UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DOUTORADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

JOACIR MORAIS

QUÍMICA DO SOLO NO ENTORNO DE EMPREENDIMENTO DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DE GIPSITA NO SETOR INDUSTRIAL DA CIDADE DE GRAJAÚ - MA

Bom Jesus – PI
2024

JOACIR MORAIS

QUÍMICA DO SOLO NO ENTORNO DE EMPREENDIMENTO DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DE GIPSITA NO SETOR INDUSTRIAL DA CIDADE DE GRAJAÚ - MA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Ciência do Solo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat
Coorientadora: Profa. Dra. Ruthanna Isabelle de Oliveira

Bom Jesus – PI

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial Campus Professora Cinobelina Elvas
Setor de Processamento Técnico

M828q Morais, Joacir.

Química do solo no entorno de empreendimento de extração e processamento de gipsita no setor industrial na cidade de Grajaú- MA / Joacir Morais. – 2024.

59 f.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus-PI, 2024.

CDD 631.41

Bibliotecária: Nayra Fontinele Feijão – CRB3/1249

JOACIR MORAIS

QUÍMICA DO SOLO NO ENTORNO DE EMPREENDIMENTO DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DE GIPSITA NO SETOR INDUSTRIAL DA CIDADE DE GRAJAÚ - MA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, do Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, como requisito à obtenção do título de Doutor em Ciências Agrárias.
Área de concentração: Ciência do Solo.
Linha de Pesquisa: Recursos ambientais, uso e manejo do solo e da água.
Orientador: Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat.
Coorientadora: Profa. Dra. Ruthanna Isabelle de Oliveira.

Aprovada em: 20 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

gov.br Documento assinado digitalmente
CACIO LUIZ BOECHAT
Data: 20/03/2025 11:07:47-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat (UFPI)
Orientador

gov.br Documento assinado digitalmente
JOSE WELLINGTON BATISTA LOPES
Data: 20/03/2025 12:40:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. José Wellington B. Lopes (UFPI)
Examinador Externo ao Programa

gov.br Documento assinado digitalmente
MELISSA ODA SOUZA
Data: 20/03/2025 13:11:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Melissa Oda Souza (UESPI)
Examinadora Externa ao Programa

gov.br Documento assinado digitalmente
JOSE DOMINGOS SANTOS DA SILVA
Data: 20/03/2025 12:34:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. José Domingos S. Silva (UFOB)
Examinador Externo ao Programa

gov.br Documento assinado digitalmente
JULIANA DA SILVA BARROS
Data: 20/03/2025 18:28:23-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Juliana S. Barros (UESPI)
Examinadora Externa ao Programa

A minha mãe, meu pai (*in memoriam*), todos meus irmãos, especialmente, Alcir Morais, Pedro Morais, Alcilene Morais e Aldilene Morais pelo apoio constante e por sempre acreditarem em mim. Assim também como a minha esposa e ao meu querido filho Joan Kleber.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus, pelo dom da vida, saúde e força para superar as adversidades durante esses cincos anos de curso, principalmente durante o tratamento do câncer da minha amada mãe e períodos de luto.

A todos os familiares que me apoiaram nessa longa caminhada, em especial àqueles que convivo diariamente. Ao meu pai Aldecir Lopes de Morais (*in memoriam*), que falava que filho de pobre não se formava e hoje o filho dele, um agricultor analfabeto e "pobre" está obtendo o título de Doutor.

À minha mãe Maria das Graças Morais (*in memoriam*), pelo carinho, amor e dedicação não somente a mim, mas por toda nossa família. Minha maior incentivadora, nos períodos que me mudava para outras cidades para estudar, ficava triste pela distância, mas mesmo assim, com lágrimas nos olhos, me falava pra ir.

Aos meus irmãos Antônio Morais (*in memoriam*), João Morais, Pedro Morais, Gracilene Morais, José Morais (*in memoriam*), Francisco Morais (*in memoriam*), Alcir Morais, Alcilene Morais e Aldilene Morais, por todos me apoiarem e me ajudarem de várias formas.

A minha esposa Kelvia Ellen de Lima Morais e ao meu tesouro, Joan Kleber de Lima Morais, filho querido que sempre será meu maior incentivo para superar os obstáculos, obrigado por suportarem os momentos que tive que me ausentar.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat, pela orientação, que tornou possível a realização deste trabalho, por seus ensinamentos, com os quais aprendi muito, pelo apoio, amizade, paciência durante todos os meus erros, pela confiança, compreensão e empatia em alguns momentos conturbados na minha vida pessoal. Serei eternamente grato, pois essa tese só teve início e foi finalizada por sua causa.

À Universidade Federal do Piauí – Campus Professora Cinobelina Elvas, com toda sua infraestrutura que me capacitou. A todos os professores que compartilharam seus conhecimentos. Aos técnicos de laboratório e administrativos, em especial, Estefenson Marques Morais e Amanda Costa que foram fundamentais para a realização das análises, sempre prestativos.

Aos colegas de pós-graduação, tanto da minha turma como os de outras turmas que foram parceiros no decorrer desta jornada. Especialmente, Kamylla Gonçalves e Maria de Fátima Marques Pires. Aos colegas do grupo de pesquisa MARS, pela ajuda e momentos de

descontração, em especial, Juliana da Silva Barros, Pâmalla Graziely Carvalho Morais, Kaíque Mesquita Cardoso, Tatiana Reis dos Santos Bastos, Paula Nascimento Alves.

A minha coorientadora Ruthanna Isabelle de Oliveira que tanto ajudou, a professora Dra. Melissa Oda-Souza (UESPI) por ter sido fundamental ao ajudar com a estatística e geoestatistica, ao professor Dr. Flávio Anastácio de Oliveira Camargo (UFRGS), ao professor Dr. José Domingos Santos da Silva (UFOB) por ter ajudado com a realização das análises dos ânions.

" A água é o sangue da terra. Insubstituível. Nada é mais suave e, no entanto, nada a ela resiste. Aquele que conhece seus princípios pode agir corretamente, tomando-a como chave e exemplo. Quando a água é pura, o coração do povo é forte. Quando a água é suficiente, o coração do povo é tranquilo."

(Filósofo Chinês no século IV A.C)

RESUMO

Os benefícios resultantes na aplicação de gesso no solo são diversos, principalmente por ser constituído por dois elementos, cálcio e enxofre, que são importantes para a maioria das culturas. No entanto, é fundamental aplicar quantidade de gesso que resultem em benefícios sem ocasionar danos, como a lixiviação de nutrientes que altera a química do solo e consequentemente prejudica a vegetação. Até o presente momento, não há estudos que tenham se dedicado a analisar os efeitos da pluma atmosférica de gesso resultante da mineração e do processamento da gipsita sobre a lixiviação das bases do solo e a degradação química nas áreas adjacentes a esses locais. Neste trabalho, investigamos as variações nas propriedades químicas em perfis de solo localizados ao longo da pluma de dispersão, comparando-os com áreas que não sofrem influência das atividades industriais na cidade de Grajaú, no Maranhão, Nordeste do Brasil. Foram coletadas amostras em cinquenta e três pontos distribuídos em sete locais, levando em consideração a dispersão da poeira provocada pela ação do vento. Cada ponto de amostragem consistiu em três amostras de solo, coletadas nas profundidades de 0-0,2 m, 0,4-0,6 m e 1,0-1,2 m. As análises incluíram pH, P, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+}, SO_4^{2-}, acidez potencial, carbono orgânico total, saturação por bases, capacidade de troca catiônica, saturação por alumínio, determinação de cátions (Al^{3+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}), elementos como P, S e NH_4^{+}. O pó de gesso liberado durante a extração e processamento da gipsita alterou as características químicas do solo. Observou-se um aumento nos teores de Ca nas camadas superficiais, redução da saturação por Al e mudanças nas relações entre Ca, Mg e K nas áreas mais próximas ao pólo gesseiro e à pluma de dispersão. Os valores médios de soma e saturação de bases foram baixos, devido aos altos teores de SO_4^{2-} nas camadas analisadas, resultantes da presença de gesso. O pó de gesso também causou a lixiviação de Mg para camadas mais profundas. É essencial desenvolver tecnologias para mitigar a liberação do pó de gesso, garantindo que os solos nas proximidades mantenham suas características naturais. Com o crescimento populacional e a crescente demanda por alimentos, é crucial evitar a perda de nutrientes e assegurar a oferta adequada para o desenvolvimento das plantas.

Palavras-chave: Perda de base, Gesso. Gipsita, Lixiviação, Mineração.

ABSTRACT

The benefits resulting from the application of gypsum to the soil are diverse, mainly because it consists of two elements, calcium and sulfur, which are important for most crops. However, it is essential to apply the amount of gypsum that results in benefits without causing damage, such as the leaching of nutrients that alters soil chemistry and consequently harms vegetation. To date, there are no studies that have focused on analyzing the effects of the atmospheric plume of gypsum resulting from the mining and processing of gypsum on the leaching of soil bases and chemical degradation in areas adjacent to these sites. In this work, we investigate the variations in chemical properties in soil profiles located along the dispersion plume, comparing them with areas that are not influenced by industrial activities in the city of Grajaú, Maranhão, Northeast Brazil. Samples were collected at fifty-three points distributed across seven locations, taking into account the dispersion of dust caused by wind action. Each sampling point consisted of three soil samples, collected at depths of 0-0.2 m, 0.4-0.6 m, and 1.0-1.2 m. The analyses included pH, P, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+}, SO_4^{2-}, potential acidity, total organic carbon, base saturation, cation exchange capacity, aluminum saturation, and determination of cations (Al^{3+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}), as well as elements such as P, S, and NH_4^{+}. The gypsum dust released during the extraction and processing of gypsum altered the chemical characteristics of the soil. An increase in Ca levels was observed in the surface layers, a reduction in aluminum saturation, and changes in the relationships between Ca, Mg, and K in areas closer to the gypsum pole and the dispersion plume. The average values of sum and base saturation were low due to the high levels of SO_4^{2-} in the analyzed layers, resulting from the presence of gypsum. The gypsum dust also caused the leaching of Mg to deeper layers. It is essential to develop technologies to mitigate the release of gypsum dust, ensuring that the soils nearby maintain their natural characteristics. With population growth and the increasing demand for food, it is crucial to avoid nutrient loss and ensure adequate supply for plant development.

Keywords: Base loss, Gypsum, Gypsite, Leaching, Mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa da área de estudo com localização do polo gesseiro do Grajaú, Maranhão, Brasil; classes de solos; e identificação de pontos amostrais em diferentes usos e coberturas do solo..... 39

Figura 2 - Composição química média do gesso do polo gesseiro do Grajaú, no estado do Maranhão, Brasil..... 41

Figura 3 - Biplot entre os atributos estudados sob a influência dos locais nas camadas 0.0 – 0.2 m, 0,4 – 0,6 m e 1,0 – 1,2 m; dendrograma utilizando o método Ward nas diferentes camadas; e locais das amostragens de solo no polo gesseiro em Grajaú, estado Maranhão, Brasil..... 47

Figura 4 - Distribuição espacial dos atributos químicos do solo, com destaque para pH, H+Al, e Ca nas camadas 0,0 – 0,2 m, 0,4 – 0,6 m, e 1,0 – 1,2 m..... 51

Figura 5 - Distribuição espacial dos atributos químicos do solo, com destaque para Mg, K e SB nas camadas 0,0 – 0,2 m, 0,4 – 0,6 m, e 1,0 – 1,2 m..... 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos químicos de amostras de solos próximos ao setor industrial gesseiro de Grajaú no estado de Maranhão, Brasil, em três profundidades..... 45

Tabela 2 - Estimativa das variâncias (Autovalores) e porcentagem acumulada da variância total (%), obtidas pela análise de componentes principais considerando-se as três camadas de solo..... 46

Tabela 3 - Valores médios das variáveis analisadas entre os grupos locais para as camadas de solos avaliadas..... 48

LISTA DE ABREVIATURAS

ANN	Agência Nacional de Mineração
Chl	Clorofila
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
COT	Carbono Orgânico Total
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CV	Coeficiente de Variação
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverso do Quadrado da Distância
MME	Inverso do Quadrado da Distância
PCA	Análise de Componentes Principais
SB	Soma de bases
SIG	Sistema de Informação Geográfica
USGS	United States Geological Survey

LISTA DE SÍMBOLOS

$CaSO_4.2H_2O$	Sulfato de Cálcio Dihidratado
%	Porcentagem
<	Menor que
m	Metros
H_2O	Água
ºC	Graus Celsius
km^2	Quilômetros quadrado
Al	Alumínio
Ca	Cálcio
K	Potássio
KCL	Cloreto de Potássio
Mg	Magnésio
N	Nitrogênio
P	Fósforo
S	Enxofre
MgO	Óxido de Magnésio
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
SiO_2	Dióxido de Silício
SO_3	Óxido sulfúrico
K_2O	Óxido de Potássio
CaO	Óxido de cálcio
TiO_2	Dióxido de Titânio
MnO	Óxido de Manganês
Fe_2O_3	Óxido de ferro (III)
CuO	Óxido de cobre (II)
SrO	Óxido de Estrôncio
$\hat{\gamma}\ (u)$	Semivariância estimada para cada distância/ classe de u
$N(u)$	Número de pares de pontos separados por u

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL 16
2 CAPÍTULO 1: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 18
2.1 Gipsita 18
2.2 O mercado do gesso 19
2.3 O gesso na agricultura 21
2.4 Propriedades químicas do solo. 23
2.4.1 Solução do solo. 25
2.4.2 Lixiviação de bases. 26
2.5 Problemas ambientais em decorrência da mineração da gipsita. 27
REFERÊNCIAS. 29
3 CAPÍTULO 2: RISCOS DE DEGRADAÇÃO QUÍMICA DO SOLO POR DERIVA DE GESSO AO REDOR DE EMPRESAS DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO NA CIDADE DE GRAJAÚ, NORDESTE DO BRASIL 36
RESUMO. 36
3.1 Introdução. 37
3.2 Material e Métodos. 38
3.2.1 Descrição da área 38
3.2.2 Amostragem de solo 39
3.2.3 Análises laboratoriais 40
3.2.3.1 Caracterização do gesso. 40
3.2.3.2 Caracterização do solo. 41
3.2.4 Processamento de dados e análises estatísticas. 41
3.2.4.1 Estatística descritiva. 41
3.2.4.2 Análise de componentes principais. 42
3.2.4.3 Análise geoestatística. 42
3.3 Resultados e Discussão 43
3.3.1 Mudanças químicas no solo. 43
3.3.2 Análise de componentes principais. 46
3.3.3 Análise geoestatística e distribuição química 50
3.4 Conclusão 53

REFERÊNCIAS..... 54
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 58

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Gipsita é um sulfato de cálcio hidratado com duas moléculas de água ($CaSO_4.\ 2H_2O$), além de impurezas. Segundo Rocha (2013), a gipsita é, dentro da classe dos sulfatos hidratados, o mineral mais importante, sendo sua ocorrência observada em rochas gipsíferas. Este mineral é encontrado em praticamente todas as regiões do mundo, e ocorre no Brasil em terrenos cretáceos de formação marinha, principalmente no estado do Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte, Piauí e Pernambuco (Bauer, 2000).

Segundo dados publicados em 2019 pela Agência Nacional de Mineração (ANM), o estado do Maranhão é o segundo maior produtor de gesso mineral do Brasil, possuindo dois polos gesseiros no estado, um na cidade de Codó e outro na cidade de Grajaú, sendo o polo gesseiro de Grajaú considerado o maior produtor de gesso do estado e segundo maior produtor do Brasil. No polo gesseiro da cidade de Grajaú, durante a extração e processamento da gipsita (mineração, calcinação e manufatura), para a produção do gesso mineral, há grande dispersão de partículas que são levadas pelo vento cobrindo a vegetação e as áreas próximas, ficando em certos períodos do ano totalmente brancos.

O gesso ($CaSO_4.2H_2O$) é amplamente empregado em sistemas de produção agrícola no Cerrado como uma fonte de cálcio (Ca) e enxofre (S). De alta solubilidade em água, o gesso se dissocia facilmente, liberando rapidamente íons Ca^{2+} e sulfato (SO_4^{2-}), além de diversos pares iônicos, o que facilita sua movimentação no perfil do solo (Hammerschmitt *et al*., 2021). O gesso agrícola ($CaSO_4.2H_2O$) não é classificado como um corretivo do solo, mas sim como um condicionador que aprimora as propriedades do solo e o ambiente químico, favorecendo o desenvolvimento das culturas (Minato *et al*., 2023).

Devido à sua solubilidade superior a do calcário e à sua capacidade de não gerar cargas elétricas no solo (Zoca; Penn, 2017), o gesso agrícola facilita o deslocamento de bases trocáveis para camadas subsuperficiais, reduzindo a toxicidade do Al^{3+} por meio da indução da formação de pares iônicos ($AlSO_4^+$) (Pavan, 1986). Além disso, diminui a saturação de Al^{3+} em camadas mais profundas, aumentando os níveis de Ca^{2+} (Pauletti *et al*., 2014).

Alguns trabalhos com gesso agrícola mostram que doses inadequadas de gesso, podem resultar em desbalanços entre as bases do solo, devido a elevação dos teores de Ca em relação aos de Mg e K, induzindo a deficiência nutricional desses últimos, com reflexos na produtividade das culturas (Marques; Faquin; Guimarães, 1999; Tomaz *et al*., 2003).

Redução no rendimento da soja e no rendimento do milho de segunda safra foram observadas em trabalhos realizados por Minato *et al*. (2023). Segundo os autores, a redução na produtividade da soja na primeira colheita após a aplicação de gesso pode ser relacionada à lixiviação de magnésio (Mg^{2+}) e às altas taxas de aplicação do produto. Como resultado, esse nutriente torna-se indisponível para as plantas, provocando deficiências (Pauletti *et al*., 2014). Geralmente, essa situação ocorre quando o gesso não é utilizado em conjunto com o calcário como fonte de magnésio (Costa; Crusciol, 2016). Resultados similares foram publicados em uma meta-análise de 129 safras, onde identificaram que a aplicação de gesso em solos com baixa saturação de alumínio no subsolo (<10%) resultou em uma leve redução na produtividade da soja (Pias *et al*., 2020).

Serafim *et al*. (2011), observaram efeitos positivos na aplicação de gesso na produção de café, no entanto, o autor afirma que faltam informações técnicas, principalmente sobre as espécies químicas no perfil do solo e na lixiviação de bases para camadas além do sistema radicular. Ramos *et al*. (2013) observaram uma diminuição no conteúdo de K^+ na solução do solo para 0,85 m. Vários trabalhos obtiveram resultados que comprovam a eficiência desses dois tipos de gesso na lixiviação de sais em solos salino-sódicos e sódicos (Barros *et al*., 2004; 2006; Silveira *et al*., 2008; Leite, *et al*., 2010; Tavares Filho *et al*., 2012; Vasconcelos *et al*., 2013). A lixiviação de bases pode ser benéfica em alguns casos, mas em outros pode ser prejudicial tornando esses elementos inacessíveis para as plantas.

A aplicação do gesso deve ser realizada com base em critérios técnicos (Souza *et al*., 2007) para evitar custos de produção excessivos ou efeitos adversos, como a lixiviação de bases trocáveis, deficiências nutricionais e redução na produtividade das colheitas (Caires; Joris; Churka, 2011; Fontoura *et al*., 2012; Pauletti *et al*., 2014). Além disso, a adição de grandes quantidades de enxofre por meio do gesso pode limitar a disponibilidade e a absorção de molibdênio, além de prejudicar culturas fixadoras de nitrogênio, como a soja, que é a principal cultura comercial no Brasil (Gelain *et al*., 2011).

Entre os estudos sobre a atividade gesseira, até o momento, não há nenhum trabalho que aborde os impactos da atividade de extração e processamento da gipsita para a produção de gesso industrial e gesso agrícola no solo e na vegetação espontânea ou natural no entorno deste tipo de empreendimento. Diante do exposto, objetiva-se avaliar as alterações químicas do solo em profundidade no setor industrial da cidade de Grajaú no estado do Maranhão.

2 CAPÍTULO 1

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Gipsita

A gipsita é um mineral que tem origem em bacias sedimentares, por evaporação da fase líquida. Trata-se de um evaporito e constitui depósitos em forma de camadas, lentes e bolsões, intercalados em sequências sedimentares, cujas idades geológicas podem variar do Paleozóico ao Cenozóico (Lyra Sobrinho; Amaral; Dantas, 2001).

O mineral gipsita é um sulfato de cálcio hidratado cuja fórmula química é $CaSO_4.2H_2O$, e é abundante na natureza (Lyra Sobrinho; Amaral; Dantas, 2004; Loureiro, 2009). A gipsita apresenta alta solubilidade, coloração incolor, branca, cinza, amarronzada que varia de acordo com as impurezas presentes. Além disso, apresenta em média 32,5% de CaO, 46,6% de SO_3 e 20,9% de H_2O. O mesmo é pouco resistente, apresentando dureza 2 na escala de Mohs (Lyra Sobrinho; Amaral; Dantas, 2001).

As reservas de gipsita estão amplamente espalhadas pelo globo, com depósitos significativos de gipsita confirmados em mais de 100 nações e regiões. Segundo dados do USGS, os países que possuem as maiores reservas de gipsita natural incluem os Estados Unidos, Canadá, China, Rússia, Irã, Brasil, entre outros. Nos últimos anos, a produção de gipsita não apresentou uma tendência de crescimento significativa, mantendo-se estável em cerca de 1,5 bilhão de toneladas anualmente (Ding *et al*., 2023).

A gipsita, após passar por processos industriais é conhecida como gesso primário ou gesso mineral, que pode ser usado tanto na construção civil como na agricultura, dependendo da qualidade. O mesmo apresenta características químicas similares ao gesso secundário, conhecido também como gesso agrícola que é um resíduo oriundo da fabricação de adubo fosfatado (Lyra Sobrinho; Amaral; Dantas, 2001).

A forma natural da gipsita é usada na indústria cimenteira, bem como na agricultura, na forma de gesso agrícola, que além de atuar como dessalinizador e condicionador de solos, consiste em um fertilizante, como fonte de cálcio (Ca) e enxofre (S). Já a forma calcinada tem

importância na construção civil, como gesso, rebocos e blocos pré-fabricados (Brito; Flores-Colen, 2015; Zoca; Penn, 2017).

A gipsita sob a ação do calor (160 ºC) sofre desidratação parcial, resultando em um semi-hidrato conhecido comercialmente como gesso ($CaSO_4.2H_2O$). Neste sentido, gipsita é o mineral em estado natural e o gesso é o produto calcinado (Lyra Sobrinho; Amaral; Dantas, 2001).

Em relação à gipsita produzida no Brasil, é possível encontrar variações mineralógicas distintas, conhecidas como alabastro, cocadinha, estrelinha, Johnson, rapadura e selenita. Essas variações são usadas de forma distinta e são capazes de gerar diferentes gesso em função da pureza e de suas características. As variedades cocadinha, rapadura, estrelinha e Johnson são utilizadas para produzir gesso, a selenita é usada em polarizadores, e o alabastro é usado na fabricação de cimento ou agricultura (Baltar *et al*., 2004).

Inicialmente, o gesso pode ser classificado como beta ou alfa, e principal característica que diferencia é a escolha da gipsita usada. Para obter o gesso alfa, utiliza-se a gipsita Johnson, a variação mais pura do mineral, enquanto para a obtenção do gesso beta, é utilizado a gipsita cocadinha ou estrelinha. Outro fator determinante para a diferenciação do gesso beta ou alfa são as condições de calcinação. Se a calcinação ocorrer sob pressão atmosférica ou baixa pressão, e temperatura entre 140 e 160 °C, será obtido o hemidrato beta. Caso o processo seja em alta pressão, será obtido o hemidrato alfa (Baltar *et al*., 2004).

2.2 O mercado do gesso

Os Estados Unidos são o maior produtor mundial de gesso com mais de 21 milhões de toneladas, seguidos pelo Irã e China com produção de 16 e 13 milhões de toneladas, respectivamente. O Brasil é o 16° maior produtor mundial de gipsita e o segundo maior da América Latina, atrás apenas do México. Uma grande parte do gesso produzido é consumida na produção de cimento (64%) e gesso cartonado (17%) (USGS, 2021; Xie *et al*., 2024; Jiang *et al*., 2024).

O Brasil detém uma das maiores reservas de gipsita do mundo, apesar do consumo per capita ter um valor bem abaixo da média para países industrializados (DNPM, 2018). Segundo o Relatório Técnico 34 - Perfil da Gipsita disponibilizado pelo Ministério de Minas e Energia-MME, a estimativa é que o Brasil aumente seu consumo per capita para 19 kg/habitante no

quadriênio 2028/2030 (MME, 2009). Este pode ser um indicador importante do potencial de crescimento no país, prevendo o desenvolvimento de novas tecnologias para o uso do produto.

No cenário nacional, o estado da Bahia apresenta as maiores reservas de gipsita, no entanto, Pernambuco é o principal estado produtor. Em 2017, o estado de Pernambuco foi responsável por 79,7% da produção nacional, sendo o polo gesseiro do Araripe o responsável pela maior parte da produção do estado (Queiroz Filho, 2018).

Além do estado de Pernambuco, outros estados brasileiros produzem quantidade significativa de gipsita, dentre eles estão Maranhão (17,3%), Tocantins (2,2%), Pará (0,4%), Amazonas (0,2%), Rio Grande do Norte (0,1%) e Ceará (0,1%). O estado do Maranhão é o segundo maior produtor nacional de gesso e nos últimos cinco anos ele vem se destacando e aumentando sua participação na produção nacional (Queiroz Filho, 2018).

O estado do Maranhão apresenta dois principais polos produtores de gipsita, um na cidade de Codó e outro na cidade de Grajaú. Segundo uma matéria do site do governo do Maranhão em 31 de julho de 2017 a cidade de Grajaú é considerada a maior produtora de gipsita do estado e a segunda maior produtora de gipsita do país. De acordo com Lyra Sobrinho; Amaral; Dantas, (2001) em 1998 a empresa Lucena Ltda estava pesquisando, lavrando e produzindo gesso agrícola na cidade de Grajaú no estado do Maranhão e já haviam sido implantadas três pequenas unidades de calcinação.

O polo gesseiro de Grajaú conta com seis mineradoras, 16 fábricas de gesso e 60 fábricas de placas. Existem poucas informações publicadas em revistas cientificas sobre o polo gesseiro de Grajaú no estado do Maranhão. Os últimos dados publicados sobre o polo industrial de gesso em Grajaú, indica que o faturamento médio mensal é de 12 milhões de reais e que emprega 500 empregados diretamente e mais de 10 mil indiretamente (Abreu, 2017). A cidade de Grajaú está localizada na mesorregião Centro Maranhense, o município possui área de 8.863,570 km^2 e uma população estimada em 69.527 habitantes, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Historicamente a utilização da gipsita *in natura* pelo homem, remonta a civilizações antigas (egípcia e romana). Mas foi com o desenvolvimento da indústria cimenteira que obteve maior valorização, pois a gipsita é fundamental para retardar o tempo de pega do cimento. Já sua utilização na agricultura, teve início no século XVIII na Europa, tendo como função a correção do solo (Lyra Sobrinho; Amaral; Dantas, 2001).

A gipsita secundária, ou gipsita química, é gerada como sub-produto dos processos industriais de obtenção dos ácidos fosfórico, fluorídrico e cítrico, e da dessulfurização de gases gerados em termelétricas movidas a carvão e linhito. A gipsita química proveniente da produção

de ácido fosfórico recebe a denominação particular de "fosfogesso", enquanto a resultante da dessulfurização dos gases denomina-se "dessulfogesso" (Lyra Sobrinho; Amaral; Dantas, 2001).

2.3 O gesso na agricultura

O gesso é um material empregado em várias atividades econômicas. Na agricultura, atua como uma fonte de nutrientes, além de servir como condicionador de subsuperfície. Essa função ajuda a mitigar os efeitos da acidez do subsolo e contribui para a correção de solos afetados pela salinidade (Brasil *et al*., 2020). Sua aplicação melhora a qualidade do solo, promove a absorção de nutrientes e eleva o rendimento das culturas, sendo útil em regiões que enfrentam problemas de salinidade do solo e deficiência de nutrientes. Entre suas principais funções minerais, este destaca-se como fonte de Ca e S, ambos essenciais para o crescimento da planta (Rashmi *et al*., 2018). Abbas *et al*. (2023) observou que a aplicação de gesso aumenta significativamente a absorção de macronutrientes, como N, P e K na cultura do trigo.

Em termos de melhoria, o gesso aprimora as propriedades físicas e químicas do solo, reduzindo a erosão e aumentando a retenção de água (Rashmi *et al*., 2018). Ele serve como um aditivo crucial para o solo, principalmente na recuperação de solos alcalinos e sódicos.

Dentre as alternativas empregadas para a redução do estresse salino, a mais comumente empregada é o gesso, graças à sua excelente relação custo-benefício, além de sua disponibilidade e capacidade de fornecer nutrientes como cálcio (Ca) e enxofre (S). A aplicação de gesso, combinada com uma boa precipitação ou irrigação, favorece a troca de sódio (Na^+) por cálcio (Ca^{2+}), o que resulta na melhoria da estrutura do solo, na infiltração de água e na redução da crosta superficial (Zoca; Penn, 2017). Ainda em relação a solos sódicos, a aplicação de gesso melhora a disponibilidade de alguns nutrientes, diminui a toxicidade de Na nas células vegetais (Walia; Dick, 2018), conserva N, enriquecendo o solo com S, aumentando assim a produtividade.

Em trabalho realizado por Rashmi *et al*. (2024), em solos deficientes em enxofre a adição de gesso a solos, resultou, sem dúvida, em maior resposta das culturas ao gesso. Da mesma forma, Rasouli, Pouya e Karimian (2013) , afirmaram que a suplementação de Ca e S como $CaSO_4$ causou uma melhora significativa no crescimento da planta (36–61%) e no rendimento (46–73%) em solos sódicos.

Embora não seja um material de calagem, o gesso é amplamente conhecido como fonte de nutrientes como cálcio e enxofre e influencia positivamente absorção de nutrientes, aumentando assim sua disponibilidade e produtividade geram em solos ácidos (Green *et al*., 2023; Shruthi *et al*., 2024).

Segundo Pavan, Bingham e Pratt (1982), a toxidez causada pelo alumínio é um dos principais fatores que prejudicam o crescimento das plantas afetando a parte aérea e radicular. Com isso, a utilização do gesso, bem como a solubilização e as reações que ocorrem no solo promovem o aumento dos teores de cálcio em profundidade e favorecendo o aprofundamento do sistema radicular. Além de suas características químicas, o gesso tem a capacidade de aprimorar as propriedades físicas dos solos (Tiecher *et al*., 2018). Ele aumenta a força iônica na solução do solo, melhora a agregação e a estabilidade dos grãos, além de favorecer a formação de bioporos e a infiltração de água, impulsionando o crescimento das raízes das plantas (Zoca; Penn, 2017; Tiecher *et al*., 2018). De fato, o gesso pode otimizar várias propriedades químicas e físicas do solo, o que pode resultar em um aumento na produtividade das colheitas. Entretanto, esse efeito varia conforme o tipo de solo, a cultura cultivada, a quantidade de fertilizantes utilizados e o padrão de chuvas (Zoca; Penn, 2017; Tiecher *et al*., 2018).

Contudo, apesar de seus benefícios, a eficácia do gesso pode variar de acordo com o tipo de solo, a cultura e as condições ambientais (Zoca; Penn, 2017). Segundo Ryan, Delhaize e Randall (1995), a elevação do pH causada pelo gesso não é douradora, gerando novas questões de toxicidade. Além disso, aplicações excessivas podem desbalancear nutrientes, pois, embora forneça cálcio e sulfato, pode reduzir a disponibilidade de potássio e magnésio (Whitney, 1988). O gesso também pode alterar a microbiota do solo, afetando a ciclagem de nutrientes e a decomposição da matéria orgânica, com possíveis impactos a longo prazo (Watts *et al*., 2023).

A aplicação de gesso apresenta vários benefícios ao solo e as culturas, no entanto, Pias *et al*. (2020) argumentaram que os efeitos positivos da aplicação de gesso no rendimento de grãos são provavelmente maiores em condições de déficit hídrico ou em solos com níveis excessivamente altos de alumínio (5% para cereais e 10% para soja). Neste sentido, Tiecher *et al*. (2018), em uma meta-análise de dados publicados no Brasil, investigaram quatro cenários que combinavam a presença ou ausência de acidez subsuperficial em solos com deficiência hídrica.

Os resultados mostraram que, independentemente da deficiência hídrica, a aplicação de gesso em solos com elevada acidez subsuperficial resultou em um aumento médio de 14% na produtividade do milho em 85% dos casos analisados. Por outro lado, a soja apresentou uma

resposta positiva ao gesso apenas quando houve a combinação de alta acidez subsuperficial e deficiência hídrica, com um aumento médio de 23% na produtividade em todos os casos considerados Os pesquisadores Fontoura *et al*. (2019) observaram que 86% das culturas não responderam à aplicação de gesso quando a saturação de bases era maior que 35% e a saturação de Al^{3+}menor que 5%.

Doses inadequadas de gesso, podem resultar em desbalanços entre as bases do solo, devido a elevação dos teores de Ca em relação aos de Mg e K, induzindo a deficiência nutricional desses últimos, com reflexos na produtividade das culturas, principalmente na cultura do cafeeiro (Marques; Faquin; Guimarães, 1999; Tomaz *et al*., 2003). Outra consequência da aplicação de doses elevadas de gesso agrícola é em decorrência do sulfato, proveniente do gesso, que não é retido na camada superficial do solo carreando para as camadas mais profundas quantidade equivalente de cátions, que ficam inacessíveis para as raízes (Dias, 1992; Pereira, 2005; Van Raij, 2008; Cremon *et al*., 2009; Neis *et al*., 2010).

Até o presente, não há estudos direcionados para entender o impacto do pó de gesso liberado no ambiente em locais de mineração de gipsita. Entender como esse pó pode afetar a qualidade do solo no entorno é de grande importância para o desenvolvimento de práticas de manejo sustentável e mitigação de possíveis danos ambientais.

2.4 Propriedades químicas do solo

A química do solo estuda constituintes químicos, propriedades e reações dos solos, sendo fundamental para entender a saúde do solo e seu impacto na qualidade ambiental (Melo; Alleoni, 2019). Em ambientes impactados, essa análise é direcionada ao estudo de contaminantes e suas interações com os componentes do solo.

Um dos aspectos centrais da química do solo é compreender como os contaminantes interagem com as partículas do solo, influenciando sua mobilidade e biodisponibilidade. Para isso, são empregadas diversas técnicas analíticas que avaliam propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, auxiliando no controle da poluição e no gerenciamento de ecossistemas (Duckworth; Plozzotto; Thompson, 2022). Entre os atributos químicos, o pH, saturação por bases e teores de nutrientes podem ser monitorados para estimar a degradação de um ambiente (Nascimento *et al*., 2014)

A mudança no uso do solo agrava as alterações nos atributos químicos, afetando sua fertilidade. Isso ocorre pela remoção de nutrientes pelas culturas, pela lixiviação de nutrientes superficiais ou pela erosão (Carneiro *et al*., 2009). Mesmo quando os nutrientes estão disponíveis em concentrações adequadas e em faixa de pH favorável para a absorção, eles precisam ser mineralizados por microrganismos e transformados por reações químicas na presença de oxigênio (Nascimento *et al*., 2014).

Assim, mesmo com nutrientes em boas concentrações, os atributos químicos do solo podem ser neutralizados e elementos prejudiciais podem ser liberados, dificultando o desenvolvimento das plantas (Martinazzo, 2006). Dada a complexidade, é essencial realizar análises dos atributos químicos do solo, que impactam o ambiente, para orientar práticas de manejo adequadas conforme as condições de uso planejadas.

O desempenho das culturas em solos tropicais e subtropicais é frequentemente limitado pela acidez do solo e pela baixa disponibilidade de nutrientes (Fageria; Nascente *et al*., 2014; Joris *et al*., 2016; Tiritan *et al*., 2016). A calagem é, sem dúvida, a prática mais comum para corrigir a acidez do solo, pois diminui os efeitos tóxicos dos íons Al^{3+} trocáveis e Mn^{2+} disponíveis (Tiritan *et al*., 2016; Rheinheimer *et al*., 2018). Além disso, essa prática aumenta a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas (Bennett *et al.*, 2014; Crusciol *et al.*, 2016) e biológicas do solo (Holland *et al*., 2018).

A baixa solubilidade e a dificuldade de penetração do calcário nos solos resultaram na recomendação do gesso agrícola ($CaSO_4.2H_2O$) como condicionador de solo (Ritchey *et al*., 1980). A solubilidade do gesso agrícola (2,5 g L^{-1}) é cerca de 170 vezes maior do que a do calcário (Crusciol *et al*., 2016). Isso faz com que o gesso aumente de forma eficiente a mobilidade de cátions alcalinos, como Ca^{2+} trocável, Mg^{2+} e K^{+}, que se ligam a ânions como S-SO_4^{2-}. Essa dissociação permite que o gesso se ligue ao Al^{3+} trocável nas camadas mais profundas do solo, reduzindo sua atividade e os efeitos tóxicos nas plantas (Pauletti *et al*., 2014; Crusciol *et al*., 2016; Zocca; Penn, 2017). Além de atuar como condicionador, o gesso agrícola também é uma fonte valiosa de Ca^{2+} e S-SO_4^{2-} (Zocca; Penn, 2017). A deficiência de enxofre em solos agrícolas tem sido amplamente estudada em diversas regiões da Europa (Ercoli *et al*., 2011), África (Kihara *et al*., 2017) e América do Sul (Ciaffi *et al*., 2013; Tiecher *et al*., 2013; Salvagiotti *et al*., 2017; Pias *et al*., 2020; Kertesz, 2000). Esse nutriente pode ser encontrado em diversos estados de oxidação, variando de -2 a +6, tanto em compostos orgânicos quanto inorgânicos no solo. No entanto, predomina em formas orgânicas (>90%) nas camadas superiores de solos bem drenados (Sun *et al*., 2019). A forma predominante de S que as plantas

absorvem é o sulfato (SO_4^{2-}), um composto inorgânico oxidado que se encontra na solução do solo ou adsorvido às partículas do solo (Guimarães *et al*., 2018).

2.4.1 Solução do solo

A solução do solo tem um papel fundamental na nutrição de plantas e na saúde dos ecossistemas terrestres, atuando como meio para o transporte de nutrientes e para interações químicas que afetam diversos processos biogeoquímicos. A solução do solo contém íons dissolvidos vitais para o crescimento das plantas, como micronutrientes (N, P, K) e micronutrientes (Cu, Zn, Mn) (Labetowicz; Rutkowska, 2001). A concentração desses nutrientes pode variar em função de fatores como absorção pelas plantas, precipitação e aplicação de fertilizantes, afetando o sistema de suprimento de nutrientes (Okajima; Imai, 1975).

Praticamente todas as reações biogeoquímicas que ocorrem no solo acontecem na solução do solo. Dentre essas reações, destacam-se a hidratação, hidrólise, oxidação, redução, reações ácido-base e complexação. Assim, a solução do solo, que se localiza na interface entre os sólidos do solo e a biosfera, atmosfera e hidrosfera, desempenha um papel crucial como mediadora dos fenômenos que controlam a retenção de diversas substâncias pela fase sólida, através de processos importantes como troca iônica, adsorção-dessorção específica e precipitação-dissolução (Lepsch, 2011).

Os principais íons que podem estar presentes na solução de solos oxidados, com pH próximo da neutralidade e teores médios de matéria orgânica, incluem os seguintes: Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}, Fe^{2+}/Fe^{3+}, Cl^{-}, NO_3^{-}, SO_4^{2-} e $Si(OH)_4$. Os íons em solução podem ser transferidos para o lençol freático por meio do perfil do solo ou através do escoamento superficial sobre a superfície do terreno, alcançando assim os corpos d'água. Além disso, por meio da evapotranspiração e do dessecamento do solo, esses íons podem ser transportados para as camadas mais superficiais do solo devido ao efeito da capilaridade (Tiecher *et al*., 2023).

Wang et al. (1999), investigaram os efeitos do gesso em solos com características de carga variadas. O estudo constatou que a aplicação do gesso resultou em uma lixiviação significativa de nutrientes como o magnésio (Mg^2) e potássio (K). Essa lixiviação ocorreu porque a alta concentração de cálcio (Ca^2) liberada do gesso deslocou esses nutrientes dos locais de troca no solo.

A química da solução do solo reflete os impactos de distúrbios antropogênicos, como poluição e mudanças no uso da terra, sobre a ciclagem de nutrientes e a mobilidade de poluentes (Mélia *et al*., 1999). A análise da solução do solo é uma ferramenta útil no diagnóstico de fertilização, permitindo aprimorar estratégias por meio do "coeficiente de recuperação da solução" que avalia a eficiência com que os nutrientes do solo atendem às necessidades das plantas (Labetowicz; Rutkowska, 2001).

2.4.2 Lixiviação de bases

A ocorrência da lixiviação de bases está relacionada com o aumento de eletrólitos na solução do solo. Para Sposito (1989) quando ocorre um acréscimo na concentração de eletrólitos na solução do solo, indicado pela força iônica, há uma redução da espessura da dupla camada elétrica-difusa, neutralizando as superfícies negativas, reduzindo o pH, aumentando a mobilidade e reduzindo a adsorção de bases na fase sólida do solo. Assim sendo, as bases Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^{+} ficam sujeitos a lixiviação para as camadas subsuperficiais do solo. A magnitude deste efeito é uma função do cátion dominante na solução do solo.

Serafim *et al*. (2012), Crusciol *et al*. (2016), Inagaki *et al*. (2016) e Zoca e Penn (2017) obtiveram resultados que demonstram uma relação forte entre a aplicação de gesso e o aumento nos níveis de Ca^{2+} nas camadas subterrâneas do solo, sugerindo o transporte desse nutriente para camadas além da profundidade de aplicação. A lixiviação de $CaSO_4^{0}$ é de suma importância para transportar cálcio e melhorar o ambiente radicular mais profundo no perfil do solo (Zandoná *et al*., 2015; Zoca; Penn, 2017).

O elemento cálcio (Ca^{2+}) é uma base que apresenta uma maior energia de adsorção aos coloides do solo em comparação com K^{+} e Mg^{2+} resultando em expressiva lixiviação dessas bases para camadas subsuperficiais do solo, por isso, é fundamental levar em consideração a capacidade de troca de cátions, o balanço de cargas dos coloides do solo e o equilíbrio iônico ao aplicar doses elevadas de gesso evitando assim que as bases fiquem inacessíveis para as raízes das plantas (Caires *et al*., 2003).

Para Caires *et al*. (2003) e Van Raij (2008), a aplicação de doses elevadas de gesso pode resultar na perda de nutrientes importante que são mais lixiviáveis causando um desbalanço nutricional, sendo este o um motivo de grande preocupação. Neste sentido, vários autores (Caires *et al*., 1998; Soratto; Crusciol, 2008; Serafim *et al*., 2012) observaram que a aplicação

de doses elevadas de gesso resultou em intensa lixiviação dos nutrientes Mg^{2+} e K^{+} ao longo do perfil do solo.

Uma explicação para desbalanço entre os nutrientes Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^{+} no solo que recebeu a aplicação de doses elevadas de gesso é dada por Mahan (2003). Segundo o referido autor, esse desbalanço está intimamente relacionado com tamanho (raio iônico de Pauling: 0,99, 0,65 e 1,33 Å, respectivamente, para Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^{+}) e à carga de cada espécie (2,02; 3,07; e 0,75, respectivamente, para Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^{+}). Sendo assim, quanto maior a densidade de carga (relação carga/raio), mais intensamente os cátions estarão ligados aos ânions (OH^{-}, SO_4^{-2}) facilitando a formação de sulfatos percoláveis no solo ($MgSO_4^0 > CaSO_4^0 > K_2SO_4^0$), podendo sofrer alteração em razão do aumento da aplicação de gesso agrícola ou de outros fatores referentes a heterogeneidade do sistema solo.

O uso de altas doses de gesso no solo requer monitoramento a longo prazo para melhor avaliar a viabilidade dessa prática em termos de alterações químicas em todo o perfil do solo, principalmente para maior lixiviação de K^{+} e Mg^{2+}, que já são encontrados em concentrações mais baixas no solo (Ramos *et al*., 2019).

2.4 Problemas ambientais em decorrência da mineração da gipsita

Para Carvalho (2015), o problema ambiental principal na mineração da gipsita é o capeamento. O mesmo autor cita outros problemas como a poluição do ar e o desmatamento da vegetação nativa como fonte de energia. Já em relação aos resíduos do setor, vários autores alertam o perigo do descarte inadequado que em locais úmidos em condições aeróbicas e na presença de microrganismos redutores de sulfato podem liberar dióxido de carbono, água e gás sulfídrico (Medeiros, 2003).

Já foram relatados problemas de saúde em trabalhadores e moradores exposto a poeira de gesso liberada na extração e processamento da gipsita (Medeiros, 2003), também já foi observada alteração da qualidade de corpos hídricos pela poeira liberada pela indústria gesseira (Arruda *et al*., 2012).

As menores partículas liberadas na extração e processamento de gipsita podem ser dispersar por alguns quilômetros a partir dos focos de emissão, e após sedimentar sobre o solo e a vegetação é solubilizada pela água da chuva formando compostos solúveis de sulfato e cloreto que escoam superficialmente ou infiltram no solo contaminando corpos d’água de

superfície e o lençol freático (Arruda *et al*., 2012). Os mesmos autores observaram concentrações anômalas de sulfatos e cloretos em corpos hídricos que segundo eles têm centrada na poeira de gesso liberada no polo gesseiro de Araripe – PE.

O pó oriundo da produção de gesso pode ser disperso por quilômetros contaminando toda a área próxima ao setor industrial. A dispersão de pó de uma indústria produtora de cal foi avaliada por Fellenberg (1997), o autor relatou que a emissão de pó de cal resultou em uma sedimentação vicinal diária de 3,17 g/m^2 e 1,74 g/m^2 a uma distância de 1 km do local de produção. O mesmo autor afirma que em alguns casos o pó pode atingir entre 4 e 8 km de altitudes podendo formar nuvens. A distância de dispersão das partículas depende da intensidade do vento.

A grande maioria das empresas não possui sistema eficiente que retenha os gases e poeiras provenientes deste tipo de tratamento. Segundo Araújo (2004), este fato permite que grande quantidade de poeira seja liberada no ambiente ocorrendo reações entre a água e o óxido de enxofre tendo como produto o gás sulfídrico e ácido sulfúrico.

Há poucos estudos sobre os impactos da indústria de gipsita no solo. Avaliar a química do solo no entorno dessas indústrias é uma prática fundamental para identificar e mitigar possíveis contaminações, orientar estratégias de recuperação de áreas degradas e assegurar um uso mais seguro e produtivo da terra.

REFERÊNCIAS

ABBAS, F.; SIDDIQUE, T.; FAN, R.; AZEEM, M. Role of gypsum in conserving soil moisture macronutrients uptake and improving wheat yield in the rainfed area. **Water**, v. 15, p. 1011-1011, 2023.

ABREU, J. Minas de gesso. **Maranhão Industrial,** v. 11 n. 39, p. 12-14, 2017.

ARAÚJO, S. M. S. **O Polo Gesseiro do Araripe: unidades geo-ambientais e impactos da mineração**. 2004. 255 f. Tese de doutorado (Doutorado em Ciências, Área de Administração e Política de Recursos Minerais) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, UNICAMP, 2004.

ARRUDA, G. B. **Diagnóstico Ambiental da poluição sulfática no Município de Araripina, através da hidroquímica de águas de superfície**. 2012. 96 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, UFP, 2012.

BARROS, M. F. C.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ V., V. H.; RUIZ, H. A. Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, p. 59-64, 2004.

BAUER, F. L. A. **Materiais de Construção,** 2 ed. São Paulo: LTC, 2000. 563 p.

BENNETT, J. M. C. L.; GREENE, R. S. B.; MURPHY, B. W.; HOCKING, P.; TONGWAY, D. Influence of lime and gypsum on long-term rehabilitation of a Red Sodosol, in a semi-arid environment of New South Wales. **Soil Research**, v. 52, p. 120-128, 2014.

BRITO, J., FLORES-COLEN, I. Gypsum Plasters. In: GONÇALVES, M., MARGARIDO, F. (eds). **Materials for Construction and Civil Engineering**. Springer. 2015. p. 123-184.

BRASIL, E. C.; LIMA, E.V.; CRAVO, M. S. **Uso de gesso na agricultura**. 8 ed, SIDALC, 2020. p. 135-147.

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicado na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p.27-34, 1998.

CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 275-286, 2003.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use Manage**, v. 27, p. 45-53, 2011.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 147-157, 2009.

CARVALHO, L. L.; GOMES, P. R. B.; PINHEIRO, H. A.; LIMA, H. S.; SILVA, E. F. Gesso: uma perspectiva dos Impactos Ambientais, noções básicas sobre sua produção química e ponto estratégico de captação de renda na cidade de Grajaú-MA. **Educação Ambiental em Ação**, v. p. 1-9, 2015.

CRUSCIOL, C. A. C.; ARTIGIANI, A. C. C. A.; ARF, O.; FILHO, A. C. A. C.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. F. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, v. 137, p. 87-99, 2016.

COSTA, C. H. M.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 119-132, 2016.

DIAS, L. E. **Uso de gesso como insumo agrícola.** Seropédica: Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Biologia - CNPBS, 1992. 6 p. (Comunicado Técnico, 7).

DUCKWORTH, O. W.; PLOZZOTTO, M. L.; THOMPSON, A. Bringing soil chemistry to environmental health science to tackle contaminants. **Frontiers Environmental Science**. v. 10, p. 981607. 2022.

ERCOLI, L.; LULLI, L.; ARDUINI, I.; MARIOTTI, M.; MASONI, A. Durum wheat grain yield and quality as affected by S rate under Mediterranean conditions. **European Journal of Agronomy**, v. 35, p. 63-70, 2011.

FELLENBERG, G., **Introdução aos problemas da poluição ambiental**. São Paulo, E.P.U./EDUSP, 1997. p. 196.

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C.; VIEIRA, R. C. B.; MORAES, R. P. **Calcário e gesso: efeito na produtividade de culturas e na melhoria química do solo em plantio direto no Centro-Sul do Paraná.** Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária. 2012. (Boletim técnico).

GELAIN, E.; ROSA JUNIOR, E.; J.; MERCANTE, F. M.; FORTES, D. G.; SOUSA, F. R.; ROSA, Y. B. C. J. Fixação biológica de nitrogênio e teores foliares de nutrientes na soja em função de doses de molibdênio e gesso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, p. 259-69, 2011.

GREEN, H.; LARSEN, P.; KOCI, J.; EDWARDS, W.; NELSON, P.N. Long-term effects of gypsum on the chemistry of sodic soils, **Soil and Tillage Research**, v. 233, p. 105780, 2023.

INAGAKI, M. T.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. Lime and gypsum application increases biological activity, carbono pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 231, p. 156-165, 2016.

JIANG, Z.; SUN, X.; LOU, Y.; FU, X.; XU, A.; BI, Y. Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials. **Construction and Building Materials**, v. 432, p. 136609, 2024.

JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; SCHARR, D. A.; BINI, A. R.; HALISKI, A. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 68-77, 2016.

KIHARA, J.; SILESHI, G.W.; NZIGUHEBA, G.; KINYUA, M.; ZINGORE, S.; SOMMER, R. Application of secondary nutrients and micronutrients increases crop yields in sub-Saharan Africa. **Agronomy for Sustainable Development**. v. 37, p. 1-14, 2017.

LABĘTOWICZ, J.; RUTKOWSKA, B. The attempt to utilize chemical composition of soil solution in fertilization diagnostics. In: HORST, W.J.; SCHENK, M. K.; BURKERT, A.; CLAASSEN, N.; FLESSA, H.; FROMMER, W. B.; GOLBACH, H.; OLFS, H. W.; SATTELMACHER, B.; SCHMIDHALTER, U.; SCHUBERT, S.; WIRÉN, N.; WITTENMAYER, L. **Plant Nutrition. Developments in Plant and Soil Sciences**. Dordrecht: Springer, p. 740-741. 2001.

LEITE, E. M.; DINIZ, A. A.; CAVALCANTE, L. F.; GHEYI, H. R.; CAMPOS, V. B. Redução da sodicidade em solo sendo irrigado com a utilização de ácido sulfúrico e gesso agrícola. **Revista Caatinga**, v.23, p.110-116, 2010.

LOUREIRO, F. E. V. L. O gesso nos agroecossistemas brasileiros. In: **Fertilizantes agroindustriais e sustentabilidade.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. p. 445-478. (Comunicado técnico, CT2009-169-00).

LYRA SOBRINHO, A. C. P.; AMARAL A. J. R.; DANTAS J. R. A. **Balanço Mineral Brasileiro**. Brasília, DNPM, 2001. p. 22. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp>. Acesso em: 06 maio 2024.

LYRA SOBRINHO, A. C. P.; AMARAL, A. J. R.; DANTAS, J. O. C. **Gipsita.** Sumário Mineral DNPM, 2004. p. 80-81. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2004/gipsita-2004.pdf. Acesso em: 11 out. 2024.

MARQUES, E. S.; FAQUIN, V.; GUIMARÃES, P. T. G. Teores foliares de nutrientes no cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em resposta a calcário e gesso. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 23, n. 1, p. 140-151, 1999.

MARTINAZZO, R. **Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado**. 2006. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

MEDEIROS, M. S. **Poluição Ambiental por Exposição à Poeira de Gesso: Impactos na Saúde da população**. 2003. 96 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Saúde Pública) – Centro Pesquisa Aggeu Magalhães (CPqAM), Recife, 2003.

MELO, V. F., ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo-Volume Único**. 3 ed. Viçosa: SBCS, 2019. 1382 p.

MINATO, E.A.; BRIGNOLI, F.M.; NETO, M. E.; BESEN, M. R.; CASSIM, B. M. A. R.; LIMA, R. S.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Lime and gypsum application to low-acidity soils: Changes in soil chemical properties, residual lime content and crop agronomic performance, **Soil and Tillage Research**, v. 234, p. 105860, 2023.

MME – Ministério De Minas E Energia. **Relatório técnico 34 – Perfil da gipsita**. 2009. 30 p. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/36108/448620/P24_RT34_Perfil_da_Gipsita.pdf/f4f7789d-c26fe52b-8f06-a75feb0cefe9?version=1.0. Acesso em: 10 nov. 2024.

NASCIMENTO, P. C.; BISSANI, C. A.; LEVIEN, R.; LOSEKANN, M. E.; FINATO, T. Uso da terra e atributos de solos do estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 920-926. 2014.

NEIS, L.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PINTO, F. A. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 409-416, 2010.

OKAJIMA, H.; IMAI, H. Role of anion in controlling mineral ion concentration of the soil solution. **Japan Agricultural Research Quarterly**, v. 9, p. 191-197. 1975.

PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A.C.V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 495-505, 2014.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Toxicity of aluminum to coffee in Ultisols and Oxisols amended with $CaCO_3$, $MgCO_3$, and $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, p. 1201-1207, 1982.

PAVAN, M. A. **Comportamento do gesso nos solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais.** Piracicaba: POTAFOS - Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1986. 3 p. (Informações Agronômicas, 35).

PEREIRA, B. F. F. **Potencial fitorremediador das culturas do feijão-de-porco, girassol e milho cultivadas em Latossolo Vermelho contaminado com chumbo**. 2005. 81 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical/Gestão de Recursos Agroambientais) – Instituo Agronômico de Campinas, Campinas, 2005.

PIAS, O. H. C.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, A. G. B.; BAYER, C. Does gypsum increase crop grain yield on no-tilled acid soils? A meta-analysis. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 675-692, 2020.

VAN RAIJ, B. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2008. 233 p.

RAMOS, B. Z.; TOLEDO, J. P. V. F.; LIMA, J. M.; SERAFIM, M. E.; BASTOS, A. R. R.; GUIMARAES, P.T.G.; COSCIONE, A.R. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH da solução de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1018-1026, 2013.

RASHMI, I.; MINA, B. L.; KULDEEP, K.; SHAKIR, A.; ASHOK, K.; KALA, S.; SINGH, R. Gypsum-an inexpensive, effective sulphur source with multitude impact on oilseed production and soil quality: A review. **Agricultural Reviews**, v. 39, p. 218-225. 2018.

RASHMI, I.; BHARAT, P. M.; RAJENDIRAN, S.; SOMASUNDARAM J.; JOSHY, C.G.; ALI, S.; MINA, B.L.; KUMAR, K.; KUMAR, A.; KUMAWAT, A.; KALA, S. Can gypsum and organic amendments achieve sustainability, productivity and maintain soil health under soybean-mustard cropping in sodic soils of western India, **Soil and Tillage Research**, v. 240, p. 106075, 2024.

RASOULI, F.; POUYA, A. K.; KARIMIAN. N. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum, **Geoderma**, v. 193-194, p. 246-255, 2013.

RHEINHEIMER, D. S.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; ZAFAR, M.; BRUNETTO, G. Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma,** v. 313, p. 7-16, 2018.

RITCHEY, K. D.; SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, v. 72, p. 40-44, 1980.

ROCHA, A. T.; OLIVEIRA, A. C.; RODRIGUES, A. N.; LIRA JÚNIOR, M. A.; FREIRE, F. J. Emprego do gesso do Araripe na melhoria do ambiente radicular da cana-deaçúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, p. 307-312, 2008.

RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; RANDALL, P. J. Characterization of Al-stimulated efflux of malate from the apices of Al tolerant wheat roots. **Planta**, v. 211, p. 315–321. 1995.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, A. S.; LIMA, J. M.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSTA, J. C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do, MG: Um estudo de caso. **Bioscience Journal**, v. 27, p. 964-977, 2011.

SERAFIM, M. E.; LIMA, J. M.; LIMA, V. M. P.; ZEVIANI, W. M.; PESSONI P. T. Alterações físico-químicas e movimentação de íons em Latossolo gibbsítico sob doses de gesso. **Bragantia**, v. 71, p. 30-40, 2012.

SHRUTHI; PRAKASH, N. B.; DHUMGOND, P.; GOIBA, P. K.; LAXMANARAYANAN, M. The benefits of gypsum for sustainable management and utilization of acid soils. **Plant and Soil**, v. 502, p. 06907, 2024.

SILVEIRA, K. R.; RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; HECK, R. J.; SILVEIRA, R. R. Gypsum saturated water to reclaim alluvial saline sodic and sodic soils. **Scientia Agricola**, v.65, p.69-76, 2008.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 3 ed. New York: Oxford University Press; 1989. p. 344.

TAVARES FILHO, A. N.; BARROS, M. F. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, E. F. F. Incorporação de gesso para correção da salinidade e sodicidade de solos salino-sódicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 247-252, 2012.

TIECHER, T.; SANTOS, D.R.; ALVAREZ, J.W.R.; MALLMANN, F.J.K.; PICCIN, R.; BRUNETTO, G. Respostas de culturas à adubação sulfatada e deposição de enxofre atmosférico. **Revista Ceres**, v. 60, p. 420-427, 2013.

TIECHER, T., PIAS, O. H. C.; BAYER, C., MARTINS, A. P.; DENARDIN, L. G. O.; ANGHINONI, I. Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 42, p. e0170025. 2018.

TIECHER, T.; SILVA, L. S.; MARTINS, A. P.; MALLMANN, F. J. K. Química do solo. 1. ed. Santa Maria : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul. 2023. 320 p.

TIRITAN, C. S.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; FERNANDES, D. M.; NASCENTE, A. S. Tillage system and lime application in a tropical region: soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 437-447, 2016.

TOMAZ, M. A.; SILVA, S. R.; SAKIYAMA, N. S.; MARTINEZ, H. E. P. Eficiência de absorção, translocação e uso de cálcio, magnésio e enxofre por mudas enxertadas de *Coffea arabica*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 885-892, 2003.

USGS – United States Geological Survey. **Gypsum Statistics and Information**. 2021. Disponível em: https://www.usgs.gov/centers/ nmic/gypsum-statistics-and-information. Acesso em: 25 out. 2024.

VASCONCELOS, R. R. A.; BARROS, M. F. C.; SILVA, Ê. F. de F.; GRACIANO, E. S. A.; FONTENELE, A. J. P. B.; SILVA, N. M. L. Características físicas de solos salino-sódicos do semiárido pernambucano em função de diferentes níveis de gesso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1318-1325, 2013.

WALIA, M. K.; DICK, W. A. Selected soil physical properties and aggregate-associated carbon and nitrogen as influenced by gypsum, crop residue, and glucose. **Geoderma**, v. 320, p. 67-73. 2018.

WANG, H. L.; BOLAN, N. S.; HEDLEY, M. J.; HORNE, D. J. The influence of surface incorporated lime and gypsiferous by-products on surface and subsurface soil acidity. I. Soil solution chemistry. **Australian Journal Soil Research**, v. 37, p. 165-180. 1999.

WATTS, D. B.; RUNION, G. B.; WARREN, A. D.; JAVIER, M. G.; ISLAM, R.; FAU SEY, N. R.; TATA, T. V.; MARVIN, B.; RANDLALL, R.; KOST, D.; PIERRE, A. J. Influence of gypsum and cover crop on greenhouse gas emissions in soybean cropping systems. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 78, p. 00042. 2023.

WHITNEY, D. A. Soil salinity. *In:* DAHNKE, W. C. (eds). **Recommended chemical soil test procedures for the North Central Region**. North Dakota: North Central Regional Research Publication, 1988. p. 59-60.

WOLT, J. D. **Soil solution chemistry: applications to environmental science and agriculture**. 1 ed. New York: John Wiley. 1994. 345 p.

XIE, Z.; LIU, X.; ZHANG, Z.; WEI, C.; GU, J. Application of the Industrial Byproduct Gypsum in Building Materials: A Review. **Materials,** v. 17, p. 1837, 2024.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 128-137, 2015.

ZOCA, S. M.; PENN, C. An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. **Advances in Agronomy**, v. 144, p. 1-44, 2017.

3 CAPÍTULO 2

RISCOS DE DEGRADAÇÃO QUÍMICA DO SOLO POR DERIVA DE GESSO AO REDOR DE EMPRESAS DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO NA CIDADE DE GRAJAÚ, NORDESTE DO BRASIL

RESUMO

Até o momento, nenhum estudo se concentrou na compreensão dos impactos da pluma atmosférica de gesso originada da mineração e processamento de gipsita na lixiviação das bases do solo e na degradação química no entorno desses locais. Neste estudo, avaliamos o comportamento das características químicas em perfis de solo distribuídos ao longo da pluma de dispersão e em áreas sem interferência do setor industrial da cidade de Grajaú, no estado do Maranhão, Nordeste do Brasil. Cinquenta e três pontos de amostragem foram coletados em 7 locais com base na dispersão da pluma de poeira através da deriva do vento. Cada ponto amostral foi representado por três amostras de solo nas profundidades de 0-0,2, 0,4-0,6 e 1,0-1,2 m. Foram avaliados pH, P, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+}, SO_4^{2-} do solo, acidez potencial, carbono orgânico total, saturação por bases, capacidade de troca catiônica e saturação por alumínio. Os teores médios de Ca, Mg e K nas camadas estudadas são classificados como baixos, com valores mínimos abaixo do limite de detecção do método, e apresentam desequilíbrio devido às maiores concentrações de Ca na camada superficial em áreas afetadas pela dispersão atmosférica de gesso. A soma e a saturação de bases em todas as profundidades são classificadas como baixas. Maiores valores de saturação de alumínio foram observados nas camadas mais profundas do solo. O pó de gesso alterou as características químicas do solo nas profundidades avaliadas; portanto, é necessário buscar meios para mitigar a liberação de pó de gesso durante a extração e processamento da gipsita e garantir que os solos nas áreas próximas a esses empreendimentos mantenham suas características naturais.

Palavras-chave: Gipsita, Mineração, Lixiviação, Perda de bases.

3.1 Introdução

O gesso é um dos principais minerais em rochas sedimentares compostas principalmente de sulfato de cálcio dihidratado ($CaSO_4.2H_2O$), sendo encontrado em grandes quantidades na natureza na forma de gipsita. Atualmente, o Estados Unidos é o maior produtor mundial, por sua vez, o Brasil aparece na 13ª posição possuindo uma das maiores reservas de gesso do planeta, sendo os principais depósitos encontrados nas regiões Norte e Nordeste (Sanz *et al*., 2022; USGS, 2022).

O gesso tem um papel de destaque na construção civil, na agricultura também tem sua importância por ser considerado uma alternativa eficaz para aliviar a acidez do subsolo em virtude de sua maior solubilidade e de conter S, que se liga a cátions como Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^+ para formar pares de íons (por exemplo, $CaSO_4^0$, $MgSO_4^0$, KSO_4^-), que podem migrar através do perfil do solo e reduzir a saturação e a atividade de Al nas camadas subsuperficiais (Tiecher *et al*., 2018; Tiecher *et al*., 2019). Além disso, vem sendo usado na lixiviação do excesso de sais ou Na^+ da zona radicular em regiões áridas e semiáridas do planeta (Santos *et al*., 2019).

O uso de gesso ou em mistura com outros condicionadores no solo também trouxe benefícios na revegetação de áreas impactadas por resíduos de bauxita e elementos potencialmente tóxicos, diminuindo a sua disponibilidade e absorção, permitindo maior aporte de matéria orgânica no solo, aumento da taxa de germinação e crescimento das plantas por promover a disponibilidade de nutrientes em profundidade (García-Robles *et al*., 2022; Phillips; Courtney, 2022). Todos esses aspectos permitem que o ambiente subsuperficial seja melhorado, aumentando o volume do solo que pode ser explorado pelas raízes e, portanto, a absorção de água e nutrientes pelas plantas (Nora *et al*., 2017).

Os benefícios da aplicação do gesso no solo são inegáveis, no entanto, é preciso ter cuidado com o manejo na aplicação ou descarte deste produto, pois quantidades elevadas podem resultar na perda ao longo dos perfis dos solos de importantes nutrientes que são mais lixiviáveis, por exemplo o Mg^{2+} e K^+, causando um desbalanço nutricional a ponto de gerar déficit destes nutrientes e consequente degradação do solo, sendo motivo de grande preocupação socioambiental (Van Raij, 2008; FAO; ITPS, 2015; Tiecher *et al*., 2019).

Outro aspecto relevante são as atividades agrícolas constantemente associadas ao gesso agrícola, que geram riscos de contaminação das águas subterrâneas a longo prazo, devido as aplicações excessivas de fertilizantes, sais, pesticidas, irrigação e outros químicos que serão lixiviados ou ainda o empobrecimento do solo ameaçando a produção agrícola e florestal, bem

como os ecossistemas naturais (Paz; Sánchez; Visconti, 2016; Wang *et al*., 2021). Tornando uma grande ameaça ao desafio da segurança alimentar, particularmente no contexto de uma população global em rápido crescimento que vive com recursos finitos da terra (Kuria *et al*., 2018). Por isso, a exposição contínua do solo ao gesso requer o monitoramento a longo prazo para melhor avaliação de sua viabilidade dessa prática em termos de perdas de bases em todo o perfil do solo, já que são encontradas naturalmente em concentrações mais baixas (Ramos *et al*., 2019).

Nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, os estudos sobre os benefícios do uso do gesso nos solos, principalmente nas regiões semiáridas, tratam da lixiviação de sódio e sais em excesso. No entanto, até o momento nenhum estudo se concentrou em entender os impactos da mineração da gipsita (gesso) na lixiviação/perda de bases e degradação química dos solos no entorno destes empreendimentos e, assim, desenvolver estratégias mais eficazes no monitoramento e controle das áreas impactadas no processo. Nossa hipótese é que a dispersão do pó (pluma atmosférica) liberado no processo de extração e processamento da gipsita afeta as características químicas dos perfis de solos no entorno deste empreendimento. No entanto, uma compreensão abrangente da variabilidade espacial da pluma deve primeiro ser estabelecida para obter uma imagem clara da dispersão do pó. Neste estudo, avaliamos o comportamento das características químicas nos perfis de solos distribuídos ao longo da pluma de dispersão e em áreas sem interferência, buscando obter informações que orientem os órgãos responsáveis, quanto ao controle da dispersão e, assim contribuir para uma atividade mais sustentável.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Descrição da área

O polo gesseiro de Grajaú é o segundo maior do Brasil, ficando atrás apenas do polo gesseiro da região do Araripe no Estado de Pernambuco. Atualmente conta com mais de dez empresas mineradoras, dezesseis fábricas de gesso e sessenta fábricas de placas de gesso, que produzem mais de 500.000 placas por mês e onde são extraídas mais de 35.000 toneladas de gesso mensalmente. A área estudada está localizada no setor industrial da cidade de Grajaú, no sul do Estado do Maranhão na Região Nordeste nas coordenadas geográficas: 05º 49' 10" S**,** 46º

08' 19" W (Figura 1). As classes de solos predominantes de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al*., 2018) são Latossolo Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo, Vertissolo Cromado, Neossolo Fúlvico, Nitossolo Vermelho e de acordo com o Soil Survey Staff (2014) são Oxisols, Acrisols, Vertisols, Entisols and Ultisols, respectivamente. O clima, segundo a classificação de Köppen, é tropical (AW') subúmido seco com dois períodos bem definidos: um chuvoso que vai de novembro a abril, com médias mensais superiores a 181 mm e, outro seco, correspondente aos meses de maio a outubro. A vegetação é composta pela Floresta Estacional e pelo Cerrado, que se caracteriza por apresentar árvores com troncos e galhos tortuosos e suberizados (IMESC, 2008).

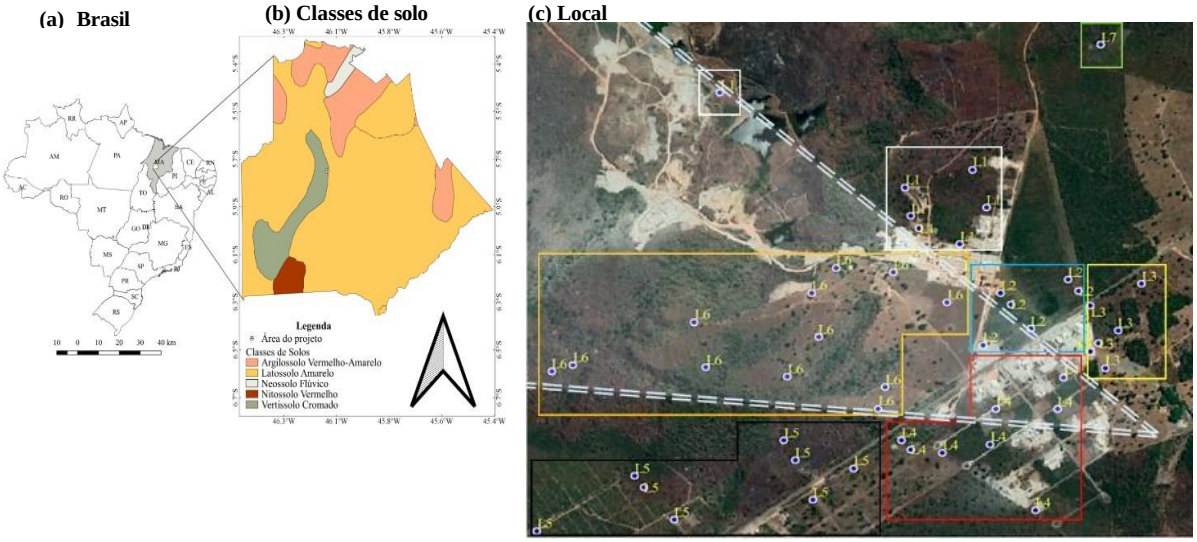


Figura 1 - Mapa da área de estudo: (a) localização no polo gesseiro do Grajaú, Maranhão, Brasil, (b) classes de solos; e (c) pontos amostrais em diferentes usos e coberturas do solo, sendo: L1 = área sob floresta nativa próxima à extração, L2 = área de floresta secundária, L3 = pastagem, L4 = setor industrial, L5 = pastagem + área urbana, L6 = pastagem e floresta secundária, L7 = área de floresta nativa sem influência da pluma atmosférica.

3.2.2 Amostragem de solo

Foram coletados 53 pontos amostrais representativos em 7 glebas (L1 = área sob floresta nativa próximo a extração, L2 = área de floresta secundária, L3 = pastagem, L4 = Setor industrial, L5 = pastagem + urbano, L6 = pastagem e floresta secundária, L7 = área de floresta nativa sem influência da pluma) formadas a partir de imagens de satélites com base na dispersão da pluma de pó pela deriva do vento (Figura 1). Cada ponto foi georreferenciado através de

aparelho de GPS e os dados posteriormente plotados para confecção de um mapa amostral confeccionado por meio de software de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Cada ponto amostral foi representado por três amostras compostas de solo nas profundidades 0-0,2, 0,4-0,6 e 1,0-1,2 m, a partir da mistura e homogeneização de cinco amostras simples coletadas em formato de compasso a uma distância de 4 m entre elas, sendo uma amostra central e quatro ao redor no sentido dos pontos cardeais (Leste, Oeste, Norte e Sul) com o auxílio de trado holandês e pás fabricadas em aço inoxidável.

As amostras foram secas ao ar, destorroadas e tamisadas em peneira de material inoxidável com abertura de malha de 2,0 mm (10 mesh), a fim de obter-se terra fina seca ao ar para posteriormente serem submetidas a análises laboratoriais.

3.2.3 Análises laboratoriais

3.2.3.1 Caracterização do gesso

Uma amostra de gesso da região foi enviada para análise no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Os teores apresentados foram determinados em amostra prensada, na calibração STD-1 (Standardless), relativa à análise sem padrões dos elementos químicos compreendidos entre o flúor e o urânio, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Bruker, modelo S8 Tiger. A perda ao fogo (PF) foi efetuada a 1.020°C por 2h. Os valores expressos foram normalizados a 100% (Figura 2).

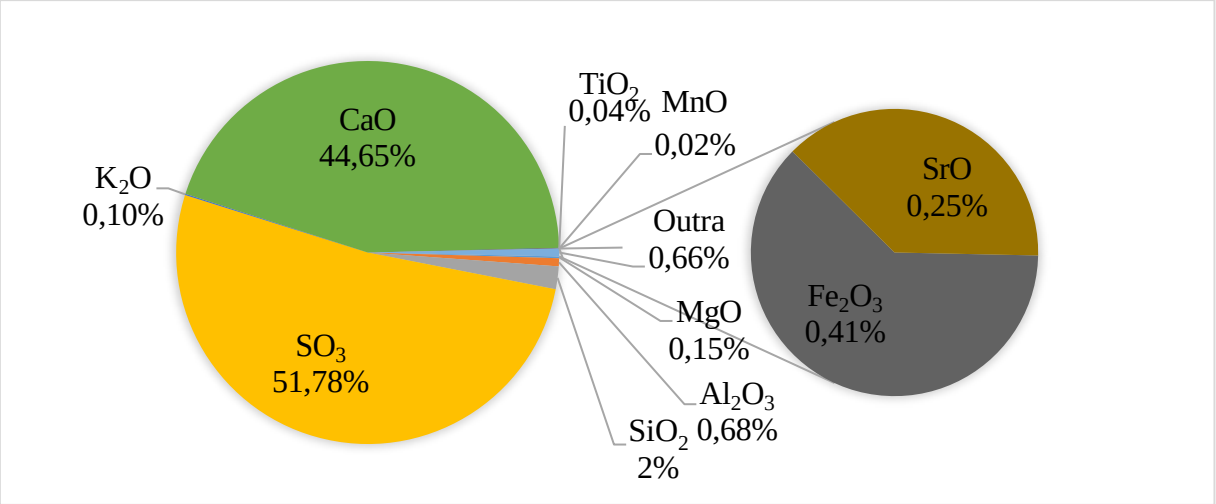


Figura 2 - Composição química média do gesso do polo gesseiro do Grajaú, no estado do Maranhão, Brasil (Ponto de fusão - 8,81%).

3.2.3.2 Caracterização do solo

O pH do solo foi medido na proporção solo/água de 1:2,5. Os teores disponíveis de P e K^+ foram extraídos com Mehlich-1 e determinados por fotocolorimetria e fotometria de chama, respectivamente. Ca^{2+}, Mg^{2+} e Al^{3+} foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados complexometricamente. A acidez total (H + Al) foi obtida por extração e titulação com acetato de cálcio. O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método Walkley-Black modificado (Teixeira *et al*., 2017). O sulfato (SO_4^{2-}) foi extraído com solução de fosfato monocálcico e determinado por espectrofotometria (Cantarella; Prochnow, 2001). As concentrações de cátions foram usadas para calcular a saturação básica, capacidade de troca catiônica e porcentagem de saturação de alumínio.

3.2.4 Processamento de dados e análises estatísticas

3.2.4.1 Estatística descritiva

Inicialmente os dados foram submetidos a uma análise exploratória com o objetivo de observar o comportamento geral. As medidas de posição (média e mediana), de dispersão (valor

máximo, valor mínimo, desvio-padrão e coeficiente de variação) e da forma da distribuição dos dados (coeficiente de assimetria e de curtose) foram calculadas considerando os dados de seis locais (n=53). Ainda foram adotados os limites de coeficiente de variação (CV) propostos por Warrick e Nielsen (1980), para a classificação da variabilidade dos atributos analisados, sendo: CV < 12%, 12% < CV < 60% e CV > 60%, considerados de baixa, média e alta variabilidade, respectivamente. A análise descritiva, embora não considere a estrutura de dependência espacial é importante, pois permite identificar dados atípicos que exercem algum tipo de influência nas análises geoestatísticas, como também verificar a normalidade e homogeneidade dos dados, e indicar a forma da distribuição.

3.2.4.2 Análise de componentes principais

Os dados foram submetidos à análise de componentes principais (CPA) das variáveis pH, H + Al, Al, Ca, Mg, P, K, S, CTC, V, m e COT em cada profundidade estudada (Jolliffe, 1986) baseando-se na representação gráfica (Biplot) relativa aos eixos dos componentes, considerando o parâmetro Cos2, indicador da qualidade de representação, que traduzem a parte da variância correspondente a cada nível da variável. Variáveis que estão correlacionadas com PC1 e PC2 são as mais importantes para explicar a variabilidade no conjunto de dados e possuem altos valores de Cos2, indicando uma boa representação da variável no componente principal (Abid; Williams, 2010) e agrupamento utilizando a distância euclidiana pelo método Ward (Ward, 1963).

3.2.4.3 Análise geoestatística

O estudo da variabilidade espacial foi avaliado pelo Software QGIS, através do plugin Smart Map (Pereira *et al*., 2022).

A autocorrelação espacial foi calculada pelo Índice de Moran (Burt; Barber; Rigby, 2009) e a dependência espacial utilizando-se o semivariograma (Matheron, 1963). O semivariograma é uma função matemática que representa o nível de dependência entre valores

de uma variável observada em duas posições na mesma região de estudo. O estimador de métodos dos momentos do semivariograma é dado por:

$$\hat{\gamma}(u) = \frac{1}{2N(u)} \sum_{a=1}^{N(u)} (z(x_a) - z(x_a + u))^2$$

em que, $\hat{\gamma}$ (u) é a semivariância estimada para cada distância ou classe de distância *u*, *N(u)* é o número de pares de pontos separados por *u*, $z(x_a)$ e $z(x_a + u)$, os valores das variáveis no ponto x_a e $x_a + u$, respectivamente.

Para que o semivariograma seja função apenas da distância *u*, é necessário adotar a Hipótese Intrínseca, ou seja, a variância depende somente da diferença entre dois pontos amostrados, sendo a mesma para toda a área avaliada (estacionaridade).

Para verificar o grau de dependência espacial utilizou-se a classificação de Cambardella *et al*. (1994) em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm efeito pepita < 25% do patamar; de dependência espacial moderada quando o efeito pepita está entre 25 e 75% do patamar; e de dependência espacial fraca, quando o efeito pepita é > 75% do patamar.

O modelo foi selecionado pela validação cruzada, através da análise do coeficiente de determinação (R^2), erro padrão (RMSE). Na construção dos mapas, utilizou-se o estimador espacial denominado de Krigagem ordinária (Isaaks; Srivastava, 1989) e na ausência de dependência espacial os mapas foram gerados pelo método de interpolação pelo inverso do quadrado da distância (IDW).

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Mudanças químicas no solo

De maneira geral os valores médios e das medianas das variáveis analisadas são muito próximas mesmo com a natureza contínua e dispersa dos dados obtidos à campo. Aproximadamente 63,9% dos atributos avaliados apresentaram valores para assimetria > 0 e

cutose igual ou maior que 3,0, ou seja, com muitos valores acima da média na camada 0,0 – 0,20 m. A acidez potencial (H+Al), alumínio disponível (Al), capacidade de troca catiônica (CTC) e a saturação de alumínio (m%) apresentam distribuição aproximadamente simétrica e normalidade, nas demais camadas houve resposta semelhante para pH, H+Al e m% (0,40 – 0,60 m) e pH e m (1,00 – 1,20 m). Conforme proposto por Warrick e Nielsen (1980), por se tratar de dados obtidos na natureza, o ajuste a uma distribuição teórica é apenas uma aproximação. A normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, mas sim que a distribuição não apresente muito caudas alongadas (Tabela 1).

O coeficiente de variação (CV) foi amplo entre os valores de pH (6,55 %) e o teor de Mg (533,91 %) na camada de 0,40 – 0,60 m apresentando considerável variação nas camadas estudadas (Tabela 1). O CV vem sendo utilizado na avaliação de atributos do solo por ser capaz de classificar a sua variabilidade, ranqueando-as nas seguintes magnitudes: baixa $\leq 10\%$; média $10\% < CV \leq 20\%$; alta $20\% < CV \leq 30\%$, e muito alta $> 30\%$ (Pimentel-Gomes; Garcia, 2002).

O solo da área estudada apresenta alta variabilidade nas características químicas nas três profundidades avaliadas (Tabela 1). O CV para pH foi baixo em todas as profundidades (< 10%). Resultados semelhantes de baixa variabilidade de pH também foram observados em solos de áreas naturais e cultivadas por Silva et al. (2022). Para todas as outras variáveis estudadas nas três camadas os valores de CV foram considerados muito altos (>30%). Resultados semelhantes com elevados CV foram observados em atributos químicos de solos de Mata Atlântica em diferentes profundidades (Delarmelina *et al*., 2022).

Os solos estudados possuem ampla faixa de pH e com valores entre 3,65 a 5,90 (média de 4,45 ± 1,1) de 0,0 – 0,20 m, 3,11 a 4,70 (média de 4,04 ± 1,1) de 0,40 – 0,60 m e 3,11 a 5,90 (média de 4,88 ± 1,1) de 1,00 - 1,20 m com predominância da condição de acidez (Tabela 2), Os teores médios de Ca (1,09, 0,36 e 0,27 $cmol_c\ dm^{-3}$), Mg (0,12, 0,21 e 0,25 $cmol_c\ dm^{-3}$) e K (0,05, 0,02 e 0,01 $cmol_c\ dm^{-3}$) nas três camadas estudadas são classificados como baixos com valores mínimos abaixo do limite de detecção do método. Este comportamento é explicado pelas expressivas quantidades de gesso depositadas nas áreas estudadas, elevando os teores de Ca na solução do solo, ocorrendo, dessa maneira, alterações nas relações entre Ca, Mg e K, devido à inibição competitiva e, assim, resultando em desbalanço entre esses cátions no solo (Marques; Faquin; Guimarães, 1999). Isso ocorre porque como o K é monovalente, é menos retido no complexo de troca do solo do que o Ca e o Mg, que são divalentes. Por outro lado, o Ca, tem grau de hidratação menor do que o Mg, fica mais fortemente retido no solo, portanto, deposições de quantidades elevadas de gesso podem resultar em alterações nas relações entre os cátions básicos (Quaggio, 2000). Resultados semelhantes foram reportados por Pauletti *et*

al. (2014) ao avaliarem a aplicação conjunta de gesso e calcário a longo prazo nos atributos químicos do solo.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos químicos de amostras de solos próximos ao setor industrial gesseiro de Grajaú no estado de Maranhão, Brasil, em três profundidades.

Variáveis	Valores					Coeficientes		
	Média	Mediana	Min	Max	DP	Variação (%)	Assimetria	Curtose
	0,0 – 0,20 m							
pH_{H2O}	4,45	4,37	3,65	5,90	0,40	9,02	1,29	2,64
H+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)	6,37	6,19	1,32	12,54	2,18	34,29	0,50	0,68
Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,50	0,50	0,00	1,10	0,25	50,42	0,10	0,02
Ca ($cmol_c\ dm^{-3}$)	1,09	0,94	ALD	4,23	0,99	90,86	1,21	1,50
Mg ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,12	0,04	ALD	1,92	0,29	242,62	5,26	31,77
K ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,05	0,03	ALD	0,18	0,05	97,17	1,60	1,76
SB ($cmol_c\ dm^{-3}$)	1,26	1,04	0,03	5,52	1,16	92,28	1,58	3,23
CTC ($cmol_c\ dm^{-3}$)	7,62	7,63	3,57	12,61	2,30	30,12	0,20	0,69
P ($mg\ dm^{-3}$)	5,73	2,01	0,97	32,25	8,68	151,39	2,35	4,05
SO_4^{2-} ($mg\ dm^{-3}$)	31,02	24,41	8,83	120,70	23,18	74,73	2,44	6,37
V (%)	16,31	13,67	0,53	73,59	14,21	87,08	1,71	4,57
m (%)	40,17	28,15	0,00	95,66	30,33	75,49	0,56	1,03
	0,40 – 0,60 m							
pH_{H2O}	4,04	4,02	3,11	4,70	0,26	6,55	0,31	2,60
H+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)	4,45	4,46	1,32	9,24	1,74	39,07	0,51	0,38
Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,64	0,60	0,30	2,00	0,26	40,90	2,88	14,80
Ca ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,36	0,18	ALD	3,64	0,68	187,34	3,85	15,87
Mg ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,21	0,00	ALD	7,97	1,13	533,91	6,96	48,86
K ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,02	0,01	ALD	0,15	0,03	161,22	3,40	14,75
SB ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,59	0,26	0,00	11,75	1,69	286,71	6,18	40,77
CTC ($cmol_c\ dm^{-3}$)	5,04	4,81	1,54	20,99	2,86	56,76	3,65	19,48
P ($mg\ dm^{-3}$)	5,62	0,88	0,26	32,12	10,44	185,56	1,92	1,91
SO_4^{2-} ($mg\ dm^{-3}$)	43,48	33,09	6,66	281,82	43,83	100,82	3,98	19,09
V (%)	8,74	5,57	0,00	55,98	10,88	124,45	2,38	7,15
m (%)	69,38	68,38	13,52	100,00	24,79	35,73	0,53	0,51
	1,00 – 1,20 m							
pH_{H2O}	4,88	4,20	3,11	5,90	0,42	7,24	0,93	1,96
H+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)	2,25	1,90	0,00	7,59	1,34	59,65	1,61	4,43
Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,46	0,40	0,20	1,40	0,21	46,26	2,35	7,79
Ca ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,27	0,06	ALD	5,42	0,78	288,54	6,09	40,24
Mg ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,25	0,08	ALD	17,52	2,47	448,19	6,88	48,06
K ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,01	0,00	ALD	0,23	0,04	311,98	5,14	29,71
SB ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,83	0,30	0,00	23,17	3,25	389,50	6,91	48,39
CTC ($cmol_c\ dm^{-3}$)	3,08	2,50	0,32	28,95	3,93	127,60	6,05	40,08
P ($mg\ dm^{-3}$)	4,53	0,52	0,19	36,40	10,02	221,16	2,27	3,58
SO_4^{2-} ($mg\ dm^{-3}$)	40,07	26,70	5,30	221,52	41,53	103,64	2,53	7,70
V (%)	18,27	12,34	0,00	100,00	21,02	115,05	2,01	4,71
m (%)	61,64	60,05	5,70	100,00	27,55	44,70	0,07	1,19

SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; H+Al: acidez potencial; Min: mínimo; Max: máximo; DP: desvio padrão; ALD: abaixo do limite de detecção.

3.3.2 Análise de componentes principais

Os três principais componentes obtidos pelo teste de normalização de Kaiser explicaram 80,94, 84,89 e 83,02% da variância total dos atributos do solo nas três profundidades estudadas. Para a camada de 0,00 - 0,20 m, 43,84% da variância foi atribuída ao PC1, 24,67% ao PC2 e 12,43% ao PC3; para a camada de 0,40 - 0,60 m, 48,49% foi atribuída ao PC1, 23,48% ao PC2 e 12,92% ao PC3; e para a camada de 1,00 - 1,20 m, 41,22% foi atribuída ao PC1, 28,12% ao PC2 e 13,68% ao PC3 (Tabela 2).

Tabela 2 - Estimativa das variâncias (Autovalores) e porcentagem acumulada da variância total (%), obtidas pela análise de componentes principais considerando-se as três camadas de solo.

PC	0,00 - 0,20 m	
	Autovalores	% Acumulada
1	5,26	43,84
2	2,96	68,51
3	1,49	80,94
4	1,31	91,90
PC	0,40 - 0,60 m	
	Autovalores	% Acumulada
1	5,82	48,49
2	2,82	71,97
3	1,55	84,89
4	1,04	93,56
PC	1,00 - 1,20 m	
	Autovalores	% Acumulada
1	4,95	41,22
2	3,38	69,34
3	1,64	83,02
4	1,28	93,67

Pode-se observar que as variáveis avaliadas nas três camadas apresentaram maiores valores do parâmetro de qualidade de representação (Cos2). Altos valores de Cos2 nas Figuras 3a, 3c e 3e estão associadas a uma escala de cores, quanto mais quente a cor (vermelho) maior a importância dessas variáveis, enquanto a análise de agrupamento evidencia a dissimilaridade entre os diferentes locais em todas as camadas de solo avaliadas (Figuras 3b, 3d e 3f).

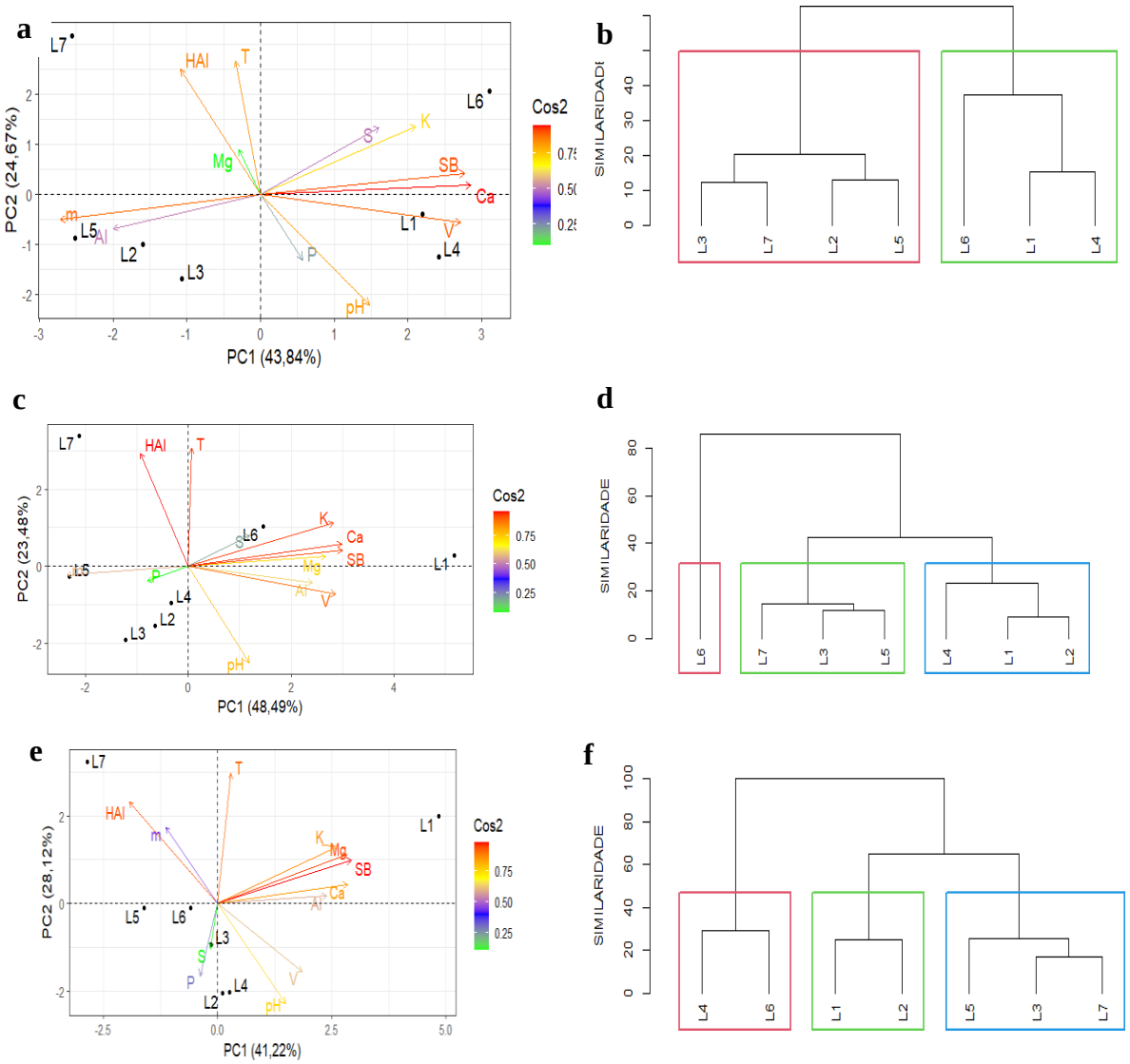


Figura 3 - Biplot entre os atributos estudados sob a influência dos locais nas camadas 0.0 – 0.2 m (a), 0,4 – 0,6 m (c) e 1,0 – 1,2 m (e); Dendrograma utilizando-se o método Ward (Ward's Method) nas camadas 0.0 – 0.2 m (b), 0,4 – 0,6 m (d) e 1,0 – 1,2 m (f). Locais das amostragens de solo no polo gesseiro em Grajaú, estado Maranhão, Brasil. L1 = área sob floresta nativa próximo a extração, L2 = área de floresta secundária, L3 = pastagem, L4 = Setor industrial, L5 = pastagem + urbano, L6 = pastagem e floresta secundária, L7 = área de floresta nativa sem influência da pluma.

Na camada superficial (0,00 - 0,20 m) foi observada uma correlação elevada e positiva entre as variáveis Ca, K, S, SB e V% (Figura 3a) e o agrupamento (G2) das áreas L1, L4 e L6 (Figura 3b). Esse agrupamento ocorre porque essas áreas estão mais próximas de fontes de suspensão de pó de gesso e da projeção de deposição atmosférica (deriva). Isso se reflete principalmente nos níveis de S e bases trocáveis do solo, especialmente Ca (Figura 1 e Tabela 3). Ca e K estão entre as bases usadas para determinar SB, que por sua vez é usada no cálculo

para determinar V%, explicando assim a correlação alta e positiva. Notavelmente, o gesso aumenta os níveis de Ca e S, o que por sua vez aumenta a soma de bases e a saturação de bases (Costa; Crusciol, 2016; Nora *et al*., 2017), consequentemente reduzindo a saturação de alumínio (m%) e o alumínio disponível (Al).

Tabela 3 - Valores médios das variáveis analisadas entre os grupos locais para as camadas de solos avaliadas.

Locais	pH	H+Al [a]	Al	Ca	Mg	K	SB [b]	CEC [c]	P	SO_4^{2-}	V% [d]	m% [e]
	0.00 - 0.20 m											
G1 [f] (L2+L3+L5+L7) [g]	3.24	7.13	0.54	0.49	0.14	0.03	0.66	7.79	3.80	22.99	9.52	52.23
G2 (L1+L4+L6)	4.55	6.05	0.42	1.53	0.15	0.07	1.75	7.80	6.04	33.92	22.06	28.99
	0.40 - 0.60 m											
G1 (L6)	4.04	5.43	0.60	0.58	0.03	0.03	0.64	6.07	0.88	85.90	8.87	62.12
G2 (L3+L5+L7)	4.70	5.59	0.59	0.14	0.06	0.01	0.21	5.79	4.06	23.19	4.07	78.38
G3 (L1+L2+L4)	4.00	3.66	0.65	0.43	0.46	0.02	0.91	4.57	6.93	35.72	12.50	64.37
	1.00 – 1.20 m											
G1 (L4+L6)	4.08	2.53	0.41	0.33	0.17	0.01	0.51	3.04	6.43	66.44	18.10	51.00
G2 (L1+L2)	4.24	1.38	0.49	0.43	0.69	0.02	2.15	3.53	0.36	21.60	36.12	51.00
G3 (L3+L5+L7)	3.95	3.46	0.42	0.07	0.10	0.01	0.17	3.63	4.38	18.79	6.24	75.88

[a] Acidez potencial. [b] Soma de bases. [c] Capacidade de troca catiônica; [d] Saturação de bases. [e] Saturação de alumínio. [f] G1: grupo 1, G2: grupo 2 e G3: grupo 3. [g] Locais de amostragem de solo na área produtora de gesso do Grajaú, Maranhão, Brasil: L1 = área sob floresta nativa próxima à extração, L2 = área de floresta secundária, L3 = pastagem, L4 = setor industrial, L5 = pastagem + área urbana, L6 = pastagem e floresta secundária, L7 = área de floresta nativa sem influência da pluma atmosférica.

Na camada subsuperficial de 0,40 - 0,60 m, nota-se alta correlação positiva entre as variáveis relacionadas às bases do solo, além dos teores de Al e S (Figura 3c). Na área L6 (cluster G1), os teores de S e Ca se destacaram em relação às demais áreas, seguido pelo cluster G3 que engloba as áreas L1, L2 e L4 (Figuras 1 e 2d, e Tabela 3), que estão na projeção da pluma criada pelos ventos fortes na região. Ca e S são os principais constituintes do gesso, explicando os valores aumentados nesses locais. Esses resultados são consistentes com os obtidos por Hammerschmitt *et al*. (2021) e Fontoura *et al*. (2019), que observaram aumento dos teores de Ca nas camadas superficial e subsuperficial com a aplicação de gesso. Os atributos H+Al e CTC apresentaram alta e positiva correlação, enquanto o pH apresentou alta e negativa correlação, seguindo tendência semelhante à camada superficial. Esta camada demonstra claramente a lixiviação de bases e Al no perfil do solo e o efeito direto da deriva de gesso do local de extração (Figura 3c).

A acidez potencial (H+Al) apresentam correlações elevadas e positivas com o primeiro componente (Figura 2c). Assim, quando os seus teores se elevam, indicam redução na fertilidade do solo, caracterizada pela baixa disponibilidade dos demais nutrientes na área em estudo. Este resultado é complementado pela correlação elevada e negativa de pH com os atributos Ca, Mg, K. Evidenciando a correlação entre pH e disponibilidade de nutrientes no solo (Malavolta *et al*., 1997). Os solos da área de estudo são considerados altamente ácidos, intemperizados, bem desenvolvidos, com baixa capacidade de troca catiônica e baixa saturação por bases. Tais características podem potencializar a mobilidade e as perdas de bases no solo por lixiviação, além de induzir a deficiência de Mg (Alves *et al*., 2021).

Na camada mais profunda (1,00 - 1,20 m) observou-se uma correlação forte e positiva das variáveis relacionadas as bases do solo e o Al disponível (Figura 3e) e os agrupamentos G1 entre as áreas L4 e L6 (destacando-se o maior teor de SO_4^{2-}), G2 entre L1 e L2 (destacando-se os maiores teores de Ca e Mg) com maior exposição e efeito da pluma de dispersão do gesso (Figura 3f).

Os locais L3, L5 e L7 apresentaram os solos mais ácidos, os menores teores de Mg e SO_4^{2-} nas três profundidades avaliadas e os maiores valores de saturação de Al, mostrando que esses locais, seja pela distância ou pela localização (Figura 1 e Tabela 3), não são afetados pelo pó do gesso, diferentemente dos demais locais que apresentaram menor saturação de Al e maiores valores de bases trocáveis e sulfato. A redução da saturação por Al pode ser explicada pelo deslocamento do Ca para as camadas subsuperficiais, de modo que esse cátion desloca o Al para a solução, assim diminuindo sua saturação e seu efeito tóxico (Pauletti *et al*., 2014). O aumento de SO_4^{2-} é esperado devido a constituição química da gipsita, resultados semelhantes foram reportados por Hammerschmitt *et al*. (2021) avaliando a aplicação de gesso em Latossolo com cultivo de soja e milho.

De modo geral, fica evidente a diferença entre os locais L6 e L7 (Tabela 3), onde L7 apresentou os maiores valores de H+Al nas três camadas e L6, principalmente, de sulfato e cálcio. O L7 é constituído por pontos em áreas nativas e acima do polo gesseiro, não recebendo o pó de gesso, já o L6 é constituído por pontos localizados próximo ao polo gesseiro e recebem o pó liberado na extração e processamento da gipsita, evidenciando a influência da pluma em locais que não fazem parte do setor industrial, mas que estão no sentido de dispersão da pluma.

3.3.3 Análise geoestatística e distribuição química

De acordo com os mapas geoquímicos dos solos da área gipsífera do Grajaú (Figura 4), maiores valores de pH foram observados na camada mais profunda, sem diferenças abruptas entre os locais próximos e distantes da área gipsífera. Em relação ao H+Al, uma distribuição semelhante foi notada nas três profundidades avaliadas neste estudo, com os maiores valores correspondendo à camada superficial. Os maiores valores de Ca foram na camada superficial; no entanto, vale ressaltar que os locais L4 e L6 apresentaram baixos valores de Ca na superfície, mas na camada mais profunda, esses locais apresentaram as maiores concentrações do elemento (Tabela 3).

Os resultados dos mapas geoquímicos corroboram com os achados já verificados e relatados no presente estudo. A influência da pluma, especialmente em L6, com maiores concentrações de cálcio nas camadas superficiais, impacta diretamente os parâmetros H+Al porque o cálcio atua como um agente ligante. Além disso, o aumento do pH do solo nas camadas mais profundas reduz a mobilidade do cálcio devido ao aumento da atração pelas cargas negativas dependentes do pH das partículas do solo (Carmeis Filho *et al.*, 2016).

A maior concentração de Mg foi observada na camada subsuperficial (1,00 – 1,20 m), em L1 e consequentemente menor contribuição na camada superficial (Figura 4). Estes resultados já foram reportados por Fontoura et al. (2019), onde os teores de Mg diminuíram em todas as camadas do solo abaixo de 0,10 m, o que é sugestivo de lixiviação do mesmo para camadas abaixo de 0,60 m avaliada por estes autores. A camada mais profunda, avaliada no presente estudo, apresentou as maiores concentrações de Mg, principalmente nos locais L4 e L6, enquanto o K e a SB apresentaram os maiores valores na camada superficial.

O maior valor de Mg na camada de 1,00–1,20 m sugere lixiviação desse nutriente para camadas ainda mais profundas (Figura 5). A maior mobilidade do Mg pode ser atribuída à sua menor energia de ligação ao oxigênio dos grupos funcionais coloidais do solo, levando ao seu acúmulo na solução do solo e facilitando a dessorção em comparação a outros cátions (Vargas *et al*., 2019). Além disso, o Mg mostra maior mobilidade no solo devido ao seu raio iônico (Batista *et al*., 2018). Essa maior mobilidade do Mg e do gesso pode resultar em lixiviação, o que é prejudicial à maioria das culturas. O gesso pode causar lixiviação de bases trocáveis como o Mg a ponto de tornar os solos deficientes nesses nutrientes, afetando negativamente a produtividade das culturas (Tiecher *et al*., 2019). Em um estudo de Pauletti *et al*. (2014), os autores concluíram que a aplicação de altas doses de gesso, na ausência de condições de

deficiência hídrica, afetou negativamente a produtividade da soja, provavelmente devido à deficiência de Mg induzida.

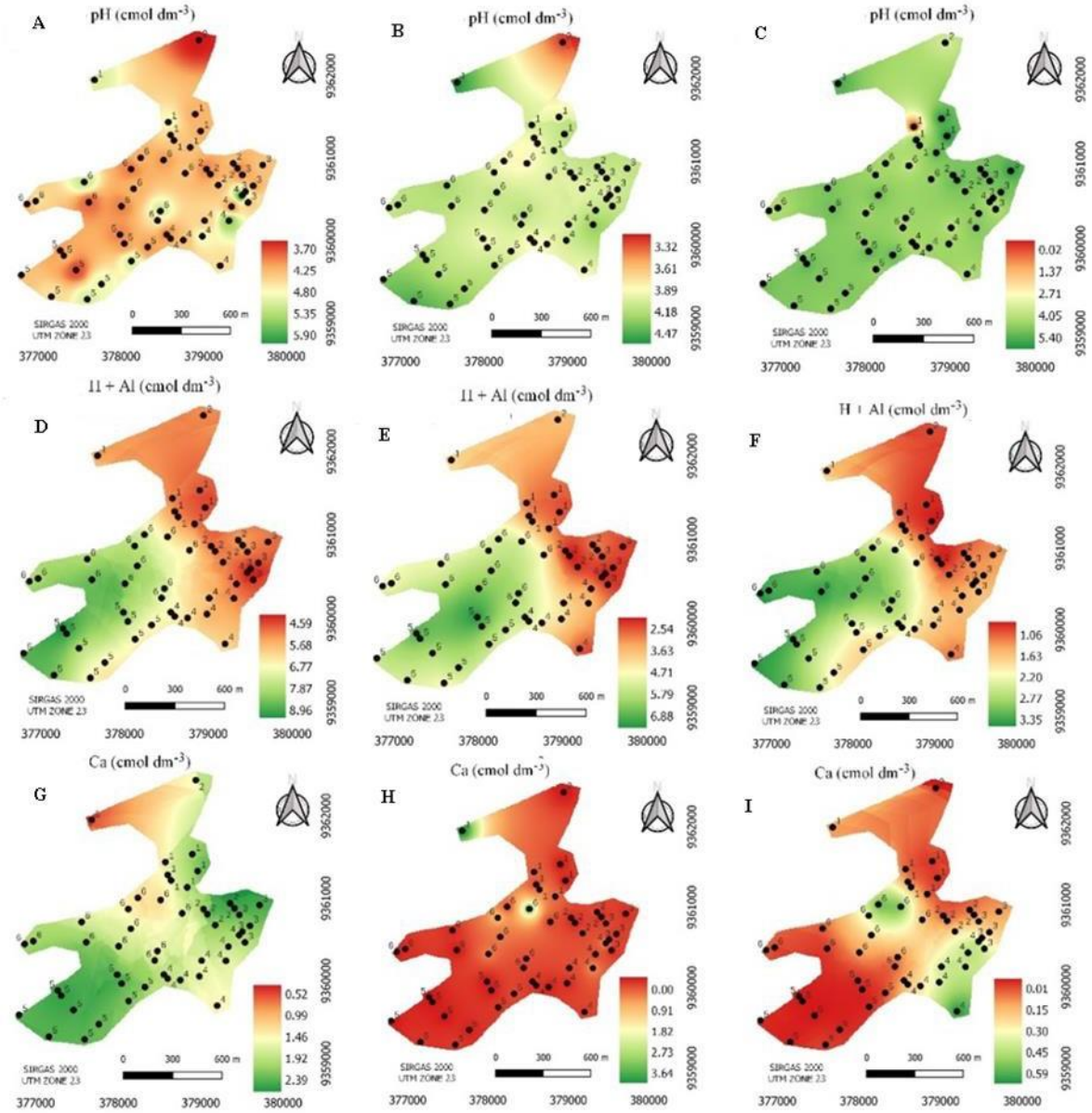


Figura 4 - Distribuição espacial dos atributos químicos do solo, pH nas camadas 0,0 – 0,2 m (a), 0,4 – 0,6 m (b) e 1,0 – 1,2 m (c); H+Al nas camadas 0,0 – 0,2 m (d), 0,4 – 0,6 m (e) e 1,0 – 1,2 m (f); Ca nas camadas 0,0 – 0,2 m (g), 0,4 – 0,6 m (h) e 1,0 – 1,2 m (i).

O Mg é um dos elementos mais vitais da nutrição das plantas, necessário para o crescimento e desenvolvimento (Gransee; Führs, 2013), e que está envolvido em vários processos bioquímicos (Verbruggen; Hermans, 2013). É o elemento central da molécula de clorofila (Chl) que está localizada nos cloroplastos, sendo fundamental para a fotossíntese,

trocas gasosas, partição de carboidratos, reações anabólicas e metabolismo energético em plantas superiores (Chen *et al*., 2018).

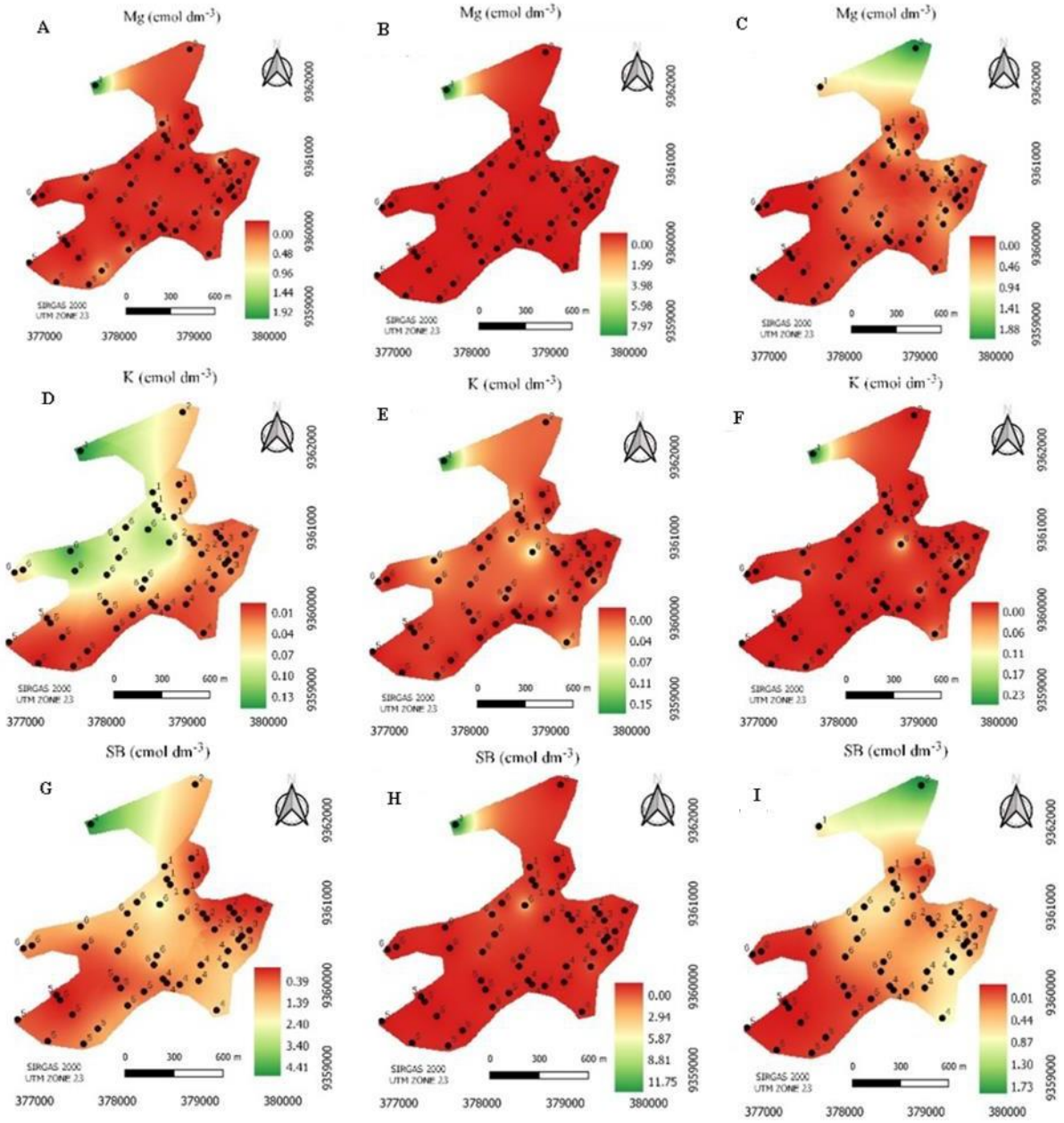


Figura 5 - Distribuição espacial dos atributos químicos do solo, Mg nas camadas 0,0 – 0,2 m (a), 0,4 – 0,6 m (b) e 1,0 – 1,2 m (c); K nas camadas 0,0 – 0,2 m (d), 0,4 – 0,6 m (e) e 1,0 – 1,2 m (f); SB nas camadas 0,0 – 0,2 m (g), 0,4 – 0,6 m (h) e 1,0 – 1,2 m (i).

O gesso apresenta alta solubilidade, o que aumenta a mobilidade de cátions alcalinos como cálcio (Ca) e potássio (K) que estão associados a ânions como sulfato (S-SO42-) (Pauletti *et al*., 2014). A saturação por bases (SB) reflete diretamente a presença desses cátions alcalinos, que, neste estudo, foram maiores nas camadas superficiais, particularmente aquelas com maior

influência da pluma (L6) e do setor industrial (L4). Esses resultados refletem as reações de mobilidade e dissociação de Ca, Mg e K nas áreas estudadas.

3.4 Conclusão

O pó de gesso liberado durante a extração e processamento da gipsita alterou as características químicas do solo da área do setor industrial de gesso na cidade de Grajaú-MA. Houve aumento dos teores de Ca nas camadas superficiais do solo, redução da saturação por Al, e alterações nas relações entre Ca, Mg e K nos locais mais próximos ao pólo e no sentido da pluma de dispersão. Os valores médios de soma e saturação de bases foram baixos, devido aos teores elevados de SO_4^{2-} nas camadas avaliadas decorrentes da presença de gesso no solo. O pó de gesso liberado foi responsável pela lixiviação de Mg para camadas profundas. É necessário buscar meios/tecnologias para mitigar a liberação do pó de gesso durante a extração e processamento da gipsita e assim garantir que os solos das áreas próximas a esses empreendimentos mantenham suas características naturais. Devido ao crescimento da população mundial e ao aumento da demanda por alimentos, os sistemas de cultivo agrícola são constantemente desafiados por uma produção eficiente, rápida e de alta qualidade. Portanto, é vital evitar a perda de nutrientes e assim garantir o fornecimento de todos os nutrientes de forma suficientes para o desenvolvimento vegetal.

REFERÊNCIAS

ABID, H.; WILLIAMS, L. J. Principal Component Analysis. **WIREs Computational Statistics,** v. 2, n. 4, p. 433-59, 2010.

ADAMS, F.; RAWAJFIH, Z. Basaluminite and alunite: A possible cause of sulfate retention by acid soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, n. 4, p. 686-692, 1977.

ALVES, L. A.; AMBROSINI, V. G.; DENARDIN, L. G. O.; FLORES, J. P. M.; MARTINS, A. P.; FILIPPI, D.; BREMM, C.; CARVALHO, P. C. F.; FARIAS, G. D.; CIAMPITTI, I. A.; TIECHER, T. Biological N2 fixation by soybeans grown with or without liming on acid soils in a no-till integrated crop-livestock system. **Soil and Tillage research**, v. 209, p. 104923, 2021.

BATISTA, M. A.; INOUE, T. T.; ESPER NETO, M.; MUNIZ, A. S. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. *In:* BRANDÃO FILHO, J. U. T.; FREITAS, P. S. L.; BERIAN, L. O. S.; GOTO, R. (eds). **Hortaliças-fruto**. Maringá: EDUEM, 2018, pp. 113-162.

BURT, J. E.; BARBER, G.M.; RIGBY, D.L. **Elementary statistics for geographers**. New York: The Guilford Press. 2009. 653 p.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511. 1994.

CANTARELLA, H.; PROCHNOW, L.I. Determinação de sulfato em solos. *In:* VAN RAIJ, B; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A (eds). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas. 2001, p. 225-230.

CARMEIS FILHO, A. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; GUIMARÃES, T. M.; CALONEGO, J. C.; MOONEY, S. J. Impact of amendments on the physical properties of soil under tropical long-term no till conditions. **PLOS One**, v. 11, n. 12, p. e0167564, 2016.

CHEN, Z. C.; PENG, W. T.; LI, J.; LIAO, H. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants, **Seminars Cell & Developmental Biology**, v. 74, p. 142-152. 2018.

COSTA, C. H. M.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean-oat-sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 119-32, 2016.

NORA, D.; D.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. D. S.; GRUHN, E. M. Modern high-yielding maize, wheat and soybean cultivars in response to gypsum and lime application on no-till Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. e0160504. 2017.

DELARMELINA, W. M.; CALDEIRA, M. V. W.; GOMES JUNIOR, D.; GODINHO, T. O.; CALIMAN, J. P.; GONÇALVES, E. O.; KUNZ, S. H.; PEREIRA, M. G.; SILVA, C.S. Soil

attributes and spatial variability of soil organic carbon stock under the Atlantic Forest, Brazil. **Ciência Floretal**, v. 32, p. 1528-1551, 2022.

FAO; ITPS. **Status of the World's Soil Resources (SWSR): Main Report.** Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome: FAO, 2015. 650 p.

FONTOURA, S. M. V.; DE CASTRO PIAS, O. H.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M. R.; DE MORAES, R. P.; BAYER, C. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 27-41. 2019.

GARCÍA-ROBLES, H.; MELLONI, E.G.P.; NAVARRO, F.B.; MARTÍN-PEINADO, F.J.; LORITE, J. Gypsum mining spoil improves plant emergence and growth in soils polluted with potentially harmful elements. **Plant and Soil**, v. 481, p. 315-329, 2022.

GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. **Plant and Soil**, v. 368, p. 5-21, 2013.

HAMMERSCHMITT, R. K.; FACCO, D. B.; DRESCHER, G. L.; MALLMANN, F. J. K.; ONO, F. B.; ZANCANARO, L.; SANTOS, D. R. Limestone and gypsum reapplication in an oxisol under no-tillage promotes low soybean and corn yield increase under tropical conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 214, p. 105-165. 2021.

IMESC. Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos. **Perfil do Maranhão 2006/2007**. São Luís: IMESC, 2008. Disponível em: https://pt.scribd.com/document/317144463/Perfil-do-Maranhao-2006-2007. Acessado em: 20 nov. 2023.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford Universit. 1989. 561 p.

JOLLIFFE, I. T. **Principal component analysis**. 2. ed., New York: Springer-Verlag. 2002. 513 p.

KURIA, A.W.; BARRIOS, E.; PAGELLA, T.; MUTHURI, C.W.; MUKURALINDA, A.; SINCLAIR. F.L. Farmers' knowledge of soil quality indicators along a land degradation gradient in Rwanda. **Geoderma Regional**, v. 15, p. e00199, 2019.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres. 1980, 251 p.

MARQUES, E. S.; FAQUIN, V.; GUIMARÃES, P. T. G. Teores foliares de nutrientes no cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em resposta a calcário e gesso. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 23, n. 1, p. 140-151, 1999.

MATHERON, G. Principles of geoestatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246-66, 1963

PAZ, J. M.; SÁNCHEZ, J.; VISCONTI, F. Combined use of GIS and environmental indicators for assessment of chemical, physical and biological soil degradation in a Spanish Mediterranean region. **Journal of Environmental Management**, v. 79, p. 150-162, 2006.

PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 495-505, 2014.

PEREIRA, G. W.; VALENTE, D. S.; QUEIROZ, D. M.; COELHO, A. L. F.; COSTA, M. M.; GRIFT, T. Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging. **Agronomy**, v. 12, p. 1350, 2022.

PIMENTEL-GOMES, F., GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais:** exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

PHILLIPS, I. R.; COURTNEY R. Long term field trials demonstrate sustainable nutrient supply and uptake in rehabilitated bauxite residue. **Science of the Total Environment**, v. 804, p. 150134, 2022.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas. Instituto Agronômico de Campinas, 2000. 111 p.

RAMOS, B. Z.; LIMA, J. M.; SERAFIM, M. E.; COSCIONE, A. R.; FERRAZ, R. M.; AMORIM, L. M.; LOPES, G. Ionic speciation in a dystrophic red latosol under coffee crop and high doses of gypsum. **Coffee Science**, v. 14, p. 281-290, 2019.

SANTOS, H. G.; JOCOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREARAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. Á.; FILHO, J. C. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Rio de Janeiro: Embrapa. 2018. 531 p.

SANTOS, P. D.; CAVALCANTE, L. F.; GHEYI, H. R.; LIMA, G. S.; GOMES, E. M.; BEZERRA, F. T. C. Saline-sodic soil treated with gypsum, organic sources and leaching for successive cultivation of sunflower and rice. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambienta**l, v. 23, p. 891-898, 2019.

SANZ, J.; TOMASA, O.; JIMENEZ-FRANCO, A.; SIDKI-RIUS, N. Introduction. In: SANZ, J.; TOMASA, O.; JIMENEZ-FRANCO, A.; SIDKI-RIUS, N. **Elements and Mineral Resources**. 1 ed. Universitat Politécnica de Catalunya: Springer Nature. 2022. 405 p.

SILVA, A. A.; SILVA JUNIOR, C. A.; BOECHAT, C. L.; DELLA-SILVA, J. L.; TEODORO, P. E.; ROSSI, F. S.; TEODORO, L. P. R.; PELISSARI, T. D.; BAIO, F. H. R.; LIMA, M. Effect of land uses and land cover on soil attributes in the southern Brazilian Amazon. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, p. 709, 2022.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**, 13 ed. Washington: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2014. 401 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2017. 570 p.

TIECHER, T.; DENARDIN, L. G. D. O.; MARTINS, A. P.; PIAS, O. H.; NUNES, L. R.; TIECHER, T. L.; ALVAREZ, J. W. R.; MALLMANN, F. J. M.; BRUNETTO, G.; SANTOS, D. R. Dynamics of sulfate and basic cations in soil solution as affected by gypsum fertilization in an Ultisol of southern Brazil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, p. 1-15, 2019.

TIECHER, T.; PIAS, O. H. C.; BAYER, C.; MARTINS, A. P.; DENARDIN, L. G. O.; ANGHINONI, I. Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 42, p. 1-17, 2018.

USGS – United States Geological Survey. **Mineral commodity summaries 2022**. U.S. Geological Survey, 2022. 202 p. Disponível em: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf. Acessado em: 12 nov. 2023.

VAN RAIJ, B.; MASCARENHAS, H. A.; PEREIRA, J. A.; IGUE, T.; DE SORDI, G. Efeito de calcário e de gesso para soja cultivada em Latossolo Roxo ácido saturado com sulfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18(2), p. 305-312. 1994.

VARGAS, J. P. R.; RHEINHEIMER, D. S.; BASTOS, M. C.; SCHAEFER, G.; PARISI, P. B. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth chemical attributes in long term period experiment. **Soil and Tillage Research**, v.185, p. 47-60, 2019.

VERBRUGGEN, N.; HERMANS, C. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. **Plant and Soil**, v. 368, p. 87-99, 2013.

WANG, H.; YANG, Q.; MA, M.; LIANG, J. Chemical compositions evolution of groundwater and its pollution characterization due to agricultural activities in Yinchuan Plain, northwest China. **Environmental Research**, v. 200, p. 111449, 2021.

WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, p. 236-244. 1963.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of same physical properties of the soil. In: HILLEL, D. **Applications of Soil Physics**, New York: Academic Press, cap. 13, p. 319-344. 1980.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo abordou uma lacuna significativa na literatura sobre a atividade gesseira, focando nos impactos da extração e processamento da gipsita na química do solo nas proximidades dos empreendimentos. Os resultados obtidos demonstraram que o pó de gesso liberado durante esses processos alterou de maneira significativa as características químicas do solo na área do setor industrial de gesso em Grajaú – MA.

Observou-se um aumento nos teores de cálcio (Ca) nas camadas superficiais do solo, acompanhado por uma redução na saturação por alumínio (Al) e alterações nas relações entre Ca, magnésio (Mg) e potássio (K) nas áreas mais próximas ao polo industrial e ao longo da pluma de dispersão. Além disso, a presença elevada de sulfato (SO_4^{2-}) nas camadas avaliadas resultou em baixos valores médios de soma e saturação de bases, evidenciando a degradação química do solo.

A hipótese de que a dispersão do pó de gesso afeta as características químicas dos perfis de solo foi confirmada, indicando a necessidade urgente de desenvolver estratégias eficazes para monitorar e controlar a dispersão do pó durante a extração e processamento da gipsita. A mitigação desses impactos é essencial para garantir a manutenção das características naturais dos solos nas áreas adjacentes a esses empreendimentos.

Além disso, considerando o crescimento populacional e a crescente demanda por alimentos, é fundamental que os solos sejam preservados. A perda de nutrientes deve ser evitada para assegurar o fornecimento adequado de todos os elementos essenciais ao desenvolvimento vegetal.

Este trabalho contribui para o entendimento dos impactos ambientais da atividade gesseira, servindo como um alerta para a necessidade de práticas mais sustentáveis, visando a preservação dos recursos naturais e a promoção de um desenvolvimento agrícola responsável.

A pesquisa sobre a extração e processamento de gipsita no polo gesseiro de Grajaú – MA revela a necessidade de investigações adicionais, especialmente no que diz respeito à quantificação do pó liberado durante esses processos. A avaliação precisa das emissões de partículas não apenas contribuirá para a compreensão dos impactos ambientais associados à atividade mineradora, mas também poderá fundamentar a formulação de políticas públicas voltadas para a mitigação de riscos à saúde e ao meio ambiente. Portanto, recomenda-se a realização de estudos que abordem a dinâmica da dispersão do pó, suas consequências para a

qualidade do ar e possíveis soluções tecnológicas para minimizar as emissões, promovendo assim uma exploração mais sustentável.