



Stoichiometric ratios in the soil of native and forage areas in a seasonally dry tropical forest

Relações estequiométricas no solo de áreas nativas e forrageiras em floresta tropical sazonalmente seca

Mônica da Silva Santana^{1*}, Vanderlise Giongo², Vanessa Coelho da Silva³, Vanderson Coelho da Silva⁴, Alessandra Monteiro Salviano², Eunice Maia de Andrade⁵

Abstract: The availability of potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) in the soil affects the nutrition and productivity of the plant cover. The Ca:Mg, Ca:K and Mg:K stoichiometric ratios indicate the nutrient load balance in the soil. However, limited attention has been paid to providing a scientific basis for how changes in land use, especially the cultivation of forage, impacts the availability and reserves of base cations in semi-arid regions, since, in these environments, fertiliser is not used. Therefore, the aim of this study was to quantify the concentrations of soil K, Ca and Mg in areas of preserved Caatinga (PC), and areas where buffel grass (BG) has been cultivated for 40 years and Leucaena grass (LE) for 11 years. Four 100 x 100 cm trenches were opened in each type of plant cover and collections were made in the 0-5, 5-10, 10-15 and 15-20 cm layers. The concentrations of K, Ca and Mg and their ratios were determined and compared using the Mann-Whitney test. The soil under buffel grass showed higher concentrations of K and Mg, and a lower concentration of Ca. Compared to PC, LE presented a lower Ca content in the 0-5 cm layer only. BG had the lowest values for the Ca:Mg and Ca:K stoichiometric ratios due to depletion of the Ca. Despite being soluble and easily leached, K remained in the soil under each type of cover, favoured by the semi-arid climate. Soil Ca, which is exported due to grazing of the produced biomass, should be replaced so as not to compromise the support capacity of seasonally dry tropical environments through the cultivation of forages.

Key words: Calcium. Support capacity. Soil fertility. Magnesium. Potassium.

Resumo: A disponibilidade de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no solo influencia na nutrição e produtividade das coberturas vegetais. As relações estequiométricas Ca:Mg, Ca:K e Mg:K indicam o equilíbrio das cargas no solo. Entretanto, limitada atenção tem sido dispensada para prover as bases científicas de como a mudança do uso da terra, principalmente com o cultivo de forrageiras, impacta a disponibilidade e a reserva de cátions básicos no Semiárido, visto que nestes ambientes a adubação não é utilizada. Assim, objetivou-se quantificar as concentrações de K, Ca e Mg do solo nas áreas de Caatinga preservada (CP) e cultivadas com capim buffel (CB) por 40 anos e leucena (LE) por 11 anos. Em cada cobertura vegetal foram abertas quatro trincheiras, dimensão de 100 x 100 cm, e as coletas realizadas nas camadas: 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm. Concentrações de K, Ca e Mg e suas relações foram determinadas e comparadas pelo teste Mann-Whitney. O solo sob capim buffel apresentou maiores concentrações de K e Mg e menor de Ca. A LE apresentou apenas na camada 0-5 cm menor teor de Ca que a CP. O CB apresentou os menores valores nas relações estequiométricas Ca:Mg e Ca:K devido à depleção de Ca. O K, embora solúvel e facilmente lixiviado, permaneceu no solo em todos os usos, favorecido pelo clima semiárido. Deve haver reposição de Ca no solo exportado pelo pastejo da biomassa produzida para não comprometer a capacidade suporte de ambientes tropicais sazonalmente secos, com o cultivo de forragens.

Palavras-chave: Cálcio. Capacidade suporte. Fertilidade do solo. Magnésio. Potássio.

*Corresponding author

Submitted for publication on 19/04/2020, approved on 09/06/2020 and published on 31/07/2020

¹Bióloga, Doutoranda em Ecologia e Recursos Naturais, Depto. Ciências Biológicas, Universidade Federal do Ceará, UFC, Fortaleza - CE. E-mails: monicassantana12@gmail.com; monica_ssantana@hotmail.com

²Enga. Agrônoma, Pesquisadora, Embrapa Semiárido, Petrolina - PE. E-mails: vanderlise.giongo@embrapa.br; alessandra.salviano@embrapa.br

³Bióloga, Mestranda, Depto. Ciências Biológicas, Universidade de Pernambuco, UPE, Petrolina-PE. E-mail: vanessacoelho1997@outlook.com

⁴Biólogo, Graduando, Depto. Ciências Biológicas, Universidade de Pernambuco, UPE, Petrolina-PE. E-mail: vanderson.coelho2000@gmail.com

⁵Enga. Agrônoma, Profª. do PPG em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Ceará, UFC, Fortaleza - CE; Profª. Visitante da Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró-RN. E-mail: eandrade.ufc@gmail.com

INTRODUCTION

The removal of native vegetation together with intensive land use promotes a reduction in the natural fertility of the soil and the quality of the environment (BRONICK; LAL, 2005; FREITAS *et al.*, 2014). When agricultural crops exceed the support capacity of ecosystems, it becomes necessary to add external inputs to ensure the desired productivity (MATIAS *et al.*, 2015; GOULD *et al.*, 2016). Potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg), together with sodium (Na), make up the base cations in the soil (CHAGANTI; CULMAN, 2018). In plants, the nutrients K, Ca and Mg remain in the form of ions in the solutions found in the cytosol and/or vacuoles, or linked to carbon compounds in the cell structure (SENBAYRAM *et al.*, 2015; TANG; LUAN, 2017). A lack of these nutrients in the soil results in poor plant nutrition and a low net primary production in ecosystems.

Different plant species have specific macronutrient requirements. Nutrient cycling in preserved environments ensures the nutritional replacement of K, Ca and Mg in the soil, which in turn makes them available to the vegetation (GRANSEE; FÜHRS, 2013; ROWLEY *et al.*, 2018). The stoichiometric ratios between base cations (i.e. Ca:Mg, Ca:K and Mg:K) are essential for understanding the balance of nutrient loads in the soil that directly influence the productivity of the different types of plant cover (SALVADOR *et al.*, 2011).

Among the species grown for animal feed in the semi-arid region of Brazil, the exotic species, buffel grass (*Cenchrus ciliaris* L.) and leucaena (*Leucena leucocephala* L.), have been used by producers. *Cenchrus ciliaris* L. is a grass that originated in Africa and spread quickly around the world during the early 20th century as a drought-resistant plant and a source of protein for feed (MARSHALL *et al.*, 2012); while *Leucena leucocephala* L. is native to Central America and employed in several countries in agrosilvopastoral systems, where it results in increases in animal productivity (ESCALANTE, 2019).

The nutrient concentration in the soil under native vegetation represents a condition of dynamic equilibrium in which addition and extraction rates are equal (JOBAGY; JACKSON, 2004). In environments cultivated with forage species, the rate of extraction may be higher than that of addition, represented by animals grazing in areas of buffel grass and the cutting down of leucaena to produce forage in agricultural systems where no fertiliser is used. The result is the depletion of soil nutrients over time. The support capacity and the characteristics of extraction determine how long these crops can be grown without the addition of nutrients from an external source.

INTRODUÇÃO

A retirada da vegetação nativa aliada ao uso intensivo do solo promove a diminuição da sua fertilidade natural e da qualidade do ambiente (BRONICK; LAL, 2005; FREITAS *et al.*, 2014). Quando os cultivos agrícolas excedem a capacidade suporte dos ecossistemas, há a necessidade de adição de insumos externos para garantir a produtividade esperada (MATIAS *et al.*, 2015; GOULD *et al.*, 2016). Potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), juntamente com o sódio (Na), formam os cátions básicos do solo (CHAGANTI; CULMAN, 2018). Nas plantas, os nutrientes K, Ca e Mg permanecem na forma de íons nas soluções que se encontram no citosol e/ou vacúolos, ou ligados a compostos de carbono estruturando as células (SENBAYRAM *et al.*, 2015; TANG; LUAN, 2017). A falta desses nutrientes no solo acarreta a má nutrição das plantas e a baixa produção primária líquida dos ecossistemas.

Diferentes espécies vegetais possuem necessidades específicas dos macronutrientes. A ciclagem de nutrientes em ambientes preservados garante a reposição nutricional de K, Ca e Mg para os solos, que por sua vez se disponibilizados para a vegetação (GRANSEE; FÜHRS, 2013; ROWLEY *et al.*, 2018). As relações estequiométricas entre os cátions básicos (i.e. Ca:Mg, Ca:K e Mg:K) são fundamentais para compreender o equilíbrio das cargas no solo, que influenciam diretamente na produtividade das coberturas vegetais (SALVADOR *et al.*, 2011).

Dentre as espécies cultivadas para alimentação animal no Semiárido brasileiro, as espécies exóticas capim buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) e leucena (*Leucena leucocephala* L.) vêm sendo utilizadas pelos produtores. O *Cenchrus ciliaris* L. é uma gramínea originária da África e foi amplamente difundida pelo mundo no início do século XX, como planta resistente a seca e fonte proteica na alimentação (MARSHALL *et al.*, 2012). Enquanto a *Leucena leucocephala* L. é nativa da América Central e utilizada em vários países em sistemas agrossilvipastoris, permitindo aumento da produtividade animal (ESCALANTE, 2019).

As concentrações dos nutrientes no solo da vegetação nativa representam uma condição de equilíbrio dinâmico, em que as taxas de adição e extração são iguais (JOBAGY; JACKSON, 2004). Nos ambientes cultivados com espécies forrageiras, a taxa de extração pode ser maior do que a de adição, representada pelo pastejo dos animais nas áreas de capim buffel e pelo corte da leucena para produção de forragem, em sistemas agrícolas que não recebem adubação. Assim, acarreta a depleção de nutrientes do solo ao longo do tempo. A capacidade de suporte e as características da extração determinarão o tempo que esses cultivos podem ser realizados sem a adição de nutrientes de uma fonte externa.

In semi-arid environments, buffel grass can produce 7,207 kg ha⁻¹ yr⁻¹ dry matter (PINHO *et al.*, 2013), which contain an average of 2.44, 1.69 and 4.87 g kg⁻¹ of K, Ca and Mg respectively (LEITE *et al.*, 2006), while leucaena, which produces between 1,311 and 7,043 kg ha⁻¹ yr⁻¹ depending on the type of cultivar (SILVA, 1992), contains an average of 17.9, 10.8 and 4.4 g kg⁻¹ of K, Ca and Mg respectively. The removal of biomass from these forages can result in a decrease in the levels of nutrients in the soil.

Based on the above, the hypothesis is that after 40 years cultivating buffel grass and 11 years cultivating leucaena, the nutritional support capacity of the environment where no fertiliser was used was exceeded, resulting in depletion of the K, Ca and Mg content of the soil. As such, the aim of this study was to quantify the concentrations of K, Ca and Mg and their stoichiometric ratios in areas of buffel and leucaena grass in a Red-Yellow Argisol, and to compare them with an area of preserved Caatinga (seasonally dry tropical forest) representing a condition of dynamic equilibrium, in order to outline strategies for soil management and conservation, while maintaining the support capacity of the environment.

MATERIAL AND METHODS

The study was carried out in the experimental area of Embrapa Semiárido, located in the city of Petrolina, Pernambuco (PE) (09°09' S, 40°22'W, altitude 366 m) (Figure 1). The soil in the area is classified as a Argisol eutrophic plinthosolic (SiBCS, 2018) or Acrisol (WRB, 2014) with a light to medium sandy texture, hyperxerophytic caatinga phase, and flat/gently rolling terrain. According to the Köppen classification, the climate in the region is type BSh', hot semi-arid with average temperatures during the coldest month above 18 °C, and a mean air temperature of 26.5 °C, relative humidity of 66%, mean annual rainfall in the region of 541 mm, and annual class-A pan evaporation of 2,500 mm yr⁻¹, with the monthly maximum not exceeding 400 mm (Figure 2).

Em ambientes semiáridos, o capim buffel chega a produzir 7.207 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca (PINHO *et al.*, 2013), que contém em média 2,44, 1,69 e 4,87 g kg⁻¹ de K, Ca e Mg, respectivamente (LEITE *et al.*, 2006). Enquanto a leucena, que produz entre 1.311 e 7.043 kg ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo do tipo de cultivar (SILVA, 1992), contém em média 17,9, 10,8 e 4,4 g kg⁻¹ de K, Ca e Mg, respectivamente, do sistema. A retirada da biomassa dessas forrageiras pode acarretar diminuição dos teores de nutrientes no solo.

Nesse sentido, a hipótese é que 40 anos de cultivo de capim buffel e 11 anos de leucena excederam a capacidade de suporte nutricional do ambiente sem a adubação, promovendo a depleção dos teores de K, Ca e Mg no solo. Portanto, objetivou-se com o presente trabalho quantificar as concentrações de K, Ca e Mg e suas relações estequiométricas nas áreas de capim buffel e leucena em ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELO e compará-las com a Caatinga preservada (floresta tropical sazonalmente seca), por representar uma condição de equilíbrio dinâmico. Para traçar estratégias de manejo e conservação do solo, considerando a manutenção da capacidade de suporte do ambiente.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no campo experimental da Embrapa Semiárido, localizado no município de Petrolina-PE (09°09'S, 40°22'W, altitude 366 m) (Figura 1). O solo da área é classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico plintossólico A fraco textura arenosa/média fase caatinga hiperxerófila relevo plano/suave ondulado (SiBCS, 2018). A região apresenta clima do tipo BSh', segundo a classificação climática de Köppen, semiárido quente com temperaturas médias do mês mais frio superior a 18 °C. A temperatura média do ar de 26,5 °C, umidade relativa do ar de 66%, precipitação média anual da região de 541 mm e evaporação do tanque classe A anual equivalente a 2.500 mm ano⁻¹, e a máxima mensal não ultrapassa 400 mm (Figura 2).

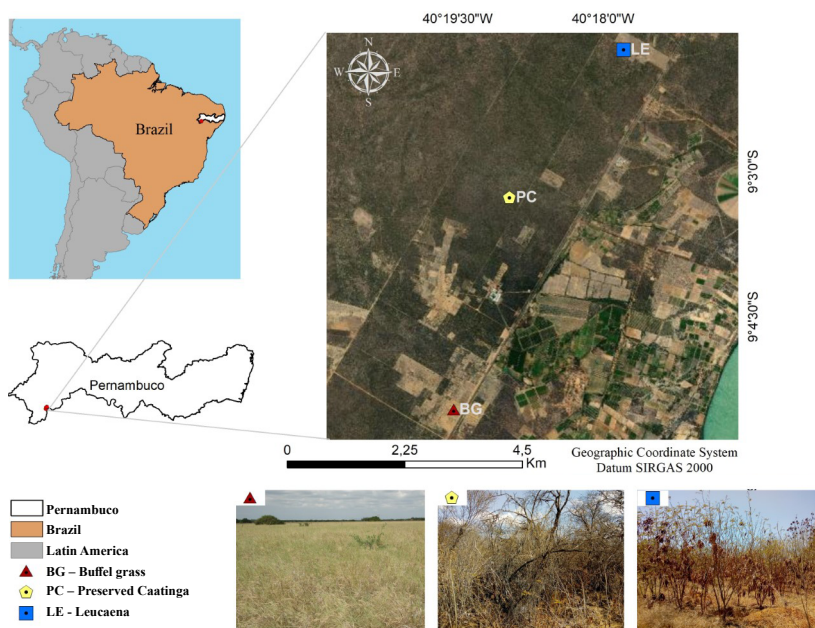


Figure 1 - Study area located in the experimental area of Embrapa Semiárido, Petrolina, PE.

Figura 1 - Área de estudo localizada na Estação experimental da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE.

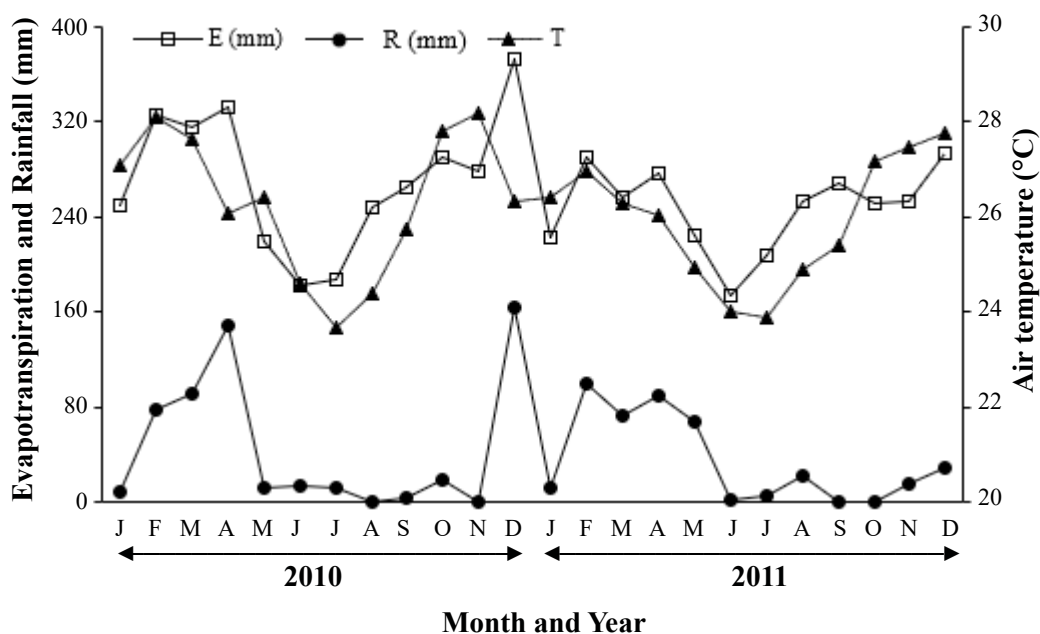


Figure 2 - Climate data from the study area for the years of collecting soil samples.

Figura 2 - Dados climatológicos da área de estudo nos anos de coleta das amostras de solo.

Between 2010 and 2011, soil samples were collected from areas under three types of plant cover: (1) Preserved Caatinga (PC), seasonally dry tropical forest; (2) Buffel grass (BG) - *Cenchrus ciliaris* L. under 40 years cultivation, with animals (i.e. cattle and sheep) grazing in the area during the dry season; (3) Leucena (LE) - *Leucena leucocephala* L. under 11 years cultivation, the biomass being periodically removed for animal feed. No type of fertiliser has been applied since the areas were set up. In the area of buffel grass, cattle and sheep were introduced to feed on the pasture, whereas in the area of leucaena, the biomass was cut to feed the animals from troughs. Four trenches were opened in each area at a minimum distance of 10 m, randomised into transects along the central area of each type of plant cover. Soil samples were collected from each trench in the 0-5, 5-10, 10-15 and 15-20 cm layers.

The samples were then air-dried and sieved (2 mm mesh) to obtain air-dried fine soil (ADFS). The potassium concentration was determined by flame photometry after extraction with Mehlich-1 solution. The calcium and magnesium content was extracted in KCl solution (1 mol L⁻¹) and determined by atomic absorption spectrophotometry, flame mode (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A physical and chemical characterisation of the soil was also carried out using methods proposed by Teixeira *et al.* (2017) (Table 1).

To assess the normality of the data for each layer of soil, the Shapiro-Wilk test ($p < 0.05$) was applied using the R v3.4.0 software. Data that did not meet the criterion for normality were compared by the non-parametric Mann-Whitney test ($p < 0.05$), using the Past v3.20 software.

Entre os anos de 2010 e 2011 foram coletadas amostras de solo em áreas com três coberturas vegetais: (1) Caatinga Preservada (CP), floresta tropical sazonalmente seca; (2) Capim Buffel (CB) - *Cenchrus ciliaris* L. com 40 anos de cultivo, animais (i.e. bovinos e ovinos) pastam na área no período de seca; (3) Leucena (LE) - *Leucena leucocephala* L. com 11 anos de cultivo, sendo a biomassa periodicamente retirada para alimentar animais. Desde a instalação das áreas, não houve a aplicação de nenhum tipo de fertilizante. Nas áreas de capim buffel, bovinos e ovinos são introduzidos para se alimentarem do pasto, já na área de leucena, a biomassa é cortada para alimentar os animais no cocho. Foram abertas quatro trincheiras em cada cobertura vegetal, com distância mínima de 10 m, aleatorizadas em transectos na área central de cada uso. Amostras de solo foram coletadas em cada trincheira nas camadas: 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm.

Em seguida, as amostras foram secas ao ar e passadas em peneira (malha 2 mm) para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA). As concentrações de potássio foram determinadas por fotometria de chama após extração com solução Mehlich⁻¹. Os teores de cálcio e magnésio foram extraídos em solução de KCl (1 mol L⁻¹) e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, modo chama (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A caracterização física e química do solo também foi realizada seguindo os métodos propostos por Teixeira *et al.* (2017) (Tabela 1).

Para avaliar a normalidade dos dados, para cada camada de solo, foi realizado o teste de Shapiro Wilk ($p < 0,05$) usando o programa R versão 3.4.0. Os dados que não atenderam ao critério de normalidade foram comparados pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney ($p < 0,05$), empregando-se o programa Past versão 3.20.

Table 1 - Physical characterisation of the Argisol/Acrisol eutrophic plinthosolic, Petrolina, PE, Brazil, 2011

Tabela 1 - Caracterização física do Argissolos Vermelho-amarelos Eutrófico plintossólico, Petrolina, PE, Brasil, 2011

| Layer cm | Density g cm ³ | Sand | Silt | Clay |
|-------------|------------------------------|--------------------|--------|-------|
| | | g kg ⁻¹ | | |
| 0-5 | 1.29 | 666.67 | 292.66 | 40.67 |
| 5-10 | 1.34 | 682.50 | 260.12 | 47.38 |
| 10-15 | 1.35 | 701.61 | 246.61 | 51.77 |
| 15-20 | 1.38 | 691.99 | 247.06 | 60.95 |

*Average of four replications.

*Médias de quatro repetições.

RESULTS

The area of buffel grass showed the highest K concentration in the upper surface layers (Figure 3). Only in the final layer sampled (15-20 cm) was there no significant difference between plant cover. The variation in K between layers was smaller in the preserved Caatinga (0.07 to 0.11 g kg⁻¹), followed by the leucaena (0.06 to 0.12 g kg⁻¹). In the area of buffel grass, the K concentration ranged from 0.11 to 0.20 g kg⁻¹ between layers (Figure 3).

In the surface layer (0-5 cm), the leucaena (0.3 g kg⁻¹) showed a calcium content significantly lower than that of the preserved caatinga (0.5 g kg⁻¹) (Figure 4). In this layer, the buffel grass did not show any significant difference in relation to the other types of plant cover, whereas in the 10-15 cm layer, the Ca concentration in the buffel grass (0.18 g kg⁻¹) was significantly lower compared to the leucaena (0.28 ± 0.02 g kg⁻¹), but was no different to that of the preserved Caatinga (0.28 ± 0.04 g kg⁻¹) (Figure 4).

In the other soil layers (5-10 and 15-20 cm) there was no significant difference between plant cover. As such, cultivating buffel grass for 40 years did not alter the calcium concentration in the soil. For the leucaena, the Ca content was depleted in the first layer of soil only.

RESULTADOS

A área do capim buffel apresentou maior concentração de K nas camadas mais superficiais (Figura 3). Apenas na última camada amostrada (15-20 cm) não houve diferença significativa entre as coberturas vegetais. A variação de K entre as camadas foi menor na Caatinga preservada (0,07 a 0,11 g kg⁻¹), seguida pela leucena (0,06 a 0,12 g kg⁻¹). Na área do capim buffel, por sua vez, a concentração variou de 0,11 a 0,20 g kg⁻¹ entre as camadas (Figura 3).

Na camada superficial (0-5 cm), a leucena (0,3 g kg⁻¹) apresentou teor de cálcio significativamente inferior à caatinga preservada (0,5 g kg⁻¹) (Figura 4). Nessa camada, o capim buffel não apresentou diferença significativa em relação às demais coberturas vegetais. Enquanto na camada 10-15 cm, o capim buffel apresentou, significativamente, menor concentração de Ca (0,18 g kg⁻¹) quando comparado com a leucena (0,28 ± 0,02 g kg⁻¹), mas não diferiu da Caatinga preservada (0,28 ± 0,04 g kg⁻¹) (Figura 4).

Nas demais camadas do solo (5-10 e 15-20 cm) não houve diferença significativa entre as coberturas vegetais. Desse modo, o cultivo, por 40 anos, de capim buffel não alterou as concentrações de cálcio no solo. No cultivo com leucena, observou-se depleção do teor de Ca somente na primeira camada do solo.

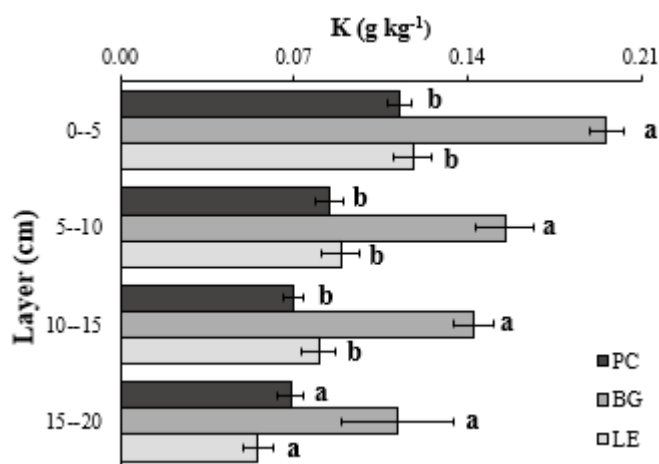


Figure 3 - Potassium concentration (standard error) within each vegetal cover: preserved caatinga (PC), buffel grass (BG) and leucaena (LE) in a Argisol/Acrisol, in Petrolina, PE, Brazil, 2011.

*Lowercase letters compare potassium concentrations by the Mann-Whitney test ($p < 0.05$).

Figura 3 - Concentrações de potássio (erro padrão) dentro de cada cobertura vegetal: caatinga preservada (CP), capim buffel (CB) e leucena (LE) em ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS em Petrolina-PE, Brasil, 2011.

*Letras minúsculas comparam as concentrações de potássio pelo teste de Mann-White ($p < 0,05$).

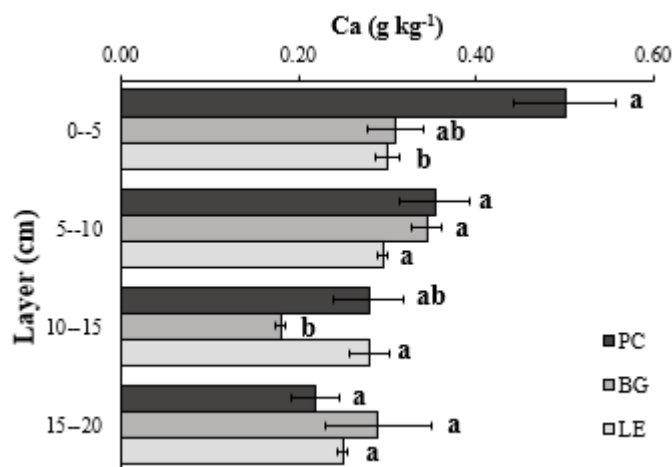


Figure 4 - Calcium concentration (standard error) within each vegetal cover: preserved caatinga (PC), buffel grass (BG) and leucaena (LE) in a Argisol/Acrisol, in Petrolina, PE, Brazil, 2011.

*Lower case letters compare calcium concentrations by the Mann-Whitney test ($p < 0.05$).

Figura 4 - Concentrações de cálcio (erro padrão) dentro de cada cobertura vegetal: caatinga preservada (CP), capim buffel (CB) e leucena (LE) em ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS em Petrolina-PE, Brasil, 2011.

*Letras minúsculas comparam as concentrações de potássio pelo teste de Mann-White ($p < 0,05$).

There was a significant difference ($p < 0.05$) in the Mg concentrations in the soil between the types of plant cover in the 5-10 and 10-15 cm layers (Figure 5). The area of buffel grass showed greater levels of magnesium (0.14 g kg^{-1}) in the soil than did the areas of preserved Caatinga and leucaena (both 0.08 g kg^{-1}) in the 5-10 cm layer, also differing from the preserved Caatinga in the next layer (10-15 cm). In the other layers (0-5 and 15-20 cm), there was no significant difference in mean value for the Mg content of the soil between the systems (Figure 5).

The Ca:Mg ratio in the soil ranged from 2.26 to 4.75 (Table 2). The area of buffel grass showed the lowest Ca:Mg ratios in the first three layers, while in the areas of preserved Caatinga and Leucena the ratios were similar. The Ca:K ratio in the soil followed a similar trend to the Ca:Mg ratio, with the cover of buffel grass showing the lowest values, except for the final layer (15-20 cm), where the Caatinga showed a lower ratio than the other types of cover (Table 2). There was a significant difference ($p < 0.05$) in the Mg:K ratio of the soil in the 10-15 cm layer only, where the buffel grass continued to show the lowest ratio (Table 2).

Em relação às concentrações de Mg no solo (Figura 5), houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre as coberturas vegetais nas camadas 5-10 e 10-15 cm. A área do capim buffel apresentou maior teor de magnésio ($0,14 \text{ g kg}^{-1}$) no solo que as áreas da Caatinga preservada e da leucena (ambas com $0,08 \text{ g kg}^{-1}$) na camada 5-10 cm, diferindo também da Caatinga preservada na camada seguinte (10-15 cm). Nas demais camadas (0-5 e 15-20 cm) não houve diferença significativa para as médias dos teores de Mg no solo entre os sistemas (Figura 5).

A relação Ca:Mg no solo variou de 2,26 a 4,75 (Tabela 2). A área do capim buffel apresentou as menores relações de Ca:Mg nas três primeiras camadas, enquanto nas áreas de Caatinga preservada e leucena essas relações são semelhantes. A relação Ca:K do solo seguiu tendência semelhante ao Ca:Mg, com a cobertura do capim buffel apresentando os menores valores, com exceção da última camada (15-20 cm), em que a Caatinga apresentou menor relação que as demais coberturas (Tabela 2). Na relação Mg:K do solo, só houve diferença significativa ($p < 0,05$) na camada 10-15 cm, onde o capim buffel seguiu apresentando a menor relação (Tabela 2).

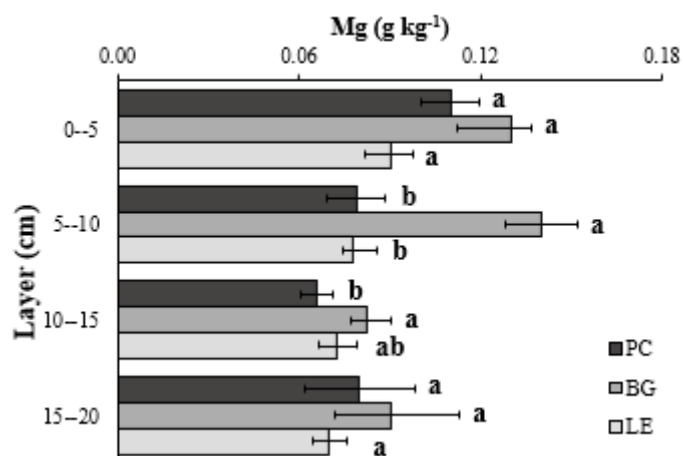


Figure 5 - Magnesium concentration (standard error) within each vegetal cover: preserved caatinga (PC), buffel grass (BG) and leucaena (LE) in a Argisol/Acrisol, in Petrolina, PE, Brazil, 2011.

*Lower case letters the compare magnesium concentrations by the Mann-Whitney test ($p < 0.05$).

Figura 5 - Concentrações de magnésio (erro padrão) dentro de cada cobertura vegetal: caatinga preservada (CP), capim buffel (CB) e leucena (LE) em ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS em Petrolina-PE, Brasil, 2011.

*Letras minúsculas comparam as concentrações de magnésio pelo teste de Mann-White ($p < 0,05$).

Table 2 - Mean values and standard error of the stoichiometric ratios of calcium, magnesium and potassium in a Argisol/Acrisol under preserved caatinga (PC), buffel grass (BG) and leucaena grass (LE), in Petrolina, PE

Tabela 2 - Médias e erro padrão das relações estequiométricas de cálcio, magnésio e potássio em ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS sob as coberturas vegetais caatinga preservada (CP), capim buffel (CB) e leucena (LE), Petrolina-PE

| Layer cm | Ca:Mg | | | Ca:K | | | Mg:K | | |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | PC | BG | LE | PC | BG | LE | PC | BG | LE |
| 0-5 | 4.75 (0.74) a | 2.45 (0.15) b | 3.64 (0.24) a | 4.50 (0.55) a | 1.58 (0.14) b | 2.55 (0.05) a | 1.01 (0.10) a | 0.66 (0.08) a | 0.71 (0.03) a |
| 5-10 | 4.66 (0.52) a | 2.51 (0.33) b | 3.65 (0.08) a | 4.14 (0,34) a | 2.24 (0.09) b | 3.39 (0.26) a | 0.98 (0.15) a | 0.95 (0.15) a | 0.93 (0.06) a |
| 10-15 | 4.34 (0.73) a | 2.26 (0.14) b | 3.73 (0.07) a | 3.96 (0,48) a | 1.28 (0.07) b | 3.53 (0.27) a | 0.95 (0.04) a | 0.58 (0.07) b | 0.95 (0.07) a |
| 15-20 | 3.95 (0.77) a | 3.07 (0.36) a | 3.39 (0.26) a | 3.22 (0,30) b | 3.20 (1.15) ab | 4.67 (0.54) a | 1.08 (0.20) a | 1.00 (0.28) a | 1.37 (0.06) a |

*Lowercase letters compare the stoichiometric ratios of calcium, magnesium and potassium by the Mann-Whitney test ($p < 0.05$).

*Letras minúsculas comparam as relações estequiométricas de cálcio, magnésio e potássio pelo teste de Mann-White ($p < 0,05$).

DISCUSSION

Buffel grass can become established in soils of low natural fertility (MARSHALL *et al.*, 2012), reflecting the smaller input of nutrients in the semi-arid region (LEITE *et al.*, 2016) and the extent to which it is found around the world (Table 3). However, the higher potassium concentrations in soil cultivated with buffel grass can be attributed to the greater plant cover afforded by the crop, which reduces losses through leaching, and to animal grazing in the area, which increases the input of nutrients through animal waste, contributing to the cycling and maintenance of these nutrients in the soil system.

Even after 40 years cultivation, the buffel grass continued to show higher levels of potassium in the surface layers of the soil; if species adapt well to the nutritional requirements of a certain element, with intense root activity and nutrient deposition through animal excreta, a greater amount remains in the soil (BOWEN; CHUDLEIGH, 2018). Potassium, although a very soluble and easily leached element, remained in the soil system under each type of plant cover, favoured by the semi-arid climate. Even after 11 years cultivation, the *Leucaena* showed K concentrations similar to those of the native forest. *Leucaena* is drought tolerant and has a developed root system (SILVA, 1992); cycling is via the fall of folioles throughout the year, which helps K to remain in the system.

DISCUSSÃO

O capim buffel pode se estabelecer em solos com baixa fertilidade natural (MARSHALL *et al.*, 2012), refletindo no menor aporte de nutrientes no Semiárido (LEITE *et al.*, 2016) e amplitude ao redor do mundo (Tabela 3). Entretanto, a maior concentração de potássio no solo cultivado com capim buffel pode ser atribuída aos fatores com maior cobertura vegetal proporcionada pela cultura, que reduz as perdas por lixiviação; bem como ao pastejo de animais na área, que aumenta o aporte de nutrientes pela deposição de dejetos animais, contribuindo para a ciclagem e manutenção desses nutrientes no sistema solo.

Mesmo com 40 anos de cultivo o capim buffel seguiu apresentando maiores teores de potássio nas camadas superficiais do solo, pois, se há boa adaptação das espécies à necessidade nutricional de determinado elemento, atividade radicular intensa e deposição de nutrientes por excretas animais, este permanece em maior quantidade no solo (BOWEN; CHUDLEIGH, 2018). O potássio, embora seja um elemento bastante solúvel e facilmente lixiviado, permaneceu no sistema solo em todas as coberturas vegetais, favorecido pelo clima semiárido. Mesmo com 11 anos de cultivo, a *Leucaena* apresentou concentrações de K semelhantes à mata nativa. A *leucaena* é tolerante à seca com sistema radicular desenvolvido (SILVA, 1992) e ciclagem por meio das quedas dos folíolos ao longo do ano, o que favorece a permanência do K no sistema.

Table 3 - Variations in the concentrations of K, Ca and Mg exported in the aerial biomass of buffel grass and *Leucaena*

Tabela 3 - Variações das concentrações de K, Ca e Mg exportada na biomassa aérea de Capim buffel e *Leucaena*

| Nutrient | Buffel grass* | Leucaena** |
|----------|--------------------|------------|
| | g kg ⁻¹ | |
| K | 2.4 a 24.5 | 7.9 a 21.1 |
| Ca | 0.4 a 4.8 | 8 a 29 |
| Mg | 0.4 a 4.9 | 1.7 a 4.8 |

*Source: Ramírez *et al.*, 1995; Dessommes *et al.* 2003; Leite *et al.*, 2006.

**Source: Silva, 1992; Garcia, 1996.

Calcium in the soil can stabilise and boost the net primary production of soil organic carbon via the creation of exchange sites with functional organic groups (ROWLEY *et al.*, 2018). This increases the cation exchange capacity of the soil, maintaining or improving the chemical quality of soils under preserved caatinga. This area, considered a reference for assessing the changes caused by land use, showed a concentration of 0.5 g kg^{-1} in the 0-5 cm layer. Preserved caatinga is considered a balanced ecosystem due to the constant deposition of organic matter from plant biomass that is deposited on the ground throughout the year by the native vegetation. Even with a short rainy season, there is annual deposition of organic material in dry forests such as the Caatinga, which ensures sufficient nutrient input to maintain the productivity of the ecosystem (ARAÚJO FILHO, 2013). In areas of preserved Caatinga, animals, such as cattle, goats and sheep, have no access to plant material below the ground, and the rate of deposition and decomposition of organic residue remains balanced.

For the leucaena, the lower Ca concentration in the surface layer (0-5 cm) was due to the removal of aerial biomass from this forage for animal feed (Table 3), reducing the return of nutrients to the soil and the fertility of the environment (MILK *et al.*, 2006). The lower concentration of Ca under BG in the 10-15 cm layer, is due to the greater extraction of this element by the roots in this layer (MNIF; CHAIEB, 2009). In addition, a reduction in the addition of organic material on the surface, together with the low mobility of this element in the soil profile (RIEKERK, 1971), decreases the input of Ca to the subsurface layers (Table 3), altering the fertility throughout the soil profile.

This reduction in the calcium content of the soil takes place slowly in areas of pasture, since, after 40 years, the BG showed no significant differences ($p < 0.05$) to the PC. According to Jobbagy and Jackson (2004), Ca cycles more quickly in forests than in pasture, as such, calcium must be less deeply distributed under native forest than under pasture; a trend also seen in the results for the first layer (Figure 4).

Grasses such as buffel grass have simpler leaves and a C4 photosynthetic cycle, requiring less nutrients such as magnesium (MARSHALL *et al.*, 2012). In addition to nutrient deposition by the aerial biomass, decomposition of the root system contributes to nutrient cycling (SCHNEIDER; LYNCH, 2018), a process that may have influenced the higher concentrations of Mg in the area of buffel grass compared to the preserved Caatinga.

O cálcio presente no solo pode potencializar a produção primária líquida e estabilizar o carbono orgânico do solo, a partir da criação de sítios de troca com grupos orgânicos funcionais (ROWLEY *et al.*, 2018). Isso aumenta a capacidade de troca de cátions do solo, permitindo a manutenção ou melhoria da qualidade química dos solos sob caatinga preservada. Essa área, considerada referência para avaliação das alterações provocadas pelo uso do solo, apresentou concentração de $0,5 \text{ g kg}^{-1}$ na camada 0-5 cm. A caatinga preservada é considerada um ecossistema em equilíbrio devido à constante deposição de matéria orgânica proveniente da fitomassa que é depositada sobre o solo ao longo do ano pela vegetação nativa. Mesmo tendo uma época chuvosa curta, há deposição anual de material orgânico nas matas secas, como a Caatinga, que garante o aporte de nutrientes suficientes para manter a produtividade do ecossistema (ARAÚJO FILHO, 2013). Nas áreas preservadas da Caatinga, animais, como bovinos, caprinos e ovinos, não possuem acesso para consumir o material vegetal sob o solo, e as taxas de deposição e decomposição de resíduos orgânicos permanecem em equilíbrio.

No cultivo de leucena, a menor concentração de Ca na camada superficial (0-5 cm) ocorreu pela retirada de biomassa aérea dessa forrageira para alimentação dos animais (Tabela 3), reduzindo o retorno dos nutrientes ao solo e a fertilidade do ambiente (LEITE *et al.*, 2006). A menor concentração de Ca no CB, na camada 10-15 cm, é devida à maior extração deste elemento pelas raízes nessa camada (MNIF; CHAIEB, 2009). Além disso, a redução da adição de material orgânico na superfície associado à baixa mobilidade deste elemento no perfil do solo (RIEKERK, 1971) diminui o aporte de Ca nas camadas subsuperficiais (Tabela 3), alterando a fertilidade ao longo do perfil do solo.

A diminuição dos teores de cálcio no solo ocorre lentamente nas áreas de pastos, pois o CB com 40 anos de instalação não apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) com a CP. Segundo Jobbagy e Jackson (2004), o Ca cicla mais rápido em florestas que em pastagens, assim a distribuição de cálcio deve ser menos profunda na mata nativa do que em pastos. Tendência que se observa nos resultados da primeira camada (Figura 4).

Gramíneas como o capim buffel possuem folhas mais simples, com ciclo fotossintético C4, possuindo menor exigência de nutrientes, como o magnésio (MARSHALL *et al.*, 2012). Além da deposição de nutrientes pela biomassa aérea, a decomposição do sistema radicular contribui na ciclagem de nutrientes (SCHNEIDER; LYNCH, 2018), esse processo pode ter influenciado na maior concentração de Mg nas áreas de capim buffel quando comparados com a Caatinga preservada.

In addition to aspects related to the greater input and the smaller losses due to leaching afforded by the agrosystem of buffel grass discussed above, herbaceous plants, such as buffel grass, have a rapid life cycle where nutrients are input to the soil via the decomposition of fine roots (AQUINO *et al.*, 2017). This allows for greater cycling of nutrients previously absorbed by the plants, with elements such as Ca and Mg being once again available in the system. Considering that buffel grass has fasciculate roots and has been grown in the area for 40 years, the surface roots reduce the loss of such nutrients as Mg and K through leaching, whereas the *Leucaena*, which is used as a source of protein for animals (ESCALATE, 2019), presented Mg concentrations similar to the preserved caatinga. This result shows that the nutritional requirement for Mg is low in *Leucaena* (Table 3), because despite biomass being extracted for animal feed, the levels of Mg do not differ from those of the native forest. Magnesium shows high mobility in the soil and undergoes several cycling processes in ecosystems, whether native or anthropic, because of this, for agricultural systems to be sustainable, the Mg concentration needs to be considered (GRANSEE; FÜHRS, 2013; SENBAYRAM *et al.*, 2015).

A Ca:Mg ratio of around 3:1 has shown greater efficiency for increasing dry matter and nutrient absorption (SALVADOR *et al.*, 2011). The lower Ca:Mg and Ca:K ratio seen in the buffel grass was due to the Mg and K concentrations being maintained in the soil under this cover. Buffel grass exports a small amount of Mg and K to the plant tissue, leaving them available in the soil. Nutrients are also added via the excreta of animals grazing in the area of buffel grass, as well as from the nutrient cycling of the fine roots. Ca uptake in the plant tissue was higher (LEITE *et al.*, 2006; MARSHALL *et al.*, 2012), thereby reducing its concentration in the soil (Figure 4).

The Mg:K ratio shows that there is a greater amount of K compared to Mg, since this ratio varied from 0.58 to 1.37 between each layer and type of cover. Only the 0-5 cm layer of preserved Caatinga and the 15-20 cm layer of the three types of cover under evaluation showed values equal to or greater than 1, demonstrating that 67% of the layers have a lower concentration of Mg than K.

Além dos aspectos relacionados ao maior aporte e às menores perdas por lixiviação proporcionadas pelo agrossistema do capim Buffel, já discutidos anteriormente, plantas herbáceas, como o buffel, possuem ciclo de vida rápido com aporte de nutrientes ao solo pela decomposição das raízes finas (AQUINO *et al.*, 2017). Isso permite maior ciclagem de nutrientes já absorvidos pelas plantas disponibilizando novamente elementos como Ca e Mg no sistema. Considerando que o capim buffel possui raízes fasciculadas e sendo cultivado na área há 40 anos, as raízes superficiais diminuíram as perdas de nutrientes, como Mg e K, pelo processo de lixiviação. Enquanto a *Leucena*, que é utilizada como fonte proteica para os animais (ESCALATE, 2019), apresentou concentrações de Mg semelhantes à caatinga preservada. Esse resultado indica que a exigência nutricional de Mg pela *Leucena* é baixa (Tabela 3), pois, mesmo a sua biomassa sendo extraída para alimentação animal, os teores não diferenciaram da mata nativa. O magnésio possui alta mobilidade no solo e passa por diversos processos de ciclagem nos ecossistemas, sejam eles nativos ou antropizados, por isso sua concentração precisa ser considerada para que os sistemas agrícolas sejam sustentáveis (GRANSEE; FÜHRS, 2013; SENBAYRAM *et al.*, 2015).

A relação Ca:Mg em torno de 3:1 vem demonstrando maior eficiência para incrementos de massa seca e absorção de nutrientes (SALVADOR *et al.*, 2011). A menor relação Ca:Mg e Ca:K observada no capim buffel foi devido à manutenção da concentração de Mg e K no solo nessa cobertura. O capim buffel exporta pouca quantidade de Mg e K para seus tecidos vegetais, deixando-os disponíveis no solo. Há também entrada de nutrientes pelas excretas dos animais que pastejam na área do capim buffel, bem como pela ciclagem de nutrientes das raízes finas. A absorção de Ca em seus tecidos foi maior (LEITE *et al.*, 2006; MARSHALL *et al.*, 2012) e por isso sua concentração no solo foi reduzida (Figura 4).

A relação Mg:K indica que há maior quantidade de K em comparação ao Mg, já que essa relação variou de 0,58 a 1,37 entre todas as camadas e coberturas. Apenas a camada 0-5 cm da Caatinga preservada e 15-20 cm das três coberturas avaliadas apresentaram valores iguais ou maiores que 1, demonstrando que em 67% das camadas ocorre menor concentração de Mg que K.

Studies of soil fertility conducted in the late 19th and early 20th centuries showed that an ideal soil should have 65% Ca, 10% Mg and 5% K (BEAR *et al.*, 1945). Later studies suggested a range of variation for these elements, such as 60 to 75% for Ca, 10 to 20% for Mg, and 2 to 5% for K (ALBRECHT, 1975). In the present study, considering only the three elements (Ca, Mg and K), we obtained a mean value between the different types of land use and layers of 60% Ca, 18% Mg and 21% K, showing that in general there is a higher K content than Mg content in the soil under evaluation. Soil aggregate stability benefits when the cations follow the order: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, since Ca and Mg bind to the clay and carbon particles, improving the soil structure; while K in greater quantities can limit the absorption of Ca and Mg from the soil (BRONICK; LAL, 2005; CHAGANTI; CULMAN, 2018).

CONCLUSIONS

The Ca concentration in the soil was reduced locally by the buffel grass (in the 10-15 cm layer) and leucaena (0-5 cm) compared to the area of preserved caatinga;

Cultivating buffel grass maintained the levels of K and Mg in the soil, and shows that the ability for cycling these elements under this type of cover is good, maintaining them and/or adding them to the system by means of animal excretion, and reducing losses through leaching;

The stoichiometric ratios under evaluation were lower in the buffel grass due to the greater extraction of Ca;

The Mg:K ratio points to a greater concentration of K in the soils under evaluation, regardless of the production system installed;

The amount of Ca removed by the export of forage biomass should be restored to the soil so as not to compromise the availability of this nutrient and the productivity of the plant cover.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido) for financing this research through the SEG MP02.14.08.002.00.00 project, and for providing the necessary structure and materials. The authors would also like to thank the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001, for granting scholarships to the students and researchers.

Os estudos de fertilidade do solo realizados no final do século XIX e início do XX indicaram que um solo ideal deveria ter 65% de Ca, 10% de Mg e 5% de K (BEAR *et al.*, 1945). Estudos posteriores sugeriram uma faixa de variação desses elementos, como 60 a 75% de Ca, 10 a 20% de Mg, 2 a 5% de K (ALBRECHT, 1975). No nosso estudo, considerando apenas os três elementos (Ca, Mg e K), obtivemos uma média entre os usos e camadas de 60% de Ca, 18% de Mg e 21% de K, indicando que no geral há maior teor de K que Mg nos solos avaliados. A estabilidade de agregação no solo é beneficiada quando os cátions seguem a ordem: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, pois Ca e Mg se ligam às partículas de argila e carbono, melhorando a estrutura do solo. Enquanto o K em maior quantidade pode limitar a absorção de Ca e Mg do solo (BRONICK; LAL, 2005; CHAGANTI; CULMAN, 2018).

CONCLUSÕES

A concentração de Ca no solo foi reduzida de forma pontual pelos cultivos de capim buffel (na camada 10-15 cm) e leucena (0-5 cm) em relação a área com caatinga preservada;

O cultivo com capim buffel manteve os teores de K e Mg do solo, mostrando que essa cobertura possui boa capacidade de ciclagem desses elementos, mantendo-os e/ou adicionando-os ao sistema por meio da excreção dos animais e da redução das perdas por lixiviação;

As relações estequiométricas avaliadas foram menores no capim buffel devido à maior extração de Ca;

A relação Mg:K aponta para a maior concentração de K nos solos avaliados, independente do sistema de produção instalado;

A quantidade de Ca retirada pela exportação da biomassa de forrageiras deve ser reposta ao solo para não comprometer a disponibilidade desse nutriente e a produtividade das coberturas vegetais.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido) pelo financiamento da pesquisa através do projeto SEG MP02.14.08.002.00.00 e por fornecer estruturas e materiais para as atividades de pesquisa deste estudo. Os autores também agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 pela concessão de bolsas de estudo para estudantes e pesquisadores.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- ALBRECHT, W. A. **The Albrecht papers: Foundation concepts**, v. 1, 1975.
- AQUINO, D. N.; ANDRADE, E. M.; CASTANHO, A. D. A.; PEREIRA JUNIOR, L. R.; PALÁCIO, H. A. Q. Belowground Carbon and Nitrogen on a Thinned and Un-Thinned Seasonally Dry Tropical Forest. **American Journal of Plant Sciences**, v. 8, n. 9, p. 2083-2100, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.89140>
- ARAÚJO FILHO, J. A. Sistemas de produção no âmbito da caatinga. In: **Manejo pastoril sustentável da caatinga**. Projeto Dom Helder Câmara, Recife, PE, 2013.
- BEAR, F. E.; PRINCE, A. L.; MALCOLM, J. L. Potassium needs of New Jersey soils. **New Jersey Agricultural Experiment Station**, n. 721, 1945.
- BOWEN, M. K.; CHUDLEIGH, F. Grazing pressure, land condition, productivity and profitability of beef cattle grazing buffel grass pastures in the subtropics of Australia: a modelling approach. **Animal Production Science**, v. 58, n. 8, p. 1451-1458, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN17780>
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- CHAGANTI, V. N.; CULMAN, S. W. Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. **Crops & Soils**, v. 51, n. 1, p. 40-47, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- DESSOMMES, G. J. G.; LOZANO, R. G. R.; FROUGHBACHCH, R.; RODRÍGUEZ, R. M.; DÍAZ, G. G. Ruminant digestion and chemical composition of new genotypes of buffelgrass (*Cenchrus ciliaris* L.). **Interciencia**, v. 28, n. 4, p. 220-224, 2003.
- ESCALANTE, E. E. Use and performance of leucaena (*Leucaena leucocephala*) in Venezuelan animal production systems. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 7, n. 4, 407-409, 2019. DOI: [https://doi.org/10.17138/tgft\(7\)407-409](https://doi.org/10.17138/tgft(7)407-409)
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; SOUZA JÚNIOR, P. R.; CAMPOS, M. C. C. Análises multivariadas de atributos químicos do solo para caracterização de ambientes. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 8, n. 2, p. 155-164, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v8i2.1684>
- GARCIA, G. W.; FERGUSON, T. U.; NECKLES, F. A.; ARCHIBALD, K. A. E. The nutritive value and forage productivity of *Leucaena leucocephala*. **Animal Feed Science and Technology**, v. 60, n. 1-2, p. 29-41, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(95\)00922-1](https://doi.org/10.1016/0377-8401(95)00922-1)
- GOULD, I. J.; QUINTON, J. N.; WEIGELT, A.; DEYN, G. B.; BARDGETT, R. D. Plant diversity and root traits benefit physical properties key to soil function in grasslands. **Ecology Letters**, v. 19, n. 9, p. 1140-1149, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.12652>
- GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. **Plant and Soil**, v. 368, n. 1-2, p. 5-21, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1567-y>
- JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. The uplift of soil nutrients by plants: biogeochemical consequences across scales. **Ecology**, v. 85, n. 9, p. 2380-2389, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1890/03-0245>
- LEITE, R. M.; VIEIRA, M. E. D. Q.; SANTOS, R.; ROCHA, E. Efeito da adubação fosfatada na composição mineral do capim buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) isolado e consorciado com feijão guandu (*Cajanus cajan* L.). **Pasturas Tropicales**, v. 2, p. 30-35, 2006.
- MARSHALL, V. M.; LEWIS, M. M.; OSTENDORF, B. Buffel grass (*Cenchrus ciliaris*) as an invader and threat to biodiversity in arid environments: A review. **Journal of Arid Environments**, v. 78, p. 1-12, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.11.005>
- MATIAS, S. S. R.; NÓBREGA, J. C. A.; NÓBREGA, R. S. A.; ANDRADE, F. R.; BAPTISTEL, A. C. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 9, n. 1, p. 17-26, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v9i1.2036>

- MNIF, L.; CHAIEB, M. Root growth and morphology of four provenances of a perennial grass (*Cenchrus ciliaris* L.) in rhizotron chamber. **Acta Botanica Gallica**, v. 156, n. 2, p. 273-282, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/12538078.2009.10516157>
- PINHO, R. M. A.; SANTOS, E. M.; BEZERRA, H. F. C.; OLIVEIRA, J. S.; CARVALHO, G. G. P.; CAMPOS, F. S.; PEREIRA, G. A.; CORREIA, R. M. Avaliação de fenos de capim-buffel colhido em diferentes alturas de corte. **Revista Brasileira Saúde e Produção Animal**, v. 14, n. 3, p. 437-447, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-99402013000300004>
- RAMÍREZ, R. G.; ALONSO, D. S.; HERNANDEZ, G.; RAMIREZ, B. Nutrient intake of range sheep on a buffelgrass (*Cenchrus ciliaris*) pasture. **Small Ruminant Research**, v. 17, n. 2, p. 123-128, 1995.
- RIEKERK, H. The mobility of phosphorus, potassium, and calcium in a forest soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 35, n. 2, p. 350-356, 1971. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1971.03615995003500020047x>
- ROWLEY, M. C.; GRAND, S.; VERRECCHIA, É. P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. **Biogeochemistry**, v. 137, n. 1-2, p. 27-49, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0410-1>
- SALVADOR, J. T.; CARVALHO, T. C.; LUCCHESI, L. A. C. Relações cálcio e magnésio presentes no solo e teores foliares de macronutrientes. **Revista Acadêmica de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 9, n. 1, p. 27-32, 2011.
- SCHNEIDER, H. M.; LYNCH, J. P. Functional implications of root cortical senescence for soil resource capture. **Plant Soil**, v. 423, p. 13-26, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3533-1>
- SENBAYRAM, M.; GRANSEE, A.; WAHLE, V.; THIEL, H. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant-soil continuum. **Crop and Pasture Science**, v. 66, n. 12, p. 1219-1229, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP15104>
- SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SILVA, C. M. M. S. Avaliação do gênero *Leucaena* na região semiárida de Pernambuco. Petrolina, PE: **Boletim de Pesquisa EMBRAPA-CPATSA**, 1992. 21 p.
- TANG, R. J.; LUAN, S. Regulation of calcium and magnesium homeostasis in plants: from transporters to signaling network. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 39, p. 97-105, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.06.009>
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa Solos, 2017.