

A FOSFATIZAÇÃO COMO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE SOLOS: CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE SOIL POCKETS DO ARQUIPÉLAGO SÃO PEDRO SÃO PAULO, ATLÂNTICO NORTE

Phosphatization as a soil forming process: physical and chemical analyses of soil pockets in the São Pedro São Paulo Archipelago, North Atlantic

João Victor da Silva Rodrigues

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGeog), Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil

joaovictor4623@gmail.com

Fábio Soares de Oliveira

Instituto de Geociências - Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

fabiosolos@gmail.com

Caroline Delpupo Souza

Coordenadoria de Geografia, Instituto Federal de Minas Gerais, *campus* Ouro Preto, Brasil

caroline.delpupo@ifmg.edu.br

Leonardo Cristian Rocha

Departamento de Geociências, Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil

rochageo@ufsj.edu.br

Recebido: 15/04/2026

Aceito: 30/06/2026

Resumo

Os produtos resultantes da fosfatização no contexto antártico já são extensivamente estudados, todavia, a influência das aves voadoras nos processos associados a ornitogênese ainda é pouco conhecida e, no âmbito insular brasileiro, as pesquisas são ainda mais escassas. Destarte, o presente trabalho investiga a fosfatização promovida pela avifauna em *soil pockets* do Arquipélago São Pedro São Paulo. Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a fosfatização no contexto antártico e insular conjugada à caracterização da área de estudo, na qual foram coletadas 8 amostras de bolsões pedogenéticos para análises físicas e químicas. Os *pockets* denotaram grau de evolução pedogenética incipiente e, mesmo que espacialmente segregados, seus atributos foram similares entre si, condicionados pela fosfatização que se traduziu em aspectos morfológicos e químicos: evidências de nidificação encontradas no material grosso e a elevada fertilidade química conjugada com elevados teores de P.

Palavras-chave: Ornitogênese, Ilhas Oceânicas, Solos Endêmicos, Bolsões Pedogenéticos, Acidificação.

Abstract

The products derived from phosphatization in the Antarctic continent have been extensively studied, however, the influence of flying birds on processes related to ornithogenesis is still

poorly understood, and research is even scarcer in the Brazilian insular context. Therefore, this work explores phosphatization promoted by avifauna in soil pockets of the São Pedro São Paulo Archipelago. A literature review of phosphatization in the Antarctic and insular context was carried out, combined with the characterization of the study area, in which 8 samples of pedogenetic pockets were collected for physical and chemical analyses. The pockets showed an incipient degree of pedogenetic evolution and, despite being spatially segregated, their attributes were similar to each other, conditioned by phosphatization, which translated into morphological and chemical aspects: evidences of nesting found in the coarse material and high chemical fertility combined with high P content.

Keywords: Ornithogenesis, Oceanic Islands, Endemic soils, Pedogenetic pockets, Acidification.

1. INTRODUÇÃO

A fosfatização é um processo químico pedogenético promovido pela excreta das aves e caracterizado pelo aumento da acidez do solo, liberação de bases, e aceleração das transformações mineralógicas e micromorfológicas no solo e no substrato rochoso (Schaefer *et al.*, 2008; Lopes *et al.*, 2022). Todavia, essa redução do pH não é imediata pois, inicialmente, o guano depositado sobre a superfície é alcalino, mas a acidificação ocorre de forma rápida e progressiva segundo o avanço da degradação microbiana da matéria orgânica (Simas *et al.*, 2007 *apud* Schmitz, 2019). Por sua vez, essa decomposição do excremento culmina na presença dos ácidos nítrico e sulfúrico, que corroboram com o ímpeto nas reações já mencionadas e possibilitam a formação de minerais fosfatados secundários (Tatur *et al.* 1997 *apud* Schaefer *et al.*, 2010).

A maior parte da literatura acadêmica descrita sobre esse fenômeno se refere ao contexto antártico, do qual é característico (mas não exclusivo) enquanto principal fator de formação dos solos ornitogênicos (Tatur & Myrcha, 1983; Tatur & Myrcha, 1989; Tatur, 1989, 2002; Michel, 2005; Simas *et al.*, 2007; Schaefer *et al.*, 2008; Souza, 2012; Schaefer *et al.*, 2017; Daher *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2019, 2020; Castro *et al.*, 2021). Esses têm suas características morfológicas, químicas e mineralógicas alteradas segundo a atividade da avifauna, que deposita guano sobre a matriz do solo (Simas *et al.*, 2007; Schaefer *et al.*, 2008).

Essas investigações focam na influência dos pinguins nos solos mas, ainda que com um *input* menor de excrementos, as aves voadoras também contribuem para a fosfatização destes (Rakusa-Suszczewski, 1980 *apud* Tatur, 2002) e, por conseguinte, a sua importância não deve ser negligenciada (Lopes *et al.*, 2022; Rodrigues *et al.*, 2024).

Não obstante, ainda que menos investigada do que a contraparte antártica, a avifauna voadora também tem influência significativa nos substratos insulares brasileiros (Oliveira,

2008; Clemente *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2009; Schaefer *et al.*, 2010; Oliveira *et al.*, 2010; Machado, 2016; Silveira *et al.*, 2020; Duarte, 2024). Entretanto, destaca-se que as pesquisas desenvolvidas no Arquipélago São Pedro São Paulo são predominantemente de caráter geológico e, para consolidar a importância da fosfatização no Brasil, é substancial promover também o protagonismo pedológico, sobretudo considerando o caráter endêmico destes solos (Bockheim, 2005).

Logo, o presente trabalho analisa a fosfatização como processo de formação em bolsões pedogenéticos condicionados pela atividade da avifauna no Arquipélago São Pedro São Paulo. O objetivo geral deste estudo é identificar, descrever e analisar as propriedades físicas e químicas dos *soil pockets*, averiguando o modo em que as características desses bolsões se aproximam ou afastam. Ademais, também são analisadas as principais similaridades e divergências destes com o perfil de solo encontrado na Ilha Belmonte (Oliveira, 2008), configurando pioneirismo em investigações estritamente pedológicas no arquipélago.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

O Arquipélago São Pedro São Paulo (ASPSP - figura 1) é o menor dentre os oceânicos brasileiros e o único situado na porção norte, localizado no Atlântico (00° 55,01' N e 029° 20,76' W) a aproximadamente 1.824 km de distância da costa africana e 1.010 km da costa brasileira (Mohr *et al.*, 2009). Ele é formado por cinco ilhas maiores (Belmonte, Cabral, Nordeste, Challenger e Sul) e várias pontas de rocha, com área total emersa aproximada de 17.000 m² (Miguens, 1995).

Seu posicionamento específico em proximidade à dorsal mesoatlântica proporciona muitas teorias e incertezas sobre sua formação (Duarte, 2024), o que reforça a necessidade de estudá-lo. As rochas deste arquipélago não são de origem vulcânica, tais como a maior parte das ilhas oceânicas do planeta, pois possuem gênese plutônica e caráter ultramáfico, milonitizadas segundo a atividade tectônica intensa do local (Maia *et al.*, 1999 *apud* Campos *et al.*, 2009). Essas rochas são em sua maioria perioditos de origem mantélica e ricas em minerais silicatados ferro-magnesianos, aparecendo também em fase serpentizada e, sobre esse embasamento, foi originada a Formação São Pedro São Paulo, geneticamente sedimentar (Oliveira, 2008) e nomeada justamente em alusão aos pássaros que ocupam o arquipélago: atobás e viuvinhas, simbolizando a importância destes nesse sistema marinho.



Figura 1 - Vista aérea do ASPSP.

Fonte: <https://marsemfim.com.br/arquipelago-sao-pedro-e-saopaulo/>.

Essa presença marcante da avifauna é favorecida pela localização do arquipélago (figura 2), utilizado então como local para alimentação e reprodução de espécies migratórias (Campos *et al.*, 2009), distribuídas espacialmente segundo suas demandas biológicas e tipos de ninho, com adensamento populacional significativo na ilha Belmonte (Viana *et al.*, 2009), escolhida, destarte, como foco do presente trabalho.

Nesse sentido, reitera-se que foi encontrada na literatura a descrição de apenas um perfil de Neossolo Litólico nessa ilha em meio a pequenos bolsões pedogenéticos (Oliveira, 2008), discrepante com o fato de o arquipélago representar uma das áreas com maior índice pluviométrico em todo o Atlântico, em função da influência da Zona de Convergência Intertropical (Campos *et al.*, 2009). Para explicar esse descompasso, é substancial considerar que a atuação da fosfatização do arquipélago é dupla. Ou seja, ao mesmo tempo em que intensifica as reações químicas no solo (Lopes *et al.*, 2022), a excreta das aves também culmina na formação de crostas fosfáticas nas rochas, que as protegem em certo grau dos processos erosivos e intempéricos segundo sua natureza hidrofóbica (Oliveira *et al.*, 2010).

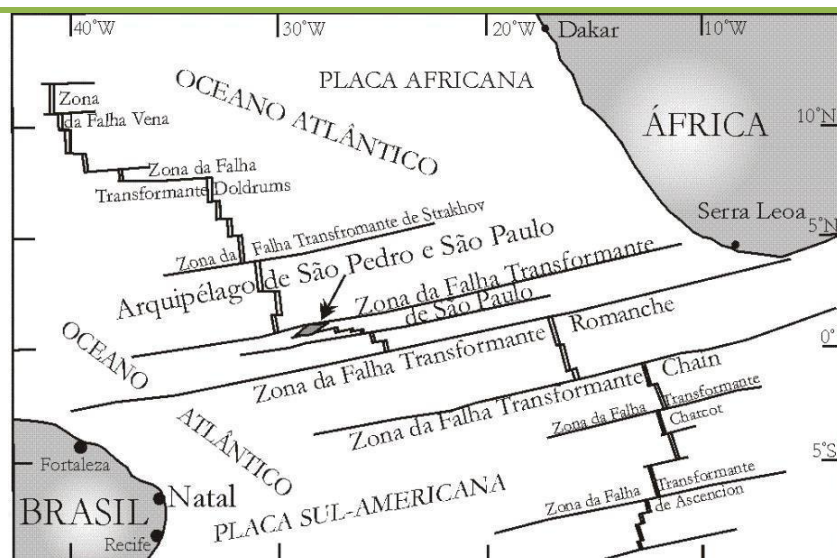


Figura 2 - Localização do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial.

Fonte: Campos *et al.*, 2009.

Por fim, esses *soil pockets* da ilha Belmonte, frutos dessa dualidade e objetos de estudo da presente investigação, devem ser devidamente conceituados. Todavia, outros trabalhos que também utilizam dessa categoria de análise atípica da pedologia não abordam a definição explícita do termo (Jones *et al.*, 2011; Sakaki *et al.*, 2012; Lopes *et al.*, 2022). Assim, tendo como base o emprego desse conceito nestas pesquisas e o modo que foram descritos em campo (Oliveira, 2008), para os fins desta investigação, os *soil pockets* podem ser entendidos como pacotes pedogenéticos pouco espessos e sem continuidade lateral entre si, denotando ações pontuais dos processos pedogenéticos.

2.2. Análises Físicas e Químicas

Destarte, foram coletadas amostras em oito distintos bolsões nas áreas de ninhais da Ilha Belmonte. As 8 amostras foram coletadas da superfície até a profundidade máxima dos *soil pockets*, que variou entre 20 e 25 cm. As coletas ocorreram entre o dia 29 de agosto e 05 de setembro de 2022, sendo as amostras acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em local seco e ventilado. Em laboratório, as amostras foram secas, pesadas e peneiradas em malha de 2 mm e preparadas para análises físicas e químicas (figura 3). Ademais, os resultados obtidos foram comparados ao perfil descrito na mesma ilha (Oliveira, 2008).



Figura 3 - Amostras identificadas, peneiradas e acondicionadas para análise.

Fonte: Autoria própria.

A priori, cabe salientar que foram realizadas análises morfológicas simples da matriz grossa das amostras (tudo aquilo que ficou retido na peneira de 2 mm) com o auxílio de uma lupa de mão, objetivando verificar evidências de nidificação do material coletado. Esses vestígios confirmam, antes mesmo dos resultados das análises químicas, a presença de materiais ornitogênicos (Wilson & Bain, 1986) e são considerados como tal os restos de ossos, cascas de ovo e penas misturados na matriz grossa do solo (Tatur; Myrcha, 1984 *apud* Tatur, 1989).

As análises físicas consistiram na determinação granulométrica. Foi utilizada a solução de hexametáfosfato de sódio $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$; seguida de dispersão mecânica com utilização de agitação lenta de 50 rpm por 16 h (Ruiz 2005). A fração areia grossa (0,2 - 2 mm) e areia fina (0,05 - 0,2 mm) foram obtidas por tamisação, a fração argila ($< 0,002 \text{ mm}$) por pesagem por amostra obtida utilizando o método da pipeta (Leis de Stokes), e a fração silte (0,002 - 0,05 mm) por diferença. As classes texturais foram determinadas utilizando o triângulo textural de acordo com Santos *et al.* (2015).

As análises químicas foram realizadas de acordo com os métodos descritos por Embrapa (2017) sendo: o pH em água medido com eletrodo de vidro, em suspensão solo:água na proporção 1:2,5. Os cátions trocáveis Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} foram extraídos em solução por KCl 1 mol.L^{-1} e quantificados por espectrometria de absorção atômica; os teores de Na^{+} e K^{+} foram extraídos com a solução Mehlich-1 (HCl $0,05 \text{ mol.L}^{-1}$ e H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol.L}^{-1}$) e quantificados por espectrometria de chama). O fósforo disponível (P) foi extraído com a solução Mehlich-1 e quantificado em espectrômetro UV-VIS, na presença de ácido ascórbico.

A acidez potencial (H+Al), foi extraída com acetato de cálcio 1 mol.L^{-1} , a pH 7,0, e quantificada por titulometria com NaOH ($0,025 \text{ mol.L}^{-1}$). O carbono orgânico total (COT) foi

calculado conforme o método adaptado de Yeomnas & Bremner (1998). A partir dos resultados de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , H^+ e Al^{3+} foram calculados $\text{SB} = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)$; a CTC a pH 7 (T) = $\text{SB} + (\text{H}^+ + \text{Al}^{3+})$, a CTC efetiva (t) = $\text{SB} + (\text{Al}^{3+})$, a saturação por bases (V%) = $\text{SB} \times 100 / \text{T}$, saturação por Al^{3+} (m %) = $\text{Al}^{3+} \times 100 / \text{t}$ e a saturação por sódio = $\text{Na}^+ \times 100 / \text{T}$, conforme Embrapa (2017).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das análises morfológicas, foram encontradas penas com possíveis fragmentos de ovo (figura 4) que, somados ao forte odor das amostras, indicam que os demais resultados serão marcados pela fosfatização. Ademais, a notória presença de fragmentos de rocha (figura 4) denota um cenário de elevada pedregosidade nos bolsões, coerente com a descrição do Neossolo realizada na Ilha Belmonte (Oliveira, 2008) e enunciando um baixo grau de desenvolvimento pedogenético, que é corroborado a partir dos resultados físicos e químicos.



Figura 4 - Pena de ave / Penas pequenas e possíveis fragmentos de ovo / Fração grossa retida na peneira.
Fonte: Autoria própria.

Os *soil pockets* do ASPSP possuem uma média de 49% de areia, 34% de silte e 17% de argila (quadro 1), com textura variando entre franco-argilo-arenosa e franco-arenosa. A disparidade entre os valores máximo (63% de areia e 50% de silte) e mínimo (37% de areia e 19% de silte) encontrados é significativa, entretanto, isso não se traduz em mudanças abruptas nas classes texturais. Em outras palavras, esses bolsões possuem propriedades granulométricas similares, o que pode ser explicado pois, mesmo que descontínuos espacialmente, são submetidos aos mesmos processos pedogenéticos.

Quadro 1: Resultados das Análises Físicas – *Soil Pockets* do Arquipélago São Pedro São Paulo.

Data de Coleta	Amostra	Areia	Silte	Argila	Relação Silte/Argila	Classificação Textural
		%				
29/08/2022	P1	56	31	13	2,38	Franco-arenosa
29/08/2022	P2	42	41	17	2,41	Franco
30/08/2022	P3	41	48	11	4,36	Franco
30/08/2022	P4	51	30	19	1,58	Franco
31/08/2022	P5	51	26	23	1,13	Franco-argilo-arenosa
01/09/2022	P6	63	19	18	1,06	Franco-arenosa
03/09/2022	P7	37	50	13	3,85	Franco
05/09/2022	P8	52	27	21	1,29	Franco-argilo-arenosa
Média		49	34	17	2,26	--
Máx		63	50	23	4,36	--
Mín		37	19	11	1,06	--

Fonte: Autoria Própria.

Estas classes texturais são consistentes com os horizontes do perfil descrito na Ilha Belmonte. A relação silte argila elevada, superior a 0,84 no Neossolo (Oliveira, 2008) e 2,26 em média nos pockets (quadro 1) também se destaca como ponto em comum entre os resultados no arquipélago. Por sua vez, isso concorda com a afirmação já enunciada: o grau de evolução pedogenética é incipiente na área de estudo, tanto nos bolsões quanto no perfil.

Com relação às análises químicas (quadro 2), são notáveis os valores do pH, que oscilam entre o mínimo de 5,7 e o máximo de 7,8, impossibilitando o agrupamento dos bolsões a partir dessa variável. Estes apresentam comportamentos que variam entre ácido (P6 por exemplo), quase neutro (P3) e ligeiramente alcalino (P8). Esses valores são, em média (6,9), mais elevados do que os resultados encontrados no Neossolo do arquipélago (4,78 - quadro 3).

Quadro 2: Resultados das Análises Químicas - *Soil Pockets* do Arquipélago São Pedro São Paulo.

Data de Coleta		29/08/22	29/08/22	30/08/22	30/08/22	31/08/22	01/09/22	03/09/22	05/09/22
Amostra		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
pH	H ₂ O	6,4	7,7	7,1	5,8	7,3	5,7	7,6	7,8
P	mg/d m ³	127,2	223,9	211,9	179,7	236,5	250,0	272,0	257,1
K	cmolc /dm ³	8,7	6,1	7,4	5,4	9,0	5,6	12,0	8,7
Na		28,3	38,3	7,8	12,6	46,5	14,8	37,8	25,6
Ca ²⁺		2,5	0,8	1,3	5,1	1,7	8,3	0,3	0,4
Mg ²⁺ +		8,8	3,8	0,8	7,8	6,8	3,8	1,5	2,7
Al ³⁺		0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	1,4	0,0	0,0
H + Al		19,8	7,6	21,1	21,5	13,9	23,1	25,7	13,2
SB		48,2	48,9	17,4	30,8	64,0	32,4	51,7	37,4
(t)		48,2	48,9	17,4	32,2	64,0	33,8	51,7	37,4
(T)		68,0	56,5	38,5	52,3	77,8	55,5	77,4	50,6

V		70,9	86,6	45,1	58,9	82,2	58,4	66,7	73,9
m		0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	4,1	0,0	0,0
ISNa	%	58,6	78,2	45,1	39,1	72,7	43,7	73,2	68,6
MO	dag/kg	6,6	5,8	5,6	7,5	8,1	5,6	7,8	5,9

Fonte: Autoria própria.

Essas divergências no pH dos *pockets* em contraste ao perfil, podem ser explicadas por uma hipótese cronológica. Reiterando a definição de fosfatização construída na introdução, é postulado que a acidificação nesse processo não é instantânea, considerando ainda que o guano depositado pelas aves é alcalino (Simas *et al.*, 2007 *apud* Schmitz, 2019). Logo, as variações de pH entre os *soil pockets* e a distância entre sua média de pH e os valores encontrados no perfil podem ser indicativos de diferentes momentos de nidificação das aves, com os índices mais alcalinos se traduzindo em ocupações mais recentes e os mais ácidos denotando atividade mais antiga, em perspectiva relativa.

Quadro 3: Atributos NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário (Oliveira, 2008).

Horizonte (cm)		A1 (0 - 8)	A2 (8 - 15)	Média
Classificação Textural		Franco-Arenosa	Franco-Argilo-Arenosa	-
pH	H2O	4,7	4,86	4,78
P	mg.dm3	8899,4	9006,1	8952,75
K	cmolc/dm³	0,75	0,75	0,75
Na		0,52	0,3	0,41
Ca²⁺		7,66	7,27	7,46
Mg²⁺		0,79	0,61	0,7
Al³⁺		0,58	0,48	0,53
H + Al		13,2	13,5	13,35
SB		10,03	9,34	9,69
(t)		10,6	9,8	10,2
(T)		23,23	22,84	23,03
V	%	43,2	40,9	42,05
m		5,5	4,9	5,2
ISNa		12,07	13,04	12,55
MO	dag/kg	6,13	4,56	5,34

Fonte: Autoria própria.

Com relação ao fósforo, invariavelmente o foco do presente trabalho, são passíveis alguns *insights* interessantes. Em primeiro lugar, os valores encontrados no ASPSP (tabela 2) são indicativos da ação do fenômeno que dá título à pesquisa, corroborando também com as evidências preliminares de ornitogênese (Wilson; Bain, 1986). Além disso, o P varia consideravelmente entre os bolsões, com mínimo de 127,24 mg/dm³ e máximo de 272,01 mg/dm³, dimensionando diferentes graus de influência fosfática. Entretanto, o que mais chama atenção é o distanciamento entre a média de P dos bolsões (219,8 mg/dm³) e a do

perfil (8.952,75 mg/dm³), evidenciando que a fosfatização do substrato foi bem mais intensa no Neossolo (quadro 3).

No sentido de investigar essa discrepância, devem ser considerados três fatores principais. Em primeiro lugar, é prudente considerar que os valores de P obtidos são referentes à fração argila e os bolsões são predominantemente areno-siltosos. Logo, esses valores não são inteiramente representativos do processo de fosfatização ao passo que, mesmo que não sejam superiores a 500 mg/dm³, valor proposto para classificação do solo enquanto ornitogênico (Simas, 2006), são atendidos os outros critérios propostos pelo autor e deve ser também considerado o fósforo presente nas frações mais grossas.

Ademais, é substancial realçar que, mesmo que a extração de P pelo Melich-1 seja um bom método para a avaliação preliminar do grau de ornitogênese em diferentes solos e horizontes, esse mecanismo extrai apenas a fração solúvel em ácido do arcabouço de P do substrato (Simas, 2006). Logo, se empregados outros métodos para análise do P total dos bolsões da ilha Belmonte, é provável que os resultados obtidos se aproximem mais do Neossolo, ainda que uma notória distinção remanesça.

Em segundo lugar, é prudente retomar a hipótese cronológica elaborada. O perfil foi desenvolvido ao longo de uma escala temporal relativamente maior de atuação do intemperismo nos peridotitos subjacentes, o que é corroborado pelos demais atributos químicos discutidos a posteriori. Assim, considerando que esses bolsões estão submetidos à atividade da avifauna há menos tempo que o perfil, naturalmente o valor de P deve ser relativamente menor nos *pockets*. Todavia, mesmo que esse perfil seja marcado por um *input* significativamente maior de guano quando comparado aos bolsões contemporâneos, isso não explica totalmente a magnitude da diferença averiguada.

Destarte, é prudente completar as duas reflexões elucidadas com um terceiro fator substancial no entendimento dessa anomalia do fósforo. Trata-se da interferência antrópica na área de estudo, significativa sobretudo a partir da construção do farol na ilha Belmonte (Oliveira, 2008; Viana *et al.*, 2009). Considerando então que o incremento de fósforo ao meio também é característico da ação humana (Embrapa, 2025), propugna-se que os bolsões de solo são frutos da ação predominantemente natural da pedogênese no arquipélago, contrastados com o Neossolo Litólico que representa relativa anomalia pedogenética, marcado fortemente pela intervenção antrópica na área de estudo.

Ademais, outro resultado que chama atenção são os valores de sódio. Nesse sentido, os elevados teores de Na dos bolsões (média de 26,46 cmolc/dm³) e a saturação por sódio (média de 67,8%), suficiente para configurar Caráter Sódico (Embrapa, 2025), são

resultado sobretudo da ação constante dos *sprays* salinos, que explica também os teores de K (média 7,86 cmolc/dm³) (Oliveira, 2008). Essa adição de cátions “alheios” é natural em contextos litorâneos (Ibraimo *et. al*, 2004) e esses valores são encarados como esperados dado o cenário de ilha oceânica no qual os bolsões se localizam. Além disso, os *pockets* são lavados constantemente e ficam empoçados periodicamente, o que também ajuda a explicar os valores encontrados.

Já a disparidade entre os valores mínimo (7,82 cmolc/dm³) e máximo (46,52 cmolc/dm³) dos resultados obtidos pode ser explicada pelos diferentes posicionamentos geográficos desses bolsões, mais favorecidos ou menos aptos a sofrerem influência das lavagens e dos *sprays*. Quando comparados os valores médios de K, Na e de ISNa (quadros 2 e 3) atesta-se que os *soil pockets* do ASPSP denotam com mais expressividade a influência mencionada, ainda que consoantes aos atributos do Neossolo e à ocorrência de fenômeno parecido nos solos ornitogênicos da Antártica (Daher *et al.*, 2019; Lopes *et al.*, 2022).

Entretanto, salienta-se que os valores elevados de K e Na também podem ser atrelados à deposição de uratos no substrato pela ação das aves (Tatur & Myrcha, 1993 *apud* Simas, 2007). Ainda que seja inviável estabelecer uma proporção exata da contribuição entre os dois agentes distintos e mesmo que considerada a grande influência já constatada dos *sprays* salinos na área de estudo (Oliveira, 2008), é possível afirmar que os valores de K e Na, além de P, validam a imperatividade da ornitogênese nos *soil pockets*.

Em conformidade, os valores de Ca²⁺ também podem ser associados à atividade da avifauna, postulada como sua provável fonte principal no perfil do ASPSP (Oliveira, 2008). Assim, os valores de Ca²⁺ (média de 2,55 cmolc/dm³), ainda que inferiores à média do perfil (7,46 cmolc/dm³), denotam a influência do guano nos bolsões. Essa disparidade pode estar associada à hipótese cronológica já postulada e chama atenção também a oscilação nos valores entre os *pockets*, com mínimo de 0,78 cmolc/dm³ e máximo de 8,25 cmolc/dm³. Essa diferença, conjugada com a variação de fósforo, corrobora com um cenário de diferenças consideráveis no grau de nidificação e consequente fosfatização dos substratos.

Com relação aos valores obtidos de Mg²⁺ (média de 4,47 cmolc/dm³), podem ser entendidos como herança da rocha mãe, uma vez que esse elemento é abundante nos peridotitos subjacentes (Oliveira, 2008). Todavia, esse valor surpreende em comparação à média no Neossolo (0,7 cmolc/dm³), o que, junto a disparidade na média de soma de bases trocáveis (41,34 cmolc/dm³ *pockets* vs. 9,69 cmolc/dm³ perfil), reforça a hipótese de distinção cronológica. Ou seja, por serem relativamente mais jovens, os bolsões foram

menos marcados pelo processo de lixiviação do que o Neossolo, fato ilustrado pelo relativo empobrecimento em bases trocáveis e no elemento principal da rocha matriz.

Os valores de Al^{3+} dos *soil pockets* no complexo de troca e, conseqüentemente, do índice de saturação de alumínio não foram significativos, coerentes então com os valores encontrados no Neossolo. Em contrapartida, a acidez potencial dos bolsões no ASPSP (média de 18,23 cmolc/dm³) é consideravelmente elevada e similar aos resultados obtidos no perfil da ilha Belmonte (média de 13,35 cmolc/dm³), reforçando a tendência de acidificação gradual desses substratos segundo o avanço da fosfatização (Simas *et al.*, 2007; Schmitz, 2019).

Os valores de MO representam *insights* interessantes sobre as distinções entre o ambiente estudado e as demais pesquisas sobre a fosfatização. Nesse sentido, é observado que a média de MO é parecida nos *pockets* do ASPSP (6,62 dag/kg) e no perfil da ilha Belmonte (5,34 dag/kg), todavia inferiores aos valores encontrados na literatura Antártica (Michel, 2005; Daher *et al.*, 2018; Lopes *et al.*, 2022; Rodrigues *et al.*, 2024). É possível explicar essa discrepância a partir das taxas de decomposição e atividade microbiológicas (Simas, 2006), superiores no arquipélago quando comparadas ao ambiente notoriamente seco e frio da Antártica, que retarda as reações e favorece o acúmulo de matéria orgânica.

Ainda sobre a matéria orgânica, os valores não variaram significativamente entre os *soil pockets*. Todavia, esses descompassos, mesmo que pequenos, podem ser explicados pelo gradiente vegetacional, estando as plantas do arquipélago condicionadas espacialmente justamente a esses bolsões pedogenéticos (Oliveira, 2008) e contribuindo, em maior ou menor grau, com os valores de MO encontrados nestes solos. Ademais, a excreta das aves também pode ser apontada como contribuinte de matéria orgânica para esses sistemas, em quantidades evidentemente variadas segundo a intensidade de nidificação nos bolsões.

Por fim, a maior parte dos *soil pockets* do ASPSP são eutróficos (P3 sendo a exceção), com saturação por bases média (67,8%) superior à 50%, acompanhada de CTCs efetiva e potencial elevadas (41,69 cmolc/dm³ & 59,57 cmolc/dm³, respectivamente). Esses valores superam os resultados encontrados no Neossolo, reforçando a hipótese cronológica e validando a fosfatização associada à atividade da avifauna voadora como agente formador e enriquecedor nos *soil pockets* do Arquipélago São Pedro São Paulo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. Esse trabalho demonstra que no Arquipélago São Pedro São Paulo, contexto insular brasileiro, são encontrados bolsões pedogenéticos sem continuidade lateral e com grau de evolução incipiente, mas que são influenciados diretamente pelos processos promovidos pela avifauna voadora nesses substratos.

2. Apesar de serem espacialmente segregados, as características dos *soil pockets* são similares entre si e invariavelmente condicionadas pela fosfatização. Este processo é evidenciado sobretudo nos atributos morfológicos, marcados pela presença de penas e demais elementos característicos de ninhos presentes nas matrizes desses solos, e também pelas análises químicas, que se traduzem sobretudo na elevada fertilidade e nos teores consideráveis de P.

3. Sob o ponto de vista comparativo, esses bolsões corroboram com a literatura já publicada sobre os processos de formação de solo associados à avifauna. Todavia, consideradas as divergências com o perfil descrito na Ilha Belmonte, é inferido que este representa relativa anomalia pedogenética no arquipélago, marcado fortemente pela interferência antrópica. Esta frente, somada à influência das aves e ao intemperismo dos peridotitos, representam uma tripla gênese nos solos do arquipélago.

4. Por se tratar de um estudo pioneiro no que diz respeito a investigações estritamente pedológicas no Arquipélago, algumas das hipóteses são carentes de maior validação e remanescem reflexões e dúvidas a serem exploradas e sanadas, mediante a realização de novas análises e pesquisas.

5. Mesmo que representem categoria de análise não ortodoxa no universo da pedologia, os insights gerados a partir da investigação dos *soil pockets* devem ser usados para reiterar a necessidade de integração do caráter ornitogênico ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, haja vista não só a dificuldade de enquadrar esses solos no sistema, mas também as evidências apresentadas da imperatividade da ornitogênese no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado, ao programa PROARQUIPÉLAGO pelo apoio logístico na amostragem e ao Laboratório de

Geomorfologia e Recursos Hídricos da UFMG pelo armazenamento e preparo das amostras.

REFERÊNCIAS

BOCKHEIM, J. G. Soil endemism and its relation to soil formation theory. **Geoderma**, v. 129, n. 3–4, p. 109–124, 2005.

CAMPOS, T. F. C.; VIRGENS NETO, J. V.; SRIVASTAVA, N. K.; PETTA, R. A.; HARTMANN, L. A.; MORAES, J. F. S.; MENDES, L.; SILVEIRA, S. R. M. Arquipélago de São Pedro e São Paulo Soerguimento tectônico de rochas infracrustais no Oceano Atlântico. **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**, v. 2, p. 1–14, 2009.

CASTRO, M. F.; NEVES, J. C. L.; FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; OLIVEIRA, T. S. Seabirds enrich Antarctic soil with trace metals in organic fractions. **Science of The Total Environment**, v. 785, p. 1-12, 2021.

CLEMENTE, E. P.; SCHAEFER, C. E. G. R.; OLIVEIRA, F. S.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; ALVES, R. V.; SÁ, M. M. F.; MELO, V. F.; CORRÊA, G. R. Topossequência de solos na ilha da trindade, atlântico sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1357–1371, 2009.

DAHER, M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; THOMAZINI, A.; LIMA NETO, E.; SOUZA, C. D.; LOPES, D. V. Ornithogenic soils on basalts from maritime Antarctica. **Catena**, v. 173, n. p. 367-374, 2018.

DUARTE, E. B. **Fosfatização no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), Atlântico Equatorial: caracterização, gênese e evolução**. 2024. 131 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa: EMBRAPA, 2015.

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2017. 577p.

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 2025. 396p.

IBRAIMO, M. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; LANI, J.; ROLIM-NETO, F. C.; ALBUQUERQUE, M. A.; MIRANDA, V. J. Gênese e Micromorfologia de solos sob vegetação Xeromórfica (Caatinga) na Região dos Lagos (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 585-796, 2004.

JONES, B. Biogenicity of terrestrial oncoids formed in soil pockets, Cayman Brac, British West Indies. **Sedimentary Geology**, v. 236, n. 1–2, p. 95–108, 2011.

LOPES, D. D. V.; OLIVEIRA, F. S.; SOUZA, J. J. L. L.; MACHADO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R. Soil pockets phosphatization and chemical weathering of sites affected by flying birds of Maritime Antarctica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, n. 1, 2022.

MACHADO, M. R. **O papel da avifauna na transformação geoquímica de substratos na Ilha da Trindade, Atlântico Sul**. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MICHEL, R. F. M. **Solos Criogênicos e Ornitogênicos da área de entorno da Ponta Llano, Antártica Marítima**. 2005. 162 F. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

MIGUENS, A. P. **Navegação Costeira, Estimada e em Águas Restritas**. Volume I. Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha. Rio de Janeiro, 1995.

MOHR, L. V.; CASTRO, J. W. A.; COSTA, P. M. S.; ALVES, R. J. V. **Ilhas oceânicas brasileiras**. [S.l: s.n.], 2009.

OLIVEIRA, F. S.; ABRAHÃO, W. A. P.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B. Implicações geomorfológicas e paleogeográficas das crostas fosfáticas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Norte. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, p. 239–246, 2010.

OLIVEIRA, F. S. **Fosfatização em Solo e Rocha em Ilhas**. 2008. 124 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

OLIVEIRA, S. M. B.; PESSENDA, L. C. R.; GOUVEIA, S. E. M.; FÁVARO, D. I. T.; BABINSKI, M. Evidência geoquímica de solos formados pela interação de guanos com rochas vulcânicas, Ilha Rata, Fernando de Noronha (PE). **Revista do Instituto de Geociências - USP**, v. 9, n. 2, p. 03–12, 2009.

RODRIGUES, W. F.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; LEITE, M. G. P.; TORRES, I. C. Contribution by Giant petrels and Brown skuas to soil phosphatization in Harmony Point - Maritime Antarctica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 96, 2024.

RODRIGUES, W. F.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; LEITE, M. G. P.; PAVINATO, P. S. Phosphatization under birds' activity: Ornithogenesis at different scales on Antarctic Soilscapes. **Geoderma**, v. 391, p. 11, 2020.

RODRIGUES, W. F.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; LEITE, M. G. P.; GAUZZI, T.; BOCKHEIM, J. G.; PUTZKE, J. Soil-landscape interplays at Harmony Point, Nelson Island, Maritime Antarctica: Chemistry, mineralogy and classification. **Geomorphology**, v. 336, p. 77–94, 2019.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da Análise Granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 297-300, 2005.

SÁ, M. M. F. **Caracterização ambiental, classificação e mapeamento dos solos da Ilha da Trindade, Atlântico Sul - Brasil**. 2010. 65 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa Viçosa, 2010.

SAKAKI, T.; LIMSUWAT, A.; CIHAN, A.; FRIPPIAT, C. C.; ILLANGASEKARE, T. H. Water Retention in a Coarse Soil Pocket under Wetting and Drainage Cycles. **Vadose Zone Journal**, v. 11, n. 1, 2012.

SCHAEFER, C. E. R.; SIMAS, F. N. B.; ALBUQUERQUE, M. A.; SOUZA, E.; DELPUPO, K. K. Fosfatização de solos e evolução da paisagem no arquipélago de Abrolhos, BA. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 4, p. 727–734, 2010.

SCHAEFER, C. E. R.; SIMAS, F. N. B.; GILKES, R. J.; MATHISON, C.; COSTA, L. M.; ALBUQUERQUE, M. A. Micromorphology and microchemistry of selected Cryosols from maritime Antarctica. **Geoderma**, v. 144, n. 1–2, p. 104–115, 2008.

SCHAEFER, C. E. R.; PEREIRA, T. T. C.; ALMEIDA, I. C. C.; MICHEL, R. F. M.; CORRÊA, G. R.; FIGUEIREDO, L. P. S.; KER, J. C. Penguin activity modify the thermal regime of active layer in Antarctica: A case study from Hope Bay. **Catena**, v. 149, p. 582–591, 2017.

SCHMITZ, D. **Ecological Drivers of plant communities diversity and structure along pedoenvironmental gradients in maritime Antarctica**. 2019. 203 f. Tese (Doutorado em Botânica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

SILVEIRA, J. C.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; VARAJÃO, C. A. C.; SENRA, E. O. Phosphatized volcanic soils of Fernando de Noronha Island, Brazil: Paleoclimates and landscape evolution. **Catena**, v. 195, p. 1–11, 2020.

SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MELO, V. F.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; MICHEL, R. F. M.; PEREIRA, V. V.; GOMES, M. R. M.; COSTA, L. M. Ornithogenic cryosols from Maritime Antarctica: Phosphatization as a soil forming process. **Geoderma**, v. 138, n. 3–4, p. 191–203, 2007.

SIMAS, F. N. B. **Solos da Baía do Almirantado, Antártica Marítima**: mineralogia, gênese, classificação e biogeoquímica. 2006. 165 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 2006.

SOUZA, K. K. D. **Gênese e classificação de solos desenvolvidos em semideserto polar - Ilha Seymour, Antártica**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Fertilidade do solo e nutrição de plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

TATUR, A. Ornithogenic Ecosystems in the Maritime Antarctic — Formation, Development and Disintegration. *In: Geocology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes* [S.l.: s.n.], 2002. Springer, p. 161–184.

TATUR, A. Ornithogenic soils of the maritime Antarctic. **Polish Polar Research**, v. 10, n. 4, p. 481–532, 1989.

TATUR, A.; MYRCHA, A. Changes in chemical composition of waters running from the penguin rookeries in the Admiralty Bay region (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica). **Polish Polar Research**, v. 4, n. 1–4, p. 113–125, 1983.

TATUR, A.; MYRCHA, A. Soils and vegetation in abandoned penguin rookeries (maritime Antarctic). **NIPR**, v. 5, p. 181–189, 1989.

VIANA, D. L.; HAZIN, F. H. V.; SOUZA, M. A. C. **O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica**. Brasília: *Marinha do Brasil Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM)*, 2009. 348p.

WILSON, M. J.; BAIN, D. C. Spheniscidite, a new phosphate mineral from Elephant Island, British Antarctic Territory. **Mineralogical Magazine**, v. 50, n. 356, p. 291–293, 1986.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Commun. Soil Sci. Plant. Anal.**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

Recebido: 15/04/2026

Aceito: 30/06/2026