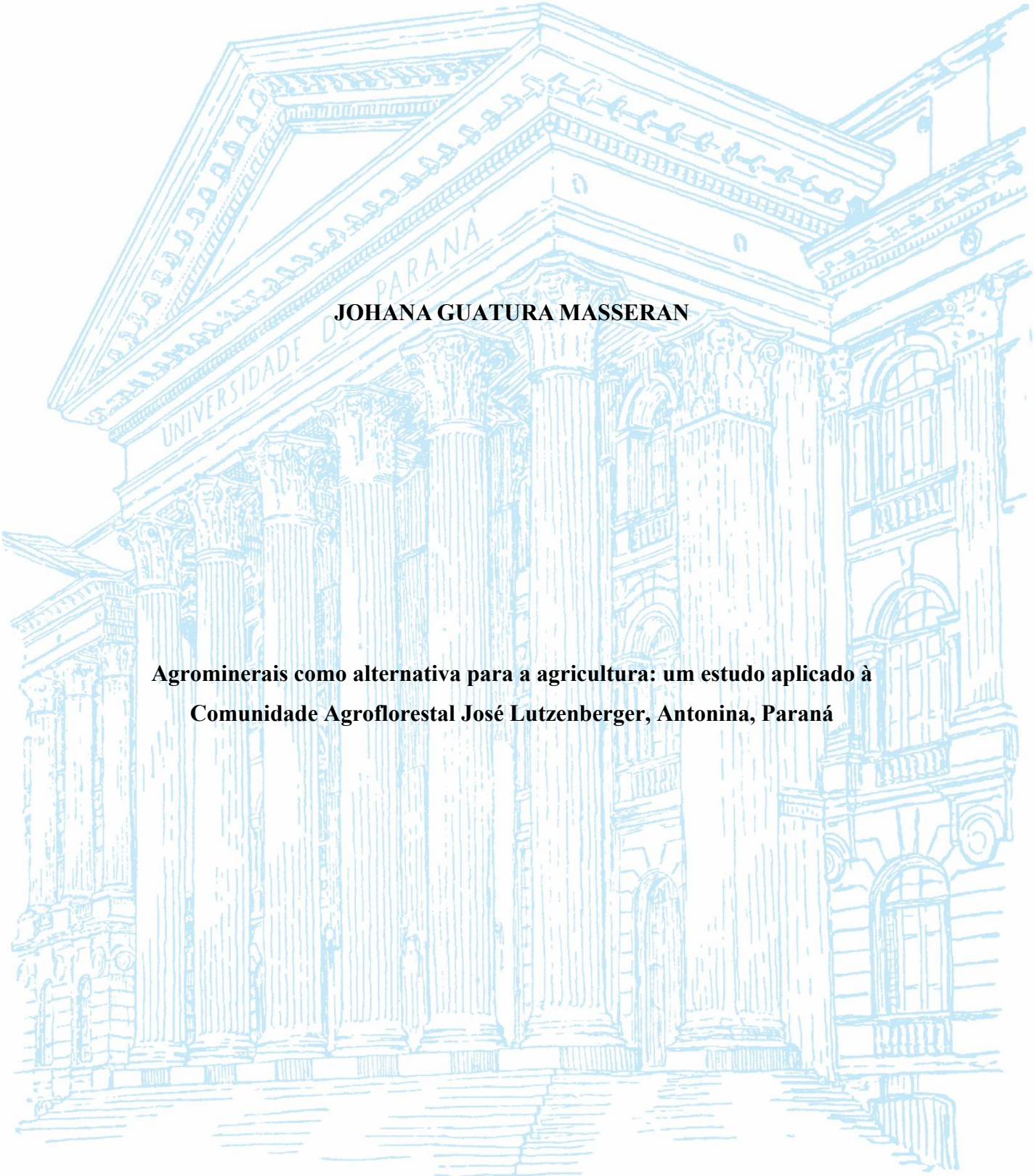
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



JOHANA GUATURA MASSERAN

Agrominerais como alternativa para a agricultura: um estudo aplicado à Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger, Antonina, Paraná

CURITIBA
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

JOHANA GUATURA MASSERAN

Agrominerais como alternativa para a agricultura: um estudo aplicado à Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger, Antonina, Paraná

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de geologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores: Prof. Dr. Guilherme Sonntag Hoerlle e Prof. Dr. José Guilherme de Oliveira.

CURITIBA
2024

Fui parida, mas também pari esta terra
(...)
Esta terra mora em mim,
brotou em mim e enraizou.
Aqui é a morada da terra.
Mora aqui em meu peito,
porque dela se fez minha vida.

Itamar Vieira Junior, no livro ‘Torto Arado’.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Edgard.

AGRADECIMENTOS

Não chego aqui sozinha. Pelo contrário, reparto meu coração em vários:

Minha mãe e meu pai, Jussara e Edgard, que muito além da criação e do cuidado, me ensinaram a viver a vida com ternura.

Meus irmãos, Thomaz e Matthaeus, que desde que nasci me fizeram sentir sortuda por ser a caçula da família.

Minhas tias Mara, Inah e Marília, minha avó Jael e meus primos Fábio e Glaucinha, apoios desde sempre.

Agradeço ao meu orientador e amigo, Guilherme, por todo o conhecimento dado e compartilhado.

Minha amiga-irmã Sophia e seus pais, Silvia e Reinaldo, obrigada por serem minha segunda família.

Agradeço aos meus queridos que me acolheram em Curitiba, me fizeram amar mais essa cidade e me permitiram também levá-los para conhecer um pouquinho da minha terra: Lívia, Gabriel, Rafa Schimidt e Ariel.

Agradeço a essa família tão especial: Rafa, Manu, Rejane e Ricardo, que entre vinhos, *Spritz* e *Matricianas*, sempre estiveram por perto.

Agradeço aos meus companheiros de 'labuta', Léo, Zé e Rodrigo, por todas os dias de campo embaixo de sol de 40ºC, tardes no laboratório e as noites no Clube Náutico em Antonina: vocês fizeram o trabalho ser muito mais divertido!

Agradeço à *galera* da escalada, esse esporte que trouxe mais sentido para minha vida: Pozzo, Oda, Maju, Roni, Rafa, Lele, Tui, Gabi, Justus, Gus, Sali, Maria e Stella. Vocês são tão amantes das rochas quanto os geólogos.

Agradeço aos meus geólogos preferidos, que passaram pela minha vida e fizeram essa caminhada ser muito mais prazerosa, dentro e fora dos substratos paranaenses: Liza, Giu, Tali, Agda, Miriam, Pedro, Fred, Saulo, Bento, Mai, Ingrid, Mi, Jorba, Nath, Léo, Ortiz, May, Britinha, Tião, Bongo e Masnik.

Por fim, agradeço ao meu companheiro de escaladas, aventuras e de vida, Dudu, que apareceu em meio a essa viagem geológica, sempre esteve disposto a ouvir um pouco das minhas reflexões e ainda me inspirar com seu olhar criativo.

RESUMO

A Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger (CAJL) foi criada pelo Movimento Rural das Trabalhadoras e Trabalhadores sem Terra (MST) no ano de 2004 e está localizada na zona rural do município de Antonina/PR, na Bacia Hidrográfica do Rio Pequeno. Fornecedora de alimentos a todos os municípios do litoral paranaense, seus cultivos englobam folhosas, mandioca, batata-doce, amendoim, banana, entre outros. Apesar disso, seus solos são, em geral, caracterizados como distróficos. Neste contexto, com o objetivo de identificar as deficiências químicas dos solos da CAJL e elaborar uma proposta de construção de sua fertilidade, o presente trabalho sugeriu uma parceria entre agrogeologia e a utilização de sistemas agroflorestais (SAFs), visando à melhora da qualidade e quantidade dos alimentos produzidos pela comunidade. Para isso, primeiramente foi realizada a abertura de perfis de descrição morfológica e coleta de amostras para análises químicas nos solos da CAJL. Em seguida, foram identificadas e descritas as deficiências de macro e micronutrientes, bem como de outros parâmetros gerais como pH, saturação por bases e capacidade de troca catiônica (CTC). Concomitantemente a isso, utilizando técnicas de geoprocessamento, foram selecionadas as minas em estado de concessão de lavra localizadas dentro do raio de 100 km da CAJL com potencial para fornecimento de pó de rocha que pode servir como remineralizador dos solos analisados. O estudo abrangeu lavras dos estados de Santa Catarina, Paraná e São Paulo e abordou questões de distância e logística, levando em consideração a quantidade de emissões de gases poluentes no transporte entre as minas e a comunidade. Ao final desta pesquisa, com a construção de um painel ilustrativo e a atribuição de pesos às variáveis observadas, foi possível concluir a integração dos seguintes assuntos: deficiências identificadas; necessidades nutricionais dos principais cultivos praticados; detalhamento da geologia das lavras ativas potenciais e cálculos das emissões de CO_2. Desta maneira, foram selecionadas quatro minas promissoras, duas cuja substância explorada é o diabásio e duas, o granito. As duas primeiras são datadas com idade mesoproterozoica e estão no contexto geológico dos metabasitos da Formação Perau, Grupo Votuverava. As duas últimas, de idade neoproteroiza, estão associadas aos anfibólio-álcali-feldspato granitos dos batólitos do Granito Farinha Seca. De acordo com os diagnósticos feitos, as litologias escolhidas teriam potencial para suprir as necessidades nutricionais dos solos em fósforo (P), enxofre (S), zinco (Zn), cobre (Cu), boro (B) e potássio (K), bem como contribuir para a diminuição de sua acidez.

Palavras-chave: agrogeologia**,** solos, pó de rocha, remineralizador, Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger.

ABSTRACT

The José Lutzenberger Agroforestry Community (CAJL**)** was created by the Movimento Rural das Trabalhadoras e Trabalhadores sem Terra (MST) in 2004 and is located in the rural area of the municipality of Antonina, in the state of Paraná (PR), within the Hydrographic Basin of Pequeno river. As a supplier of food to all municipalities along the Paraná coast, its crops include leafy vegetables, cassava, sweet potatoes, peanuts, bananas, among others. However, its soils are generally characterized as dystrophic. In this context, with the aim of identifying the chemical deficiencies of the CAJL soils and developing a proposal to improve their fertility, the present study suggested a partnership between agrogeology and the use of agroforestry systems (IASs), aiming to enhance the quality and quantity of food produced by the community. To achieve this, initially, profiles for morphological description were opened and soil sample collections for chemical analyses were carried out at CAJL. Then, the deficiencies of macro and micronutrients were identified and described, along with other general parameters such as pH, base saturation, and cation exchange capacity (CEC). Concurrently, using geoprocessing techniques, the mining sites within a 100 km radius of CAJL with the potential to supply rock powder as a soil remineralizer were selected. The study covered mining operations in the states of Santa Catarina, Paraná, and São Paulo and addressed issues related to distance and logistics, considering the amount of polluting gas emissions during transportation between the mines and the community. At the end of this research, with the construction of an illustrative panel and the assignment of weights to the observed variables, it was possible to conclude the integration of the following topics: identified deficiencies; nutritional needs of the main crops cultivated; detailed geology of potential active mining sites; and calculations of CO2 emissions. Thus, four promising mines were selected: two that extract diabase and two that extract granite. The first two are dated to the Mesoproterozoic era and belong to the geological context of the metabasites of the Perau Formation, Votuverava Group. The last two, dating to the Neoproterozoic era, are associated with amphibole-alkali-feldspar granites from the Farinha Seca Granite batholiths. According to the diagnoses, the selected lithologies would have the potential to meet the nutritional needs of the soils in terms of phosphorus (P), sulfur (S), zinc (Zn), copper (Cu), boron (B), and potassium (K), as well as contribute to the reduction of soil acidity.

Keywords**:** agrogeology, soils, rock powder, remineralizer, José Lutzenberger Agroforestry Community.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução histórica de parte da área da CAJL.....16
Figura 2: Áreas de cultivo de banana, mandioca e horticultura na Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger, com Serra do Mar no plano de fundo.....17
Figura 3: Mapa de Localização da Área de Estudo.....18
Figura 4: Distribuição mundial dos maiores depósitos de fosfato econômicos e potencialmente econômicos. Fonte: Modificado de Straaten, 2007.....25
Figura 5: Estrutura do mineral feldspático com uma camada única visualizada perpendicular ao seu plano. Modificado de Lira & Neves, 2013.....28
Figura 6: Painel esquematizado das formas de ocorrência natural do enxofre (S).....29
Figura 7: Seção esquemática com os principais ambientes de ocorrência geológica de rochas ricas em Ca e Mg.....32
Figura 8: Influência do pH na disponibilidade de nutrientes no solo. Fonte: Veloso et al., 2020.....36
Figura 9: Carta de solos das bacias hidrográficas do litoral paranaense. Fonte: modificado de De Paula et al., 2022.....41
Figura 10: Bloco diagrama com os pontos de coleta de solos para análises químicas, perfis de solo descritos e cultivos da Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger.....44
Figura 11: Mapa de Lavras ativas a um raio de 100 km da CAJL.....46
Figura 12: Guia para subgrupamento das classes de textura. Fonte: Santos et al., 2018.....48
Figura 13: Minas Potenciais para Fornecimento de Pó de Rocha à Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger.....54
Figura 14: Mapa Geológico das Litologias referentes às Minas Potenciais para Fornecimento de Pó de Rocha.....55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Determinações e métodos utilizados para as análises químicas dos solos.....20
Tabela 2: Faixas para interpretação do teor de fósforo (P) no solo pelo Mehlich-3 em função do teor de argila. Fonte: Mumbach et al., 2018.....26
Tabela 3: Classificação das culturas segundo sua exigência em disponibilidade de P no solo, tendo como base a exigência das culturas de grãos. Fonte: CQFS, 2016.....26
Tabela 4: Faixas para interpretação do teor de potássio (K) no solo. Fonte: Modificado de Lafayette et al., 2015.....28
Tabela 5: Faixas para interpretação do teor de enxofre (S) no solo. Fonte: Modificado de De Castro et al., 2021.....30
Tabela 6: Teores médios de CaO e MgO (% em massa) nos principais grupos minerais em que ocorrem. Fonte: Modificado de Straaten, 2007.....31
Tabela 7: Faixas de valores interpretados como baixos, médios e altos de Ca e Mg nos solos. Fonte: Modificado de Lafayette et al., 2015.....31
Tabela 8: Faixas de valores interpretados como baixos, médios e altos de micronutrientes nas plantas, principais funções nas culturas e suas formas de ocorrência. Fontes dos dados: Straaten, 2007; Deer et al., 2014.....33
Tabela 9: Faixas adequadas de saturação por bases para as principais culturas brasileiras. Fonte: Modificado de Veloso et al., 2020.....36
Tabela 10: Implicações práticas dos níveis de capacidade de troca catiônica (CTC). Fonte: Ronquim, 2020.....37
Tabela 11: Horizontes e camadas utilizados na descrição de perfis e classificação de solos. Fonte: Modificado de Tullio, 2019.....38
Tabela 12: Principais sufixos utilizados em horizontes e camadas. Fonte: Tullio, 2019.....38
Tabela 13: Feições geomorfológicas do município de Antonina/PR. Fonte: FUPEF, 2022.....39
Tabela 14: Descrição morfológica de perfil de solo da CAJL. Fonte: Modificado de Masseran et al., 2022.....42
Tabela 15: Descrição morfológica de perfil de solo da CAJL. Fonte: Modificado de Masseran et al., 2022.....43
Tabela 16: Análises químicas dos solos nas profundidades 0-20 e 20-40 cm.....45
Tabela 17: Interpretação das Análises Químicas da CAJL.....49

Tabela 18: Deficiências identificadas nos solos da CAJL e respectivas litologias potenciais para fornecimento do pó de rocha corretivo.....50
Tabela 19: Litologias potenciais para fornecimento do pó de rocha e número de parâmetros satisfeitos.....51
Tabela 20: Lavras ativas com litologias definidas como aptas à remineralização dos solos da CAJL.....52
Tabela 21: Massa de CO_2 emitida no transporte de pó de rocha de cada mina à CAJL.....53
Tabela 22: Minas mais promissoras para o fornecimento de pó de rocha à CAJL.....56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Concentrações médias de micronutrientes em $mg.kg^{-1}$ nos principais grupos de rochas da crosta terrestre e em coberturas sedimentares. Autoria própria. Fonte dos dados: Straaten, 2007.....34
Gráfico 2: Concentrações médias do ferro em % nos principais grupos de rochas da crosta terrestre e em coberturas sedimentares. Autoria própria. Fonte dos dados: Straaten, 2007.....35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
APA	Área de Proteção Ambiental
APP	Área de Preservação Permanente
APPA	Associação dos Portos de Paranaguá e Antonina
CAJL	Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	*Food and Agriculture Organization*
FGVces	Centro de Estudos em Sustentabilidade da FGV
SAF	Sistema Agroflorestal
SIGMINE	Sistema de Informação Geográfica da Mineração
MO	Matéria Orgânica
MST	Movimento das Trabalhadoras e Trabalhadores Rurais sem Terra
UFPR	Universidade Federal do Paraná
WRI	*World Resources Institute*

SUMÁRIO

1. **Introdução**.....14
    1.1. Contexto e Problemática.....14
    1.2. Área de Estudo.....16
    1.3. Objetivos.....19
        1.3.1. Objetivo Geral.....19
        1.3.2. Objetivos Específicos.....19
2. **Materiais e Métodos**.....19
    2.1 Revisão Bibliográfica.....19
    2.2. Análise Química dos Solos.....19
    2.3. Identificação e Caracterização das Áreas para Fornecimento de Pó de Rocha.....20
    2.4. Avaliação do Custo-Benefício Ambiental do Transporte.....21
    2.5. Seleção das Áreas Mais Promissoras para o Fornecimento de Pó de Rocha.....21
3. **Revisão Bibliográfica**.....21
    3.1 Agricultura, Geologia, Agrogeologia.....22
    3.2. Das Rochas, aos Solos, às Plantas: os Nutrientes.....23
        3.2.1. Fósforo.....24
        3.2.2. Potássio.....27
        3.2.3. Enxofre.....28
        3.2.4. Cálcio e Magnésio.....30
        3.2.5. Micronutrientes.....32
            3.2.5.1. Parâmetros Gerais.....32
            3.2.5.2. Ambientes Geológicos.....34
        3.2.6. Demais Parâmetros Utilizados.....35
            3.2.6.1. pH e Saturação por Bases.....35
            3.2.6.2. Capacidade de Troca Catiônica (CTC) 37
    3.3. Perfis de Solo, Horizontes e Classificações.....37
4. **Aspectos Fisiográficos Regionais**.....38
    4.1. Geologia, Geomorfologia e Clima.....38
    4.2. Pedologia.....39
        4.2.1. Argissolos.....40

4.2.2. Cambissolos.....40
4.2.3. Gleissolos.....40

5. Resultados.....42
5.1. Pedologia de Detalhe e Descrição Morfológica.....42
5.2. Análises Químicas dos Solos da Comunidade.....43
5.3. Mapeamento de Lavras Ativas em um Raio de 100 km.....45
6. Discussões.....47
6.1. Interpretação dos Perfis de Solo e Análises Químicas.....47
6.1.1. Considerações Anteriores às Interpretações.....47
6.1.1.1. Os Solos da CAJL.....47
6.1.1.2. Teor de Argila.....47
6.1.1.3. Faixas Ideais.....48
6.1.1.4. Os Principais Cultivos da CAJL.....48
6.1.2. Gráfico de Análises Químicas Interpretadas.....49
6.2. Áreas Potenciais para Fornecimento do Pó de Rocha.....50
6.2.1. Deficiências Identificadas e Definição das Rochas Potenciais para Remineralização.....50
6.2.2. Lavras Ativas com as Litologias Aptas à Remineralização.....51
6.3. Pegada de Carbono e Logística.....53
6.4. Discussão Integrada: Deficiências Identificadas, Culturas Alimentares e Rochas com Potencial Remineralizador.....56
6.4.1. Metabasitos e Anfibolitos Maciços da Fm. Perau.....57
6.4.2. Anfibólio-álcali-feldspato Granitos do Granito Farinha Seca.....57
6.4.3. Sienogranitos e Monzogranitos do Granito Morro Inglês.....57
7. Conclusões e Considerações Finais.....57
Referências Bibliográficas.....58
ANEXO I: Painel esquemático de minas promissoras para o fornecimento de pó de rocha à CAJL.....64
ANEXO II: Processos em estado de concessão de lavra que se encontram dentro do raio de 100 km da CAJL.....65

1. Introdução

1.1. Contexto e Problemática

O Brasil desempenha um importante papel na produção global de alimentos, biocombustíveis e fibras. No período de 1975 a 2016, o país aumentou em 80,6% sua produção agrícola e passou a liderar o mercado global na venda de suco de laranja (79% das exportações), café (27% das exportações), soja (43% das exportações) e açúcar (45% das exportações) (Calil & Ribeira, 2019). Apesar disso, segundo estudo publicado por Bamberg *et al.*, em 2016 o país ainda importava 74% das matérias-primas necessárias à fabricação de fertilizantes agrícolas, fato que acarreta o aumento dos preços de produção e dependência econômica de outras potências mundiais.

Em geral, os solos brasileiros são caracterizados por apresentarem elevada acidez e baixos teores disponíveis de nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, tais como fósforo, cálcio e magnésio (Manzatto et al., 2002*)*. Após cultivos contínuos, mesmo os solos que possuem fertilidade natural adequada tendem a apresentar redução na sua capacidade de fornecimento de nutrientes (Zonta et al., 2021). Com isso, torna-se necessária a construção da fertilidade química desses solos, a qual pode ser realizada por meio de diferentes técnicas. Neste contexto, os fertilizantes minerais se mostram como uma alternativa sustentável e de baixo custo.

Os principais fertilizantes minerais utilizados no Brasil são os sulfatos, cloretos e nitratos (solúveis em água) e os óxidos e os carbonatos (insolúveis em água) (Zonta et al*.,* 2021). Eles podem ser obtidos de diferentes rochas e, consequentemente, de diversas localidades. Seu uso varia conforme as necessidades do solo em questão e o tipo de cultura aplicada a ele. Além disso, a pegada de carbono emitida no deslocamento entre as áreas-fonte e as áreas de cultivo é uma variável ambiental relevante na escolha do pó de rocha fornecedor do fertilizante mineral.

A utilização dos fertilizantes minerais em conjunto com a implementação de Sistemas Agroflorestais (SAFs) é uma solução ainda pouco estudada no Brasil, mas de grande interesse do ponto de vista econômico e socioambiental. Foco do presente trabalho, esta cooperação será sugerida como solução às deficiências nutricionais existentes nos solos da Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger (CAJL), localizada no município de Antonina (PR) e constituída por de cerca de 24 famílias, cujo início se deu com a ocupação da Fazenda São Rafael, em setembro de 2004 (FIOCRUZ, 2018*)*.

A ocupação da terra por famílias caiçaras é um fenômeno histórico. Antes de sua fundação, o local onde hoje encontra-se a CAJL apresentava irregularidades ambientais pela criação de búfalos e pastagem de braquiária (flora exótica), mudança e redução de extensão do curso do rio e descaracterização e redução da área de preservação permanente (APP) (Isaguirre-Torres & Maso*.,* 2023). Com o apoio do Movimento das Trabalhadoras e Trabalhadores Rurais sem Terra (MST), as famílias elaboraram no ano de 2006 um projeto de assentamento agroecológico utilizando Sistemas Agroflorestais (SAFs), cuja votação para aprovação, realizada no Conselho Consultivo da Área de Proteção Ambiental de Guaraqueçaba, resultou em não aprovação. Apesar disso, as famílias continuaram suas práticas de cultivo (Rossito, 2020).

Em menos de 20 anos, os integrantes da comunidade demonstraram que suas atividades são capazes de preservar a natureza, garantir a própria subsistência nutricional e ainda fornecer alimentos aos municípios próximos – Antonina, Morretes, Pontal do Paraná e Matinhos. O cultivo de produtos agrícolas no assentamento se destaca na horticultura e culturas de mandioca, amendoim e batata-doce (Fernandes & Facco, 2015). O projeto de Assentamento Agroflorestal José Lutzenberger participou, no ano de 2017, do prêmio Juliana Santilli de Agrobiodiversidade, sendo premiado na categoria 1, que contemplava iniciativas que promovem a ampliação e a conservação da agrobiodiversidade (MST, 2017). Hoje, além disso, a iniciativa da CAJL possibilitou no local a recuperação da biodiversidade, a regeneração da vegetação, a naturalização do curso do rio e a redução dos processos erosivos (Isaguirre-Torres & Maso*.,* 2023). A evolução histórica da área da CAJL está ilustrada na Figura 1.

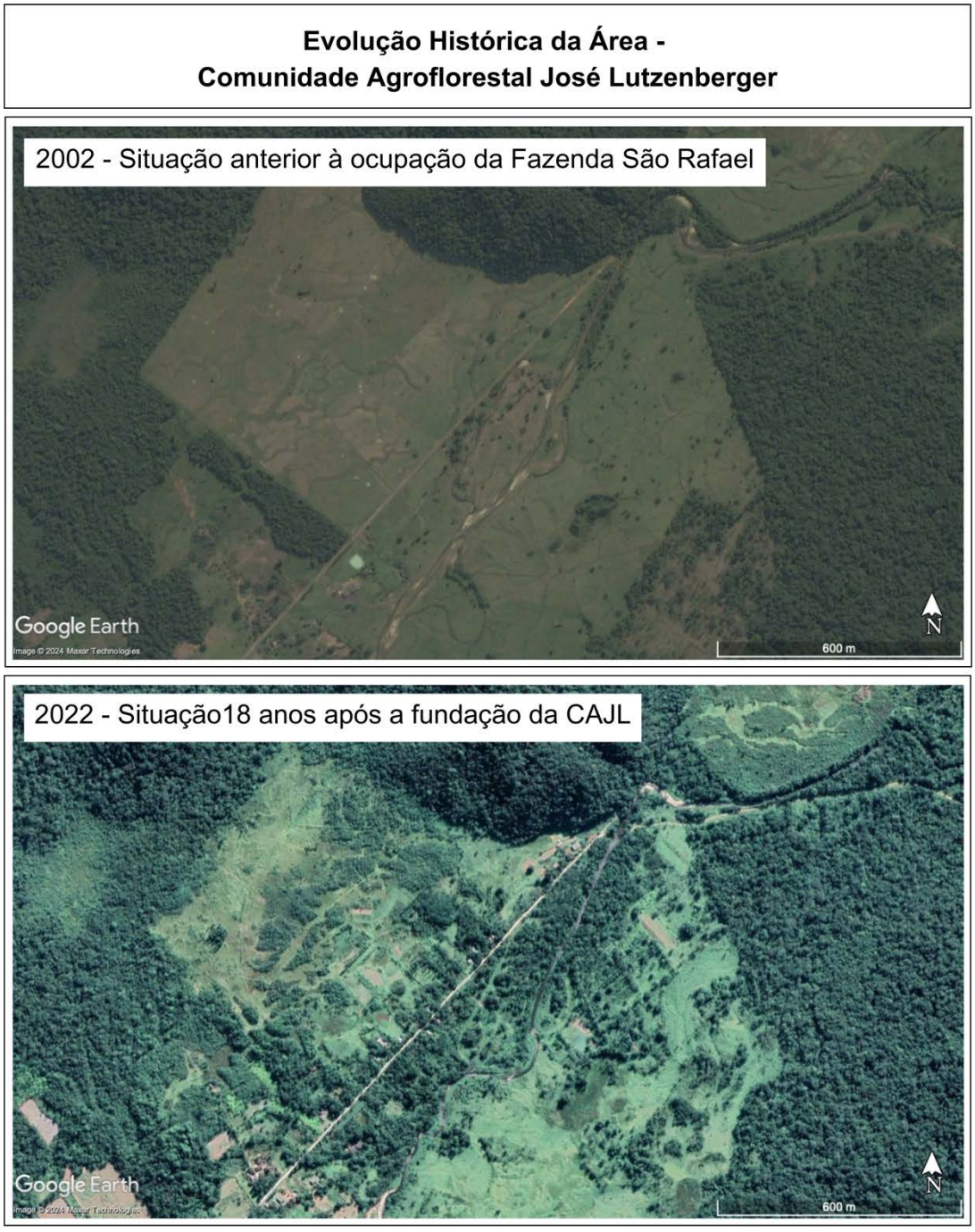


Figura 1: Evolução histórica de parte da área da CAJL, com foco para o aumento da área de floresta recuperada. Fonte: Google Earth. Autoria Própria.

1.2. Área de Estudo

A Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger (CAJL) está situada no município de Antonina (PR) (Figura 3), em local pertencente à Área de Proteção Ambiental (APA) de Guaraqueçaba. O acesso a partir da capital paranaense se dá pela Rodovia do Café

Governador Ney Braga (BR-277), no sentido litoral, e posteriormente pelas rodovias estaduais PR-340 e PR-405. A região faz parte da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica e está inserida no Complexo Estuarino-Lagunar de Iguape-Cananéia-Paranaguá, de grande relevância ambiental em contexto nacional, fato que lhe conferiu o título de Patrimônio Mundial da Natureza, da UNESCO, em 1999 (Vaneski Filho, 2020). A pesquisa será aplicada nos solos da CAJL, cujas áreas de cultivo podem ser visualizadas na Figura 2, e em um perímetro de 100 km em seu entorno, onde serão avaliadas áreas com potencial para fornecimento de pó de rocha para uso como remineralizador.

Figura 2: Áreas de cultivo de banana, mandioca e horticultura na Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger, com Serra do Mar no plano de fundo. Fonte: Autoria Própria.

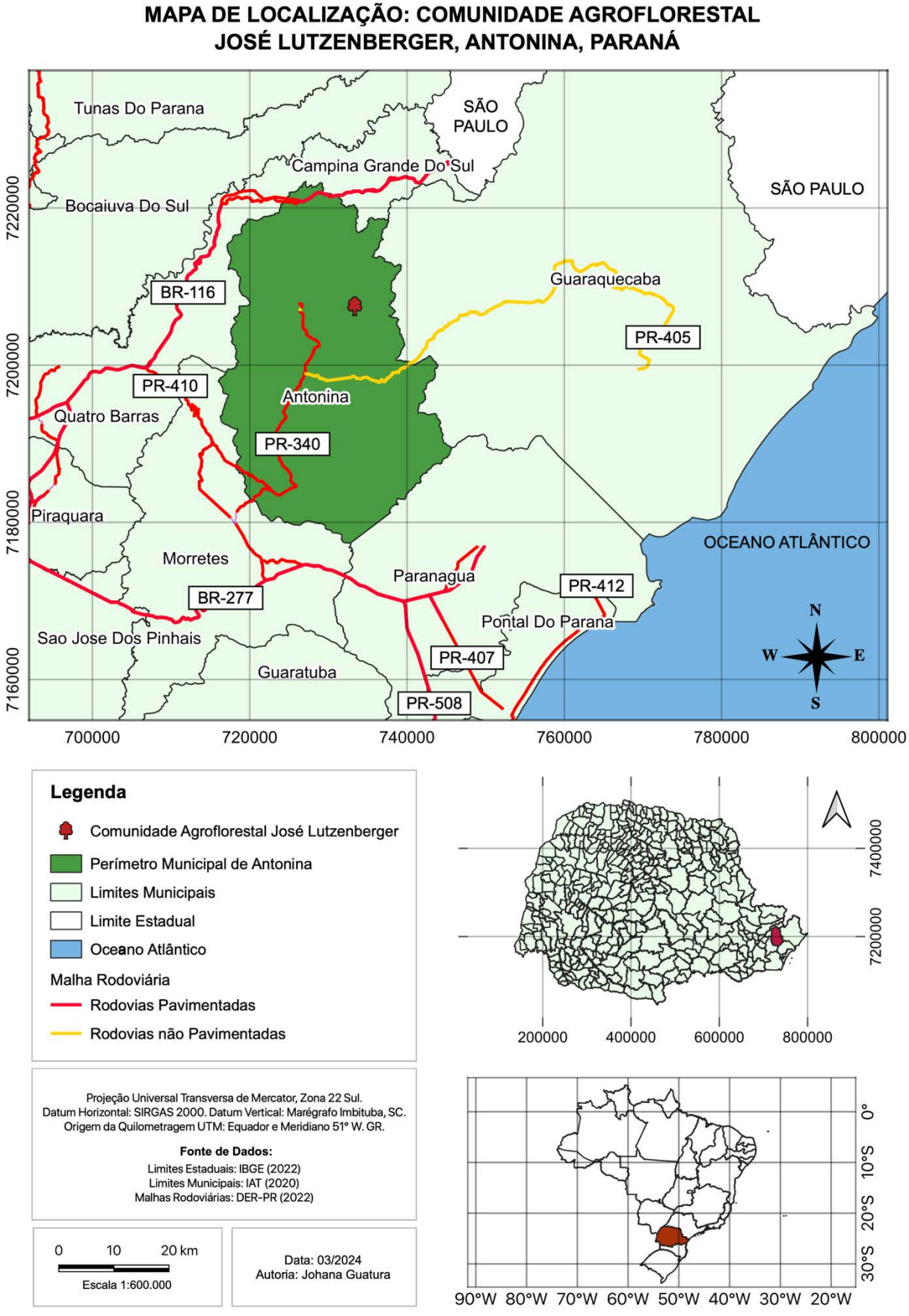


Figura 3: Mapa de Localização da Área de Estudo

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Identificar as deficiências químicas dos solos da Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger e indicar áreas potenciais para obtenção de pó de rocha adequado para remineralização destes solos.

1.3.2. Objetivos específicos

(a) Realizar as análises químicas dos solos utilizados para cultivo na Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger;
(b) Identificar as áreas de mineração com potencial para fornecimento do pó de rocha;
(c) Caracterizar o potencial de fornecimento de macro e micronutrientes do pó de rocha das áreas de mineração selecionadas;
(d) Avaliar o custo-benefício ambiental do transporte do pó de rocha de diferentes áreas potenciais até a área da Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger.

2. Materiais e Métodos

2.1. Revisão Bibliográfica

O processo de revisão bibliográfica se iniciou com a busca e leitura de trabalhos que abordam conceitos de agrogeologia, focando nos seguintes tópicos: contexto agronômico brasileiro e dependência do mercado externo; necessidades nutritivas das culturas vegetais; insumos agrícolas; insumos alternativos (agrominerais, remineralizadores de solo e suas condicionantes). Para isso, foram selecionados os trabalhos de Lafayette et al. (2012), Ronquim (2020), Straaten (2007) e Zonta et al. (2021), tendo em vista a relevância histórica e pioneirismo dos autores no assunto, bem como a riqueza e integração de suas informações, que também são utilizadas por órgãos oficiais como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Além disso, para elaboração da pedologia da área de estudo, foi consultado e revisado o trabalho de Masseran et al. (2022), que possui a descrição detalhada de 2 perfis de solo abertos dentro da Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger.

2.2. Análises Químicas dos Solos

Análises químicas de 2 amostras de solos da CAJL foram realizadas pelo Instituto Agronômico do Centro de P&D de Solos e Recursos Ambientais do Laboratório de Fertilidade do Solo de Campinas/SP, estando suas determinações e respectivos métodos catalogados na Tabela 1. Estas análises foram realizadas segundo os métodos mais comuns no Brasil, também utilizados e publicados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, e estão detalhadamente descritos no trabalho de Teixeira et al. (2017). Suas interpretações, por fim, foram realizadas a partir dos guias e parâmetros para interpretação de resultados de análises de solo disponibilizados por Lafayette et al. (2015) e Straaten (2007).

Determinação	Método
pH	Cloreto de Cálcio 0,01
Hidrogênio + Alumínio (H+Al)	Tampão SMP
Fósforo (P)	Resina
Potássio (K)	Resina
Cálcio (Ca)	Resina
Magnésio (Mg)	Resina
Sódio (Na)	Acetato de amônio pH 7
Alumínio (Al)	Cloreto de Potásio
Enxofre (S)	Fostato de Cálcio
Boro (B)	Água Quente
Condutividade Elétrica (C.E.)	Água 1:1
Cobre (Cu)	DTPA
Ferro (Fe)	DTPA
Manganês (Mn)	DTPA
Zinco (Zn)	DTPA

Tabela 1: Determinações e métodos utilizados para as análises químicas dos solos.

2.3. Identificação e Caracterização de Áreas para Fornecimento de Pó de Rocha

A identificação e caracterização das áreas de mineração com potencial para fornecimento do pó de rocha foi realizada a partir de um sistema de informações geográficas (SIG) elaborado no software de geoprocessamento QGIS. Os dados utilizados contaram com arquivos vetoriais (*shapefiles)* obtidos da plataforma online do Sistema de Informação Geográfica da Mineração (SIGMINE) disponibilizado pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Foram selecionados apenas os processos minerários ativos em estado de concessão de lavra, visando a caracterizar áreas que de fato possuem

autorização para extração de bens minerais. Além disso, foram utilizados arquivos vetoriais das unidades federativas brasileiras disponibilizados pelo IBGE. A seleção das áreas de mineração com potencial para fornecimento do pó de rocha foi realizada utilizando a ferramenta *buffer* – ou amortecedor – do QGIS. Desta forma, foi criado um mapa de lavras ativas localizadas no raio de 100 km da CAJL, abrangendo minas dos estados de Santa Catarina, Paraná e São Paulo.

2.4. Avaliação do Custo-benefício Ambiental do Transporte

A avaliação do custo-benefício ambiental do transporte do pó de rocha das áreas potenciais até a área da CAJL foi realizada por meio da metodologia da pegada de carbono, cujo principal parâmetro empregado é a medida das emissões de gás carbônico (CO_2), que junto ao óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) integram a massa de gases do efeito estufa (GEE). O cálculo foi realizado por meio da metodologia proposta em uma parceria do Centro de Estudos em Sustentabilidade da FGV (FGVces) com o *World Resources Institute* (WRI), segundo a qual uma quantidade de emissões padrão para o meio de transporte utilizado é multiplicada pela quilometragem percorrida (FGV EAESP, 2023).

O cálculo foi baseado na seguinte fórmula:

$$\boldsymbol{M\,CO_2 = C\,.\,d\,.\,F\,.\,x}$$

sendo que:

- M CO_2 = massa de CO_2 emitida em kg;
- C = consumo de combustível por km rodado, a depender do meio de transporte utilizado; neste caso, foi adotado o valor de um caminhão *truck* que consome em média 2,5 km/L;
- d = densidade do combustível; neste caso, o diesel, que possui d = 0,853 kg/L;
- F = fator de emissão de CO_2 por litro de combustível; para o diesel, o fator é = 3,2 kg/L;
- x = número de quilômetros rodados.

2.5. Seleção das Áreas Mais Promissoras para o Fornecimento de Pó de Rocha

Para efetuar a escolha de quatro minas mais promissoras para o fornecimento de pó de rocha à Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger, foi realizado um trabalho de integração executado a partir da soma de pontos positivos e negativos relacionados aos seguintes parâmetros: (a) deficiências identificadas nos solos, (b) necessidades nutricionais dos principais cultivos realizados na CAJL, (c) detalhamento da geologia das lavras ativas potenciais e (d) massa de CO_2 emitida no transporte de cada mina até a CAJL. A elaboração deste raciocínio se deu com a construção de um painel ilustrativo (Anexo I).

Cada supressão de deficiência identificada por cultivo possui o mesmo "peso" no cálculo final. Por exemplo: se uma litologia é capaz de suprir a deficiência de enxofre para três tipos de cultivo, ela soma três pontos. Às massas de CO_2 emitidas, foram atribuídos valores positivos e negativos, sendo que as duas maiores emissões correspondem ao somatório -1; as intermediárias, ao 0; e as menores emissões, ao somatório +1. As minas finais definidas foram aquelas que totalizaram o maior número de pontos.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Agricultura, Geologia, Agrogeologia

Desde o Período Neolítico (8.000 a.C. – 5.000 a.C.), momento no qual o ser humano largou sua condição de nômade, a agricultura é uma prática vivente em diversas sociedades do globo (Castanho & Teixeira, 2017). Em geral, admite-se que os primeiros sistemas de cultivo de alimentos iniciaram-se de maneira acidental, próximos às moradias, em locais de preparos culinários. Estes eram desenvolvidos em áreas desmatadas, enriquecidas de dejetos domésticos e sobre terrenos regularmente inundados pelas cheias dos rios que traziam sedimentos de aluvião, não exigindo o preparo do solo (Mazoyer & Roudart, 1997).

A trajetória das mudanças da Pré-história até a Idade Contemporânea aconteceu, principalmente, em função do crescimento demográfico exponencial, que desencadeou o aumento da produção de alimentos e, por consequência, as revoluções agrícolas e econômicas. O surgimento do capitalismo veio acompanhado de novas técnicas de cultivo de alimentos, mais lucrativas e eficientes do ponto de vista da produção, mas nem sempre mais sustentáveis e benéficas ao meio ambiente. Além disso, embora a produção de alimentos tenha crescido e se modernizado, de acordo com o relatório *The State of Food*

Security and Nutrition in the World publicado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) em 2023, estima-se que 735 milhões de pessoas ainda passam fome, cerca de 10% da população mundial. No ano de 2023, é produzido alimento suficiente para nutrir toda a população humana (FAO, 2023). O problema, portanto, não está relacionado à quantidade produzida, mas sim à distribuição destes insumos.

Somado a isso, características comuns dos sistemas agrícolas atuais são padrões e técnicas de cultivo inadequados, abuso de pastagem em áreas de florestas naturais e sistemas de irrigação e drenagem defeituosos. Com isso, o empobrecimento do solo, a perda da fertilidade e o aumento dos mecanismos de erosão devido à desagregação das partículas são consequências cada vez mais recorrentes (FAO, 1977). Para reverter estes processos, o cultivo de alimentos vem sendo integrado ao uso de fertilizantes e tecnologias modernas. Os fertilizantes, quanto utilizadas as quantidades e os tipos adequados, promovem melhoras significativas na qualidade química do solo. Seus elevados preços no mercado, porém, limitam seu uso. Nestas condições, o potencial agronômico dos minerais disponíveis local ou regionalmente é uma alternativa que pode ser explorada por camponeses e agricultores familiares. Seus custos de produção são mínimos, e quando provenientes de resíduos de pedreiras ou rejeitos de mineração, podem inclusive ser distribuídos gratuitamente (Theodoro & Leonardos, 2006).

Embora ainda pouco disseminada no Brasil, a ciência das rochas aplicada à agricultura vem ganhando força, em especial graças ao seu caráter econômico e sustentável. Desta maneira, diferentes termos – rochagem, agrominerais, agrogeologia – estão sendo utilizados para se referir à mesma prática: a utilização do pó de rocha como fertilizante agrícola. O pó de rocha, quando aplicado a um solo em quantidades adequadas, é eficaz na construção da fertilidade e reserva nutricional. Suas partículas são compostas por minerais de dissolução lenta, processo pelo qual ocorre a liberação dos elementos químicos (ERHART, 2009). De maneira geral, este ocorre pelo intemperismo físico ou químico, havendo desintegração e decomposição das estruturas cristalinas. Os fertilizantes agrícolas convencionais, por outro lado, costumam ser fontes de alta solubilidade, o que afeta a disponibilidade nutricional à planta ao longo do tempo e, consequentemente, reduz seu aproveitamento (Zonta et al*.,* 2021).

3.2. Das Rochas, aos Solos, às Plantas: os Nutrientes

A transferência dos nutrientes das rochas aos solos e, posteriormente, às plantas é o caminho natural para o crescimento vegetal e seu entendimento é essencial quando se busca o cultivo de plantas utilizando recursos nutricionais naturalmente disponíveis (Straaten, 2007). Além dos elementos de origem orgânica (oxigênio, carbono, hidrogênio e nitrogênio), que representam cerca de 90% da matéria seca das plantas (Mendes, 2007), os demais nutrientes essenciais ao crescimento vegetal podem ser classificados em duas categorias: macronutrientes, necessários em quantidades mais elevadas – fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) –, e micronutrientes, também essenciais, porém em menores teores – boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), molibdênio (Mo), ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn) (Mendes, 2007). Esta separação, no entanto, trata-se de uma generalização, visto que as necessidades de elementos variam entre as espécies vegetais. Straaten (2007) define e descreve os nutrientes em função de suas áreas-fonte, ambientes e comportamentos geoquímicos e origens geológicas. Sendo uma classificação interessante do ponto de vista da agrogeologia e útil para o entendimento dos pós de rochas, bem como suas aplicações aos diferentes cultivos, esta será detalhada a seguir.

3.2.1. Fósforo (P)

O fósforo desempenha um papel fundamental nos processos vitais das plantas, especialmente no armazenamento e transferência de energia, crescimento adequado das raízes e desenvolvimento dos frutos e sementes (Straaten, 2007). Ele ocorre principalmente na forma de HPO_4^{2-} nos minerais do grupo da apatita (Deer *et al.,* 2014) e de $H_2PO_4^-$ em fosfatos de Ca, Al ou Fe, em minerais da série da crandallita, os quais apresentam estrutura aberta, alta estabilidade e relativa abundância nas formações da superfície terrestre (Toledo, 1999).

O fósforo do solo é derivado quase que totalmente das rochas fosfáticas, as quais podem ser divididas em cinco tipos: (i) depósitos fosfáticos sedimentares; (ii) depósitos fosfáticos ígneos; (iii) depósitos metamórficos; (iv) depósitos de guano, relacionados aos excrementos de aves e morcegos e (v) depósitos de fosfato resultantes do intemperismo (Straaten, 2007). No Brasil, ocorrem principalmente os dois primeiros (Figura 4)

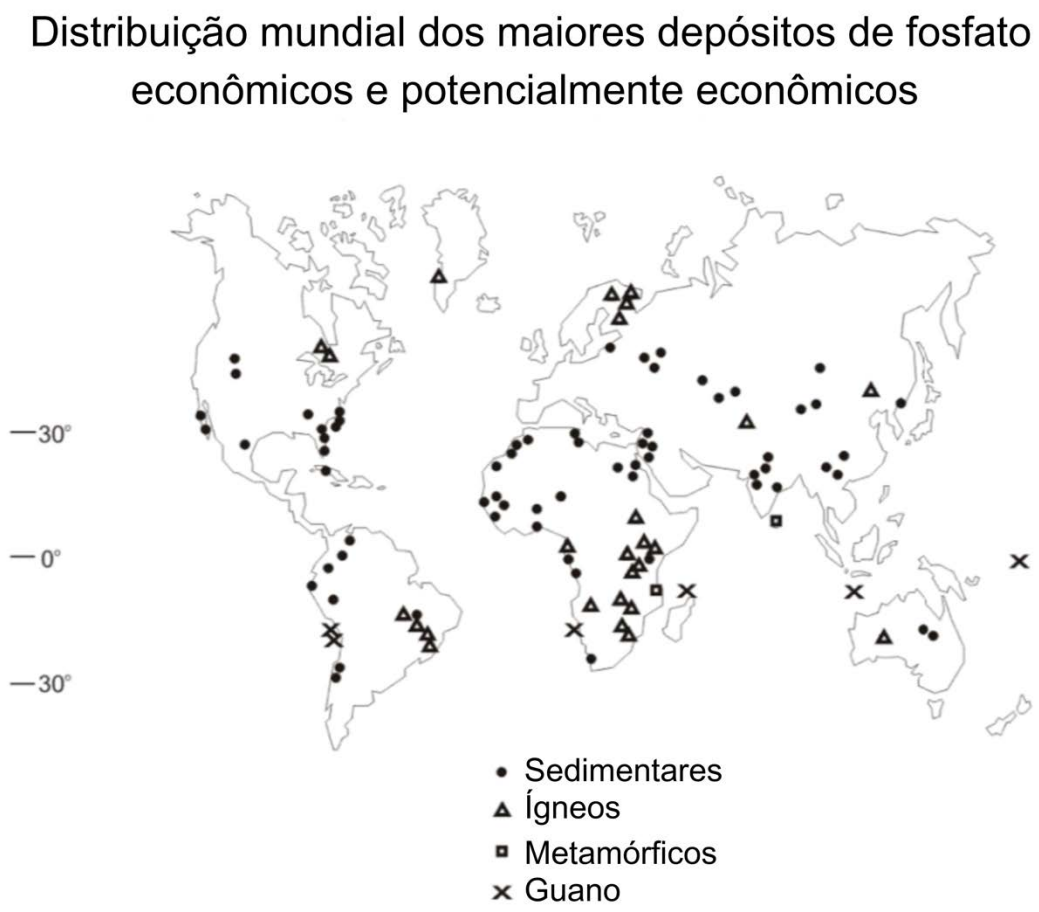


Figura 4: Distribuição mundial dos maiores depósitos de fosfato econômicos e potencialmente econômicos. Fonte: Modificado de Straaten, 2007.

O principal método no Brasil para estimar o teor de fósforo em um solo é o extrator Mehlich-1, uma mistura dos ácidos sulfúrico e clorídrico, o qual leva em consideração também as classes texturais (areia e argila) para definição dos parâmetros (Lafayette et al*.,* 2015). Também são utilizados com frequência os métodos Mehlich-3 e resina trocadora de ânions (RTA), os quais extraem, em média, 11 a 12% mais fósforo que o Mehlich-1, sobretudo devido às diferentes sensibilidades ao teor de argila no solo de cada extrator (Mumbach et al., 2008). Na Tabela 2, estão reunidos os valores de interpretação dos teores de P no solo pelo método de Mehlich-3 para quatro grupos distintos de culturas. As descrições dos tipos de culturas estão catalogadas na Tabela 3.

Interpretação	Teor de Argila (%)			
	> 60	41 - 60	21 - 40	< 20
	Grupo 1, mg dm^{-3}			
Muito baixo	≤4,0	≤6,0	≤11,0	≤22,0
Baixo	4,1 – 8,0	6,1 – 12,0	11,1 – 22,0	22,1 – 44,0
Médio	8,1 – 12,0	12,1 – 18,0	22,1 – 33,0	44,1 – 66,0
Alto	12,1 – 24,0	18,1 – 36,0	33,1 – 66,0	66,1 – 132,0
Muito alto	> 24,0	> 36,0	> 66,0	> 132,0
	Grupo 2, mg dm^{-3}			
Muito baixo	≤2,5	≤3,5	≤7	≤13,0
Baixo	2,6 – 5,0	3,6 – 7,0	7,1 – 14,0	13,1 – 26,0
Médio	5,1 – 7,5	7,1 – 10,5	14,1 – 21,0	26,1 – 39,0
Alto	7,6 – 15,0	10,6 – 21,0	21,1 – 42,0	39,1 – 78,0
Muito alto	> 15,0	> 21,0	> 42,0	> 78,0
	Grupo 3, mg dm^{-3}			
Muito baixo	≤1,0	≤1,5	≤4,0	≤6,5
Baixo	2,1 – 2,0	1,6 – 3,0	4,1 – 8,0	6,6 – 13,0
Médio	2,1 – 3,0	3,1 – 4,5	8,1 – 12,0	13,1 – 19,5
Alto	3,1 – 6,0	4,6 – 9,0	12,1 – 24,0	19,6 – 39,0
Muito alto	> 6,0	> 9,0	> 24,0	> 39,0
	Grupo 4, mg dm^{-3}			
Muito baixo		≤2,3		
Baixo		2,3 – 4,6		
Médio		4,7 – 6,9		
Alto		7,0 – 13,8		
Muito alto		> 13,8		

Tabela 2: Faixas para interpretação do teor de fósforo (P) no solo pelo Mehlich-3 em função do teor de argila. Grupo 1: culturas com alta exigência de fósforo, com o teor crítico 1,7 vezes o de grãos. Grupo 2: culturas exigentes em fósforo (teor crítico igual dos grãos). Grupo 3: culturas com baixa exigência em fósforo, com o teor crítico 0,5 vezes o de grãos. Grupo 4: cultura do arroz irrigado. Fonte: Mumbach et al., 2018.

Nível de exigência de disponibilidade em P no solo	Culturas[1]
Grupo 1 Culturas muito exigentes (Teor crítico 1,7 vezes o de grãos)	Alho, beterraba, cenoura, batata e roseira de corte
Grupo 2 Culturas exigentes (Teor crítico igual grãos)	Culturas de grãos (exceto arroz irrigado); hortaliças (exceto culturas do Grupo 1); pastagens (exceto pastagem natural); frutíferas e gengibre
Grupo 3 Culturas pouco exigentes (Teor crítico 0,5 vezes o de grãos)	Demais culturas (exceto culturas dos Grupos 1, 2 e 4) tais como florestais, medicinais, aromáticas, condimentares, raízes, cana-de-açúcar e tabaco
Grupo 4	Arroz irrigado

Tabela 3: Classificação das culturas segundo sua exigência em disponibilidade de P no solo, tendo como base a exigência das culturas de grãos. Fonte: CQFS, 2016.

3.2.2. Potássio (K)

O potássio é um elemento essencial ao crescimento das plantas, necessário em quantidades semelhantes às do nitrogênio. Atua na regulação da atividade enzimática, na translocação de carboidratos, na eficiência do uso da água e na resistência aos efeitos da seca e de possíveis doenças ou parasitas (Straaten, 2007). Apesar disso, é um nutriente que não está presente nos tecidos vegetais propriamente ditos, mas sim nos fluidos que preenchem os xilemas e floemas, na forma de seu cátion monovalente (K^+), de alta mobilidade (Rosolem et al*.,* 2006).

Sendo um componente comum dos silicatos, o potássio está presente em feldspatos alcalinos, feldspatoides como a leucita, filossilicatos como as micas e a glauconita e em argilas, especialmente a illita (Deer et al*.,* 2014). Além disso, é comum também em minerais de evaporitos como a silvita, a carnalita, a kainita e a langbeinita (da Silva et al*.,* 2000). Embora presente em variados minerais, nos silicatos estes átomos de potássio encontram-se ligados a uma forte rede de tetraedros de silício (SiO_4^{4-}) (Lira & Neves, 2013) – configuração que pode ser visualizada na Figura 5 –, o que dificulta sua migração para as estruturas vegetais. Assim como o fósforo, sua forma disponível e com maior potencial de mobilidade diz respeito aos cátions monovalentes (K^+) em solução. O cloreto de potássio (KCl) – presente em rochas evaporíticas – é a fonte mais utilizada de K, uma vez que é também a que possui maior concentração do elemento. Esta molécula, no entanto, apresenta o maior índice salino, visto que contém em sua composição de 42% a 47% de cloro (Zonta et al*.*, 2021). Logo, cuidados devem ser tomados na utilização dos sais de potássio, de maneira a evitar a elevação excessiva da salinidade do solo.

De maneira geral, solos com elevados teores de potássio indicam presença de minerais primários – por vezes provenientes de rochas graníticas – e pouco efeito do intemperismo, sendo comuns em regiões áridas ou semiáridas. Teores de K mais baixos indicam solos intemperizados, de regiões úmidas, nos quais o preenchimento dos poros pela água da chuva eleva a concentração de K^+ em solução (Lafayette et al*.,* 2015). Os valores referentes ao que se consideram teores baixos, médios e altos de potássio em um solo estão presentes na Tabela 4.

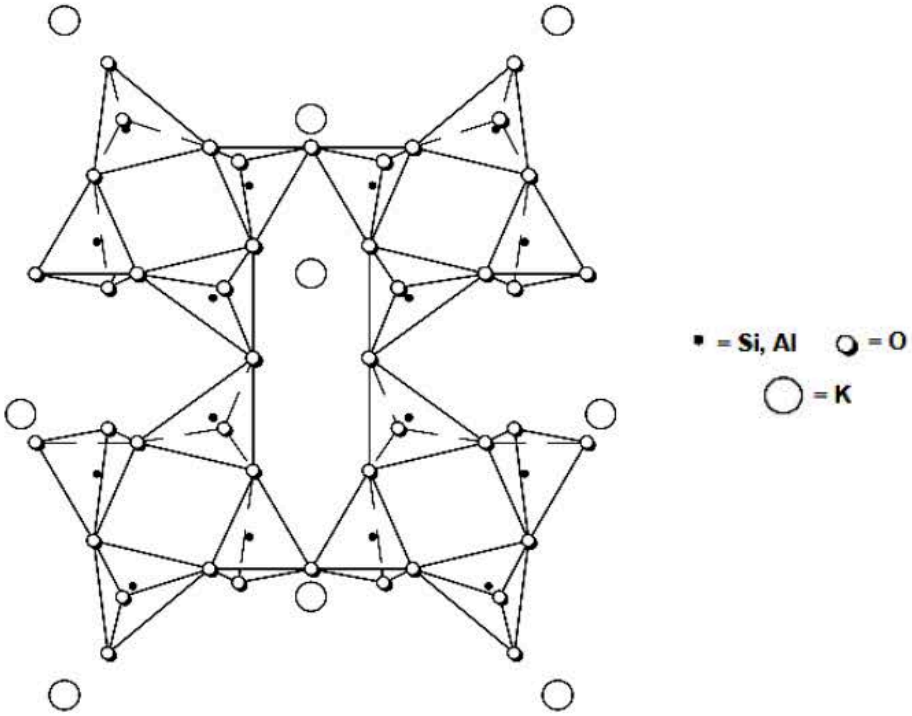


Figura 5: Estrutura do feldspato com uma camada única visualizada perpendicular ao seu plano. Os feldspatos costumam ter um de cada quatro Si^{4+} substituído com Al^{3+}, sendo o desequilíbrio de carga resultante compensado por íons de sódio e/ou potássio. Fonte: Modificado de Lira & Neves, 2013.

	Baixo	Médio	Alto
Teor de K no solo ($mg.dm^{-3}$)	< 30	30 - 60	> 60

Tabela 4: Faixas para interpretação do teor de potássio (K) no solo. Fonte: Modificado de Lafayette et al., 2015.

3.2.3. Enxofre (S)

O enxofre (S), absorvido pelas plantas sob a forma de sulfato (SO_4^{2-}), é um importante elemento na formação dos aminoácidos, proteínas, vitaminas e óleos dos vegetais. Sua estrutura química permite a realização de ligações covalentes estáveis, – principalmente com o C e outros átomos de S – e, consequentemente, a formação de aminoácidos como a cisteína, metionina e cistina, representantes da maior parte do S contido nas plantas (Mendes, 2007). Quando deficientes em S, as plantas podem apresentar baixos níveis de carboidratos, redução da fotossíntese e, além disso, tornar-se cloróticas devido à redução da biossíntese de proteínas que formam complexos com a clorofila nos cloroplastos (Mendes, 2007).

Quanto às formas de ocorrência mais frequentes do enxofre, destacam-se os sulfatos, como anidrita ($CaSO_4$) e gipsita ($CaSO_4.2H_2O$), os sulfetos, como pirita e marcassita (FeS_2) e o enxofre elementar (S^o) (Straaten, 2007). Os sulfatos são as fontes geológicas de S mais comuns, encontradas em sequências de rochas sedimentares depositadas em ambientes evaporíticos ou ainda em rochas que ocorrem como cobertura de domos de sal. Para mais, o enxofre está presente sob diferentes formas em depósitos de sulfetos metálicos, no petróleo e no gás, em areias betuminosas, no xisto betuminoso e no carvão (Straaten, 2007). As principais formas de ocorrência natural do enxofre, bem como seus percentuais em massa, estão reunidos na Figura 6.

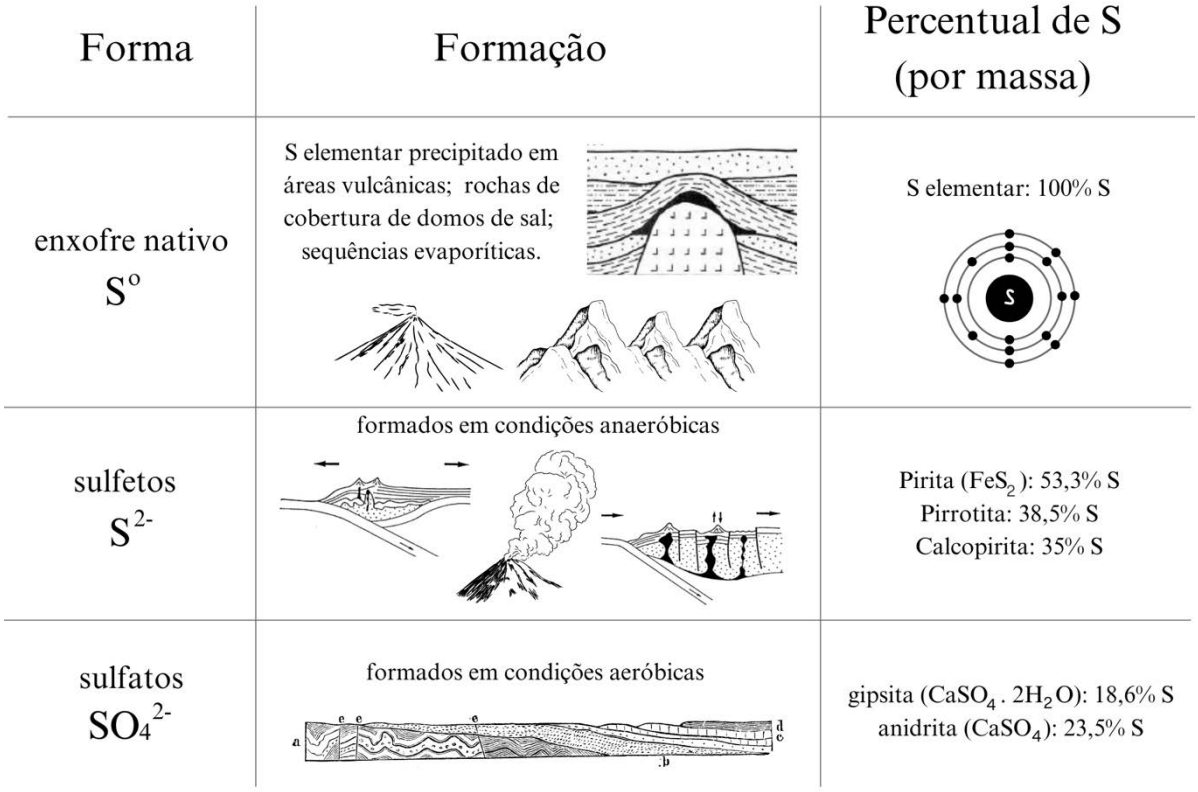


Figura 6: Painel esquematizado das formas de ocorrência natural do enxofre (S).

Quando na forma de íon sulfato (SO_4^{2-}), o enxofre apresenta alta mobilidade e, por isso, tende a se acumular na camada subsuperficial do solo. Por isso, a avaliação de seus teores ideais deve considerar duas faixas de profundidade – 0 a 20 cm e 20 a 40 cm –, além da textura e granulometria do solo em questão (De Castro et al., 2021). Os níveis críticos de enxofre no solo são os valores sobre os quais não ocorre mais um aumento da resposta das culturas à adubação, e são divididos também de acordo com as faixas de

profundidade. Na tabela 5, estão reunidas as faixas de interpretação do teor de enxofre nos solos, bem como a indicação de seus níveis críticos.

		Classes de teores de S no solo ($mg.dm^{-3}$)		
Profundidade (cm)	Classe textural	Baixo	Médio	Alto (nível crítico)
0-20	Solo argiloso (> 40% de argila)	< 5	5 a 10	> 10
20-40		< 20	20 a 35	> 35
0-20	Solo arenoso (< ou = 40% de argila)	< 2	2 a 3	> 3
20-40		< 6	6 a 9	> 9

Tabela 5: Faixas para interpretação do teor de enxofre (S) no solo. Fonte: Modificado de De Castro et al., 2021.

3.2.4. Cálcio e Magnésio

Diferentemente dos demais elementos, a análise de teor do cálcio e magnésio costuma ser feita em conjunto, devido ao fenômeno de inibição competitiva. Neste, a presença em excesso de um dos elementos pode diminuir a absorção do outro. Isso ocorre porque os elementos Ca e Mg possuem propriedades químicas similares e passam a competir pelos mesmos sítios de adsorção nos fluidos do solo (Sarruge et al., 1973).

A principal função do cálcio está associada à estabilização das estruturas celulares das plantas, ao passo que o magnésio é essencial para a fotossíntese e para a formação de inúmeras enzimas. Ambos são absorvidos pelas plantas em sua forma iônica (Mg^{2+} e Ca^{2+}) (Straaten, 2007). Esta absorção costuma ocorrer por fluxos de massa, isto é, fluxos de água e nutrientes que são transportados no sistema atmosfera-solo-planta (Ruiz et al., 1999).

Cálcio e magnésio são elementos presentes em grande escala na Terra. Nas rochas, ocorrem principalmente na forma de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), respectivamente. Os principais grupos minerais de ocorrência do primeiro são carbonatos, silicatos, sulfatos, fluoretos e fosfatos; do segundo, carbonatos, silicatos, sulfatos e cloretos (Straaten, 2007). Os principais ambientes de ocorrência geológica destes minerais estão compilados na Figura 7, bem como seus teores de óxidos em porcentagem na Tabela 6. Os valores considerados baixos, médios e altos de Ca e Mg nos solos, por sua vez, estão expostos na tabela 7, os quais serão utilizados como parâmetro para interpretação das análises de solo da CAJL. De maneira geral, a Empresa Brasileira de

Pesquisa Agropecuária (Embrapa) preconiza que a relação ideal de Ca/Mg varia de 3:1 a 5:1, ou seja, de 3 ou 5 partes de cálcio para 1 parte de magnésio (Vasconcellos et al., 1982).

Classificação	Mineral	CaO (%)	MgO (%)
Não-silicatos	Calcita ($CaCO_3$)	56	-
	Dolomita [$CaMg(CO_3)_2$]	30,4	21,9
	Anidrita ($CaSO_4$)	41,2	-
	Gipsita ($CaSO_4.2H_2O$)	32,6	-
	Apatita [$Ca_{10}(PO_4)_6F_2$]	55,8	-
	Magnesita [$MgCO_3$]	48	-
	Kieserita [$MgSO_4.H_2O$]	-	29
Silicatos	Diopsídio (clinopiroxênio)	25,9	18,6
	Epidoto	23,2	-
	Anortita (plagioclásio cálcico)	20,1	-
	Hornblenda (anfibólio)	14,9	13
	Tremolita (anfibólio)	13,8	24,8
	Actinolita (anfibólio)	13,3	19,1
	Forsterita (olivina)	-	57,3
	Serpentina	-	36-44
	Enstatita (piroxênio magnesiano)	-	40
	Clorita	-	20,36
	Talco	-	32
	Flogopita	-	29
	Vermiculita	-	20-24

Tabela 6: Teores médios de CaO e MgO (% em massa) nos principais grupos minerais em que ocorrem. Fonte: Modificado de Straaten, 2007.

	Classes de Teores no solo ($cmol_c dm^{-3}$)		
Macronutriente	Baixo	Médio	Alto
Ca	<1,6	1,6 - 3,0	>3,0
Mg	<0,4	0,4-1,0	>1,0

Tabela 7: Faixas de valores interpretados como baixos, médios e altos de Ca e Mg nos solos. Fonte: Modificado de Lafayette et al., 2015.

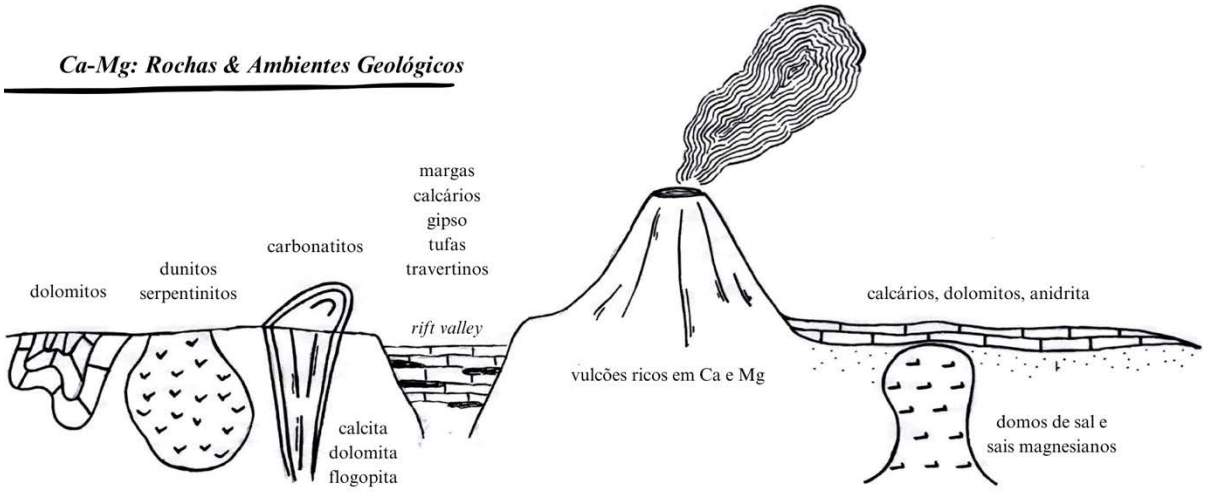


Figura 7: Seção esquemática com os principais ambientes de ocorrência geológica de rochas ricas em Ca e Mg.

3.2.5. Micronutrientes

3.2.5.1. Parâmetros Gerais

Os micronutrientes essenciais ao crescimento das plantas são boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn) (Mendes, 2007). As faixas de valores gerais consideradas baixas, médias e altas nas plantas para cada um destes elementos estão expostas na Tabela 8, bem como suas principais funções nas culturas e seus minerais de ocorrência.

Micronutriente	Concentração crítica ($mg.kg^{-1}$)	Concentração adequada ($mg.kg^{-1}$)	Concentração tóxica ($mg.kg^{-1}$)	Papel funcional nas plantas	Forma e Minerais de Ocorrência
Boro (B)	< 10	10-100	> 100	divisão celular, polinização, formação da parede celular, transporte de açúcares	$B(OH)_3$: bórax, turmalina, argilas marinhas, colemanita, kernita

Cobre (Cu)	< 6	8-20	> 20	formação das enzimas, metabolismo e fixação do nitrogênio	Cu^{2+}: calcopirita, calcossita, bornita, malackita, azurita, cuprita
Cloro (Cl) (%)	< 0.2%	0.2-2.0%	> 2.0%	ativação dos sistemas enzimáticos para produção de O2 na fotossíntese	Cl^{-}: halita, silvita
Ferro (Fe)	< 50	50-250	em geral não se torna tóxico para as plantas; no arroz, > 300	constituição dos cloroplastos, fotossíntese e fixação do nitrogênio	Fe^{2+}: magnetita, hematita, goethita, siderita, pirita
Manganês (Mn)	10-20	20-300	> 300	controle dos sistemas oxi-redox, formação do O2 na fotossíntese	Mn^{2+}: pirolusita, psilomelano
Molibdênio (Mo)	< 0.5	>0.5-5	em geral não se torna tóxico para as plantas	fixação do nitrogênio, antídoto à toxicidade	MoO_4^{2-}: molibdenita
Níquel (Ni)	-	-	-	ativação da enzima urease e germinação das sementes	Ni^{2+}: olivina, serpentina, pentlandita
Zinco (Zn)	15-20	20-100	> 400	enzimas, hormônios do crescimento, formação das sementes	Zn^{2+}: esfalerita

Tabela 8: Faixas de valores interpretados como baixos, médios e altos de micronutrientes nas plantas, principais funções nas culturas e suas formas de ocorrência. Fontes dos dados: Straaten, 2007; Deer et al., 2014.

3.2.5.2. Ambientes Geológicos

As concentrações gerais dos micronutrientes nas rochas estão detalhados nos gráficos 1 e 2. Tipicamente, os teores de boro nas rochas são baixos. As maiores concentrações ocorrem em rochas sedimentares marinhas ricas em argila e matéria orgânica, como folhelhos. O cloro, por sua vez, é o ânion mais frequente na água do mar, estando em grande concentração nas sequências evaporíticas marinhas. Os cátions divalentes Mn^{2+}, Ni^{2+} e Zn^{2+} possuem tamanhos semelhantes aos íons Fe^{2+} e Mg^{2+}, podendo substituí-los, o que os torna muito comuns em rochas máficas – mais ferromagnesianas – e menos abundantes em rochas félsicas – mais ricas em quartzo e feldspato. Já o molibdênio ocorre especialmente na forma de sulfetos em depósitos minerais do tipo pórfiro, em ambientes geotectônicos relacionados a arcos acrescionários, ou ainda em contextos pós-colisionais (após o período de subducção) (Rios, 2019).

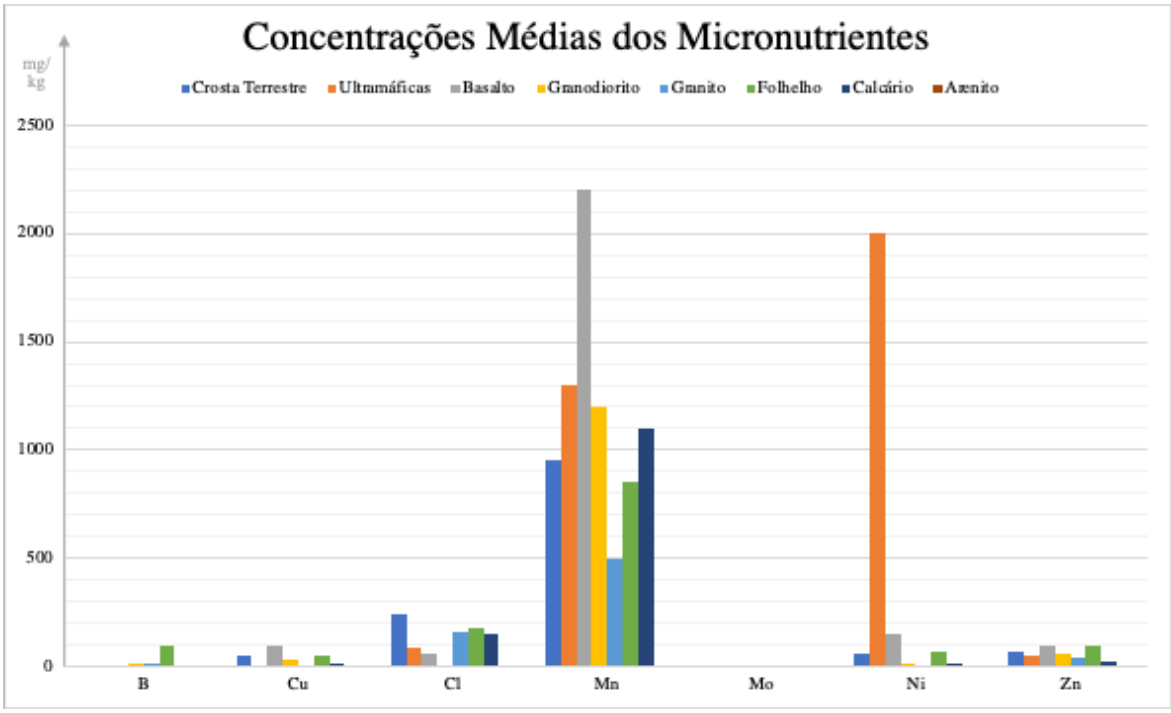


Gráfico 1: Concentrações médias de micronutrientes em $mg.kg^{-1}$ nos principais grupos de rochas da crosta terrestre e em coberturas sedimentares. Autoria própria. Fonte dos dados: Straaten, 2007.

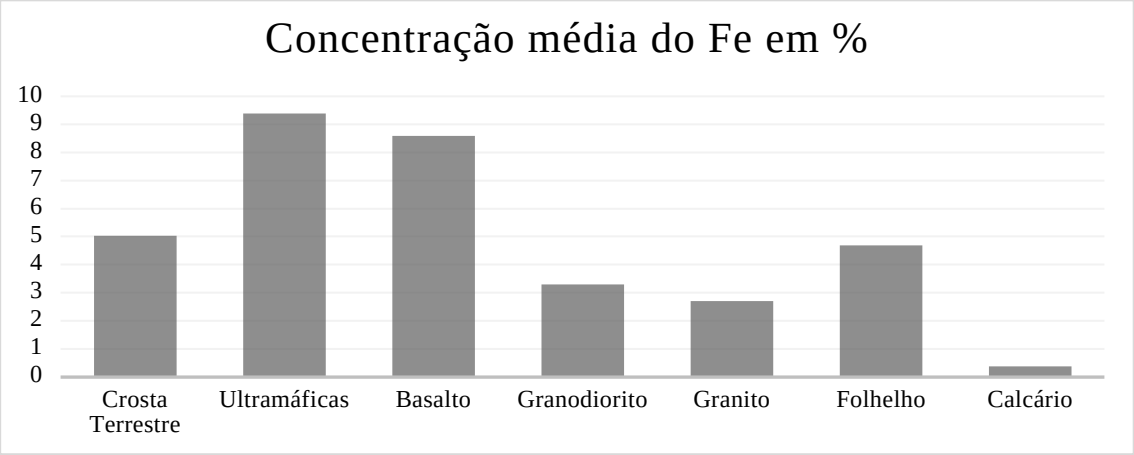


Gráfico 2: Concentrações médias do ferro em % nos principais grupos de rochas da crosta terrestre e em coberturas sedimentares. Autoria própria. Fonte dos dados: Straaten, 2007.

3.2.6. Demais Parâmetros Utilizados

3.2.6.1. pH e Saturação por Bases

O pH é o parâmetro medido pela escala logarítmica que indica a concentração hidrogeniônica em solução no solo, isto é:

$$pH = -\log [H^+] \text{ ou } [H_3O^+].$$

A escala pode variar de 0 a 14 e, quanto mais próximo de zero, maior a concentração de íons H^+ no solo – ou seja, maior sua acidez.

As faixas de valores de pH indicam a presença de diferentes componentes no solo: (1) entre 2 e 3, ácidos livres provenientes da pirita que, quando oxidada, passa para a forma de H_2SO_4; (2) entre 4 e 5, alumínio trocável, prejudicial às raízes das plantas; (3) entre 7 e 8, carbonatos de cálcio; (4) valores próximos de 9, por fim, indicam a presença de sódio (Lafayette et al., 2015). A disponibilidade e solubilização dos nutrientes no solo também são afetadas pelas faixas de pH (Figura 8), as quais, a depender do manejo realizado, podem alcançar valores tóxicos para as plantas (Veloso et al., 2020).

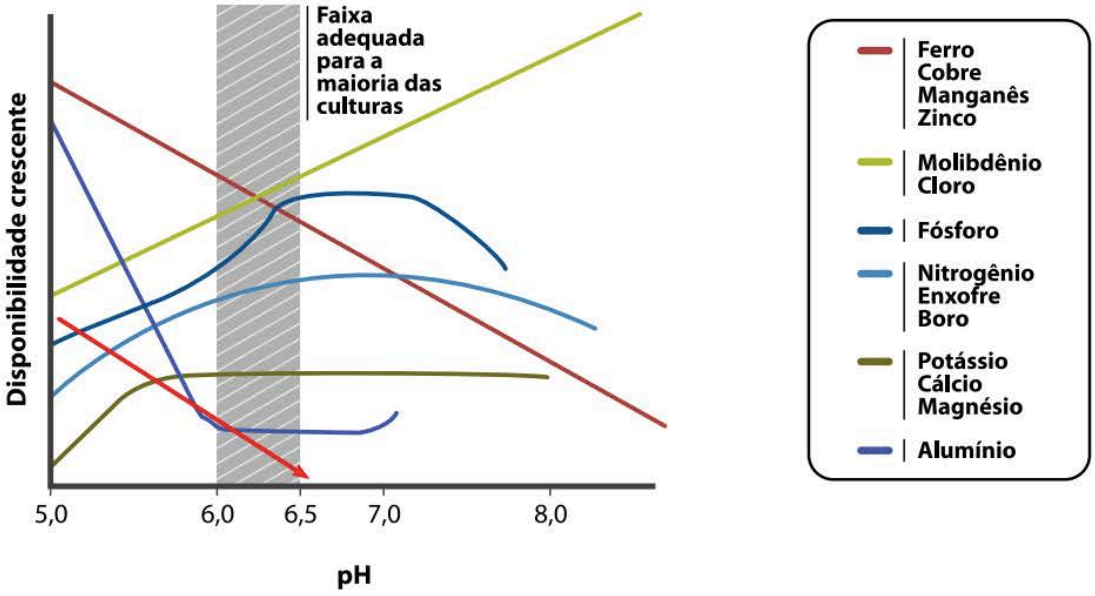


Figura 8: Influência do pH na disponibilidade de nutrientes no solo. Fonte: Veloso et al., 2020.

A saturação por bases é a proporção da capacidade de troca catiônica ocupada pelas bases (Lafayette et al., 2015). De maneira geral, solos com saturação por bases maior que 70% indicam que não há necessidade de correção da acidez, mas as proporções mais adequadas variam para cada cultura (Veloso et al., 2020) (Tabela 9).

Tipo de Cultura	Cultura	Faixa de V%
Cereais	Arroz	40-50
	Milho	50-60
Frutíferas	Abacateiro	50-60
	Bananeira	50-60
	Citrus	60-70
	Goiabeira	60-70
	Mangueira	50-60
	Maracujazeiro	60-70
Leguminosas	Feijão	60-70
	Soja	60-70
Hortaliças	Folhosas	60-70
	Tuberosas	50-60
	Bulbos	60-70
Estimulantes	Cacaueiro	60-70
	Cafeeiro	60-70
Sacarinas e Amido	Cana-de-açúcar	50-60
	Mandioca	30-40

Tabela 9: Faixas adequadas de saturação por bases para as principais culturas brasileiras. Fonte: Modificado de Veloso et al., 2020.

3.2.6.2. Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

A capacidade de troca catiônica (CTC) de um solo representa a quantidade total de cátions retidos à sua superfície em condição mutável ($Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + H^{+} + Al^{3+}$) (Ronquim, 2020). De maneira geral, CTCs baixas apresentam valores menores que 45 $mmol_c/dm^3$, ao passo que CTCs elevadas apresentam valores maiores que 100 $mmol_c/dm^3$ (Prezotti & Guarçoni, 2013). As implicações práticas dos valores de CTC estão reunidos na Tabela 10.

CTC elevada	CTC baixa
Alta porcentagem de argila e, ou, alto teor de M.O.	Baixa porcentagem de argila ou baixo teor de M.O.
Maior quantidade de calcário é necessária para aumentar o pH	Menor quantidade de calcário é necessária para aumentar o pH
Maior capacidade de retenção de nutrientes a uma certa profundidade	Nitrogênio e potássio lixiviam mais
Maior capacidade de retenção de umidade	Menor capacidade de retenção de umidade

Tabela 10: Implicações práticas dos níveis de capacidade de troca catiônica (CTC). Fonte: Ronquim, 2020.

3.3. Perfis de Solo, Horizontes e Classificações

O perfil de solo representa a unidade fundamental da pedologia, e a delimitação e descrição dos horizontes permite sua separação em diferentes classes. São reconhecidos oito horizontes e camadas principais (Tabela 11), utilizados em conjunto com os sufixos (Tabela 12), que possuem significados próprios e somam características ao perfil estudado (Tullio, 2019).

Nome	Classificação	Características
O e H	horizonte ou camada	de constituição orgânica, podem ser bem drenados (O) ou mal drenados, com condições de anaerobiose (H)
A	horizonte	horizonte mineral superficial com maior quantidade de MO do que os horizontes subjacentes. Geralmente apresentam menores valores de densidade e teor de argila, com maior desenvolvimento de estrutura granular, favorecendo a circulação de ar, fluxo de água e fixação dos vegetais

E	horizonte	horizonte de translocação de materiais (MO, argila etc.); pode apresentar cores claras e/ou textura arenosa
B	horizonte	horizonte mineral subsuperficial com maior expressão dos processos pedogenéticos, com domínio das características genéticas sobre as herdadas do material de origem
C	horizonte	horizonte mineral adjacente à rocha matriz, com domínio das características herdadas sobre as genéticas
F	horizonte ou camada	formado pela consolidação de minerais ricos em ferro (petroplintita)
R	camada	representa o substrato rochoso

Tabela 11: Horizontes e camadas utilizados na descrição de perfis e classificação de solos. Fonte: Modificado de Tullio, 2019.

Subscrito	Característica
d	Avançado estado de transformação da matéria orgânica.
f	Material laterítico brando ou plintita.
g	Gleização intensa.
h	Acúmulo de material orgânico coloidal iluvial.
i	Desenvolvimento incipiente de horizonte.
j	Tiomorfismo.
n	Acúmulo de sódio trocável.
o	Material orgânico não decomposto.
p	Aração ou outras pedoturbações.
r	Rocha branda ou saprolito (exclusivo do horizonte C).
s	Acúmulo iluvial de óxidos de ferro e alumínio com matéria orgânica.
t	Acúmulo de argila (iluvial ou não).
w	Intensa intemperização com inexpressiva acumulação de argila.

Tabela 12: Principais sufixos utilizados em horizontes e camadas. Fonte: Tullio, 2019.

4. Aspectos Fisiográficos Regionais

4.1. Geologia, Geomorfologia e Clima

O município de Antonina está inserido na bacia hidrográfica do Rio Pequeno e apresenta diversidade de feições geomorfológicas, contemplando 6 feições taxonômicas, dispostas na Tabela 13 (FUPEF, 2022). A CAJL, em específico, está localizada em área onde dominam planícies flúvio-marinhas, sendo cercada pelos morros da Serra do Mar e pelos planaltos dos Complexos Gnaissicos-Migmatíticos.

Tipo de Formação	Área (km²)	%
Morros isolados costeiros	39,65	5
Rampas de pré-serra e serras isoladas	167,10	20
Serra do Mar paranaense	260,29	31
Blocos soerguidos da Serra do Mar	70,82	8
Planalto do Complexo Gnaissico-Migmatítico	65,62	8
Planície Litorânea e Planícies Flúvio-Marinhas	225,27	27
Corpos d'água	10,99	1

Tabela 13: Feições geomorfológicas do município de Antonina/PR. Fonte: FUPEF, 2022.

O relevo da região é heterogêneo, marcado pela presença de topos alongados e em cristas, vertentes retilíneas e vales em "V" fechado, resultantes dos processos de soerguimento tectônico de blocos da Serra do Mar (FUPEF, 2022). Segundo a classificação de Köppen, em Antonina predominam as variedades "Af" – clima tropical de floresta – e "Cfa" – clima mesotérmico úmido e verões quentes, sem estação de seca e com as quatro estações bem definidas (Prefeitura Municipal de Antonina, 2020). A elevada pluviosidade do clima tropical úmido e o relevo acidentado do município contribuem para a instabilidade das encostas, o que levou à delimitação de zonas de proteção ambiental, como a Zona de Proteção das Altas Serras (ZPAS), com altitudes que atingem até 1532 m (IPARDES, 2001).

A APA de Guaraqueçaba engloba dois domínios geológicos principais: rochas graníticas do embasamento com diques básicos juro-cretáceos associados e coberturas sedimentares cenozoicas. Os depósitos sedimentares foram identificados como continentais (leques aluviais, talus e colúvios) ou costeiros, estes últimos associados a dois sistemas deposicionais distintos: (1) planície costeira com cordões litorâneos ou (2) ambientes estuarinos (IPARDES, 2001).

4.2. Pedologia

O mapa de solos das bacias hidrográficas do litoral paranaense (Figura 9), utilizado neste trabalho, foi elaborado por De Paula et al. (2022) na escala 1:125.000. O levantamento de solos nesta escala (semidetalhado) tem relevância para a integração de estudo dos atributos do solo e as litologias potenciais para fornecimento de remineralizadores. Em escala regional da área de estudo, os solos predominantes são os Argissolos, Cambissolos e Gleissolos.

4.2.1. Argissolos

Argissolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou alta, desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico na maior parte do horizonte B, podendo possuir horizontes plíntico ou glei, desde que não satisfaçam aos critérios para Plintossolos ou Gleissolos, respectivamente (Santos et al., 2018). Em relevos suaves, apresentam potencial para o uso agrícola. Deficiências como baixa fertilidade, acidez, teores elevados de Al e suscetibilidade a processos erosivos estão mais associadas a relevos acidentados (Zaroni & dos Santos, 2022).

4.2.2. Cambissolos

Cambissolos são solos pouco desenvolvidos, cuja presença de minerais primários evidencia características do material originário (rocha). Apresentam horizonte diagnóstico B incipiente, com baixa ou alta saturação por bases e baixa a alta atividade de argila (Zaroni & dos Santos, 2022). Quando em áreas mais planas, os Cambissolos apresentam potencial para o uso agrícola, especialmente se de maior profundidade e ricos em argilas de atividade baixa.

4.2.3. Gleissolos

Gleissolos são solos compostos por material mineral com horizonte glei iniciando-se dentro dos primeiros 50 cm a partir da superfície, sendo que não apresentam textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes até a profundidade mínima de 150 cm (Santos et al., 2018). Encontram-se saturados por água permanente ou periodicamente, sendo comumente desenvolvidos em sedimentos recentes e nas proximidades dos cursos d'água, fato que os leva a apresentarem baixa fertilidade natural, pH ácido, pouca drenagem e elevadores teores de alumínio, sódio e enxofre, limitando seu uso agrícola (Zaroni & dos Santos, 2022).

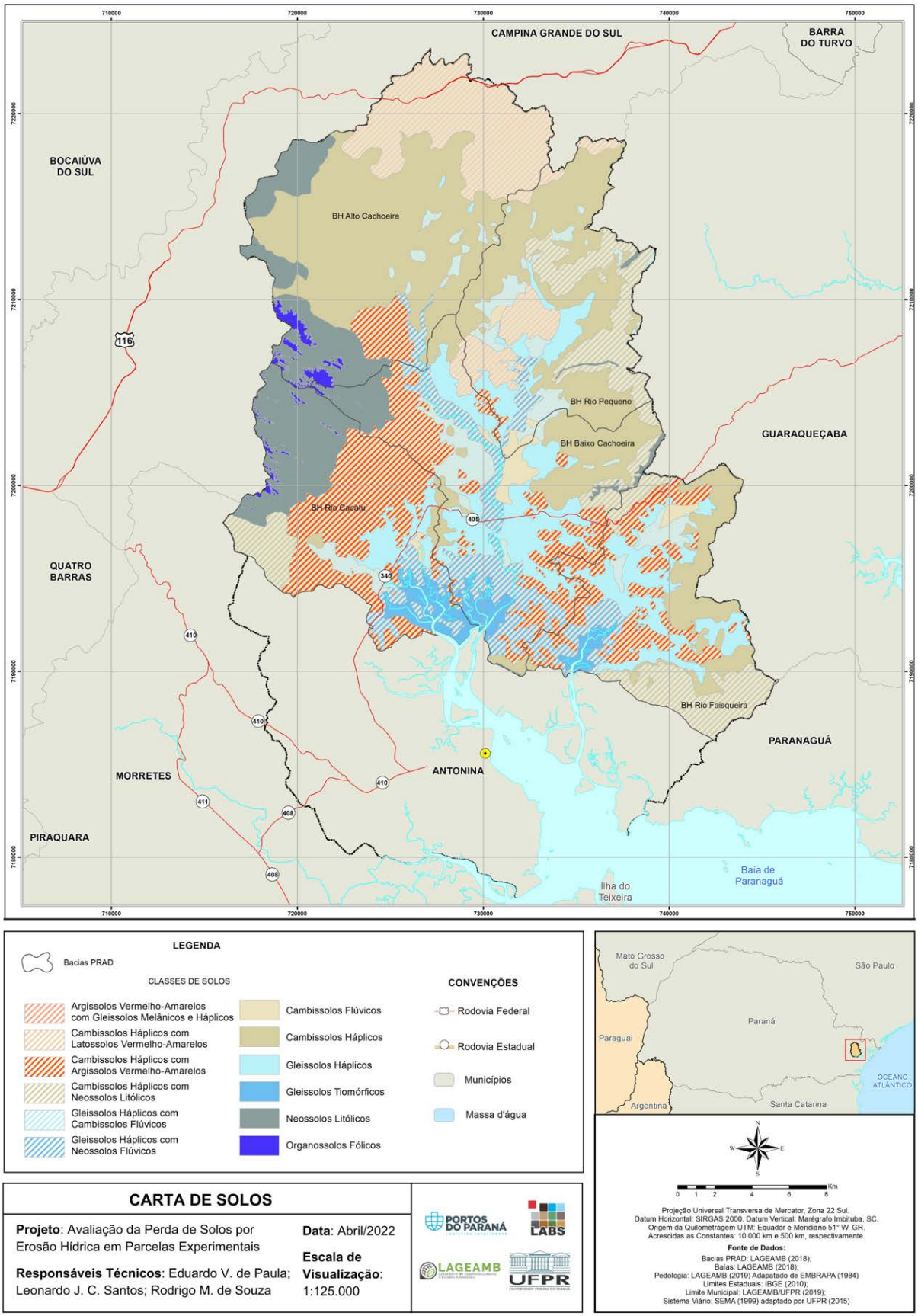


Figura 9: Carta de solos das bacias hidrográficas do litoral paranaense. Fonte: Modificado de De Paula et al., 2022.

5. Resultados

5.1. Pedologia de Detalhe e Descrição Morfológica

Os solos da CAJL foram identificados como CAMBISSOLOS FLÚVICOS Tb Distróficos típicos (perfil 01) e CAMBISSOLOS HÁPLICOS Tb Distróficos típicos (perfil 02) (Masseran et al., 2022). As descrições morfológicas dos dois perfis de solo abertos na Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger estão dispostas nas Tabelas 14 e 15.

Perfil 01					
Horizonte	Profundidade (cm)	Cor - Matriz Úmida	Textura	Estrutura	Consistência
Ap	0-12	10YR 3/2	Franco-argilosa	Grau - forte; Tamanho - pequeno; Tipos - granular	Úmido - friável; Plasticidade - plástica; Pegajosidade - pegajosa; Transição - topografia plana e contraste claro
Bi1	12-45	10YR 5/4	Argilosa	Grau - moderada; Tamanho - médio; tipos - blocos angulares e subangulares	Úmido - friável; Plasticidade - plástica; Pegajosidade - pegajosa; Transição - topografia plana e constraste gradual
Bi2	45-75	10YR 6/4; Variegado - Matriz úmida: 10YR 6/2, comum, pequena e distinta	Argilosa-siltosa	Grau - fraca; Tamanho - grande; Tipos - Blocos angulares	Úmido - friável; Plasticidade - muito plástica; Pegajosidade - muito pegajosa; Transição - topografia plana e constraste gradual
BC	75-92	10YR 5/4; Variegado - Matriz úmida: 10YR 6/3, comum, pequena e distinta	Argilosa-siltosa	Grãos simples	Úmido - muito friável; Plasticidade - não plástica; Pegajosidade - ligeiramente pegajosa; Transição - topografia plana e constraste abrupto
C/R	92+	10YR 6/3; Variegado - Matriz úmida: 7.5YR 6/6, comum, pequena e distinta	Argilosa-siltosa	Maciça	Úmido - friável

Tabela 14: Descrição morfológica de perfil de solo da CAJL. Fonte: Modificado de Masseran et al., 2022

Perfil 02					
Horizonte	Profundidade (cm)	Cor - Matriz Úmida	Textura	Estrutura	Consistência
Ap	0-15	10YR 4/3	Franco	Grau - forte; Tamanho - pequeno; Tipos - granular	Úmido - friável; Plasticidade - plástica; Pegajosidade - pegajosa; Transição - topografia plana e contraste claro
Bi1	15-43	10YR 4/4	Franco	Grau - moderada; Tamanho - médio a pequeno; tipos - blocos angulares	Úmido - friável; Plasticidade - plástica; Pegajosidade - pegajosa; Transição - topografia plana e constraste gradual
Bi2	43-70	10YR 5/6	Franco-argilo-arenosa	Grau - moderada; Tamanho - média; Tipos - Blocos angulares e subangulares	Úmido - friável; Plasticidade - plástica; Pegajosidade - muito pegajosa; Transição - topografia plana e constraste claro
2C	70-90	10YR 5/4	Franco-arenosa e cascalhenta	Grãos simples	Úmido - muito friável; Plasticidade - não plástica; Pegajosidade - ligeiramente pegajosa; Transição - topografia plana e constraste abrupto
3C	90-116	10YR 5/4	Arenosa e cascalhenta	Grãos simples	Úmido - solta; Plasticidade - não plástica; Pegajosidade - não pegajosa; Transição - topografia plana e constraste abrupto
4C	116-125+	10YR 5/4	Arenosa e cascalhenta	Grãos simples	Úmido - solta; Plasticidade - não plástica; Pegajosidade - não pegajosa

Tabela 15: Descrição morfológica de perfil de solo da CAJL. Fonte: Modificado de Masseran et al.,

5.2. Análises Químicas dos Solos da Comunidade

Como parte do Programa de Recuperação de Áreas Degradas da APA de Guaraqueçaba, foram coletadas pela empresa *ECOTEC Soluções Ambientais LTDA*

amostras dos solos da CAJL em pontos próximos aos perfis abertos, para realização de análises químicas ao longo de três anos, nas profundidades 0-20 e 20-40 cm. Os resultados foram cedidos e estão dispostos na Tabela 16, sendo referentes à última coleta, realizada em 29/05/2024. O ponto de coleta e os pontos onde foram realizadas as descrições morfológicas dos perfis de solo estão esquematizados na Figura 10.

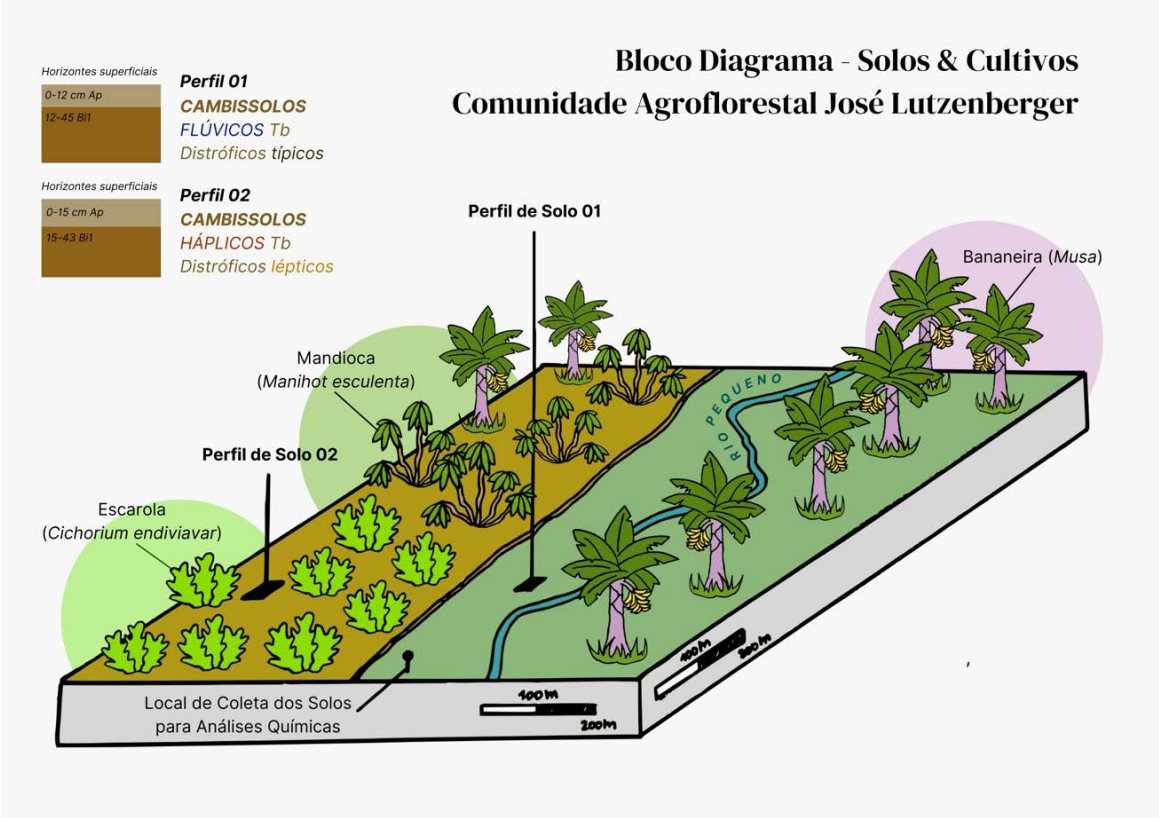


Figura 10: Bloco diagrama com os pontos de coleta de solos para análises químicas, perfis de solo descritos e cultivos da Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger. As porções com superfície de cor verde dizem respeito às áreas nas quais já houve maior recuperação da vegetação nativa, ao passo que os domínios de cor castanha são zonas com maior proporção de solo exposto.

AMOSTRA 1		Profundidade (cm)	
Determinação	Unidade	0 - 20	20 - 40
pH	-	4,6	4,7
Fósforo	$mg.dm^{-3}$	20	19
Potássio	$mg.dm^{-3}$	27,37	31,28
Cálcio	$cmolc.dm^{-3}$	2,2	1,2
Magnésio	$cmolc.dm^{-3}$	0,5	0,3
C. T. Cátions	$mmolc.dm^{-3}$	71,7	41,8
Saturação por Bases	%	39	38
Enxofre	$mg.dm^{-3}$	5	2

Boro	$mg.kg^{-1}$	0,28	0,25
Cobre	$mg.kg^{-1}$	1,8	0,8
Ferro	$mg.kg^{-1}$	126	56
Manganês	$mg.kg^{-1}$	23,3	10,8
Zinco	$mg.kg^{-1}$	1,7	0,5

Tabela 16: Análises químicas dos solos nas profundidades 0-20 e 20-40 cm.

5.3. Mapeamento de Lavras Ativas em um Raio de 100 km

No anexo II deste trabalho estão reunidos todos os processos em estado de concessão de lavra que se encontram dentro do raio de 100 km da CAJL, bem como suas áreas e as respectivas substâncias produzidas. O mapa destes processos pode ser visualizado na Figura 11.

A tabela de lavras serviu como base para elaboração do custo-benefício e da pegada de carbono de transporte dos pós de rochas das minas, de maneira a priorizar as que, concomitantemente, estão mais próximas e possuem as litologias mais promissoras para construção da fertilidade dos solos da comunidade.

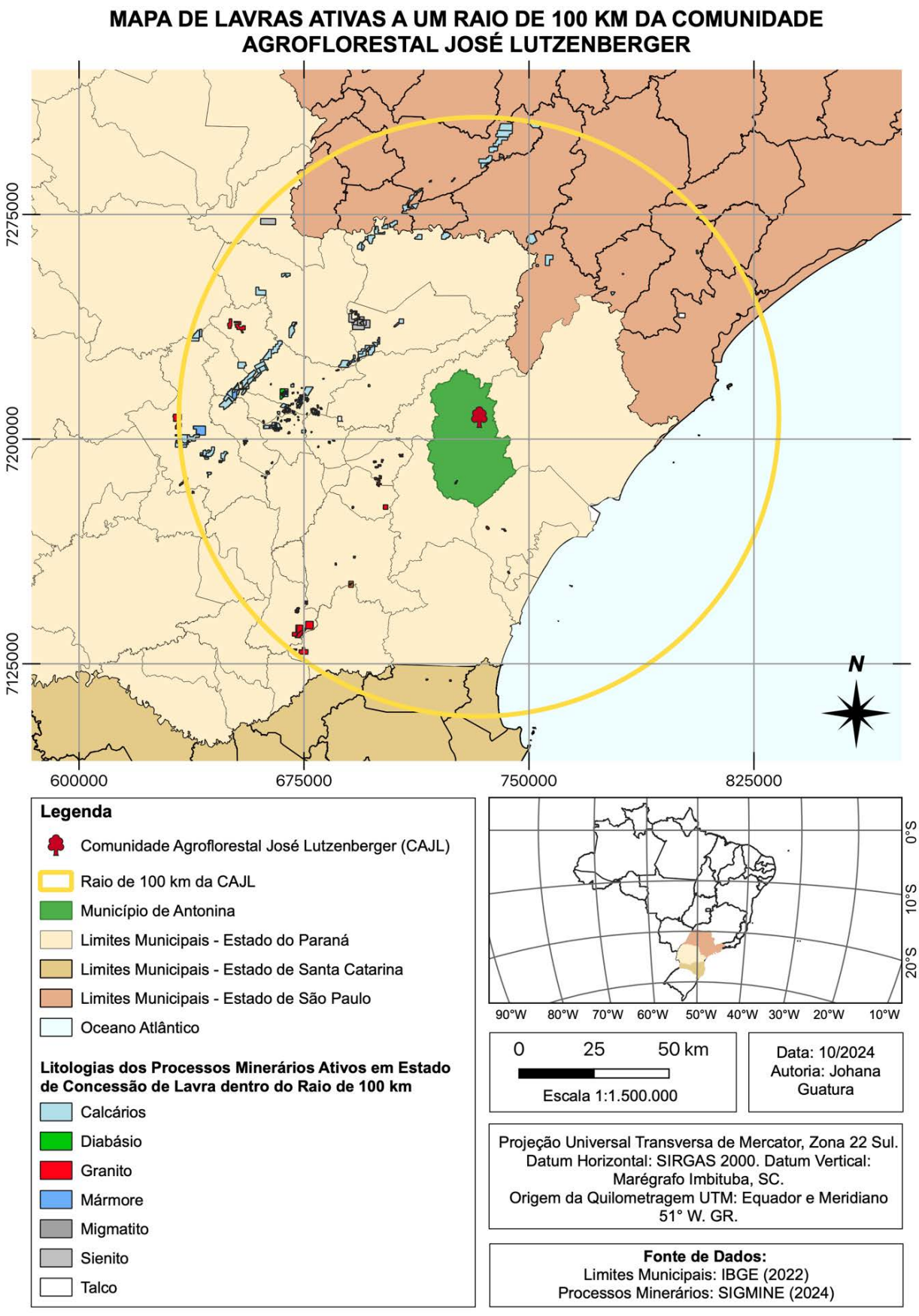


Figura 11: Mapa de Lavras ativas a um raio de 100 km da CAJL.

6. Discussões

6.1. Interpretação dos Perfis de Solo e Análises Químicas

6.1.1. Considerações Anteriores às Interpretações

Para construção da fertilidade de um solo utilizando remineralizadores, é essencial que o raciocínio acerca das análises químicas seja realizado de maneira conjunta com as descrições dos horizontes dos perfis de solo e o conhecimento dos principais cultivos agrícolas praticados no local. Disto isto, algumas considerações serão citadas e detalhadas a seguir.

6.1.1.1. Os Solos da CAJL

De acordo com as descrições dos perfis abertos, os solos da CAJL são CAMBISSOLOS FLÚVICOS Tb Distróficos típicos e CAMBISSOLOS HÁPLICOS Tb Distróficos típicos. Em relevos suaves – como os da CAJL, geologicamente posicionada sobre as coberturas sedimentares cenozoicas e cercada pela Serra do Mar –, os Cambissolos apresentam potencial para o cultivo agrícola.

Os Cambissolos háplicos de maneira geral são mais homogêneos e menos estratificados do que os Cambissolos flúvicos, sendo que a gênese dos segundos está relacionada a processos aluvio-coluvionares, comumente associados ao transbordamento fluvial e às grandes enchentes (Curcio et al., 2021). O termo distrófico diz respeito a solos com baixa saturação por bases – ou seja, ácidos – e, por consequência, de baixa fertilidade (Almeida et al., 2021), ao passo que o 'Tb' se refere à baixa atividade da fração argila, inferior a 27 $cmol_c kg^{-1}$ (Santos et al., 2018). O subgrupo 'típico', por fim, representa os solos que não atendem aos critérios para os demais subgrupos na chave taxonômica (Santos et al., 2018).

6.1.1.2. Teor de Argila

Os horizontes mais superficiais de ambos os perfis de solo abertos (Ap e Bi1), são francos ou franco-argilosos, textura considerada média-argilosa na proporção entre areia, silte e argila (Santos et al., 2018). Esta classificação é relevante para interpretação dos

teores de enxofre no solo, por exemplo, e pode ser mais bem compreendida na Figura 12, que contém os valores de referência para subgrupamento das classes de textura.

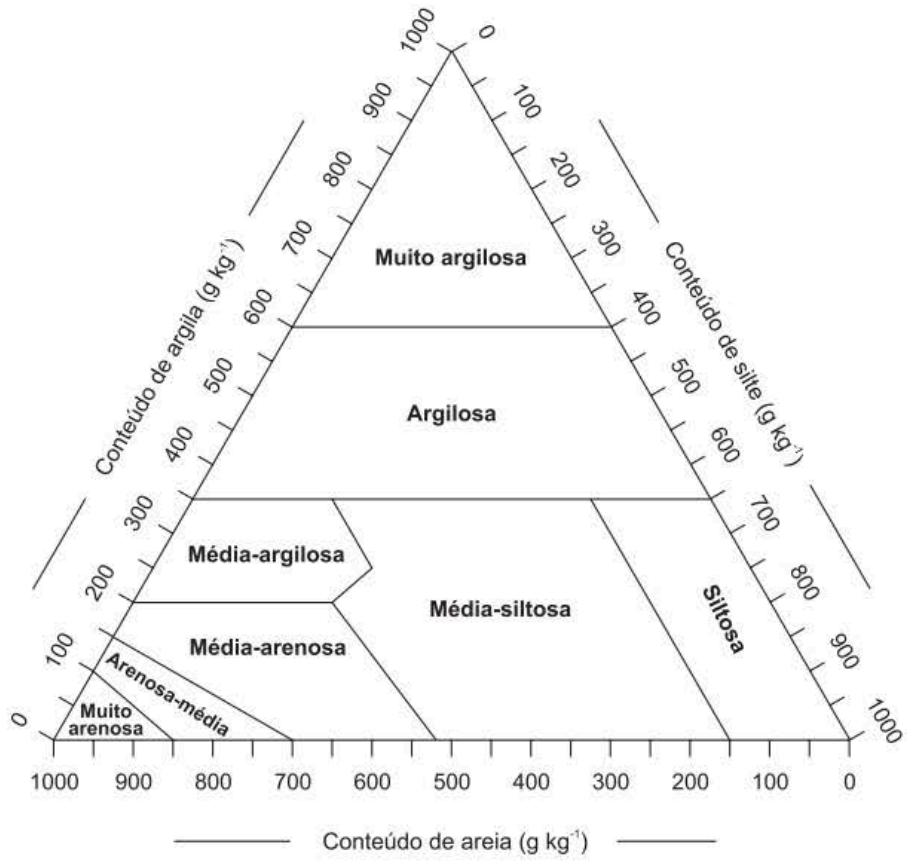


Figura 12: Guia para subgrupamento das classes de textura. Fonte: Santos et al., 2018.

6.1.1.3. Faixas Ideais

Altas concentrações de nutrientes nos solos, com valores superiores aos níveis críticos, podem causar fenômenos de toxicidade às plantas (Feil et al., 2023). Assim sendo, as faixas de valores consideradas ideais para os solos serão aquelas referentes às concentrações médias, apresentadas anteriormente.

6.1.1.4. Os Principais Cultivos da CAJL

Os principais cultivos realizados na CAJL são a horticultura (grupo das folhosas), mandioca (grupo das sacarinas e amido), amendoim (grupo das leguminosas) e batata doce (grupo das tuberosas). O conhecimento das culturas é relevante, em especial, para

parâmetros cujos valores são subdivididos de acordo com o tipo de cultivo, como é o caso do fósforo (P) e da porcentagem da saturação por bases.

6.1.2. Gráfico de Análises Químicas Interpretadas

Os parâmetros que apresentaram maior discrepância em relação aos valores de referência foram pH, saturação por bases e os teores de fósforo, enxofre, boro, cobre e zinco (Tabela 17). O pH dos solos mostrou-se baixo, o que implicou também em uma baixa saturação por bases. Os valores obtidos são considerados bons apenas para a cultura da mandioca, visto que os demais cultivos exigem saturações por bases que variam entre 50 e 70%. O mesmo acontece para o teor de fósforo, que se mostrou ideal apenas para os cultivos do grupo 3, que engloba cana-de-açúcar, tabaco e culturas florestais, medicinais, aromáticas, condimentares e raízes. Em resumo, para melhores desempenhos na prática da horticultura e cultivo de leguminosas e tubérculos, os solos da CAJL necessitarão de uma correção da acidez e aumento dos teores de fósforo, enxofre, boro, cobre, ferro e zinco.

AMOSTRA 1		Profundidade (cm)			
Determinação	Unidade	0 - 20	20 - 40	Valores de referência	Interpretação
pH	-	4,6	4,7	6,0 - 6,5	baixo
Fósforo	$mg.dm^{-3}$	20	19	44,1 - 66,0 (grupo 1) 26,1 - 39,0 (grupo 2) 13,1 - 19,5 (grupo 3)	baixo para os grupos 1 e 2, ideal para a mandioca (grupo 3)
Potássio	$mg.dm^{-3}$	27,37	31,28	30 - 60	ideal
Cálcio	$cmolc.dm^{-3}$	2,2	1,2	1,6 - 3,0	ideal
Magnésio	$cmolc.dm^{-3}$	0,5	0,3	0,4 - 1,0	ideal
C. T. Cátions	$mmolc.dm^{-3}$	71,7	41,8	45 - 100	ideal
Saturação por Bases	%	39	38	30-40 (mandioca) 50-60 (tuberosas) 60-70 (leguminosas, folhosas e bulbos)	baixa para todos, exceto mandioca
Enxofre	$mg.dm^{-3}$	5	2	2-3 (0-20 cm) 6-9 (20-40 cm)	baixo
Boro	mg/kg	0,28	0,25	10-100	baixo
Cobre	mg/kg	1,8	0,8	8-20	baixo
Ferro	mg/kg	126	56	50-250	ideal
Manganês	mg/kg	23,3	10,8	20-300	ideal
Zinco	mg/kg	1,7	0,5	20-100	baixo

Tabela 17: Interpretação das Análises Químicas da CAJL.

6.2. Áreas Potenciais para Fornecimento do Pó de Rocha

6.2.1. Deficiências Identificadas e Definição das Rochas Potenciais para Remineralização

A partir do diagnóstico exposto na Tabela 17 e a correlação dos nutrientes com as respectivas fontes e ambientes geológicos de ocorrência já descritos neste trabalho, elaborou-se a Tabela 18, com as principais litologias potenciais que poderiam fornecer o pó de rocha para correção das deficiências identificadas.

Deficiência identificada	Interpretação sobre o resultado obtido	Litologias potenciais para fornecimento do pó de rocha corretivo
pH	baixo	rochas alcalinas: calcários, mármores e basalto/diabásio
Fósforo	baixo para os grupos 1 e 2, ideal para a mandioca (grupo 3)	fosfatos, basalto/diabásio e rochas ricas em apatita (carbonatitos, granitos e sienitos)
Saturação por Bases	baixa para todos, exceto mandioca	rochas alcalinas: calcários, mármores e basalto/diabásio
Enxofre	baixo	evaporitos e rochas com mineralizações de sulfetos
Boro	baixo	folhelhos e granitos
Cobre	baixo	basaltos/diabásios, folhelhos e granodioritos
Zinco	baixo	basaltos/diabásios, folhelhos, granodioritos, ultramáficas e granitos

Tabela 18: Deficiências identificadas nos solos da CAJL e respectivas litologias potenciais para fornecimento do pó de rocha corretivo.

Embora a calagem (correção da acidez do solo) seja mais comumente feita com rochas calcárias devido à rapidez da reação dos carbonatos com os íons H^+, o pó de rochas basálticas também é capaz de aumentar o pH do solo (Rodrigues et al., 2024) e ainda suprir outras demandas de nutrientes, como fósforo, cobre e zinco (Kautzmann, 2020). A utilização de pó de calcários e/ou mármores, por outro lado, não contribuiria para o acréscimo de nutrientes, ao passo que rochas graníticas poderiam suprir as demandas de

fósforo, boro e zinco, mas não existem estudos suficientes que comprovem sua eficácia no aumento do pH e da saturação por bases em solos ácidos.

Dadas as informações expostas e análises realizadas, foram consideradas litologias aptas à remineralização aquelas que atenderiam à correção de ao menos três parâmetros identificados como deficientes nos solos da CAJL (Tabela 19).

Litologias potenciais para fornecimento do pó de rocha corretivo	Número de Parâmetros Satisfeitos
*Basaltos/diabásios**	4
*Granitos**	3
Calcários e mármores	2
Folhelhos	2
Granodioritos	2
Fosfatos e rochas ricas em apatita	1
Evaporitos	1
Ultramáficas	1
Rochas mineralizadas em sulfetos	1

Tabela 19: Litologias potenciais para fornecimento do pó de rocha e número de parâmetros satisfeitos. (*): Litologias definidas como aptas à remineralização dos solos da CAJL.

6.2.2. Lavras Ativas com as Litologias Aptas à Remineralização

Finalizadas as interpretações das análises, foram selecionadas as lavras localizadas dentro do raio de 100 km da CAJL cujas substâncias para extração coincidem com as litologias definidas como aptas à remineralização, totalizando 39 minas em estágio de concessão de lavra: 3 para diabásio e 36 para granito (Tabela 20).

Processo	Área (ha)	Empresa/Pessoa Física	Substância	UF
812853/1968	331,12	VOTORANTIM CIMENTOS S.A.	DIABÁSIO	PR
816327/1968	59,36	VOTORANTIM CIMENTOS S.A.	DIABÁSIO	PR
815606/1973	18	MARMORARIA AGUA VERDE LTDA	GRANITO	PR
803380/1974	78,85	MORRO BRANCO MINERAÇÃO LTDA	GRANITO	PR
806851/1974	21,62	MARMORARIA AGUA VERDE LTDA	GRANITO	PR
801983/1976	225	FELIPPE MASCARO	GRANITO	PR

806146/1976	38,7	SEPAMAR SERRARIA PARANAENSE DE MARMORES LTDA	GRANITO	PR
820108/1978	592,75	SOMIBRÁS SOCIEDADE DE MINERAÇÃO BRASILEIA LTDA.	GRANITO	PR
820149/1979	335,12	PARANA GRANITOS LTDA	GRANITO	PR
820752/1980	49,48	SEPAMAR SERRARIA PARANAENSE DE MARMORES LTDA	GRANITO	PR
820669/1981	49,61	BASALTO PEDREIRA E PAVIMENTACAO LTDA	GRANITO	PR
821031/1981	42,77	Mineração Morro Anhangava Ltda	GRANITO	PR
820077/1983	492	PARANA GRANITOS LTDA	GRANITO	PR
820299/1983	296,5	GRAMINERIOS MINERAÇÃO E TRANSPORTES LTDA	GRANITO	PR
820394/1983	464,25	PARANA GRANITOS LTDA	GRANITO	PR
820681/1983	559,58	PARANA GRANITOS LTDA	GRANITO	PR
820751/1983	272,65	PARANA GRANITOS LTDA	GRANITO	PR
826054/1988	50,4	PEDREIRA RIO DO MEIO LTDA	GRANITO	PR
826073/1989	70,88	Milton Perine Fi	GRANITO	PR
826297/1992	18,58	CBB INDUSTRIA E COMERCIO DE ASFALTOS E ENGENHARIA LTDA	GRANITO	PR
826912/1994	50	Abib Miguel	GRANITO	PR
827107/1996	45	De Amorim Construtora de Obras Ltda	GRANITO	PR
826143/1997	48,19	CHIMBUVA MINERADORA S/A	GRANITO	PR
826020/2000	33,37	Pedreiras Boscardin Ltda	GRANITO	PR
826127/2001	49,98	De Amorim Construtora de Obras Ltda	GRANITO	PR
826022/2002	49,91	Pedreira Mandirituba Ltda.	GRANITO	PR
826040/1990	49,2	Oca Engenharia e Empreendimentos Ltda	GRANITO	PR
826080/2011	50	Construtora Serra da Prata Ltda.	GRANITO	PR
826570/2002	40,71	Pedreira Mandirituba Ltda.	GRANITO	PR
826681/1996	32,89	PEDREIRA RIO DO MEIO LTDA	GRANITO	PR
826387/2002	32	Pedreira Mandirituba Ltda.	GRANITO	PR
820557/1980	997,1	PARANA GRANITOS LTDA	GRANITO	PR
826388/2002	42	Pedreira Mandirituba Ltda.	GRANITO	PR
812853/1968	331,12	VOTORANTIM CIMENTOS S.A.	DIABÁSIO	PR
816327/1968	59,36	VOTORANTIM CIMENTOS S.A.	DIABÁSIO	PR
826074/1989	81,78	Construtora Triunfo Sa	GRANITO	PR
826077/1992	28,92	BRASIL BETON SA - INCORPORADA POR LAFARGE BRASIL S/A	GRANITO	PR
826192/2009	16,56	Oca Engenharia e Empreendimentos Ltda	GRANITO	PR
815787/2009	24,01	TERRAPLENAGEM HOSANG EIRELI	DIABÁSIO	SC

Tabela 20: Lavras ativas com litologias definidas como aptas à remineralização dos solos da CAJL.

6.3. Pegada de Carbono e Logística

Variáveis como distância, logística e, consequentemente, quantidade de emissões de gases poluentes no transporte até a CAJL também são relevantes na escolha de minas promissoras no fornecimento de pó de rocha para remineralização. Levando em conta estes aspectos, das 39 minas com litologias aptas à remineralização dos solos da CAJL, foram selecionadas quatro em estado de concessão de lavra para granito e duas para diabásio. A localização das poligonais destas minas, bem como suas distâncias, estão dispostas na Figura 13, ao passo que os cálculos das emissões de CO_2 no transporte de pó de rocha de cada mina até a CAJL estão reunidos na Tabela 21. Com a definição destas minas, foi elaborado também um mapa geológico com o detalhamento das litologias referentes às substâncias exploradas em cada lavra (Figura 14).

Processo	ID	Empresa	Substância	UF	Distância até a CAJL (km)	Massa de CO2 emitida em kg (ida e volta)
812853/1968	1	VOTORANTIM CIMENTOS S.A.	DIABÁSIO	PR	136	1856,128
816327/1968	2	VOTORANTIM CIMENTOS S.A.	DIABÁSIO	PR	135	1842,48
826054/1988	3	PEDREIRA RIO DO MEIO LTDA	GRANITO	PR	67	914,416
826681/1996	4	PEDREIRA RIO DO MEIO LTDA	GRANITO	PR	68,3	932,1584
803380/1974	5	MORRO BRANCO MINERAÇÃO LTDA	GRANITO	PR	74,1	1011,3168
826080/2011	6	Construtora Serra da Prata Ltda.	GRANITO	PR	75,9	1035,8832

Tabela 21: Massa de CO_2 emitida no transporte de pó de rocha de cada mina à CAJL.

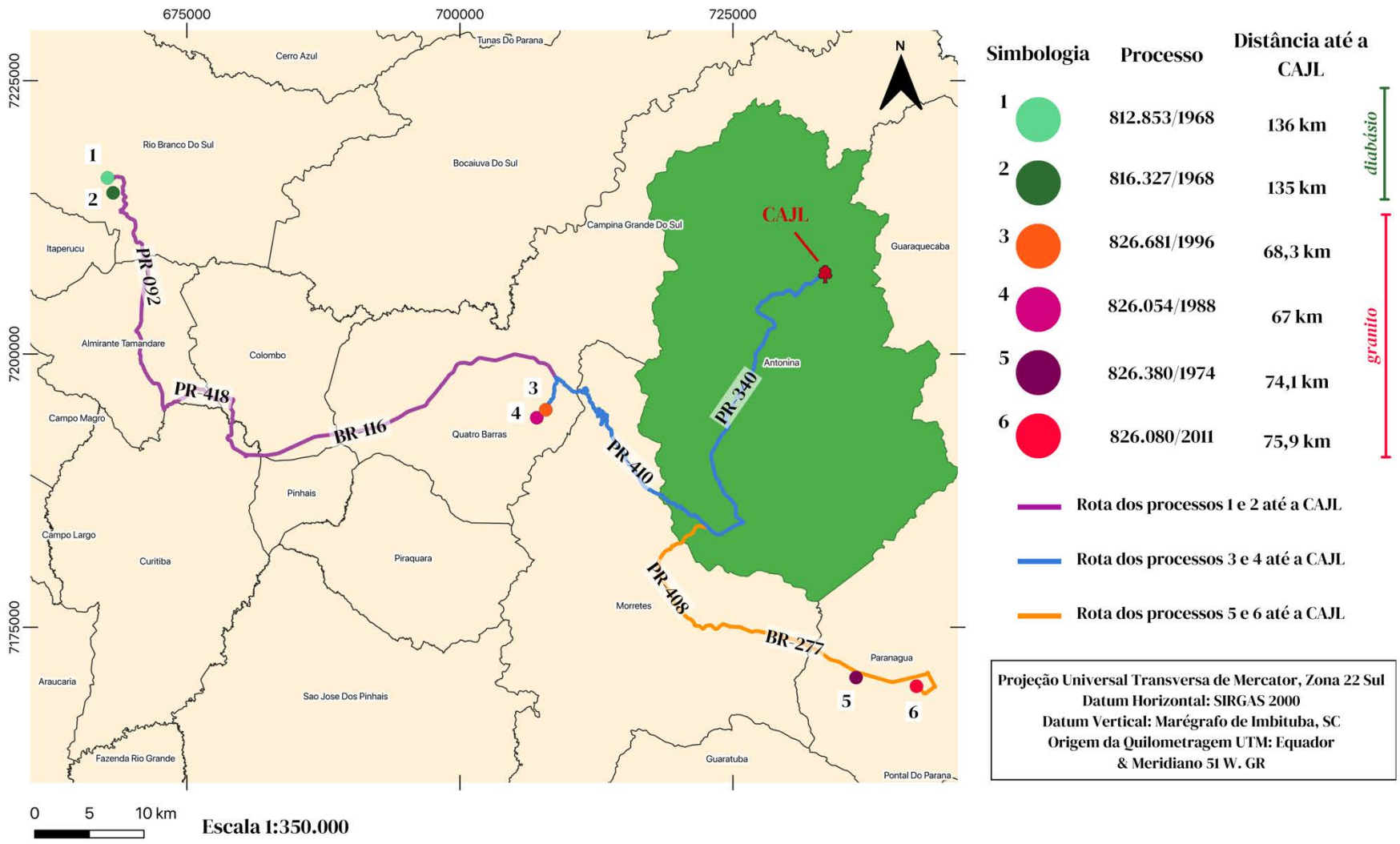


Figura 13: Minas Potenciais para Fornecimento de Pó de Rocha à Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger.

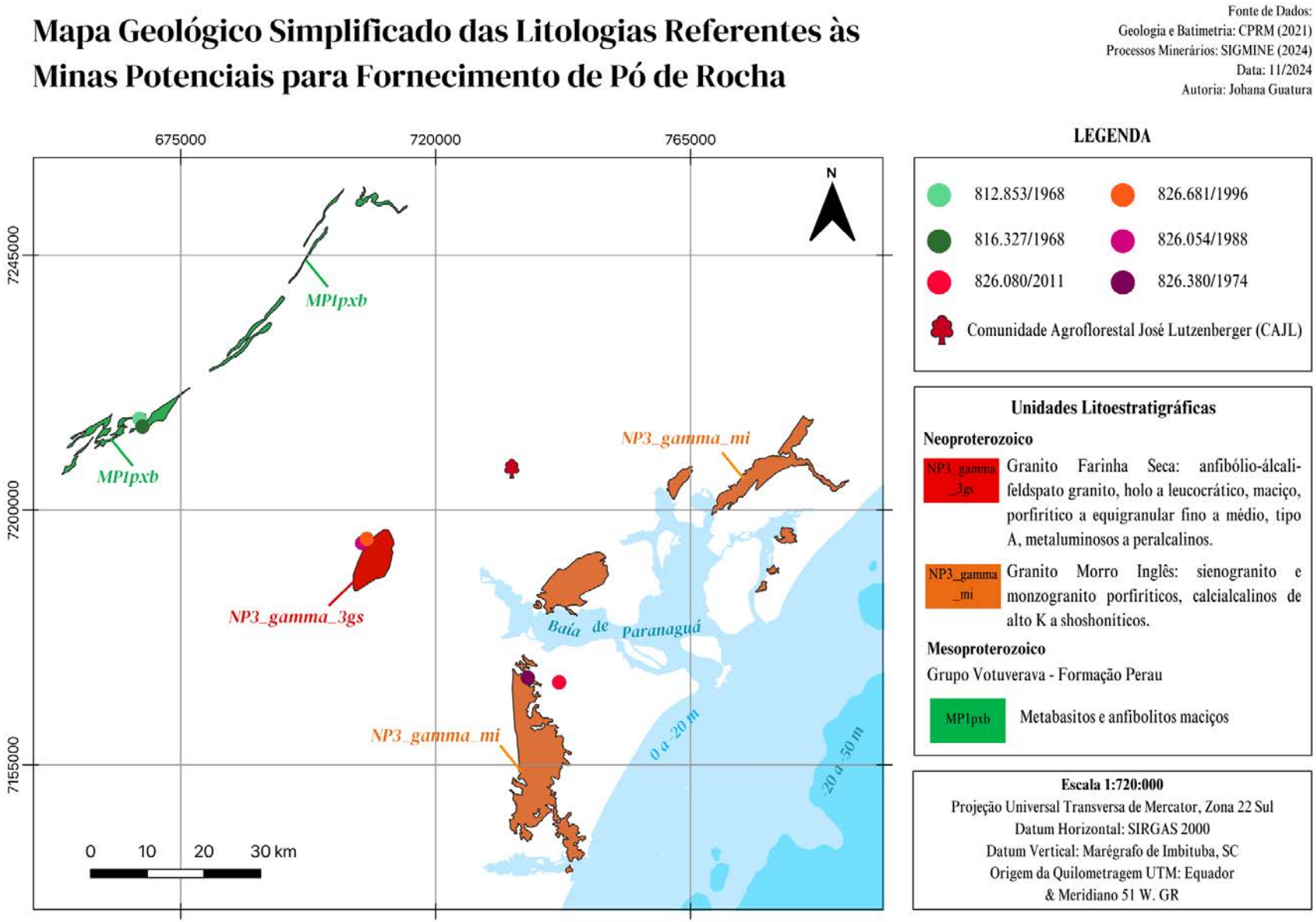


Figura 14: Mapa Geológico das Litologias referentes às Minas Potenciais para Fornecimento de Pó de Rocha.

6.4. Discussão Integrada: Deficiências Identificadas, Culturas Alimentares e Rochas com Potencial Remineralizador

Para a escolha das quatro minas mais promissoras para fornecimento de pó de rocha à Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger, elaborou-se o painel ilustrativo presente no Anexo I do presente trabalho. Vale destacar que os parâmetros 'S', 'Zn', 'Cu' e 'B', presentes no painel, se sobrepõem, ou seja, são úteis para todos os grupos de culturas.

Ao final deste trabalho, as minas escolhidas foram as dispostas na tabela 22.

Processo da Mina	ID	Empresa	Substância	**Pontos somados**
812853/1968	1	VOTORANTIM CIMENTOS S.A.	DIABÁSIO	19
816327/1968	2	VOTORANTIM CIMENTOS S.A.	DIABÁSIO	19
826054/1988	3	PEDREIRA RIO DO MEIO LTDA	GRANITO	13
826681/1996	4	PEDREIRA RIO DO MEIO LTDA	GRANITO	13

Tabela 22: Minas mais promissoras para o fornecimento de pó de rocha à CAJL.

6.4.1. Metabasitos e Anfibolitos Maciços da Fm. Perau

As minas 1 e 2 (processos 812.853/1968 e 816.327/1968), cuja substância explorada é o diabásio, estão inseridas no contexto geológico dos metabasitos e anfibolitos maciços da unidade MP1mxb, pertencentes à Fm. Perau, Grupo Votuverava (Brumatti et al., 2024). No que diz respeito ao caráter geoquímico, estes são subdivididos em três grupos com base na variabilidade da razão Ti/V, mostrando desde assinaturas de basaltos toleíticos de arcos de ilhas, até de basaltos de fundo oceânico (MORB), ricos em plagioclásio cálcico e piroxênio subcálcico (Faleiros et al., 2011).

Os metabasitos da Fm. Perau ocorrem frequentemente associados a lentes de rochas calciossilicáticas com depósitos estratiformes de mineralizações polimetálicas sulfetadas (Brumatti et al., 2024). Logo, além de contribuírem com os teores de P, Zn, Cu e B, poderiam contribuir com o acréscimo dos teores de enxofre (S) nos solos da CAJL.

6.4.2. Anfibólio-álcali-feldspato Granitos do Granito Farinha Seca

As minas 3 e 4 (processos 826.054/1988 e 826.681/1996), cuja substância explorada é o granito, estão inseridas no contexto geológico do Granito Farinha Seca, pertencente à Suite intrusiva Graciosa. Compostos por anfibólio-álcali-feldspato granitos e monzodioritos subordinados, são caracterizados como metaluminosos a peralcalinos segundo seu índice de saturação em alumina (Brumatti et al., 2024).

6.4.3. Sienogranitos e Monzogranitos do Granito Morro Inglês

Embora as minas 5 e 6 (processos 826.380/1974 e 826.080/2011) não tenham sido selecionadas devido ao seu somatório de pontos inferior aos demais, vale comentar que elas estão inseridas no contexto geológico do Granito Morro Inglês, composto por sienogranitos e monzogranitos de alto teor de K. Estas litologias poderiam somar com os teores de K nos solos da comunidade, que apesar de não terem sido interpretados como baixos, estavam muito próximos ao limite inferior considerado aceitável. Por este motivo, no somatório total, foi atribuído o valor +1 ao parâmetro 'potássio' (K).

7. Conclusões e Considerações Finais

Os solos da Comunidade Agroflorestal José Lutzenberger foram identificados como distróficos e suas principais deficiências estão associadas aos elementos fósforo (P), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), zinco (Zn), ao pH e à saturação por bases, as quais podem ser supridas a partir do pó de diferentes rochas.

Existem diversas lavras ativas no raio de 100 km da CAJL com potencial para supressão das deficiências descritas. Destas, foram selecionadas quatro mais promissoras, duas cuja substância explorada é o granito – inseridas no Granito Farinha Seca – e duas, o diabásio – inseridas na Fm. Perau do Grupo Votuverava. Para esta seleção, foram consideradas as variáveis: deficiências identificadas, necessidades nutricionais dos cultivos praticados, distância entre as minas e a comunidade e as respectivas taxas de emissão de CO_2.

A utilização de pó de rocha como fertilizante agrícola é uma alternativa sustentável e de baixo custo aos fertilizantes industrializados, visto que sua produção

envolve apenas processos mecânicos e utiliza recursos naturais disponíveis local ou regionalmente.

Os guias de interpretação de resultados de análises de solo são um instrumento essencial para a utilização das rochas como remineralizadores e podem conter ainda mais informações úteis aos trabalhadores do campo, tais como tipos de rochas e seus principais nutrientes, tornando a agrogeologia uma ciência mais acessível aos agricultores familiares e à comunidade rural em geral.

O processo de identificação detalhada das necessidades nutricionais de um solo é complexo, pois depende da integração de diferentes parâmetros, como descrições morfológicas, noção de razões areia/silte/argila, carências nutricionais das culturas realizadas, entre outros.

O geoprocessamento é uma ferramenta-chave na construção de um raciocínio integrado entre as geociências e suas áreas correlatas. O georreferenciamento das informações é útil não somente para a construção deste raciocínio, mas também para sua divulgação e elucidação à sociedade.

O Movimento Rural das Trabalhadoras e Trabalhadores sem Terra (MST) faz um trabalho único no Brasil, não somente socioeconômico, no que diz respeito à reforma agrária e ao aproveitamento de terras improdutivas, mas também ambiental, possibilitando a regeneração da vegetação natural, dos cursos fluviais e da biodiversidade em diversas áreas que antes se mostravam destruídas pelos sistemas de produção agrícola em larga escala.

Referências Bibliográficas

Almeida, C.; Fontes, M.; Dias, A.; Pereira, T.; Ker, J. 2021. Mineralogical, chemical and electrochemical attributes of soils. *Scientia Agricola*. https://doi.org/10.1590/1678-992x-2020-0071. 11 pp.

Bamberg, A.; Silveria, C.; Martins, É., Bergmann, M., Martinazzo, R., & Theodoro, S. C749a - Congresso Brasileiro de Rochagem. 2016. *Anais do III Congresso Brasileiro de Rochagem*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Cerrados; Assis: Triunfal Gráfica e Editora. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319550032_Anais_do_III_Congresso_Brasileiro_de_Rochagem. Acesso em 08 junho 2024.

Brumatti, M.; Spisila, A. L.; Besser, M. L. 2024. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Paraná, Escala 1:600.000, Nota Explicativa. Serviço Geológico do Brasil (SGB). Curitiba. 129 pp.

Calil, Y. C. D. Ribeira, L. Brazil's Agricultural Production and Its Potential as Global Food Supplier. *Agricultural & Applied Economics Association*. 2019. 12 p. Disponível em: https://www.choicesmagazine.org/UserFiles/file/cmsarticle_704.pdf. Acesso em 03 mar. 2024.

Castanho, R. B. Teixeira, M. E. S. 2017. A evolução da agricultura no mundo: da gênese até os dias atuais. *Brazilian Geographical Journal – Geosciences and Humanities Research Medium*. Ituiutaba, v. 8, n. 1, p. 136-146.

CQFS - Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2016) Manual de calagem e adubação para os Estados de Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 376p.

Curcio, G. R.; Bonnet, A.; Kacharouski, M.; Petry, A. L.; Debrino, M. A. 2021. Cambissolos Flúvicos da BHP III: características e funcionalidades ecológicas. PRONASOLOS PARANÁ. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/PronasolosPR/Pagina/CAMBISSOLOS-FLUVICOS-DA-BHP-III-caracteristicas-e-funcionalidades-ecologicas#:~:text=A%20forma%C3%A7%C3%A3o%20dos%20Cambissolos%20Fl%C3%BAvicos,fato%20inerente%20%C3%A0s%20grandes%20enchentes. Acesso em 20/11/2024.

Da Silva, M. A. M.; Schreiber, B. C.; Santos, C. L. Evaporitos como Recursos Minerais. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 1893, 2000. 14 p. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbg/a/8VG7F6yKGBNs7bmqV4jyZyc/?format=pdf&lang=pt. Acesso em 09 mar. 2024.

Deer, W. A.; Howie, R. A.; Zussman, J. *Minerais Constituintes das Rochas: Uma Introdução*. 5ª edição. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal. 2014. 724 pp.

De Castro, C.; Klepker, D.; Sfredo, G. J.; de Oliveira, F. A. Júnior, A. O. Exigências Minerais e Adubação: Enxofre. *EMBRAPA*. 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/producao/manejo-da-fertilidade-do-solo/exigencias-minerais-e-adubacao/adubacao/enxofre#:~:text=Os%20n%C3%ADveis%20cr%C3%ADticos%20de%20S,duas%20camadas%20(Tabela%201). Acesso em 26 abr. 2024.

De Paula, E. V.; Santos, L. J. C.; de Souza, R. M. 2022. Avaliação da Perda de Solos por Erosão Hídrica em Parcelas Experimentais. Laboratório de Geoprocessamento e Estudos Ambientais (LAGEAMB). Carta de Solos, escala 1:125.000.

Erhart, J. *Efeito do pó de basalto nas propriedades químicas do solo e nutrição da videira* (*Cabernet sauvignon).* 2009. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Lages, SC. 72 pp. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1460/dissertacao_joni_erhart_15688936809688_1460.pdf. Acesso em 09 mar. 2024.

Faleiros, F. M.; Ferrari, V. C.; Costa, V. S.; Campanha, G. A. C. 2011. Geoquímica e Petrogênese de Metabasitos do Grupo Votuverava (Terreno Apiaí, Cinturão Ribeira Meridional): Evidências de uma Bacia de Retroarco Calimiana. *Revista do Instituo de Geociências – USP.* São Paulo, v. 11., n. 2, p. 135-155.

FAO, IFAD, UNICEF, WFP e WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. 2023. Rome, FAO. Disponível em: https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc3017en. Acesso em 08 mar. 2024.

Feil, S.; Zuluaga, M.; Cesco, S.; Pii, Y. 2023. Copper toxicity compromises root acquisition of nitrate in the high affinity range. *Frontiers in Plant Science*, 13. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1034425. 9 pp.

Fernandes, G. M.; Facco, V. A. B. Agroecologia e MST no Leste Paranaense: as experiências do Assentamento Contestado (Lapa/PR) e do Acampamento José Lutzenberger (Antonia/PR). *Mundo do Trabalho*. Revista Pegada – vol. 16, n. especial. 2015. 13 pp.

FIOCRUZ. 2018. *Agrofloresta É Mais*. Direção: Beto Novaes. Produção: Fundação Oswaldo Cruz. Youtube, 33min28s. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=HN_E0kJj_eo. Acesso em 25 fev. 2024.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Soil Conservation and Management in Developing Countries*. 1977. *FAO Soils Bulletin*. 216 pp.

FUPEF. 2022. Revisão do Plano Diretor Municipal de Antonina/PR. Produto 2 – Análise Temática Integrada. Prefeitura Municipal de Antonina. 211 pp.

Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (IPARDES). 2001. Zoneamento da APA de Guaraqueçaba. Convênio IBAMA. Fundação Araucária. 150 pp.

Isaguirre-Torres, R. K.; Maso, T. F. 2023. As lutas por justiça socioambiental diante da emergência climática. *Rev. Direito e Práxis*, Rio de Janeiro, Vol. 14, N.01, p. 458-485. DOI: 10.1590/2179-8966/2023/73122| ISSN: 2179-8966. Disponível em https://www.scielo.br/j/rdp/a/yDkqJkpnpdHnQHZcF395Zkk/?format=pdf. Acesso em 08 jun. 2024.

Kautzmann, R.; Medeiros, D.; Dalmora, A.; Costa, M.; Cortina, J.; Sampaio, C. 2020. Caracterização Geoquímica de basalto amigdaloide alterado para uso agronômico. 1-10. https://doi.org/10.31419/issn.2594-942x.v72020i2a5rmk.

Lafayette, F. S.; Barretto, M. C. V.; Silva, A. J.; Anjos, J. L. 2015. *Guia Prático para Interpretação de Resultados de Análises de Solo.* 1ª edição. Aracaju, SE: Empraba Tabuleiros Costeiros. 15 pp. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042994/1/Doc206.pdf. Acesso em 09 mar. 2024.

Lira, H. L.; Neves, G. A. 2013. Feldspatos: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 8.3. p. 110-117.

Manzatto, C. V.; Freitas Junior, E. de; Peres, J. R. R. 2002. Uso agrícola dos solos brasileiros. Rio de Janeiro: *Embrapa Solos*. cap. 6, p. 61-77.

Masseran, J. G.; Borges Neto, I. O.; Valladares, G. S.; de Souza, R. M.; Santos, L. J. C.; Wroblewski, C. A.; de Paula, E. V. 2022. Assertividade entre levantamento de campo e carta de solo de planícies fluviais em bacias bidrográficas do Litoral Paranaense. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, vol. 1, p. 56-60. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/370540957_ASSERTIVIDADE_ENTRE_LEVANTAMENTO_DE_CAMPO_E_CARTA_DE_SOLO_DE_PLANICIES_FLUVIAIS_EM_BACIAS_HIDROGRAFICAS_DO_LITORAL_PARANAENSE. Acesso em: 17 set. 2024.

Mendes, A. M. S. 2007. Introdução à Fertilidade do Solo. Curso de Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 64 pp. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPATSA/35800/1/OPB1291.pdf. Acesso em 09 março 2024.

Mumbach, G. L.; Oliveira, D. A. de; Warmling, M. I.; Gatiboni, L. C. 2018. Quantificação de fósforo por Mehlich 1, Mehlich 3 e Resina Trocadora de Ânions em solos com diferentes teores de argila. Rev. Ceres, Viçosa, v. 65, n. 6, p. 546-554. DOI 10.1590/0034-737X201865060010.

MST - Movimento das Trabalhadoras e Trabalhadores Rurais Sem Terra. 26/09/2017. MST ganha prêmio Juliana Santilli de Agrobiodiversidadade. Disponível em:

https://mst.org.br/2017/09/26/mst-ganha-premio-juliana-santilli-de-agrobiodiversidadade/. Acesso em 25 fev. 2024.

Mazoyer, M.; Roudart, L. 1997. *Histoire des Agricultures du monde: du néolithique à la crise contemporaine.* Éditions du Seuil, Paris, 528 pp.

Prefeitura Municipal de Antonina. 2020. Plano Municipal de Saneamento Básico. Ampla Acessoria e Planejamento LTDA. 143 pp.

Prezotti, L. C.; Guarçoni, A. 2013. *Guia de Interpretação de Análise de Solo e Foliar.* Vitória, ES: Incaper. 104 pp. ISBN 978-85-89274-21-0. Disponível em: https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/40/1/Guia-interpretacao-analise-solo.pdf. Acesso em 27 set. 2024.

Rios, F. S. 2019. *O depósito de Au (Cu-Ag) Serrinha de Guarantã, Cráton Amazônico, Brasil: um depósito aurífero não convencional associado ao sistema pórfiro-epitermal paleoproterozoico Jurena Teles Pires*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Brasília: Universidade de Brasília, 138 pp.

Rodrigues, M.; Junges, L. F. S.; Mozorovicz, C.; Ziemmer, G. S.; Kosera Neto, C.; de Andrade, E. A.; dos Passos, A. I.; Pacheco, F. P.; Cezar, E.; Teixeira, L. M. 2024. Paraná basin basalt powder: A multinutrient soil amendment for enhancing soil chemistry and microbiology. *Journal of South American Earth Sciences*, V.141. ISSN 0895-9811. 11 pp. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104957.

Ronquim, C. C. 2020. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*. Campinas: Embrapa Territorial. 2. Ed. 34 pp. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1128267.

Rosolem, C. A.; Santos, F. P.; Foloni, J. S. S.; Calonego, J. C. 2006. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milheto e chuva simulada. *Pesquisa agropeuária brasileira,* Brasília, v.41, n.6, p.1 033-1040. Disponível em: https://www.scielo.br/j/pab/a/bH4TSBF6KskrLBkmNKfpqxQ/?lang=pt&format=pdf. Acesso em 09 mar. 2024.

Rossito, F. D. *Cooperação agroecológica, natureza e gente*. 2020. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em meio ambiente e desenvolvimento. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 164 pp. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/69094. Acesso em 25 fev. 2024.

Ruiz, H., Miranda, J., & Conceição, J. 1999. Contribuição dos mecanismos de fluxo de massa e de difusão para o suprimento de K, Ca e Mg a plantas de arroz. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo,* vol. 23, 1015-1018. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000400029. Acesso em 29 ago. 2024.

Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Lumbreras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Filho, J. C. A.; Oliveira, J. B.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. 2018. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Embrapa Solos. 5ª ed. 355 pp.

Sarruge, J. R.; Biasi, J.; Castro, P. R. C.; Defelipo, B. V.; Feitosa, C.; Krug, F. J. Morelli, M. 1973. Cinética da absorção de magnésio em células foliares no cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. 'Mundo Novo'). *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, vol. 30, p. 441-456. DOI: 10.1590/S0071-12761973000100033. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/aesalq/article/view/39018. Acesso em: 29 ago. 2024.

Straaten, P. V. 2007. *Agrogeology: The use of rocks for crops*. Department of Land Resource Science. University of Guelph. Guelph, Ontario, Canada.

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. 2017. *Manual de métodos de análise de solo.* Embrapa Solos. 3ª ed. 577 pp.

Theodoro, S. H. & Leonardos, O. H. 2006. The use of rocks to improve Family agriculture in Brazil. *Anais da Acadêmia Brasileira de Ciências*. 78(4): 721-730. ISSN 0001-3765.

Toledo, M. C. M. 1999. Os fosfatos aluminosos da série da crandallita – uma revisão. *Revista do Instituto Geológico* (IG). São Paulo, 20 (1/2), 49-63. Disponível em: https://revistaig.emnuvens.com.br/rig/article/view/315/297. Acesso em 09 mar 2024.

Tullio, L. 2019. *Formação, Classificação e Cartografia dos Solos*. Editora Atena. DOI: 10.22533/at.ed.348192309. ISBN: 978-85-7247-634-8.

Vaneski Filho. 2020. *Ordenamento territorial com justiça ambiental: construindo uma (agri)cultura com natureza*. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em meio ambiente e desenvolvimento. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 213 p. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/68627. Acesso em 25 fev. 2024.

Vasconcellos, C. A.; dos Santos, H. L.; de França, G. E. 1982. Recomendações técnicas para o cultivo do milho – adubação e calagem. Sete Lagoas, MG: *Embrapa – Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo.* Circular Técnica, n. 4, 2ª ed. p. 14-22.

Veloso, C. A. A.; Botelho, S. M.; Rodrigues, J. E. L. P.; Silva, A. R. 2020. Correção da Acidez do Solo. Brasília, DF: Embrapa. cap. 10, pp. 121-131. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1127245.

Zaroni, M. J.; dos Santos, H. G. 2022. Solos Tropicais. Empraba Solos, Brasília, DF. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais. Acesso em 20/11/2024.

Zonta, E.; Stafanato, J. B.; Pereira, M. G. 2021. Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais. Empraba. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1134679/fertilizantes-minerais-organicos-e-organominerais. Acesso em 25 fev. 2024.

ANEXO I

Principais Culturas

horticultura

amendoim

batata-doce

mandioca

Parâmetros & Deficiências Associadas

pH e saturação por bases
+6 pontos

fósforo (P)
+3 pontos

enxofre (S)
+4 pontos

zinco (Zn)
+4 pontos

cobre (Cu)
+4 pontos

boro (B)
+4 pontos

potássio (K)
+1 ponto

Litologias & ID das Minas

Metabasitos e anfibolitos maciços

Minas 1 & 2

Anfibólio-álcali-feldspato granitos

Minas 3 & 4

Sienogranitos e monzogranitos de alto K

Minas 5 & 6

Massa de CO2 emitida (kg)

Minas 1 & 2		Minas 3 & 4		Minas 5 & 6	
1856,12	1842,48	914,42	932,16	1011,32	1035,88
-1 ponto	-1 ponto	+1 ponto	+1 ponto	0 ponto	0 ponto

Pontuação Final por Agrupamento de Minas

6 + 3 + 4 + 4 + 4 - 2 = 19 ✓

3 + 4 + 4 + 1 + 1 = 13 ✓

3 + 4 + 4 + 1 = 12 ✗

ANEXO II

3272960	100	VOTORANTIM CIMENTOS S.A.	CALCÁRIO
3272960	101	VOTORANTIM CIMENTOS S.A.	CALCÁRIO
3272960	102	VOTORANTIM CIMENTOS S.A.	CALCÁRIO
3272960