



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ – UESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL – PPGPV

ÁDSON DOS SANTOS OLIVEIRA

**VARIAÇÃO TEMPORAL DE CÁTIOS BÁSICOS E DE ATRIBUTOS DE ACIDEZ
DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIRO**

ILHÉUS – BAHIA

2023

ÁDSON DOS SANTOS OLIVEIRA

**VARIAÇÃO TEMPORAL DE CÁTIOS BÁSICOS E DE ATRIBUTOS DE ACIDEZ
DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, da Universidade Estadual de Santa Cruz, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Linha de Pesquisa: Solos e Nutrição de Plantas em Ambiente Tropical Úmido.

Orientador: Prof. Dr. José Olímpio de Souza Júnior.

ILHÉUS – BAHIA

2023

O48

Oliveira, Ádson dos Santos.

Variação temporal de cátions básicos e de atributos de acidez do solo em áreas cultivadas com cacau-eiro / Ádson dos Santos Oliveira. – Ilhéus, BA: UESC, 2023.

84f. : il.

Orientador: José Olímpio de Souza Júnior
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal – PPGPV.

Inclui referências.

1. Calagem dos solos. 2. Solos – Acidez. 3. Alumínio. 4. Metais – Toxicologia. 5. Fosfogesso. I. Título.

CDD 631.821

ÁDSON DOS SANTOS OLIVEIRA

**VARIAÇÃO TEMPORAL DE CÁTIOS BÁSICOS E DE ATRIBUTOS DE ACIDEZ
DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIRO**

Ilhéus, 27 de fevereiro de 2023.



Prof. Dr. José Olímpio de Souza Júnior
UESC/DCAA
(Orientador)



Prof. Dr. Júlio César Lima Neves
UFV/DPS



Prof. Dr. José Augusto dos Santos Neto
UNIMONTES

A Jesus, Senhor de tudo e de todos, dedico.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, Elaine, pelo amor e compreensão.

A meus filhos, Flor e Lucas.

Ao Professor Dr. José Olímpio, pela paciência e orientação.

Ao Prof. Dr. Dário Ahnert, pelo incentivo.

A Universidade Estadual de Santa Cruz, por proporcionar a infraestrutura para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Projeto Renova Cacau, no contexto da parceria UESC/Mondelez, pela disponibilização de toda a estrutura de pesquisa e dos dados experimentais.

VARIAÇÃO TEMPORAL DE CÁTIOS BÁSICOS E DE ATRIBUTOS DE ACIDEZ DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIRO

RESUMO GERAL

A acidez do solo é uma das principais restrições à produtividade das culturas em ambiente tropical úmido. A toxidez por Al^{3+} associada a baixos teores de cátions de caráter básico, afeta o acúmulo de biomassa, com consequente redução da produtividade das culturas. Visando avaliar a variação temporal de cátions básicos e de atributos de acidez do solo nas camadas 0-20 e 20-40 cm, de solos cultivados com cacauzeiros em processo de renovação, foram avaliadas durante 87 meses, 19 áreas experimentais situadas em 19 fazendas produtoras de cacau, de duas zonas climáticas do estado da Bahia, que receberam doses de calcário e de gesso agrícola em superfície. A acidificação do solo não mostrou relacionamento com os indicadores de tamponamento de acidez do solo. A aplicação superficial de calcário não alterou os atributos de acidez na camada 0-20 cm, indicativo de efeito nas camadas mais superficiais. O gesso aplicado em superfície reduziu a saturação por Al^{3+} , sendo o efeito reversível com o tempo. A aplicação superficial e sem incorporação de calcário os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e, consequentemente, a soma e saturação por bases, da camada de 0-20 cm do solo. A aplicação superficial de gesso incrementou o Ca^{2+} , principalmente na camada de 20-40 cm do solo. Também favoreceu o incremento de Mg^{2+} e K^+ nesta camada.

Palavras-chave: correção da acidez do solo, alumínio tóxico, calcário superficial, mobilidade do gesso.

TEMPORAL VARIATION OF BASIC CATION AND SOIL ACIDITY ATTRIBUTES IN AREAS CULTIVATED WITH COCOA TREE

ABSTRACT

Soil acidity is one of the main constraints to crop productivity in a humid tropical environment. Al^{3+} toxicity associated with low levels of basic cations affects the accumulation of biomass, with a consequent reduction in productivity and the financial viability of agricultural enterprises. Aiming to evaluate the temporal variation of basic cations and soil acidity attributes in the layers 0-20 and 20-40 cm, of soils cultivated with cocoa trees in the process of renewal, 19 experimental areas located in 19 producing farms were evaluated during 87 months of cocoa, from two climatic zones in the state of Bahia, which received doses of limestone and agricultural gypsum on the surface. Soil acidity showed little temporal variation in the studied layers. Soils with lower acidity buffering capacity showed varied acidification rates. Lime applied superficially did not modify the pH in the 0-20 cm layer. Gypsum promoted a reduction of Al^{3+} saturation in the 20-40 cm layer in different magnitudes. The Ca^{2+} and Mg^{2+} contents did not change with the limestone doses applied on the surface. Gypsum applied on the surface favored the increase of Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^{+} in the 20-40 cm layer. The variation in K^{+} levels was associated with potassium fertilization.

Keywords: acidity correction, aluminum, limestone, gypsum.

LISTA DE TABELAS

VARIAÇÃO TEMPORAL DE ATRIBUTOS DA ACIDEZ DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIRO

- Tabela 1 - Valores de pH e de atributos químicos^{1/} iniciais utilizados para o cálculo de calagem e gessagem, de duas camadas de solo, e respectivas doses de calcário e de gesso aplicadas em 19 áreas experimentais (AE), no Estado da Bahia, Brasil.....30
- Tabela 2 - Valores médios de atributos^{1/} indicadores de tamponamento de acidez^{2/} e de intemperismo^{3/} de duas camadas do solo, em 19 áreas experimentais (AE), no Estado da Bahia, Brasil.....31
- Tabela 3 - Análise descritiva e de normalidade dos valores de pH, em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais (AE) do estado da Bahia, Brasil.....32
- Tabela 4 - Equações de regressão do pH em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.....33
- Tabela 5 - Análise descritiva e de normalidade dos teores de Al³⁺, em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.....34
- Tabela 6 - Equações de regressão dos teores de Al³⁺ em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.....35
- Tabela 7 - Análise descritiva e de normalidade da saturação por Al³⁺, em função do tempo, em duas diferentes camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.....36
- Tabela 8 - Equações de regressão saturação por Al³⁺, em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.....37
- Tabela 9 – Estimativa da saturação por Al³⁺ mínima (m%_{min}) alcançada e dos tempos estimados para alcançar saturação por Al³⁺ de 20% (m% calculada – T1), para atingir m%_{min} (T2) e para a saturação por Al³⁺ retornar novamente para de 20% (tempo para reaplicação do gesso – T3), em cinco áreas experimentais (AE) cultivadas com cacauzeiros, na região sudeste do Estado da Bahia.....38

VARIAÇÃO TEMPORAL DE CÁTIOS BÁSICOS DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIRO

Tabela 1 - Valores de pH e de atributos químicos^{1/} iniciais utilizados para o cálculo de calagem e gessagem, de duas camadas de solo, e respectivas doses de calcário e de gesso aplicadas em 19 áreas experimentais (AE), no Estado da Bahia, Brasil.....60

Tabela 2 - Valores médios de atributos^{1/} relacionados aos cátions básicos trocáveis^{2/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais (AE) do estado da Bahia, Brasil.....61

Tabela 3 - Análise descritiva e de normalidade dos teores de Ca^{2+} , em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.....62

Tabela 4 - Análise descritiva e de normalidade dos teores de Mg^{2+} , em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.....63

Tabela 5 - Análise descritiva e de normalidade dos teores de K^{+} , em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.....63

Tabela 6 - Análise descritiva e de normalidade da soma de bases (SB), em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.....64

Tabela 7 - Análise descritiva e de normalidade da saturação bases (V), em função do tempo, em duas diferentes camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais (AE) do estado da Bahia, Brasil.....64

Tabela 8 - Equações de regressão dos teores de Ca^{2+} , em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.....65

Tabela 9 - Equações de regressão dos teores de Mg^{2+} , em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.....66

Tabela 10 - Equações de regressão dos teores de K^+ , em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.....67

Tabela 11 - Equações de regressão da soma de bases em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.....69

Tabela 12 - Equações de regressão da saturação por bases em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.....69

LISTA DE FIGURAS

VARIAÇÃO TEMPORAL DE ATRIBUTOS DA ACIDEZ DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIRO

Figura 1 - Localização e tipologia climática segundo Thornthwaite e Matther das 19 áreas experimentais do Projeto Renova Cacau nas quais foram coletadas amostras de solo para avaliação. Bahia; Santana; Medauar, 2021.....27

Figura 2 - Variação da saturação por Al^{3+} em função do tempo, em cinco áreas experimentais cultivadas com cacauzeiros, no estado da Bahia, Brasil.....38

VARIAÇÃO TEMPORAL DE CÁTIOS BÁSICOS DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIRO

Figura 1 - Localização e tipologia climática segundo Thornthwaite e Matther das 19 áreas experimentais (AE) do Projeto Renova Cacau nas quais foram coletadas amostras de solo para avaliação Bahia; Santana; Medauar, 2021.....57

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT.....	8
1 INTRODUÇÃO GERAL	12
Referências.....	17
2 VARIAÇÃO TEMPORAL DE ATRIBUTOS DA ACIDEZ DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIRO	21
Resumo	21
Abstract.....	22
2.1 Introdução	23
2.2 Material e Métodos.....	25
2.3 Resultados	32
2.4 Discussão	39
2.5 Conclusões	45
Referências.....	46
3 VARIAÇÃO TEMPORAL DE CÁTIOS BÁSICOS DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIRO	51
Resumo	51
Abstract.....	52
3.1 Introdução	53
3.2 Material e Métodos.....	55
3.3 Resultados	62
3.4 Discussão	71
3.5 Conclusões	76
Referências.....	77

1. INTRODUÇÃO GERAL

A cultura do cacauero

O cultivo do cacauero (*Theobroma cacao* L.) é um dos mais importantes negócios agrícolas nos trópicos úmidos. A atividade é fonte de sustento para milhares de agricultores na África, Ásia e nas Américas do Sul e Central. Países como Costa do Marfim e Gana, principais produtores globais, têm sua economia baseada na produção de amêndoas de cacau.

No Brasil, o negócio cacau envolve cerca de 93 mil estabelecimentos rurais situados principalmente no nordeste e norte do país (IBGE, 2017). Apesar de ter figurado entre os três principais produtores da *commodity*, atualmente o país oscila entre a quinta e sexta posições na produção global de amêndoas de cacau. O Estado da Bahia, que já foi responsável pela produção de 400 mil toneladas na década de 1980, atualmente produz um terço deste montante.

Esta severa redução teve como causa um amplo conjunto de fatores. O envelhecimento das lavouras, as perdas por incidência pragas e doenças e a má gestão da fertilidade dos solos cultivados com cacauero destacam-se como os principais. O aumento da frequência e intensidade de secas, carência de assistência técnica, baixos preços e gestão deficiente da propriedade agrícola também contribuíram significativamente para a redução da produção.

A recuperação das lavouras de cacau da Bahia, ainda em curso, requereu desenvolvimento e introdução de novas tecnologias. Cultivares mais produtivos e tolerantes à vassoura de bruxa, mecanização das práticas agrícolas e nutrição baseada em extração/exportação foram os pilares de geração de inovações atualmente disponíveis na cacauicultura do Estado.

Relevância socioeconômica e ambiental da cultura do cacauero.

Originário da América do Sul e mais tarde introduzido pelo homem na América Central, o cacauero ocorre espontaneamente desde a Bolívia até o Sul do México (MOTAMAYOR, 2002). Bebidas à base de cacau eram consumidas no período pré-colombiano, o que comprova seu uso desde 1.100 a. C. (HENDERSON et al., 2007).

Na atualidade, o cacau é uma *commodity* agrícola com produção global de 4,9 milhões toneladas previstas para a safra 2021/2022 (ICCO, 2022). O Brasil, 7º produtor mundial, produziu 345 mil toneladas de amêndoas na safra 2021/2022 (IBGE, 2023). A geração de receita da cacauicultura nacional é de R\$ 1,3 bilhão, quando se considera exclusivamente o produto da venda das amêndoas por parte do produtor (IBGE, 2022).

A Bahia é o maior produtor do país com 144 mil toneladas produzidas na safra 2020 (IBGE, 2022). No Estado, as amêndoas de cacau e seus derivados estiveram no topo da pauta de exportação no final da década de 1950. Já na década de 1970 o cacau representou 70% das exportações da Bahia, com uma geração de receita da ordem de US\$ 1 bilhão (CHIAPETTI, 2018). Atualmente, a atividade gera ocupação para famílias residentes em 69.022 mil estabelecimentos rurais no Estado (IBGE, 2017).

O cultivo de cacau no Estado também proporciona a preservação da paisagem nativa local. As lavouras de cacau baianas foram predominantemente implantadas sob a sombra da mata nativa raleada, constituindo o sistema agroflorestal de cultivo regionalmente denominado de “cabruca”. A cabruca apresenta rica biodiversidade, sendo de grande importância para a conservação de espécies florestais e habitats para a fauna local (SAMBUICHI, 2006).

Acidez do solo: Importância e impactos na produção do cacau.

A elevada acidez do solo afeta 30% dos solos não sujeitos a congelamento no globo. Nas regiões tropicais, a acidez é o fator que mais afeta o crescimento e produção das culturas (GURMESSA, 2020; KRSTIC et al., 2012). Dessa forma, a acidez do solo se constitui na principal restrição à expansão da produção de alimentos, fibras e energia nas regiões tropicais, predominantemente compostas por Latossolos e Argissolos de elevada acidez, altos teores de Al^{3+} e baixa disponibilidade de nutrientes (FAGERIA; BALIGAR, 2008; NOGUEIROL et al., 2015).

Quando em elevados teores na solução do solo, o Al^{3+} provoca toxidez às culturas. Pela sua alta afinidade com as paredes celulares, membranas e metabólitos, o Al^{3+} causa redução da biomassa da parte aérea e do sistema radicular

(NOGUEIROL et al., 2015). O excesso de Al^{3+} causa danos ao ápice das raízes e inibição do crescimento radicular, provoca a redução da absorção de água e nutriente e afeta drasticamente o acúmulo de nutrientes na parte aérea (ALEMU; SELASSIE; YITAFERU, 2022; BORGES et al., 2020; GOULDING, 2016; SOUZA et al., 2016).

A acidez do solo pode ser corrigida com uso rochas calcárias moídas, compostas basicamente de $CaCO_3$ e $MgCO_3$. Cifu et al. (2004), trabalhando com correção da acidez, registraram aumento médio de produção de 367% para cevada, 57,3% para trigo, 44,1% para batata e 32,1% para algodão, para as culturas da cevada, trigo, batata e algodão em respectivo, decorrentes do uso de calcário. Por sua vez, Costa et al., (2016) verificaram que a calagem aumentou as colheitas de aveia preta, sorgo e soja em Latossolos ácidos do estado de São Paulo.

Respostas positivamente à correção da acidez do solo também têm sido verificadas em frutíferas. Para mudas de citros (*Poncirus trifoliata* L.) a calagem aumentou a produção de matéria seca da raiz na camada de 0-15 cm de profundidade (KORZUNE et al., 2021). Para a cultura da goiaba, foram verificados incrementos significativos de produção de frutos (NATALE et al., 2012).

Estas respostas decorrem do aumento de pH e dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nos solos corrigidos (COSTA; CRUSCIOL, 2016; HIRZEL et al., 2021; PAULETTI et al., 2013). Além das positivas modificações nos atributos químicos do solo relacionados à acidez, a calagem também proporciona efeitos benéficos como: aumento da disponibilidade de N, P, S; redução da lixiviação de cátions e diminuição da toxidez por Mn^{2+} (CRUSCIOL et al., 2021; SOUZA JUNIOR et al., 2018).

Por outro lado, o calcário possui baixa mobilidade no perfil do solo, sendo necessária sua incorporação para eficiente correção da acidez (PAULETTI et al., 2014; SANTOS et al., 2018). Em culturas já implantada a prática da incorporação não é possível. Nestes casos a calagem é feita superficialmente e sem incorporação ao solo (CHEPOTE et al., 2012).

Em função da baixa mobilidade, as modificações promovidas pelo calcário são limitadas à camada superficial (CAIRES et al., 2005; GODSEY et al., 2007). Por isso, em casos de aplicação superficial, Souza Júnior, Neves e Sodré (2018) recomendam considerar no cáculo de recomenda o de quantidade de calcário a profundidade de rea o de 5 a 7 cm.

As alterações químicas no solo após a calagem superficial dependem do tempo de reação, da dose e das precipitações, ocorrendo máxima resposta no terceiro ano de aplicação e na camada de 0-10 cm de profundidade (FIDALSKI et al., 2005; LI et al., 2019; RHEINHEIMER et al., 2018a, 2018b).

Gesso como condicionador da acidez do solo em subsuperfície.

A acidez subsuperficial pode restringir o crescimento das raízes, comprometendo a absorção de água e de nutrientes (TIECHER et al., 2017). Nessas condições o gesso agrícola pode ser usado para reduzir a saturação por Al^{3+} e aumentar os teores de SO_4^{2-} e Ca^{2+} , resultando em melhoria da fertilidade do solo em profundidade (COSTA e CRUSCIOL, 2016; BOSSOLANI et al., 2020; SERAFIM et al., 2012; VICENSI et al., 2020).

Os efeitos positivos do gesso podem ser percebidos principalmente em veranicos. A melhoria do ambiente subsuperficial decorrente do efeito do insumo proporciona a expansão do sistema radicular em profundidade e em volume de solo explorado. Como consequência, aumenta sobremaneira a capacidade de absorção de água e nutrientes, fato que permite às culturas maior resistência a períodos de seca.

Também são notados efeitos positivos na produção, como os obtidos por Caires et al. (1999), que verificaram resposta do milho à aplicação de gesso em decorrência do fornecimento de enxofre, da melhoria do teor de Ca^{2+} , da redução da saturação por Al^{3+} e do aumento da relação Ca/Mg do solo.

Contextualização do estudo

O presente trabalho consiste em um subprojeto dentro do escopo do projeto “Métodos de renovação de lavouras decadentes de cacau na Bahia, Brasil”. O Projeto visou testar três métodos de renovação de lavouras velhas de cacau: 1 - enxertia em brotos basais dos cacaueiros velhos; 2 - plantio de mudas enxertadas sob a copa das

plantas velhas de cacau e 3 - corte de todas as plantas velhas de cacau, plantio de bananeira para sombreamento e posterior plantio de mudas de cacau enxertadas.

REFERÊNCIAS

ALEMU, E.; SELASSIE, Y. G.; YITAFERU, B. Effect of lime on selected soil chemical properties, maize (*Zea mays* L.) yield and determination of rate and method of its application in Northwestern Ethiopia. **Heliyon**, v. 8, n. 1, jan. 2022.

BORGES, C.E. et al. Aluminum toxicity reduces the nutritional efficiency of macronutrients and micronutrients in sugarcane seedlings. **Ciência e Agrotecnologia**, V. 44, p. 1-18, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/cagro/v44/1981-1829-cagro-44-e015120.pdf>. Acesso em 22/10/2020.

BOSSOLANI, JW et al. (2020) Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. *Geoderma* 375:114476. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114476>

CAIRES, E. F. Et al. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p.315-327, 1999. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rbcs/v22n1/04.pdf>>. Acesso em: 08 jul. 2021.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, v.68, n.2, p.209-216, March/April 2011.

CHEPOTE, R. E. Et al. Aptidão agrícola e fertilidade de solos para a cultura do cacauzeiro. P 31-66. In. VALLE, R. R. (Ed.). **Ciência, tecnologia e manejo do cacauzeiro**. Ilhéus: CEPLAC, 2012. Cap. 3, p. 67-114.

CHIAPETTI. **Produção de cacau na Bahia: análise da trajetória política e econômica**. In: SOUZA JÚNIOR, J. O. (org.). *Cacau: cultivo, pesquisa e inovação*. Ilhéus: Editus, 2018. P. 333-377. <https://doi.org/10.7476/9786586213188>.

CIFU, M. et al. Long-term effects of lime application on soil acidity and crop yields on a red soil in Central Zhejiang. **Plant and Soil**. 265:101–109, 2004.

COSTA, C. H. M. et al. Efeitos residuais da calagem superficial em solo tropical com plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1633–1642, 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, 1 mar. 2016.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Liming optimizes nitrogen fertilization in a maize-upland rice rotation under no-till conditions. **Agronomy**, v. 11, n. 10, 1 out. 2021.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. **Adv. Agron.**, 99:345-431, 2008.

FIDALSKI, J.; ANTONIO TORMENA, C. Dinâmica da calagem superficial em um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p.235-247.2005.Disponível:< tps://www.scielo.br/j/rbcs/a/hswtJTXPLpJLQLdgJNd5F7J/>.

GODSEY, C. B. et al. Changes in soil pH, organic carbon, and extractable aluminum from crop rotation and tillage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 03, p. 1032-1044, 2007.

GOULDING, K. W. T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil Use and Management**. Blackwell Publishing Ltda 1 set. 2016.

GURMESSA, B. Soil acidity challenges and the significance of liming and organic amendments in tropical agricultural lands with reference to Ethiopia. **Environment, Development and Sustainability**. Springer Science and Business Media B.V.1 Jan. 2020.

HENDERSON, J.S. et al. Chemical and archaeological evidence for the earliest cacao beverages. **Proc Natl Acad Sci U S A**. 2007 Nov 27;104(48):18937-40. doi: 10.1073/pnas.0708815104. **Epub** 2007 Nov 16. PMID: 18024588; PMCID: PMC2141886.

HIRZEL, J. et al. Maize grain production, plant nutrient concentration and soil chemical properties in response to different residues levels from two previous crops. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science**, 70(4), 285–293. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1725619>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção agrícola municipal** – PAM. Disponível em: sidra.ibge.gov.br. 2017

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção agrícola municipal** – PAM. Disponível em: sidra.ibge.gov.br. 2022

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção agrícola municipal** – PAM. Disponível em: sidra.ibge.gov.br. 2023

INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION - ICCO. Disponível em: www.icco.org. 2022

KORZUNE, M. et al. Crescimento e produção de matéria seca de raiz e parte aérea em mudas de *Poncirus trifoliata* (L.) Raf. Sob efeitos da gessagem e calagem. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, p. e44910510298, 13 maio 2021.

KRSTIC, D. et al. Aluminum in Acid Soils: Chemistry, Toxicity and Impact on Maize Plants. Em: **Food Production – Approaches, Challenges and Tasks**. [s.l.] InTech, 2012.

LI, G.D. et al. Long-term surface application of lime ameliorates subsurface soil acidity in the mixed farming zone of south-eastern Australia. **Geoderma** 338, 236–246. 2019.

MOTAMAYOR, J. C. et al. Cacao domestication I: The origin of the cacao cultivated by the Mayas. **Heredity**, v. 89, n. 5, p. 380 -386, nov. 2002.

NATALE, W. et al. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal-SP**. v. 34, n. 4, p. 1294-1306. 2012.

NOGUEIROL, R. C. et al. Tropical soils with high aluminum concentrations cause oxidative stress in two tomato genotypes. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 3, 1 mar. 2015.

PAULETTI, V. et al. 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, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbcs/v38n2/14.pdf>.

RHEINHEIMER, D. S. et al. 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, 1 mar. 2018.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 24:797-805, 2000.

SAMBUICHI, R. H. R. Estrutura e dinâmica do componente arbóreo em área de cabruca na região cacauzeira do sul da Bahia, Brasil. **Acta bot. bras.**, v. 20, n. 4, p. 943 -954, 2006.

SANTOS, D. R. et al. Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 222–231, 1 ago. 2018.

SERAFIM, E. S. et al. Alterações físico-químicas e movimentação de íons em Latossolo gibbsítico sob doses de gesso. **Bragantia**, v. 71, n. 1, p. 75-81, 2012.

SOUZA et al., 2016. Effects of aluminum on the elongation and external morphology of roots tips in two maize genotypes. **Bragantia**, v. 75, n. 1, p. 19-25, 1 jun. 2016.

<http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.142>

SOUZA JÚNIOR, J. O.; SODRÉ, G. A.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo, correção da acidez e recomendação de adubação para o cacauzeiro**. In: SOUZA JÚNIOR, J. O. (org.). *Cacau: cultivo, pesquisa e inovação*. Ilhéus: Editus, 2018. P. 333-377. <https://doi.org/10.7476/9786586213188>

TIECHER, T. et al. Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2018.

VICENSI, M. et al. Gypsum Rates and Splitting Under No-Till: Soil Fertility, Corn Performance, Accumulated Yield and Profits. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 2, p. 690 -702, 1 jun. 2020.

VARIAÇÃO TEMPORAL DE ATRIBUTOS DA ACIDEZ DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIRO

RESUMO

A acidez do solo, associada a altos teores de Al^{3+} e à baixa disponibilidade de nutrientes, é uma das principais restrições à produção agrícola nas regiões tropicais do mundo. Por esse motivo, o alcance de produtividades que se sustentem agrônomicamente e economicamente precisa considerar sua correção. O objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade e as alterações temporais nos atributos químicos relacionados à acidez do solo (pH, teor e saturação por Al^{3+}), em duas profundidades (0-20 cm e 20-40 cm), em 19 áreas experimentais de cacauzeiros, que receberam ou não aplicação superficial e sem incorporação de calcário e de gesso. Os atributos químicos relacionados à acidez foram avaliados numa escala temporal de 0, 40, 52, 72 e 87 meses da aplicação dos insumos. A acidificação ou não do solo em as áreas experimentais (AE) com cacauzeiro, num período de 87 meses, não mostrou relacionamento com indicadores de tamponamento de acidez do solo. A aplicação superficial e sem incorporação de calcário não alterou atributos de acidez na camada de 0-20 cm, indicando que seu efeito deva ter ficado restrito a camadas mais superficiais. O gesso aplicado em superfície reduziu a saturação por Al^{3+} na camada 20-40 cm, sendo este efeito reversível com o tempo.

Palavras-chave: calagem superficial, gessagem, toxidez por alumínio, mobilidade do gesso.

TEMPORAL VARIATION OF SOIL ACIDITY ATTRIBUTES IN AREAS CULTIVATED WITH COCOA TREE

ABSTRACT

Soil acidity, associated with high levels of Al^{3+} and low availability of nutrients, is one of the main constraints to agricultural production in the tropical regions of the world. For this reason, the achievement of yields that are agronomically and economically sustainable needs to consider its correction. The objective of this study was to evaluate the variability and temporal changes in chemical attributes related to soil acidity (pH, Al^{3+} content and saturation), at two depths (0-20 cm and 20-40 cm), in 19 experimental areas of cocoa trees, whether or not they received surface application and without the incorporation of limestone and gypsum. The chemical attributes related to acidity were evaluated on a temporal scale of 0, 40, 52, 72 and 87 months of input application. In more buffered soils, the acidity attributes varied little over time in the two layers. In less buffered soils, acidification rates varied between layers and between soils. The surface application of limestone without soil incorporation did not change acidity attributes in the 0-20 cm layer. In most soils that received gypsum, there was a reduction in Al^{3+} content and saturation in the 20-40 cm layer, with the magnitude and duration of this reaction varying between soils.

Keywords: surface liming, plastering, aluminum toxicity.

2.1 INTRODUÇÃO

Cerca de 15% dos solos atingidos por acidez do planeta situam-se em ambiente tropical úmido, onde se encontra o maior potencial de expansão da produção global de alimentos, fibras e energia (FAGERIA; BALIGAR, 2008; KRSTIC et al., 2012). Somente na América do Sul, 85% dos solos apresentam acidez (COCHRANE, 1985), sendo este o fator que mais restringe a produção agrícola no mundo (CRAVO et al., 2012; NATALE et., 2012; RHEINHEIMER et al., 2018).

Em solos ácidos a CTC é predominantemente ocupada por H^+ e Al^{3+} (FAGERIA; BALIGAR, 2003; OBIRI-NYARCO, 2012), o que reduz a disponibilidade de nutrientes (GOULDING, 2016, GODSEY et al., 2007), o crescimento radicular e a absorção de água e nutrientes pelas culturas (GLOVYN; PAVLIV, 2019; PÁDUA et al., 2007).

No Brasil, os solos em geral necessitam de correção da acidez para utilização na agricultura (MARCOLAN; ANGHINONI, 2006). Em sistemas de sistemas de elevadas produtividades, as modernas lavouras de cacauzeiros que alcançam 5,0 t ha⁻¹ de amêndoas secas por ano (ZUGAIB; LANDIM; SOUZA, 2020), a correção da acidez do solo é consiçãõ essencial. Originário da América do Sul (MOTAMAYOR, 2002), o cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) é, umas das grandes *commodities* agrícolas em termos de valor no planeta (SNOECK et al., 2016).

O Brasil colheu na safra de 2020/2021 cerca de 269 mil toneladas de amêndoas de cacau (IBGE, 2022) e tem oscilado entre a sexta e a sétima posições na lista dos maiores produtores globais (FAOSTAT, 2022; ICCO, 2022). A Bahia é o maior produtor do país, com 144 mil toneladas na safra de 2020 (IBGE, 2022).

A relevância do cacauzeiro no Brasil contrasta com a escassez de pesquisas relacionadas ao comportamento da espécie em relação à acidez do solo. Avaliando os efeitos de doses crescentes de Al^{3+} sobre plântulas de cacauzeiro em solução nutritiva, Santana, Cabala-Rosand e Miranda (1973) observaram que a planta tem seu desenvolvimento sensivelmente afetado pelo excesso de Al^{3+} , mesmo apresentando tolerância à concentrações do elemento inferiores a 16 mg L⁻¹, sendo que valores superiores a este, provocaram a inibição do desenvolvimento do cacauzeiro, fato também observado por Garcia e Leon (1978) e Ezeta e Santana (1979).

Baligar e Fageria (2005) verificaram que o aumento da saturação por Al^{3+} para valores acima de 15% diminuiu o peso seco radicular e o peso seco da parte aérea. Quando em elevada saturação, o Al^{3+} causa danos aos ápices radiculares e, por consequência, afeta drasticamente o acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas (ALEMU; SELASSIE; YITAFERU, 2022; NOGUEIROL et al., 2015; SOUZA et al., 2016). A toxidez por Al^{3+} associada a baixos teores disponíveis de nutrientes no solo afeta a produtividade do cacaueteiro, pelo comprometimento da sua capacidade de absorver água e nutrientes do solo (BALIGAR; FAGERIA, 2005).

Esses efeitos restritivos à produção do cacaueteiro podem ser facilmente neutralizados com aplicação de insumos corretivos de acidez, dentre os quais o calcário é o mais utilizado. A correção da acidez do solo pela calagem promove aumento da produção de biomassa de mudas de cacaueteiro (NAKAYAMA, SANTANA E PINTO, 1988; SANTANA; CABALA-ROSAND; MORAIS, 1971), e eleva a produtividade de amêndoas em condições de campo (SANTANA; CABALLA-ROSAND, 1984).

A calagem promove o aumento do pH, dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , da saturação por bases e reduz a saturação por Al^{3+} (m%) nas camadas superficiais do solo (COSTA; CRUSCIOL, 2016; FAGERIA et al., 2014; HIRZEL et al., 2021; PAULETTI et al., 2013). A calagem também proporciona efeitos benéficos como: aumento da disponibilidade de N, P, S, aumento da CTC e consequente redução da lixiviação de cátions e diminuição da toxidez por Mn, caso esteja em teores elevados no solo (CRUSCIOL et al., 2021).

Por ser um insumo de baixa mobilidade perfil do solo, o calcário modifica os atributos relacionados à acidez até no máximo 10 cm de profundidade (LI et al., 2019; RHEINHEIMER et al., 2018a, 2018b; PAULETTI et al., 2013). Por esse motivo é necessária a incorporação do corretivo, de forma a proporcionar o contato direto entre suas partículas e as partículas do solo. Entretanto, em culturas perenes já implantadas, como é o caso do cacaueteiro, essa prática é inviável, de forma que nesses casos a calagem é feita superficialmente e sem incorporação (CHEPOTE et al., 2012; NATALE et al., 2012). Após a calagem superficial, as alterações químicas nos atributos relacionados à acidez do solo são influenciadas por fatores como dose e granulometria do corretivo, precipitação pluviométrica, capacidade tampão de acidez

do solo e tempo após a aplicação (FIDALSKI et al., 2005; LI et al., 2019; RHEINHEIMER et al., 2018a, 2018b).

Por ser pouco móvel, o calcário não corrige a acidez em camadas mais profundas do solo. Nestas circunstâncias, a melhoria do ambiente subsuperficial pode ser feita com o gesso agrícola, que é um insumo móvel no solo e diminui a toxidez por Al^{3+} , além de fornecer Ca e S em profundidade (SANTOS et al., 2010; SERAFIM et al., 2012; TIECHER et al., 2017), sendo seus efeitos bastante evidentes em períodos de veranicos, pois proporciona o crescimento radicular, com conseqüente aumento da absorção de água e nutrientes, especialmente Ca^{2+} , em profundidade (BOSSOLANI et al., 2020; CAIRES, 2010; JORIS; CHURCA, 2010; PAULETTI et al., 2014).

Após solubilização no solo, o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) forma o par iônico CaSO_4^0 , que é fácil de ser lixiviado e, por reações de equilíbrio, retorna a dissociar-se em Ca^{2+} e SO_4^{2-} , sendo que o primeiro reduz matematicamente a saturação por Al^{3+} (m%), enquanto o segundo forma espécies menos tóxicas de Al^{3+} , como o AlSO_4^+ , o que reduz a atividade e a toxidez por Al^{3+} (PAULLETTI, 2013).

Para a cultura do cacau, a compreensão acerca do uso do gesso ainda se constitui em uma lacuna. Diante da escassez de pesquisas, é possível mencionar o pioneiro trabalho realizado com gesso por Nakayama (1988b), que constatou a melhoria no desenvolvimento e na distribuição do sistema radicular de mudas de cacau, como efeito do uso do insumo.

Este trabalho teve como objetivo avaliar as alterações temporais nos atributos químicos relacionados à acidez do solo (pH, teor e saturação por Al^{3+}), em duas camadas (0-20 cm e 20-40 cm), de 19 áreas experimentais (AE) de cacau em processo de renovação, que receberam ou não aplicação superficial e sem incorporação de calcário e de gesso, na região sudeste do Estado da Bahia, Brasil.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa consiste em um subprojeto dentro do Projeto “Métodos de renovação de lavouras decadentes de cacau na Bahia, Brasil”, localmente denominado Renova Cacau. O Projeto Renova Cacau se encontra em execução

desde 2014 e teve por principal objetivo testar métodos de renovação de lavouras de cacauzeiros degradadas agrônomicamente e economicamente. Com o intuito de alcançar o objetivo supracitado, foram estabelecidas áreas experimentais (AE) com 300 cacauzeiros cada, em fazendas produtoras de cacau, situadas em municípios da região Sudeste do Estado da Bahia, Brasil. O delineamento foi em esquema fatorial 3 x 5, com três métodos de renovação e cinco cultivares clonais de cacau, com duas repetições por AE.

Foram coletadas amostras de solo em 19 AE situadas em 19 fazendas produtoras de cacau de 15 municípios localizados em duas zonas climáticas, úmida e úmida a subúmida (SEI-BA, 2022), da região sudeste da Bahia (Figura 01). O marco zero da escala temporal de coleta de amostras de solo, denominado neste estudo de tempo zero (T0), correspondeu ao mês de aplicação dos insumos (calcário e gesso), seguindo-se coletas posteriores aos 40, 52, 72 e 87 meses de aplicação dos mesmos, os quais foram denominados, respectivamente, T40, T52, T72 e T87. Em todos os tempos foram coletadas 20 amostras simples por amostra composta, porém em T0 coletou-se apenas uma amostra composta por AE (para caracterização da área e recomendação dos insumos), nas camadas 0-20 e 20-40 cm. Para os demais tempos, foram coletadas amostras em três camadas (0-10, 10-20 e 20-40 cm), sendo os valores da camada 0-20 obtidos pela média das camadas 0-10 e 10-20 cm. Em T40 foi coletada uma amostra composta por repetição, ou seja, duas amostras compostas por AE. Nos demais anos foi coletada uma amostra composta por repetição e por método de renovação, ou seja, seis amostras compostas por AE. Todas as amostras simples foram coletadas com uso de sonda feita em aço inoxidável, acondicionadas em baldes plásticos limpos e colocadas para secar à sombra quando necessário. Em seguida uniformizadas e, desse volume, foi tomada uma amostra composta constituída por massa aproximada de 300 gramas. As amostras compostas foram acondicionadas em sacos plásticos e identificadas de acordo com as camadas e as AE.

Nas amostras compostas foram analisados os seguintes atributos químicos: pH em H₂O; Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ extraídos por KCl 1,0 mol L⁻¹; acidez potencial (H+Al) extraída por Ca(CH₃COO)₂ 0,5 mol L⁻¹; matéria orgânica (MO) determinada pelo método de Walkley-Black e P remanescente (P-rem) obtido pela agitação de 60 mg L⁻¹ de P, em uma solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (TEIXEIRA et al., 2017). Foram

calculados os valores de: soma de bases ($SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+$), CTC do solo ($t = SB + Al^{3+}$), CTC a pH 7,0 ($T = SB + H+Al$), saturação por Al^{3+} (m%) e saturação por bases (V%). Também foram realizadas análises granulométricas para determinação dos teores de areia, silte e argila dos solos estudados, conforme Teixeira et al. (2017). Os resultados das análises químicas iniciais utilizados para os cálculos das doses de calcário e de gesso, bem como estas doses, encontram-se na Tabela 1. Na Tabela 2 são apresentados atributos químicos, médios dos cinco tempos analisados, indicadores de tamponamento de acidez e do grau de intemperização dos solos analisados.

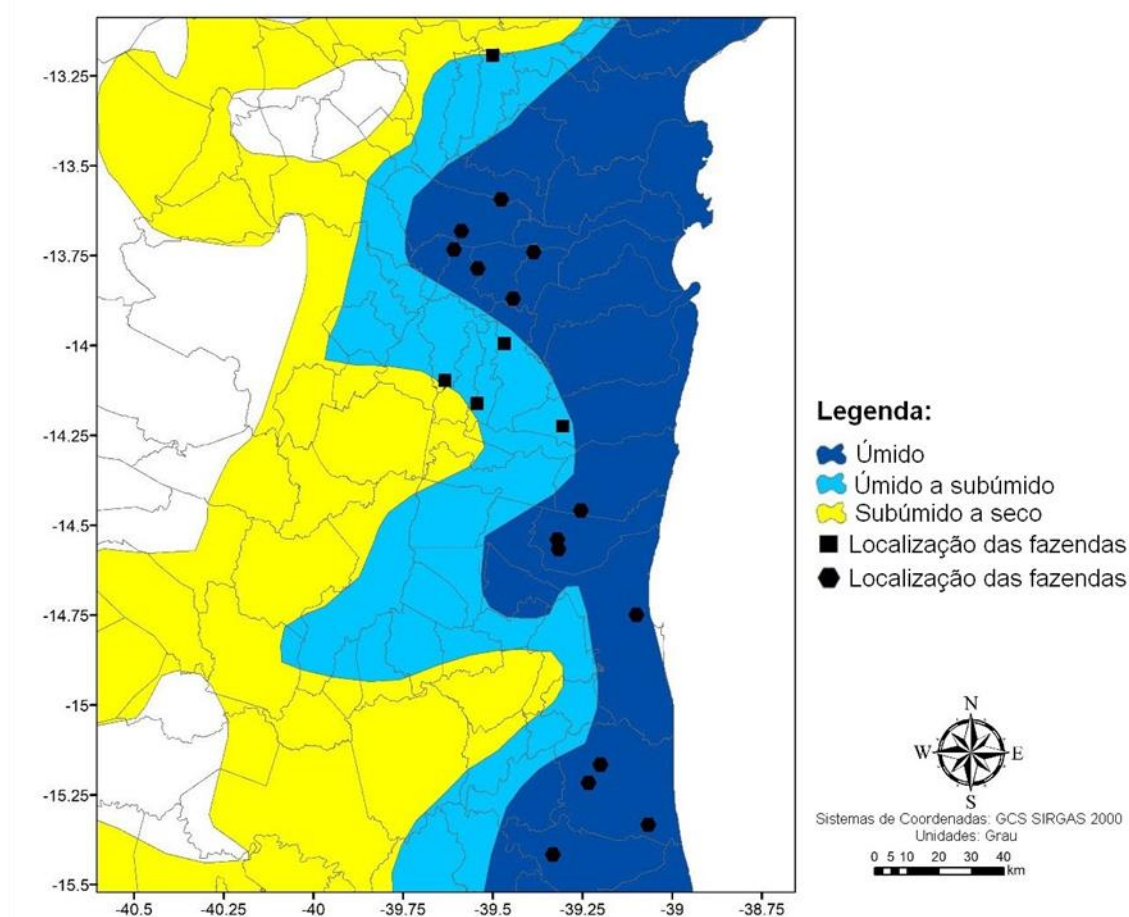


Figura 1. Localização e tipologia climática segundo Thornthwaite e Mather das 19 áreas experimentais do Projeto Renova Cacao nas quais foram coletadas amostras de solo para avaliação. Bahia; Santana; Medauar, 2021.

As doses de calcário foram calculadas pelo método de saturação por bases (Equação 1), visando elevar o valor V% para 75% nas áreas experimentais que apresentavam saturação por bases inferior a 65% na camada de 0-20 cm, considerando-se a profundidade de reação de 5 cm e o PRNT do calcário de 90%.

$$QC = \frac{(V_2 - V_1) \times T}{10 \times PRNT} \times \frac{p}{20} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

QC = quantidade de calcário, em toneladas por hectare (t ha⁻¹);

V₂ = saturação por bases desejada, em % (adotou-se 75%);

V₁ = saturação por bases do solo, em %;

T = CTC a pH 7,0, em mmol_c dm⁻³;

PRNT = Poder Relativo de Neutralização Total do corretivo, em % (adotou-se 90%);

p = profundidade de reação do calcário, em cm (adotou-se 5 cm).

As doses de gesso foram calculadas de acordo com equação estequiométrica proposta por Souza Júnior, Neves e Sodré (2018), baseadas na saturação por Al³⁺ tolerável – m_t (Equação 2) visando reduzir o valor m para 20%, nas áreas que apresentavam saturação por alumínio (m%) maior que 20%, considerando a camada de reação de 20 a 50 cm (30 cm de espessura) e o gesso com 16% de Ca.

$$QG = \left[Al^{3+} - \left(\frac{m_t \times t}{100} \right) \right] \times \frac{0,2 \times EC}{\%Ca_{ges}} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

QG = quantidade de gesso, em toneladas por hectare (t ha⁻¹);

Al³⁺ = teor de Al³⁺ na camada de interesse, em mmol_c dm⁻³;

m_t = saturação por Al³⁺ tolerável pelo cacauzeiro, em % (adotou-se 20%);

t = CTC efetiva na camada de interesse, em mmol_c dm⁻³;

EC = espessura da camada, em cm (adotou-se 30 cm);

%Ca_{ges} = porcentagem de Ca no gesso, em % (adotou-se 16%).

As doses de calcário e o gesso (Tabela 1), foram convertidas em gramas por planta e aplicadas manualmente a lanço, cobrindo toda a superfície dos solos. O calcário e o gesso não foram incorporados ao solo, porém a manta orgânica foi revolvida com auxílio de soprador de folhas, visando acelerar o contato dos insumos com a superfície dos solos.

Os atributos químicos estudados (pH, teor e saturação por Al^{3+}) foram submetidos à análise descritiva (média, mediana, mínimo, máximo e coeficiente de variação – CV), teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) e análise de variância (ANAVA) conjunta com todas as 19 AE, sendo estas consideradas blocos. Os valores de CV foram categorizados conforme WARRICK e NIELSEN (1980) em baixo ($CV < 12\%$), médio ($12 \leq CV \leq 60\%$) e alto ($CV > 60\%$). Para cada atributo estudado, visando verificar a homogeneidade de variâncias do erro experimental, fez-se também a ANAVA para cada AE, posteriormente procedendo-se a divisão do maior pelo menor quadrado médio do resíduo, sendo os valores desta divisão muito superiores a sete, o que evidenciou falta de homogeneidade de variância. Conseqüentemente cada AE foi considerada como um experimento. Por fim, realizou-se análise de regressão dos atributos estudados em função do tempo (0, 40, 52, 72 e 87 meses), com coeficientes lineares e quadráticos testados pelo quadrado médio do erro da ANAVA de cada AE até 10%, pelo teste F. O software utilizado foi R (R Core Team 2022).

Tabela 1 – Valores de pH e de atributos químicos^{1/} iniciais utilizados para o cálculo de calagem e gessagem, de duas camadas de solo, e respectivas doses de calcário e de gesso aplicadas em 19 áreas experimentais (AE), no Estado da Bahia, Brasil.

AE	Fazenda	Município	Zona climática	----- Camada 0-20 cm -----			--- Camada 20-40 cm ---			---- Insumo ----	
				pH	T mmol _c dm ⁻³	V %	pH	Al ³⁺ mmol _c dm ⁻³	t	Calcário ----- t ha ⁻¹ -----	Gesso
1	Alto da Prata	Teolândia	úmida	5,56	101,7	44,9	4,59	6,8	16,6	0,80	1,31
2	Muriá	Piraí do Norte	úmida	6,51	104,1	87,5	6,50	0,0	78,5	---	---
3	Saramandaia	W. Guimarães	úmida	5,61	91,8	47,7	4,67	10,7	17,6	0,70	2,69
4	São João	Piraí do Norte	úmida	5,81	91,0	50,5	4,91	8,8	17,9	0,62	1,96
5	Bom Prazer	Itamarí	úmida	5,88	49,4	73,6	4,78	5,9	19,8	---	0,73
6	Paó	Gandu	úmida	6,01	80,2	70,0	5,51	4,9	37,8	---	---
7	N.S. Vitória	Uruçuca	úmida	5,27	114,2	42,2	4,68	4,9	20,7	1,04	0,29
8	Cariri	Una	úmida	5,84	73,0	52,0	4,90	4,0	12,0	0,46	0,60
9	Ravenala	Ilhéus	úmida	5,31	79,4	30,0	5,15	3,9	18,4	0,98	---
10	São Roque	Uruçuca	úmida	5,83	123,0	59,3	5,14	5,0	28,2	0,54	---
11	Itaperuna	Uruçuca	úmida	6,08	99,8	59,9	5,42	2,0	27,7	0,42	---
12	Mangueira	Una	úmida	4,95	90,2	33,4	4,75	10,7	21,7	1,04	2,39
13	São Rafael	Una	úmida	5,52	86,3	50,1	5,22	0,0	16,6	0,54	---
14	Lajedo de Ouro	Ibirataia	úmida	6,50	60,3	81,7	4,76	0,0	19,4	---	---
15	Gamaliel	Ubatã	us ^{2/}	5,69	102,3	56,0	4,99	4,9	26,8	0,54	---
16	Duas Barras	Mutuípe	us	7,34	73,1	86,3	6,63	0,0	37,5	---	---
17	Ponta Alegre	Ibirapitanga	us	5,35	115,4	41,0	4,17	6,8	19,9	1,09	1,06
18	Suíça	Coaraci	us	5,63	92,3	61,0	5,11	4,0	24,3	0,36	---
19	Boa Vista	Maraú	us	5,55	110,8	49,4	4,90	1,0	24,7	0,78	---

1/ pH em H₂O; T (CTC a pH 7,0); V (saturação por bases); Al³⁺ (alumínio trocável); e t (CTC efetiva). 2/ úmida a subúmida.

Tabela 2 – Valores médios^{1/} de atributos indicadores de tamponamento de acidez^{2/} e de intemperismo^{3/} de duas camadas do solo, em 19 áreas experimentais (AE), no Estado da Bahia, Brasil.

AE	----- Camada 0-20 cm -----					----- Camada 20-40 cm -----				
	T mmol _c dm ⁻³	P-rem mg L ⁻¹	MO g kg ⁻¹	Arg. %	S/A	T mmol _c dm ⁻³	P-rem mg L ⁻¹	MO g kg ⁻¹	Arg. %	S/A
1	89,9	32,2	30,5	44	0,05	54,0	19,1	17,1	56	0,03
2	126,4	35,9	24,8	31	0,68	105,9	24,6	12,6	43	0,41
3	105,9	32,2	41,6	53	0,10	60,2	19,8	21,0	61	0,07
4	109,5	33,3	40,3	42	0,16	70,6	21,8	24,5	49	0,13
5	80,2	45,7	25,0	35	0,13	51,2	36,9	20,9	43	0,09
6	82,4	45,6	14,5	17	0,89	63,1	40,7	8,6	19	0,82
7	110,6	30,7	36,5	51	0,09	74,4	19,8	24,8	60	0,08
8	92,6	29,1	35,6	53	0,19	52,9	18,5	21,6	62	0,15
9	86,0	31,4	26,9	29	0,22	53,7	19,0	16,1	41	0,21
10	112,0	27,0	37,3	55	0,14	76,7	15,0	26,3	63	0,11
11	114,2	34,1	37,1	44	0,19	67,0	19,4	21,2	53	0,14
12	94,1	36,2	29,3	37	0,24	61,5	24,3	16,5	43	0,21
13	102,5	24,4	41,2	69	0,12	63,1	16,2	24,7	63	0,12
14	71,4	53,3	15,7	15	0,39	42,7	46,5	7,2	20	0,28
15	107,3	27,6	40,1	67	0,03	67,4	21,1	25,5	73	0,02
16	87,1	46,5	28,4	57	0,04	63,7	39,2	18,9	66	0,02
17	119,4	33,2	45,8	71	0,08	82,4	24,3	28,2	75	0,07
18	106,6	27,2	34,6	51	0,23	70,7	14,1	19,4	65	0,16
19	80,5	40,6	24,3	25	0,30	47,0	30,0	13,2	36	0,21

1/ Valores médios dos cinco tempos de amostragem (0,40,52,72,87 meses). 2/ (CTC pH 7,0); P-rem (P remanescente), MO (matéria orgânica), Arg (argila).
3/ S/A (relação silte:argila).

2.3 RESULTADOS

pH

Na camada 0-20 cm, em todos os tempos avaliados, os CV para o pH foram baixos, indicando pequena variabilidade deste atributo entre as áreas experimentais (AE) (Tabela 3). A amplitude das médias foi de 5,08 - 5,80, enquanto a amplitude da medianas situou-se de 4,99 - 5,69. Excetuando-se em T0 e T40, houve predomínio de distribuição não normal dos valores de pH.

Para a camada de 20-40 cm, os CV indicaram baixa variação dos valores de pH ao longo do período avaliado. As médias tiveram amplitude de 4,66 - 5,10, com valores bem distintos das medianas. O teste de Shapiro-Wilk apontou a não normalidade da distribuição dos valores de pH para os cinco tempos estudados.

Tabela 3 – Análise descritiva e de normalidade dos valores de pH, em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.

Camada Cm	Tempo Meses	pH				CV %	p-value
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana		
0-20	0	4,95	7,34	5,80	5,69	9,3	ns
	40	4,17	6,24	5,14	5,15	10,0	ns
	52	4,53	6,52	5,43	5,34	9,0	*
	72	4,24	6,76	5,08	4,99	10,5	*
	87	4,08	7,32	5,14	5,02	12,1	*
20-40	0	4,17	6,63	5,10	4,99	11,8	*
	40	3,99	6,57	4,79	4,76	11,7	*
	52	4,20	6,62	4,95	4,70	12,1	*
	72	3,99	6,75	4,66	4,59	9,9	*
	87	4,07	7,22	4,79	4,63	11,8	*

* e ns – não normalidade e normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), respectivamente.

Não foi observado aumento dos valores de pH do solo da camada 0-20 cm em nenhuma das 14 AE que receberam calcário (Tabelas 1 e 4). Das 19 AE estudadas, não foram verificadas alterações no pH em 11 AE, dentre as quais sete receberam calcário com doses variando de 0,36 a 1,09 t ha⁻¹ (Tabela 1). Por outro lado, o pH dessa camada diminuiu com o tempo em oito AE (Tabela 4), mesmo para as sete que

receberam calcário em superfície com doses variando entre 0,54 e 1,04 t ha⁻¹ (Tabela 1).

Tabela 4 – Equações de regressão do pH em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.

AE	Camada			
	0-20 cm		20-40 cm	
	Equação	R ²	Equação	R ²
1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,38$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,83$	-
2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6,11$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,92$	-
3	$\hat{Y} = 5,69 - 0,013^{***}t$	0,80	$\hat{Y} = 4,70 - 0,004^*t$	0,46
4	$\hat{Y} = 5,76 - 0,009^{**}t$	0,83	$\hat{Y} = 4,98 - 0,005^*t$	0,69
5	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,54$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,01$	-
6	$\hat{Y} = 6,05 - 0,013^{**}t$	0,74	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,16$	-
7	$\hat{Y} = 5,45 - 0,013^{**}t$	0,74	$\hat{Y} = 4,78 - 0,007^{**}t$	0,80
8	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,44$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,72$	-
9	$\hat{Y} = 5,38 - 0,008^{**}t$	0,97	$\hat{Y} = 5,03 - 0,006^{**}t$	0,93
10	$\hat{Y} = 5,22 - 0,008^*t$	0,48	$\hat{Y} = 4,69 - 0,004^*t$	0,42
11	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,35$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,86$	-
12	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,89$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,40$	-
13	$\hat{Y} = 5,56 - 0,007^{**}t$	0,99	$\hat{Y} = 5,18 - 0,006^{**}t$	0,92
14	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6,23$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,72$	-
15	$\hat{Y} = 5,77 - 0,010^{**}t$	0,62	$\hat{Y} = 5,05 - 0,008^{**}t$	0,79
16	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6,09$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,46$	-
17	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,91$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,34$	-
18	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,16$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,75$	-
19	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,33$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,75$	-

1/ Tempo, em meses. *** 0,01 ** 0,05 * 0,1, significativos a 1,0, 5,0 e 10 %, pelo teste F, respectivamente.

O comportamento da variação ou não do pH do solo para a camada 20-40 cm foi semelhante ao observado para a camada de 0-20 cm para 18 das 19 AE estudadas; a única exceção foi observada para a AE 6, a qual apresentou decréscimo dos valores de pH com o tempo apenas na camada superior (Tabela 4), justamente esta AE tem a maior relação silte:argila, indicativo de solo menos intemperizados, e baixos teores de MO e argila, indicativos de solo menos tamponado quanto à acidez (Tabela 2).

Teores de Al³⁺

Para a camada 0-20 cm, a variação do Al³⁺ foi classificada como alta, de acordo com Warrick e Nielsen (1980), tendo em vista os CV superiores a 100% em todos os tempos de avaliação (Tabela 5). As relevantes diferenças entre médias e medianas

indicam que as médias não representam o valor central na distribuição dos dados. Para a camada 20-40 cm, as médias dos teores Al^{3+} foram superiores à camada superficial e variaram entre de 4,4 - 7,4 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Al^{3+} ; estas médias foram mais semelhantes às medianas e os CV, apesar de ainda altos, foram inferiores aos observados na camada superficial (Tabela 5).

Tabela 5 – Análise descritiva e de normalidade dos teores de Al^{3+} , em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.

Camada cm	Tempo meses	----- Al^{3+} ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) -----				CV %	p-value
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana		
0-20	0	0,0	4,9	0,6	0,0	224,8	*
	40	0,0	9,9	1,8	0,9	127,3	*
	52	0,0	6,2	0,9	0,0	147,0	*
	72	0,0	10,3	2,5	1,5	103,1	*
	87	0,0	14,9	3,1	1,7	110,5	*
20-40	0	0,0	10,7	4,4	4,9	76,8	ns
	40	0,0	15,3	5,2	4,5	79,6	*
	52	0,0	17,1	4,0	3,4	98,5	*
	72	0,0	20,5	6,3	5,9	77,5	*
	87	0,0	17,0	7,4	6,7	71,0	*

* e ns – não normalidade e normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), respectivamente.

Na camada 0-20 cm não houve efeito de redução dos teores de Al^{3+} decorrente da aplicação de calcário em todas as AE que receberam este insumo (Tabela 6). Para esta camada, os teores de Al^{3+} ao longo do tempo não variaram em nove AE, das quais cinco receberam doses de calcário que variaram de 0,36 a 1,04 t ha^{-1} (Tabela 1). Estas nove AE cujos teores de Al^{3+} não variaram (Tabela 6) coincidem com aquelas que os valores de pH também não variaram (Tabela 4).

Foram observadas aumento nos teores de Al^{3+} em função do tempo em 10 AE, sendo que destas, um total de nove AE recebeu doses de calcário em superfície entre 0,54 e 1,09 t ha^{-1} (Tabela 1).

Tabela 6 – Equações de regressão dos teores de Al^{3+} em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.

AE	Camada			
	0-20 cm		20-40 cm	
	Equação	R ²	Equação	R ²
1	$\hat{Y} = -0,6 + 0,030^{\circ}t$	0,82	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6,1$	-
2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,0$	-
3	$\hat{Y} = -0,2 + 0,076^{**}t$	0,57	$\hat{Y} = 10,4 - 0,176t^{**} + 0,002^{**}t^2$	0,94
4	$\hat{Y} = -0,4 + 0,019^{**}t$	0,81	$\hat{Y} = 8,6 - 0,256^{**}t + 0,003^{**}t^2$	0,99
5	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,2$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2,0$	-
6	$\hat{Y} = -0,8 + 0,049^{\circ}t$	0,51	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6,7$	-
7	$\hat{Y} = -3,9 + 0,141^{**}t$	0,65	$\hat{Y} = 5,0 - 0,124^{\circ}t + 0,003^{**}t^2$	0,67
8	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,5$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,2$	-
9	$\hat{Y} = 1,8 + 0,040^{\circ}t$	0,57	$\hat{Y} = \bar{Y} = 7,7$	-
10	$\hat{Y} = -0,2 + 0,075^{\circ}t$	0,36	$\hat{Y} = 5,7 + 0,098^{**}t$	0,66
11	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,5$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 3,8$	-
12	$\hat{Y} = \bar{Y} = 3,7$	-	$\hat{Y} = 9,0 + 0,057^{\circ}t$	0,72
13	$\hat{Y} = -0,3 + 0,021^{\circ}t$	0,68	$\hat{Y} = 0,04 + 0,038^{\circ}t$	0,67
14	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,1$	-
15	$\hat{Y} = -1,4 + 0,054^{**}t$	0,70	$\hat{Y} = -0,2 + 0,112^{**}t$	0,46
16	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,03$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,8$	-
17	$\hat{Y} = 0,2 + 0,029^{\circ}t$	0,56	$\hat{Y} = \bar{Y} = 7,1$	-
18	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,9$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 3,6$	-
19	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,7$	-	$\hat{Y} = 1,0 + 0,048^{\circ}t$	0,99

1/ Teor de Al^{3+} em $mmol_c dm^{-3}$; tempo em meses.

*** 0,01 ** 0,05 ° 0,1, significativos a 1,0, 5,0 e 10 %, pelo teste F, respectivamente.

Houve redução dos teores de Al^{3+} decorrente da aplicação de gesso agrícola na camada 20-40 cm de profundidade em três das 10 AE que receberam este insumo (Tabela 6), com equações quadráticas significativas, evidenciando que o teor de Al^{3+} atingiu um mínimo e depois aumentou, sendo que todas se localizaram na zona climática úmida. Os tempos de máximo efeito do gesso na redução dos teores Al^{3+} na camada 20-40 cm, para as AE 3, 4 e 7 foram aos 38, 52, 25 meses, respectivamente. As amplitudes máximas das reduções foram: de 10,7 para 7,0 $mmol_c dm^{-3}$ na AE 3; de 8,8 para 2,1 $mmol_c dm^{-3}$ na AE 4 e de 4,9 para 3,5 $mmol_c dm^{-3}$ na AE 7.

Não houve alteração nos teores de Al^{3+} em 11 AE, das quais cinco receberam doses de gesso variando entre 0,60 e 1,96 $t ha^{-1}$ (Tabela 1). Por fim, mesmo tendo recebido 2,39 $t ha^{-1}$, não foi verificado efeito do insumo na AE 12, mas aumento temporal dos teores de Al^{3+} . Quanto às AE que não receberam gesso em superfície, não foram observadas variações no teor de Al^{3+} na camada 20-40 cm (Tabelas 1 e 6).

Saturação por Al³⁺ (m%)

Na camada 0-20 cm houve grande variação da saturação por Al³⁺ (m%) entre as AE avaliadas (Tabela 7). Os CV tiveram amplitude de 66 a 364%, demonstrando a heterogeneidade dos solos estudados para este atributo. As diferenças entre média e mediana são indicativos de não normalidade dos dados, confirmados pelo teste Shapiro-Wilk ($p < 0,05$). Para a camada de 20-40 cm, a variação da m% foi alta entre os solos (Tabela 7), com CV variando de 66,8 a 105,9%, sendo classificados como altos, conforme Warrick e Nielsen (1980).

Tabela 7 – Análise descritiva e de normalidade da saturação por Al³⁺, em função do tempo, em duas diferentes camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.

Camada Cm	Tempo meses	----- saturação por Al ³⁺ (%) -----				CV %	p-value
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana		
0-20	0	0,0	14,0	1,7	0,0	233,1	*
	40	0,0	23,1	4,1	1,9	140,2	*
	52	0,0	23,9	1,9	0,0	181,6	*
	72	0,0	36,2	6,2	3,6	116,0	*
	87	0,0	47,1	8,4	3,7	125,4	*
20-40	0	0,0	60,1	22,1	18,3	84,9	ns
	40	0,0	55,1	21,9	18,6	66,8	*
	52	0,0	64,0	14,2	11,2	105,9	*
	72	0,0	63,2	26,1	25,6	74,3	*
	87	0,0	78,0	35,6	38,5	69,7	*

* e ns – não normalidade e normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), respectivamente.

Na camada 0-20 cm não houve variação de m% em função do tempo em 11 AE, mesmo comportamento observado para o teor de Al³⁺ nas respectivas nove AE mais as AE 9 e 13 (Tabelas 6 e 8). Dessas 11 AE, sete receberam doses de calcário entre 0,46 e 1,04 t ha⁻¹ (Tabela 1). Incremento de m% em função do tempo na camada de 0-20 cm foi observado em oito AE (Tabela 8), das quais apenas a AE 6 não recebeu calcário em superfície. As demais receberam calcário variando de 0,54 a 1,09 t ha⁻¹.

Para a camada 20-40 cm, dez das 19 AE estudadas apresentaram variação para m% em função do tempo (Tabela 8). Destas, cinco AE apresentaram variação positiva (todas não receberam gesso) e em cinco AE a m% apresentou

comportamento quadrático, decrescendo com o tempo até atingir um mínimo e voltando a subir, sendo que todas estas AE receberam gesso (Tabela 9 e Figura 2). A m% mínima (m%_{min}) média alcançada foi de 15,5%, a qual ocorreu em média aos 41 meses após a aplicação do gesso (Tabela 9).

Tabela 8 – Equações de regressão saturação por Al³⁺ em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.

AE	Camada			
	----- 0-20 cm -----		----- 20-40 cm -----	
	Equação	R ²	Equação	R ²
1	$\hat{Y} = - 2,2 + 0,088^{\circ}t$	0,81	$\hat{Y} = 41,0 - 1,102t + 0,013^{\circ}t^2$	0,98
2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,0$	-
3	$\hat{Y} = - 3,5 + 0,229^{**}t$	0,54	$\hat{Y} = 62,1 - 1,667^{**}t + 0,019^{**}t^2$	0,98
4	$\hat{Y} = - 1,1 + 0,042^{**}t$	0,77	$\hat{Y} = 49,0 - 1,635^{**}t + 0,016^{**}t^2$	0,99
5	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,6$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 9,5$	-
6	$\hat{Y} = - 2,4 + 0,119^{\circ}t$	0,52	$\hat{Y} = \bar{Y} = 14,7$	-
7	$\hat{Y} = - 15,6 + 0,470^{**}t$	0,61	$\hat{Y} = 23,9 - 1,001^{**}t + 0,018^{**}t^2$	1,00
8	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1,4$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 25,3$	-
9	$\hat{Y} = \bar{Y} = 14,9$	-	$\hat{Y} = 25,4 + 0,289^{\circ}t$	0,73
10	$\hat{Y} = - 2,0 + 0,195^{\circ}t$	0,35	$\hat{Y} = 11,2 + 0,480^{**}t$	0,58
11	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,8$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 13,9$	-
12	$\hat{Y} = \bar{Y} = 8,3$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 50,0$	-
13	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2,7$	-	$\hat{Y} = 0,3 + 0,232^{\circ}t$	0,55
14	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,4$	-
15	$\hat{Y} = - 3,5 + 0,126^{**}t$	0,64	$\hat{Y} = - 11,4 + 0,666^{**}t$	0,49
16	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,1$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2,4$	-
17	$\hat{Y} = - 0,7 + 0,071^{\circ}t$	0,62	$\hat{Y} = 38,4 - 1,042^{\circ}t + 0,013^{\circ}t^2$	0,55
18	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1,6$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 11,2$	-
19	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1,8$	-	$\hat{Y} = - 0,4 + 0,375^{**}t$	0,96

1/ Saturação por Al³⁺ (m%) em mmolc dm⁻³; tempo em meses.

*** 0,01 °* 0,05 °° 0,1, significativos a 1,0, 5,0 e 10 %, pelo teste F, respectivamente.

Tabela 9 – Estimativa da saturação por Al^{3+} mínima ($m\%_{\text{min}}$) alcançada e dos tempos estimados para alcançar saturação por Al^{3+} de 20% ($m\%$ calculada – T1), para atingir $m\%_{\text{min}}$ (T2) e para a saturação por Al^{3+} retornar novamente para de 20% (tempo para reaplicação do gesso – T3), em cinco áreas experimentais (AE) cultivadas com cacauzeiros, no estado da Bahia, Brasil.

AE	$m\%_{\text{min}}$ (%)	-----Tempos (meses) -----		
		T1	T2	T3
1	17,6	29	42	56
3	25,5	nd ^{1/}	43	nd ^{1/}
4	7,5	23	52	78
7	10,0	05	28	51
17	17,0	26	40	54
Média	15,5	21	41	60

1/ Não determinado.

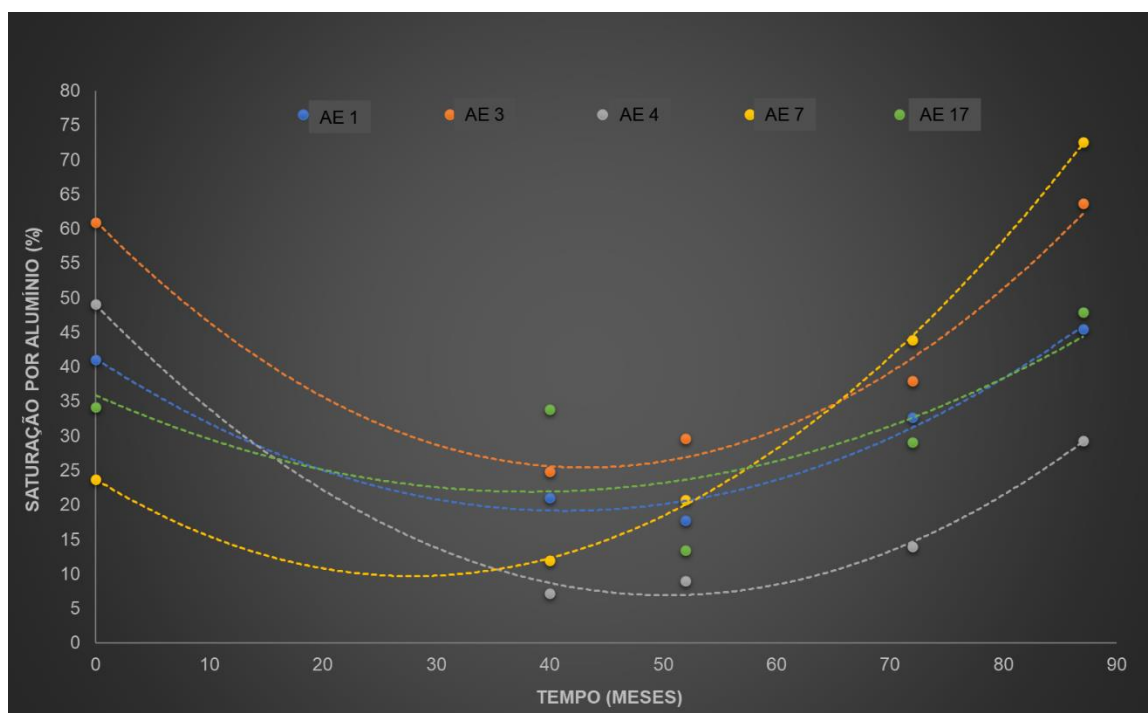


Figura 02 – Variação da saturação por Al^{3+} em função do tempo, em 05 AE cultivadas com cacauzeiros, no estado da Bahia, Brasil.

2.4 DISCUSSÃO

Análise descritiva para pH, teor e saturação por Al³⁺

A baixa variabilidade apresentada pelo pH em ambas as camadas de solo e em todos os tempos avaliados (Tabela 3) é esperado visto se tratar de uma variável logaritimizada. Além disso, o pH também foi mais estável ao longo do tempo, quando comparado ao teor e saturação por Al³⁺, comportamento também observado por Souza Júnior et al. (1999). O CV médio (10,8%) encontrado ficou dentro da faixa de variação encontrada por Bahia et al. (2021), que estudando 20 solos situados nas mesmas zonas climáticas deste estudo, observou CV de 7,8 a 10,3%. É possível que a diversidade dos solos avaliados neste estudo tenha contribuído para esta diferença. A amplitude da variação das médias de pH dos solos avaliados, de 4,66 – 5,80, situou-se na faixa classificada como baixa, segundo Souza Júnior, Neves e Sodré (2018), para a cultura do cacauzeiro, fato que caracteriza a correção da acidez do solo como prática indispensável para o estabelecimento e manutenção de lavouras de cacauzeiros no Sudeste da Bahia.

Por sua vez, a grande variabilidade do teor Al³⁺ e da saturação por Al³⁺ (m%) verificada entre as AE (Tabelas 5 e 7) são indicativos da diversidade de solos quanto à toxidez deste elemento para o cacauzeiro. A ocorrência de valores de m% acima de 15% são indicativos de risco de toxidez por Al³⁺ para a cultura, segundo Baligar e Fageria (2005), que mencionaram esse valor como sendo o máximo tolerado pelo cacauzeiro, de forma a não causar prejuízos ao crescimento da parte aérea da planta.

A ampla variabilidade dos atributos químicos relacionados à acidez do solo observados neste estudo, também pode ter sido influenciada pelas duas zonas climáticas onde as AE estavam situadas: úmida e úmida a subúmida. Trabalhando com a cultura do cacauzeiro desta mesma região e nas mesmas zonas climáticas, Arévalo-Hernandez et al. (2017) observaram diferenças entre atributos físicos dos solos localizados nas duas zonas climáticas, fato que evidencia a influência do clima como fator de formação de solo, contribuindo para a formação de diferentes solos.

Variação do pH

A não observância de aumento dos valores de pH na camada 0-20 cm para as AE que receberam calcário (Tabela 4), sugere que o efeito corretivo do insumo deva ter ficado restrito às camadas mais superficiais, que não foram avaliadas. Isto está de acordo com resultados observados na literatura, os quais demonstram que os efeitos corretivos do calcário se restringem a camadas mais superficiais, especialmente em 0-5 e 5-10 cm de profundidade (ALLEONI et al., 2005; CAIRES et al., 2004; FREIRIA et al., 2008; MORÃES et al., 2007; ZAIDONÁ et al., 2015). Especificamente para a cultura do cacauzeiro é possível mencionar o trabalho realizado por Nakayama (1988), que observou efeitos da aplicação superficial de calcário até a camada 0-10 cm. Os efeitos restritos do calcário ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) na superfície está relacionada à sua baixa mobilidade no perfil do solo, causada pela perda do íon acompanhante (CO_3^{2-}) durante as reações de dissolução do insumo e posterior redução da acidez ativa e neutralização do Al^{3+} (SORATTO; CRUSCIOL, 2008). Além disso, cátions de caráter ácido, como H^+ e Al^{3+} , em superfície consomem os produtos da dissolução do calcário, contribuindo para o efeito superficial do insumo (CAIRES et al., 2000; RHEINHEIMER et al., 2009; RHEINHEIMER et al., 2018). Esses resultados enfatizam a importância da correção da profundidade de reação na recomendação das doses de calcário a serem aplicadas em lavouras de cacauzeiros, visando evitar possíveis efeitos relacionados à calagem excessiva em superfície. A esse respeito, Souza Júnior, Neves e Sodré (2018) sugerem uma profundidade de reação de entre 5 a 7 cm, associada ao revolvimento da manta orgânica (serapilheira) presente em áreas cultivadas com cacauzeiros, com intuito de acelerar o processo de dissolu o e rea o do corretivo.

Em situa es mais específicas, como o caso das lavouras cultivadas em sistema de plantio direto (SPD), no qual também não há revolvimento do solo, foram registrados efeitos decorrentes da aplica o superficial de calcário até profundidades variando de 20 a 40 cm (CAIRES et al., 2001; MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2002; OLIVEIRA; PAVAN, 1998; RHEINHEIMER et al., 2009). Os autores atribuíram esses resultados às especificidades do SPD, como a presença de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, oriundos da mineraliza o das plantas de cobertura, que poderiam formar complexos organometálicos com íons básicos provenientes da

dissolução do calcário, permitindo assim o deslocamento em subsuperfície. Também mencionaram a possibilidade do deslocamento físico de partículas de calcário por canalículos formados por raízes de culturas anteriores.

Ainda para a camada 0-20 cm, considerando o período de avaliação de 78 meses, em 11 AE os valores de pH se mantiveram constantes e em oito AE houve redução nos valores de pH com o tempo (Tabela 4), mesmo sete destas recebendo calcário com doses variando entre 0,54 e 1,04 t ha⁻¹ (Tabela 1). Os indicadores de tamponamento de acidez do solo (T, Prem, MO e argila – Tabela 1) não auxiliam no entendimento deste comportamento distinto entre os solos, pois nas 11 AE em que o pH da camada de 0-20 cm não variou com o tempo, os valores médios de T, Prem, MO e argila foram de 96,6 mmol_c dm⁻³, 37,6 mg L⁻¹, 30,1 g kg⁻¹ e 42,1 %, respectivamente, indicando menor tamponamento de acidez que os solos das oito AE cujos valores de pH reduziram com o tempo, cujas médias destes quatro atributos do solo foram de 102,0 mmol_c dm⁻³, 31,5 mg L⁻¹, 34,8 g kg⁻¹ e 47,9 % (Tabela 1). Nestas oito AE que apresentaram redução nos valores de pH em função do tempo, os coeficientes lineares dos modelos variaram de 0,007 a 0,013 por mês (Tabela 4), valores que indicam taxa de redução de 0,084 a 0,156 unidade de pH por ano, o que evidencia distintas magnitudes de intensidades de acidificação entre os solos. Estes coeficientes permitem também estimar uma taxa de redução média de 0,122 unidade de pH por ano, o que equivale que há um decréscimo de 0,50 unidade de pH num período médio de 4,1 anos.

Talvez, o clima possa auxiliar nesse entendimento, pois sete das oito AE cujos valores de pH reduziram com o tempo estão localizadas em região climática mais chuvosa (Tabelas 1 e 4 e Figura 1), o que favorece a lixiviação de cátions básicos e aumento da acidez. Além do clima, a redução dos valores de pH em função do tempo nas sete AE que receberam calcário, pode ter sido causada pela interação entre fatores como: pequena dose de calcário aplicada (média de 0,71 t ha⁻¹), mineralização da matéria orgânica, lixiviação de bases e o acúmulo de H⁺ e Al³⁺ no perfil do solo e a absorção de cátions de caráter básico associados à exsudação de H⁺ pelas raízes das plantas (GOULDING, 2016; NATALE et al., 2012).

Para a camada de 20-40 cm (Tabela 4) houve redução dos valores de pH em função tempo em sete AE. Para as outras 12 AE não foram verificadas alterações de pH ao longo do tempo de avaliação. Como esperado, esses resultados não sofreram

influência das doses de calcário aplicadas em superfície, sendo por sua vez, reflexo da variação temporal do pH para esta camada. Igualmente ao observado para a camada de 0-20 cm, os atributos químicos indicadores de tamponamento de acidez do solo não auxiliam no entendimento do porquê em alguns solos há redução de pH e em outros não. A magnitude da intensidade de acidificação observada na camada de 20-40 cm foi menor que na camada superficial, o que pode ser constatado pelos coeficientes angulares dos modelos de regressão (Tabela 4), sendo a taxa de média acidificação para a camada 20-40 cm de decréscimo de 0,069 unidade de pH por ano.

Variação do Al^{3+}

Na camada 0-20 cm não houve variação nos teores de Al^{3+} para nove das 19 AE avaliadas. Quando comparadas as análises do pH e Al^{3+} observa-se que, excetuando as AE 1 e 17, as AE cujos teores de Al^{3+} não variaram (Tabela 6) foram as mesmas cujos valores de pH também não variaram em função do tempo (Tabela 4), evidenciando a relação entre esses dois atributos. A solubilidade do Al^{3+} e, conseqüentemente, a sua toxidez tem o pH como principal fator de controle, sendo que a disponibilidade mínima de Al^{3+} ocorre em valores de pH acima 5,5 (FERREIRA; MOREIRA; RASSINI, 2006; SOUSA et al., 2007; RUIZ et al., 2019). Li e Jonhson (2016) observaram o aumento do Al^{3+} com a profundidade do solo e valores de pH inferiores a 4,5, ao passo que Dong et al. (2008) verificaram o aumento acentuado dos teores de Al^{3+} no solo e absorvidos pelas plantas de chá, quando o pH ficou abaixo de 5,0. Dessa forma, as AE que não apresentaram variação para Al^{3+} , apesar de terem recebido calcário, podem ter sido influenciadas pela não alteração do pH na camada de 0-20 cm.

Ainda na camada 0-20 cm, 10 AE apresentaram variação temporal nos teores de Al^{3+} , das quais nove receberam doses de calcário entre 0,54 e 1,04 t ha⁻¹ (Tabela 6), com os modelos indicando aumento nos teores do elemento em função do tempo. Também nesse caso, à exceção AE 1 e 17, todas as demais demonstraram variação para o pH, fato que ratifica a influência do pH sobre a solubilidade do Al^{3+} neste estudo. Os coeficientes angulares dos modelos de regressão linear correspondem a taxa de

incremento dos teores de Al^{3+} , os quais variaram de 0,019 a 0,141 $mmol_c dm^{-3}$ de Al^{3+} por mês ou 0,23 a 1,69 $mmol_c dm^{-3}$ de Al^{3+} por ano (Tabela 6).

Para a camada de 20-40 cm não houve variação nos teores de Al^{3+} para 11 AE, dais quais em quatro foram aplicadas doses de gesso entre 0,60 e 1,31 $t ha^{-1}$ (Tabela 6), com comportamento semelhança ao observado na camada 0-20 cm.

Para as AE que apresentaram variação de Al^{3+} na camada 20-40 cm (Tabela 6), o comportamento dos modelos lineares indica o aumento dos teores de Al^{3+} em função do tempo em áreas que não receberam gesso agrícola em superfície. Das oito AE que receberam gesso, houve redução dos teores de Al^{3+} na camada de 20-40 cm em apenas três delas, sendo que os modelos quadráticos evidenciaram reduções máximas nos teores de Al^{3+} de: 10,7 para 7,0 $mmol_c dm^{-3}$ na AE 3; 8,8 para 2,1 $mmol_c dm^{-3}$ na área 4 e 4,9 para 3,5 $mmol_c dm^{-3}$ na AE 7, com posterior aumento dos teores em função do tempo. Este resultado está em consonância com as observações feitas por Rocha et al. (2017), ao constatar que a aplicação de gesso aumenta os teores de Ca^{2+} , sem reduzir sensivelmente os teores de Al^{3+} em subsuperfície. Caires et al. (2014) também verificaram que aplicação de gesso não influenciou o Al^{3+} em um solo com elevados teores do elemento. Para Silva et al. (1967), citado por Chepote et al. (2013), o teor máximo aceitável de Al^{3+} para o cacauzeiro seria de 5,0 $mmol_c dm^{-3}$, valor próximo aos verificados neste trabalho.

Variação da saturação por Al^{3+} (m%)

Para a camada 0-20 cm, em 10 das 11 AE em que a m% não variou com o tempo, as médias de 0 a 8,3% (Tabela 8) foram inferiores ao valor de 10%, sugerido por Souza Júnior, Neves e Sodré (2018) como m% baixa para o cacauzeiro. Apenas na AE 9 o valor médio de m% foi mais elevado, de 14,9%, mas mesmo assim inferior ao valor de 15%, sugerido por Baligar e Fageria (2005) como a máxima m% tolerada pela cultura. Em sete dessas AE sem variação de m% houve aplicação de calcário que variaram 0,36 a 1,04 $t ha^{-1}$ (Tabelas 1 e 8). Ainda na camada 0-20 cm, foram observadas aumento na m% em com o tempo para oito das 19 AE avaliadas (Tabela 8), mesmo sete destas terem recebido doses de calcário variando entre 0,54 e 1,09 $t ha^{-1}$ (Tabela 1). Dessa forma, este aumento da m% com o tempo pode ser resultado

de processos naturais de acidificação de solo como: mineralização da matéria orgânica, absorção pelas raízes e a lixiviação de bases, e acúmulo de H^+ e Al^{3+} no perfil do solo (FAGERIA et al., 2014; GOULDING, 2016). É possível também que doses pequenas de calcário contribuam para a não observância de efeito corretivo de acidez, conforme observado por Parecido et al. (2021), além de que a baixa mobilidade do calcário restringe seus efeitos a camadas mais superficiais, que a de 0-20 cm (ALLEONI et al., 2005; CAIRES et al., 2004; FREIRIA et al., 2008; MORÃES et al., 2007; ZAIDONÁ et al., 2015). Os coeficientes angulares dos modelos de regressão linear permitem estimar incremento de m% variando de 0,5 a 5,6% ao ano.

Para a camada 20-40 cm foi observado efeito do gesso agrícola nos valores de m% em cinco AE (Tabela 8). A partir dos modelos quadráticos, estimou a m% mínima ($m\%_{min}$) alcançada em cada AE, em função do tempo e do efeito do gesso, a qual variou de 7,5% a 25,5%, sendo a média das cinco AE de 15,5% (Tabela 9), valor que é próximo à m% desejada de 20%, adotada como tolerável (m_t) pelo cacauzeiro e utilizada no cálculo para definir as doses de gesso aplicadas (Equação 1 – proposta por Souza Júnior, Neves e Sodr e, 2018), as quais variaram nessas cinco AE de 0,29 a 2,69 t ha⁻¹ (Tabela 1).

Estimou-se tamb em os tempos: T1 – para alcançar a m% desejada, ou seja, de 20% (Equa o 1); T2 – para atingir a $m\%_{min}$ e T3 – para que m% retornar novamente para de 20%, ou seja, tempo necessário para reaplica o do gesso, cujos valores médios foram, respectivamente, de 21, 41 e 60 meses (Tabela 9). Os máximos efeitos do gesso em reduzir m% (T2) variaram de 28 a 52 meses após a sua aplica o, faixa que   superior ao tempo máximo avaliado por Dala Nora e Amado (2013), de 22 meses, e compreende o tempo máximo estudado por Caires et al. (2000), de 43 meses; ressalta-se que em ambas as pesquisas os autores verificaram efeitos do gesso em melhorar quimicamente camadas subsuperficiais do solo, com redu o de Al^{3+} e m%, porém os tempos avaliados em ambas pesquisas foram inferiores ao deste estudo. O tempo necessário para sua reaplica o (T3) variou de 51 a 78 meses (Tabela 9 e Figura 2), faixa de tempo que abrange o efeito residual da gessagem de 60 meses, registrado por Costa e Crusciol (2015) e o tempo máximo de efeito da gessagem de 72 meses, encontrado por Pauletti et al. (2014).

Ainda para a camada 20-40 cm, em cinco AE que não receberam gesso houve aumento temporal de m% (Tabelas 1 e 8), sendo que os modelos de regressão linear permitem calcular a taxa anual de incremento de m%, a qual variou de 2,8 a 8,0%.

2.5 CONCLUSÕES

A acidificação ou não do solo em as áreas experimentais (AE) com cacauero, num período de 87 meses, foi muito variável e não mostrou relacionamento com indicadores de tamponamento de acidez do solo.

A aplicação de calcário na superfície e sem incorporação ao solo não alterou atributos de acidez na camada de 0-20 cm, indicando que seu efeito deva ter ficado restrito a camadas mais superficiais.

A aplicação de gesso em superfície e sem incorporação ao solo reduziu, em algumas AE, o teor e, principalmente, a saturação por Al^{3+} na camada 20-40 cm, sendo este efeito reversível com o tempo.

REFERÊNCIAS

ALEMU, E.; SELASSIE, Y. G.; YITAFERU, B. Effect of lime on selected soil chemical properties, maize (*Zea mays* L.) yield and determination of rate and method of its application in Northwestern Ethiopia. **Heliyon**, v. 8, n. 1, jan. 2022.

ARÉVALO-GARDINI, E.; CANTO, M.; ALEGRE, J.; et al. Changes in soil physical and chemical properties in long term improved natural and traditional agroforestry management systems of cacao genotypes in Peruvian Amazon. **PLOS ONE**, v. 10, n. 7, 2015. Public Library of Science.

BAHIA, B. L.; SANTANA, T. M.; MEDAUAR, C. C.; et al. Partition, correlation, and natural bioconcentration of iron, manganese, and zinc in cacao trees. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 18, p. 2663 -2676, 2021. Taylor and Francis Ltd.

BALIGAR, V C; FAGERIA, N. K. **Aluminum influence on growth and uptake of micronutrients by cacao Linking Soil Quality and Cocoa Quality in Bahia, Brazil View project Aluminum influence on growth and uptake of micronutrients by cacao.** 2005.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Soil aluminum effects on growth and nutrition of cacao. *Soil Science and Plant Nutrition*. **Anais**, v. 51, p.709 -713, 2005.

BOSSOLANI, JW et al. (2020) Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. **Geoderma**,375:114476. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114476>

CAIRES, E.F.; BANZATTO D.A.; FONSECA, A.F. Calagem na superfície em sistema plantio direto.**Rev.Bras. Ciência Solo**, 24:161-169, 2000.

CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C.;BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, 60:213-223, 2001.

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 125-136, 2004.

COCHRANE A. T. T. Advances in understanding and managing acid soils in tropical south america. La Paz, 1989.

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, 1 mar. 2016.

CHEPOTE, R. E. Et al. Aptidão agrícola e fertilidade de solos para a cultura do cacauero. P 31-66. In. VALLE, R. R. (Ed.). **Ciência, tecnologia e manejo do cacauero**. Ilhéus: CEPLAC, 2012. Cap. 3, p. 67-114.

CRUSCIOL, C. A. C.; MOMESSO, L.; DE CAMPOS, M. Liming optimizes nitrogen fertilization in a maize-upland rice rotation under no-till conditions. **Agronomy**, v. 11, n. 10, 2021. MDPI

EZETA, F.N.; SANTANA, M.B.M. Efeito do alumínio sobre absorção e concentração de nutrientes em plântulas de cacauero. **Revista Theobroma**, Ilhéus, v.9, n.4, p.173-184,1979.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. **Adv. Agron.**, 99:345-431, 2008.

FAGERIA, N. K. et al. Influence of Lime and Gypsum on Yield and Yield Components of Soybean and Changes in Soil Chemical Properties. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 45, n. 3, p. 271 -283, 2014.

GOULDING, K. W. T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil Use and Management**. Blackwell Publishing Ltda 1 set. 2016.

FREIRIA, A. C. *et al.* Alterações em atributos químicos do solo pela aplicação de calcário na superfície ou incorporado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, p. 285-291, 2008.

GARCIA, O; LEON, S.A. Respuesta de cinco híbridos de cacao a toxicidad causada por aluminio en solución nutritiva y en un oxisol de los Llanos Orientales. *Horticultural abstracts*, 50(3): 187, 1980

GLOVYN, N. M.; PAVLIV, O. V. Investigation of Causes and Influences of Soil Acidity on Crop Yields in Kozova District, Ternopil Region. **Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies**, v. 21, n. 91, p. 16 -20, 2019. Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv.

HIRZEL, J. et al. Maize grain production, plant nutrient concentration and soil chemical properties in response to different residues levels from two previous crops. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science**, 70(4), 285–293. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1725619>

GODSEY, C.B. et al. Changes in soil pH, organic carbon, and extractable aluminum from crop rotation and tillage. **Soil Science Society of America Journal**, v.71, n.5, p.1038-1044, 2007. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2006.0170>

GOULDING, K. W. T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil Use and Management**, 1. set. 2016. Blackwell Publishing Ltd.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção agrícola municipal – PAM**. Disponível em: sidra.ibge.gov.br. 2022

KRSTIC, D. et al. Aluminum in Acid Soils: Chemistry, Toxicity and Impact on Maize Plants. Em: **Food Production – Approaches, Challenges and Tasks**. [s.l.] InTech, 2012.

LI, G.D. et al. Long-term surface application of lime ameliorates subsurface soil acidity in the mixed farming zone of south-eastern Australia. **Geoderma** 338, 236–246. 2019.

LI, W.; JONHSON C. E. Relationships among pH, aluminum solubility and aluminum complexation with organic matter in acid forest soils of the Northeastern United States. June, 234-242. 2016.

MARCOLAN, L.A.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:163-170, 2006.

MIYAZAWA, M.; PAVAN M.A.; FRANCHINI J.C. 2002. Brazilian Archives of Biology and Technology. V. 45, N 3, 251-256. 2002.

MOTAMAYOR, J. C. et al. Cacao domestication I: The origin of the cacao cultivated by the Mayas. **Heredity**, v. 89, n. 5, p. 380 -386, nov. 2002.

NAKAYAMA, L. H. I. Efeito da calagem no pH e nos teores de cálcio, magnésio e alumínio em solo ácido cultivado com cacau. **Revista Theobroma**, v. 1, n. 1. p. 243-247, 1971.

NAKAYAMA, L. H. I.; SANTANA, C. J. L.; PINTO, L. R. M. Resposta do cacauzeiro em desenvolvimento à calagem. **Revista Theobroma**, v. 18, n. 4. p. 229 -241, 1988.

NATALE, W. et al. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal-SP**. v. 34, n. 4, p. 1294-1306. 2012.

NOGUEIROL, R. C.; MONTEIRO, F. A.; GRATÃO, P. L.; BORGIO, L.; AZEVEDO, R. A. Tropical soils with high aluminum concentrations cause oxidative stress in two tomato genotypes. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 3, 2015. Kluwer Academic Publishers.

NORA, D. D.; AMADO, T. J. C. Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 5, p. 1393 -1403, 2013.

OBIRI-NYARCO, B. D. et al. Financial analysis of shaded cocoa in Ghana. **Agroforestry Systems**, v. 71, n. 2, p. 139 -149, 2007.

PARECIDO, R. J.; SORATTO, R. P.; PERDONÁ, M. J.; et al. Limestone increased coffee yield and profitability more than phosphogypsum or their combination. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 4, p. 3586 -3599, 2021.

PAULETTI, V. et al. 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, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbcs/v38n2/14.pdf>.

SANTANA, M. B.M.; CABALA ROSAND, P.; MIRANDA, E.R.; Toxidez do alumínio em plântulas de cacau. **Revista Theobroma**, v. 1, N 04. p. 11–21, 1973.

SANTANA, M. B.M.; CABALA ROSAND, P.; MORAIS, F.I. Efeito da incorporação de doses crescentes de calcário em alguns solos da região cacaeira da Bahia. **Revista Theobroma**, N 02. p. 17–28, 1971.

SOUZA JÚNIOR, J.O., MELLO, J., ALVAREZ, V., NEVES, J. 1999. Produtividade do cacaeiro em função de características do solo. I. Características químicas. R. Bras. Ci. Solo. 23, 863-872.

SOUZA JÚNIOR, J. O.; SODRÉ, G. A.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo, correção da acidez e recomendação de adubação para o cacaeiro**. In: SOUZA JÚNIOR, J. O. (org.). Cacao: cultivo, pesquisa e inovação. Ilhéus: Editus, 2018. p. 333-377. <https://doi.org/10.7476/9786586213188>

RHEINHEIMER, D. S. et al. 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, 1 mar. 2018.

SNOECK, D.; KOKO, L.; JOFFRE, J.; BASTIDE, P.; JAGORET, P. Cacao Nutrition and Fertilization. . p.155 -202, 2016.

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

TIECHER, T. et al. Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 42, 2018.

VARIAÇÃO TEMPORAL DE CÁTIONS BÁSICOS DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CACAUEIROS

RESUMO

A baixa saturação por bases tem sido mencionada como uma das principais causas de estresse abiótico em lavouras e, ao mesmo tempo, como um relevante fator de ganho de produção, quando corrigida para teores adequados. Com o propósito de avaliar a variação temporal dos cátions básicos dos solos em áreas cultivadas com cacauzeiros em processo de renovação no Estado da Bahia, Brasil, foram acompanhadas 19 áreas experimentais (AE) que receberam diferentes doses de calcário, gesso agrícola e adubação N P K de formação e de produção. Os insumos foram aplicados na superfície e sem incorporação ao solo, com escala temporal de avaliação aos 0, 40, 52, 72 e 87 meses, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm. Na maioria das AE avaliadas, o calcário não alterou os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e, conseqüentemente, a soma e saturação por bases na camada 0-20 cm. O gesso contribuiu para o incremento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} em ambas as camadas de solo avaliadas, como também para o incremento de Mg^{2+} e K^+ na camada 20-40 cm. Os teores de K^+ tiveram variação associada às adubações potássicas.

Palavras-chave: mobilidade de gesso, bases do solo, calagem superficial calcário em incorporação.

TEMPORAL VARIATION OF BASIC CATIONS IN THE SOIL IN AREAS CULTIVATED WITH COCOA TREE

ABSTRACT

Low base saturation has been mentioned as one of the main causes of abiotic stress in crops and, at the same time, as a relevant factor in production gain, when corrected for adequate levels. With the purpose of evaluating the temporal variation of the basic cations of the soils in areas cultivated with cocoa trees under renovation process in Bahia State, Brazil, 19 experimental areas (AE) that received different doses of limestone, agricultural gypsum and N P K fertilization of formation and production were followed. The inputs were applied on the surface and without incorporation into the soil, with a time scale of evaluation at 0, 40, 52, 72 and 87 months, at depths of 0-20 and 20-40 cm. In most of the AEs evaluated, limestone did not alter the Ca^{2+} and Mg^{2+} contents and, consequently, the sum and base saturation in the 0-20 cm layer. Gypsum contributed to the increase of Ca^{2+} and Mg^{2+} contents in both evaluated soil layers. The K^{+} contents had a variation associated with potassium fertilization.

Keywords: gypsum, soil bases, surface limestone.

3.1 INTRODUÇÃO

Originário da América do Sul e mais tarde introduzido na América Central (MOTAMAYOR, 2002) e África, o cacaueteiro (*Theobroma cacao* L.) tem uso conhecido desde 1100 a.C. (HENDERSON et al., 2007). Atualmente, o cultivo da espécie é um negócio tão relevante nas regiões tropicais, que se tornou uma das grandes commodities agrícola em termos de valor no planeta (SNOECK *et al.*, 2016). A atividade é a base da economia de países como Costa do Marfim e Gana, principais produtores mundiais (ICCO, 2022).

Globalmente, um dos grandes desafios do cultivo do cacaueteiro é a acidez do solo e suas limitações impostas à produção da planta, uma vez que seu cultivo é feito predominantemente em Latossolos e Argissolos de elevada acidez, altos teores de Al^{3+} e baixa disponibilidade de nutrientes (FAGERIA; BALIGAR, 2008; NOGUEIROL et al., 2015). Somente na América do Sul, cerca de 85% dos solos são ácidos (COCHRANE, 1989) e, frequentemente, afetados por elevados teores de Al^{3+} associados a baixos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Associada à acidez, a baixa saturação por bases no solo é uma das principais causas de estresse abiótico (ANDRADE et al., 2020), afetando a acumulação de nutrientes na parte aérea das culturas (FAGERIA, 2001), ao passo que se constitui em um fator de incremento de produção quando corrigida para atender às demandas das culturas (NATALE et al., 2012).

Quando cultivado em solos ácidos, o cacaueteiro sofre redução na absorção, translocação, acúmulo de nutrientes e rendimento das colheitas (ROSAS-PATIÑO; PUENTES-PÁRAMO; MENJIVAR-FLORES, 2021), uma vez que há correlação positiva entre a fertilidade do solo e a produtividade da planta (SANTOS et al., 2017).

Os efeitos restritivos da acidez do solo sobre a produção podem ser corrigidos pela aplicação de insumos corretivos, dentre os quais o calcário é o mais acessível logística e financeiramente (WENNECK et al., 2021), sendo composto basicamente de $CaCO_3$ e $MgCO_3$ (FAGERIA et al., 2014; LI et al., 2019). A calagem proporciona condições favoráveis ao desenvolvimento do sistema radicular, melhorando a absorção de água e de nutrientes pelas plantas, resultando em ganhos de produtividade (ZAIDONÁ et al., 2015). A prática promove a elevação do pH, a redução do teor e da saturação por Al^{3+} , e elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e,

consequentemente, da saturação por bases (COSTA; CRUSCIOL, 2016; FAGERIA et al., 2014; HIRZEL et al., 2021; PAULETTI et al., 2013), além de possuir efeitos benéficos como aumento da CTC, da disponibilidade de N, P, S e diminuição da toxidez por Mn^{2+} (CRUSCIOL et al., 2021; SOUZA JUNIOR; SODRÉ; NEVES, 2018).

A correção da acidez do solo, por meio da calagem, é condição indispensável para o alcance de produtividades de cacau que se sustentem agrônomicamente e economicamente e, negligenciá-la pode comprometer de forma irremediável os resultados pretendidos no negócio cacau. O cacauzeiro é exigente em termos nutricionais, quando comparado a outros cultivos tropicais permanentes, como café e seringueira (FAGERIA; BALIGAR, 2005). No entanto, devido à baixa mobilidade no perfil do solo, os produtos da dissolução do calcário provocam alterações químicas em camadas superficiais do solo, geralmente a até 10 cm de profundidade (ALEONI et al., 2005; CAIRES et al., 2004; SANTOS et al., 2018; NAKAYAMA, 1988; PAULETTI et al., 2013; FREIRIA et al., 2008; SORATTO; CRUSCIOL, 2008), podendo ocasionar aumento de bases, a partir de quatro a cinco anos, na camada de 10-20 cm (CAIRES; BANZATTO; FONSECA, 2000); por isso mesmo, o calcário necessita ser incorporado ao solo.

Entretanto, em lavouras perenes já implantadas como cacauzeiro, o calcário não pode ser incorporado ao solo (CHEPOTE et al., 2012; NATALE et al., 2012; SOUZA JUNIOR; SODRÉ; NEVES, 2018). Depois de aplicado ao solo, fatores como tempo, precipitações pluviométricas, magnitude das doses e granulometria do insumo também influenciam nos efeitos corretivos do calcário (FIDALSKI et al., 2005).

Tendo em vista a baixa mobilidade do calcário no perfil do solo, o gesso agrícola é uma boa alternativa para redução da atividade do Al^{3+} em subsuperfície. O mineral natural gesso ou gipsita foi formado em depósitos sedimentares; enquanto o gesso agrícola é um subproduto industrial oriundo da produção de ácido fosfórico, a partir da reação de apatitas com o ácido sulfúrico (OLIVEIRA et al., 2012), sendo fonte de Ca e S, o gesso agrícola é um sal de reação neutra, que apresenta boa mobilidade no perfil do solo, contribuindo para melhoria do ambiente radicular, sem, entretanto, ter efeito corretivo de acidez do solo (CHEPOTE et al., 2012; SOUZA JUNIOR; SODRÉ; NEVES, 2018). A melhoria do ambiente químico radicular subsuperficial promovida pelo gesso agrícola permite às plantas explorarem maior volume de solo, com melhor distribuição de raízes e em maior profundidade, o que propicia maior aproveitamento

da lâmina de água em camadas subsuperficiais (SERAFIM et al., 2011; SOUSA; LOBATO; REIN, 2005).

Os resultados positivos do gesso no aumento dos teores de Ca^{2+} , SO_4^{2-} e também de Mg^{2+} e na redução da toxidez por Al^{3+} em profundidade, com conseqüente elevação da produtividade efetiva do solo, aprofundamento do sistema radicular das culturas e na amenização dos efeitos negativos de déficits hídricos têm sido relatados para várias culturas, especialmente aquelas cultivadas em solos muito intemperizados, os quais são abundantes em regiões tropicais úmidas (ARFI et al., 2014; CAIRES et al., 2014; PAULETTI et al., 2013; ROCHA et al., 2017; ZAIDONÁ et al., 2015). Por outro lado, mesmo que em número reduzido, há trabalhos que não observaram respostas das culturas à aplicação do gesso (FOIS et al., 2018; NEIS et al., 2010), ao passo que outros chamam a atenção para a perda por lixiviação de cátions básicos, especialmente Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , provocada pelo gesso (CAIRES et al., 2011; MICHALOVICZ et al., 2014; RAMOS et al., 2013).

Objetivou-se neste trabalho avaliar as alterações temporais nos atributos químicos relacionados aos cátions básicos trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e soma e saturação por bases), em duas profundidades (0-20 cm e 20-40 cm), em 19 áreas experimentais (AE) de cacauzeiros em processo de renovação, que receberam ou não aplicação superficial e sem incorporação de calcário e de gesso, na região Sudeste do estado da Bahia, Brasil.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa consiste em um subprojeto dentro do Projeto “Métodos de renovação de lavouras decadentes de cacau na Bahia, Brasil”, localmente denominado Renova Cacau. O Projeto Renova Cacau se encontra em execução desde 2014 e tem por principal objetivo testar métodos de renovação de lavouras de cacauzeiros degradadas agrônomicamente e economicamente, com o uso de novas tecnologias e cultivares clonais altamente produtivas e que apresentam tolerância à algumas das principais doenças que acometem o cacauzeiro. Com o intuito de alcançar o objetivo supracitado, foram estabelecidas áreas experimentais (AE) com 300 cacauzeiros cada, em fazendas produtoras de cacau, situadas em municípios da região Sudeste do Estado da Bahia, Brasil. O delineamento foi em esquema fatorial 3 x 5,

com três métodos de renovação e cinco cultivares clonais de cacau, com duas repetições por AE.

Foram coletadas amostras de solo em 19 AE situadas em 19 fazendas produtoras de cacau de 15 municípios localizados em duas zonas climáticas, úmida e úmida a subúmida (SEI-BA, 2022), da região sudeste da Bahia (Figura 1). O marco zero da escala temporal de coleta de amostras de solo, denominado neste estudo de tempo zero (T0), correspondeu ao mês de aplicação dos insumos (calcário e gesso), seguindo-se coletas posteriores aos 40, 52, 72 e 87 meses de aplicação dos mesmos, os quais foram denominados, respectivamente, T40, T52, T72 e T87. Em todos os tempos foram coletadas 20 amostras simples por amostra composta, porém em T0 coletou-se apenas uma amostra composta por AE (para caracterização da área e recomendação dos insumos), nas camadas 0-20 e 20-40 cm. Para os demais tempos, foram coletadas amostras em três camadas (0-10, 10-20 e 20-40 cm), sendo os valores da camada 0-20 cm obtidos pela média das camadas 0-10 e 10-20 cm. Em T40 foi coletada uma amostra composta por repetição, ou seja, duas amostras compostas por AE. Nos demais anos foi coletada uma amostra composta por repetição e por método de renovação, ou seja, seis amostras compostas por AE. Todas as amostras simples foram coletadas com uso de sonda feita em aço inoxidável, acondicionadas em baldes plásticos limpos e colocadas para secar à sombra quando necessário. Em seguida uniformizadas e, desse volume, foi tomada uma amostra composta constituída por uma massa de aproximadamente 300 gramas. As amostras compostas foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas de acordo com as camadas e as AE.

Foram analisados os seguintes atributos químicos: pH em H₂O; Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ extraídos por KCl 1,0 mol L⁻¹; acidez potencial (H+Al) extraída por Ca(CH₃COO)₂ 0,5 mol L⁻¹; matéria orgânica (MO) determinada pelo método de Walkley-Black e P remanescente (P-rem) obtido pela agitação de 60 mg L⁻¹ de P, em uma solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (TEIXEIRA et al., 2017). Foram calculados os valores de: soma de bases (SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺), CTC do solo (t = SB + Al³⁺), CTC a pH 7,0 (T = SB + H+Al), saturação por Al³⁺ (m%) e saturação por bases (V%). Também foram realizadas análises granulométricas para determinação dos teores de areia, silte e argila dos solos estudados, conforme Teixeira et al., 2017. A relação silte/argila foi calculada dividindo-se os teores de silte pelos teores de argila obtidos na análise

granulométrica, sendo considerada indicativo de alto grau de intemperismo valor inferior a 0,7 para solos de textura média e inferior a 0,6, para solos argilosos e muito argilosos, conforme descrito por Santos et al. (2018). Os resultados das análises químicas iniciais podem ser observados na Tabela 01. A Tabela 02 mostra os indicadores de tamponamento e grau de intemperização dos solos analisados.

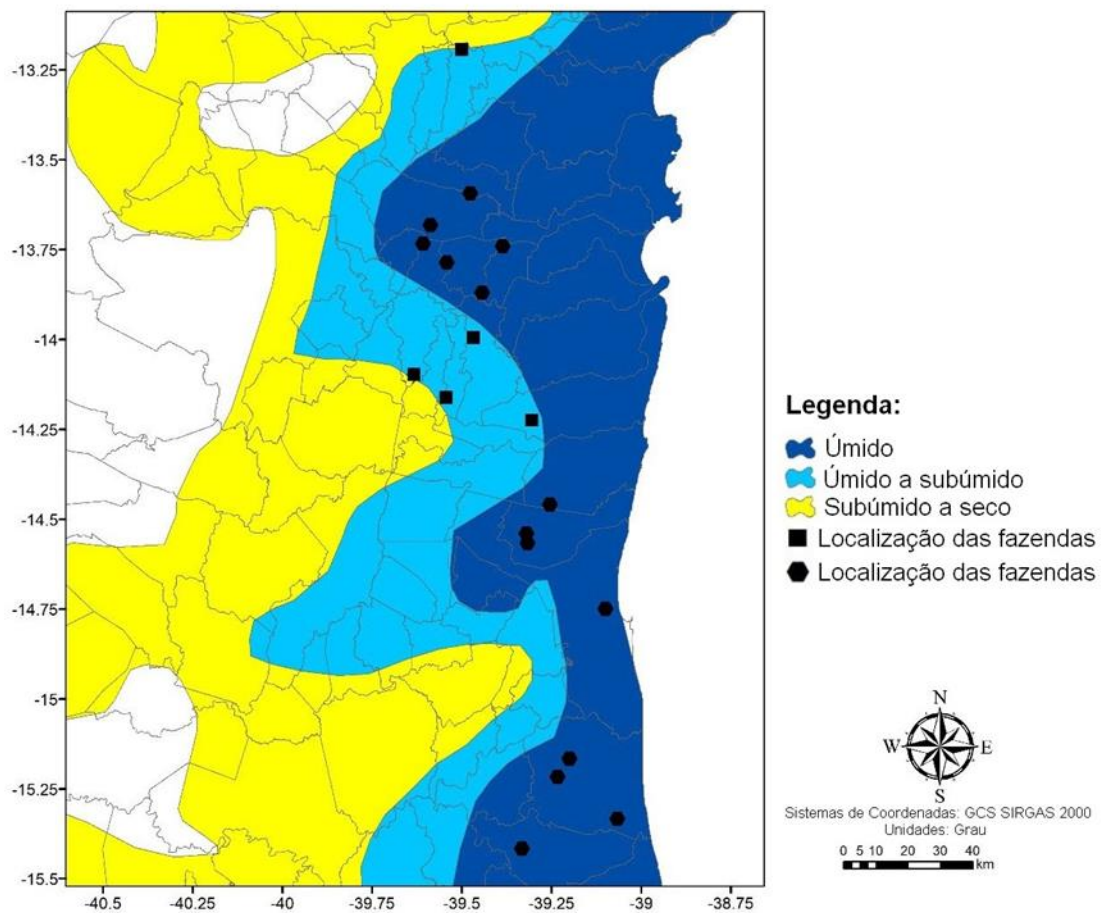


Figura 1. Localização e tipologia climática segundo Thornthwaite e Mather das 19 áreas experimentais do Projeto Renova Cacao nas quais foram coletadas amostras de solo para avaliação. Bahia; Santana; Medaur, 2021.

As doses de calcário foram calculadas pelo método de saturação por bases (Equação 1), visando elevar o valor V% para 75% nas AE que apresentavam V% inferior a 65% na camada de 0-20 cm, considerando-se a profundidade de reação de 5 cm e o PRNT do calcário de 90%.

$$QC = \frac{(V_2 - V_1) \times T}{10 \times PRNT} \times \frac{p}{20} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

QC = quantidade de calcário, em toneladas por hectare ($t\ ha^{-1}$);

V_2 = saturação por bases desejada, em % (adotou-se 75 %);

V_1 = saturação por bases do solo, em %;

T = CTC a pH 7,0, em $mmol_c\ dm^{-3}$;

PRNT = Poder Relativo de Neutralização Total do corretivo, em % (adotou-se 90 %);

p = profundidade de reação do calcário, em cm (adotou-se 5 cm).

As doses de gesso foram calculadas de acordo com equação estequiométrica propostas por Souza Júnior, Neves e Sodré (2018), baseadas na saturação por Al^{3+} tolerável – m_t (Equação 2) visando reduzir o valor m para 20%, nas áreas que apresentavam saturação por alumínio (m%) maior que 20%, considerando a camada de reação de 20 a 50 cm (30 cm de espessura) e o gesso com 16% de Ca.

$$QG = \left[Al^{3+} - \left(\frac{m_t \times t}{100} \right) \right] \times \frac{0,2 \times EC}{\%Ca_{ges}} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

QG = quantidade de gesso, em toneladas por hectare ($t\ ha^{-1}$);

Al^{3+} = teor de Al^{3+} na camada de interesse, em $mmol_c\ dm^{-3}$;

m_t = saturação por Al^{3+} tolerável pelo cacauzeiro, em % (adotou-se 20 %);

t = CTC efetiva na camada de interesse, em $mmol_c\ dm^{-3}$;

EC = espessura da camada, em cm (adotou-se 30 cm);

$\%Ca_{ges}$ = porcentagem de Ca no gesso, em % (adotou-se 16 %).

As doses de calcário e o gesso (Tabela 1), foram convertidas em gramas por planta e aplicadas manualmente a lanço, cobrindo toda a superfície dos solos. O calcário e o gesso não foram incorporados ao solo, porém a manta orgânica foi revolvida com auxílio de soprador de folhas, visando acelerar o contato dos insumos com a superfície dos solos.

Os atributos químicos estudados (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e soma e saturação por bases) foram submetidos à análise descritiva (média, mediana, mínimo, máximo e coeficiente

de variação – CV), teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) e análise de variância (ANAVA) conjunta com todas as 19 AE, sendo estas consideradas blocos. Os valores de CV foram categorizados conforme WARRICK e NIELSEN (1980) em baixo ($CV < 12\%$), médio ($12 \leq CV \leq 60\%$) e alto ($CV > 60\%$). Para cada atributo estudado, visando verificar a homogeneidade de variâncias do erro experimental, fez-se também a ANAVA para cada AE, posteriormente procedendo-se a divisão do maior pelo menor quadrado médio do resíduo, sendo os valores desta divisão muito superiores a sete, o que evidenciou falta de homogeneidade de variância. Consequentemente cada AE foi considerada como um experimento. Por fim, realizou-se análise de regressão dos atributos estudados em função do tempo (0, 40, 52, 72 e 87 meses), com coeficientes lineares e quadráticos testados pelo quadrado médio da ANAVA de cada AE até 10%, pelo teste F. O software utilizado foi R (R Core Team 2022).

Tabela 1 – Valores pH e de atributos químicos^{1/} iniciais utilizados para o cálculo de calagem e gessagem, de duas camadas de solo, e respectivas doses de calcário e de gesso aplicadas em 19 áreas experimentais (AE), no Estado da Bahia, Brasil.

AE	Fazenda	Município	Zona climática	----- Camada 0-20 cm -----			--- Camada 20-40 cm ---			---- Insumo ----	
				pH	T mmol _c dm ⁻³	V %	pH	Al ³⁺ mmol _c dm ⁻³	t	Calcário ----- t ha ⁻¹ -----	Gesso
1	Alto da Prata	Teolândia	úmida	5,56	101,7	44,9	4,59	6,8	16,6	0,80	1,31
2	Muriá	Piraí do Norte	úmida	6,51	104,1	87,5	6,50	0,0	78,5	---	---
3	Saramandaia	W. Guimarães	úmida	5,61	91,8	47,7	4,67	10,7	17,6	0,70	2,69
4	São João	Piraí do Norte	úmida	5,81	91,0	50,5	4,91	8,8	17,9	0,62	1,96
5	Bom Prazer	Itamarí	úmida	5,88	49,4	73,6	4,78	5,9	19,8	---	0,73
6	Paó	Gandu	úmida	6,01	80,2	70,0	5,51	4,9	37,8	---	---
7	N.S. Vitória	Uruçuca	úmida	5,27	114,2	42,2	4,68	4,9	20,7	1,04	0,29
8	Cariri	Uma	úmida	5,84	73,0	52,0	4,90	4,0	12,0	0,46	0,60
9	Ravenala	Ilhéus	úmida	5,31	79,4	30,0	5,15	3,9	18,4	0,98	---
10	São Roque	Uruçuca	úmida	5,83	123,0	59,3	5,14	5,0	28,2	0,54	---
11	Itaperuna	Uruçuca	úmida	6,08	99,8	59,9	5,42	2,0	27,7	0,42	---
12	Mangueira	Uma	úmida	4,95	90,2	33,4	4,75	10,7	21,7	1,04	2,39
13	São Rafael	Una	úmida	5,52	86,3	50,1	5,22	0,0	16,6	0,54	---
14	Lajedo de Ouro	Ibirataia	úmida	6,50	60,3	81,7	4,76	0,0	19,4	---	---
15	Gamaliel	Ubatã	us ^{2/}	5,69	102,3	56,0	4,99	4,9	26,8	0,54	---
16	Duas Barras	Mutuípe	us	7,34	73,1	86,3	6,63	0,0	37,5	---	---
17	Ponta Alegre	Ibirapitanga	us	5,35	115,4	41,0	4,17	6,8	19,9	1,09	1,06
18	Suíça	Coaraci	us	5,63	92,3	61,0	5,11	4,0	24,3	0,36	---
19	Boa Vista	Maraú	us	5,55	110,8	49,4	4,90	1,0	24,7	0,78	---

1/ pH em H₂O; T(CTC a pH 7,0); V (saturação por bases); Al³⁺ (alumínio trocável); e t (CTC efetiva); 2/ úmida a subúmida

Tabela 2 – Valores médios^{1/} de atributos relacionados aos cátions básicos trocáveis^{2/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais (AE) do estado da Bahia, Brasil.

AE	----- Camada 0-20 cm -----					----- Camada 20-40 cm -----				
	Ca ²⁺	Mg ²⁺ mmol _c dm ⁻³	K ⁺	SB	V %	Ca ²⁺	Mg ²⁺ mmol _c dm ⁻³	K ⁺	SB	V %
1	32,6	14,6	93,2	49,5	54,3	9,9	5,3	55,7	16,6	29,8
2	76,4	24,4	96,8	103,2	81,2	58,0	25,4	81,7	85,6	80,7
3	29,1	11,5	100,0	43,2	40,3	8,8	4,1	50,9	14,2	23,0
4	42,3	12,7	121,3	58,1	52,4	16,3	5,0	67,0	23,0	31,0
5	37,8	14,3	94,3	54,5	67,4	16,0	7,7	53,1	25,0	48,7
6	33,0	14,3	111,5	50,2	60,3	23,4	13,6	64,8	38,7	60,6
7	25,1	11,9	52,1	38,3	34,3	10,0	4,9	23,8	15,5	19,7
8	34,9	20,1	33,0	55,9	59,2	9,0	6,4	8,9	15,7	28,3
9	18,1	8,9	49,7	28,2	32,9	5,9	3,9	29,2	10,5	19,1
10	31,2	14,3	101,2	48,0	42,2	11,6	5,2	57,3	18,3	23,2
11	50,2	17,4	100,1	70,1	61,1	17,7	7,7	45,3	26,6	39,3
12	27,4	14,3	63,6	43,3	45,9	7,7	4,3	30,4	12,7	20,7
13	33,2	13,4	70,2	48,4	46,8	11,0	4,7	32,0	16,4	25,8
14	40,2	16,0	52,4	57,6	80,3	20,3	10,0	21,2	30,9	72,3
15	32,5	21,3	70,4	55,6	51,2	11,0	7,4	32,7	19,2	27,2
16	41,3	19,5	142,9	64,4	74,5	22,2	12,8	83,9	37,2	58,2
17	38,8	18,7	76,9	59,5	49,3	15,6	8,0	32,2	24,4	28,8
18	34,4	23,3	80,7	59,8	56,6	14,1	15,8	28,6	30,7	43,2
19	27,3	13,9	64,7	42,9	53,3	10,0	5,0	33,6	15,8	33,2

1/ Valores médios dos cinco tempos de amostragem (0,40,52,72,87 meses); 2/ Ca²⁺ (cálcio); Mg²⁺ (magnésio), K⁺ (potássio), SB (soma de bases); V (saturação por bases).

3.3 RESULTADOS

Análise descritiva – Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, soma e saturação por bases

Em ambas as camadas e nos cinco tempos estudados, os valores médios de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, soma de bases (SB) e saturação por bases (V%) foram maiores que a mediana, o que significa que há maior número de AE com teores médios inferiores à média geral; este fato contribui para a não detecção de distribuição normal dos dados, pelo teste de Shapiro-Wilk, na maioria dos casos. Além disso, os CV variaram de médios a altos indicando grande variabilidade dos dados (Tabelas 3 a 7), o que é reflexo da diversidade dos solos das EA (Tabelas 1 e 2).

Na camada de 0-20 cm a SB foi composta, em média, por 66,1% de Ca²⁺, 33,1% de Mg²⁺ e 3,8% K⁺, com relação Ca/Mg média de 2,2; para a camada de 20-40 cm, essa proporção média é de 62,6%, 33,1% e 4,3% de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, respectivamente, com relação Ca/Mg média de 1,9 (Tabelas 3 a 7). Considerando as proporções de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ em V%, ou seja, as saturações na CTC a pH 7,0 (T) destes três nutrientes, as mesmas foram, respectivamente, de: 35,7%, 16,3% e 2,0%, na camada superficial e de 22,3%, 11,8% e 1,5%, na camada subsuperficial.

Na camada superficial, as médias dos teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ e dos valores de SB e V% foram 132%, 100%, 89%, 120% e 52% superiores às médias da camada subsuperficial, sendo que nesta camada os CV foram muito maiores que na camada superficial, para todos os atributos estudados. Em ambas as camadas, os maiores valores de Ca²⁺, Mg²⁺, SB e V% foram observados 52 meses após a aplicação do calcário e do gesso em superfície (Tabelas 3, 4, 6 e 7). Quanto ao K⁺, os maiores teores foram observados em T52 na camada superficial e em T72 na camada subsuperficial.

Tabela 3 – Análise descritiva e de normalidade dos teores de Ca²⁺, em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.

Camada Cm	Tempo Meses	Ca ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)				CV %	p-value
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana		
0-20	0	15,3	67,1	32,3	30,8	35,0	*
	40	12,2	97,9	37,1	34,8	41,8	*
	52	11,6	103,8	46,4	43,1	37,4	*
	72	10,4	70,2	29,9	27,8	35,9	*

	87	11,0	94,5	30,2	26,3	51,3	*
	0	3,4	53,6	13,2	10,4	83,5	*
	40	3,1	51,9	15,4	11,3	73,2	*
20-40	52	5,1	90,3	21,7	19,1	66,7	*
	72	3,3	58,0	13,9	10,6	82,9	*
	87	2,1	71,7	11,5	6,5	115,1	*

* e ns – não normalidade e normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), respectivamente.

Tabela 4 – Análise descritiva e de normalidade dos teores de Mg^{2+} , em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.

Camada Cm	Tempo Meses	----- Mg^{2+} (mmol _c dm ⁻³) -----				CV %	p-value
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana		
0-20	0	8,7	24,1	17,3	16,7	25,1	ns
	40	7,4	28,9	16,8	15,8	31,0	ns
	52	6,2	38,2	18,9	18,5	31,4	*
	72	3,6	29,5	13,6	13,0	39,9	*
	87	3,7	29,2	13,5	13,1	41,7	*
20-40	0	2,1	24,5	7,4	5,7	72,0	*
	40	2,7	26,6	8,5	6,8	64,1	*
	52	2,6	35,8	10,1	8,7	59,4	*
	72	2,0	32,6	7,7	5,4	81,3	*
	87	0,7	28,1	6,4	4,0	102,1	*

* e ns – não normalidade e normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), respectivamente.

Tabela 5 – Análise descritiva e de normalidade dos teores de K^+ , em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.

Camada Cm	Tempo Meses	----- K^+ (mg dm ⁻³) -----				CV %	p-value
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana		
0-20	0	15,0	152,0	43,5	40,0	72,4	*
	40	14,0	216,6	78,4	61,4	64,1	*
	52	21,0	268,0	92,8	75,3	56,9	*
	72	22,5	224,0	93,3	83,5	47,6	*
	87	15,0	206,0	78,6	74,0	45,8	*
20-40	0	3,0	129,0	22,4	14,0	126,6	*
	40	4,0	89,2	34,1	26,1	65,5	*
	52	3,0	192,0	42,9	31,0	83,1	*
	72	3,0	275,0	57,8	47,0	78,4	*
	87	2,0	256,0	47,0	39,0	73,3	*

* e ns – não normalidade e normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), respectivamente.

Tabela 6 – Análise descritiva e de normalidade da soma de bases (SB), em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.

Camada Cm	Tempo meses	SB (mmol _c dm ⁻³)				CV %	p-value
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana		
0-20	0	24,4	91,1	50,8	48,8	29,9	ns
	40	20,2	128,6	56,0	53,3	35,1	*
	52	19,7	148,0	67,6	65,5	31,9	*
	72	16,6	99,5	46,0	43,1	33,2	*
	87	16,5	119,6	45,6	43,1	44,0	*
20-40	0	6,9	78,5	21,1	16,6	76,4	*
	40	5,9	79,0	24,8	18,7	65,8	*
	52	8,2	117,1	32,9	30,0	59,8	*
	72	5,8	96,5	23,1	17,1	78,6	*
	87	3,9	102,1	19,1	11,9	101,7	*

* e ns – não normalidade e normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), respectivamente.

Tabela 7 – Análise descritiva e de normalidade da saturação por bases (V), em função do tempo, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros em 19 áreas experimentais do estado da Bahia, Brasil.

Camada Cm	Tempo meses	V (%)				CV %	p-value
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana		
0-20	0	30,7	87,5	56,7	52,0	29,4	ns
	40	22,6	85,7	52,8	53,4	28,8	ns
	52	24,9	86,7	62,6	62,5	21,8	*
	72	19,8	88,5	49,5	48,0	30,8	ns
	87	14,9	96,0	48,7	47,4	36,2	*
20-40	0	14,6	78,9	33,5	30,9	54,6	*
	40	12,1	78,8	34,0	27,8	55,6	*
	52	16,6	95,9	45,7	40,6	42,9	*
	72	11,0	89,6	34,9	28,9	52,9	*
	87	6,5	92,7	30,1	20,9	71,9	*

* e ns – não normalidade e normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), respectivamente.

Varição dos teores de Ca²⁺

Para a camada de 0-20 cm, não houve variação significativa nos teores de Ca²⁺ em função do tempo em oito AE (Tabela 8), sendo que três destas receberam calcário em doses variando entre 0,54 e 0,98 t ha⁻¹, duas receberam calcário (0,46 e 1,09 t ha⁻¹) mais gesso (0,60 e 1,06 t ha⁻¹), uma recebeu apenas gesso (0,73 t ha⁻¹) e duas não receberam calcário, nem gesso (Tabela 1). Nesta mesma camada, 10 AE registraram variação significativa nos teores de Ca²⁺ em função do tempo, todas apresentando o

mesmo comportamento – regressão quadrática, com coeficiente linear positivo e coeficiente quadrático negativo, apontando incremento nos teores de Ca^{2+} , com posterior decréscimo em função do tempo (Tabela 8), sendo que três receberam apenas calcário (0,36 a 0,54 t ha⁻¹), cinco receberam calcário (0,62 a 1,04 t ha⁻¹) mais gesso (0,29 a 2,39 t ha⁻¹) e duas não receberam os insumos (Tabela 8). Apenas na AE 19 houve redução dos teores de Ca^{2+} em função do tempo (Tabela 8).

Para a camada de 20-40 cm, não houve variação significativa nos teores de Ca^{2+} em função do tempo em 12 AE (Tabela 8). Nesta mesma camada, seis AE apresentaram o mesmo comportamento da camada superior (0-20 cm), incremento, com posterior decréscimo dos teores de Ca^{2+} em função do tempo (Tabela 8), sendo que todas receberam gesso, com doses variando de 0,29 a 2,39 t ha⁻¹ (Tabela 1). Apenas na AE 9 houve redução linear dos teores de Ca^{2+} com o tempo (Tabela 8).

Tabela 8 – Equações de regressão dos teores de Ca^{2+} em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.

AE	Camada			
	0-20 cm		20-40 cm	
	Equação	R ²	Equação	R ²
1	$\hat{Y} = 28,3 + 0,510t - 0,006^{\circ}t^2$	0,65	$\hat{Y} = 4,8 + 0,404^*t - 0,005^*t^2$	0,78
2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 76,4$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 58,0$	-
3	$\hat{Y} = 27,3 + 0,618^{**}t - 0,008^{**}t^2$	0,94	$\hat{Y} = 2,8 + 0,442^{**}t - 0,005^{**}t^2$	0,95
4	$\hat{Y} = 32,8 + 0,901^*t - 0,011^*t^2$	0,84	$\hat{Y} = 8,2 + 0,742^{**}t - 0,009^{**}t^2$	0,95
5	$\hat{Y} = \bar{Y} = 37,8$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 16,0$	-
6	$\hat{Y} = \bar{Y} = 33,0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 23,4$	-
7	$\hat{Y} = 28,7 + 0,464^{**}t - 0,007^{**}t^2$	0,96	$\hat{Y} = 11,1 + 0,363^*t - 0,005^{**}t^2$	0,82
8	$\hat{Y} = \bar{Y} = 33,0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 9,1$	-
9	$\hat{Y} = \bar{Y} = 18,1$	-	$\hat{Y} = 10,3 - 0,070^{\circ}t$	0,51
10	$\hat{Y} = \bar{Y} = 31,6$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 11,6$	-
11	$\hat{Y} = 45,1 + 0,770t^* - 0,010^{**}t^2$	0,65	$\hat{Y} = \bar{Y} = 17,7$	-
12	$\hat{Y} = 20,4 + 0,342t - 0,003^{\circ}t^2$	0,77	$\hat{Y} = 6,9 + 0,117t - 0,001^*t^2$	0,93
13	$\hat{Y} = \bar{Y} = 33,2$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 11,0$	-
14	$\hat{Y} = 34,4 + 0,708^{\circ}t - 0,010^*t^2$	0,68	$\hat{Y} = \bar{Y} = 20,3$	-
15	$\hat{Y} = 35,5 + 0,373t - 0,006^*t^2$	0,59	$\hat{Y} = \bar{Y} = 11,0$	-
16	$\hat{Y} = 38,1 + 0,779^{**}t - 0,010^{**}t^2$	0,88	$\hat{Y} = \bar{Y} = 22,2$	-
17	$\hat{Y} = \bar{Y} = 38,8$	-	$\hat{Y} = 6,0 + 0,646^*t - 0,007^{**}t^2$	0,51
18	$\hat{Y} = 32,6 + 0,331^*t - 0,005^{**}t^2$	0,74	$\hat{Y} = \bar{Y} = 14,4$	-
19	$\hat{Y} = 35,7 - 0,153^*t$	0,69	$\hat{Y} = \bar{Y} = 10,0$	-

1/ Teor de Ca^{2+} em mmolc dm⁻³; tempo em meses.

** , * , °, significativo a 0,01; 0,05 e 0,10, pelo teste F, respectivamente.

Variação dos teores de Mg²⁺

Para a camada 0-20 cm, não foram registradas variações significativas nos teores de Mg²⁺ em 10 AE, das quais cinco AE receberam apenas calcário (0,36 a 0,98 t ha⁻¹), três AE receberam calcário (0,46 a 1,04 t ha⁻¹) mais gesso (0,60 a 2,39 t ha⁻¹), uma AE recebeu apenas gesso (0,73 t ha⁻¹) e uma AE não recebeu nenhum dos insumos (Tabela 9). Cinco AE registraram variação significativa nos teores de Mg²⁺ em função do tempo, com coeficiente linear positivo e coeficiente quadrático negativo, apontando incremento nos teores de Mg²⁺, com posterior decréscimo em função do tempo (Tabela 9); destas, duas AE receberam calcário (0,62 e 1,09 t ha⁻¹) mais gesso (1,06 e 1,96 t ha⁻¹), uma AE recebeu apenas calcário (0,54 t ha⁻¹) e duas AE não receberam nenhum dos insumos (Tabela 9). Por fim, em quatro AE os teores de Mg²⁺ reduziram linearmente ao longo do tempo de avaliação, mesmo em três destas que receberam doses de calcário variando de 0,70 a 1,04 t ha⁻¹ (Tabela 1).

A camada 20-40 cm apresentou mais constância nos teores de Mg²⁺ ao longo do tempo que a camada superior, visto que em 13 AE não foram registradas variações significativas nos teores de Mg²⁺ no decorrer dos 87 meses de avaliação deste estudo (Tabela 9). Seis AE registraram variação significativa nos teores de Mg²⁺ em função do tempo, com ajuste de modelos quadráticos (coeficiente linear positivo e coeficiente quadrático negativo), o que retrata o incremento com posterior decréscimo dos teores de Mg²⁺ em função do tempo (Tabela 9), ressalta-se que todas estas seis AE receberam gesso, com doses variando de 0,29 a 2,69 t ha⁻¹ (Tabela 1). Apenas na AE 13 houve redução linear dos teores de Mg²⁺ com o tempo (Tabela 9).

Tabela 09 – Equações de regressão dos teores de Mg²⁺ em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacaueiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.

AE	Camada			
	0-20 cm		20-40 cm	
	Equação	R ²	Equação	R ²
1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 14,6$	-	$\hat{Y} = 3,9 + 0,145t - 0,002^{\circ}t^2$	0,91
2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 24,4$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 25,4$	-
3	$\hat{Y} = 19,4 - 0,122^{**}t$	0,95	$\hat{Y} = 3,2 + 0,158^{**}t - 0,002^{**}t^2$	0,99
4	$\hat{Y} = 14,5 + 0,093t - 0,002^{\circ}t^2$	0,77	$\hat{Y} = 2,7 + 0,218^{**}t - 0,003^{**}t^2$	0,94
5	$\hat{Y} = \bar{Y} = 14,3$	-	$\hat{Y} = 4,7 + 0,178^{\circ}t - 0,002^{\circ}t^2$	0,55
6	$\hat{Y} = 25,2 - 0,169^{**}t$	0,58	$\hat{Y} = \bar{Y} = 13,6$	-
7	$\hat{Y} = 25,6 - 0,215^{**}t$	0,70	$\hat{Y} = 7,0 + 0,135^{**}t - 0,002^{*}t^2$	0,93

8	$\hat{Y} = \bar{Y} = 20,2$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6,4$	-
9	$\hat{Y} = \bar{Y} = 8,9$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 3,9$	-
10	$\hat{Y} = \bar{Y} = 14,3$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,2$	-
11	$\hat{Y} = \bar{Y} = 17,4$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 7,7$	-
12	$\hat{Y} = \bar{Y} = 14,3$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,3$	-
13	$\hat{Y} = \bar{Y} = 13,4$	-	$\hat{Y} = 6,9 - 0,034^{\circ}t$	0,48
14	$\hat{Y} = 15,2 + 0,159t - 0,002^{\circ}t^2$	0,55	$\hat{Y} = \bar{Y} = 10,0$	-
15	$\hat{Y} = 26,1 + 0,215t - 0,004^{\circ}t^2$	0,59	$\hat{Y} = \bar{Y} = 7,4$	-
16	$\hat{Y} = 21,6 + 0,195^{\circ}t - 0,003^{\circ}t^2$	0,89	$\hat{Y} = \bar{Y} = 12,8$	-
17	$\hat{Y} = 15,6 + 0,287^{\circ}t - 0,004^{\circ}t^2$	0,70	$\hat{Y} = 4,4 + 0,231^{\circ}t - 0,003^{\circ}t^2$	0,61
18	$\hat{Y} = \bar{Y} = 23,3$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 15,8$	-
19	$\hat{Y} = 18,5 - 0,083^{\circ}t$	0,93	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5,0$	-

1/ Teor de Mg^{2+} em $mmol\ c\ dm^{-3}$; tempo em meses.

** , * , °, significativo a 0,01; 0,05 e 0,10, pelo teste F, respectivamente.

Varição dos teores de K^+

Os teores de K^+ na camada de 0-20 cm não variaram significativamente em nove AE; em cinco AE verificaram-se comportamento quadrático (coeficiente linear positivo e coeficiente quadrático negativo), indicando incremento com posterior decréscimo dos teores de K^+ em função do tempo; em quatro AE verificou-se comportamento linear positivo; por fim, apenas em uma AE o teor de K^+ decresceu linearmente com o tempo (Tabela 10).

Na camada 20-40 cm houve predomínio de não variação significativa dos teores K^+ ao longo de 87 meses de estudo. Em três AE houve comportamento linear positivo e apenas em uma AE houve comportamento quadrático para o teor de K^+ em função do tempo (Tabela 10).

Tabela 10 – Equações de regressão dos teores de K^+ em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.

AE	Camada			
	0-20 cm		20-40 cm	
	Equação	R ²	Equação	R ²
1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 93,1$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 55,7$	-
2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 96,8$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 81,7$	-
3	$\hat{Y} = 7,8 + 1,439^{\circ}t$	0,83	$\hat{Y} = -1,6 + 0,818^{\circ}t$	0,83
4	$\hat{Y} = 56,0 + 3,530^{\circ}t - 0,035^{\circ}t^2$	0,91	$\hat{Y} = 29,5 + 0,584^{\circ}t$	0,88
5	$\hat{Y} = \bar{Y} = 94,3$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 53,1$	-
6	$\hat{Y} = \bar{Y} = 111,5$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 64,8$	-
7	$\hat{Y} = \bar{Y} = 52,8$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 23,8$	-
8	$\hat{Y} = \bar{Y} = 33,0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 8,9$	-

9	$\hat{Y} = 13,3 + 0,568^{**}t$	0,87	$\hat{Y} = \bar{Y} = 29,2$	-
10	$\hat{Y} = 192,5 - 1,425^{**}t$	0,77	$\hat{Y} = \bar{Y} = 57,3$	-
11	$\hat{Y} = \bar{Y} = 100,1$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 45,4$	-
12	$\hat{Y} = 9,5 + 0,845^{**}t$	0,97	$\hat{Y} = -7,6 + 0,594^{**}t$	0,89
13	$\hat{Y} = 13,9 + 0,878^{**}t$	0,97	$\hat{Y} = \bar{Y} = 32,1$	-
14	$\hat{Y} = 21,9 + 2,367^{*}t - 0,029^{**}t^2$	0,94	$\hat{Y} = \bar{Y} = 21,2$	-
15	$\hat{Y} = \bar{Y} = 70,4$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 32,7$	-
16	$\hat{Y} = 80,2 + 4,458^{**}t - 0,049^{**}t^2$	0,96	$\hat{Y} = \bar{Y} = 83,9$	-
17	$\hat{Y} = 36,1 + 2,611^{*}t - 0,029^{*}t^2$	0,92	$\hat{Y} = 10,7 + 1,158^{*}t - 0,012^{*}t^2$	0,75
18	$\hat{Y} = 49,6 + 2,199t - 0,026^{\circ}t^2$	0,88	$\hat{Y} = \bar{Y} = 28,6$	-
19	$\hat{Y} = \bar{Y} = 64,8$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 33,6$	-

1/ Teor de K⁺ em mg dm⁻³; tempo em meses.

** , * , °, significativo a 0,01; 0,05 e 0,10, pelo teste F, respectivamente.

Variação da soma e saturação por bases

Como Ca²⁺ e Mg²⁺ compõem majoritariamente a soma de bases (SB), o comportamento temporal da mesma (Tabela 11) segue comportamento semelhante aos observados para estes dois nutrientes (Tabelas 8 e 9). Ou seja, houve predomínio de não variação da SB com o tempo, principalmente na camada subsuperficial; porém, quando houve variação, o modelo significativo predominante foi o quadrático, com coeficiente linear positivo e coeficiente quadrático negativo (Tabela 11).

A saturação por bases (V%) é a porcentagem da CTC a pH 7,0 (T) ocupada por cátions básicos (SB), sendo a diferença ocupada pela acidez potencial (H+Al³⁺). Ou seja, V% é altamente dependente da SB, mas também dependente da acidez potencial. Por isso mesmo, o comportamento de ambas as variáveis é semelhante, sendo que na camada de 20-40 cm esse comportamento foi idêntico para todas as 19 AE, das quais 14 AE não apresentaram variação com o tempo e cinco apresentaram modelos quadráticos significativos (Tabelas 11 e 12), sendo que estas cinco AE receberam gesso (Tabela 1).

Tabela 11 – Equações de regressão da soma de bases em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.

AE	Camada			
	0-20 cm		20-40 cm	
	Equação	R ²	Equação	R ²
1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 49,6$	-	$\hat{Y} = 8,9 + 0,580^{\circ}t - 0,006^{*}t^2$	0,81
2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 103,2$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 85,6$	-
3	$\hat{Y} = 45,4 + 0,604^{*}t - 0,009^{**}t^2$	0,96	$\hat{Y} = 5,9 + 0,623^{**}t - 0,007^{**}t^2$	0,97
4	$\hat{Y} = 48,7 + 1,084^{*}t - 0,013^{**}t^2$	0,84	$\hat{Y} = 11,3 + 0,989^{**}t - 0,011^{**}t^2$	0,95
5	$\hat{Y} = \bar{Y} = 54,5$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 25,1$	-
6	$\hat{Y} = \bar{Y} = 50,2$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 38,7$	-
7	$\hat{Y} = 48,6 + 0,571^{*}t - 0,010^{**}t^2$	0,93	$\hat{Y} = 18,7 + 0,482^{*}t - 0,007^{**}t^2$	0,84
8	$\hat{Y} = \bar{Y} = 55,9$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 15,7$	-
9	$\hat{Y} = \bar{Y} = 28,2$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 10,4$	-
10	$\hat{Y} = \bar{Y} = 48,0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 18,3$	-
11	$\hat{Y} = 63,2 + 0,871^{\circ}t - 0,011^{*}t^2$	0,61	$\hat{Y} = \bar{Y} = 26,6$	-
12	$\hat{Y} = \bar{Y} = 43,3$	-	$\hat{Y} = 11,2 + 0,151t - 0,002^{\circ}t^2$	0,98
13	$\hat{Y} = \bar{Y} = 48,4$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 16,5$	-
14	$\hat{Y} = 50,2 + 0,928^{\circ}t - 0,013^{*}t^2$	0,68	$\hat{Y} = \bar{Y} = 30,9$	-
15	$\hat{Y} = 61,5 + 0,650t - 0,010^{*}t^2$	0,61	$\hat{Y} = \bar{Y} = 19,2$	-
16	$\hat{Y} = 61,7 + 1,088^{**}t - 0,015^{**}t^2$	0,91	$\hat{Y} = \bar{Y} = 37,2$	-
17	$\hat{Y} = 45,2 + 1,141^{*}t - 0,014^{*}t^2$	0,50	$\hat{Y} = 10,7 + 0,907^{*}t - 0,010^{**}t^2$	0,54
18	$\hat{Y} = \bar{Y} = 59,8$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 30,7$	-
19	$\hat{Y} = 55,74 - 0,235^{*}t$	0,76	$\hat{Y} = \bar{Y} = 15,8$	-

1/ Soma de bases (SB) em mmol_c dm⁻³; tempo em meses.

** , * , °, significativo a 0,01; 0,05 e 0,10, pelo teste F, respectivamente.

Tabela 12 – Equações de regressão da saturação por bases em função do tempo^{1/}, em duas camadas, para solos cultivados com cacauzeiros, em 19 áreas experimentais (AE) no estado da Bahia, Brasil.

AE	Camada			
	0-20 cm		20-40 cm	
	Equação	R ²	Equação	R ²
1	$\hat{Y} = 45,1 + 0,682t - 0,008^{\circ}t^2$	0,93	$\hat{Y} = 17,8 + 0,855t - 0,009^{\circ}t^2$	0,65
2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 81,2$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 80,7$	-
3	$\hat{Y} = 47,8 + 0,185t - 0,004^{\circ}t^2$	0,95	$\hat{Y} = 12,7 + 0,797^{**}t - 0,009^{**}t^2$	0,89
4	$\hat{Y} = 51,0 + 0,528^{*}t - 0,007^{**}t^2$	0,84	$\hat{Y} = 15,6 + 1,022^{**}t - 0,011^{**}t^2$	0,98
5	$\hat{Y} = \bar{Y} = 67,4$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 48,7$	-
6	$\hat{Y} = \bar{Y} = 60,3$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 60,6$	-
7	$\hat{Y} = 40,8 + 0,489^{*}t - 0,008^{**}t^2$	0,81	$\hat{Y} = 19,5 + 0,616^{**}t - 0,009^{**}t^2$	0,99
8	$\hat{Y} = \bar{Y} = 59,2$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 28,3$	-
9	$\hat{Y} = \bar{Y} = 33,0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 19,1$	-
10	$\hat{Y} = \bar{Y} = 42,3$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 23,2$	-
11	$\hat{Y} = \bar{Y} = 61,1$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 39,3$	-
12	$\hat{Y} = 32,6 + 0,469^{*}t - 0,004^{*}t^2$	0,86	$\hat{Y} = 15,4 + 0,287^{\circ}t - 0,003^{*}t^2$	0,85
13	$\hat{Y} = \bar{Y} = 46,9$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 25,7$	-
14	$\hat{Y} = \bar{Y} = 80,4$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 72,3$	-
15	$\hat{Y} = \bar{Y} = 51,2$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 27,2$	-
16	$\hat{Y} = 85,1 - 0,166^{\circ}t$	0,60	$\hat{Y} = \bar{Y} = 58,2$	-
17	$\hat{Y} = \bar{Y} = 49,3$	-	$\hat{Y} = 13,4 + 0,915^{*}t - 0,01^{**}t^2$	0,52

18	$\hat{Y} = \bar{Y} = 56,6$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 43,2$	-
19	$\hat{Y} = \bar{Y} = 53,3$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 33,2$	-

1/ Saturação por bases (V) em %; tempo em meses.

**, *, °, significativo a 0,01; 0,05 e 0,10, pelo teste F, respectivamente.

3.4 DISCUSSÃO

Variação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+}

Os CV para Ca^{2+} e Mg^{2+} , em ambas as camadas e nos cinco tempos, podem ser classificados como médios ou altos, conforme proposição de Warrick e Nielsen (1980). Essa alta variabilidade dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} pode ser reflexo da diversidade de solos (GUARAÇONI, 2017), o que pode ser demonstrado pela variabilidade de atributos químicos e de textura dos solos das 19 AE.

Na camada 0-20 cm, os teores médios desse nutriente nas 19 AE deste estudo foram considerados de médio a bom para a cultura do cacauzeiro, de acordo com Souza Júnior, Sodré e Neves (2018) e dentro da faixa desejável para a cultura conforme Chepote et al. (2013). Para 20-40 cm, a variação de Ca^{2+} entre as AE foi alta em todos os tempos estudados e, em média, 57% inferiores à média da camada de 0-20 cm. Os teores médios de Mg^{2+} , na camada de 0-20 cm, também foram adequados para a cultura (CHEPOTE et al., 2013; SOUZA JÚNIOR; SODRÉ; NEVES 2018); sendo, em média 100% superiores à média da camada subsuperficial.

Das 15 AE que receberam calcário e/ou gesso, em oito AE o teor de Ca^{2+} foi significativamente alterado ao longo dos meses de estudo, todas com comportamento quadrático, indicando a importância destes dois insumos como fonte de Ca^{2+} , bem como que seu efeito é temporalmente limitado, haja visto o decréscimo dos teores de Ca^{2+} após o ponto de inflexão dos modelos quadráticos, o qual variou de 32 a 53 meses. A elevação dos teores de Ca^{2+} na camada 0-20 cm, em decorrência da calagem superficial tem sido amplamente documentada, em especial em sistema de plantio direto (SPD), no qual não há revolvimento do solo (COSTA; CRUSCIOL, 2016; FIDALSKI et al., 2005; PAULETTI et al., 2013; CAIRES, 2014). No SPD também tem-se observado a influência dos resíduos vegetais na dinâmica do Ca^{2+} , por meio da formação de complexos organometálicos, que podem aumentar a mobilidade do nutriente (MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2002; RHEINHEIMER et al., 2009).

Para as AE que, mesmo recebendo calcário e/ou gesso, não apresentaram variações temporais dos teores de Ca^{2+} , pode-se apresentar alguns argumentos, que atuam isoladamente ou simultaneamente: doses pequenas dos insumos (FIDALSKI

et al., 2005; LI et al., 2019); concentração do Ca^{2+} , oriundo do calcário, em camada mais superficiais e, conseqüentemente, diluindo-se na amostra oriunda da camada de 0-20 cm; perda de Ca^{2+} , oriundo do gesso, por lixiviação para camadas mais profundas que a de 0-20 cm; equilíbrio dinâmico na ciclagem biogeoquímica, em consequência de aporte natural de nutrientes (mineralização do grande aporte de matéria orgânica oriunda da eliminação dos cacauzeiros velhos, bem como da poda de galhos das árvores que compunham o sistema agroflorestal Cacau-Cabruca e, em algumas AE, gerava um sombreamento excessivo); de extração de nutrientes pela lavoura (formação de novos cacauzeiros ao longo dos anos, imobilizando nutrientes na biomassa vegetal viva); de exportação pelas colheitas (algumas AE apresentaram produtividades superiores a $3.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de amêndoas secas nos últimos anos).

Na camada 20-40 cm, a dinâmica do Ca^{2+} parece estar relacionada à aplicação do gesso em superfície, pois todas as seis EA que apresentaram comportamento quadrático (incremento, com posterior decréscimo dos teores de Ca^{2+} em função do tempo) receberam gesso. A aplicação de gesso tem se mostrado eficiente no aumento dos teores de Ca^{2+} em subsuperfície, em função da formação de par iônico com o SO_4^{2-} (SERAFIM et al., 2011; RAMOS et al., 2013). Por outro lado, resultados obtidos por Ziglio, Miyazawa e Pavan (1998) indicaram que a presença de ligantes orgânicos de origem vegetal podem atuar sobre a mobilidade do Ca^{2+} no solo, de forma que não seria possível descartar essa possibilidade neste estudo, tendo em vista o elevado aporte de material vegetal nas AE, oriundo da renovação das lavouras velhas de cacau. Ressalta-se que das EA que receberam gesso, apenas em duas delas (AE 5 e 8) não houve alterações significativas nos teores de Ca^{2+} com o tempo, na camada de 20-40 cm, fato provavelmente justificado pelas doses relativamente pequenas utilizadas nestas AE, as quais foram de $0,73$ a $0,60 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente. Ainda nesta camada, para todas as AE que não receberam gesso, não houve variação significativa nos teores de Ca^{2+} em função do tempo, indicando constância do mesmo numa escala temporal de 87 meses; exceto para a AE 9 que apresentou redução linear de Ca^{2+} com o tempo (Tabela 8), provavelmente por ser a AE com o menor teor de Ca^{2+} em superfície, o que propiciaria as plantas a absorver Ca^{2+} de camadas mais subsuperficiais.

Para a camada de 0-20 cm, das 14 AE que receberam calcário, em apenas três o teor de Mg^{2+} mostrou comportamento quadrático, sendo os teores máximos

alcançados antes 29 a 40 meses; em oito AE o teor de Mg^{2+} não foi significativamente afetado ao longo dos meses, indicando equilíbrio entre o nutriente fornecido pelo calcário e a absorção pelas plantas; e em três AE o teor de Mg^{2+} decresceu com o tempo, sugerindo que houve maior absorção pelas plantas, que o fornecimento pelo calcário, sendo que para a AE 3, área que recebeu a maior dose de gesso, este insumo pode também ter contribuído para a lixiviação de Mg^{2+} para camadas subsuperficiais. A adição de Mg^{2+} em consequência da mineralização de matéria orgânica oriunda da eliminação dos cacauzeiros velhos e da poda dos galhos das árvores de sombra auxiliaria entender também os incrementos iniciais de Mg^{2+} nas três AE que receberam calcário e também nas AE 14 e 16, que não receberam calcário, sendo que nestas últimas AE o teor máximo de Mg^{2+} ocorreu por volta de 34 meses. A não variação significativa de Mg^{2+} também foi verificada em duas das cinco AE que não receberam calcário.

Na camada 20-40 cm, o comportamento quadrático dos teores de Mg^{2+} só foi observado em AE que receberam gesso, indicando que o gesso aplicado na superfície do solo favoreceu a lixiviação de Mg^{2+} , o qual aumentou e depois decresceu nesta camada, sendo os teores máximos alcançados antes 29 a 47 meses. Alterações nos teores subsuperficiais de Mg^{2+} são relatados em trabalhos envolvendo a aplicação superficial de gesso, com relatos de elevação do Mg^{2+} em consequência da formação do par iônico com o SO_4^{2-} , que confere ao cátion mobilidade no perfil do solo (BOSSOLANI et al., 2020; SERAFIM et al., 2011; SERAFIM et al., 2012; VICENSI et al., 2020). Esse aumento do Mg^{2+} em subsuperfície traz consigo a possibilidade de melhoria no fornecimento e aumento da disponibilidade deste nutriente abaixo da camada de ação do calcário, com benefícios como ampliação do volume de solo explorado pelo sistema radicular, com consequente ganhos na absorção de água e de nutrientes (CAIRES et al., 2013; PAULETTI et al., 2014), especialmente para o cacauzeiro, considerada exigente em Mg (SOUZA JÚNIOR; NEVES; SODRÉ, 2018). Entretanto, não há possibilidade de controle da profundidade para a qual o Mg^{2+} seria mobilizado, tendo sido observado alterações no Mg^{2+} até profundidades superiores a 80 cm (CAIRES et al., 2009; CAIRES et al., 2014). Outra questão se refere à possibilidade de redução dos teores de Mg^{2+} nas camadas superficiais (SERAFIM et al., 2011 b), o que pode ser contornado com a aplicação do gesso associado ao calcário, visando fornecimento do nutriente (CAIRES et al., 2002), além de evitar o

desbalanço entre Mg^{2+} , Ca^{2+} e K^+ (RAMOS et al., 2013). Em 10 AE que não receberam gesso e em duas que receberam este insumo, não houve alteração significativa dos teores de Mg^{2+} com o tempo, na camada de 20-40 cm. Apenas na AE 13 o teor de Mg^{2+} decresceu linearmente com o tempo (Tabela 09), talvez porque esta AE apresentava baixo teor de Mg^{2+} em superfície, requerendo que as plantas absorvessem Mg^{2+} de camadas mais subsuperficiais.

Variação dos teores de K^+

Nem calcário, nem gesso é fonte de K, mas estes insumos podem influenciar na dinâmica deste nutriente nos solos, seja pelo aumento da CTC do solo pelo calcário, favorecendo a retenção de K^+ ; seja pelo aumento da lixiviação de K^+ favorecida pela adição de Ca^{2+} e Mg^{2+} pelo calcário e, principalmente, pela adição de Ca^{2+} e SO_4^{2-} pelo gesso. Ressalta-se que as AE foram adubadas com K, sendo as doses definidas em função da idade de plantio, da expectativa de produtividade e das análises mais recentes dos solos de cada AE, segundo critério sugerido por Souza Júnior, Neves e Sodré (2018). Ou seja, certamente os quatro fatores que mais influenciaram nas variações temporais de K^+ foram: adubações potássicas específicas de cada AE, aporte natural de K via mineralização da matéria orgânica oriunda do desbaste dos cacauzeiros velhos e da poda de galhos das árvores de sombra, extração de K para formação de novas árvores de cacau e exportação de K via colheitas; ressalta-se que o K é o nutriente mineral que mais se acumula na biomassa vegetal como um todo do cacauzeiro, bem como é o que mais se acumula no cacau (SOUZA JÚNIOR; NEVES; SODRÉ, 2018).

Devido aos fatores apresentados, o K^+ na camada de 0-20 cm, apresentou comportamentos bem distintos ao longo do tempo, entre as 19 AE estudadas. Em nove AE não houve variação significativa do K^+ , indicando equilíbrio entre os aportes e as saídas de do nutriente. Em cinco AE verificaram-se comportamento quadrático, o qual pode ser compreendido pelo aumento inicial de K^+ em função do aporte de K^+ via adubação e também via mineralização da biomassa oriunda do processo de renovação da lavoura, e posterior decréscimo ocasionado pela extração e exportação de K, ressaltando-se que em muitas AE a produtividade nos últimos anos superou

3.000 kg ha⁻¹ano⁻¹, chegando algumas AE a valores por volta de 5.000 kg ha⁻¹ de amêndoas secas de cacau. Em quatro AE verificou-se comportamento linear positivo, com coeficientes variando de +0,568 a +1,439, os quais representam incrementos anuais de 6,8 a 17,3 mg dm⁻³ de K⁺, sendo que estas AE eram as que tinham os menores teores iniciais e K⁺ no solo e, conseqüentemente, receberam as maiores doses anuais, as quais, nos últimos anos, variaram de 280 a 320 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O; e apenas na AE 10 verificou-se comportamento linear negativo, com coeficiente de -1,425, o qual representa decréscimo anual de 17,1 mg dm⁻³ de K⁺, sendo que esta AE recebeu, nos últimos anos, adubações de apenas 40 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O, em função de apresentar teores de K no solo muito altos, nos primeiros anos do experimento.

Na camada de 20-40 cm o K⁺ foi temporalmente muito mais constante, visto que 15 AE não apresentaram variações significativas dos teores de K⁺ ao longo de 87 meses de estudo, mesmo para uma elevada amplitude dos teores médios entre estas AE, sendo estes variando de 8,9 até 83,9 mg dm⁻³ de K⁺ (Tabela 10). Em três AE houve comportamento linear positivo, sendo que os coeficientes dos modelos de regressão permitem estimar taxas de incremento de 7,0 a 9,8 mg dm⁻³ de K⁺ por ano (Tabela 10); ressalta-se que estas três AE receberam as maiores doses de gesso, variando de 1,96 a 2,69 t ha⁻¹ (Tabela 1), o que sugere que o gesso possa ter contribuído para a translocação de K⁺ da camada superficial para a subsuperficial. Apenas em uma AE houve comportamento quadrático para o teor de K⁺ em função do tempo (Tabela 9), sendo que a mesma recebeu 1,06 t ha⁻¹ de gesso (Tabela 1). O gesso tem causado a lixiviação de K⁺ no perfil do solo, às vezes até profundidade superiores a 85 cm (SERAFIM et al., 2011; RAMOS et al., 2013), pela afinidade de formação de par iônico com o SO₄²⁻ originário da dissolução do insumo (SOBRAL et al., 2009).

Variação da soma e saturação por bases

A soma de base (SB) é majoritariamente dependente dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, os quais representaram mais 95% da SB, em ambas as camadas. Por isso, a SB tende a ser um comportamento intermediário entre estes dois nutrientes. Ou seja,

semelhante ao observado para Ca^{2+} e Mg^{2+} , houve predomínio de não variação da SB com o tempo, seja pelo não recebimento de calcário e/ou gesso ou porque as doses foram pequenas ou pelos motivos já anteriormente discutidos.

Mas, houve variações da SB em nove e em seis AE, respectivamente, nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm, pelos motivos já discutidos para Ca^{2+} e Mg^{2+} . Estas variações apresentaram majoritariamente modelos quadráticos, os quais, quando derivados, permitem obtém que as máximas SB estimadas ocorreram entre 28 a 41 meses, para a camada de 0-20 cm, e entre 34 a 48 meses, para a camada de 20-40 cm, após a aplicação dos insumos. Ressalta-se que para esta última, todas as seis AE que apresentaram variações dos valores de SB receberam gesso.

Por sua vez, a saturação por bases (V%) é uma variável relativizada da SB, visto que considera também os cátions de caráter ácido ($\text{H} + \text{Al}^{3+}$), sendo seu valor expresso em porcentagem. Isso auxilia no entendimento de em alguns casos, para a camada de 0-20 cm, não haver coincidência no comportamento de SB e de V%. Por sua vez, para a camada de 20-40 cm, o comportamento de ambas as variáveis foi igual para todas as 19 EA estudadas, sendo que em 14 AE a SB e V% não variaram significativamente com o tempo e cinco AE apresentaram modelos quadráticos significativos, sendo que estas últimas receberam gesso.

3.5 CONCLUSÕES

Na maioria das áreas experimentais (AE), a aplicação de calcário em superfície, sem incorporação ao solo, não alterou os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e, conseqüentemente, a soma e saturação por bases, da camada de 0-20 cm do solo.

Na maioria das AE, a aplicação de gesso em superfície, sem incorporação ao solo, incrementou o Ca^{2+} , principalmente na camada de 20-40 cm do solo. Também favoreceu o incremento de Mg^{2+} e K^+ nesta camada.

As variações dos teores de K^+ foram mais associados às adubações potássicas.

REFERÊNCIAS

- ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A. & CAIRES, E.F. Atributos químicos de um Latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:923-934, 2005.
- ANDRADE, C. A. et al. Soil Physiological response and earliness of soybean genotypes to soil base saturation conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 1, p. 163-169, 2020.
- ARFI, O. et al. Gesso aplicado na superfície do solo no desenvolvimento do arroz de terras altas sob plantio direto. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, 18 (11) Nov 2014. DOI <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1136-1141>
- BAHIA, B . L. et al. Partition, correlation, and natural bioconcentration of iron, manganese, and zinc in cacao trees, *Journal of Plant Nutrition*, 2021. DOI: [10.1080/01904167.2021.1927091](https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1927091)
- BALIGAR, V.; FAGERIA, N. K.. (2023). Aluminum influence on growth and uptake of micronutrients by cacao. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, Vol.3 (3&4) : 173-177, 2005.
- BOSSOLANI, J.W. et al. Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. **Geoderma**, 375:114476. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114476>
- CAIRES, E.F.; BANZATTO, D. A. FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.161-169, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000100018>
- CAIRES, E. F. et al. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 26 (4), Dez 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400019>
- CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 28 (1), 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100013>

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 Manag.** 27, 45–53, 2011. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00310.x>

CHEPOTE, R. E. Et al. Aptidão agrícola e fertilidade de solos para a cultura do cacauero. P 31-66. In. VALLE, R. R. (Ed.). **Ciência, tecnologia e manejo do cacauero**. Ilhéus: CEPLAC, 2012. Cap. 3, p. 67-114.

CHEPOTE et al. Recomendações corretivos e fertilizantes na cultura do cacauero no sul da Bahia. Boletim Técnico, Bahia, Brasil, nº 203 p07-43, 2013.

COCHRANE A. T. T. Advances in understanding and managing acid soils in tropical south america. La Paz, 1989.

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, 1 mar. 2016.

CRUSCIOL C.A.C. et al. Liming optimizes nitrogen fertilization in a maize-upland rice rotation under no-till conditions. **Agronomy**. 2021. 11(10):2005. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102005>

FAGERIA V.D. Nutrient interactions in crop plants, **Journal of Plant Nutrition**, 24:8, 1269-1290, 2001. DOI: [10.1081/PLN-100106981](https://doi.org/10.1081/PLN-100106981)

FAGERIA, N. K. Influence of Lime and Gypsum on Yield and Yield Components of Soybean and Changes in Soil Chemical Properties, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 45:3, 271-283, 2014. DOI: [10.1080/00103624.2013.861906](https://doi.org/10.1080/00103624.2013.861906)

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. **Adv. Agron.**, 99:345-431, 2008.

FIDALSKI, J.; ANTONIO TORMENA, C. Dinâmica da calagem superficial em um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p.235-247.2005. Disponível:< [tps://www.scielo.br/j/rbcs/a/hswtJTXPLpJLQLdgJNd5F7J/](https://www.scielo.br/j/rbcs/a/hswtJTXPLpJLQLdgJNd5F7J/)>.

FOIS, D. A. F. Resposta da soja ao gesso agrícola em plantio direto no Paraguai. **Rev. Ceres, Viçosa**, v. 65, n.5, p. 450-462, set/out, 2018.

FREIRIA, A.C. et al. Alterações em atributos químicos do solo pela aplicação de calcário na superfície ou incorporado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.30, n.2, p.285-291, 2008.

GUARÇONI, A; GUARÇONI, ANDRÉ. Saturação por bases para o cafeeiro baseada no ph do solo e no suprimento de Ca e Mg. **Coffee Science, Lavras**, v. 12, n. 3, p. 327 - 336, jul./set. 2017

HENDERSON, J.S. et al. Chemical and archaeological evidence for the earliest cacao beverages. **Proc Natl Acad Sci U S A**. 2007 Nov 27;104(48):18937-40. doi: 10.1073/pnas.0708815104. **Epub** 2007 Nov 16. PMID: 18024588; PMCID: PMC2141886.

HIRZEL, J. et al. Maize grain production, plant nutrient concentration and soil chemical properties in response to different residues levels from two previous crops. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science**, 70(4), 285–293. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1725619>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção agrícola municipal** – PAM. Disponível em: sidra.ibge.gov.br. 2017

INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION - ICCO. Disponível em: www.icco.org. 2022

LI, G.D. et al. Long-term surface application of lime ameliorates subsurface soil acidity in the mixed farming zone of south-eastern Australia. **Geoderma** 338, 236–246. 2019.

MICHELOUD M. G. et al. Factors affecting phenology of different *Citrus* varieties under the temperate climate conditions of Santa Fe, Argentina. **Rev. Bras. Frutic.** 40 (1). 2018 <https://doi.org/10.1590/0100-2945201831>

MIYAZAWA, M.; PAVAN M.A.; FRANCHINI J.C. 2002. Brazilian Archives of Biology and Technology. V. 45, N 3, 251-256. 2002.

MOTAMAYOR, J. C. et al. Cacao domestication I: The origin of the cacao cultivated by the Mayas. **Heredity**, v. 89, n. 5, p. 380 -386, nov. 2002.

NAKAYAMA, L.H.I.; SANTANA, C.J.L.; PINTO, L.R.M. Resposta do cacauero em desenvolvimento à calagem. **Revista Theobroma**, Ilhéus, v.18, n.4, p.229-240, 1988.

NATALE, W. et al. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal-SP**. v. 34, n. 4, p. 1294-1306. 2012.

NEIS, L. et al. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de goiás. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 34 (2) Abr 2010 <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200014>

NOGUEIROL, R. C. et al. Tropical soils with high aluminum concentrations cause oxidative stress in two tomato genotypes. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 3, 1 mar. 2015.

OLIVEIRA, B. D. A. et al. Spatiality of soil chemical attributes in a banana cultivation area in west bahia. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 1, p. 177-188, 2021. Universidade Federal Rural do Semi-Arido.

PAULETTI, V. et al. 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, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbcs/v38n2/14.pdf>.

RAMOS, Z.R. et al. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e ph na solução de um latossolo vermelho distrófico. **R. Bras. Ci. Solo**, 37:1018-1026, 2013.

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 24:797-805, 2000.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam ultisol from south brazilian campos. *Soil & Tillage Research* 180 (2018) 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.014>

ROCHA, I. T. M. Aluminum buffering in acid soil under mineral gypsum application. *Afr. J. Agric. Res.* Vol. 12(8), pp. 597-605, 2017.

ROSAS-PATIÑO, G.; PUENTES-PÁRAMO, Y. J.; MENJIVAR-FLORES, J. C. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. **Corpoica Ciencia y Tecnologia Agropecuaria**, v. 18, n. 3, p. 529-541, 2017. Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria Corpoica.

SANTOS, R.O.; FRANCO, L. B.; SILVA, S. A.; SODRÉ, G. A.; MENEZES, A. A. Spatial variability of soil fertility and its relation with cocoa yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 88-93, 2017. Departamento de Engenharia Agricola - UFCG/Cnpq.

Superintendências de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. SEI. Disponível em: https://www.sei.ba.gov.br/site/geoambientais/mapas/pdf/tipologia_climatica_segundo_koppen_2014.pdf.

SERAFIM, M.E. **Sistema conservacionista e de manejo intensivo na melhoria de atributos do solo para a cultura do cafeeiro**. 2011. 120 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

SNOECK, D. et al. **Cacao Nutrition and Fertilization**. In: Sustainable Agriculture Reviews. Montpellier: 2016. P. 3-35.

SOBRAL, L. F.; CINTRA, F. L. D.; Smyth, J. T. Lime and gypsum to improve root depth of orange crop in an ultisol of the coastal tablelands. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*, 13(SUPPL.0), 836–839. 2009. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662009000700004>

SORATTO, R.P. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:675-688, 2008.

GOMES DE SOUSA, D. M.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Circular Técnica 32 Uso de Gesso Agrícola nos Solos do Cerrado Planaltina, DF 2005. Disponível em: <www.cpac.embrapa.br>.

SOUZA JÚNIOR, J. O.; SODRÉ, G. A.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo, correção da acidez e recomendação de adubação para o cacauero**. In: SOUZA JÚNIOR, J. O. (org.). Cacau: cultivo, pesquisa e inovação. Ilhéus: Editus, 2018. P. 333-377. <https://doi.org/10.7476/9786586213188>

TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 573 p. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>

VICENSI, M. et al. Gypsum Rates and Splitting Under No-Till: Soil Fertility, Corn Performance, Accumulated Yield and Profits. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 2, p. 690 -702, 1 jun. 2020.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319-344.

WENNECK, G.S.et al. Correction of soil acidity with shell lime and dolomitic limestone in a Latossolo Vermelho distrófico in Paraná state, Brazil. **Idesia**, v. 39, n. , p. 53-57, 2021.

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, n. 2, p. 128-137, 2015. Universidade Federal De Goiás (UFG).

ZIGLIO, C. M.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Formas Orgânicas e Inorgânicas de Mobilização do Cálcio no Solo. *Braz. arch. biol. technol.* 42 (2), 1999. <https://doi.org/10.1590/S1516-89131999000200016>