWSON e FONT, 1974), da Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* do Irã (MOMENI *et al.*,

2012) e da *Geotechnical Area Studies Programme* - GASP de Hong Kong (BURNETT e STYLE, 1982).

Já no âmbito nacional, Canil *et al.* (2018) destacam as metodologias do grupo de pesquisadores do Departamento de Geologia do IG-UFRJ (BARROSO *et al.*, 1986; BARROSO *et al.*, 1993), da Divisão de Geologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (AVILA *et al.*, 1987; NAKAZAWA *et al.*, 1991; PRANDINI *et al.*, 1995; FREITAS *et al.*, 1990; FREITAS, 2000), do Departamento de Geotecnia da EESC-USP (ZUQUETTE, 1987, 1993), do Grupo de Geotecnia da UFRGS (DIAS, 1995), da Técnica de Avaliação do Terreno (LOLLO, 1994, 1995 e 1996), do Detalhamento Progressivo (CERRI *et al.*, 1996; ZAINÉ, 2000) e do Departamento de Geologia do Instituto Geológico de São Paulo IG-SP (YOSHINAGA *et al.*, 1995; PIRES e YOSHINAGA, 1995). Dentre as metodologias citadas, são abordados os procedimentos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, dado que estão relacionados com o objeto deste trabalho.

Desde a década de 70, a Divisão de Geologia Aplicada do IPT-SP vem realizando inúmeros trabalhos envolvendo a análise de processos naturais e alterados pela ocupação, com delimitação de unidades conforme o desempenho dos terrenos frente às solicitações impostas. No tocante às escalas, os estudos têm abrangência que varia de 1:500.000 (mais regionais) a 1:2.000 (grande detalhamento). Quanto à abordagem metodológica e aos conceitos básicos, são baseados em Prandini *et al.* (1995) e Freitas (2000), uma vez que sintetizam os resultados obtidos no desenvolvimento e na aplicação da cartografia geotécnica no IPT (ZUQUETTE; NAKAZAWA, 1998; CANIL *et al.*, 2018).

De acordo com Zuquette e Gandolfi (2004) e Zuquette e Nakazawa (1998), os pontos centrais dos trabalhos desenvolvidos pelo IPT são:

- i. partir dos problemas do meio físico significativos para as suas condicionantes mapeáveis;
- ii. considerar as formas usuais de ocupação do solo e as solicitações sobre o meio físico como fatores fundamentais na determinação do desempenho dos terrenos;
- iii. concentrar esforços na coleta objetiva e orientada de dados, voltada para definir unidades de terreno de mesmo comportamento, de modo que cada unidade conduza a distintas práticas e técnicas de prevenção e correção dos problemas identificados;

- iv. superar o determinismo ingênuo intrínseco aos conceitos de “aptidão” comumente empregados nas cartas geotécnicas, valendo-se do arsenal de técnicas disponíveis para a maximização de opções plausíveis de uso do solo;
- v. elaborar cartas geotécnicas de caráter dinâmico que permitam incorporar novos conhecimentos do meio físico e novas técnicas de ocupação do solo.

Por meio de fluxograma, Zuquette e Nakazawa (1998) apresentam as principais etapas e produtos oriundos da metodologia desenvolvida no IPT. As etapas são denominadas levantamento preliminar, investigação orientada, compartimentação final, estabelecimento das medidas de controle e representação. O produto resultante de cada uma dessas etapas é chamado mapa preliminar (esboço geotécnico), mapas temáticos dirigidos, unidades geotécnicas, diretrizes para o uso do solo e carta geotécnica (mapa final e quadro legenda), respectivamente. Sucintamente, são descritas cada uma dessas etapas.

B.4.1 Levantamento preliminar

De acordo com Zuquette e Nakazawa (1998), o levantamento preliminar, considerado o primeiro passo da metodologia, consiste no levantamento e na sistematização dos principais processos e características do meio físico que significam problemas para os usos do solo (específico ou gerais). Tal levantamento é realizado através de observação de campo, associado à análise de dados do meio físico disponíveis (mapas geológicos, geomorfológicos, topográficos, etc.) e complementado por entrevistas e consultas. Essa abordagem reúne os meios necessários para permitir a elaboração de uma compartimentação preliminar (esboço da carta geotécnica), servindo de modelo orientativo para as etapas posteriores. O levantamento preliminar é sintetizado em 2 (dois) procedimentos: identificação dos problemas existentes ou previstos e compilação de dados.

B.4.2 Investigação orientada

No tocante à investigação orientada, os problemas detectados são analisados com a finalidade de identificar suas causas e mecanismos, estabelecendo-se os parâmetros do meio físico e da ocupação a serem considerados na compartimentação geotécnica final. Tais parâmetros permitem a definição dos mapas temáticos necessários, sendo estes elaborados

através de levantamentos de campo ou de compilação de dados existentes. As escalas de trabalho, a escala da carta geotécnica final e a caracterização do uso e ocupação do solo também são definidas nessa etapa. Dessa forma, a investigação orientada é sumarizada em 4 (quatro) procedimentos, sendo eles: identificação dos fatores condicionantes dos problemas, mapeamento desses fatores, definição das escalas de trabalho e caracterização do uso e ocupação do solo (ZUQUETTE; NAKAZAWA, 1998).

B.4.3 Compartimentação final

Determinados os parâmetros nas etapas anteriores, a compartimentação final consiste na análise integrada desses de modo a delimitar zonas ou unidades geotécnicas, cada qual caracterizada por uma expectativa de comportamento ou desempenho do terreno, em face dos usos do solo considerados desde o início dos trabalhos. A superposição dos mapas temáticos é a técnica mais frequentemente utilizada nessa etapa, devido à facilidade proporcionada pelas ferramentas atualmente disponíveis de cartografia digital e Sistemas de Informações Geográficas (SIG). A compartimentação geotécnica final em unidades ou zonas geotécnicas é o produto dessa etapa de trabalho, sendo composta por 2 (dois) procedimentos: análise integrada dos fatores mapeados e delimitação dos terrenos com comportamento homogêneo frente ao seu uso e ocupação (ZUQUETTE; NAKAZAWA, 1998).

B.4.4 Estabelecimento das medidas de controle

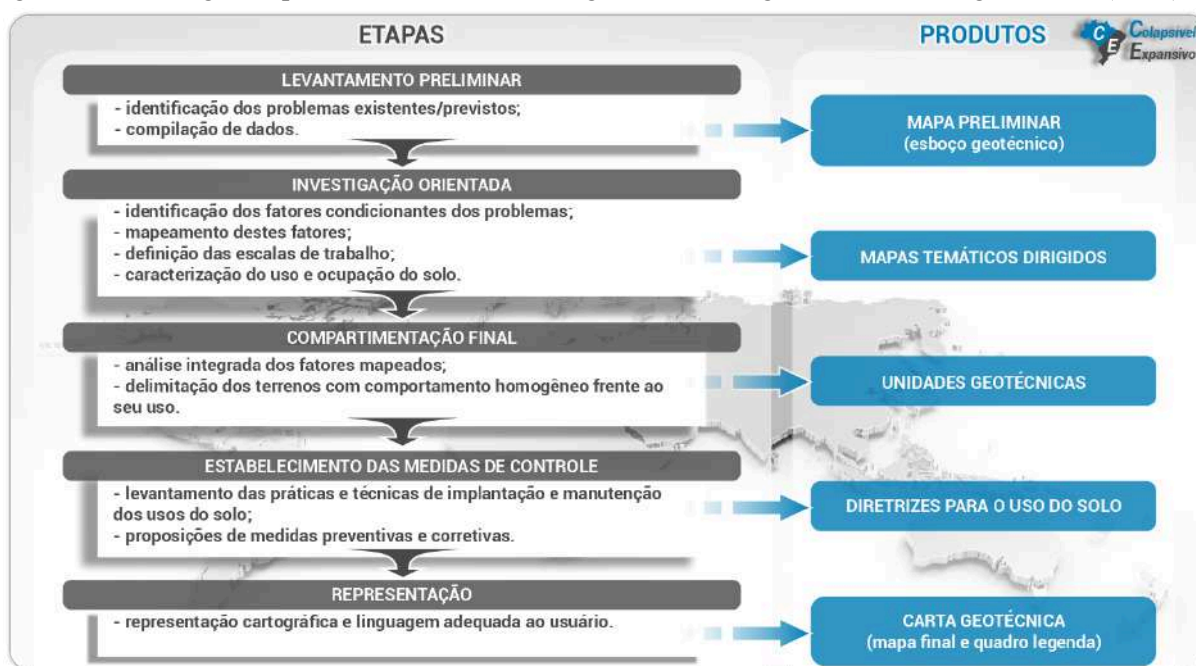
Essa etapa consiste na formulação das ações e medidas técnicas recomendadas para o controle preventivo e corretivo dos problemas e comportamentos indesejáveis identificados, considerando-se as limitações e potencialidades do terreno em cada unidade, as formas usuais de implantação dos usos do solo em análise e as técnicas e práticas disponíveis para viabilizar tais usos. A etapa é sintetizada em 2 (dois) procedimentos: levantamento das práticas e técnicas de implantação e manutenção dos usos do solo e proposição de medidas preventivas e corretivas (ZUQUETTE; NAKAZAWA, 1998).

B.4.5 Representação

Segundo Zuquette e Nakazawa (1998), trata-se de uma etapa de grande importância, posto que envolve a apresentação dos resultados ao público interessado. Os referidos autores ressaltam que as informações de natureza cartográfica são melhor transmitidas através de recursos de cores e texturas, cuja aplicação é facilitada pelas ferramentas de cartografia nas edições digitais. Tais ferramentas, associadas às potencialidades do SIG, também proporcionam uma facilidade nas revisões e atualizações periódicas necessárias.

Os autores asseveram que as informações sobre as características de cada unidade geotécnica e as respectivas diretrizes técnicas para o uso dos solos são apresentadas na forma de um quadro-legenda, sendo utilizada linguagem acessível ao usuário, atentando-se para não prejudicar a precisão do trabalho. A carta geotécnica, contendo a compartimentação geotécnica e o respectivo quadro-legenda, representa o documento cartográfico que corresponde ao produto final dos trabalhos formulados. Portanto, na sistematização apresentada pelos referidos autores, essa etapa é sumarizada em um único procedimento, que consiste na representação cartográfica em linguagem adequada ao usuário. A Figura B.2 apresenta as etapas e produtos oriundos da metodologia desenvolvida no IPT.

Figura B.2- Fluxograma para elaboração de cartas geotécnicas, segundo a metodologia do IPT (1994).

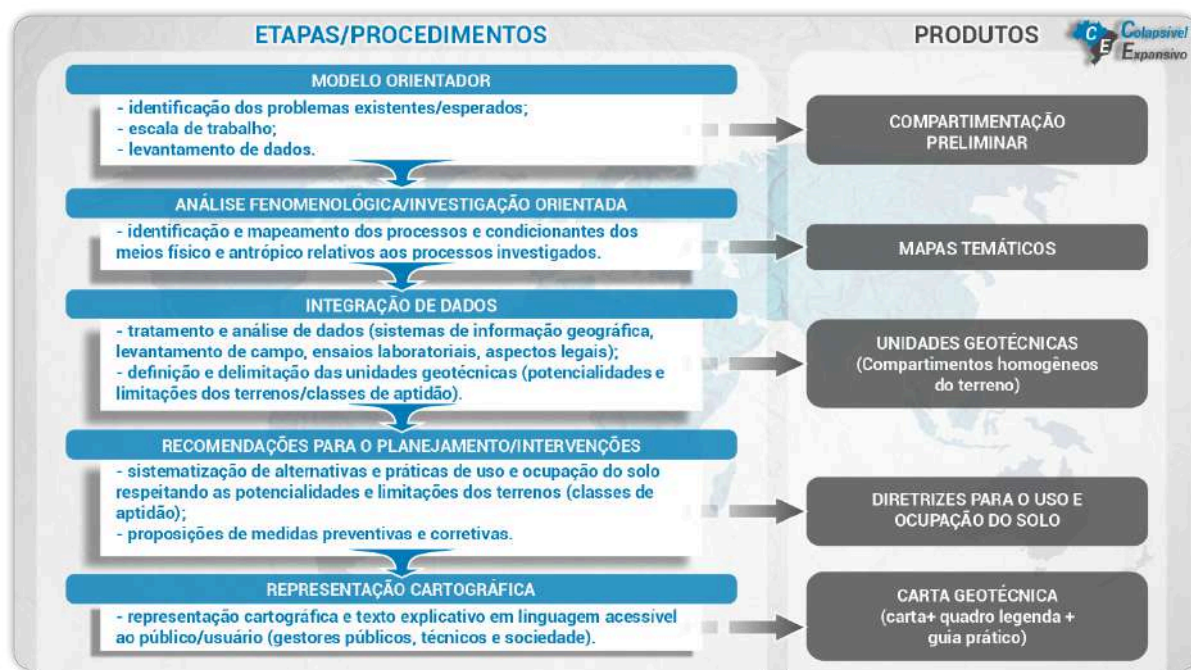


Fonte: Adaptado de Nakazawa *et al.* (1994), Zuquette e Nakazawa (1998).

Baseado na esquematização metodológica exposta, Canil *et al.* (2018) apresentam a sistematização com algumas alterações na nomenclatura e no enquadramento dos procedimentos, bem como promovem o acréscimo de informações na metodologia do IPT (Figura B.3). Realizando o confronto entre os fluxogramas, nota-se que o procedimento de definição de escala foi transferido para a etapa denominada modelo orientador, a qual corresponde, na nomenclatura anterior, ao levantamento preliminar. O produto dessa etapa, o mapa preliminar, passou a ser chamado Compartimentação Preliminar.

Na etapa de investigação orientada, houve o acréscimo do termo análise fenomenológica, bem como a sumarização dos procedimentos e do produto. O termo integração de dados corresponde à compartimentação final, sendo possível observar o destaque na especificação do tratamento e análise de dados em que são descritos expressamente os meios para alcançar o objetivo da atividade, tais como o sistema de informação geográfica, levantamento de campo, ensaios laboratoriais e aspectos legais. Um maior detalhamento também foi observado nas etapas seguintes.

Figura B.3 - Fluxograma para elaboração de cartas geotécnicas, segundo a metodologia do IPT (1994) modificada por Canil *et al.* (2018).



Fonte: Adaptado de Canil *et al.* (2018).

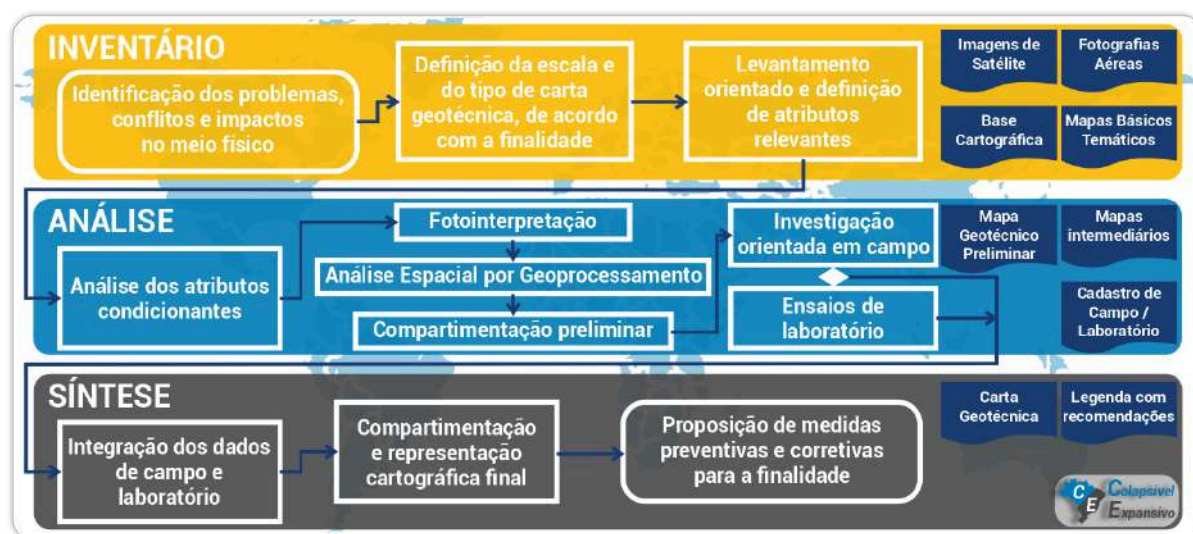
Diniz e Freitas (2013) afirmam que, com base em propostas de Prandini *et al.* (1995), complementadas e implementadas por sugestões de outros profissionais especializados em

cartografia geotécnica e de diferentes instituições que atuam nessa área no Brasil e em autores internacionais, podem-se aplicar os seguintes procedimentos básicos:

- a) formulação de um modelo inicial orientador, com identificação objetiva dos recursos e problemas existentes ou esperados, pelo conhecimento do meio físico e da dinâmica da ocupação local. Para tanto, devem-se buscar informações do meio físico (um esboço fisiográfico primário dos terrenos) e sua relação com o uso, resultando em um primeiro ensaio de compartimentação ante os problemas e recursos esperados;
- b) análise fenomenológica e de desempenho, identificando as causas do desenvolvimento de processos ou situações geradoras de problemas previamente detectados, estabelecendo as características fisiográficas de interesse para a ocupação (geologia, geomorfologia e parâmetros geotécnicos locais) e as solicitações e transformações inerentes às formas de uso do solo, incluindo questões do meio biótico;
- c) mapeamento e compartimentação, estabelecendo-se as principais evidências acessíveis à investigação das características de interesse, fixando critérios de correlação, extrapolação e interpolação das diversas áreas de conhecimento, resultando na configuração espacial da distribuição de tais características;
- d) orientação das informações e expressões geográficas das características de interesse, por meio de operações de coleta e análise das informações; reconhecimento/mapeamento, tanto por sensoriamento remoto, quanto por levantamentos de campo, investigações laboratoriais e *in situ*;
- e) compartimentação homogênea, segundo a maior probabilidade de ocorrência de problemas, ou as características de interesse, ou as homogeneidade quanto à aptidão a determinadas formas de uso e ocupação, bem como à minimização de possíveis efeitos;
- f) representação, com exposição dos resultados de modo a facilitar o acesso ao público interessado.

Para Diniz (1998), os procedimentos expostos podem ser estruturados em 3 (três) fases, sendo elas: inventário, análise e síntese (Figura B.4).

Figura B.4 - Fases da cartografia geotécnica, segundo Diniz (1998).



Fonte: Adaptado de Diniz (1998).

Segundo o referido autor, as cartas geotécnicas partem de um inventário com planejamento e levantamento orientado de dados. Em seguida, são realizadas análises e investigações de campo, para identificação dos problemas (existentes e previstos) decorrentes da interação entre os meios físico, biótico e antrópico (socioeconômico e cultural). Por fim, estabelece-se a síntese com proposição de alternativas de solução ou de prevenção desses problemas.

APÊNDICE C - SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

C.1 HISTÓRICO E CONCEITOS

De acordo com Câmara e Davis (2001), os primeiros trabalhos de SIG surgiram na década de 60, no Canadá, a partir de um programa governamental com objetivo de criar um inventário de recursos naturais. Contudo, nesse período existiam limitações computacionais e carência de mão de obra especializada. No decorrer dos anos 70, o desenvolvimento tecnológico proporcionou recursos mais acessíveis e viáveis, permitindo o avanço de sistemas comerciais. A partir desse momento, surge a expressão *Geographic Information System*. Também nessa época, foram desenvolvidos alguns fundamentos matemáticos voltados para a cartografia, inserindo questões de geometria computacional. O progresso mais acelerado dos SIGs se deu a partir da década de 80, persistindo até os dias atuais.

O termo Sistemas de Informação Geográfica - SIG, segundo Câmara e Queiroz (2001), é utilizado para identificar sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos, bem como que recuperam informações com base em suas características alfanuméricas e sua localização espacial. Tais sistemas possibilitam uma visão única do ambiente de trabalho em que é possível ter acesso às informações com base na localização geográfica. Ressaltam que esse cenário só é possível quando a geometria e os atributos dos dados num SIG estão georreferenciados, ou seja, estão localizados na superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica.

Trata-se de uma ferramenta tecnológica poderosa para o gerenciamento e a análise de informações de qualquer natureza que sejam dependentes da sua localização, informação espacial ou geográfica. Tal ferramenta permite o desenvolvimento de abordagens críticas para compreender, representar, gerenciar e comunicar os vários aspectos das paisagens naturais e humanas, bem como permite compreender melhor a Terra como sistema ambiental (AUGUSTO FILHO, 2013).

Câmara e Davis (2001) apresentam algumas definições sobre o SIG segundo a perspectiva de diversos autores. A título de exemplo, Aronoff (1989) o define como “um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados”. Burrough (1986) conceitua o SIG como sendo “conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o

mundo real”. Cowen (1988) o entende como “um sistema de suporte à decisão que integra dados referenciados espacialmente num ambiente de respostas a problemas”.

Dentre as diversas definições propostas para SIG na literatura, Augusto Filho (2013) adota como referência geral a definição apresentada pela ESRI (1997), que o designa como “conjunto composto de computador, programas, dados geográficos e pessoal com capacidade de capturar, armazenar, atualizar, analisar e apresentar todas as formas de informações geograficamente referenciadas”.

Hamada e Gonçalves (2007), ao discorrerem sobre os preceitos do SIG, apresentam uma representação esquemática sobre a utilização desse sistema (Figura C.1). É possível perceber que se trata de um processo cíclico. Os processos que ocorrem no ambiente SIG envolvem a aquisição de dados, a entrada de dados, o armazenamento e análise de dados, as informações para a tomada de decisões e a ação.

Figura C.1 - Representação esquemática geral de utilização do SIG, segundo Hamada e Gonçalves (2007).



Fonte: Autor (2024).

Oriundas do mundo real, as fontes de dados são interpretações da realidade. Após a conclusão dos processos iniciais, as informações geradas são produtos cartográficos, tais como mapas, gráficos e tabelas, que auxiliam ou dão subsídio aos usuários para uma tomada

de decisão. Existindo consenso na decisão escolhida, essa será colocada em ação, agindo sobre o mundo real e eventualmente modificando-o, necessitando, então, de novas aquisições de dados de uma realidade diferente. E assim por diante.

O SIG, segundo Hamada e Gonçalves (2007), representa uma ferramenta computacional poderosa, sendo imprescindível o seu planejamento, desde a sua implantação até a sua utilização, de modo a buscar atingir os objetivos desejados, bem como explorar todas as potencialidades oferecidas pela ferramenta. Ressalta-se que o usuário é o responsável direto pelo sucesso alcançado através de aplicação do SIG, uma vez que o êxito depende exclusivamente da maneira como a ferramenta é utilizada pelo usuário.

C.2 TRÊS VISÕES DE UM SIG

De acordo com Câmara e Queiroz (2001), existem, no mínimo, três maneiras de utilizar um SIG:

- a) como ferramenta para produção de mapas;
- b) como suporte para análise espacial de fenômenos;
- c) como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

As 3 (três) visões apresentadas por Maguire *et al.* (1991) estão apresentadas na Figura C.2. A visão do mapa tem como foco os aspectos cartográficos do SIG, tendo a função de processar mapas que apresentam um conjunto de dados separados em camadas ou temas. Normalmente, os mapas são manipulados por rotinas que podem adicionar e subtrair informações, bem como podem realizar consultas e procurar padrões. Tais operações têm como resultado de saída outro mapa.

A segunda visão, de análise espacial, visa extrair ou questionar informações úteis que satisfaçam as exigências dos objetivos do usuário para tomada de decisão. Por fim, a visão de banco de dados do SIG enfatiza o uso de um bem projetado, implementando um banco de dados que permita consultar e recuperar informações.

Figura C.2 - Três visões de um SIG, segundo Maguire *et al.* (1991).



Fonte: Autor (2024).

C.3 COMPONENTES

Inicialmente, Maguire *et al.* (1991) apresentam o SIG como sendo composto por 4 (quatro) elementos básicos: equipamentos, programas, dados e pessoas. Posteriormente, Longley *et al.* (2015) representam o SIG com dois elementos adicionais, sendo eles: procedimentos e redes. Sendo assim, pode-se afirmar que os Sistemas de Informação Geográfica são constituídos por 6 (seis) componentes: equipamentos, programas, dados, pessoas, procedimentos e redes.

Os equipamentos correspondem à plataforma computacional utilizada pelo usuário. Representam os dispositivos que permitem a interação dos usuários na realização das operações do sistema tais como digitalizar, clicar, apontar e falar. A tela dos dispositivos retorna as informações oriundas das operações citadas. Atualmente, existem diversas opções disponíveis aos usuários como notebooks, netbooks, tablets, *all-in-one*, desktops e smartphones.

Os programas são responsáveis por fornecer as funções e as ferramentas necessárias para armazenar, analisar e exibir as informações geográficas. Existem inúmeras opções de programas, podendo ser de código aberto ou fechado, gratuitos ou pagos. O QGIS representa um programa de SIG que vem se expandindo pelo Brasil pelo fato de ser um programa gratuito e de código aberto. Outro programa bastante utilizado é ArcGIS, porém é pago e de código fechado. Ambos apresentam inúmeros recursos para executar tarefas de geoprocessamento, atendendo os interesses dos usuários na resolução de diversos problemas. Além desses, podem ser citados outros programas de SIG tais como SPRING, gvSIG, Grass

GIS, uDIG, TerraView, SAGA GIS, SOPI, DIVA GIS, OpenJUMP GIS, MapServer, TerraLib, VisualSIG, Kosmo GIS, GeoMedia, Mapinfo, MicroImages, iSMART, IDRISI, dentre outros.

Os dados, o terceiro componente, fornecem a base para a representação digital de aspectos selecionados de alguma área específica da Terra, representando o material bruto que alimenta o sistema de modo a gerar informação. Os Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados (SGBD) permitem criar e manipular a base de dados. Atualmente, os dados estão disponíveis gratuitamente através de diferentes fontes. São divididos em dados espaciais (representados em formato vetorial ou matricial) e dados de atributos (compostos por códigos alfanuméricos e armazenados em tabelas).

Os recursos humanos, o quarto componente, representam os profissionais responsáveis pelo projeto. As pessoas são encarregadas de realizar as operações nos programas, as manipulações nos equipamentos, as transferências de dados, a definição das metodologias adequadas ao projeto e a interpretação dos resultados obtidos. Representam uma parte essencial do sistema, pois a eficiência de um SIG está intimamente relacionada ao treinamento de pessoal, sendo primordial o conhecimento das potencialidades dessa tecnologia.

Os procedimentos correspondem às regras que fazem com que o sistema opere adequadamente, consistem no conjunto de etapas utilizadas pelo usuário no ambiente SIG visando atingir um determinado objetivo a partir de um tratamento de dados específico. Sendo assim, os procedimentos estão ligados ao conhecimento e à experiência do profissional.

De acordo com Longley *et al.* (2015), as aplicações estão cada vez mais interconectadas por meio de redes de internet, possibilitando a utilização dos recursos de forma remota e ininterrupta, adaptando-se às necessidades dos usuários. Esse contexto evidencia o papel central das redes.

Os 6 (seis) componentes de um SIG, segundo os referidos autores, estão apresentados na Figura C.3. Cada componente desempenha um papel fundamental na criação, manipulação e utilização de informações espaciais para atender às necessidades dos usuários. O treinamento adequado dos profissionais e a interconexão das aplicações por meio de redes são aspectos cruciais para o sucesso e eficiência desses sistemas.

Figura C.3 - Componentes de um SIG, adaptado de Longley *et al.* (2015).



Fonte: Autor (2024).

C.4 ARQUITETURA DO SIG

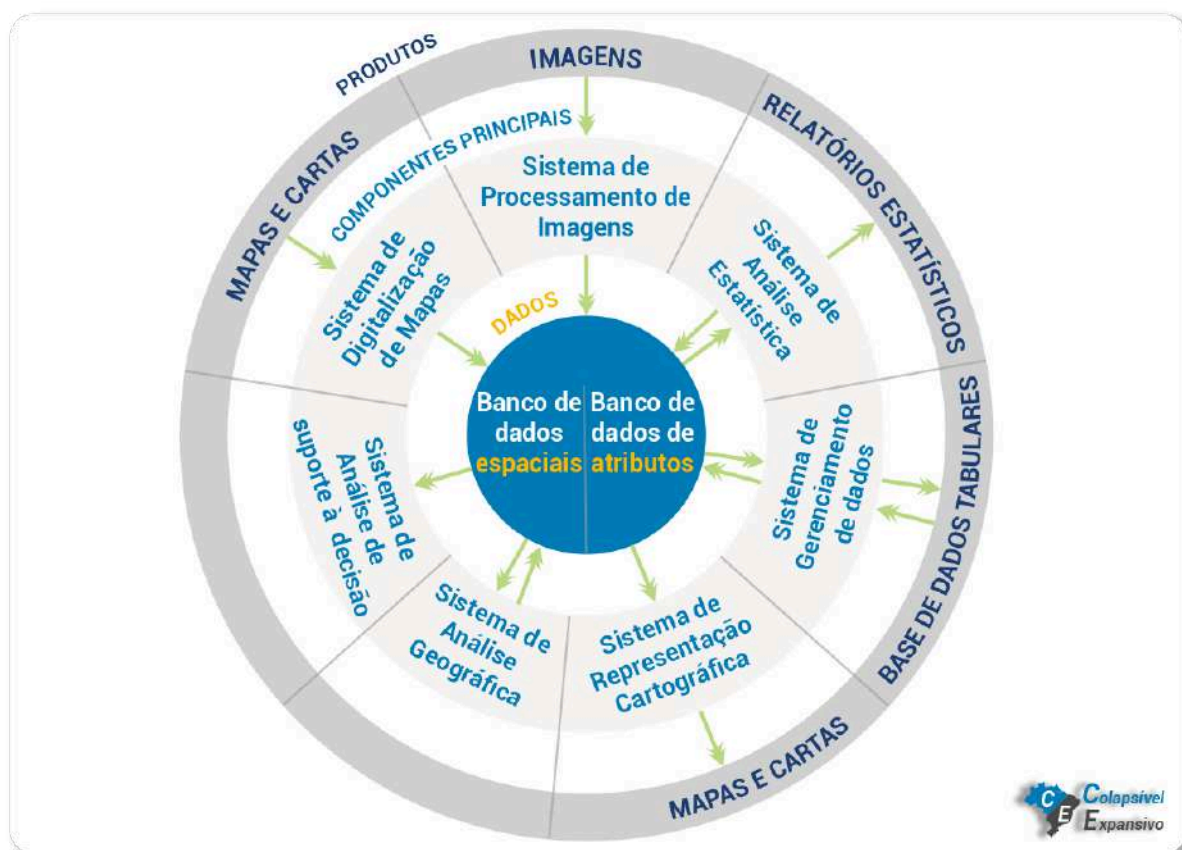
Augusto Filho (2013) afirma que, apesar da diversidade de programas de SIG disponíveis no mercado, existe um conjunto de características comuns a todos eles, tais como: utilizam meios digitais; necessitam de uma base de dados integrada, georreferenciada e com controle do erro; contêm funções de análise desses dados; realizam operações algébricas simples, complexas e lógicas (igual a, maior que, pertence a, etc.); e estão relacionados a outras técnicas e tecnologias digitais e computacionais (banco de dados, desenho digital, sensoriamento remoto, etc.).

Em virtude disso, é possível estabelecer uma estrutura geral para esses programas, sendo eles constituídos pelos seguintes componentes principais:

- i. banco de dados espacial e de atributos;
- ii. sistema de representação cartográfica;
- iii. sistema de digitalização de mapas;
- iv. sistema de gerenciamento de dados;
- v. sistema de análise geográfica;
- vi. sistema de processamento de imagens;
- vii. sistema de análise estatística.

Hamada e Gonçalves (2007) apresentam a descrição desses componentes. Segundo os autores, o sistema central, banco de dados espacial e de atributos, consistem em uma coleção de informações e de mapas armazenados digitalmente. Os componentes principais, chamados componentes de programa, circundam os bancos de dados. A manipulação e a análise de imagens de sensoriamento remoto, tais como radares e fotografias aéreas, são realizadas pelo sistema de processamento de imagem. A arquitetura típica de um SIG, descrita pelos autores mencionados, está consolidada na Figura C.4, em que é possível visualizar as saídas, as entradas, os componentes principais, os dados e os produtos gerados.

Figura C.4 - Arquitetura, saídas e entradas típicas de um SIG.



Fonte: Modificado de Eastman (1992, 1998) e Hamada e Gonçalves (2007).

O sistema de análise estatística apresenta uma série de rotinas para a descrição estatística de dados espaciais. Já o Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) geralmente está associado a um tipo de programa que é utilizado para a entrada, o gerenciamento e a análise de dados de atributos. No que se refere ao sistema de representação cartográfica, este permite selecionar os elementos do banco de dados e produzir um material cartográfico no monitor do computador ou a saída para uma impressora. O sistema de análise

geográfica proporciona a análise de dados ou atributos baseados em suas características espaciais.

No tocante ao sistema de digitalização de mapas, este possibilita a entrada de dados de mapas em papel e a transformação dessas informações no formato digital. Por fim, em comparação ao modelo apresentado por Eastman (1998, 1992), os autores supracitados apresentam um componente adicional chamado análise de suporte à decisão. Para os autores, esse componente representa uma das mais importantes funções de um SIG, bem como possibilita utilizar ferramentas matemáticas e estatísticas especialmente desenvolvidas para esse fim.

C.5 RAZÕES PARA O USO

De acordo com Aronoff (1989), existem 4 (quatro) razões para se usar um SIG, sendo elas:

- ⇒ os dados armazenados digitalmente estão em uma forma mais compacta do que se eles estivessem em mapas de papel ou em pilhas nas mesas. Normalmente, os dados são armazenados em um ou mais arquivos de um disco rígido fixo, fitas *streamer*, discos rígidos removíveis, discos ópticos fixos ou discos ópticos removíveis;
- ⇒ grande quantidade de dados pode ser mantida e recuperada com celeridade e a um custo menor por unidade de dado quando são utilizados sistemas computacionais;
- ⇒ a habilidade de gerenciar os dados espaciais e seus correspondentes dados de atributo e de integrar diferentes tipos de dados de atributos em uma única análise, à alta velocidade, são incomparáveis com os métodos manuais;
- ⇒ a habilidade de rapidamente realizar análises espaciais complexas fornece vantagem tanto quantitativa quanto qualitativa. Cenários de planejamento, detecção e análise de mudança e outros tipos de planos podem ser desenvolvidos por refinamentos de análises sucessivas. Esse processo interativo somente se torna prático com um SIG, pois cada processamento computacional pode ser feito rapidamente e a um custo relativamente baixo.

No tocante à Geologia de Engenharia, Celestino e Diniz (1998) afirmam que as principais vantagens no uso de SIG na elaboração de cartas são:

- i. possibilidade de variação nas escalas de trabalho e na recuperação;
- ii. manipulação de um maior volume de atributos do meio físico, permitindo aquisição, atualização e recuperação em tempo real;
- iii. simulação interativa da dinâmica de uso do solo e do meio físico ao longo do tempo.

Quanto às aplicações, os referidos autores asseveram que estão concentradas em mapeamentos temáticos, cartografia geotécnica, modelagem numérica de terrenos para análises de risco, avaliação geotécnica e gerenciamento ambiental. Em relação aos produtos gerados, os principais resultados de saída são:

- a) cartografia digital;
- b) modelagem digital de terrenos;
- c) automação de cartas de declividade;
- d) análise de processos do meio físico;
- e) gerenciamento de banco de dados geológico-geotécnicos por unidade de terreno, município, bacia;
- f) avaliação geotécnica para finalidades específicas;
- g) interação de temas para zoneamento geral ou cartas de risco.

No que se refere à Climatologia, Sampaio *et al.* (2011) afirmam que, para o estudo de situações complexas, o uso de sistemas de informações geográficas (SIG), sensoriamento remoto e técnicas de análise espacial (estatística espacial, geoestatística e modelos de distribuição espacial) fornece resultados eficientes e de grande utilidade. Além disso, constata-se uma boa qualidade na modelagem de previsão de tempo e clima.

C.6 PROGRAMA DE SIG UTILIZADO NESTE TRABALHO

O QGIS é um programa de SIG disponível de forma gratuita e com código aberto. O programa apresenta uma interface gráfica amigável, simples e atraente. Tem funcionamento em diversas plataformas, tais como Windows, macOS, Linux e Android. Oriundo do projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), o QGIS foi desenvolvido na linguagem C++ e baseado nas bibliotecas Qt4, sendo acessível também através do uso da linguagem *Python*. É livremente distribuído por meio da licença GNU/GPL (*General Public*

License) e permite o emprego de diversos formatos tais como *raster*, vetorial, banco de dados e outras funcionalidades adicionadas através da arquitetura de *plug-in* (QGIS, 2022).

O projeto teve início em maio de 2002 e o lançamento ocorreu em junho do mesmo ano. O objetivo era criar um visualizador gratuito para a base de dados geográfica que permitisse o funcionamento em sistemas operacionais livres. Em janeiro de 2009, houve o lançamento da série 1.x, com a versão 1.0 denominada “*Kore*”. Durante esse período, o programa foi chamado *Quantum GIS*, porém a mudança da nomenclatura ocorreu em setembro de 2013, quando houve o lançamento da série 2.x, sendo a versão 2.0 chamada “*Dufour*”. A partir daí, o programa passou a ser chamado apenas de QGIS. Até a presente data deste trabalho, o programa se encontra na série 3.x, cuja versão 3.0 foi lançada em fevereiro de 2018, denominada “*Girona*” (Figura C.5).

Figura C.5 - Evolução do QGIS ao longo dos anos.



Fonte: Autor (2024).

Nota-se que o QGIS é um programa que vem apresentando grande evolução, com o lançamento de sucessivas versões. Segundo Brasil (2018), o QGIS atende diversas necessidades de seus usuários, pois se mostra em constante desenvolvimento, com listas de discussões ativas. Permite realizar consultas espaciais e por atributo (semânticas), bem como possibilita a edição de dados na estrutura vetorial, em formato *Shapefile*, *PostgreSQL* (*PostGIS*), *Oracle Spatial*, entre outros.

Para Dalla Corte *et al.* (2020), o QGIS tem sido utilizado por profissionais de diversas áreas, principalmente pela sua interface amigável e pela constante atualização nas suas versões. Os autores citados destacam a possibilidade de incorporação de novas ferramentas e o potencial de integração com outros programas e pacotes de análise. Tais possibilidades permitem uma ampliação em suas aplicações.

O QGIS apresenta duas linhas de desenvolvimento de versões: Lançamento de Longa Duração (LLD) e Último Lançamento (UL), Figura C.6. A primeira, versão de longa duração, representa a versão estável e confiável, sendo a recomendada para ambientes de produção. As versões LLD, além de contar com suporte a longo prazo, não permitem a introdução de novidades até que seja substituída pela versão seguinte.

Figura C.6 - Linhas de desenvolvimento do QGIS.



Fonte: Autor (2024).

Nas versões especiais LLD, ao longo de 1 (um) ano concentram o trabalho nas correções de erros ou falhas, ficando estagnado o desenvolvimento do programa, ou seja, novos recursos não serão adicionados, apenas correções de falhas e atualizações triviais. Portanto, o objetivo da LLD é fornecer uma plataforma estável dentro de um período determinado, sem sofrer alterações com frequência.

Por outro lado, o Último Lançamento (UL) representa a versão com novidades, ou seja, estão presentes os lançamentos mais recentes, correspondendo à última versão do QGIS. Isto significa que representa a versão com recursos em fase de teste. Essas versões são lançadas a cada 4 (quatro) meses e englobam todas as novas funcionalidades do QGIS para que os usuários possam realizar as operações de testes. Sendo assim, não são recomendadas para o ambiente de produção.

APÊNDICE D - *BUSINESS INTELLIGENCE*

D.1 BREVE HISTÓRICO

Na década de 80, *Business Intelligence* (Inteligência de Negócio), também conhecido BI, foi o termo criado por *Howard Dresner* do *Gartner Group* para descrever um conjunto de conceitos e métodos para melhorar o processo de tomada de decisão das empresas, utilizando-se de sistemas fundamentados em fatos e dimensões. Trata-se de um processo de coleta, organização, análise e fornecimento de informações que dão suporte às tomadas de decisão (BRAGHITTONI, 2017).

Sob o ponto de vista de Turban *et al.* (2009), o termo BI foi cunhado muito antes, dado que tem raízes nos sistemas de geração de relatório oriundo dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) dos anos 1970. Os referidos autores elucidam que, durante esse período, os sistemas de geração de relatórios eram estáticos, bidimensionais e não possuíam recursos de análise.

Ainda segundo os autores supracitados, no início dos anos 1980 surgiu o conceito de Sistemas de Informações Executivas (EIS), que deu suporte computadorizado aos gerentes e executivos, permitindo a geração de relatórios dinâmicos multidimensionais, dentre outros recursos. Posteriormente, houve a difusão desses recursos que apareceram sob o nome BI. Em virtude disso, o conceito original de EIS foi transformado em BI. Poderosos recursos de inteligência artificial e de análise foram incluídos nos sistemas de BI em 2005 e o uso dessa metodologia solucionou diversos problemas das empresas, resultando em uma tecnologia de sucesso.

No que concerne ao conceito de BI, Reis e Angeloni (2006) discorrem como sendo um conjunto de metodologias de gestão implantadas através de ferramentas de programa visando proporcionar benefícios nos processos decisórios gerenciais com base na integralização de informações realizada pela ferramenta. Os referidos autores ressaltam que o objetivo do BI é transformar dados em conhecimento.

D.2 PIRÂMIDE DO CONHECIMENTO

Elaborada inicialmente por Ackoff (1989) e analisada por Bates (2005), Rowley (2007) e Bernstein (2009), a Pirâmide do Conhecimento, também conhecida estrutura DIKW, oriunda do inglês (*data-information-knowledge-wisdom*), envolve o relacionamento de dados, informações, conhecimento e inteligência (ELEUTÉRIO, 2015).

Os dados ocupam o primeiro nível, a base da pirâmide, e consistem em registros brutos, estruturados e não interpretados, normalmente obtidos em grande volume e sem um significado específico. Apesar de volume significativo e de formato inadequado, esses dados são essenciais para gerar informação. No segundo nível estão as informações, resultantes do tratamento e da interpretação do conjunto de dados estruturados. Consequentemente, apresentam menor volume e maior valor agregado em relação ao primeiro nível (ACKOFF, 1989; ELEUTÉRIO, 2015).

Segundo os autores, o nível seguinte é representado pelo conhecimento. Esse consiste na capacidade de analisar e interpretar as informações visando a aplicabilidade sobre o mundo real. O conhecimento apresenta menor volume e maior valor agregado em relação à informação. Por fim, o alto nível da pirâmide é ocupado pela inteligência ou sabedoria, que envolve o uso do conhecimento com competência no processo de decisão nas organizações. Em relação aos demais níveis, a inteligência apresenta o menor volume e o maior valor agregado, Figura D.1.

Figura D.1 - Pirâmide do conhecimento, adaptado de Rowley (2007).



Fonte: Autor (2024).

Conforme ressalta Eleutério (2015), nota-se que, à medida que ascende na pirâmide, o nível de compreensão sobre os fatos aumenta, enquanto a quantidade de itens diminui. Dessa forma, pode-se afirmar que, na pirâmide do conhecimento, volume e valor são grandezas inversamente proporcionais. O expressivo volume de dados contido na base da pirâmide tem potencial de ser transformado em informação, conhecimento e inteligência. O uso de tecnologias possibilita a realização desse percurso, gerando conteúdo útil para tomada de decisão.

D.3 ARQUITETURA DO BI

Segundo Chaudhuri *et al.* (2011), a arquitetura típica de uma plataforma de BI pode ser resumida pelos seguintes ambientes: fonte de dados, movimentação de dados, Repositório de Dados (RD), servidores intermediários e análises do negócio.

- ⇨ ambiente de fonte de dados: registra as origens dos dados que dão suporte ao sistema, podendo ser internos ou externos à organização, tal como planilhas do *Excel*, arquivos TXT, banco de dados, redes sociais, arquivos CSV e outros;
- ⇨ ambiente de movimentação de dados: realiza-se o processo chamado ETC (Extração, Transformação e Carregamento), que consiste nas operações de extração, transformação (limpezas, correções, classificação e padronização) e carregamento dos dados, tornando-os adequados para armazenamento no repositório de dados da organização, bem como para uso no sistema de BI;
- ⇨ ambiente de Repositório de Dados (RD): contém o conjunto de dados integrados, estruturados e organizados de modo a suportar os processos de consulta, análise e decisão da empresa. Esse elemento, que pode ser dividido em Sub-Repositórios de Dados - SRD (repositório de informações de um departamento), apresenta as seguintes características: orientado por assunto (organizados por tema), integrado (representação única a todos os dados oriundos dos diversos sistemas operacionais), não volátil (os dados são incrementados, mas não atualizados) e variante no tempo (dados são armazenados temporariamente);
- ⇨ ambiente de servidores intermediários: utilizam-se as técnicas e ferramentas de análise para gerar informações relevantes para a tomada de decisão, tais como Processamento Analítico *Online* (PAO), que consegue manipular as informações em múltiplas perspectivas com foco na apresentação de análises e relatórios para

tomada de decisão, e mineração de dados, que tem um enfoque mais estatístico na detecção de tendência e padrões;

- ⇒ ambiente de análise de negócio: disponibilizam-se diversas aplicações de interface gráfica que permitem o acesso e a manipulação da informação pelos gestores para realizar o acompanhamento do desempenho do negócio utilizando ferramentas como painéis e consultas personalizadas.

A Figura D.2 apresenta esquematicamente os componentes elencados. Oliveira (2020) ressalta que o advento da Computação em Nuvem (CN) proporcionou a simplificação da arquitetura e da complexidade técnica envolvendo a implantação do BI, tornando a estruturação dos dados mais intuitiva. Essa tecnologia possibilitou a consolidação de dados de diversas fontes pelo ETC e a organização da arquitetura nos sub-repositórios e repositórios de dados.

Figura D.2 - Arquitetura típica de uma plataforma de BI, adaptado de Chaudhuri *et al.* (2011).



Fonte: Autor (2024).

Sobre a computação em nuvem, Eleutério (2015) a define como sendo um modelo tecnológico e de negócio que proporciona a contratação de recursos de Tecnologia da Informação (TI) sob demanda, tal como fosse um serviço terceirizado. Essa computação utiliza a internet para oferecer serviços que, geralmente, necessitam de uma infraestrutura de equipamentos e programas. O referido autor apresenta os seguintes benefícios pertinentes aos serviços de nuvem:

- ⇒ custo: o provedor de serviços cuida de toda a tecnologia, evitando-se os altos investimentos em servidores e redes de dados, além de manter a tecnologia sempre atualizada;
- ⇒ flexibilidade: a empresa pode facilmente ampliar ou reduzir as capacidades contratadas para se adaptar a momentos de pico de demanda. Isso é frequente principalmente no lançamento de campanhas de *marketing*, em que o volume de acessos de usuários ao sistema de informação da empresa aumenta significativamente por um curto período de tempo;
- ⇒ segurança: o provedor de nuvem monitora o sistema em tempo integral, garante fontes de energia redundantes e oferece sistemas contra invasões de *hackers* e vírus;
- ⇒ recuperação de dados: periodicamente, os dados são submetidos a processos de backup e replicados em *data centers* instalados em diferentes localidades;
- ⇒ equipe mínima de TI: o fornecedor de nuvem se ocupa da manutenção do sistema, atividades como a atualização de versões de programas e substituição de equipamentos, além de oferecer ferramentas automatizadas para a instalação de sistemas operacionais, bancos de dados e programas aplicativos;
- ⇒ acessibilidade e mobilidade: a infraestrutura de nuvem permite o acesso remoto de usuários, bem como a autenticação unificada (*single sign-on*) e o uso de dispositivos móveis. O *single sign-on* possibilita, por exemplo, que os usuários utilizem uma única senha para acessar todos os sistemas de programas, estejam eles instalados na infraestrutura local ou em nuvem.

No tocante à temática externada, o *Google Drive* e o *Google Looker Studio* representam ferramentas que simplificam a arquitetura do BI. O primeiro permite a consolidação e a organização de dados, enquanto o segundo proporciona a análise de dados, ambos funcionando através de tecnologia de computação em nuvem. Portanto, nesse contexto, a arquitetura de uma plataforma de BI pode ser representada através de uma estrutura mais simplificada.

Os sistemas de BI visam transformar dados em informação e conhecimento, bem como criar um ambiente de suporte para a tomada de decisão efetiva, o pensamento estratégico e a atuação nas organizações (OLSZAK; ZIEMBA, 2007). Dessa forma, esses sistemas permitem disponibilizar aos usuários uma facilidade no acesso às informações solicitadas,

proporcionando a realização de análise e o compartilhamento das informações necessárias para o embasamento das tomadas de decisão. Baseado na pirâmide do conhecimento, a Figura D.3 apresenta esquematicamente a participação dos sistemas de BI na tomada de decisão.

Figura D.3 - O papel dos sistemas de BI na tomada de decisão.



Fonte: Adaptado de Olszak e Ziembra (2007).

D.4 BENEFÍCIOS E FERRAMENTAS DE BI

Turban *et al.* (2009) afirmam que o principal benefício do BI é a capacidade de fornecer informações precisas quando necessário, abrangendo uma visão em tempo real do desempenho corporativo geral e de suas partes individuais. Essas informações representam um pré-requisito para todos os tipos de decisão, para o planejamento estratégico e mesmo para a sobrevivência da organização.

Eckerson (2003) apresenta uma pesquisa realizada em 510 corporações em que foram levantados os benefícios do BI segundo a visão dos participantes. Os resultados pertinentes aos benefícios estão listados abaixo:

- ⇒ economia de tempo (61%);
- ⇒ versão única da verdade (59%);
- ⇒ melhores estratégias e planos (57%);
- ⇒ melhores decisões táticas (56%);
- ⇒ processos mais eficientes (55%);
- ⇒ economia de custos (37%).

Após realizar uma revisão da literatura, Santos (2014) identificou os benefícios mais relevantes do BI através de um critério de seleção em que foram considerados aqueles que tivessem uma frequência igual ou maior que 40%, selecionando os benefícios mais citados nas diferentes pesquisas. Em seguida, essas vantagens foram agrupadas e relacionadas às teorias e aos conceitos pertinentes ao BI. Esses procedimentos resultaram na representação gráfica do modelo conceitual para as dimensões dos benefícios esperados do BI e as questões da revisão da literatura que resultaram nessa associação, Figura D.4.

Figura D.4 - Representação gráfica referente aos benefícios esperados do BI.



Fonte: Adaptado de Santos (2014).

As ferramentas de BI estão cada vez mais acessíveis aos usuários que desejam extrair informações a partir de uma grande massa de dados. Segundo Barbieri (2011), a Gartner Inc., empresa mundialmente conhecida, publica um relatório chamado Quadrante Mágico Gartner. Essa empresa realiza levantamentos e pesquisas em diversas áreas de tecnologia e seus relatórios permitem acompanhar a avaliação das principais empresas do setor e seu posicionamento em suas respectivas áreas de atuação tais como BI, *Machine Learning*, *Big Data*, Inteligência Artificial, etc. O Quadrante Mágico Gartner é publicado anualmente.

O referido quadrante consiste em um gráfico que dispõe as empresas em um espaço bidimensional, posicionando-as segundo a sua visão e sua habilidade para executar aquela tecnologia, ou seja, esse documento apresenta um panorama das empresas que compõem o mercado tecnológico, apontando os líderes, os desafiantes, os visionários e os competidores de nicho (BARBIERI, 2011).

No quadrante dos líderes (*leaders*), estão as empresas que apresentam uma visão mercadológica mais abrangente, visando o sucesso do cliente e oferecendo maior credibilidade. Essas empresas são tecnologicamente mais avançadas. Os desafiantes (*challengers*) representam empresas que, apesar de terem capacidade de execução plena, ainda não se consolidaram efetivamente no mercado. Já os visionários (*visionaries*) são empresas mais fortes em pesquisa e desenvolvimento. No entanto, não possuem tecnologias suficientes para executar o que foi prometido. Por fim, os competidores de nicho (*niche players*) representam empresas que possuem ferramentas focadas em uma solução para um determinado nicho de mercado (GOMES, 2016; MARTINEZ, 2021; GARTNER, 2021).

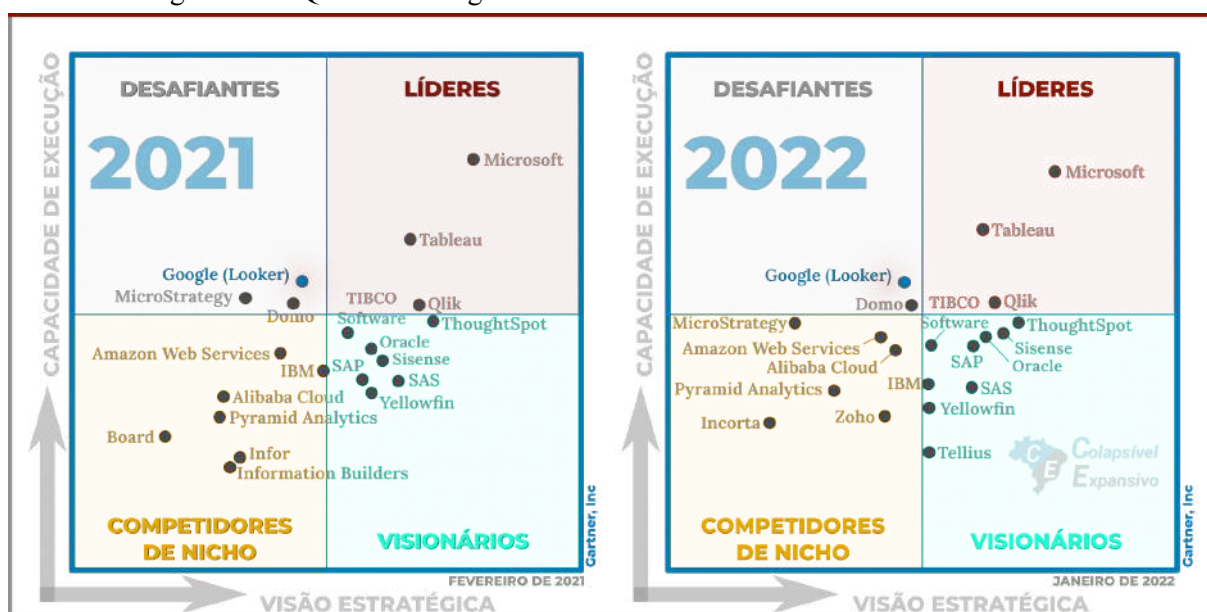
Segundo Martinez (2021), no Quadrante Mágico Gartner o eixo horizontal X corresponde à visão estratégica (*Completeness of Vision*). A definição da posição de uma empresa no eixo X é determinada através de oito critérios: entendimento do mercado, estratégia de vendas, estratégia de abordagem, estratégia de *marketing*, modelo de negócios, estratégia de indústria, inovação e estratégia geográfica. Significa que a empresa localizada mais à direita do gráfico será aquela com maior visão em relação ao mercado.

Já o eixo vertical Y corresponde à capacidade de execução (*Ability to Execute*). Nesse eixo, a posição da empresa é resultante da aplicação de sete critérios: produtos e serviços, vendas e precificação, viabilidade, responsividade ao mercado, execução de *marketing*, experiência do consumidor e operações. Dessa forma, a empresa localizada na parte superior do gráfico corresponde àquela com a melhor capacidade de executar tarefas (MARTINEZ, 2021).

A Figura D.5 apresenta o Quadrante Mágico de Gartner referente ao ano de 2021 e 2022. Nota-se que a *Microsoft* (ferramenta Power BI) representa a empresa líder no mercado, seguida pela *Tableau* e *Qlink*. Sendo assim, compreende-se que, perante os critérios utilizados na elaboração do Quadrante Mágico Gartner, a empresa com maior capacidade de execução e maior visão de mercado é a *Microsoft*.

Em relação à ferramenta utilizada neste trabalho, *Google Looker Studio*, constata-se o seu enquadramento na categoria desafiantes. Ao realizar uma análise dos anos de publicação do quadrante, observa-se uma movimentação em direção à categoria líderes, demonstrando uma evolução da ferramenta quanto à visão estratégica.

Figura D.5 - Quadrante Mágico de Gartner referente ao ano de 2021 e 2022.



Fonte: Autor (2024).

Portanto, compreende-se que o *Google Looker Studio* representa uma importante plataforma de análise e visualização de dados, estando entre as principais empresas do mercado no que tange ao *business intelligence*.

D.5 FORMATOS DE VISUALIZAÇÃO

A partir dos dados disponibilizados, inaugura-se a etapa pertinente à exibição do conteúdo para os usuários. Braghittoni (2017) frisa que uma plataforma de BI permite ao usuário a criação de suas próprias visões de dados e relatórios. Isso gera infinitas possibilidades de relatórios, tabelas dinâmicas e gráficos.

O referido autor ressalta que existem diversos formatos para a apresentação das informações de forma rápida, consistente e interativa. Dentre eles, os mais comuns, que atendem 90% das necessidades, são os seguintes: relatórios, indicadores chave de desempenho, painéis e tabelas dinâmicas.

O Quadro D.1 apresenta uma descrição sucinta das tipologias mais comuns para a visualização de dados em uma plataforma de BI, segundo Braghittoni (2017). Além disso, de modo a permitir o reconhecimento desses formatos, o referido quadro expõe para cada tipologia uma imagem meramente ilustrativa.

Quadro D.1 - Tipos de visualização no ambiente BI, adaptado de Braghittoni (2017).

Tipo	Descrição	Ilustração
Relatórios	Trata-se da representação mais conhecida. Essa visualização consiste em uma formatação predefinida de colunas que apresenta registros (linhas) de acordo com os filtros de uma seleção. Geralmente, esses relatórios apresentam centenas e até milhares de linhas. São usados para acessar informações mais detalhadas e, em geral, não se relacionam com informações de outras fontes.	 The screenshot shows a BI report interface with a 'METADADOS' (Metadata) tab selected. It displays various attributes of a dataset, including categories, language (Portuguese), and a description of the climate map of Brazil.
Indicador Chave de Desempenho	O Indicador Chave de Desempenho (ICD) é um conceito bastante difundido e muito útil. Esse formato parte do princípio de analisar uma informação sob a comparação de outra informação, ou seja, estabelece-se um objetivo e se compara o realizado a esse objetivo.	 The image shows three circular gauges, each representing a different KPI. Each gauge has a needle pointing to a value on a scale, with a color-coded background (yellow, orange, and red) indicating the performance level.
Painéis	Quando existem diversos ICDs em conjunto, ditando uma correlação significativa entre eles, tem-se o painel. Geralmente, os gráficos e tabelas trabalham conjuntamente com os ICDs para permitir um melhor entendimento dos fenômenos.	 The dashboard displays a variety of data visualizations, including a table of KPIs, two donut charts showing percentages, and a bar chart titled 'TIPO DE LITERATURA' (Type of Literature).
Tabelas Dinâmicas	Consistem em formas de visualização que permitem ao usuário criar suas próprias análises. Esse recurso possibilita que o usuário escolha quais fatos (métricas) e quais dimensões (textos) que serão exibidos e em que ordem.	 The image shows a dynamic table interface where users can interact with data. It displays a table with columns for categories and metrics, and a sidebar for selecting and organizing the data.

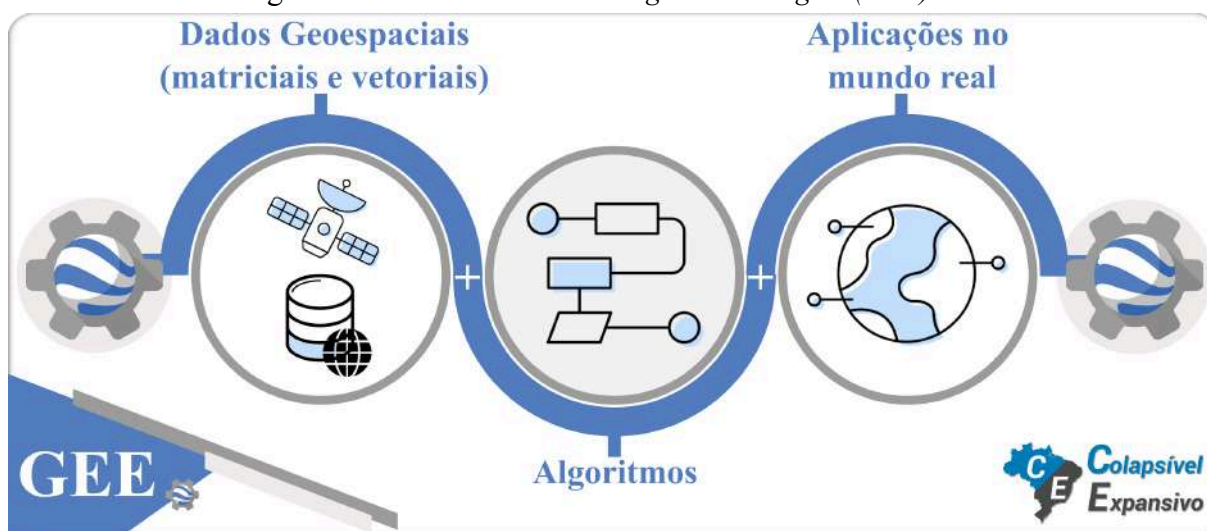
Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE E - *GOOGLE EARTH ENGINE (GEE)*

E.1 CONCEITO

O *Google Earth Engine (GEE)* é um serviço de processamento geoespacial que utiliza a infraestrutura de nuvem do *Google*. Representa uma plataforma de computação para análise científica e visualização de conjuntos de dados geoespaciais, disponibilizada para usuários acadêmicos, sem fins lucrativos, empresariais e governamentais (GOOGLE, 2022c), Figura E.1.

Figura E.1 - Conhecendo o *Google Earth Engine (GEE)*.



Fonte: Autor (2024).

O GEE hospeda imagens de satélite e as armazena em um arquivo de dados público que inclui imagens históricas da Terra com mais de 40 (quarenta) anos de captura. As imagens, inseridas diariamente, são então disponibilizadas para mineração de dados em escala global. Sendo assim, o GEE permite acesso a um conjunto de dados que alcança *petabytes* de dados geoespaciais disponíveis instantaneamente para análise, sendo atualizados e expandidos diariamente.

Somando-se a isso, também fornece Interface de Programação de Aplicação (*Application Programming Interface - API*) e outras ferramentas para permitir a análise de grandes conjuntos de dados (GOOGLE, 2022a). No tocante à API, trata-se de um conjunto de rotinas e padrões de programação para acesso a um aplicativo de programa ou plataforma

baseado na web. A API do GEE está disponível em *Python* e *Javascript*, facilitando o aproveitamento do potencial da nuvem do Google para sua própria análise geoespacial.

E.2 OBJETIVOS E CARACTERÍSTICAS

O GEE foi lançado em novembro de 2010 durante a Conferência Internacional de Mudanças Climáticas, realizada em Cancún, no México. Trata-se de uma ferramenta gratuita que permite ao usuário visualizar, editar e analisar eficientemente dados de diversas fontes (OLIVEIRA, L. P.; SANTOS, 2021). Dentre os objetivos do GEE, podem ser elencados os seguintes:

- fornecer uma plataforma interativa para o desenvolvimento de algoritmos geoespaciais em escala planetária;
- habilitar a ciência de alto impacto, orientada por dados;
- fazer progressos substanciais em desafios globais que envolvem grandes conjuntos de dados geoespaciais.

Em comparação com as técnicas de SIG convencionais, o GEE possui alta capacidade de processamento, tendo em vista que a sua velocidade é significativamente maior devido ao uso do servidor do *Google*, ou seja, diferentemente do processamento de imagem tradicional, que ocorre na máquina do usuário por meio de uso de programa SIG ou outro programa de *desktop* usados para análise de dados geoespaciais, os algoritmos do GEE são executados na nuvem do *Google*, distribuídos entre muitos computadores. Significa que todo o processamento pode acontecer de forma *online*, evitando-se o uso de recursos dos computadores dos usuários como ocorre na ferramenta de SIG tradicional.

O alto desempenho do GEE ocorre devido ao uso de um sistema de processamento paralelo para realizar o cálculo em inúmeras máquinas. Para habilitar esse processamento, o GEE recorre às técnicas padrão comumente usadas por linguagens funcionais, como transparência referencial e avaliação lenta, para ganhos significativos de otimização e eficiência (GORELICK *et al.*, 2017).

Os referidos autores afirmam que, após a disponibilidade gratuita da série Landsat em 2008, o *Google* arquivou todos os conjuntos de dados e os vinculou ao mecanismo de computação em nuvem, para uso em código aberto. O arquivo atual de dados inclui os dados

de outros satélites, bem como conjuntos de dados vetoriais baseados em SIG, modelos sociais, demográficos, climáticos, de elevação digital e camadas de dados climáticos.

Kumar e Mutanga (2019) afirmam que a interface gráfica do usuário (*front-end*) possui fácil acesso e fornece um ambiente adequado para o desenvolvimento interativo entre dados e algoritmos. Tal conjuntura permite aos usuários adicionar e selecionar seus próprios dados e coleções, enquanto usam os recursos de nuvem do *Google* para realizar todo o processamento. Cientistas, pesquisadores independentes e entusiastas exploram esse enorme banco de dados para detecção de mudanças, mapeamento de tendências e quantificação de recursos na superfície da Terra.

No banco de dados do GEE, são disponibilizadas imagens dos satélites Landsat, MODIS, Sentinel 1 e 2. No tocante ao meio físico, é possível o acesso aos dados de elevação digital, cobertura do terreno, temperatura de superfície, etc. Em relação à previsão de tempo e aos modelos climáticos, existem mais de 300 conjuntos prontos para análises. Nota-se que o catálogo de dados inclui uma variedade de conjuntos de dados referentes às ciências da Terra. O GEE também permite que o usuário carregue seus próprios dados na plataforma (matriciais ou vetoriais).

Perante as características expostas do GEE, é possível afirmar que a ferramenta disponibiliza aos usuários os seguintes recursos: conjunto de dados, infraestrutura de computação, APIs e Apps (Figura E.2).

Figura E.2 - Recursos disponibilizados pelo *Google Earth Engine*.



Fonte: Autor (2024).

E.3 APLICATIVOS (APPS)

Os aplicativos do GEE são interfaces de usuário dinâmicas e compartilháveis. Através desses aplicativos, os especialistas podem usar elementos de interface simples para aproveitar o catálogo de dados e o poder analítico do GEE, tanto para especialistas, quanto para não especialistas. Os aplicativos publicados no GEE podem ser acessados a partir do URL específico, gerado no momento da publicação. Nenhuma conta do GEE é necessária para visualizar ou interagir com um aplicativo publicado (GOOGLE, 2022b).

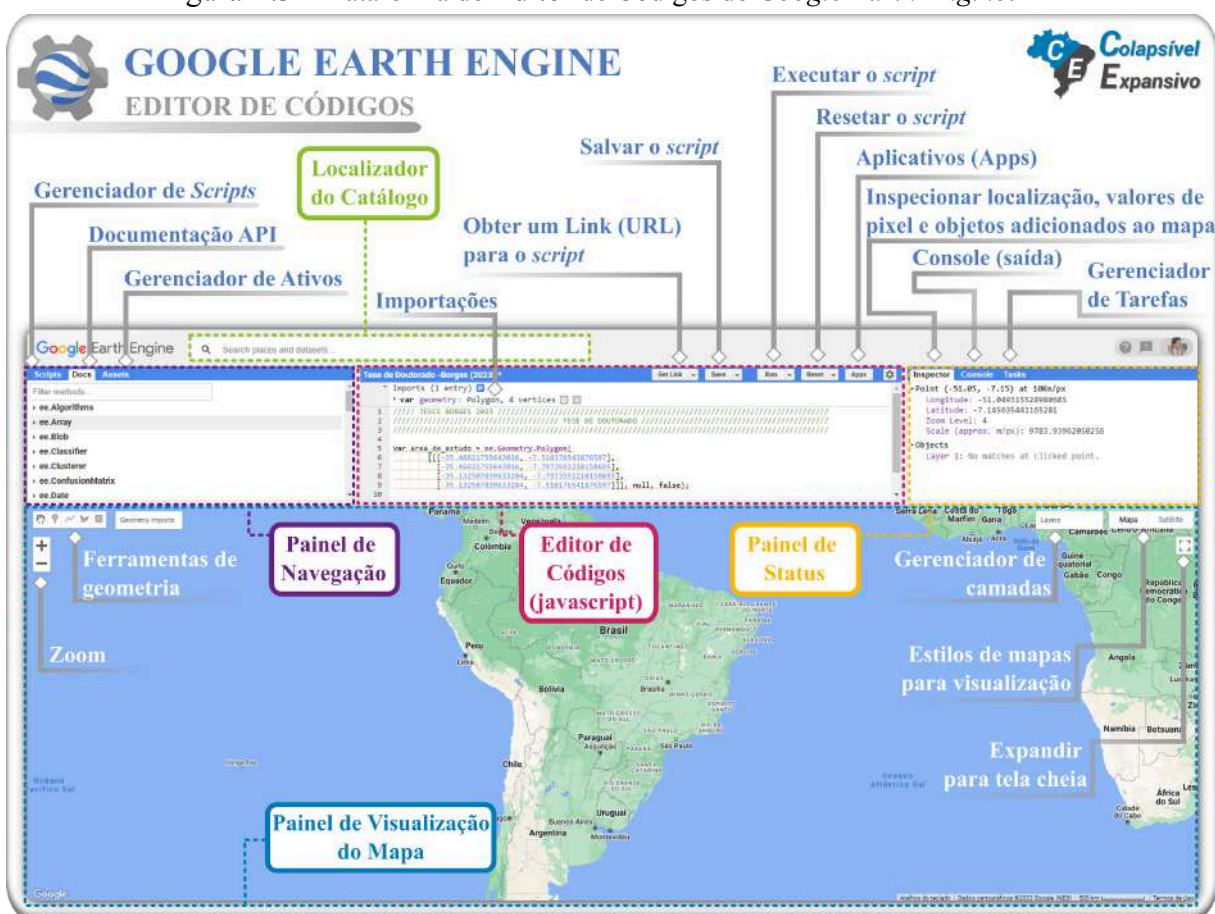
Cabe esclarecer que, quanto ao aplicativo publicado, o GEE permite definir o tipo de acesso, podendo ser restrito ou público. No primeiro caso, os usuários precisarão fazer login em uma conta que seja membro de um Grupo do *Google*. No segundo caso, esses podem ser visualizados por qualquer pessoa, sem a necessidade de fazer login (GOOGLE, 2022b).

O GEE também disponibiliza aos desenvolvedores uma API referente à interface do usuário, elucidando os procedimentos para obter os recursos de interface gráfica, tais como botões, caixas de seleção, controles deslizantes, caixas de texto, menus de seleção, gráficos, manipuladores de eventos, dentre outros.

E.4 PLATAFORMA

Dentre as maneiras de interagir com a plataforma, podem ser elencadas 3 (três): Editor de Códigos, Explorador e Documentação. O primeiro é um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (*Integrated Development Environment* - IDE) baseado na web para escrever e executar os códigos (*scripts*). O segundo consiste em um aplicativo web para explorar o catálogo de dados e executar análises simples. Por fim, o terceiro fornece funções de *Python* e *JavaScript* para auxiliar os usuários no desenvolvimento de seus protótipos. O Editor de Códigos apresenta os elementos expostos na Figura E.3.

O acesso ao Editor de Códigos ocorre após fazer login com uma conta do *Google* e permite que os usuários criem códigos de programação para analisar dados geoespaciais, visualizando os resultados em tempo real. Salienta-se que essa conta terá que ser ativada pelo GEE. A linguagem de programação utilizada no GEE é o *JavaScript*. Os recursos do Editor de Códigos são projetados para tornar a codificação mais fácil e o desenvolvimento de fluxos de trabalho mais rápido. A plataforma permite que os usuários criem aplicativos e análises personalizadas para atender às suas necessidades específicas.

Figura E.3 - Plataforma do Editor de Códigos do *Google Earth Engine*.

Fonte: Autor (2024).

O Editor de Códigos do GEE apresenta uma série de recursos e ferramentas úteis para ajudar os usuários a desenvolver e depurar o roteiro de programação, incluindo:

- editor de código integrado com destaque de sintaxe e recurso de autocompletar, auxiliando o usuário durante o uso da linguagem *JavaScript*;
- console de depuração para encontrar e corrigir erros nos roteiros de programação (*scripts*);
- acesso à documentação da *Earth Engine* API e exemplos de código para entender como usar as diferentes funções e métodos disponíveis na API;
- ferramentas de visualização para observar e explorar os resultados de análises de dados geoespaciais, incluindo mapas interativos e gráficos.

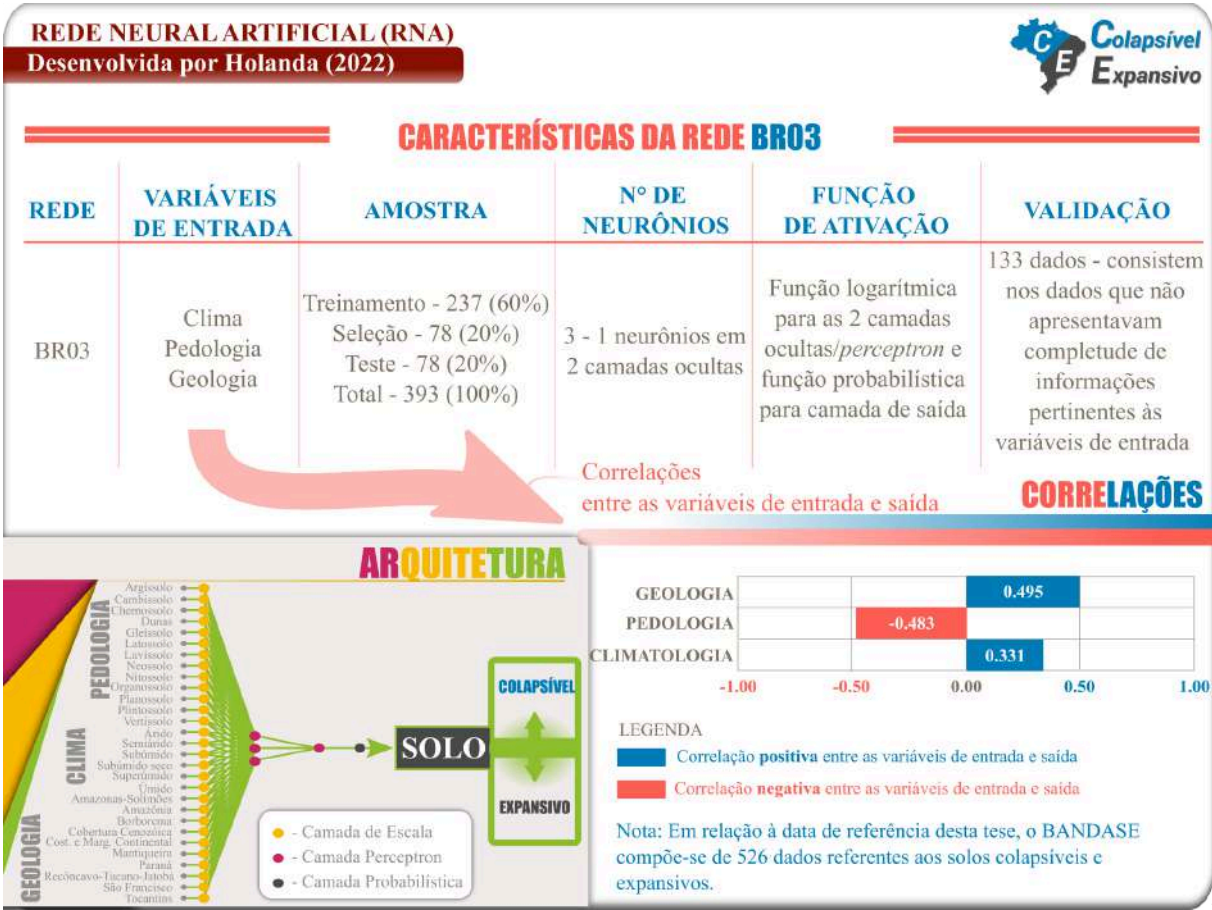
Perante o exposto, o Editor de Código do GEE pode ser definido como uma plataforma de desenvolvimento de código integrado utilizado para escrever, executar e depurar códigos de programação elaborados com base na linguagem de programação

Javascript e na biblioteca de código aberto (*Earth Engine API*), visando analisar dados geoespaciais.

APÊNDICE F - INFORMAÇÕES SOBRE RNA - REDE BR03

A rede BR03, desenvolvida por Holanda (2022), foi baseada em 3 (três) variáveis de entrada do tipo categóricas referentes aos atributos de clima, pedologia e geologia. A Figura F.1 apresenta esquematicamente as características da rede de RNA utilizada na elaboração dos produtos cartográficos, expondo as informações sobre nomenclatura, variáveis de entrada, amostra, número de neurônios, função de ativação, validação, arquitetura e correlações entre as variáveis de entrada e saída.

Figura F.1 - Características da rede BR03 desenvolvida por Holanda (2022).



Fonte: Autor (2024).

A matriz de confusão e a Curva ROC (*Receiver Operating Characteristics*, que significa Característica de Operação do Receptor) foram recursos utilizados para avaliar o modelo de classificação. Em virtude disso, cabe apresentar uma elucidação breve sobre a temática, visto que tais recursos também são utilizados para avaliar as classificações das cartas de suscetibilidade.

Silva *et. al* (2016) ressaltam que as ferramentas citadas são especialmente úteis para avaliação de classificadores binários. Nesses classificadores, as duas classes presentes no problema devem ser definidas como classe positiva e classe negativa. Cada uma das células da matriz de confusão possui um significado que pode indicar problemas maiores ou menores nos resultados do classificador, a depender do contexto de aplicação no qual o classificador foi aplicado. No problema binário, os significados das células da matriz de confusão são:

- Verdadeiro Positivo (VP): classificação correta na classe positiva, o exemplar pertence à classe positiva, e o classificador o classificou como pertencente à classe positiva;
- Falso Positivo (FP): classificação incorreta na classe positiva, o exemplar pertence à classe negativa, mas o classificador o classificou como pertencente à classe positiva;
- Verdadeiro Negativo (VN): classificação correta na classe negativa, o exemplar pertence à classe negativa, e o classificador o classificou como pertencente à classe negativa;
- Falso Negativo (FN): classificação incorreta na classe negativa, o exemplar pertence à classe positiva, mas o classificador o classificou como pertencente à classe negativa.

Em relação às métricas de avaliação derivadas da matriz, os referidos autores elencam as seguintes:

- Sensibilidade ou revocação (do inglês, *recall*) ou Taxa de Verdadeiros Positivos (TVP): porcentagem de verdadeiros positivos dentre todos os exemplos cuja classe esperada é a classe positiva ($VP/(VP + FN)$);
- Especificidade ou Taxa de Verdadeiros Negativos (TVN): proporção de rejeições corretas, ou seja, porcentagem de verdadeiros negativos dentre todos os exemplos cuja classe esperada é a classe negativa ($VN/(FP + VN)$);
- Taxa de Falsos Positivos (TFP): porcentagem de falsos positivos dentre todos os exemplos cuja classe esperada é a classe negativa ($FP/(VN + FP)$);
- Taxa de Falsas Descobertas (TFD): porcentagem de falsos positivos dentre os exemplos classificados como positivos ($FP/(VP + FP)$);

- Preditividade positiva ou precisão (do inglês, *precision*): porcentagem de acertos ou verdadeiros positivos dentre todos os exemplos classificados como positivos ($VP/(VP + FP)$);
- Preditividade negativa: porcentagem de rejeições ou de verdadeiros negativos dentre todos os exemplos classificados como negativos ($VN/(VN + FN)$);
- F-score: faz uma relação entre a precisão e a revocação: $2/((1/revocação) + (1/precisão))$.

Outra medida que merece destaque é a acurácia (*accuracy* ou ACC) ou taxa de classificações corretas. Consiste na razão entre a quantidade de acertos e o total de entradas. A Figura F.2 apresenta as métricas expostas, bem como expõe a estrutura típica de uma matriz de confusão para o caso de um problema de classificação binária.

Figura F.2 - Exemplo de Matriz de Confusão para o caso de um problema de classificação binária.



Fonte: Autor (2024).

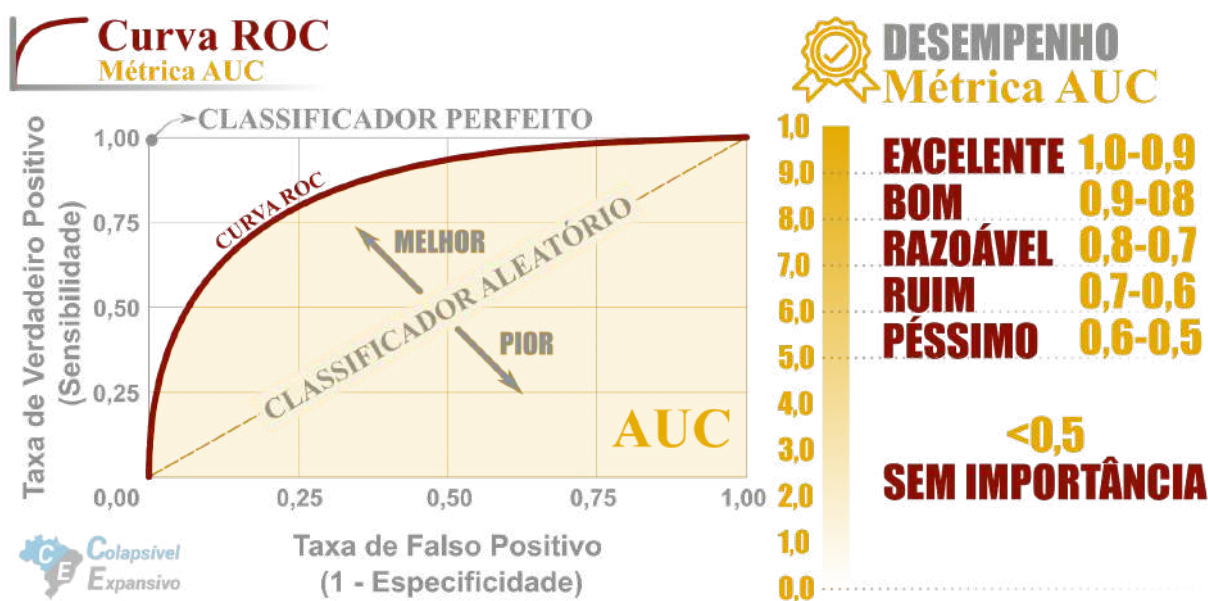
No tocante à Curva ROC, trata-se de uma curva de probabilidade plotada em um gráfico bidimensional. No eixo y, consta a Taxa de Verdadeiros Positivos (TVP, sensibilidade). Já no eixo x, é apresentada a Taxa de Falsos Positivos (TFP, 1 - especificidade). A representação gráfica permite comparar diferentes classificadores e definir qual o melhor com base em diferentes pontos de corte.

O classificador aleatório é representado por uma linha diagonal de 45 graus. Os classificadores que se aproximam mais dessa linha são considerados menos eficientes. Por

outro lado, os classificadores mais eficientes tendem a ter uma curva ROC mais próxima do canto superior esquerdo do gráfico, significando uma TVP mais alta e uma TFP mais baixa. O classificador perfeito, que atinge 100% de verdadeiros positivos e 0% de falsos positivos, fica situado na extremidade superior esquerda do gráfico.

A análise de uma Curva ROC pode ser avaliada pela métrica AUC (*Area Under the Curve* ou “área sob a curva”), que consiste na medida de área da forma bidimensional formada abaixo da curva. Essa métrica indica a probabilidade de duas previsões serem corretamente ranqueadas. Metz (1978) interpreta os valores de AUC da seguinte maneira: excelente ($>0,9$), bom ($0,8-0,9$), razoável ($0,7-0,8$), ruim ($0,6-0,7$), péssimo ($0,6-0,5$) e sem importância ($<0,5$). As particularidades da Curva ROC e as gradações da métrica AUC estão ilustradas na Figura F.3.

Figura F.3 - Característica da Curva ROC e análise de desempenho com base na métrica AUC.



Fonte: Autor (2024).

Explanadas as ferramentas de avaliação de modelo para classificação binária, são expostos os resultados obtidos pela rede de Holanda (2022), utilizada na elaboração dos produtos cartográficos desta tese.

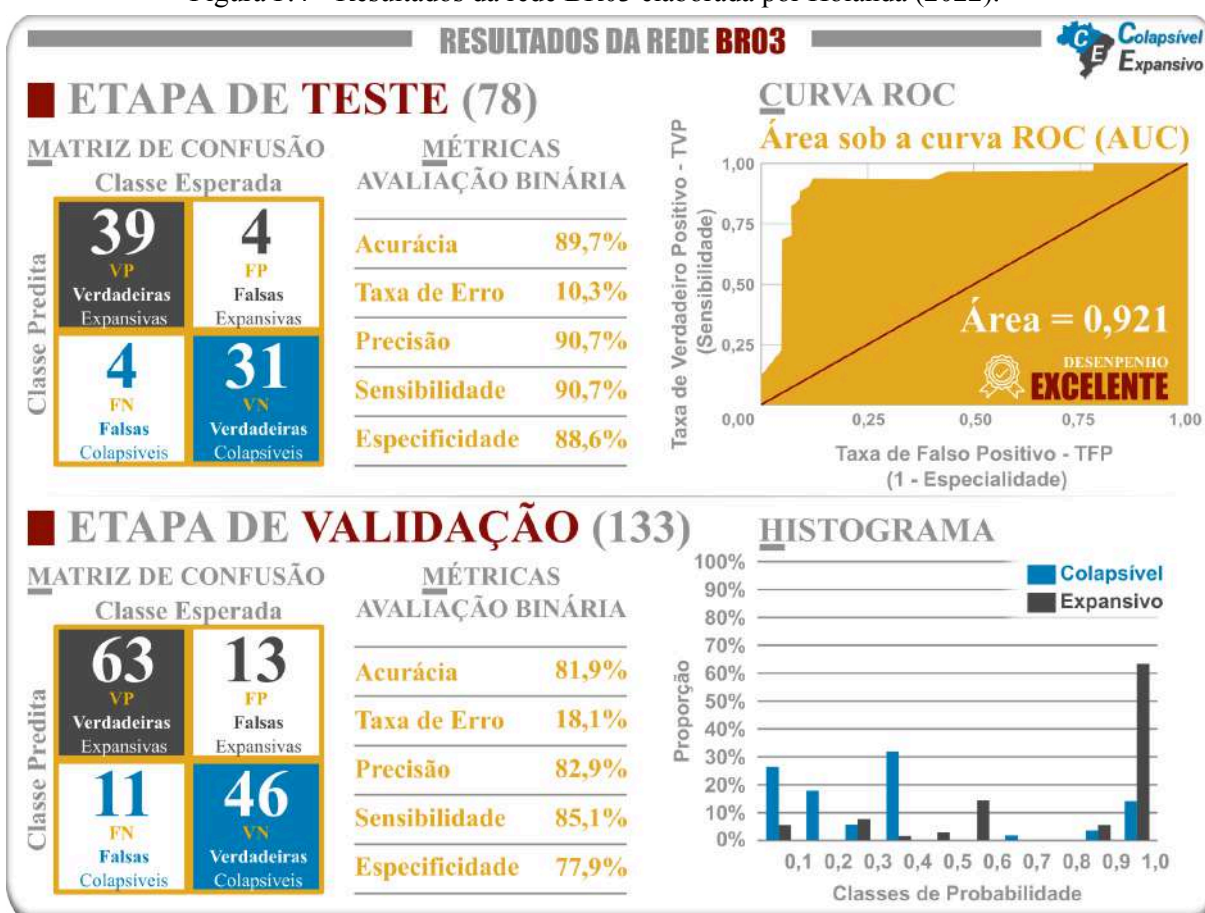
No que concerne aos instrumentos de mensuração do modelo, os valores de acurácia, que medem a capacidade de medir aquilo que se propõe a medir, atingiram 89,7% e 81,9% referentes às etapas de teste e validação, respectivamente. Consequentemente, as taxas de erros, que correspondem ao inverso da acurácia, resultaram em 10,3% e 18,1%. Em relação à

confiabilidade, os percentuais de precisão, que medem capacidade de fornecer os mesmos resultados quando repetidos (reprodutibilidade), alcançaram 90,7% e 82,9%.

No tocante aos instrumentos de validação do modelo, os valores de sensibilidade, que medem a capacidade do modelo de detectar casos verdadeiros positivos, apontaram 90,7% e 85,1%. Quanto aos valores de especificidade, que medem a capacidade do modelo de evitar falso negativos, esses alcançaram os percentuais de 88,6% e 77,9%.

Em relação à métrica de avaliação do modelo, o valor de AUC resultou em 0,921. Baseado na gradação de Metz (1978), tal quantitativo enquadra o desempenho do modelo no nível de excelência. Os resultados narrados estão esquematicamente externados na Figura F.4.

Figura F.4 - Resultados da rede BR03 elaborada por Holanda (2022).



Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE G - SOLUÇÕES APLICADAS AOS SOLOS COLAPSÍVEIS

G.1 EXIGÊNCIA NORMATIVA

A norma em vigor referente ao projeto e execução de fundações, a NBR 6122/2019, descreve os solos colapsíveis como sendo “solos que apresentam brusca redução de volume quando submetidos a acréscimos de umidade, sob a ação de carga externa” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019, p. 8). No tocante à fundação rasa (direta ou superficial), a referida normativa enquadra os solos colapsíveis entre os casos particulares, apresentando a seguinte determinação, *ipsis litteris*:

7.5.3 Solos colapsíveis

Deve ser considerada a possibilidade de ocorrer o encharcamento (devido a, por exemplo, vazamentos de tubulações de água, elevação do lençol freático etc.). Essas características **devem ser consideradas no projeto e no método construtivo** (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019, p. 23, grifo nosso).

Somando-se a isso, frisa-se que, no que diz respeito às investigações complementares de laboratório, o ensaio de colapsibilidade consta na relação dos ensaios mais usuais, conforme pode ser extraído do conteúdo normativo, *ipsis litteris*:

4.6 Investigações complementares de laboratório

Estes ensaios visam classificar os solos, determinar parâmetros de resistência, de deformabilidade e de permeabilidade. [...] **Os ensaios mais usuais são:** [...]

4.6.6 Ensaio de colapsibilidade

É indicado no caso de solos não saturados que possam apresentar colapso com o aumento de umidade. O ensaio mais simples é feito no mesmo equipamento utilizado no ensaio de adensamento, medindo-se a deformação vertical sofrida pela amostra, sob determinada tensão, ao ser inundada. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019, p. 13, grifo nosso).

Ressalta-se ainda que, segundo os subitens 7.2 e 8.2 da NBR 6122/2019, o comportamento colapsível representa um fator a ser considerado para a determinação da tensão admissível ou tensão resistente de cálculo tanto para fundações rasas, quanto para fundações profundas:

7 Fundação rasa (direta ou superficial)

[...] 7.2 Fatores a serem considerados para a determinação da tensão admissível ou da tensão resistente de cálculo

Devem ser considerados os seguintes fatores nessa determinação:

- características geomecânicas do subsolo;
- profundidade da fundação; [...]
- **eventual alteração das características do solo (expansivos, colapsíveis etc.) devido a agentes externos (encharcamento, contaminação, agressividade etc.);**

- alívio de tensões;
- características ou peculiaridades da obra; [...]

8 Fundações profundas

[...] 8.2 Fatores a serem considerados para a determinação da carga admissível ou da força resistente de cálculo

Devem ser considerados os seguintes fatores nessa determinação:

- características geomecânicas do subsolo;
- profundidade da ponta ou base da fundação; [...]
- **eventual alteração das características dos solos (expansivos, colapsíveis etc.) devido a agentes externos (encharcamento, contaminação, agressividade etc.);**
- alívio de tensões;
- eventual ocorrência de solicitações adicionais como atrito negativo e esforços horizontais devidos a carregamentos assimétricos; [...] (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019, p. 21–26, grifo nosso).

Perante tal conjuntura, nota-se que as particularidades envolvendo os solos colapsíveis representam uma exigência prevista expressamente na norma supracitada, devendo ser consideradas no projeto e no método construtivo das obras de engenharia. Ferreira (1995) reforça que a identificação de solos colapsíveis representa um estágio essencial no sucesso de projetos de engenharia.

No que concerne ao projeto de uma fundação em solos colapsíveis, Souza (2008) assevera que, conforme a experiência, tal projeto deve atender aos seguintes requisitos: escolha adequada do tipo de fundação, capacidade de carga do solo, tratamento do solo de fundação e precauções construtivas. Conciani (2006) ressalta que para fundações assentadas sobre solos colapsíveis deve-se buscar uma redução nos valores de tensões transmitidas, bem como explorar zonas de baixa variação de umidade.

Apresentadas as exigências normativas e as considerações pertinentes, são apresentadas as principais soluções técnicas utilizadas para evitar ou minimizar os efeitos dos solos colapsíveis na obra. Os métodos expostos são oriundos dos trabalhos de Mendonça (1990), Cintra (1998), Amorim (2004), Conciani (2006), Souza (2008), Ferreira (2010) e Mendonça Neto (2011), sendo apresentados resumidamente.

G.2 SOLUÇÕES TÉCNICAS

De acordo com Ferreira (2010), as soluções de engenharia envolvem 2 (dois) princípios básicos. O primeiro tem como finalidade garantir ao solo uma estrutura estável no estado de tensão original, bem como naquele a que será submetido. O segundo visa impedir ou minimizar significativamente a variação de umidade do solo. Salienta-se que cada solução está condicionada ao tipo de obra, às características do solo, ao custo e ao tempo de execução.

Ao realizar uma análise sobre as possíveis soluções, Mendonça (1990) apresenta uma consolidação de técnicas apresentadas por diversos autores, sendo o produto deste trabalho denominado pelo referido autor como sendo um guia básico bibliográfico. A descrição destas soluções, que foram sendo aperfeiçoadas por Amorim (2004), Ferreira (2010) e Mendonça Neto (2011), são divididas em 3 (três) grupos, sendo elas:

- I. soluções antes da construção, evitando o solo colapsível ou preparando a estrutura para conviver com o mesmo:
 - substituição por material adequado;
 - utilização de fundações profundas;
 - uso de sistema de fundação corrida de maior rigidez.
- II. soluções anteriores à construção, modificando as propriedades dos solos colapsíveis:
 - umedecimento prévio;
 - compactação;
 - reestruturação do solo colapsível.
- III. soluções posteriores à construção:
 - construção de calçadas;
 - projetos de drenagem adequados;
 - controle de vazamento de tubulações.

Essas soluções são expostas a seguir obedecendo à ordenação definida pelos autores mencionados. Posteriormente, mesmo que seja possível o enquadramento nos grupos elencados em tela, outras soluções são exteriorizadas em tópicos subsequentes.

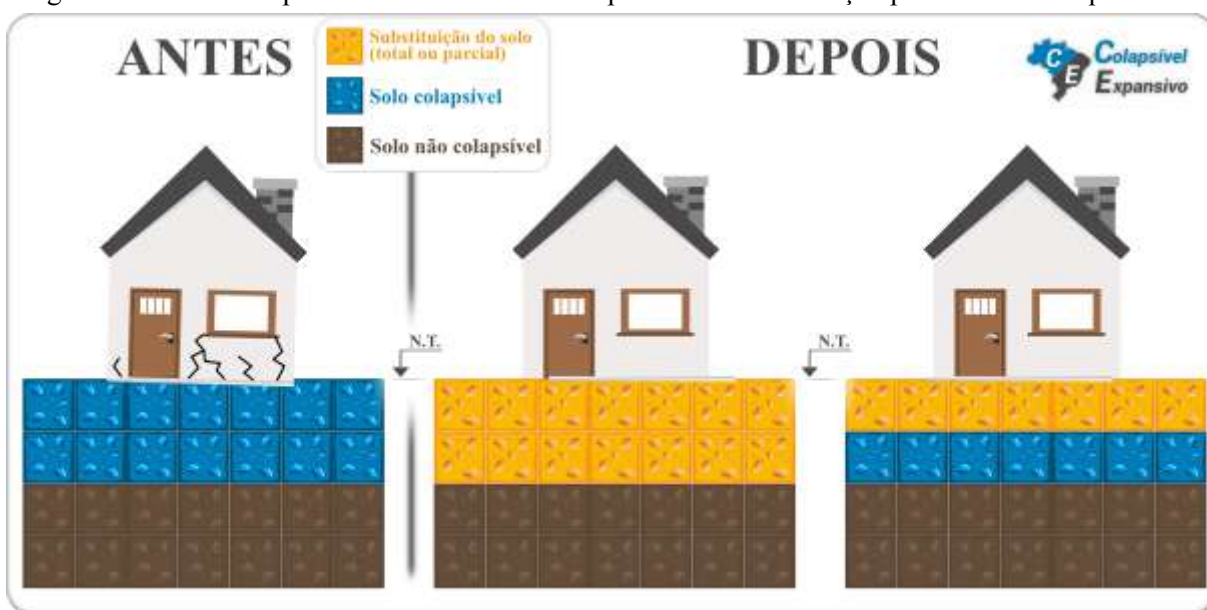
G.2.1 SOLUÇÕES ANTERIORES À CONSTRUÇÃO SEM MODIFICAÇÃO DO SOLO

Trata-se de medidas que antecedem à construção buscando evitar o contato com o solo colapsível ou preparar a estrutura para conviver com o mesmo. Nesse grupo, podem ser destacadas as seguintes soluções:

G.2.1.1 Substituição por material adequado

Consiste na retirada parcial ou total do solo colapsível, sendo ele substituído por um material adequado. A especificação da espessura do solo a ser substituído se dá a partir da distribuição de tensões no terreno e da previsão da variação da profundidade até onde ocorre variação da umidade do solo (MENDONÇA, 1990; AMORIM, 2004; FERREIRA, S. R. M., 2010; MENDONÇA NETO, 2011), Figura G.1.

Figura G.1 - Retirada parcial ou total do solo colapsível com substituição por material adequado.



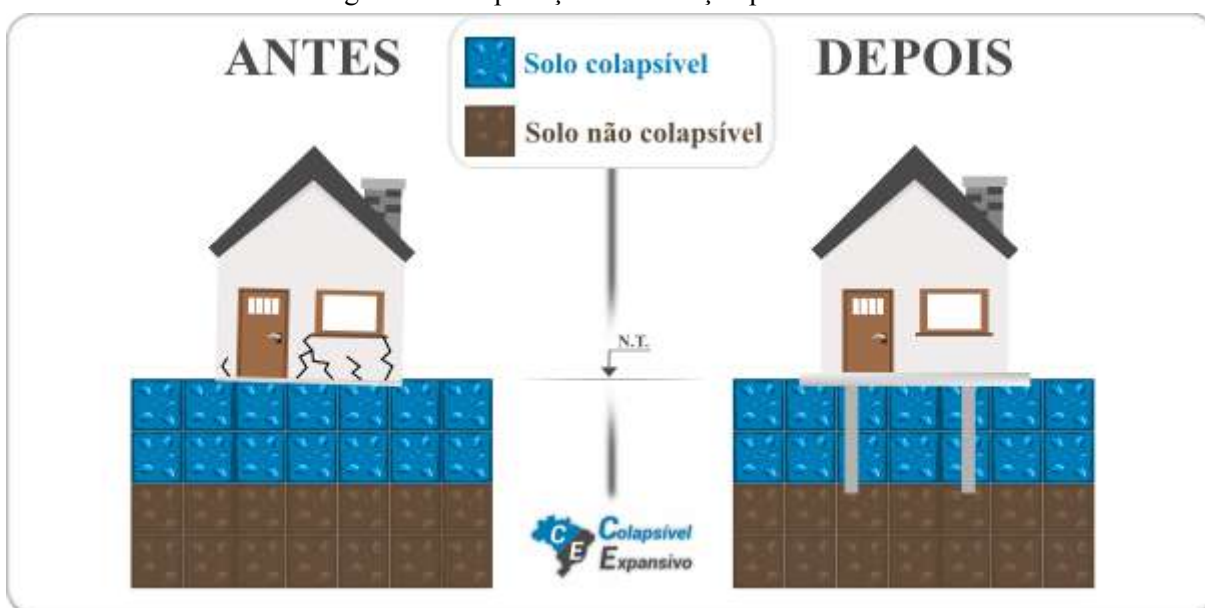
Fonte: Autor (2024).

G.2.1.2 Utilização de fundações profundas

Consiste na aplicação de fundações profundas apoiadas sob o extrato colapsível, considerado o efeito do atrito negativo que pode ser provocado pelo colapso da camada superior (MENDONÇA, 1990; AMORIM, 2004; FERREIRA, S. R. M., 2010; MENDONÇA NETO, 2011), Figura G.2.

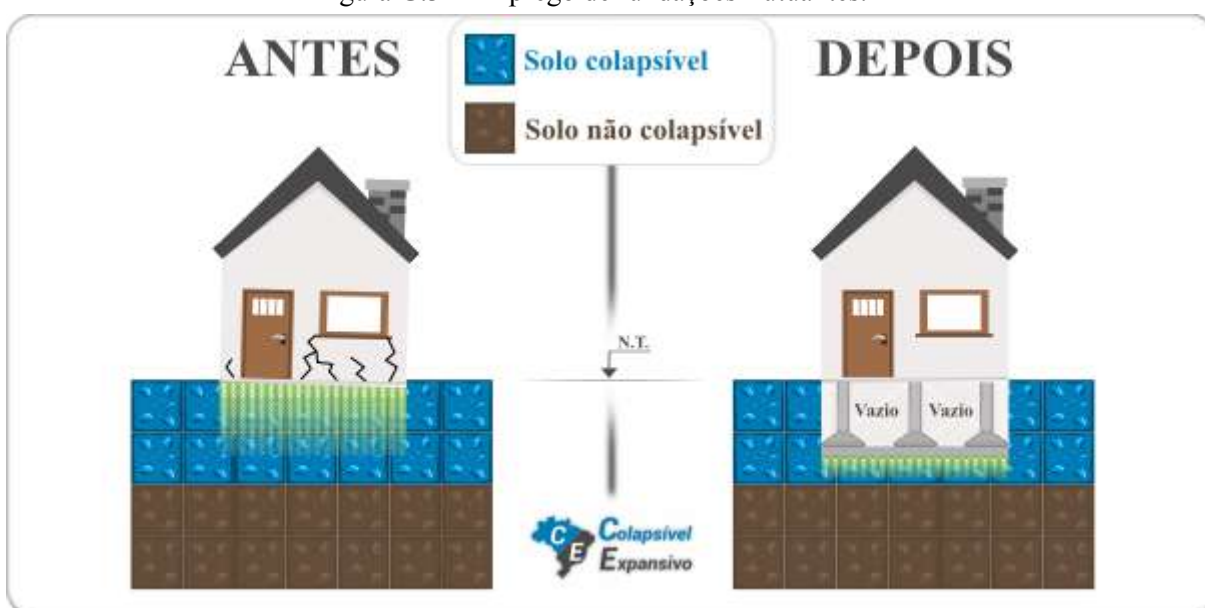
O emprego de fundações flutuantes consiste em outra solução técnica utilizada para minimizar os efeitos do comportamento colapsível. A Figura G.3 apresenta esquematicamente o uso dessa fundação sob o solo problemático.

Figura G.2 - Aplicação de fundação profunda.



Fonte: Autor (2024).

Figura G.3 - Emprego de fundações flutuantes.

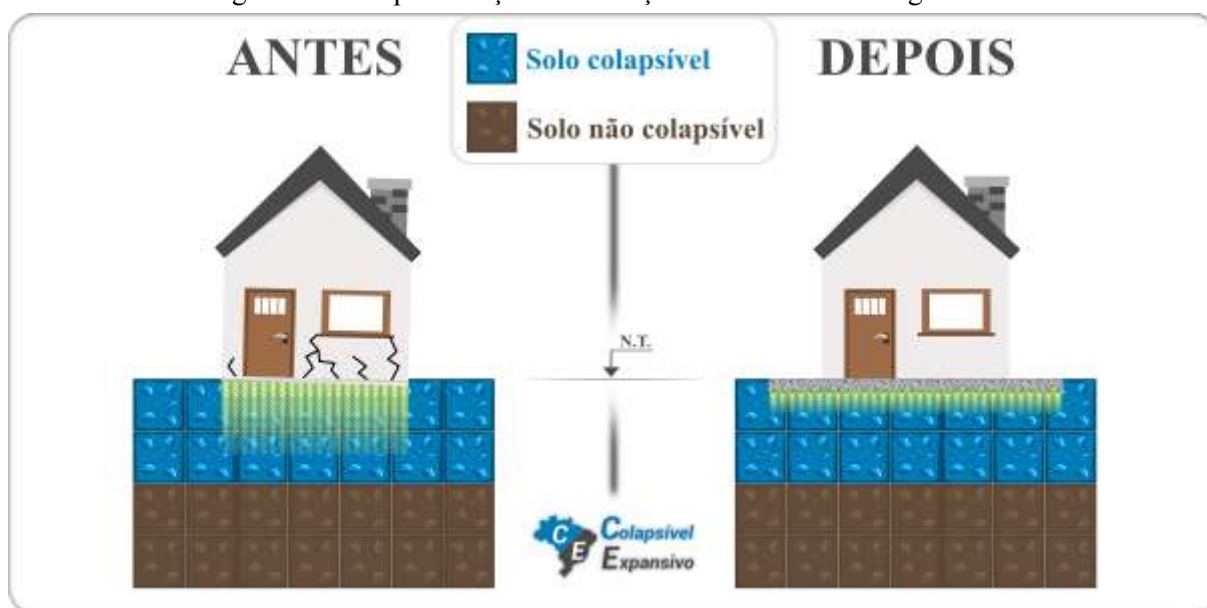


Fonte: Autor (2024).

G.2.1.3 Uso de sistema de fundação corrida de maior rigidez

A aplicação de sistema de fundação corrida tem a finalidade de minimizar os efeitos dos recalques diferenciais, os quais podem ser significativos em relação às edificações apoiadas sobre solos colapsíveis (MENDONÇA, 1990; AMORIM, 2004; FERREIRA, S. R. M., 2010; MENDONÇA NETO, 2011), Figura G.4.

Figura G.4 - Representação de fundação corrida de maior rigidez.



Fonte: Autor (2024).

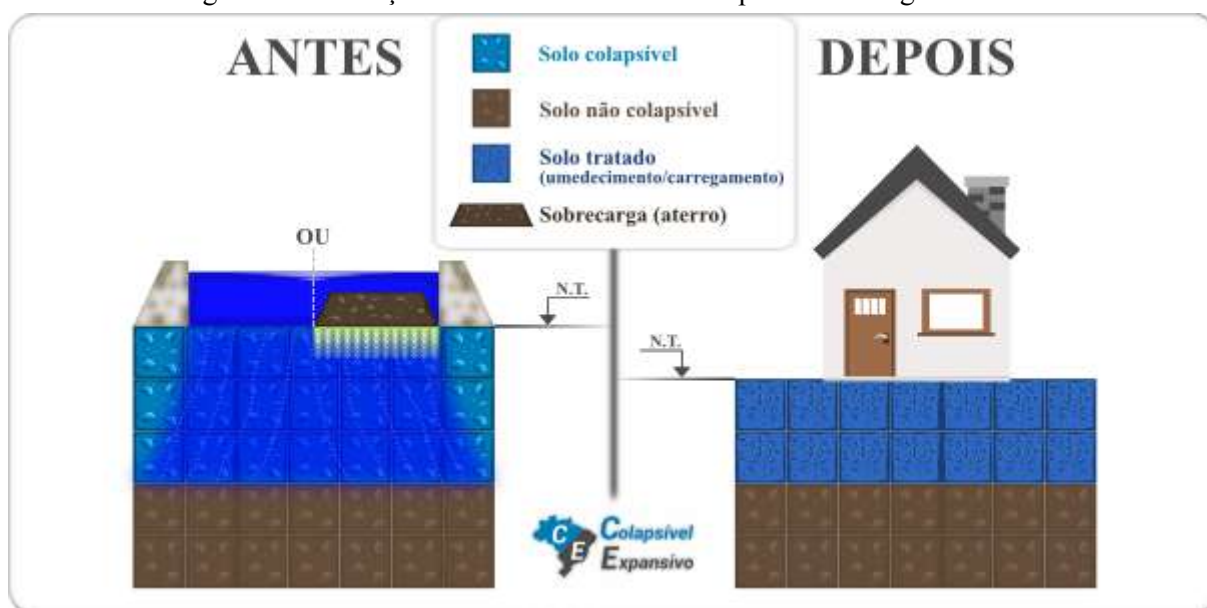
G.2.2 SOLUÇÕES ANTERIORES À CONSTRUÇÃO COM MODIFICAÇÃO DO SOLO

Essas soluções, além de anteriores à construção, são técnicas que modificam as propriedades dos solos colapsíveis. As principais soluções deste grupo são apresentadas a seguir.

G.2.2.1 Umedecimento prévio

Através do umedecimento prévio, é possível promover o colapso forçado da estrutura. Caso tal procedimento não seja suficiente para obter o colapso, aplica-se uma sobrecarga com a finalidade de acelerar ou aumentar o efeito da técnica em foco (MENDONÇA, 1990; AMORIM, 2004; FERREIRA, S. R. M., 2010; MENDONÇA NETO, 2011), Figura G.5.

Figura G.5 - Solução através de umedecimento prévio e carregamento.



Fonte: Autor (2024).

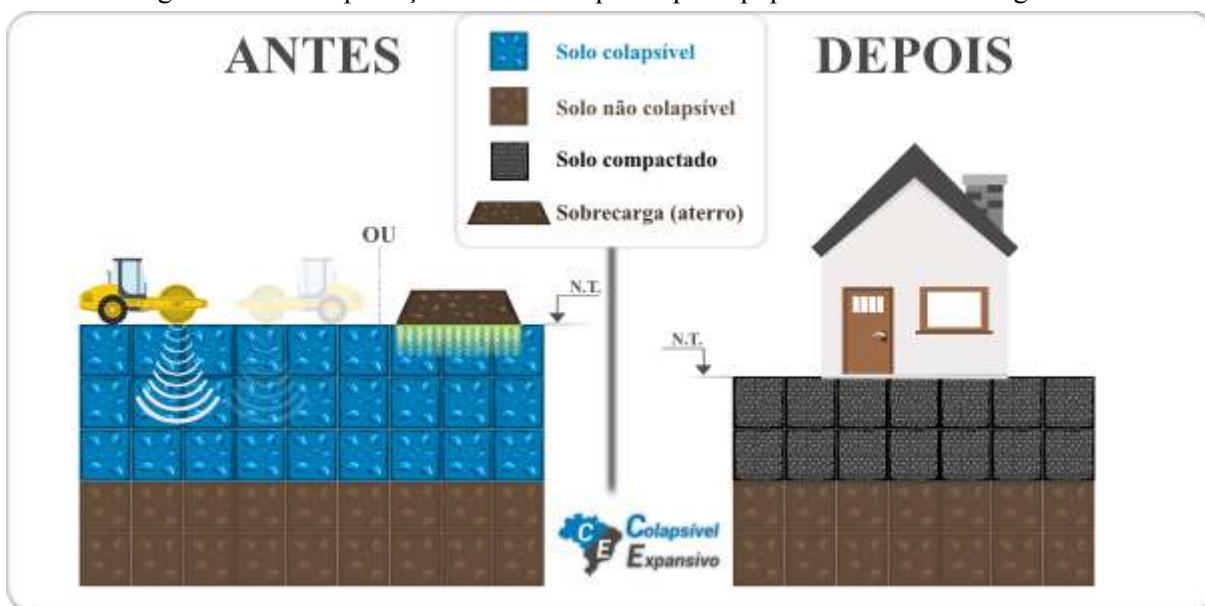
G.2.2.2 Compactação

Consiste em realizar a compactação total ou parcial do solo colapsível, buscando alcançar os seguintes objetivos: reduzir a permeabilidade, aumentar a capacidade suporte e destruir a estrutura metaestável (MENDONÇA, 1990; AMORIM, 2004; FERREIRA, S. R. M., 2010; MENDONÇA NETO, 2011), Figura G.6.

G.2.2.3 Reestruturação do solo colapsível

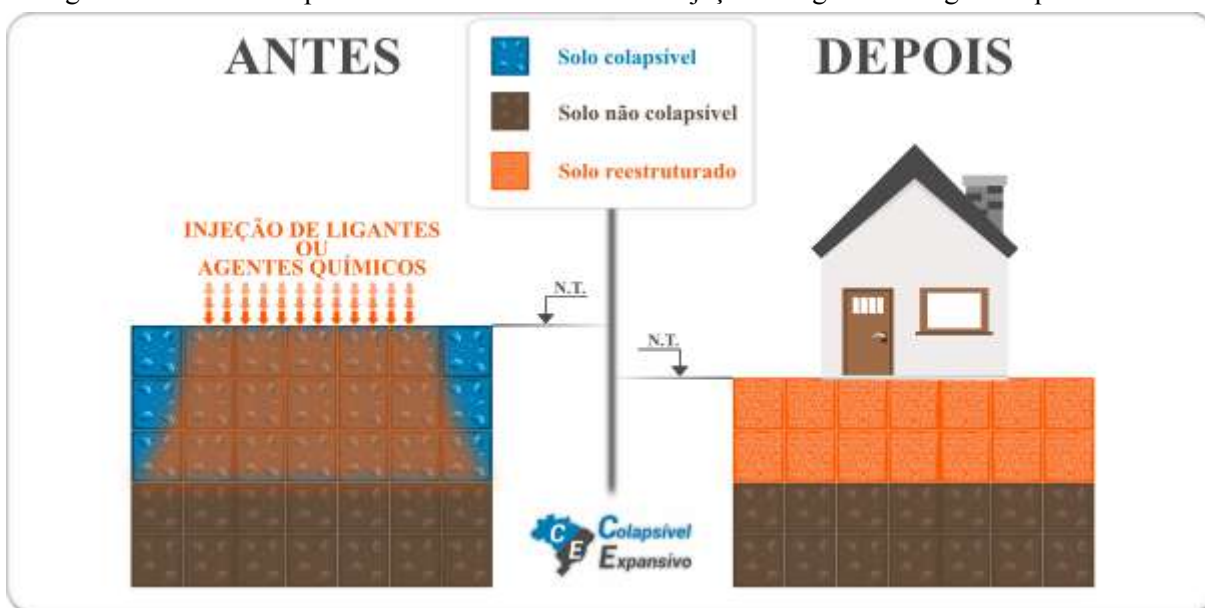
Trata-se de medidas que proporcionam a criação de uma nova ligação estrutural com um melhor arranjo das partículas do solo, garantindo a este uma maior coesão e, conseqüentemente, uma redução ou eliminação da colapsibilidade. Tais medidas estão baseadas na destruição da estrutura natural do solo ou na fixação da mesma com o aumento de sua resistência, através da injeção de vários ligantes ou agentes químicos e estabilização granulométrica (MENDONÇA, 1990; AMORIM, 2004; FERREIRA, S. R. M., 2010; MENDONÇA NETO, 2011), Figura G.7.

Figura G.6 - Compactação do solo colapsível por equipamento ou sobrecarga.



Fonte: Autor (2024).

Figura G.7 - Solo colapsível reestruturado através da injeção de ligantes ou agentes químicos.



Fonte: Autor (2024).

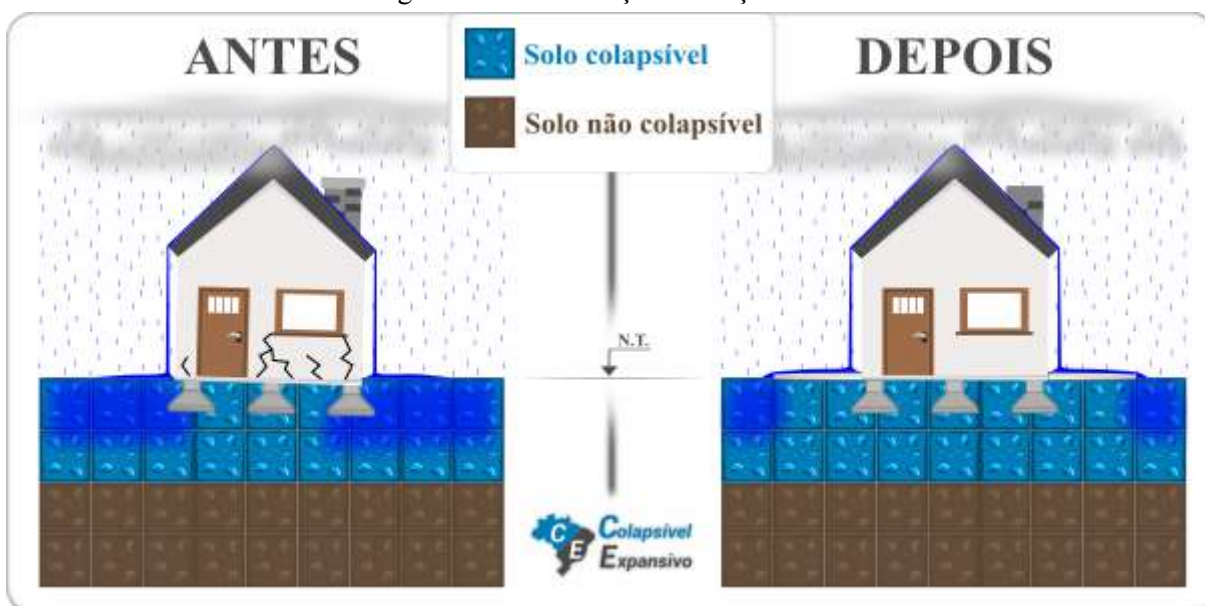
G.2.3 SOLUÇÕES POSTERIORES À CONSTRUÇÃO

Para situações posteriores à execução da obra, a recomendação é no sentido de buscar a minimização dos efeitos do comportamento colapsível. Neste grupo, podem ser destacadas as seguintes medidas:

G.2.3.1 Construção de calçadas

A construção de calçadas ao redor da edificação visa afastar a infiltração da água na região próxima à fundação. Tal medida busca diminuir ou eliminar os efeitos do colapso do solo abaixo da construção devido à variação de umidade. Importante frisar que se deve evitar o aumento de sobrecarga no solo colapsível, Figura G.8.

Figura G.8 - Construção de calçadas.



Fonte: Autor (2024).

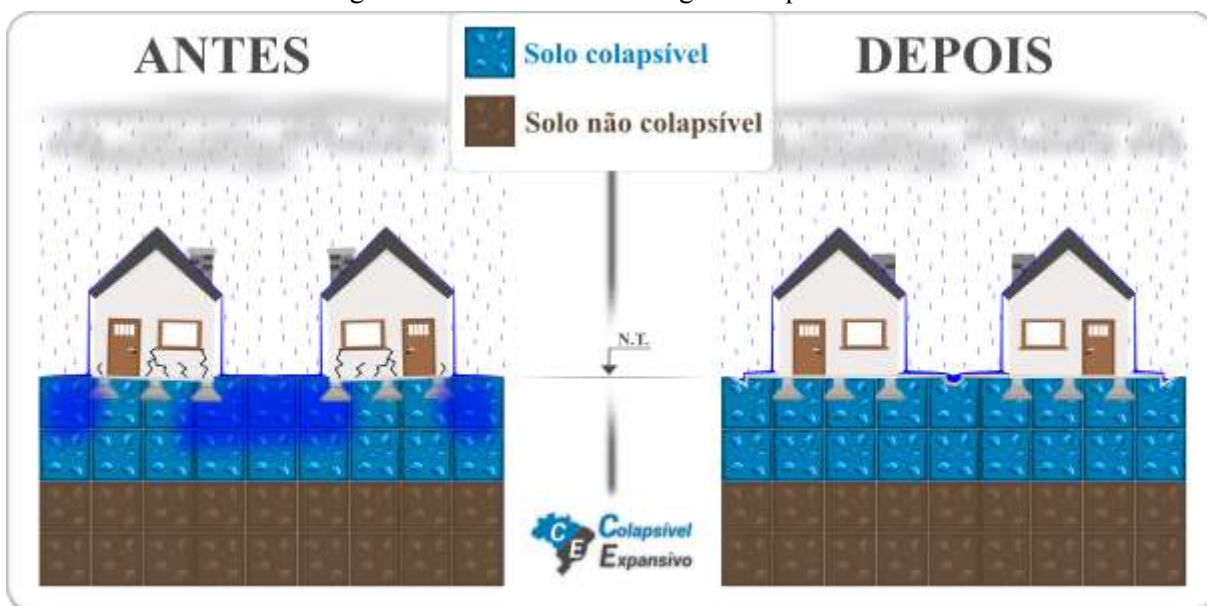
G.2.3.2 Projetos de drenagem adequados

Através de um sistema de drenagem adequado, é possível realizar a condução das águas pluviais para deságue em local apropriado, evitando o contato da água com o solo colapsível. Salienta-se que as medidas corretivas ou de manutenção são imprescindíveis neste caso (Figura G.9).

G.2.3.3 Controle de vazamentos de tubulações

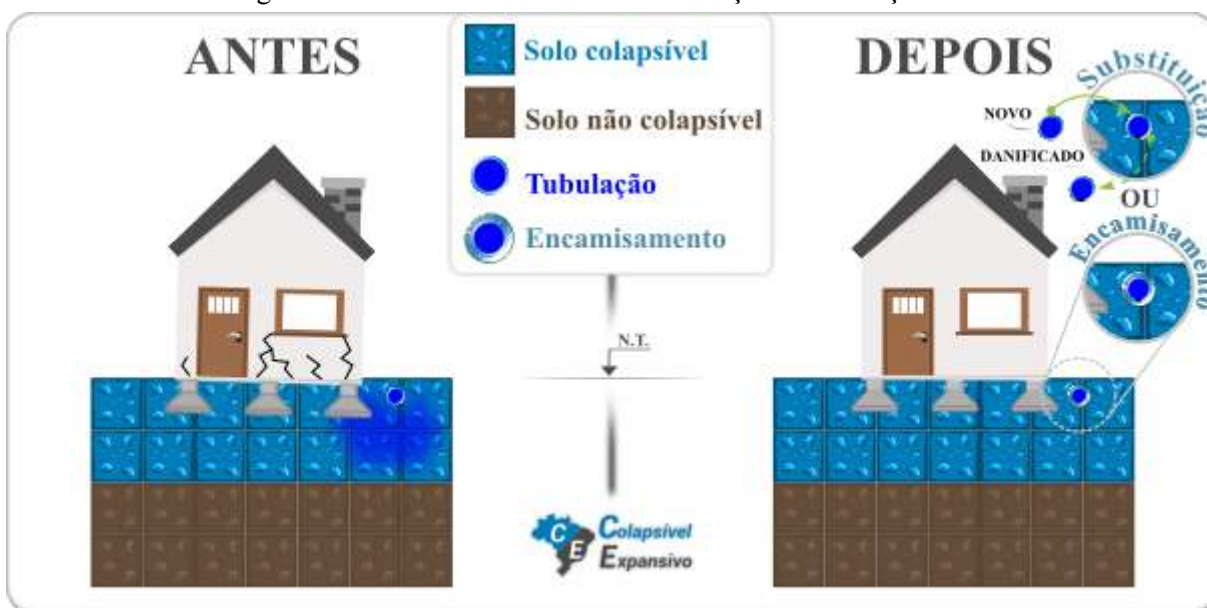
Representam medidas destinadas ao controle de vazamento de condutos de água ou esgotos, buscando evitar a infiltração no solo colapsível. A título de exemplo, a substituição ou o encamisamento da tubulação são procedimentos que visam o controle de vazamentos (Figura G.10), sendo indispensáveis às operações de manutenção neste caso.

Figura G.9 - Sistema de drenagem adequado.



Fonte: Autor (2024).

Figura G.10 - Encamisamento ou substituição da tubulação.



Fonte: Autor (2024).

G.3 ESTUDOS DE SOLUÇÕES REALIZADOS NO BRASIL

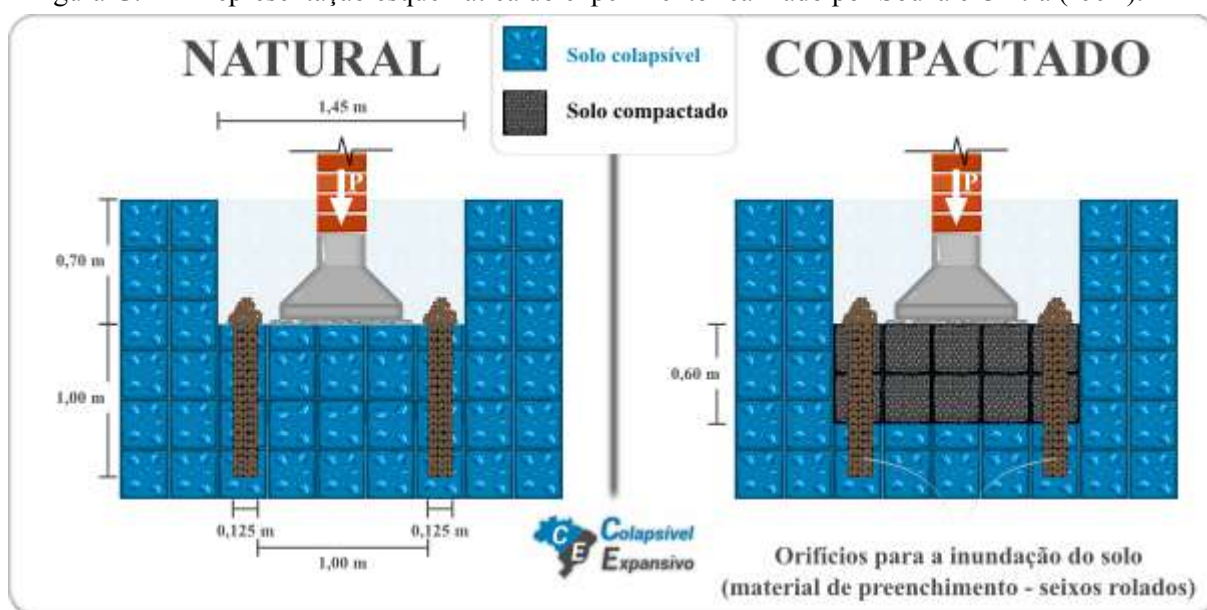
São apresentados alguns estudos sobre soluções aplicadas no Brasil.

G.3.1 COMPACTAÇÃO

No tocante às fundações rasas, Souza e Cintra (1994) estudaram os efeitos da compactação dos solos colapsíveis em Ilha Solteira-SP. Os referidos autores conduziram um experimento para estudar o comportamento real das sapatas corridas, sendo confeccionados dois protótipos apoiados sobre solos na condição natural e compactada. Nestas condições, foram realizadas provas de carga em cava seca e inundada.

Os carregamentos foram feitos em estágios sucessivos de 5 kN até que se atingisse o dobro da taxa admitida para o solo. A inundação do solo de fundação ocorreu através de orifícios ao redor da placa rígida e a condição compactada foi alcançada por meio da aplicação de soquete manual em camadas de 0,10 m de espessura do próprio solo extraído durante a escavação (Figura G.11).

Figura G.11 - Representação esquemática do experimento realizado por Souza e Cintra (1994).



Fonte: Autor (2024).

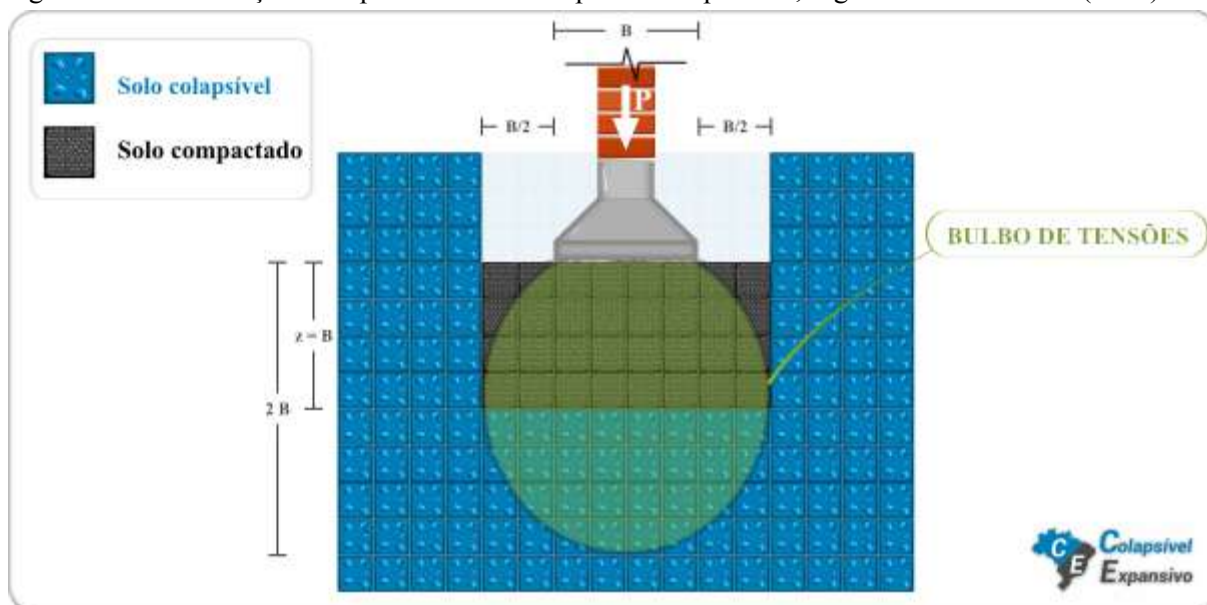
Dentre os valores médios de recalques mensurados no estudo em tela, é possível constatar a redução do colapso em 79%. Perante tal conjuntura, nota-se que o emprego da compactação proporcionou uma significativa redução nos potenciais de colapso, demonstrando a eficiência da técnica, a qual consiste no processo de compactar o solo subjacente.

Ratificando os efeitos da compactação nos solos colapsíveis, Cintra e Aoki (2009) ressaltam que esta solução representa o procedimento de melhoria mais usual no Brasil, pois

permite reduzir substancialmente o recalque de colapso de modo a possibilitar o emprego de fundações. No que concerne à profundidade, os referidos autores elucidam que a compactação do solo tem sido empregada até a metade do bulbo de tensões.

O próprio solo escavado é utilizado na compactação, sendo este repostado em camadas compactadas até uma profundidade z , contada a partir da cota de apoio da sapata e igual à largura desta fundação. A eficácia do processo pode ser alcançada mesmo através de uma compactação manual, com soquete de madeira e sem controle do grau de compactação (CINTRA; AOKI, 2009). Os referidos autores afirmam que o aumento da dimensão da cava ($B/2$) para cada lado permite que, até a profundidade $z = B$, a propagação de tensões ocorram somente no maciço compactado, admitida a hipótese de propagação 1:2 (Figura G.12).

Figura G.12 - Utilização de sapatas em solo colapsível compactado, segundo Cintra e Aoki (2009).



Fonte: Autor (2024).

De modo lógico, quanto maior a espessura da camada compactada, maior será a eficácia da solução. A título de exemplo, caso a compactação englobe todo o bulbo de tensões ($2B$), a tensão propagada ao topo da camada não compactada equivale cerca de 10% da tensão aplicada pela sapata. Contudo, esta situação deixa de ser interessante do ponto de vista econômico. Também não seria viável para os casos em que as sapatas apresentem grandes dimensões, visto que existiria uma camada muito espessa de solo sujeita ao processo de compactação (CINTRA; AOKI, 2009).

Outra ocasião em que a compactação teve destaque como solução foi no caso clássico do Conjunto Habitacional Massangano, situado em Petrolina-PE. Após o aparecimento de

várias patologias nas edificações oriundas do colapso no solo de fundação, a compactação foi recomendada por Aragão e Melo (1982) como medida preventiva para a execução das fundações das novas casas, buscando evitar os danos devido ao comportamento colapsível.

No município de Santa Maria da Boa Vista-PE, Guimarães Neto e Ferreira (1998) analisaram o comportamento de colapso devido à inundação em solos compactados em diferentes graus de compactação e desvios de umidade em relação à umidade ótima. Os referidos autores concluíram que:

- i. para uma mesma umidade inicial e tensão vertical de inundação, os valores dos potenciais de colapso diminuíram com o aumento do peso específico aparente seco, exceto em algumas condições de compactação;
- ii. há diminuição dos valores dos potenciais de colapso devido ao fato de que as amostras compactadas no peso específico aparente seco de $17,00 \text{ kN/m}^3$ têm maiores índices de vazios do que as outras com pesos específicos aparentes secos de $18,00 \text{ kN/m}^3$ e $19,00 \text{ kN/m}^3$;
- iii. os maiores valores de potenciais de colapso estão associados aos menores graus de compactação (maiores índices de vazios iniciais), sendo susceptíveis aos maiores colapsos do que as amostras mais compactas.

Esse trabalho demonstrou que a compactação do solo próxima da condição de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima confere ao solo uma estrutura estável em presença de água para diferentes níveis de tensão aplicada.

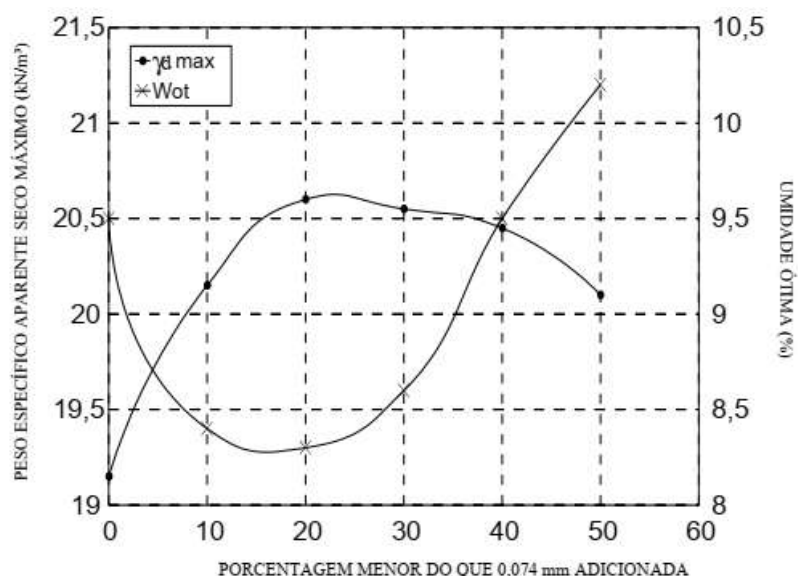
G.3.2 ADIÇÃO DE FINOS AO SOLO

Guimarães Neto e Ferreira (1998), desta vez em Petrolândia-PE, adicionaram ao solo colapsível a fração fina do mesmo solo (menor do que $0,074 \text{ mm}$) nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Foram utilizadas 6 (seis) amostras. A amostra 1 (solo natural) apresenta composição granulométrica constituída por 90% de areia, 2% de silte e 8% de argila. As amostras de 2 a 6 correspondem às adições da fração menor do que $0,074 \text{ mm}$. Tais adições nessas amostras proporcionaram, em relação à amostra natural, um acréscimo das porcentagens de argila e de silte, ocorrendo, respectivamente, o aumento de 4% e 2% na amostra 2 para 22% e 18% na Amostra 6. Consequentemente, houve a redução da

porcentagem de areia. Verificou-se que as amostras 1, 2 e 3 não apresentaram limite de liquidez e plasticidade; já as amostras 4, 5 e 6 apresentaram valores muito próximos.

Baseado nas amostras supracitadas, Ferreira (2010) verificou que o acréscimo da fração menor do que 0,074 mm ao solo natural até 20% provoca um decréscimo na umidade ótima e um acréscimo no peso específico aparente seco, conferindo um maior entrosamento entre os grãos e um menor teor de umidade ótima para uma mesma energia de compactação aplicada, (Figura G.13). O comportamento inverso foi observado para os valores superiores a 20%, dado que prevalece o acréscimo de finos, reduzindo o peso específico aparente seco máximo e aumento da umidade ótima.

Figura G.13 - Influência da fração menor do que 0,074 mm ao solo natural na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo.



Fonte: Ferreira (2010).

Através de ensaios edométricos simples, realizados em amostras do solo natural e das misturas compactadas na umidade inicial de 3,5% e no peso específico aparente seco de 17,00 kN/m³ e 18,00 kN/m³, verificou-se que, para tensões verticais inferiores a 80 kPa, o acréscimo da fração menor do que 0,074 mm ao solo resulta em uma redução do potencial de colapso, exceto para amostras compactadas estaticamente no peso específico aparente seco de 17,00 kN/m³ e umidade inicial de 3,5%. Em relação às amostras compactadas estaticamente com peso específico aparente seco de 18,00 kN/m³ e tensões verticais de inundação de 10, 40, 80 kPa, verificou-se que existem algumas porcentagens da fração menor do que 0,074 mm que,

adicionadas ao solo, não provocam os fenômenos de colapso ou expansão, ou seja, ele não colapsa e nem expande quando inundado (FERREIRA, S. R. M., 2010).

Segundo Ferreira (2010), tais porcentagens são 15 %, 34 % e 50 % para as tensões de 10, 40 e 80 kPa. Observou-se que a expansão cresce quanto menor for o grau de compactação e menor tensão vertical de inundação. Afirma que, para tensões inferiores a 80 kPa, a inundação causa pequena expansão ($< 1,0\%$), isso significa que existe um teor de fração fina que, adicionada ao solo não resulta em colapso ou expansão quando inundado. O referido autor conclui que a adição da fração menor que 0,074 mm ao solo reduz significativamente a colapsibilidade do solo.

G.3.3 ADIÇÃO DE LODO AO SOLO

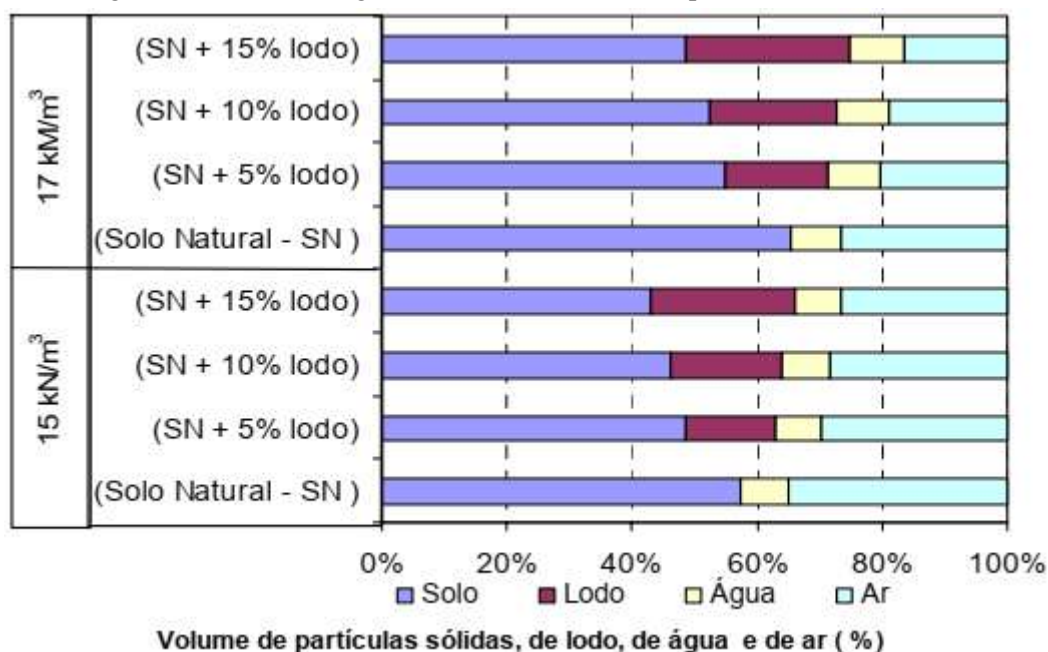
Recorrendo a lodos já ambientalmente tratados para uso, oriundos da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do Curado, localizada no município do Recife-PE, Feitosa (2009) realiza uma mistura com solo da Estação Experimental de Itapirema, localizada no município de Goiana-PE, nas proporções de 5%, 10% e 15%, buscando reduzir o colapso do solo. Em condições próximas às de campos, as amostras de solo e das misturas solo-lodo foram compactadas no peso específico seco (γ_d) de 15 kN/m³ e 17 kN/m³, sendo a umidade registrada em 3,0%.

Os resultados desse estudo evidenciaram que a adição de lodo ao solo resulta em uma redução no índice de vazios, melhorando o empacotamento das partículas, bem como reduz a colapsibilidade do solo para um mesmo peso específico aparente seco (FEITOSA, 2009). Constatou-se que o aumento da quantidade de lodo misturado ao solo provoca uma redução nos potenciais de colapso para todas as tensões aplicadas com peso específico seco de 15 kN/m³ em relação ao solo natural compactado. Já para tensões de inundação menores do que 20 kPa, foi constatada uma pequena expansão (inferior a 1,0%). No que tange ao peso específico seco de 17 kN/m³, verificou-se que o acréscimo de 5% de lodo adicionado ao solo proporcionou o melhor resultado na redução do valor do potencial de colapso.

Verificou-se que, para o mesmo peso específico seco, a porosidade do solo apresenta redução com o aumento da quantidade de lodo. Observou-se que existe um acréscimo no volume de partículas e uma redução do volume de vazios, nesse caso prevalecendo a parcela de ar, dado que a umidade é constante. Esse comportamento ocorre porque as partículas do lodo apresentam um peso específico real dos grãos (16,70 kN/m³) menor que o do solo (26,00

kN/m^3). Em virtude disso, existem mais partículas revestindo os grãos do solo, implicando em uma maior estabilidade da estrutura e reduzindo o colapso quando o solo é inundado, Figura G.14.

Figura G.14 - Porcentagem de volume de cada componente na mistura.



Fonte: Adaptado de Feitosa (2009) por Ferreira (2010).

Por fim, salienta-se que, na literatura, outros autores abordam diversas soluções técnicas para o tratamento de solos colapsíveis, tais como: substituição do solo colapsível no caso de pequena profundidade (AL-RAWAS, 2000), execução de colunas de deslocamento (AYADAT; HANNA, 2005), utilização de mistura de pó de ferro (ALSHABA; ABDELAZIZ; RAGHEB, 2018), adição de escória granulada e pozolana natural (ZIANI *et al.*, 2019), compactação com sonda vibratória (GAO *et al.*, 2020, 2021), utilização de misturas de polietilenoglicol-nanolima (ZIMBARDO *et al.*, 2020) e uso de misturas de nanomateriais nano-sílica, nano-argila e nano-carbonato de cálcio (HAERI; VALISHZADEH, 2021).

APÊNDICE H - SOLUÇÕES APLICADAS AOS SOLOS EXPANSIVOS

H.1 EXIGÊNCIA NORMATIVA

A NBR 6122/2019, que trata de projeto e execução de fundações, define os solos expansivos como sendo “solos que, por sua composição mineralógica, aumentam de volume quando há acréscimo do teor de umidade” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019, p. 8). No que concerne à fundação rasa (direta ou superficial), de modo similar aos solos colapsíveis, a referida normativa enquadra os solos expansivos entre os casos particulares, ressaltando e determinando que “nesses solos pode ocorrer o levantamento da fundação e a diminuição de resistência devido à expansão. Essas características devem ser consideradas no projeto e no método construtivo.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019, p. 23).

No que tange às investigações complementares de laboratório, os ensaios para caracterização de expansibilidade constam na relação dos ensaios mais usuais segundo a normativa em tela, *ipsis litteris*:

4.6 Investigações complementares de laboratório

Estes ensaios visam classificar os solos, determinar parâmetros de resistência, de deformabilidade e de permeabilidade. [...] Os ensaios mais usuais são: [...]

4.6.5 Ensaios para caracterização de expansibilidade

Há várias formas para se caracterizar o solo quanto à sua expansibilidade. O ensaio mais comum é o que emprega o equipamento utilizado no ensaio de adensamento.

Outros ensaios de laboratório, como os citados a seguir, também podem fornecer informações sobre a expansibilidade do solo:

- a) granulometria (pela porcentagem da fração argila);
- b) índice de plasticidade;
- c) difração de raios X (pela caracterização do argilomineral);
- d) adsorção de azul-de-metileno;
- e) análise termodiferencial;
- f) espectrometria infravermelha. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019, p. 12, grifo nosso).

Conforme o exposto no APÊNDICE G, o comportamento expansivo também representa um fator a ser considerado para a determinação da tensão admissível ou tensão resistente de cálculo tanto para fundações rasas, quanto para fundações profundas, segundo o conteúdo expresso nos subitens 7.2 e 8.2 da NBR 6122/2019, respectivamente.

Somando-se a isso, o comportamento expansivo consta como um dos fatores a serem considerados nos limites dos deslocamentos das fundações, *ipsis litteris*:

6.2.2.2 Valores limites dos deslocamentos das fundações

6.2.2.2.1 Limites de serviço a serem considerados

Devem ser considerados:

- a) recalques excessivos;
- b) levantamentos excessivos decorrentes, por exemplo, de **expansão do solo** ou outras causas;
- c) vibrações inaceitáveis. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019, p. 20, grifo nosso).

De modo semelhante aos solos colapsíveis, percebe-se que as particularidades dos solos expansivos também representam uma exigência prevista expressamente na norma NBR 6122/2019, devendo ser consideradas no projeto e no método construtivo das obras de engenharia. Sendo assim, seguindo a mesma sistemática dos solos colapsíveis, são apresentadas as principais soluções técnicas envolvendo os solos expansivos.

H.2 SOLUÇÕES TÉCNICAS

Reforça-se que a escolha da solução está condicionada a uma variedade de fatores, tais como: estrutura da edificação, características do solo, relação custo-benefício, condições climáticas, dentre outros. Jimenez Salas (1980) classifica as soluções construtivas em dois grupos, sendo eles:

- I. soluções aplicadas à estrutura:
 - palafitas;
 - estrutura rígida e semirrígida;
 - estrutura flexível.
- II. soluções aplicadas ao terreno:
 - isolamento;
 - substituição;
 - estabilização.

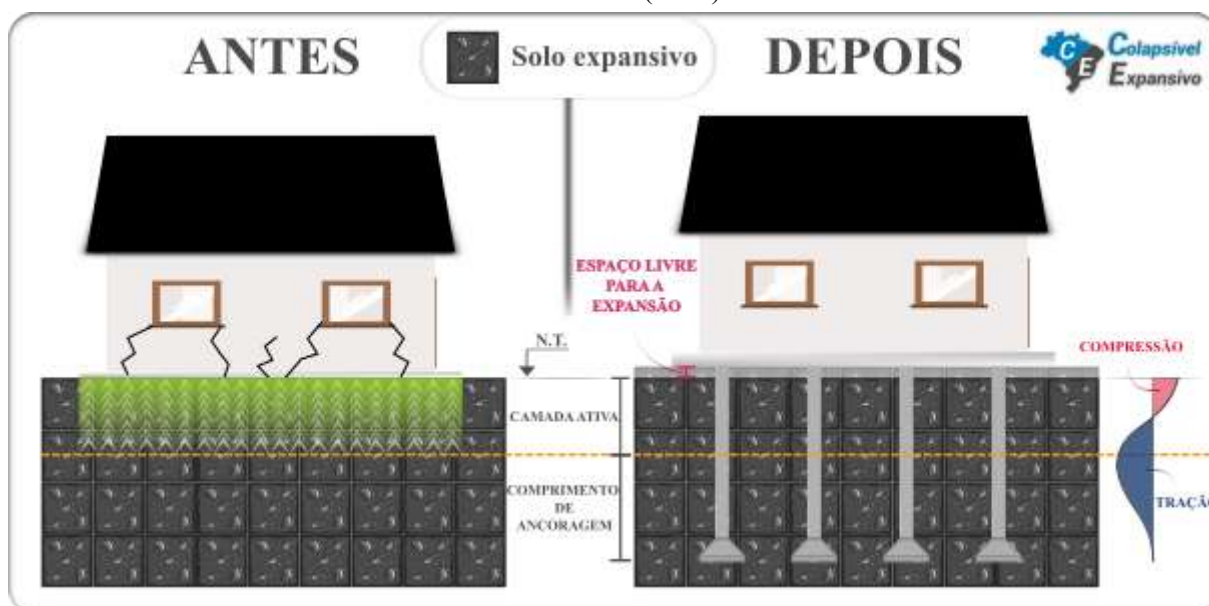
A seguir, são apresentados maiores detalhes sobre as soluções elencadas.

H.2.1 SOLUÇÕES APLICADAS À ESTRUTURA

H.2.1.1 Palafitas

Trata-se de uma solução que consiste em elevar a fundação de uma edificação através de estacas ancoradas abaixo da zona ativa. Este procedimento permite criar um espaço livre entre a fundação e o solo expansivo, fazendo com que a expansão ocorra neste local. Desta forma, o comportamento expansivo não atinge a estrutura (Figura H.1).

Figura H.1 - Solução através de fundação tipo palafita, segundo Jimenez Salas (1980) e Ayala *et al.* (1986).



Fonte: Autor (2024).

Jimenez Salas (1980) ressalta que o comportamento expansivo tende a levantar as estacas, podendo até quebrá-las caso não estejam com armadura dimensionada de forma adequada. Além disso, destaca o uso de sapatas sob as estacas como uma medida eficaz de ancoragem. Sobre esta solução, Ayala *et al.* (1986) ratificam a possibilidade das estacas sofrerem esforços de tração ocasionados pela expansão do solo. Em virtude disso, os autores mencionados ressaltam a necessidade de atender aos seguintes requisitos: resistir abaixo da zona ativa, usar armadura adequada e não utilizar grandes diâmetros.

O termo denominado camada ativa ou zona ativa corresponde à espessura do solo a qual está mais suscetível à variação de umidade devido à evaporação e à infiltração de água pluvial, sendo a delimitação desta camada definida pela profundidade em que se observa um equilíbrio nos valores de umidade. De acordo com Souza Neto (2004), a espessura da camada ativa vai variar segundo o clima, o tipo do solo e a topografia.

Sabendo-se que o umedecimento do solo varia segundo o fluxo da água, é possível inferir o avanço da frente de umedecimento seguindo o padrão da Figura H.2 para um perfil

de solo natural, influenciado apenas pela precipitação pluviométrica, evaporação e evapotranspiração. As variações sazonais dos teores de umidade estão representadas pelas curvas denominadas limite inferior (estação seca) e limite superior (estação úmida). Dependendo da espessura do perfil, existirá uma determinada profundidade em que não será constatada a variação dos teores de umidade, alcançando assim ao que pode ser chamado de umidade de equilíbrio (HOUSTON; HOUSTON, 1997; JUCÁ; PONTES FILHO, 1997; SOUZA NETO, 2004).

Desta forma, pode-se afirmar que existe um ponto limite definindo a espessura da camada ativa de um solo. A determinação desta se dá pela diferença entre o nível do terreno e o ponto limite anteriormente mencionado, o qual representa o início da umidade de equilíbrio.

Figura H.2 - Representação esquemática das variações sazonais da umidade em um perfil de solo não saturado (solo expansivo) e homogêneo (HOUSTON; HOUSTON, 1997).



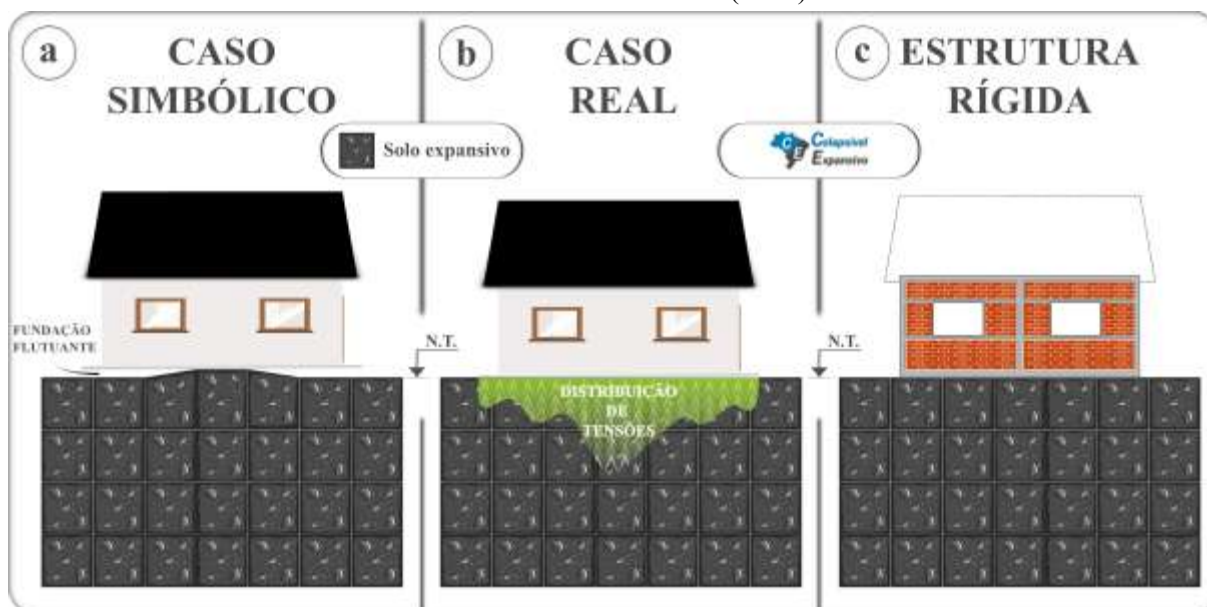
Fonte: Autor (2024).

H.2.1.2 Estrutura rígida e semirrígida

Consiste em projetar uma estrutura rígida buscando flutuar sobre as irregularidades do terreno sem haver fissuras. Contudo, trata-se de uma representação simbólica, posto que, na verdade, o terreno não apresenta resistência suficiente para levantar a estrutura em uma pequena área (Figura H.3a). O caso real mostra que as zonas de desigual expansão produzem uma distribuição desigual das pressões (Figura H.3b), originando esforços que a edificação deverá resistir sem romper. Importante frisar que a estrutura rígida engloba toda a edificação

(Figura H.3c), ou seja, a superestrutura e a infraestrutura, posto que esta sozinha não resiste aos esforços (JIMENEZ SALAS, 1980).

Figura H.3 - Cenários referentes às representações: simbólica, real e estrutura rígida, segundo Jimenez Salas (1980).



Fonte: Autor (2024).

No tocante à estrutura semirrígida, Jimenez Salas (1980) afirma que sua diferença em relação à estrutura rígida está na metodologia de cálculo, pois se considera que a estrutura se deforma, sendo verificados os levantamentos diferenciais do terreno, os quais diminuem os momentos. A solução em tela se aplica às construções extensas, tais como edifícios de grande porte e depósitos com vãos capazes de suportar uma deformação de alguns centímetros sem apresentar danos estruturais. A complexidade dos cálculos nestes casos é ressaltada pelo referido autor.

H.2.1.2 Estrutura flexível

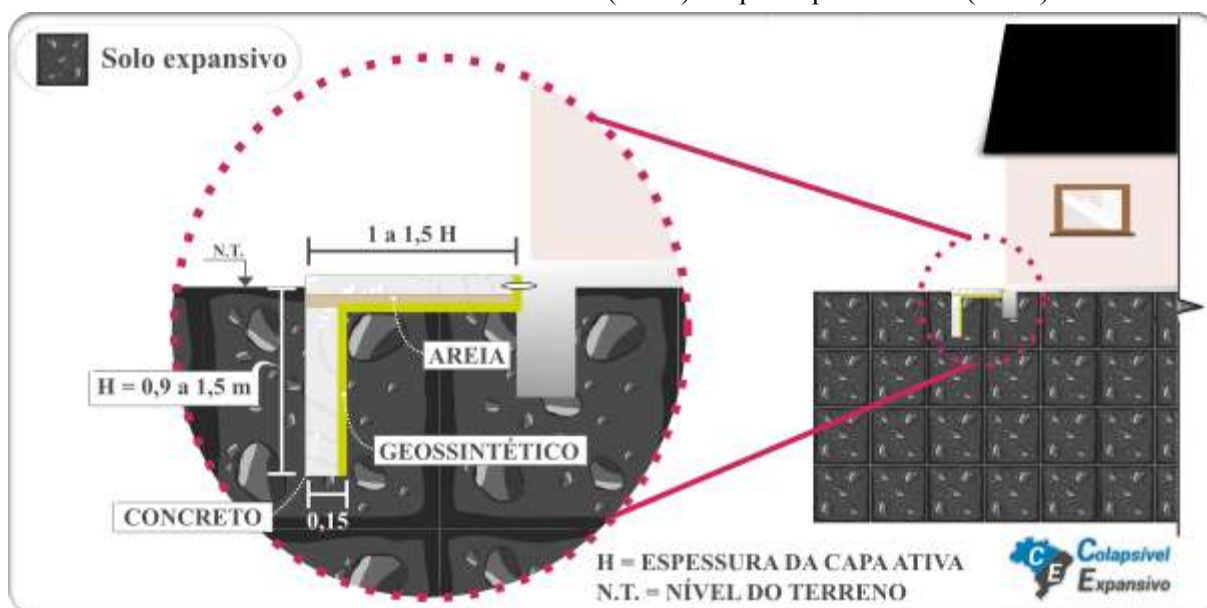
Conforme exposto no subitem anterior, o termo flexível corresponde à capacidade da estrutura em resistir deformações sem que ocorram danos estruturais. A título de exemplo, Jimenez Salas (1980) cita a solução através de uma estrutura metálica para a construção de um galpão de armazenamento sobre argilas expansivas.

H.2.2 SOLUÇÕES APLICADAS AO TERRENO

H.2.2.1 Isolamento

Calçadas, pavimentação e drenagem representam medidas que podem ser utilizadas para obter o isolamento das trocas hídricas do terreno. A construção de calçadas é considerada essencial. Embora não evitem o levantamento uniforme, atenuam os levantamentos diferenciais. Estudos apontam que danos no centro da estrutura são eliminados quando se realiza a cobertura do terreno com materiais plásticos, evitando-se o contato da água com o solo. Em virtude disso, aconselha-se que sejam construídas calçadas com comprimento equivalente a 1 a 1,5 vezes em relação à profundidade da camada ativa. Essas calçadas devem conseguir suportar os movimentos de expansão do solo e evitar a passagem de água (JIMENEZ SALAS, 1980; AMORIM, 2004), Figura H.4.

Figura H.4 - Proteção do solo através da construção de calçadas e barreiras verticais de concreto, conforme Jimenez Salas (1980) adaptado por Amorim (2004).



Fonte: Autor (2024).

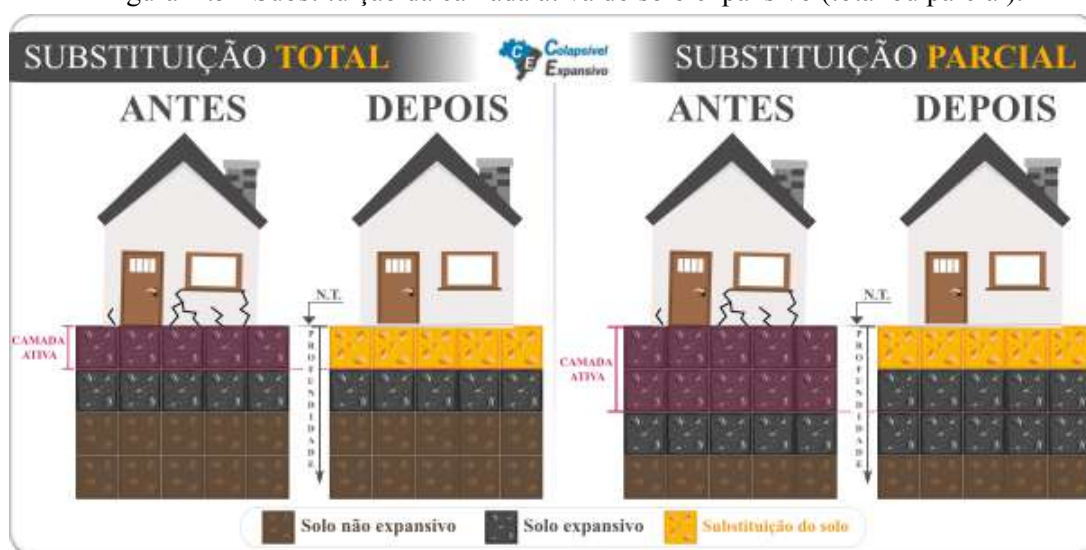
Segundo Jimenez Salas (1980), outra solução para impedir a troca hídrica do solo é a pavimentação das ruas. Essa solução, através de sistemas de drenagem e esgotos adequados, possibilita uma diminuição nos danos às estruturas sobre os solos expansivos. A efetividade da pavimentação é citada por Chen (1975) ao discorrer que, apesar de situados em zonas de argilas expansivas, as estruturas e os edifícios dos postos de combustíveis não apresentaram danos decorrentes dos solos expansivos por estarem construídos em meio às extensas áreas pavimentadas.

Por fim, a drenagem também surge como solução. No entanto, representa o método com maior dificuldade de execução. A maior parte das transferências de umidade nas argilas expansivas se fazem nos poros capilares de forma lenta ou mesmo na forma de vapor. Em virtude disso, imagina-se que a drenagem não tem importância. Entretanto, é possível afirmar que existe efetividade, embora às vezes prejudicial. Isso ocorre porque o solo está com fendas e essas aberturas, nas primeiras chuvas, permitem a drenagem, impedindo a formação de águas suspensas. O efeito da drenagem em outras ocasiões deve ser limitado devido ao simples efeito denominado barreira de vapor que corte a transmissão das variações de umidade exterior ao interior do solo (JIMENEZ SALAS, 1980).

H.2.2.2 Substituição

Trata-se de uma solução muito interessante, pois visa substituir a camada ativa do solo expansivo. Quando a profundidade da camada ativa é muito grande, a substituição parcial torna-se a alternativa mais viável, eliminando-se apenas a camada superior responsável pelas maiores variações de umidade. É possível que ocorram irregularidades na superfície do terreno expansivo, porém essas irregularidades se dispersam através do colchão de material estável e produzem momentos menores nas estruturas subjacentes (JIMENEZ SALAS, 1980), Figura H.5.

Figura H.5 - Substituição da camada ativa do solo expansivo (total ou parcial).



Fonte: Autor (2024).

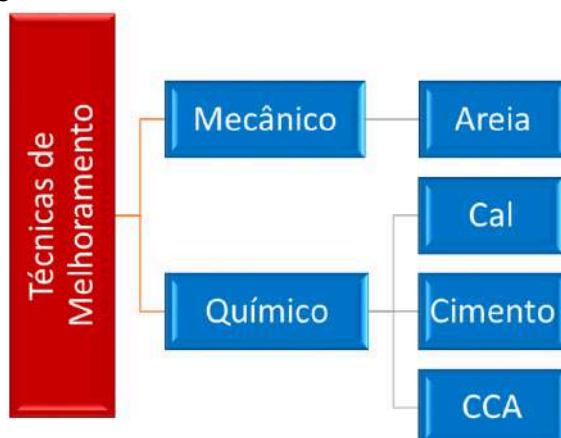
H.2.2.3 Estabilização

No que se refere à estabilização, destacam-se as soluções que se utilizam de cal, de areia, de cimento e das Cinzas da Casca de Arroz (CCA). Constantino (2018) assevera que as técnicas de estabilização visam melhorar as características geotécnicas dos solos expansivos, obtendo resultados efetivos quando comparados com as técnicas preventivas, dado que estas buscam apenas evitar possíveis problemas, não garantindo solução definitiva para a obra. A referida autora elucida que a escolha do método a ser utilizado deve considerar as particularidades de cada solo e a necessidade da obra a ser realizada. Os principais itens a serem analisados na definição do método são: fatores econômicos, características do solo e objetivo da construção a ser realizada.

A estabilização mecânica consiste na alteração da forma como as partículas de solo estão dispostas ou a granulometria dele. Dessa forma, prevalece a compactação e a correção granulométrica. O processo de compactação promove o arranjo das partículas do solo ou sua granulometria. Consequentemente, ocorre a redução de volume, que está relacionado com o ganho de resistência, implicando na redução da expansão do solo (GONDIM, 2008).

A estabilização química pode ser definida como um fenômeno que provoca mudanças nas propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade do solo (SANTOS, M.; LIMA; BUENO, 1995). Normalmente, essa estabilização ocorre através da adição de outros materiais buscando alterar as propriedades por reações físico-químicas, tais como cal, cimento e cinza de casca de arroz, Figura H.6.

Figura H.6 - Técnicas de melhoramento de solo expansivo.



Fonte: Constantino (2018).

A cal apresenta propriedades físico-químicas que provocam mudanças na microestrutura das partículas dos solos através de troca catiônica, floculação, compressão da dupla camada elétrica, bem como reações de cimentação pozolânicas e a carbonatação (BARBOSA, 2013). Trata-se de uma prática comum o espalhamento direto de cal no solo. Dependendo do volume a ser estabilizado, esse método pode ser mecanizado ou manual (ATAÍDE, 2017), Figura H.7.

Figura H.7 - Aplicação de cal com espalhamento mecanizado.



Fonte: Ataíde (2017).

Em relação à adição de cimento *portland* ao solo, esse procedimento promove um ganho de resistência mecânica à mistura e uma menor susceptibilidade à água, após a hidratação do cimento (INGLES; METCALF, 1972). No tocante ao acréscimo de cinza de casca de arroz, Constantino (2018) afirma que a mistura desenvolve a formação de compostos cimentícios no solo ao reagir com o hidróxido de cálcio, em função das suas características pozolânicas.

No município de Paulista-PE, a autora supracitada realizou ensaios no solo natural e nas misturas solo com cinza de casca de arroz nos percentuais, em peso, de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. O resultado apontou uma redução de 80% dos valores de expansão “livre”, 91% da tensão de expansão do solo natural e aumento da resistência à compressão simples e diametral do solo natural para os percentuais de 4%. Concluiu-se que o percentual de 8% demonstrou ser o mais indicado para garantir que não haja danos às edificações.

Em solo expansivo do Brejo da Madre de Deus-PE, Bezerra (2019) processou ensaios no solo natural e nas misturas do solo compactado com CCA nos percentuais, em peso, de 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 20%. Nesse estudo, verificou-se que a adição de CCA ao solo reduziu praticamente a zero os valores da expansão “livre” e da tensão de expansão do solo. Concluiu-se que o percentual de 20% representa a porcentagem mais indicada para garantir que não haja danos às edificações.

Medeiros *et al.* (2023) apresentam um estudo sobre a evolução da estabilização química em solos expansivos, oferecendo uma abrangente revisão da literatura publicada ao longo dos últimos setenta anos. Os referidos autores concluem que os materiais mais frequentemente empregados na composição dos compósitos são os seguintes: cal, cinzas, cimento e derivados de sódio. No que concerne aos compósitos mais prevalentes, observou-se uma predominância de cal hidratada (57%) e cinzas (32%).

APÊNDICE I - ASPECTOS PEDOLÓGICOS

Baseado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), são expostas as características das classes relacionadas ao primeiro nível categórico (ordem), conforme Marques *et al.* (2014) e Santos *et al.* (2018). Também é exteriorizada a interpretação dos seus respectivos ambientes de ocorrência, traduzidos em unidades geo-pedológicas, segundo Antunes *et al.* (2013), Antunes e Salomão (2018). Ao final, ou ao longo de cada descrição, é exposto um quadro contendo sucintamente algumas das características dessas classes de solo. As imagens ilustrativas foram obtidas do portal da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021a, b).

⇔ Argissolos

Trata-se de solos constituídos por material mineral que apresentam sequência de horizontes A-B-C, tendo o horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico na maior parte do horizonte B (ANTUNES *et al.*, 2013; ANTUNES; SALOMÃO, 2018; SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

A maioria dos solos pertencentes a essa classe apresentam um nítido incremento no teor de argila do horizonte superficial para o horizonte B, com ou sem decréscimo nos horizontes subjacentes. A transição entre os horizontes A e Bt é usualmente clara, abrupta ou gradual. Os argissolos apresentam profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas ou amareladas e mais raramente brunadas ou acinzentadas. São de forte a moderadamente ácidos, com saturação por bases alta ou baixa, predominantemente caulíníticos e com relação molecular Ki, em geral, variando de 1,0 a 3,3 (SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

Antunes *et al.* (2013), Antunes e Salomão (2018) afirmam que os argissolos (antigo podzólico) são muito comuns no território brasileiro e essa classe de solos é distribuída em várias fases de relevo. Sua gênese está relacionada com diferentes materiais de origem. Dentre esses, as rochas cristalinas são as mais comuns.

No que tange à geotecnia, os referidos autores ressaltam serem solos não saturados que podem estar associados a perfis de intemperismo, especialmente os que têm ocorrência em

relevo suave ondulado e ondulado, tendo como material fonte as rochas cristalinas. Em relação aos que ocorrem em relevo forte ondulado, esses podem estar associados a afloramentos de rochas.

Marques *et al.* (2014) discorrem sobre os argissolos como sendo solos minerais bem desenvolvidos e drenados, profundos a muito profundos, apresentando acúmulo de argila em subsuperfície, tipificado pelo horizonte B textural (Bt). Apresentam sequência de horizontes do tipo: A – E– Bt – C – R ou A – Bt – C – R. No tocante à coloração, exibem cores vermelhas, vermelho-amarelas, amarelas, acinzentadas ou brunadas. As características desses solos estão expostas no Quadro I.1.

Quadro I.1 - Principais características da classe Argissolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Argissolos	Características
	solos com B textural, com argila de atividade baixa, ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter aluminico; apresentam acúmulo de argila em subsuperfície, tipificado pelo horizonte B textural (Bt); relação molecular Ki, em geral, variando de 1,0 a 3,3.
Sequência de horizontes	A – E– Bt – C – R ou A – Bt – C – R.
Coloração	vermelhas, vermelho-amarelas, amarelas, acinzentadas ou brunadas.
Ocorrência	muito comuns no território brasileiro; representam aproximadamente 24% do território nacional.
Relevo	ocorrem em relevo plano e suave ondulado; ondulado; forte ondulado, montanhoso e escarpado.
Drenagem	forte a imperfeitamente drenados.
Profundidade	profundos a muito profundos.
Material de origem	desenvolvidos de rochas cristalinas.
Aspectos geotécnicos	perfil de solo de origem residual, não saturado, raramente de material de origem alóctone, alta erodibilidade, boa capacidade de suporte, baixa compressibilidade; podem constituir jazidas de saibro para aterros compactados; pode apresentar argila expansiva na base do horizonte B e no horizonte C.
Fatores limitantes	baixa fertilidade natural, alta suscetibilidade à erosão quando possui mudança textural abrupta, coesão natural em alguns solos amarelos, e associação com relevo movimentado.

Fonte: Autor (2024).

Ainda segundo os autores mencionados, os argissolos apresentam uma boa capacidade de armazenamento de água e ocorrem em relevo plano a suave ondulado. De modo geral, esses solos possuem alta suscetibilidade à erosão quando possui mudança textural abrupta,

baixa fertilidade natural, coesão natural em alguns solos amarelos, e associação com relevo movimentado.

⇒ Cambissolos

São solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial (exceto hístico com 40 cm ou mais de espessura) ou horizonte A chernozêmico, caso o horizonte B incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases altas. Essa classe compreende desde solos fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de cor bruna ou bruno-amarelada até vermelho-escura, de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração argila. A relação molecular K_i corresponde à fração argila $> 2,2$ (SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

Essa classe representa um horizonte pouco desenvolvido, podendo conter materiais primários e fragmentos de rocha, e com elevados teores de silte. Os cambissolos apresentam sequência de horizontes A, Bi e C, podendo ocorrer em relevos acidentados ou planos. Quanto à abrangência, ocupam áreas de pequena expressão no território brasileiro. São derivados de diversos materiais de origem encontrados em diversos ambientes climáticos e tipos de relevos (ANTUNES *et al.*, 2013; ANTUNES; SALOMÃO, 2018).

Segundo Antunes *et al.* (2013), os cambissolos que ocorrem em relevo ondulado ou em relevo forte ondulado, montanhoso e escarpado podem estar associados a solos residuais e/ou a depósitos coluviais ou de tálus. Por outro lado, os que ocorrem em relevo plano e suave ondulado podem estar associados a sedimentos não consolidados.

Para Marques *et al.* (2014), os Cambissolos são solos pouco desenvolvidos com presença de horizonte B incipiente (Bi). Quanto ao seu material de origem, são oriundos de rochas e sedimentos diversificados. Possuem grande heterogeneidade de atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos. Esses solos apresentam minerais primários facilmente alteráveis na massa do solo, bem como sequência de horizontes do tipo: A – Bi – C – R ou A – Bi – C. Têm boa capacidade de armazenamento de água. Quanto às suas principais limitações, os autores elencam as seguintes: risco de inundação no ambiente de várzea, alto teor de alumínio trocável, risco de erosão, pedregosidade e rochiosidade e associação com relevo forte ondulado. As características desses solos estão expostas no Quadro I.2.

Quadro I.2 - Principais características da classe Cambissolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Cambissolos	Características
	solos pouco desenvolvidos com horizonte B incipiente; de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração argila; grande heterogeneidade de atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos; ricos em minerais primários facilmente intemperizáveis quando residuais; relação molecular Ki corresponde à fração argila > 2,2.
Sequência de horizontes	A – Bi – C – R ou A – Bi – C.
Coloração	bruna ou bruno-amarelada até vermelho-escura.
Ocorrência	ocupam áreas de pequena expressão no território brasileiro; representam cerca de 2,5% do território nacional.
Relevo	ocorrem em relevo plano e suave ondulado; ondulado; forte ondulado, montanhoso e escarpado.
Drenagem	fortemente até imperfeitamente drenados.
Profundidade	rasos a profundos.
Material de origem	desenvolvidos de rochas cristalinas (fragmentos de rochas na matriz argilosa com relação silte/argila > 0,7) ou de depósitos de encostas (relevo acidentado) e de sedimentos aluviais (relevo plano).
Aspectos geotécnicos	alta erodibilidade; em geral, pouco espessos; podem indicar presença de colúvio ou tálus quando em relevos acidentados, sendo, neste caso, indicativos de áreas potenciais a movimentos de massa; características geotécnicas dos materiais variam dependendo do produto de alteração do substrato geológico.
Fatores limitantes	risco de inundação no ambiente de várzea, alto teor de alumínio trocável, risco de erosão, pedregosidade e rochosidade, e associação com relevo forte ondulado.

Fonte: Autor (2024).

⇒ Chernossolos

São solos constituídos por material mineral que têm as seguintes características diferenciais: alta saturação por bases e horizonte A chernozêmico sobrejacente a horizonte B textural ou B incipiente, ambos com argila de atividade alta ou sobrejacente a horizonte C carbonático, horizonte cálcico ou petrocálcico ou ainda sobrejacente à rocha, quando o horizonte A apresentar alta concentração de carbonato de cálcio (SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

Segundo Santos *et al.* (2018), essa classe consiste em solos normalmente de bem a imperfeitamente drenados, moderadamente ácidos a fortemente alcalinos, com argila de atividade alta, com capacidade de troca de cátions que pode chegar a valores superiores a 100

cmol_c kg⁻¹ de argila, saturação por bases alta, geralmente superior a 70%. São formados sob condições climáticas bastante variáveis e a partir de diferentes materiais de origem. Admite-se, nessa classe, a presença de gleização ou de horizonte glei, de superfície de fricção e de mudança textural abrupta. As características desses solos estão expostas no Quadro I.3.

Os Chernossolos (antigos Brunizens e Rendzinas) têm ocorrência em diversas áreas do território brasileiro, principalmente quando desenvolvidos de rochas de caráter intermediário a básico. Esses solos não ocupam áreas de grande expressão. Sobre o caráter geotécnico, são solos não saturados que podem apresentar argilominerais do tipo 2:1 nas frações finas (ANTUNES *et al.*, 2013; ANTUNES; SALOMÃO, 2018).

Quadro I.3 - Principais características da classe Chernossolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Chernossolos	Características
	solos com horizonte A chernozêmico, com argila de atividade alta e saturação por bases alta, com ou sem acumulação de carbonato de cálcio, com reação moderadamente ácida a fortemente alcalina; percentagem de carbono orgânico $\geq 0,6\%$; saturado com cátions bivalentes.
Sequência de horizontes	A – Bt – C – R; A – Bi – C – R; A – C – R; ou simplesmente, A – R.
Coloração	horizonte superficial enriquecido em matéria orgânica de cor escura (A chernozêmico).
Ocorrência	ocorrem em diversas áreas do território brasileiro, principalmente quando desenvolvidos de rochas de caráter intermediário a básico; não ocupam áreas de grande expressão; representam aproximadamente 0,5% do território nacional.
Relevo	ocorrem em relevo suave ondulado; ondulado e forte ondulado.
Drenagem	bem a imperfeitamente drenados.
Profundidade	pouco profundos.
Material de origem	desenvolvidos a partir de rochas básicas, ricas em minerais ferromagnesianos e/ou calcário.
Aspectos geotécnicos	solo de origem residual; não saturado; horizonte B pouco espesso; predominam argilominerais do tipo 2:1 nas frações finas; presença de argilas expansivas no horizonte B e em muitos casos também no horizonte C, condicionando expansão e contração dos materiais com fissuramentos; comum a presença de fragmentos de rocha no horizonte superficial.

Fonte: Autor (2024).

Segundo Marques *et al.* (2014), são solos ricos em bases e com argila de atividade alta, com reação moderadamente ácida a fortemente alcalina. Esses solos possuem horizonte

superficial enriquecido em matéria orgânica de cor escura (A chernozêmico), bem como são desenvolvidos a partir de rochas básicas, ricas em minerais ferromagnesianos e/ou calcário. A sequência de horizontes é do tipo: A – Bt – C – R; A – Bi – C – R; A – C – R; ou simplesmente, A – R. No que concerne aos fatores limitantes, os autores destacam a elevada plasticidade e pegajosidade, restrição de drenagem, consistência dura a muito dura, risco de erosão, dificuldade de manejo do solo com máquinas e implementos agrícolas.

⇒ Espodossolos

Santos *et al.* (2018) define essa classe como sendo composta de solos minerais que apresentam horizonte B espódico imediatamente abaixo de horizonte E, A, ou horizonte hístico. Normalmente, apresentam sequência de horizontes A, E, B espódico, C, com nítida diferenciação de horizontes. Quanto à tonalidade das cores, o horizonte A varia de cinzenta até preta e o horizonte E desde cinzenta ou acinzentada-clara até praticamente branca. A cor do horizonte espódico varia desde cinzenta, de tonalidade escura ou preta, até avermelhada ou amarelada. São solos desenvolvidos especialmente de materiais arenoquartzosos sob condições de umidade elevada, em clima tropical e subtropical, em relevo plano, suave ondulado, áreas de surgente, abaciamientos e depressões (SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

Os Espodossolos (antigo Podzol) são solos desenvolvidos de materiais arenosos de qualquer origem, ocupando predominantemente áreas de relevo plano, mas também podendo ocorrer em relevo suave ondulado. Esses solos ocupam as áreas mais extensas do extremo noroeste do estado do Amazonas e no centro-sul do estado de Roraima. As baixadas litorâneas na parte leste do país representam as áreas esparsas de ocorrência desses solos. No que concerne ao aspecto geotécnico, são solos transportados, tipicamente arenosos, ocupando, sob ambiente de maior energia, as baixadas topográficas (ANTUNES *et al.*, 2013; ANTUNES; SALOMÃO, 2018).

Do ponto de vista de Marques *et al.* (2014), os Espodossolos são descritos como solos profundos a muito profundos com nítida diferenciação de horizontes no perfil e possuem acumulação iluvial de matéria orgânica, com ou sem ferro e/ou alumínio formando o horizonte B espódico. Quanto ao ambiente de ocorrência, ocupam predominantemente áreas de restinga e Tabuleiros Costeiros nas condições tropicais. A sequência de horizontes é do tipo: A – E – Bh – Bsm ou A – E – Bh. No tocante aos fatores limitantes, os referidos autores citam os seguintes: textura arenosa, fertilidade natural muito baixa, drenagem moderada a

imperfeita, presença de camada de impedimento e risco elevado de contaminação do lençol freático e de alagamento. As características desses solos estão expostas no Quadro I.4.

Quadro I.4 - Principais características da classe Espodossolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Espodossolos	Características
	solos com B espódico imediatamente abaixo de horizonte E, A, ou horizonte hístico; complexação de ferro, alumínio e matéria orgânica; profundo a muito profundo com nítida diferenciação de horizontes; acumulação iluvial de matéria orgânica, com ou sem ferro e/ou alumínio formando o horizonte B espódico.
Sequência de horizontes	A – E – Bh – Bsm ou A – E – Bh.
Coloração	horizonte A varia de cinzenta até preta e horizonte E desde cinzenta ou acinzentada-clara até praticamente branca; horizonte espódico varia desde cinzenta, de tonalidade escura ou preta, até avermelhada ou amarelada.
Ocorrência	ocorrem em áreas mais extensas no extremo noroeste do estado do Amazonas e no centro sul do estado de Roraima, bem como em áreas esparsas nas baixadas litorâneas na parte leste do país; ocorrência dominante no ambiente de restinga e nos Tabuleiros Costeiros nas condições tropicais; representam aproximadamente 2% do território nacional.
Relevo	ocorrem em relevo plano; suave ondulado.
Drenagem	moderada a imperfeita.
Profundidade	profundos a muito profundos.
Material de origem	desenvolvidos especialmente de materiais arenoquartzosos sob condições de umidade elevada, em clima tropical e subtropical.
Aspectos geotécnicos	solo transportado; arenoso; alta erodibilidade; moderadamente espessos; pode apresentar hidromorfismo; podem apresentar baixa capacidade de suporte e compressibilidade.

Fonte: Autor (2024).

⇒ Gleissolos

Trata-se de solos minerais hidromórficos que apresentam horizonte glei iniciando-se nos primeiros 150 cm da superfície do solo ou a profundidade entre 50 cm e 150 cm desde que imediatamente abaixo de horizonte A ou E, ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos. Os solos dessa classe se encontram permanente ou periodicamente saturados por água, salvo se artificialmente drenados. Caracterizam-se pela forte gleização, o que implica a manifestação de cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas devido à redução e solubilização do ferro. Esses solos são

desenvolvidos de sedimentos, estratificados ou não, e sujeitos a constante ou periódico excesso d'água (SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

Antunes *et al.* (2013), Antunes e Salomão (2018) asseveram que esses solos ocupam relevo plano e ocorrem indiscriminadamente em todo o território brasileiro. Têm ocorrência em várzeas e planícies aluvionares mal ou muito mal drenadas, onde o lençol freático apresenta nível elevado durante grande parte do ano. São solos compressíveis, conhecidos como solos moles ou argilas orgânicas, e podem estar associados com solos de mangue e solos orgânicos. No que concerne ao aspecto geotécnico, são solos saturados com ocorrência em relevo plano e em diversos casos sujeitos a alagamentos em épocas de precipitações mais intensas. As características desses solos estão expostas no Quadro I.5.

Quadro I.5 - Principais características da classe Gleissolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Gleissolos	Características
	solos minerais hidromórficos com expressiva gleização, resultante de processos de intensa redução de compostos de ferro em presença de matéria orgânica; encontram-se permanente ou periodicamente saturados por água; conhecidos como solos moles ou argilas orgânicas.
Sequência de horizontes	A – Cg – C; A – Btg ou Big – C; H – Cg – C ou A – H – Cg.
Coloração	acinzentadas, azuladas ou esverdeadas em função da redução de ferro ou manganês.
Ocorrência	ocorrem indiscriminadamente em todo o território brasileiro, em várzeas e planícies aluvionares onde o lençol freático fica elevado durante grande parte do ano; representam cerca de 4% do território nacional.
Relevo	ocupam relevo plano no ambiente de várzea e de baixada.
Drenagem	mal a muito mal drenado.
Profundidade	profundos.
Material de origem	desenvolvidos a partir de sedimentos colúvio-aluvionares sob hidromorfismo permanente ou sazonal.
Aspectos geotécnicos	solo transportado, saturado, profundo, sujeito a alagamentos e desenvolvimento de boçorocas na dependência do gradiente hidráulico subterrâneo; baixa capacidade de suporte, alta compressibilidade e geralmente expansivos.

Fonte: Autor (2024).

Marques *et al.* (2014) descrevem os Gleissolos como sendo solos mal a muito mal drenados com horizonte glei. São desenvolvidos a partir de sedimentos colúvio-aluvionares sob hidromorfismo permanente ou sazonal. Em relação à coloração, afirmam que esses solos apresentam cor acinzentada e ocorrem em relevo plano no ambiente de várzea e de baixada. A sequência de horizontes é do tipo: A – Cg – C; A – Btg ou Big – C; H – Cg – C ou A – H –

Cg. No tocante aos fatores limitantes, asseveram que, devido aos problemas de drenagem, apresentam riscos de inundação, de acidez elevada pelo manejo inadequado e de contaminação de cursos de água e do lençol freático.

⇔ Latossolos

Segundo Santos *et al.* (2018), são solos minerais que apresentam horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A dentro de 200 cm a partir da superfície ou dentro de 300 cm, se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura. Esses solos são muito evoluídos, apresentando avançado estágio de intemperização. Essa classe consiste em solos com menor resistência ao intemperismo e com baixa capacidade de troca de cátions da fração argila inferior a $17 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila sem correção para carbono. Verificam-se variações desde solos predominantemente cauliníticos, com valores de Ki mais altos, em torno de 2,0, admitindo o máximo de 2,2, até solos oxídicos de Ki extremamente baixo.

Ainda segundo os referidos autores, esses solos variam de fortemente a bem drenados. Normalmente, quanto à profundidade, são muito profundos e têm sequência de horizontes A, B, C com pouca diferenciação de sub-horizontes. Distinguindo-se das cores mais escuras do horizonte A, o horizonte B tem cores mais vivas, variando desde amarelas ou mesmo bruno-acinzentadas até vermelho-escuro-acinzentadas. Geralmente, são solos fortemente ácidos, com baixa saturação por bases, distróficos ou alumínicos.

Marques *et al.* (2014) descrevem os Latossolos como sendo solos bem desenvolvidos, profundos e bem drenados com horizonte B latossólico (Bw). Apresentam características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas uniformes no perfil. Quanto à coloração, exibem cores vermelhas, vermelho-amarelas, amarelas, acinzentadas ou brunadas. Em geral, ocorrem em relevo suave ondulado a plano. Apresentam boa capacidade de armazenamento de água e efluentes. As características desses solos estão expostas no Quadro I.6.

Os solos desta classe estão distribuídos em várias fases de relevo e têm ocorrência em todo o território brasileiro. Tais solos estão associados a Cambissolos em muitas áreas e são formados a partir de depósitos coluviais, apresentando como substratos as rochas metamórficas e ígneas e até sedimentos de naturezas diversas. Em função do relevo, podem ocorrer em relevo plano e suave ondulado, ondulado e forte ondulado, montanhoso e escarpado. Em relação ao caráter geotécnico, são solos não saturados que apresentam fração

argila de baixa atividade. No caso de relevo forte ondulado e montanhoso, é majorado o potencial de ocorrência de movimentos de massa, sendo recomendado que essas áreas sejam destinadas à preservação ambiental (ANTUNES *et al.*, 2013).

Quadro I.6 - Principais características da classe Latossolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Latossolos	Características
	solos bem desenvolvidos com B latossólico; profundos; avançado estágio de intemperização; textura muito argilosa ou argilosa ou média, dependendo do material de origem; apresentam características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas uniformes no perfil; variações desde solos predominantemente cauliníticos, com valores de Ki mais altos, em torno de 2,0, admitindo o máximo de 2,2, até solos oxídicos de Ki extremamente baixo.
Sequência de horizontes	A – Bw – C.
Coloração	vermelhas, vermelho-amarelas, amarelas, acinzentadas ou brunadas.
Ocorrência	ocorrem em todo o território brasileiro; representam aproximadamente 39% do território nacional.
Relevo	ocorrem em relevo plano e suave ondulado; ondulado; forte ondulado, montanhoso e escarpado.
Drenagem	fortemente a bem drenados.
Profundidade	muito profundos.
Material de origem	desenvolvidos a partir de depósitos coluviais, tendo como substratos rochas metamórficas e ígneas e até sedimentos de naturezas diversas.
Aspectos geotécnicos	solo não saturado, podendo ser o material de origem (substrato pedogenético) residual, transportado ou coluvial; bom indicador de materiais de empréstimo ou de jazidas para aterros compactados; baixa erodibilidade; boa capacidade de suporte, alta drenabilidade, expansividade nula, baixa compressibilidade; baixa saturação por bases e atividade da argila baixa.

Fonte: Autor (2024).

⇒ Luvisolos

São solos minerais não hidromórficos que apresentam horizonte B textural com argila de atividade alta e saturação por bases alta, imediatamente abaixo de horizonte A ou horizonte E. Variam de bem a imperfeitamente drenados e geralmente pouco profundos. Apresentam sequência de horizontes A, Bt e C com nítida diferenciação entre os horizontes A e Bt devido ao contraste de textura, cor e/ou estrutura entre eles. O horizonte Bt apresenta coloração avermelhada, amarelada e menos frequentemente brunada ou acinzentada. Os solos dessa

classe são moderadamente ácidos a ligeiramente alcalinos, com teores de alumínio extraível baixos ou nulos e com valores elevados para a relação molecular Ki no horizonte Bt, normalmente entre 2,4 e 4,0. Em quantidade variável, mas expressiva, constata-se a presença de argilominerais do tipo 2:1 (SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

Os Luvissolos (antigo Bruno não cálcico e alguns Podzólicos de alta atividade) são solos com ocorrência no território nacional em regiões de ambiente climático de baixa precipitação, bem como com distribuição em várias fases de relevo (plano e suave ondulado, ondulado e forte ondulado, montanhoso e escarpado). Sob o ponto de vista geotécnico, são não saturados que apresentam fração argila de alta atividade, presença de argilas expansivas (ANTUNES *et al.*, 2013; ANTUNES; SALOMÃO, 2018). As características desses solos estão expostas no Quadro I.7.

Quadro I.7 - Principais características da classe Luvissolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Luvissolos	Características
	solos com B textural, atividade alta da fração argila e saturação por bases alta; geralmente pouco profundos; argilominerais tipo 1:1 e 2:1; nítida diferenciação entre os horizontes A e Bt em função da cor, textura e estrutura; moderadamente ácidos a ligeiramente alcalinos; valores elevados para a relação molecular Ki no horizonte Bt, normalmente entre 2,4 e 4,0.
Sequência de horizontes	A – E – Bt – C – R ou A – Bt – C – R.
Coloração	avermelhada, amarelada e menos frequentemente brunada ou acinzentada.
Ocorrência	ocorrem no território nacional em regiões de ambiente climático de baixa precipitação, típico do ambiente semiárido; representam cerca de 3% do território brasileiro.
Relevo	ocorrem em plano e suave ondulado, ondulado e forte ondulado, montanhoso e escarpado.
Drenagem	bem a imperfeitamente drenados.
Profundidade	pouco profundos.
Material de origem	desenvolvidos de rochas metamórficas.
Aspectos geotécnicos	solo residual não saturado; alta erodibilidade; pouco profundo; presença comum de argila expansiva, e neste caso não favoráveis à utilização em aterros compactados; características geotécnicas dos materiais dependentes da natureza e composição do substrato rochoso.

Fonte: Autor (2024).

Para Marques *et al.* (2014) os Luvissolos são solos rasos a pouco profundos típicos do ambiente semiárido, rico em bases e com argila de atividade alta. Os referidos autores

afirmam que esses solos apresentam acúmulo de argila em subsuperfície, caracterizado pelo horizonte Bt. Em função da cor, textura e estrutura, essa classe possui nítida diferenciação entre os horizontes A e Bt. Apresenta sequência de horizontes do tipo: A – E – Bt – C – R ou A – Bt – C – R. No que se refere aos fatores limitadores, apresentam alta suscetibilidade à erosão, pedregosidade superficial comum, pequena profundidade efetiva, consistência muito dura quando secos, e muito pegajosa quando molhados, e risco de salinização e de solonização.

⇒ Neossolos

São solos pouco evoluídos constituídos por material mineral ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura, apresentando sequência de horizonte A-R, A-C-R, A-Cr-R, A-Cr, A-C, OR ou H-C. Essa classe não apresenta nenhum tipo de horizonte B diagnóstico. Esses solos não apresentam alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, tais como características inerentes ao próprio material de origem (como maior resistência ao intemperismo ou composição química mineralógica) ou influência dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo), essas condições podem impedir ou limitar a evolução dos solos (SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

Marques *et al.* (2014) resumem os Neossolos como sendo solos minerais pouco desenvolvidos com ausência do horizonte B diagnóstico. Em função de suas características singulares e de sua diversidade, são subdivididos em 4 (quatro) subordens, sendo eles:

- a. Neossolos Litólicos;
- b. Neossolos Regolíticos;
- c. Neossolos Flúvicos;
- d. Neossolos Quartzarênicos.

Os autores citados descrevem os Neossolos Litólicos como sendo solos rasos e geralmente pedregosos. A sequência de horizontes é do tipo: A – C – R ou A – R. Esses solos apresentam contato lítico dentro de 50 cm de profundidade, ou seja, contato direto com a rocha. São desenvolvidos de qualquer tipo de rocha, sendo associados comumente a um relevo movimentado. Quanto às limitações, são elencadas as seguintes: pequena profundidade efetiva e pequena capacidade de armazenamento de água, pedregosidade e rochosidade

generalizada e alta suscetibilidade à erosão. Antunes e Salomão (2018) afirmam que esses solos são encontrados em todo território brasileiro, associados a rochas cristalinas e sedimentares.

Em relação aos Neossolos Regolíticos, são solos típicos do ambiente semiárido do nordeste brasileiro. Apresentam textura arenosa a média, pequena diferenciação entre horizontes no perfil e sequência de horizontes do tipo: A – C – R ou A – C. De modo geral, esses solos têm uma drenagem de boa a moderada e ocorrem em relevo pouco movimentado. Essa subordem apresenta baixa capacidade de retenção de água, baixos teores de matéria orgânica e pequena profundidade efetiva, em alguns casos (MARQUES *et al.*, 2014).

Antunes e Salomão (2018) asseveram que os Neossolos Regolíticos ocorrem em áreas de rochas cristalinas em relevo forte ondulado ou montanhoso, em associação com Neossolos Litólicos e Cambissolos, bem como têm ocorrência em regiões de relevos plano e suave ondulado, desenvolvidos de depósitos sedimentares bastante arenosos sujeitos às condições ambientais climáticas com precipitação reduzida.

Os Neossolos Flúvicos são solos profundos derivados de sedimentos fluviais. Esses solos são estratificados com variação de textura e do teor de carbono orgânico em profundidade. Quanto à sequência de horizontes, é do tipo A – 2C1 – 3C2 – 4C3 – 5C4. Ocorrem em relevo plano e apresentam elevado risco de inundação periódica, salinização, solonização e restrição de drenagem (MARQUES *et al.*, 2014). Segundo Antunes e Salomão (2018), esses solos de origem fluvial têm ocorrência restrita às margens dos cursos de água, lagoas e planícies costeiras.

Por fim, os Neossolos Quartzarênicos, segundo Marques *et al.* (2014), consistem em solos derivados de rochas ou sedimentos de natureza predominantemente quartzosa. Em virtude disso, apresentam textura arenosa até 1,5 m de profundidade e ocorrem em relevo suave ondulado. A sequência de horizontes é do tipo A-C e o perfil desses solos tem pequena diferenciação entre horizontes.

Ainda segundo os referidos autores, desde forte a excessivamente drenado, os solos dessa subordem apresentam os seguintes fatores limitantes: baixa a muito baixa capacidade de retenção de água, fertilidade natural muito baixa, baixos teores de matéria orgânica e elevado risco de contaminação de águas subterrâneas. As características desses solos estão expostas no Quadro I.8.

Quadro I.8 - Principais características da classe Neossolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Neossolos	Características
	solos minerais pouco desenvolvidos com ausência do horizonte B diagnóstico; não apresentam alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos; ocupam várias fases de relevo; em função de sua diversidade e de suas características singulares são subdivididos em quatro subordens: Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos, Neossolos Quartzarênicos e Neossolos Flúvicos.
Sequência de horizontes	Neossolos Litólicos: A – C – R ou A – R; Neossolos Regolíticos: A – C – R ou A – C; Neossolos Flúvicos: A – 2C1 – 3C2 – 4C3 – 5C4; Neossolos Quartzarênicos: A-C.
Ocorrência	Neossolos Litólicos: encontrados em todo território brasileiro; Neossolos Regolíticos: solos típicos do ambiente semiárido do nordeste brasileiro; Neossolos Flúvicos: ocorrência restrita às margens dos cursos de água, lagoas e planícies costeiras; Neossolos Quartzarênicos: ocorrem em praticamente todos os estados brasileiros. Esses solos representam aproximadamente 15% do território brasileiro.
Relevo	Neossolos Litólicos: relevo movimentado; Neossolos Regolíticos: relevo pouco movimentado; Neossolos Flúvicos: relevo plano; Neossolos Quartzarênicos: relevo suave ondulado.
Drenagem	Neossolos Litólicos: bem a acentuadamente drenados; Neossolos Regolíticos: bem a moderadamente drenados; Neossolos Flúvicos: mal drenados; Neossolos Quartzarênicos: forte a excessivamente drenados.
Profundidade	Neossolos Litólicos: rasos; Neossolos Regolíticos: pouco profundos; Neossolos Flúvicos: profundos; Neossolos Quartzarênicos: profundos.
Material de origem	Neossolos Litólicos: solos rasos e geralmente pedregoso, desenvolvidos de qualquer tipo de rocha; Neossolos Regolíticos: solos com contato lítico, formados por quartzo e pelos feldspatos (ortoclásios e plagioclásios); Neossolos Flúvicos: solos profundos, derivados de sedimentos fluviais; Neossolos Quartzarênicos: solos sem contato lítico, derivados de rochas ou sedimentos de natureza predominantemente quartzosa.

Fonte: Autor (2024).

⇒ Nitossolos

Trata-se de solos minerais que apresentam horizonte B nítico abaixo do horizonte A, com argila de atividade baixa ou atividade alta. Apresentam textura argilosa ou muito

argilosa, com teores de argila iguais ou maiores que 350 g kg^{-1} de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) desde a superfície do solo, estrutura em blocos subangulares ou angulares ou prismática, de grau moderado ou forte, com cerosidade expressiva e/ou caráter retrátil. Quando possuem o caráter aluminico conjugado com argila de atividade alta, apresentam mineralogia da argila com presença de argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

Segundo Antunes *et al.* (2013), os Nitossolos (antigos Terra Roxa Estruturada Similar e Podzólico Vermelho Escuro) apresentam cerosidade forte, ocorrem em várias fases de relevo e derivam principalmente de rochas ígneas basálticas, sendo possível seu desenvolvimento decorrente de rochas sedimentares. Sob o aspecto geotécnico, são solos não saturados com fração argila que, caso seja desenvolvida de rochas básicas, pode ser rica em óxido de ferro. As características desses solos estão expostas no Quadro I.9.

Quadro I.9 - Principais características da classe Nitossolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Nitossolos	Características
	solos bem desenvolvidos com horizonte B nítico abaixo do horizonte A, com argila de atividade baixa ou atividade alta; em geral, apresentam altos teores de argila (>35%) com atividade baixa; cerosidade expressiva e/ou caráter retrátil; são, em geral, de moderadamente ácidos a ácidos; apresentam textura argilosa ou muito argilosa e relação textural igual ou menor que 1,5.
Sequência de horizontes	A – Bt – C.
Coloração	variando de vermelha a brunada.
Ocorrência	comuns nas áreas de solos formados de basaltos no centro-sul do Brasil; representam aproximadamente 1,5% do território nacional.
Relevo	ocorrem em relevo forte ondulado e montanhoso.
Drenagem	bem drenados.
Profundidade	pouco profundos.
Material de origem	derivados de rochas básicas ou de sedimentos argilosos e/ou calcários.
Aspectos geotécnicos	solos não saturados, pouco profundos; moderada erodibilidade, e com possibilidade de ocorrer nos horizontes B e C argilas expansivas; não apropriados a jazidas de materiais para aterros compactados tendo em vista serem em geral muito argilosos; boa capacidade de suporte e pouco compressivos.

Fonte: Autor (2024).

Marques *et al.* (2014) os descrevem como solos profundos e bem desenvolvidos que apresentam baixo gradiente textural e horizonte B nítico. De maneira geral, esses solos apresentam altos teores de argila (>35%) com atividade baixa. Possuem estrutura forte ou moderada, com presença de cerosidade expressiva e cor uniforme ao longo do perfil. A sequência de horizontes é do tipo A – Bt – C. Apresentam boa capacidade de armazenamento de água e risco de erosão laminar.

⇒ Organossolos

Segundo Santos *et al.* (2018), os Organossolos consistem em solos pouco evoluídos, que apresentam preponderância de material orgânico. São solos de coloração preta, cinzenta muito escura ou brunada, resultantes de acumulação de resíduos vegetais, em graus variáveis de decomposição. Essa classe engloba solos com horizontes de constituição orgânica (H ou O). Geralmente, são solos fortemente ácidos, apresentando alta capacidade de troca de cátions e baixa saturação por bases. Normalmente, ocorrem em áreas baixas de várzeas, depressões e locais de surgentes.

Do ponto de vista de Marques *et al.* (2014), os solos em tela apresentam as seguintes características: solos pouco desenvolvidos, elevado teor de matéria orgânica, densidade de solo baixa, cores escuras, alta capacidade de retenção de água, contração quando seco, difícil reumedecimento e sequência de horizontes do tipo: H; H – 2Cg ou O – R. No tocante às limitações, podem ser citadas as seguintes: problemas de drenagem; risco de acidez extrema, se drenados incorretamente; risco de incêndios e de alagamentos; e risco de subsidência em função da drenagem.

Os Organossolos ocorrem em áreas de relevo plano, encontrados em regiões mais baixas ou deprimidas e mal drenadas das várzeas. Em áreas úmidas da orla marinha, em pântanos ou banhados, ocorrem os orgânicos tiomórficos. Sob o ponto de vista geotécnico, são solos saturados com alto teor de matéria orgânica, podendo permanecer permanentemente ou esporadicamente alagados. Esses solos podem conter sais solúveis, materiais sulfídricos e sulfetos. Na geotecnia são conhecidos como solos orgânicos, apresentando suscetibilidade a grandes deformações e potencial de corrosão (ANTUNES *et al.*, 2013; ANTUNES; SALOMÃO, 2018). As características desses solos estão expostas no Quadro I.10.

Quadro I.10 - Principais características da classe Organossolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Organossolos	Características
	solos pouco evoluídos que apresentam preponderância de material orgânico; mínimo de 8% de carbono orgânico (80g/Kg); contrai-se quando seco e é de difícil reumedecimento; horizonte diagnóstico hístico; densidade de solo baixa; fortemente ácidos, apresentando alta capacidade de troca de cátions e baixa saturação por bases.
Sequência de horizontes	H; H – 2Cg ou O – R.
Coloração	preta, cinzenta muito escura ou brunada.
Ocorrência	geralmente associados às regiões Sudeste e Sul do Brasil; ocorrem de forma muito dispersa, em pequenas manchas, não constituindo áreas representativas em escalas pequenas.
Relevo	ocorrem em relevo plano.
Drenagem	mal e muito mal drenados.
Profundidade	pouco profundos.
Material de origem	desenvolvidos preponderantemente de detritos orgânicos em vários estádios de decomposição.
Aspectos geotécnicos	solos orgânicos saturados; alta erodibilidade, apresentando possibilidades de desenvolver boçorocas se o aquífero freático for interceptado por ravinas; baixa capacidade de suporte, normalmente expansivos, e compressíveis.

Fonte: Autor (2024).

⇔ Planossolos

Compreendem solos minerais com horizonte A ou E seguido de horizonte B plânico. Esses solos são imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve, que contrasta abruptamente com o horizonte B imediatamente subjacente. Essa classe apresenta diferenciação bem acentuada entre os horizontes A ou E e o B, devido à mudança textural abrupta ou com transição abrupta conjugada com acentuada diferença de textura do horizonte A para o B (SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

Para Marques *et al.* (2014), os Planossolos são solos que apresentam acúmulo significativo de argila em subsuperfície (horizonte B plânico). Afirmam que o horizonte B possui estrutura colunar, prismática, em blocos, maciça ou combinações dessas formas. Quanto à coloração, apresentam cor pálida. Ocorrem predominantemente em relevo suave ondulado e plano. No que se refere à sequência de horizontes, é do tipo A – E – Bt – C – R ou A – E – 2Bt – 2C – 2R. Essa classe apresenta os seguintes fatores limitantes: drenagem restrita, alta suscetibilidade à erosão, elevado risco de salinização e de solonização,

consistência dura a extremamente dura do horizonte B plânico, pequena profundidade efetiva e pedregosidade superficial. As características desses solos estão expostas no Quadro I.11.

Quadro I.11 - Principais características da classe Planossolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Planossolos	Características
	solos minerais com horizonte B plânico, subjacente a qualquer tipo de horizonte A, podendo ou não apresentar horizonte E (álbico ou não); acúmulo significativo de argila em subsuperfície (horizonte B plânico); diferença textural entre o horizonte superficial e sub-superficial pode torná-los suscetíveis à erosão; podem apresentar hidromorfismo; apresentam argilominerais do tipo 2:1 em alguns casos.
Sequência de horizontes	A – E – Bt – C – R ou A – E – 2Bt – 2C – 2R.
Coloração	pálida.
Ocorrência	predominância no nordeste brasileiro e no pantanal Mato-Grossense; representam aproximadamente 2% do território nacional.
Relevo	ocorrem em relevo suave ondulado e plano.
Drenagem	imperfeitamente a mal drenado.
Profundidade	pouco profundos.
Material de origem	desenvolvidos de sedimentos areno-argilosos e argilosos.
Aspectos geotécnicos	indicativo de solos transportados, podendo também ser residual, saturado apenas durante o período chuvoso do ano; alta erodibilidade; sujeito a alagamentos; não indicado à utilização em aterros compactados por serem em subsuperfície muito argilosos e com possibilidade de apresentar argila expansiva; podem apresentar baixa capacidade de suporte e serem compressíveis.

Fonte: Autor (2024).

O horizonte B plânico é compacto, apresentando acentuada concentração de argila e baixa permeabilidade. As ocorrências mais expressivas desses solos estão em terrenos sedimentares com áreas de relevo plano, tendo predominância no nordeste brasileiro e no pantanal Mato-Grossense. A característica marcante dessa classe é a diferença textural entre os horizontes superficial e subsuperficial, tornando-os suscetíveis à erosão superficial. Apresentam argilominerais do tipo 2:1 em alguns casos (ANTUNES *et al.*, 2013; ANTUNES; SALOMÃO, 2018).

⇒ Plintossolos

Segundo Santos *et al.* (2018), compreendem solos minerais que possuem horizonte plíntico, litoplíntico ou concrecionário. São formados sob condições de restrição à percolação

da água sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade. Em geral, são imperfeitamente ou mal drenados. No tocante à coloração, constata-se o predomínio de cores pálidas com ou sem mosqueados de cores alaranjadas a vermelhas ou coloração variegada, acima do horizonte diagnóstico. São solos fortemente ácidos, com saturação por bases baixa e atividade da fração de argila baixa. Esses solos são típicos de zonas quentes e úmidas.

Os Plintossolos apresentam textura variável e ocorrem nos terços inferiores de encostas e nas bordas de chapadas e tabuleiros. Seu desenvolvimento está associado aos efeitos dos ciclos alternados de umedecimento e secagem atuais ou pretéritos. A sequência de horizontes é do tipo A – E – Btf – C – R; A – Bwf ou Bif – C; A – Cf – C ou A – F – C. Essa classe apresenta drenagem imperfeita a má, pedregosidade e camadas de impedimento; e baixa disponibilidade de água quando concrecionário (MARQUES *et al.*, 2014).

Quadro I.12 - Principais características da classe Plintossolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Plintossolos	Características
	solos minerais apresentando horizonte plântico, litoplântico ou concrecionário; presença de plintita (material pobre em matéria orgânica, argiloso, rico em ferro); típicos de zonas quentes e úmidas; textura variável e com argila, comumente, de atividade baixa.
Sequência de horizontes	A – E – Btf – C – R; A – Bwf ou Bif – C; A – Cf – C ou A – F – C.
Coloração	predomínio de cores pálidas com ou sem mosqueados de cores alaranjadas a vermelhas ou coloração variegada.
Ocorrência	ocorrem nos terços inferiores de encostas e nas bordas de chapadas e tabuleiros; representam aproximadamente 6% do território nacional.
Relevo	ocorrem em relevos plano ou suave ondulado ou em áreas deprimidas e planícies aluvionares ou em relevo ondulado (menos comum).
Drenagem	imperfeitamente ou mal drenados.
Profundidade	pouco profundos.
Material de origem	desenvolvidos de sedimentos em várias fases de evolução ou de rochas ricas em ferro, contendo em subsuperfície desde materiais mosqueados com plintitas até petroplintita.
Aspectos geotécnicos	características geotécnicas variáveis dependendo da profundidade da camada de impedimento de drenagem e dos ambientes de ocorrência, podendo ocorrer em ambientes hidromórficos oxidados e apresentar ou não petroplintia (couraça ferruginosa); fortemente influenciados pelo lençol freático.

Fonte: Autor (2024).

São formados em ambiente hidromórfico e apresentam coloração variegada. À luz da Geotecnia, são solos desenvolvidos de sedimentos em várias fases de evolução ou de rochas ricas em ferro, contendo em subsuperfície desde materiais mosqueados com plintitas até petroplintita. As características geotécnicas estão condicionadas ao seu grau de desenvolvimento e aos ambientes de ocorrência (ANTUNES *et al.*, 2013; ANTUNES; SALOMÃO, 2018).

⇒ Vertissolos

Trata-se de solos minerais com horizonte vértico entre 25 e 100 cm de profundidade e pequena variação textural ao longo do perfil, insuficiente para caracterizar um horizonte B textural. Constatam-se nessa classe acentuadas mudanças de volume em decorrência do aumento do teor de água no solo. Na época seca, verificam-se fendas profundas, bem como evidências de movimentação da massa do solo sob a forma de superfícies de fricção, conhecidas como *slickensides* (SANTOS, H. G. *et al.*, 2018).

Ainda segundo os referidos autores, devido à presença comum de argilas expansíveis ou mistura destas com outros argilominerais, esses solos são de consistência muito plástica e muito pegajosa. No que concerne à drenagem, variam de imperfeitamente a mal drenados, sendo, ocasionalmente, moderadamente drenados. Em relação à coloração, podem ser escuros, acinzentados, amarelados ou avermelhados. No que concerne à profundidade, variam de pouco profundos a profundos, embora seja possível constatar enquadramento como rasos.

Marques *et al.* (2014) descrevem os Vertissolos como sendo solos pouco desenvolvidos com presença obrigatória do horizonte vértico. São solos argilosos a muito argilosos que apresentam alto teor de argilas expansivas e de bases trocáveis, com pronunciada mudança de volume devido à alteração do teor de água. A característica marcante dessa classe é a presença de superfícies de fricção (*slickensides*) e a abertura de fendas no período seco. Quanto à sequência de horizontes, é do tipo A – Cv – C – R; A – Cv – C ou A – Bv – C – R.

No tocante aos fatores limitadores, os autores mencionados elencam os seguintes: elevada plasticidade e pegajosidade, risco de salinização e de solonização, consistência dura a extremamente dura, dificuldade de manejo do solo com uso de máquinas e danos em construções e benfeitorias rurais. As características desses solos estão expostas no Quadro I.13.

São desenvolvidos de material de origem ricos em Cálcio e Magnésio. Sua maior ocorrência está na zona seca do nordeste brasileiro e no pantanal Mato-Grossense. Esses solos ocorrem em relevo plano e suave ondulado. Verifica-se no horizonte vértico a presença de argila 2:1, com comportamento de expansão e de contração acentuado. A fração argila é superior ou igual a 30%. Em termos geotécnicos, compreendem solos que apresentam mudança de volume devido às variações de umidade, podendo resultar em trincas profundas ao longo do perfil em períodos de secas. Constatam-se teores variáveis de minerais do grupo das esmectitas nas frações finas desses solos. Estão sujeitos a variações de volume sazonais e são mal drenados e de baixa permeabilidade (ANTUNES *et al.*, 2013).

Quadro I.13 - Principais características da classe Vertissolos, adaptado de Antunes *et al.* (2013), Marques *et al.* (2014), Antunes e Salomão (2018) e Santos *et al.* (2018).

Vertissolos	Características
	solos argilosos a muito argilosos com alto teor de argilas expansivas e de bases trocáveis, com pronunciada mudança de volume conforme o teor de água; solos com horizonte vértico; acentuadas mudanças de volume em decorrência do aumento do teor de água no solo; teor de argila $\geq 30\%$; apresentam feições marcantes como superfícies de fricção (<i>slickensides</i>) e abertura de fendas no período seco; alta relação K_i ($> 2,0$).
Sequência de horizontes	A – Cv – C – R; A – Cv – C ou A – Bv – C – R.
Coloração	escuras, acinzentadas, amareladas ou avermelhadas.
Ocorrência	maior ocorrência está na zona seca do nordeste brasileiro e no pantanal Mato-Grossense; representam aproximadamente 2% do território nacional.
Relevo	ocorrem em relevo plano e suave ondulado.
Drenagem	imperfeitamente a mal drenados.
Profundidade	pouco profundos a profundos.
Material de origem	desenvolvidos de material de origem ricos em Cálcio e Magnésio.
Aspectos geotécnicos	origem sedimentar e residual, sendo indicativo de ocorrência de argilomineral expansivo, sujeitos a deformações acentuadas em presença de variações de umidade.

Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE J - DADOS TABULARES CONSOLIDADOS

Os dados tabulares utilizados neste trabalho estão consolidados em uma única planilha do *Google*, denominada Dados Consolidados. Essa planilha é composta por várias páginas que abordam um tema específico, estando nomeadas da seguinte forma:

- ⇒ [1]U.EX.PED - apresenta as unidades exclusivas constatadas na tabela de atributos do mapa pedológico;
- ⇒ [2]T.AT.PED - são expostos os dados contidos na tabela de atributos do mapa pedológico (2852 registros e 20 campos);
- ⇒ [3]A.TR.PED - contém a tabela de atributos com os dados reproduzidos, processados e tratados do mapa pedológico em conformidade com os critérios conservador e ponderado (3424 registros e 41 campos);
- ⇒ [4]T.AT.CLI - são expostos os dados contidos na tabela de atributos do mapa climatológico (9 registros e 3 campos);
- ⇒ [5]A.TR.CLI - contém a tabela de atributos com os dados reproduzidos, processados e tratados do mapa climatológico (128 registros e 8 campos);
- ⇒ [6]C.B.COL - apresenta a relação dos campos que constituem o BANDASE referente aos solos colapsíveis;
- ⇒ [7]C.B.EXP - apresenta a relação dos campos que constituem o BANDASE referente aos solos expansivos;
- ⇒ [8]B.D.COL - apresenta o banco de dados pertinente aos solos colapsíveis;
- ⇒ [9]B.D.EXP - apresenta o banco de dados pertinente aos solos expansivos.

O Quadro J.1 apresenta as formas de acesso à planilha. O acesso pode ser realizado mediante clique na imagem ilustrativa, no link ou pela leitura de QR Code.

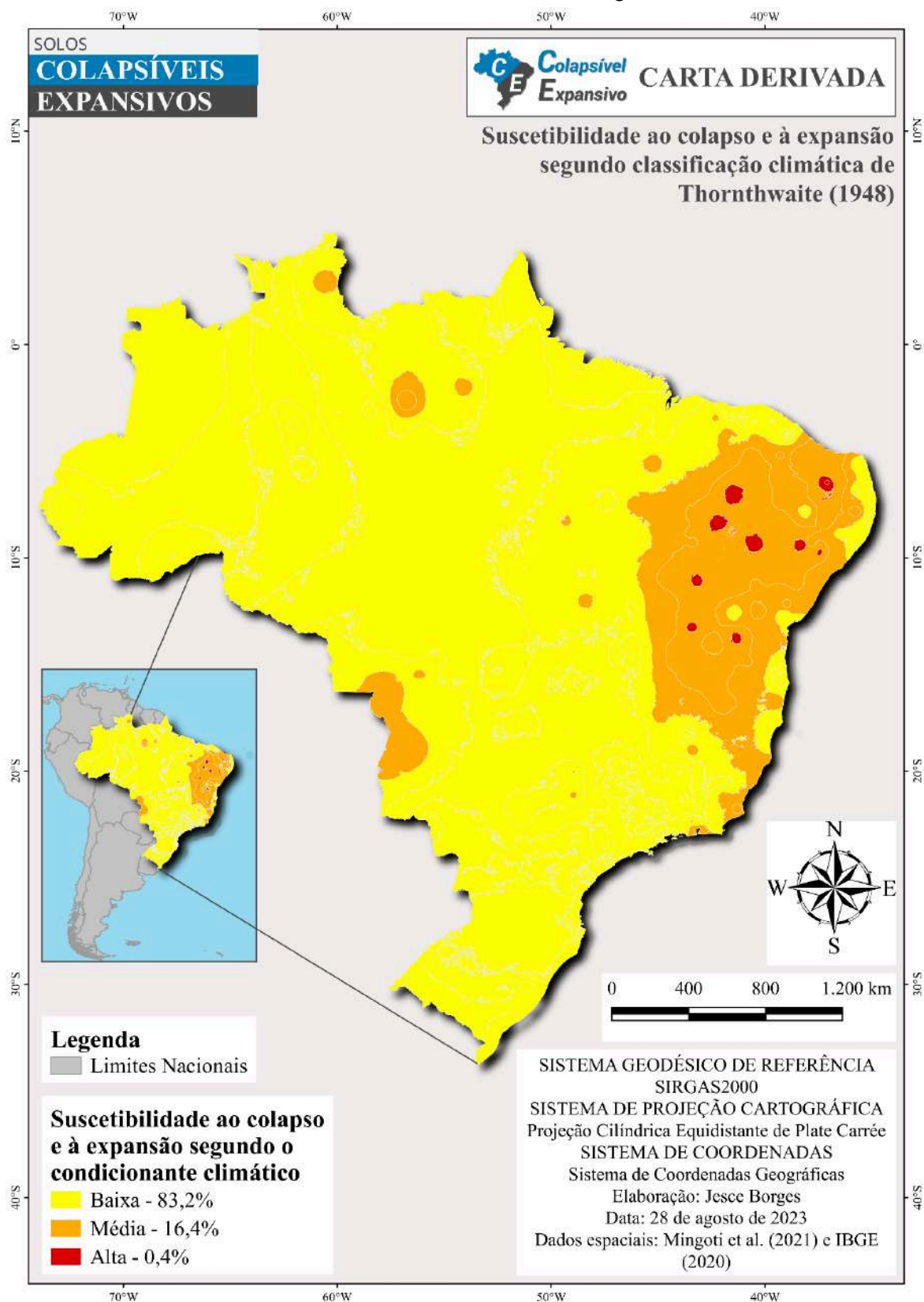
Quadro J.1 - Disponibilização dos dados tabulares utilizados neste trabalho.

Descrição	Ilustração	Link	QR Code
Dados Consolidados		https://docs.google.com/spreadsheets/d/17GPqY4VkgLPbKLfQc9X8ZS1Rsm3ivC3Upccu-XQewvE/edit?usp=sharing	

Fonte: Autor (2024).

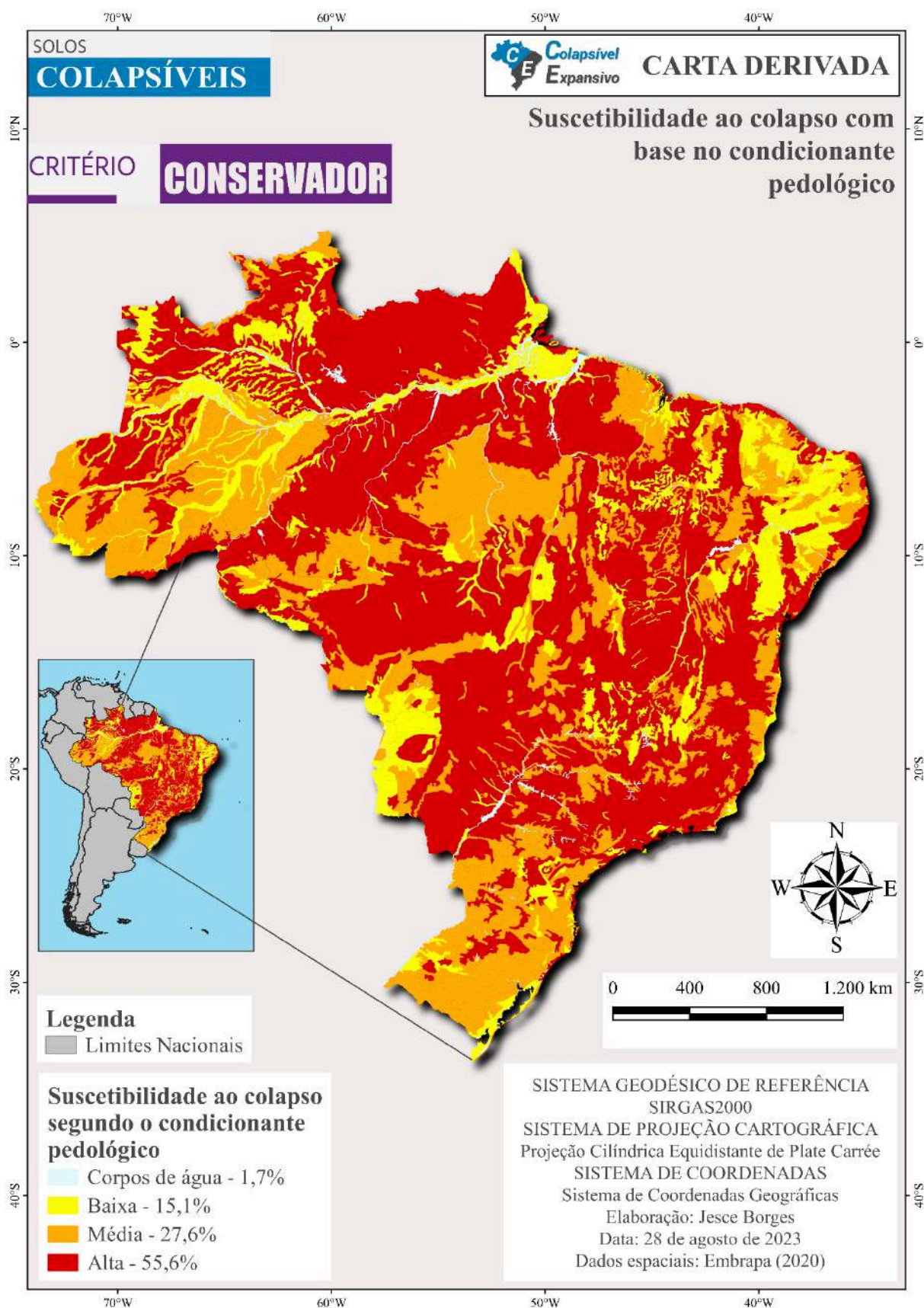
APÊNDICE K - PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

Figura K.1 - Carta derivada referente à suscetibilidade ao colapso e à expansão segundo o condicionante climatológico.



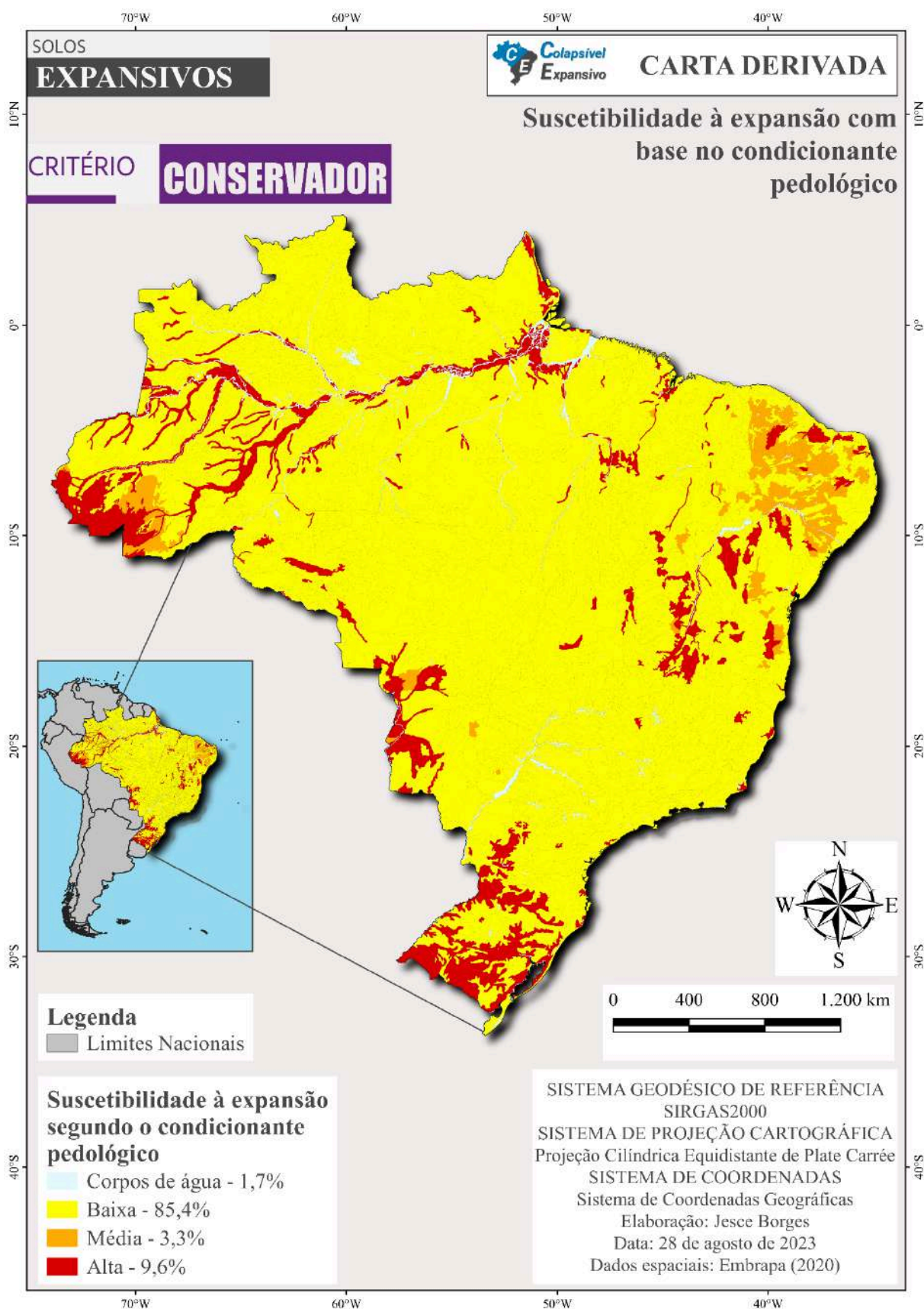
Fonte: Autor (2024).

Figura K.2 - Carta derivada pedológica referente à suscetibilidade ao colapso segundo o critério conservador.



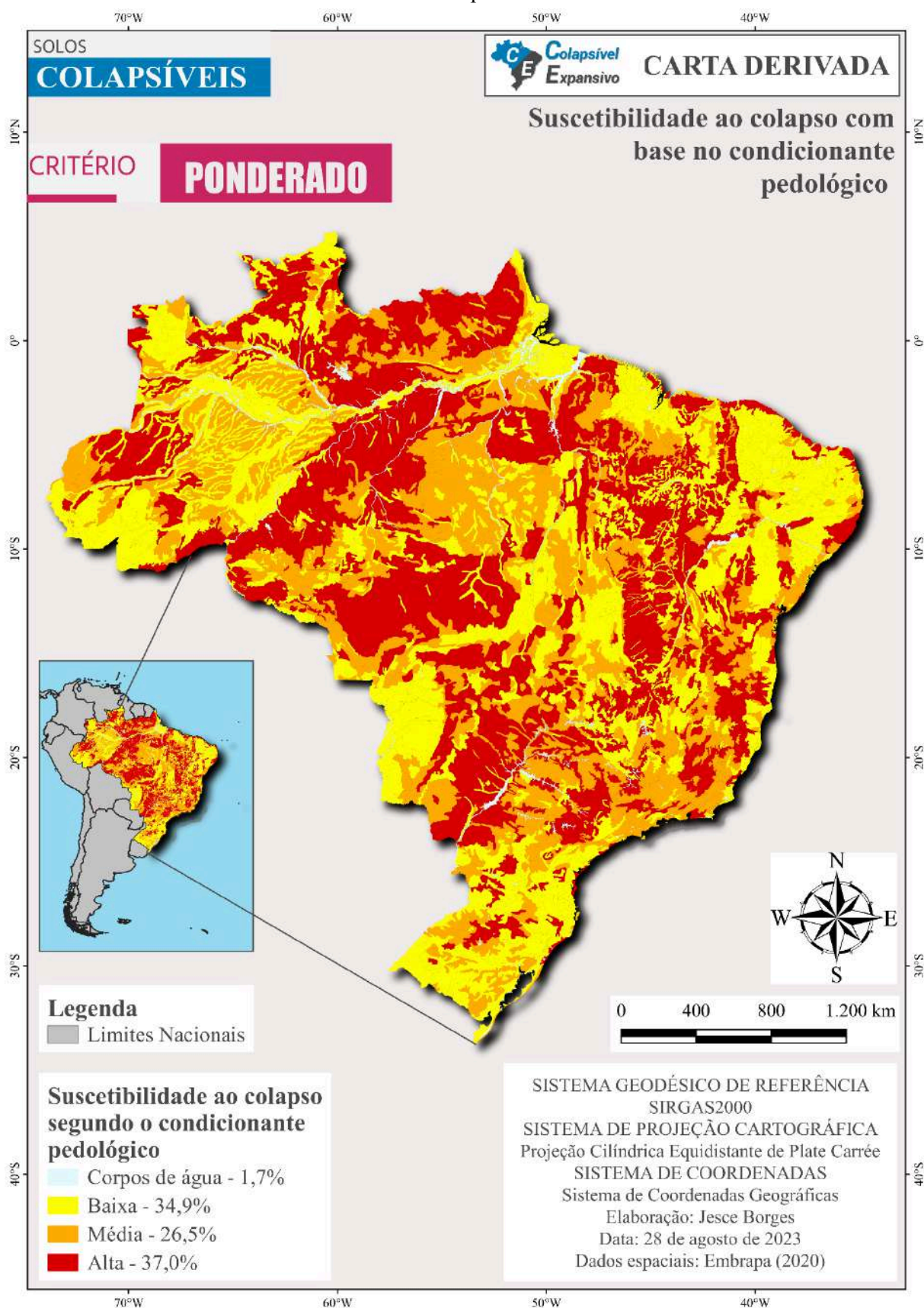
Fonte: Autor (2024).

Figura K.3 - Carta derivada pedológica referente à suscetibilidade à expansão segundo o critério conservador.



Fonte: Autor (2024).

Figura K.4 - Carta derivada pedológica referente à suscetibilidade ao colapso segundo o critério ponderado.



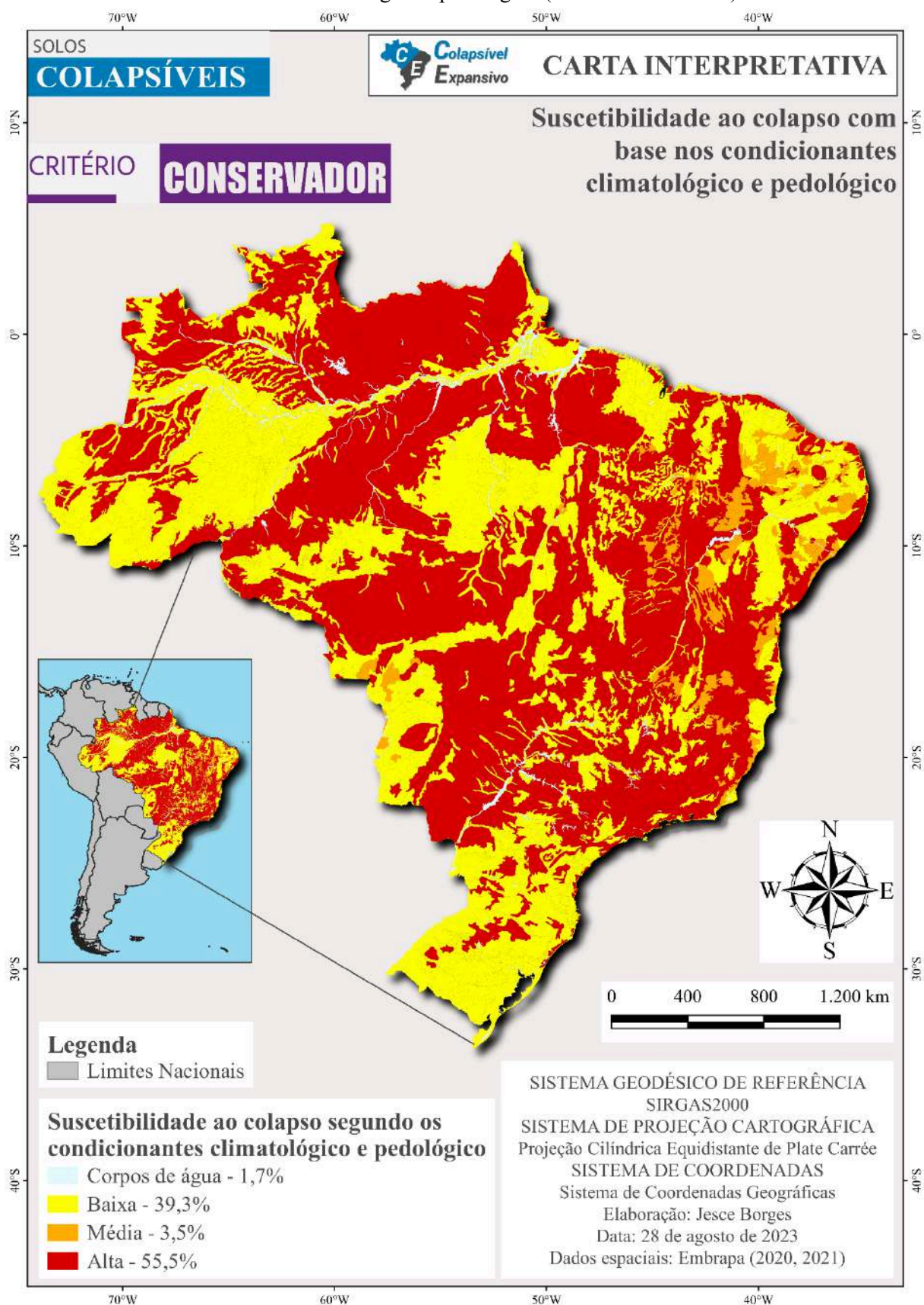
Fonte: Autor (2024).

Figura K.5 - Carta derivada pedológica referente à suscetibilidade à expansão segundo o critério ponderado.



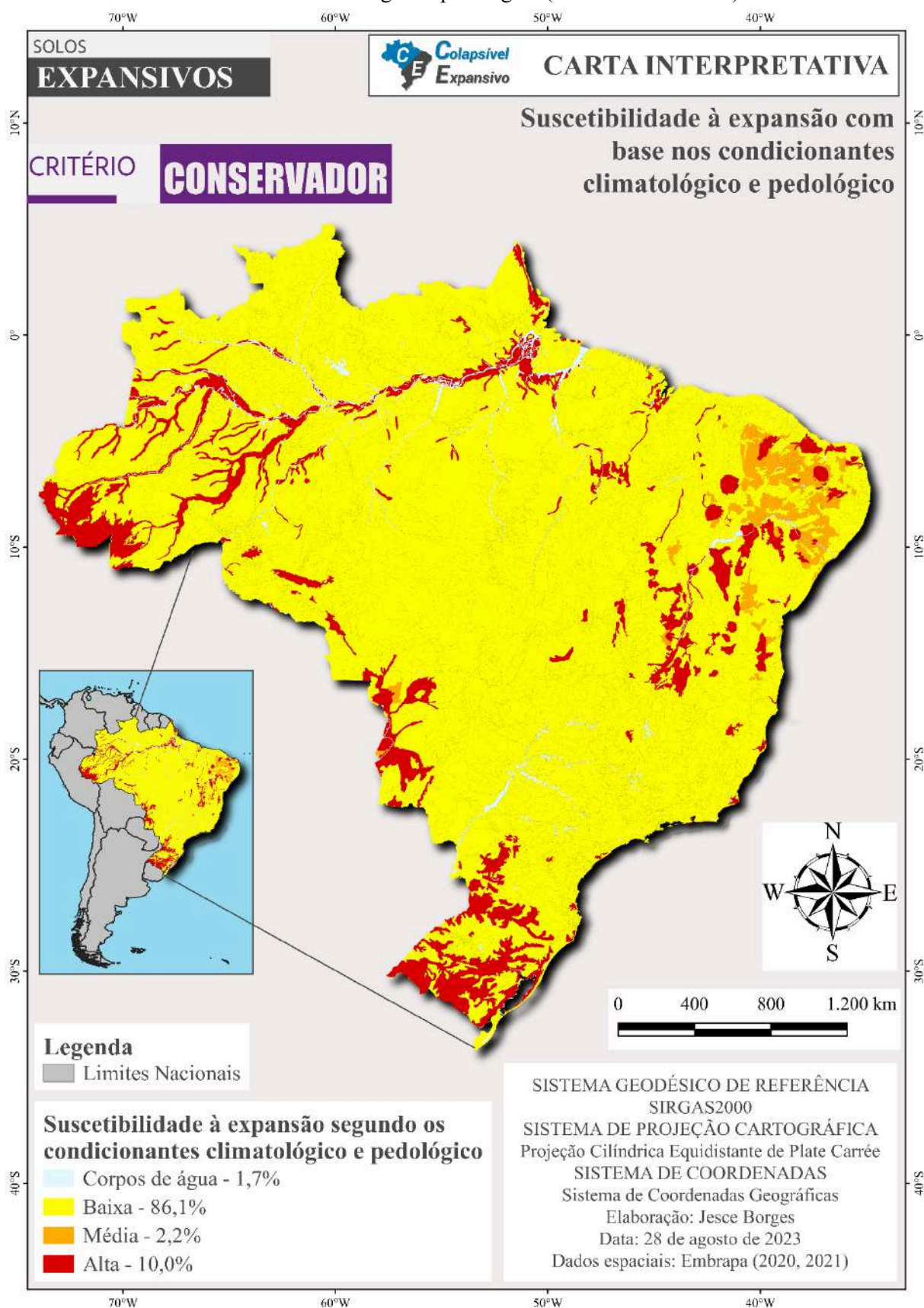
Fonte: Autor (2024).

Figura K.6 - Carta interpretativa referente à suscetibilidade ao colapso segundo os condicionantes climatológico e pedológico (critério conservador).



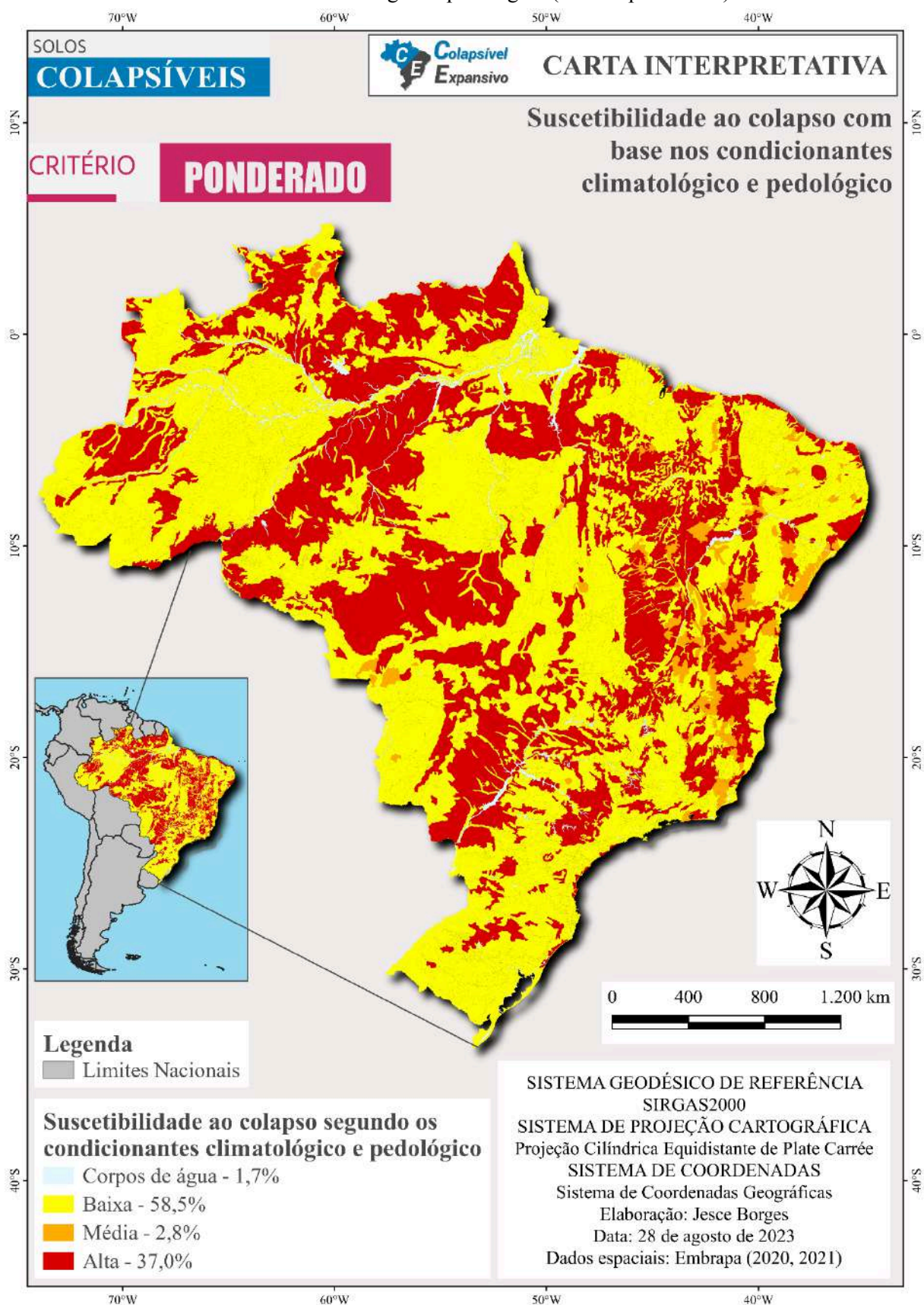
Fonte: Autor (2024).

Figura K.7 - Carta interpretativa referente à suscetibilidade à expansão segundo os condicionantes climatológico e pedológico (critério conservador).



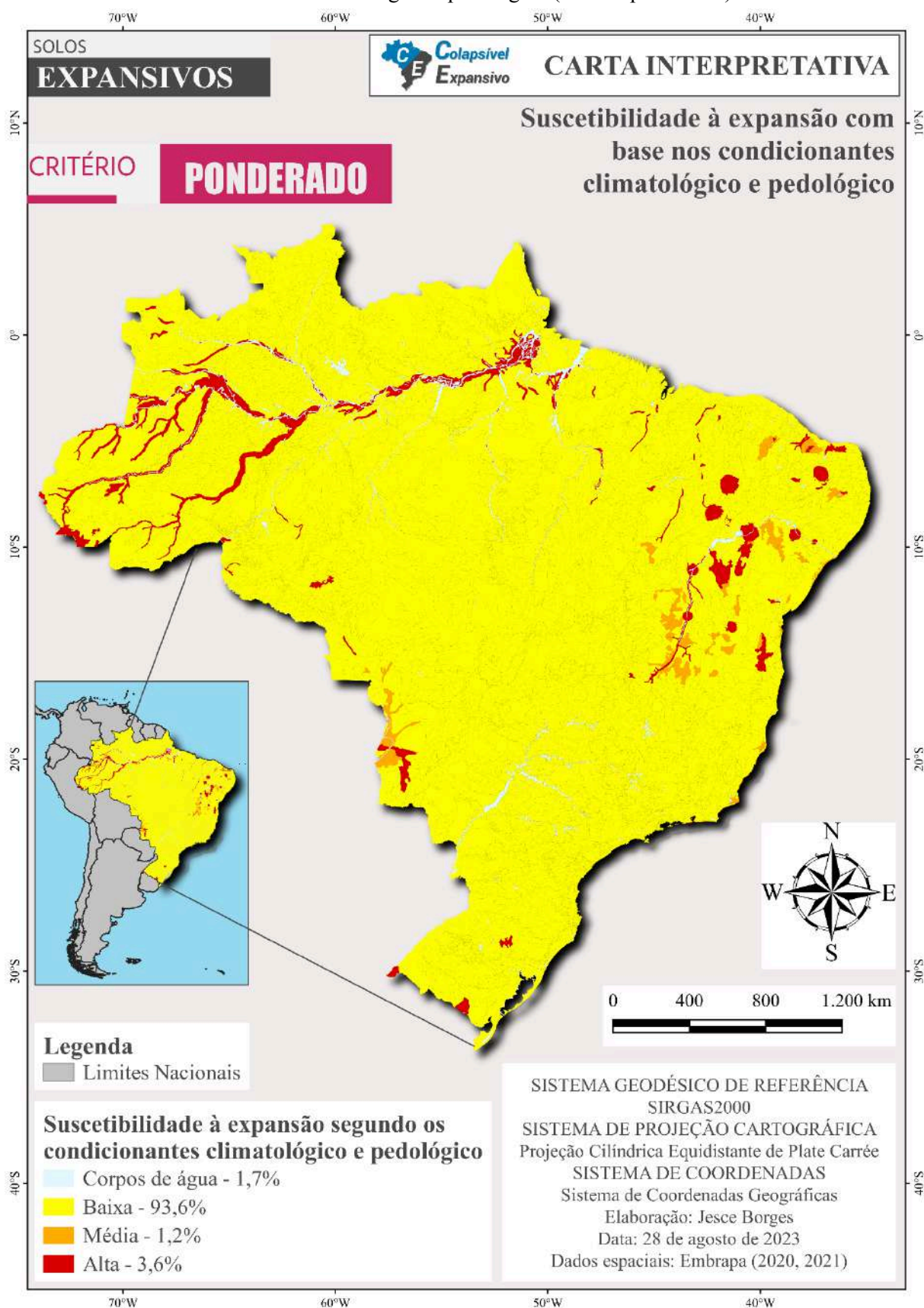
Fonte: Autor (2024).

Figura K.8 - Carta interpretativa referente à suscetibilidade ao colapso segundo os condicionantes climatológico e pedológico (critério ponderado).



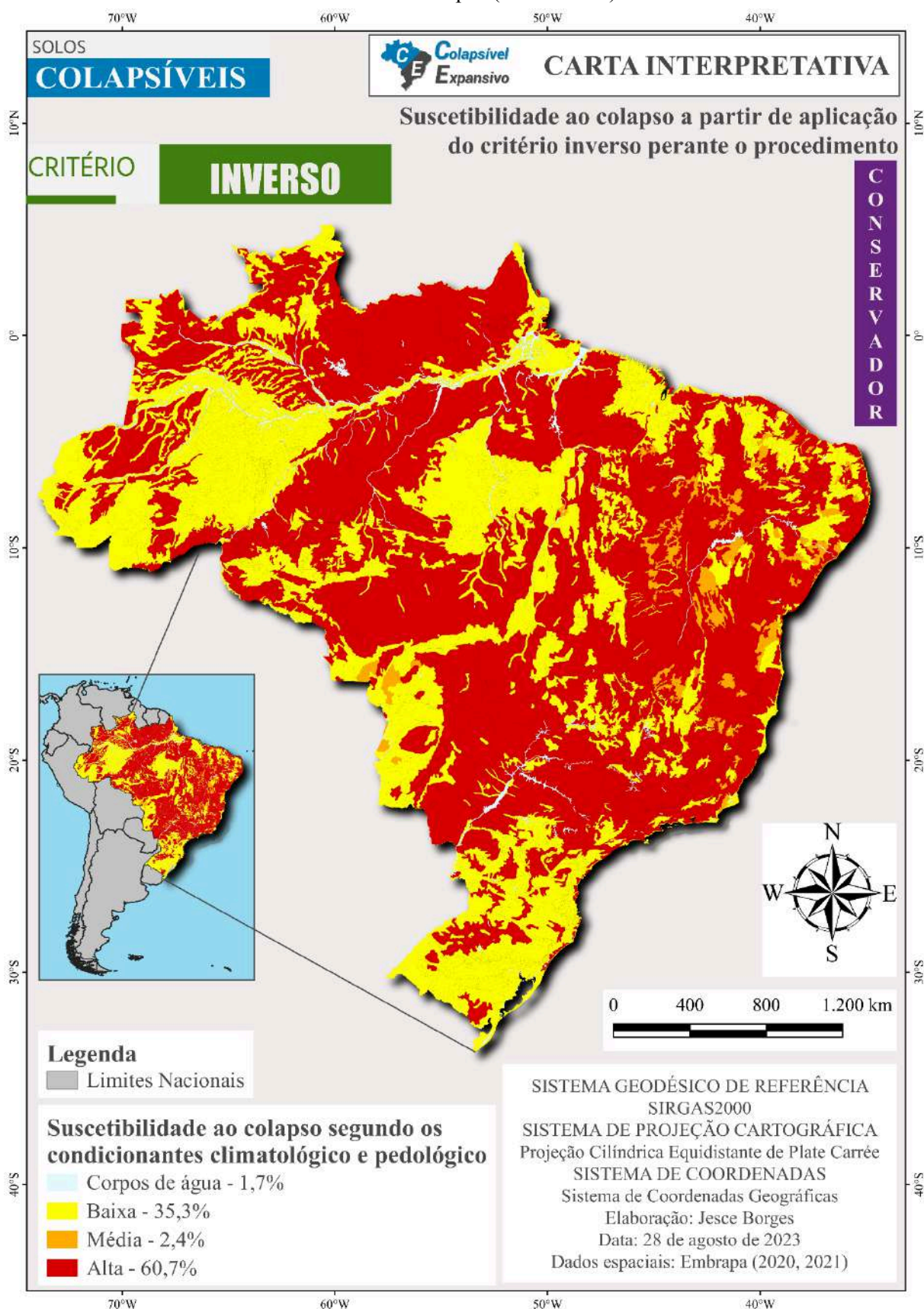
Fonte: Autor (2024).

Figura K.9 - Carta interpretativa referente à suscetibilidade à expansão segundo os condicionantes climatológico e pedológico (critério ponderado).



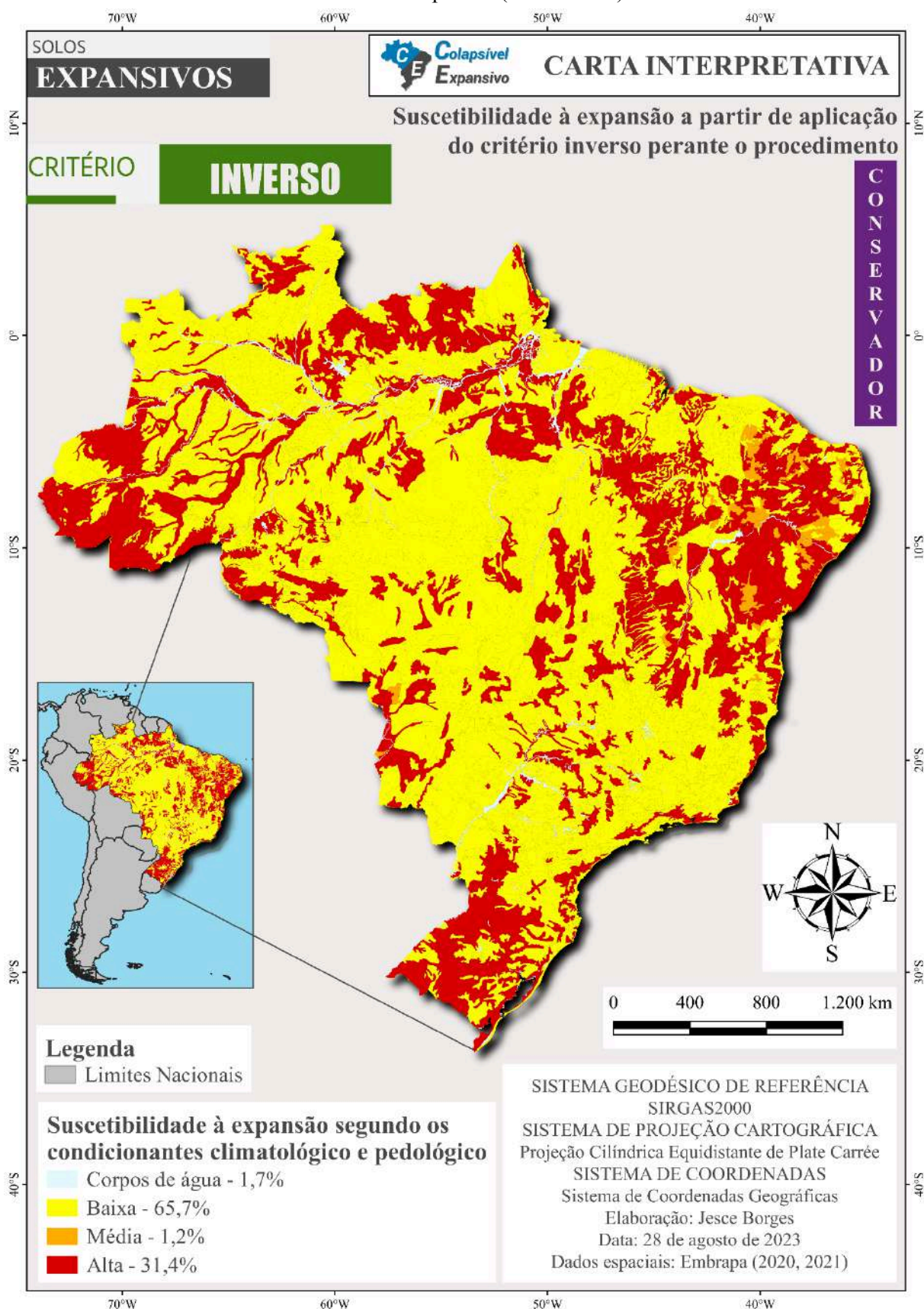
Fonte: Autor (2024).

Figura K.10 - Carta interpretativa resultante da aplicação do critério inverso para a suscetibilidade ao colapso (conservador).



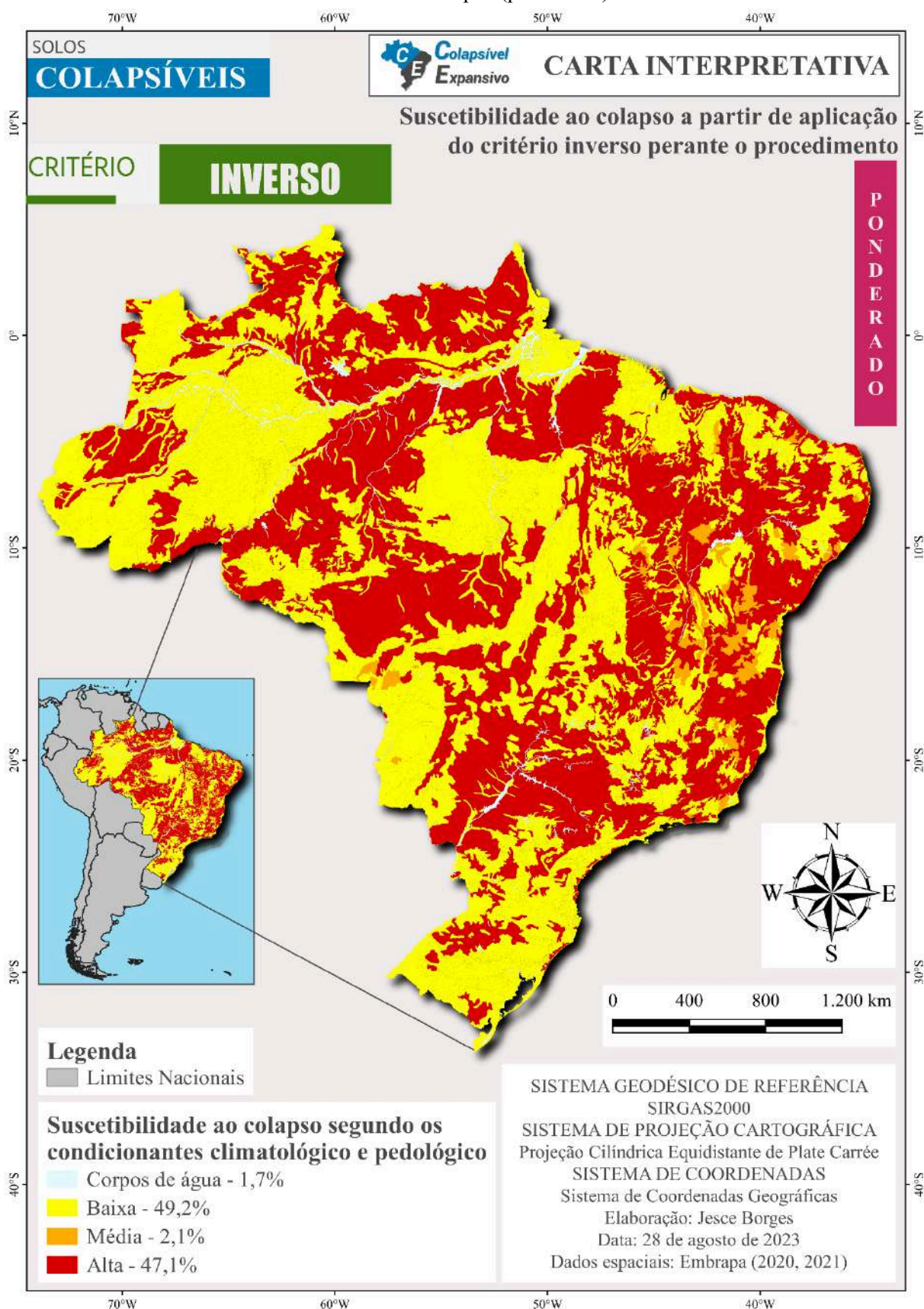
Fonte: Autor (2024).

Figura K.11 - Carta interpretativa resultante da aplicação do critério inverso para a suscetibilidade à expansão (conservador).



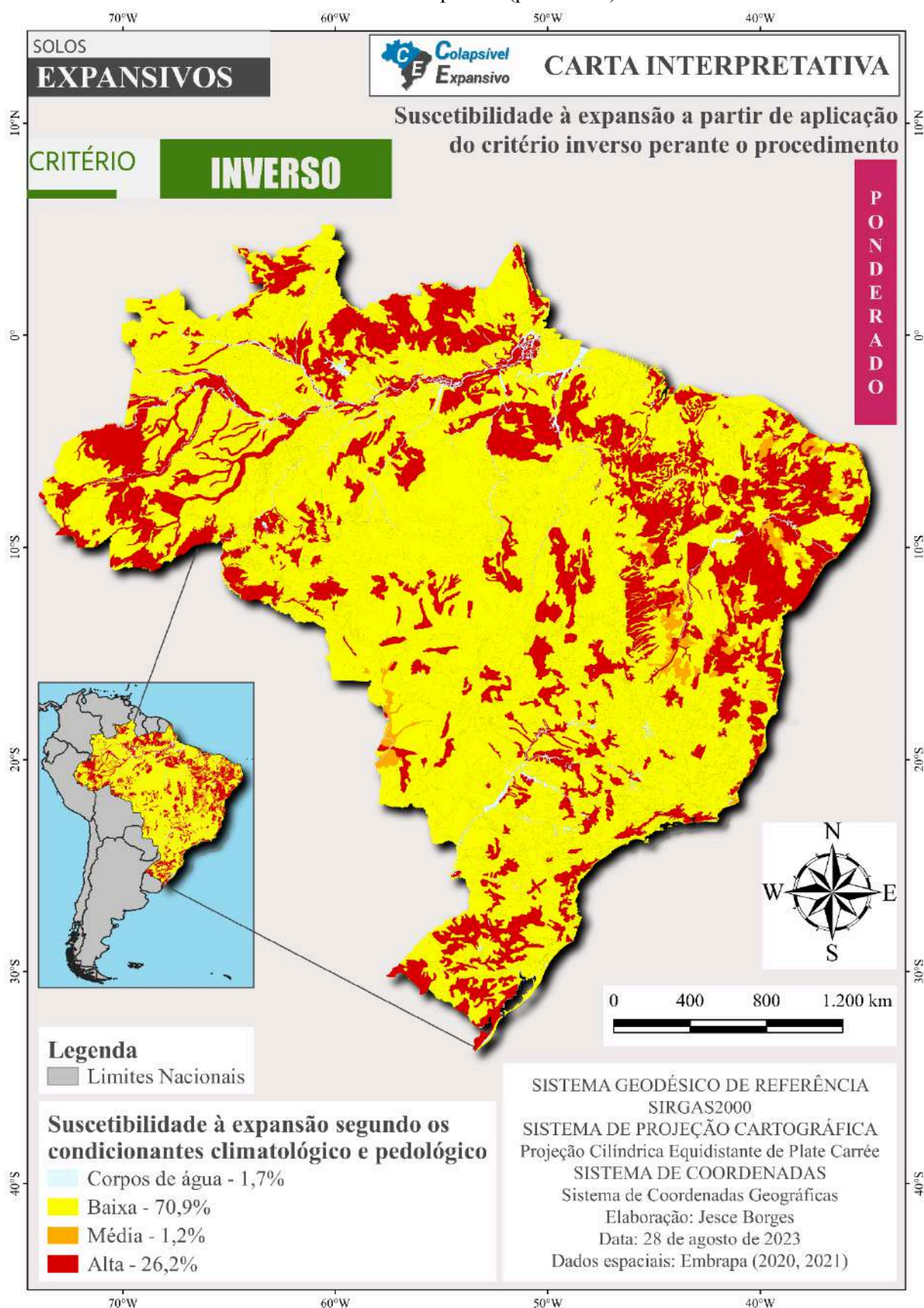
Fonte: Autor (2024).

Figura K.12 - Carta interpretativa resultante da aplicação do critério inverso para a suscetibilidade ao colapso (ponderado).



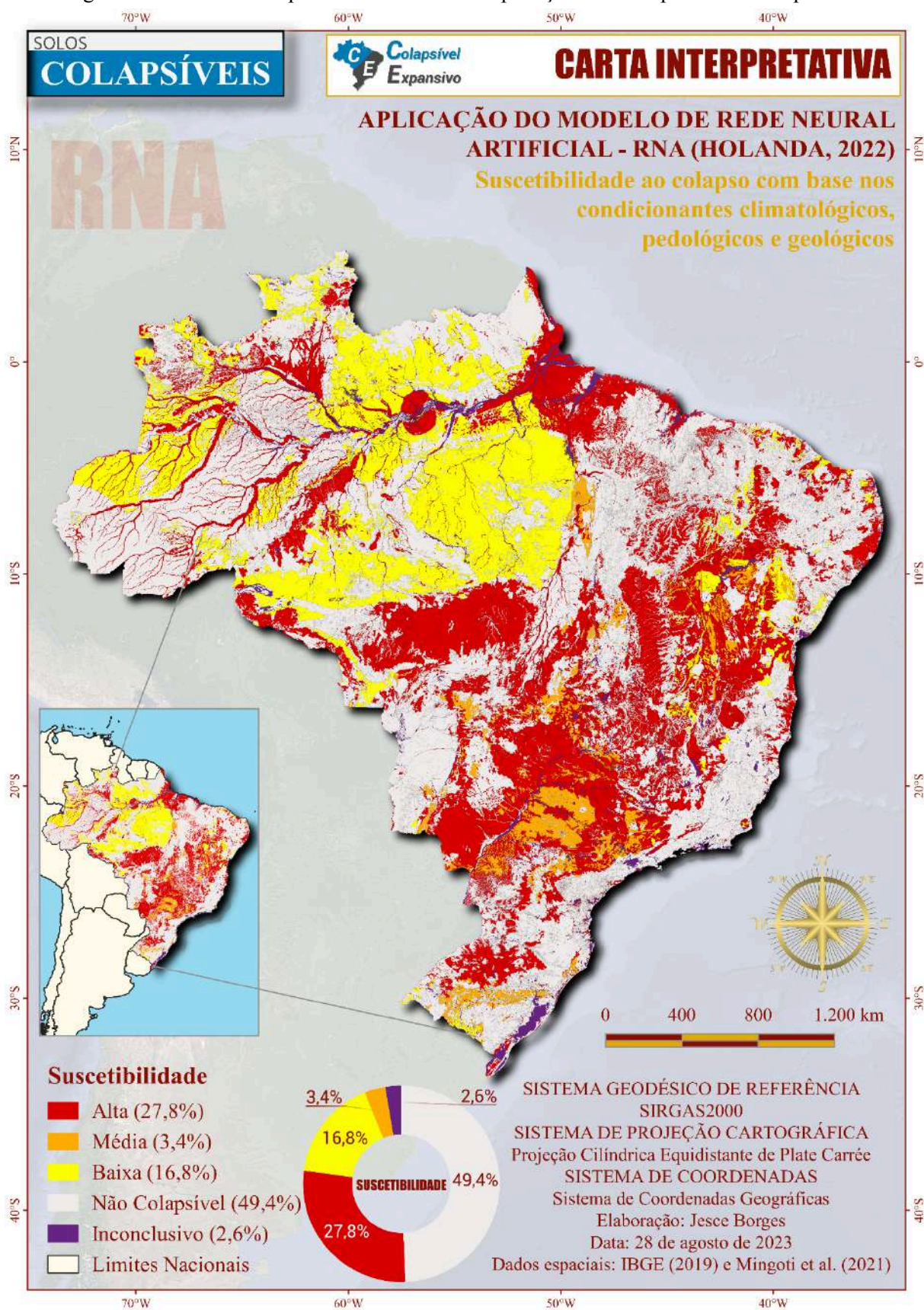
Fonte: Autor (2024).

Figura K.13 - Carta interpretativa resultante da aplicação do critério inverso para a suscetibilidade à expansão (ponderado).



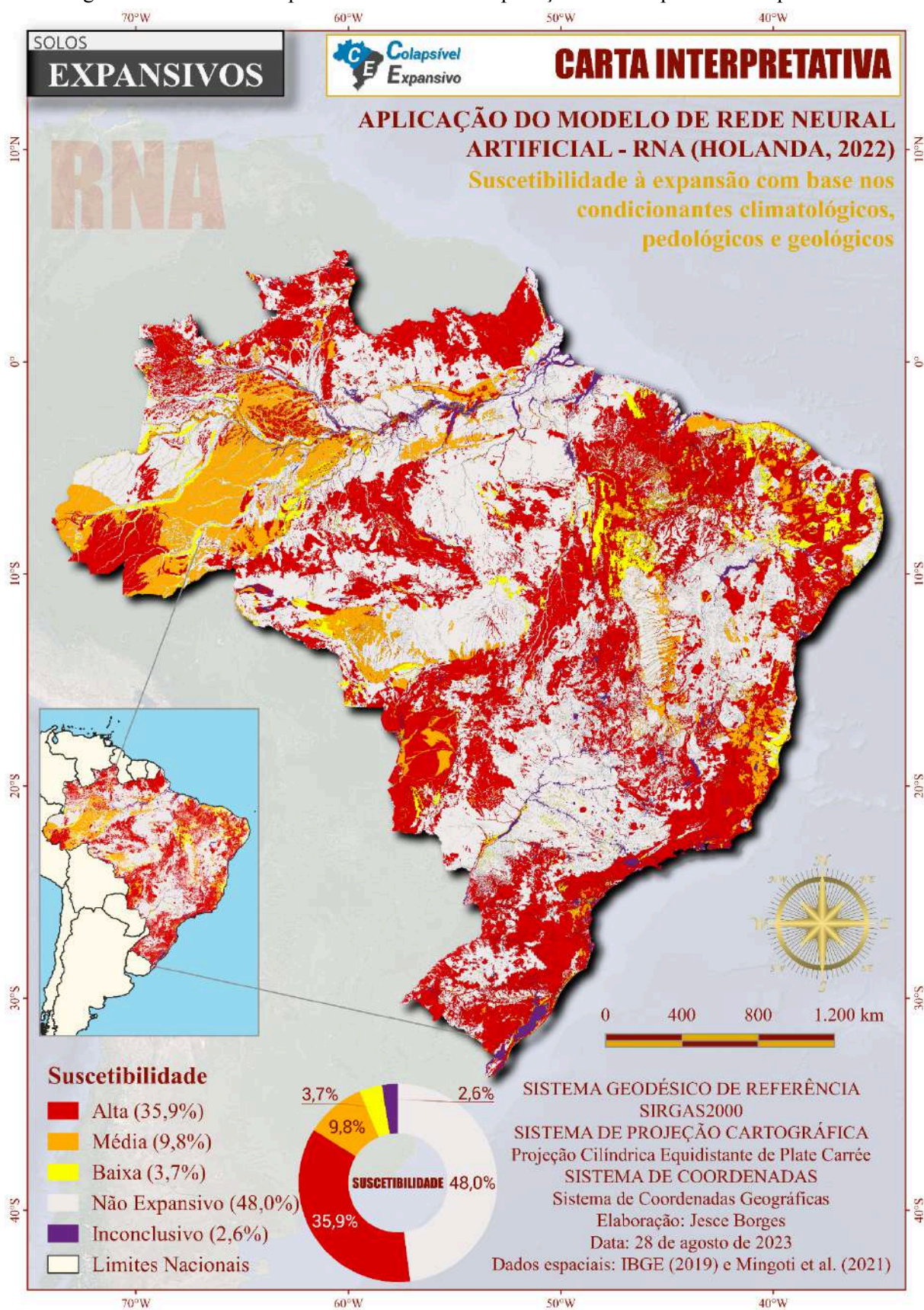
Fonte: Autor (2024).

Figura K.14 - Carta interpretativa resultante da aplicação de RNA para solos colapsíveis.



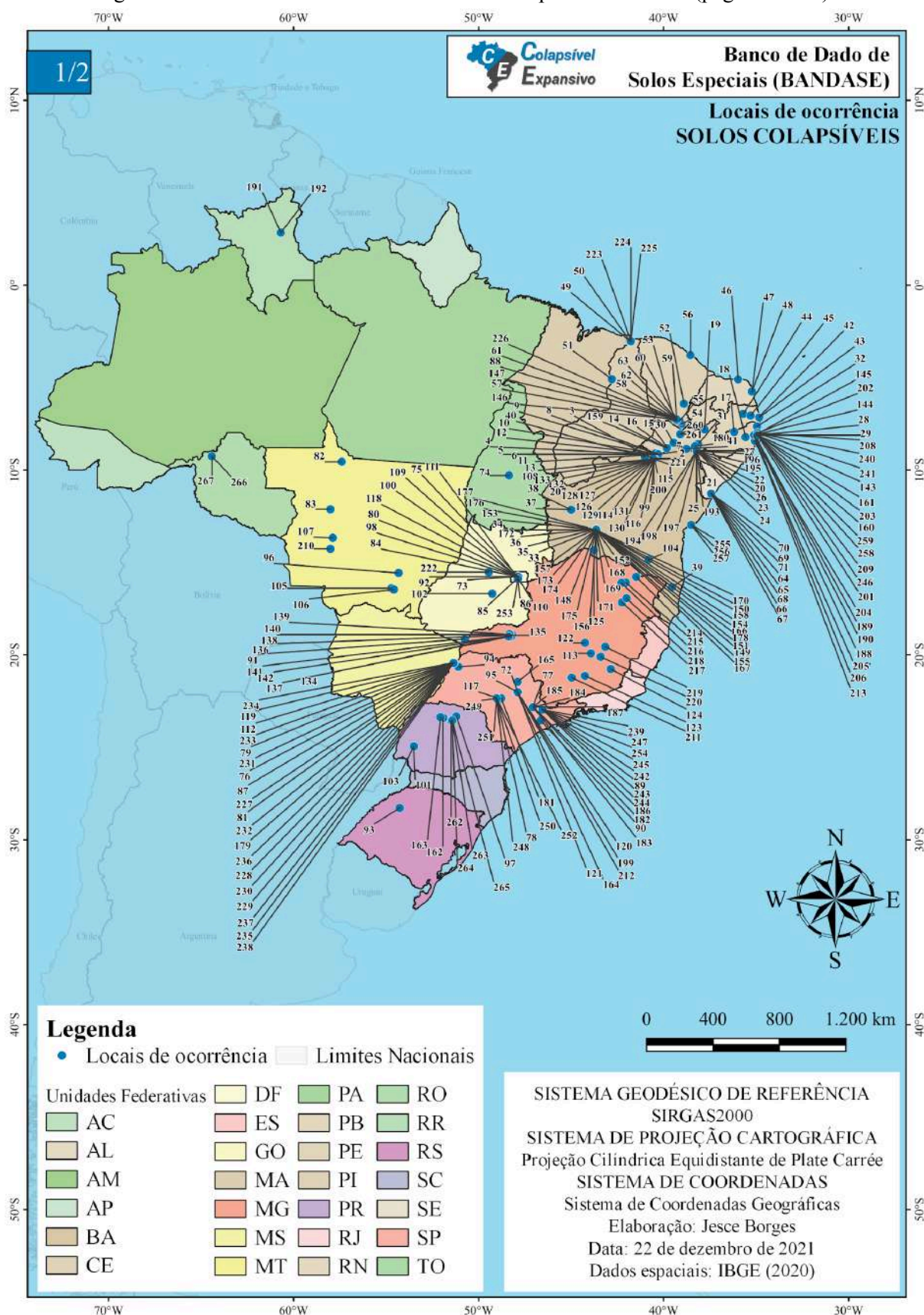
Fonte: Autor (2024).

Figura K.15 - Carta interpretativa resultante da aplicação de RNA para solos expansivos.



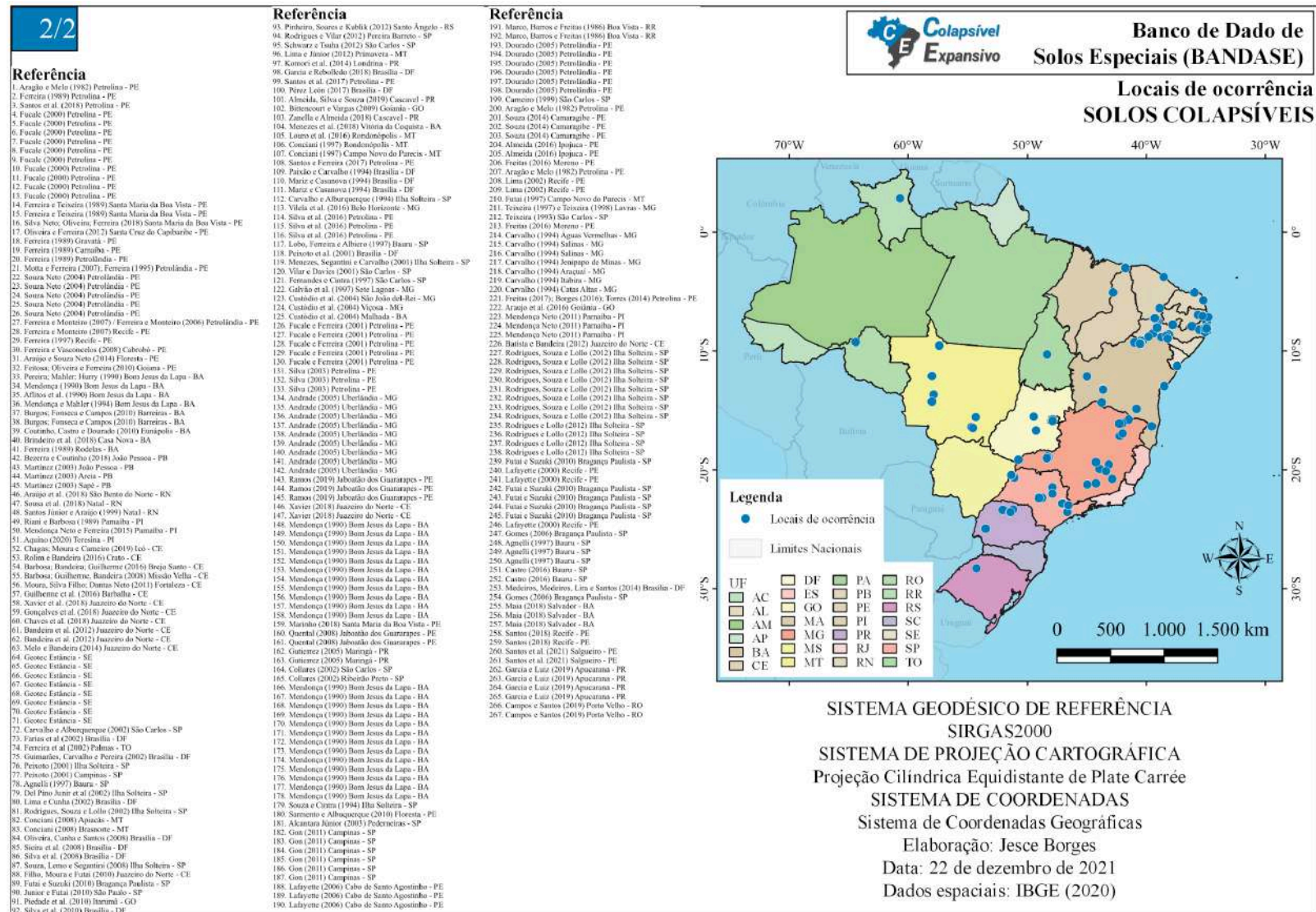
Fonte: Autor (2024).

Figura K.16 - Locais de ocorrência de solos colapsíveis no Brasil (página 1 de 2).



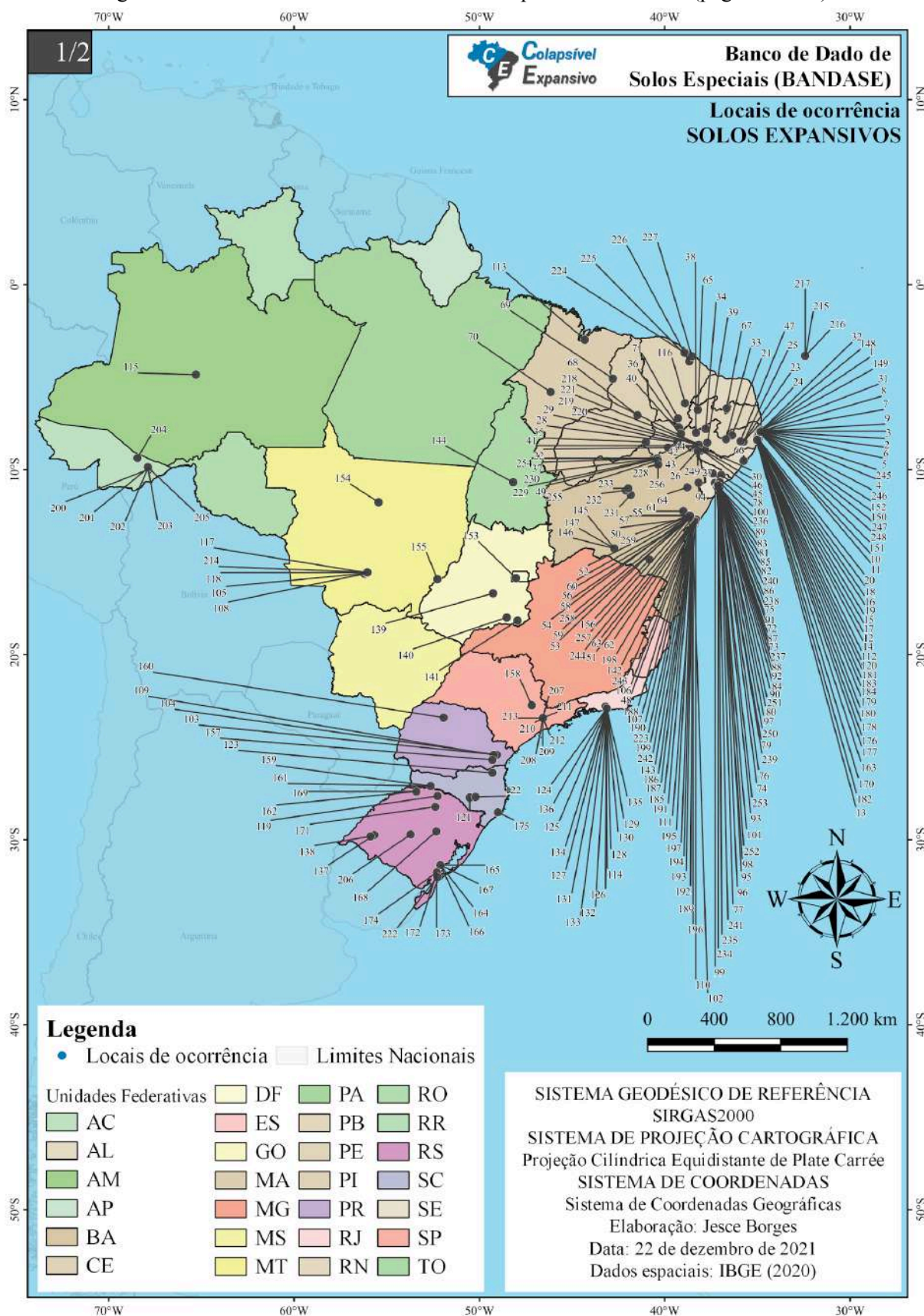
Fonte: Autor (2024).

Figura K.17 - Locais de ocorrência de solos colapsíveis no Brasil (página 2 de 2).



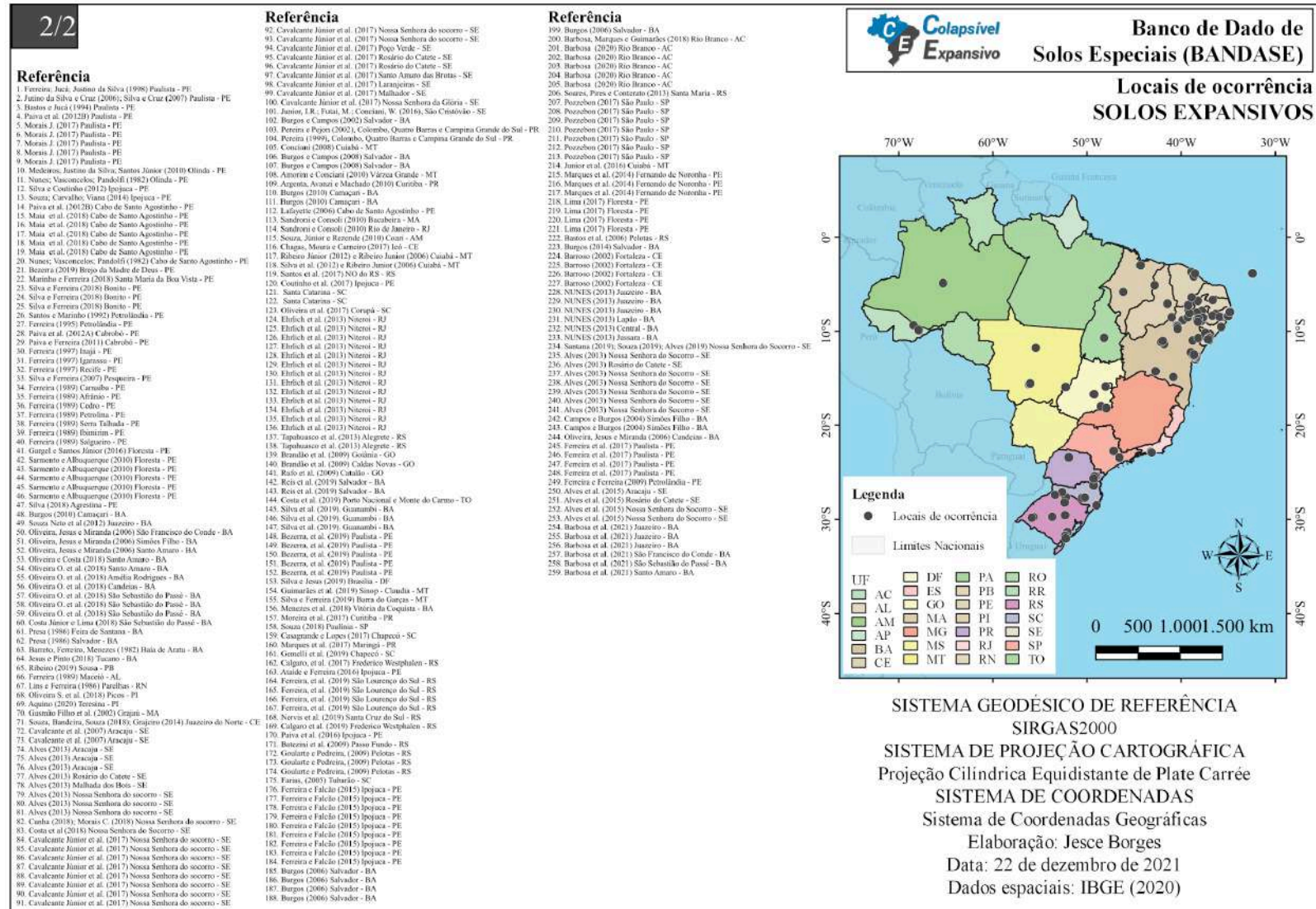
Fonte: Autor (2024).

Figura K.18 - Locais de ocorrência de solos expansivos no Brasil (página 1 de 2).



Fonte: Autor (2024).

Figura K.19 - Locais de ocorrência de solos expansivos no Brasil (página 2 de 2).



APÊNDICE L - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL (PPGEC)

Tese de Doutorado

SOLOS COLAPSÍVEIS E EXPANSIVOS DO BRASIL

abordagem
multidisciplinar com
ênfase em cartografia
de suscetibilidade,
aplicações interativas
e inteligência artificial

BORGES
(2024)

Doutorando: Jesce John da Silva Borges
Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira
Coorientador: Prof. Dr. Samuel França Amorim

Recife, 04 de março de 2024



Apresentação do
Trabalho de
Conclusão de
Curso de
Doutorado do
Programa
de Pós-graduação
em Engenharia
Civil - CTG da
Universidade
Federal de
Pernambuco, no
dia 04 de março de
2024

Clique na imagem
ou no botão abaixo:

[Clique Aqui](#)

