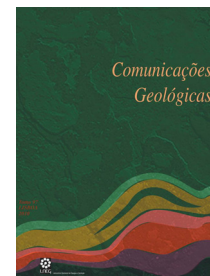


## Estudo geoquímico para reabilitação de uma albufeira pouco profunda e anóxica, em terrenos vulcânicos e clima semi-árido, no Arquipélago de Cabo Verde

### Geochemical study of the rehabilitation of a shallow anoxic reservoir, in volcanic terrains, under semi-arid climate, in Cape Verde Archipelago

R. Fonseca<sup>1\*</sup>, R. Hernandez<sup>2</sup>, A. P. Pinto<sup>3</sup>, A. Araújo<sup>1</sup>, C. Pinho<sup>4</sup>

© 2014 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP



Artigo Curto  
Short Article

**Resumo:** A albufeira do Poilão (Arquipélago de Cabo Verde) encontra-se em estado crítico, dado o excessivo assoreamento, o elevado teor em nitratos e condições de anóxia em toda a sua extensão. Considerando que a estratégia de reabilitação mais viável consiste na remoção dos sedimentos do fundo, onde os nutrientes preferencialmente se concentram, fez-se um estudo geoquímico para determinar a sua qualidade agrícola. As análises apontaram para um enriquecimento dos sedimentos relativamente aos solos parentais em alguns nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, pelo que a sua adição aos solos vizinhos degradados, poderá trazer melhorias significativas relativamente à capacidade de produção de alimentos dos pequenos produtores que habitam nas proximidades.

**Palavras-chave:** Anóxia, Assoreamento, Desertificação, Sedimentos de barragem, Uso agrícola.

**Abstract:** Poilão dam reservoir (Cape Verde Archipelago) is in critical conditions, owing the excessive silting up, the high concentration of nitrates and the pronounced anoxia all over the lake. Considering that the most suitable remediation strategy is the removal of the bottom sediments where nutrients are preferentially concentrated, we have done a geochemical study, in order of evaluating their suitability to agricultural use. Analyses indicate that sediments are rich in a few key nutrients, when compared with parent soils. Thus, adding suitable sediments to nearby degraded soils can improve food crops for smallholder farmers living in close proximity to this system.

**Keywords:** Anoxia, Silting up, Desertification, Dam sediments, Agricultural use.

<sup>1</sup>Centro de Geofísica de Évora, Departamento de Geociências, Laboratório AmbiTerra, Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigação e Desenvolvimento Agrário da República de Cabo Verde.

<sup>3</sup>Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Departamento de Química, Laboratório AmbiTerra, Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora.

<sup>4</sup>Centro de Geofísica, Laboratório de Biogeoquímica Ambiental, Universidade de Évora.

\*Autor correspondente / Corresponding author: [rfonseca@uevora.pt](mailto:rfonseca@uevora.pt)

## 1. Introdução

O uso de barragens para armazenamento de água implica especial atenção nos reservatórios e respectiva bacia de drenagem. Um dos principais problemas é a excessiva

acumulação de sedimentos provenientes de duas fontes: materiais de textura grosseira resultantes da erosão natural e materiais resultantes da sobre-erosão induzida por actividades antrópicas, constituídos por partículas silto-argilosas. Estas partículas finas que retêm os nutrientes são facilmente lixiviadas dos solos, tornando-o com textura mais grosseira e deficiente em componentes nutritivos, evoluindo para solos áridos. A progressiva degradação dos solos é um dos maiores problemas do nosso planeta e qualquer exploração para além de certos limites resulta na diminuição da produtividade.

Os produtos de erosão transportados pelos rios acumulam-se nas albufeiras sempre que um rio é interrompido por uma barragem. Por um lado, os sedimentos ricos em nutrientes representam um problema pois afectam a qualidade da água e diminuem a capacidade de armazenamento da mesma; por outro, poderão constituir um importante recurso, dado conterem elementos sob formas minerais e/ou orgânicas, essenciais ao desenvolvimento vegetal. Nos últimos anos desenvolvemos um conceito inovador e sustentável de aproveitamento dos sedimentos acumulados em albufeiras, sob distintas condições climáticas e geológicas, utilizando-os como solos ou aditivos agrícolas (Fonseca *et al.*, 1998, 2003, 2009). O Arquipélago de Cabo Verde apresenta sérios problemas de escassez e degradação dos solos. Encontra-se actualmente em fase de reorganização/gestão dos seus recursos hídricos, através da construção de diversas barragens. A primeira, em funcionamento desde 2006, a barragem do Poilão, localizada na região central da ilha de Santiago, forma um lago pouco profundo numa zona de grandes declives com desníveis que chegam a atingir os 1300 m até à base do lago. Com clima semiárido, interrompido por curtos períodos de chuvas torrenciais, associado a forte erosão diferencial, apresenta elevada acumulação de sedimentos e sérios problemas relacionados com a qualidade da água. Dada a grande preocupação das populações relativamente à escassez de solos aráveis, tem-se desenvolvido agricultura intensiva de irrigação nas encostas a montante da albufeira, facto que

tem contribuído para o aumento da erosão e consequente deterioração da qualidade da água. A ideia conceptual de extracção e utilização dos sedimentos acumulados para recuperação dos solos degradados da bacia é muito adequada a esta pequena albufeira que, dadas as elevadas taxas de sedimentação, funciona como uma “fábrica” de solo renovado e enriquecido que poderá aumentar significativamente a produção agrícola dos pequenos agricultores locais, melhorar a qualidade da água e diminuir a degradação do solo.

Em colaboração com o Instituto Nacional de Investigação e Desenvolvimento Agrário de CV (INIDA), este trabalho tem como objectivo o estudo geoquímico dos sedimentos da albufeira do Poilão e a sua comparação com os solos das sub-bacias envolventes, de forma a avaliar o efeito nocivo da excessiva erosão da bacia e a qualidade dos sedimentos como aditivo agrícola.

## 2. Caracterização da albufeira e bacia de drenagem

A barragem do Poilão situa-se na ilha de Santiago, uma ilha de origem vulcânica, com litologia dominada por escoadas lávicas e materiais piroclásticos subaéreos (escórias, bagacinas ou lapilli e cinzas) e unidades sedimentares conglomeráticas-brechóides, predominantemente basálticos. A barragem foi construída na Ribeira da Seca e na sua bacia afloram 3 das principais unidades cartográficas individualizadas na ilha por Serralheiro (1976): Formação dos Orgãos, Complexo Eruptivo do Pico Antónia e formações sedimentares recentes (Araújo *et al.*, 2014).

As condições climáticas e a erosão em solos pouco profundos e de fraco coberto vegetal, são alguns dos problemas naturais da bacia do Poilão. Além disso, a intervenção humana no ambiente superficial (práticas agrícolas incorrectas e intensivas, uso abusivo de pesticidas e fertilizantes, deposição inadequada de resíduos, lançamento de efluentes na rede hídrica) apresenta forte impacto no meio, levando à contaminação de solos, águas superficiais e subterrâneas e ao aumento do escoamento superficial e consequente perda da camada de solo arável, que vai colmatando a base das encostas, enchendo pouco a pouco o leito das ribeiras (Hernandez, 2008; Pinto, 2010).

## 3. Metodologia

Foi realizada amostragem em diversos componentes do sistema durante a estação da seca: (1) Solos: camada superficial (20 cm) em todas as sub-bacias de drenagem; (2) Sedimentos: amostragem superficial (20 cm) com draga Shipeck (modificada) em 8 pontos uniformemente distribuídos na albufeira, (3) coluna de água: amostragem de água na superfície e fundo (garrafa de Van Dorn) em 5 pontos coincidentes com a amostragem dos sedimentos. Realizaram-se perfis batimétricos em toda a área do lago, através de um sonar de varrimento lateral. Foram feitos perfis em todo o perímetro do lago e em vários transeptos em toda a extensão. Na água foram medidos *in situ*: pH, potencial redox, temperatura, conductividade, salinidade e

sólidos suspensos totais. Nos sedimentos, foi retirada água intersticial através de amostradores específicos e medido o pH e potencial redox dos sedimentos e da água extraída.

Nos solos e sedimentos foram analisados os parâmetros físicos e químicos geralmente usados na avaliação da fertilidade de um solo i.e. textura, carbono, azoto e enxofre, teores biodisponíveis de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e de micronutrientes metálicos (Fe, Mn, Cu, Zn), capacidade de troca catiónica, bases e alumínio de troca. Para uma melhor caracterização dos materiais analisaram-se os minerais argilosos através de difracção de raios-X e quantificou-se a concentração total de fósforo e ião nitrato. Na água intersticial e nas duas profundidades da coluna de água, analisaram-se fosfatos, nitratos, elementos maiores (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na) e menores (Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn).

## 4. Resultados e discussão

A análise morfométrica e geoquímica da albufeira aponta para 3 principais aspectos críticos:

1.Excessivo assoreamento: Os resultados do levantamento batimétrico da albufeira conjugados com perfis topográficos perpendiculares ao vale da Ribeira da Seca, realizados sobre cartas topográficas anteriores à construção da barragem, apontam para uma taxa de sedimentação anual próxima de 90.000 m<sup>3</sup>/ano, fazendo com que, em apenas 7, anos a capacidade de armazenamento da albufeira tenha diminuído quase para metade (Araújo *et al.*, 2014).

2.Excesso de nitratos: A coluna de água, solos e sedimentos, apresentam valores anormalmente elevados de nitratos (Tabela 1), muito superiores aos valores máximos recomendados (25 mg Kg<sup>-1</sup>) e admissíveis (50 mg Kg<sup>-1</sup>), classificando-se toda a bacia como uma zona vulnerável a nitratos (ZVN). Os nitratos têm distribuição heterogénea no espaço e, na albufeira, no mesmo local, entre a superfície e o fundo, denotando que diferentes fluxos de água poderão afectar a sua concentração.

A evolução da agricultura a montante frequentemente em zonas com elevada inclinação, a inexistência de adequados sistemas sanitários e a ausência de zonas tampão (valas, sebes, zonas húmidas), têm favorecido a erosão, o escoamento superficial e a drenagem dos nutrientes. Estas fontes difusas lançam nas águas azoto sob diversas formas (orgânico, amoniacal nitrato, nitrito).

3.Anóxia: Como consequência da estratificação térmica acentuada e do excesso de azoto que entra sob formas minerais/orgânicas, toda a coluna de água encontra-se em anóxia, com valores de Eh que oscilam entre -32,2 e -104,8 mV à superfície e -19,6 e -91,2 mV no fundo. Também os sedimentos de fundo e a água retida nos seus poros apresentam valores de intensa redução traduzidos por valores de Eh que oscilam, respectivamente, entre -161,30 e -346,30 mV e -41,94 e -195,1 mV. As principais causas para esta situação de anóxia poderão ser: (1) o excesso de nitratos na água intensifica o crescimento de plantas e algas em toda a área do lago, consumindo o oxigénio dissolvido, reduzindo o

potencial redox e alterando a química e o metabolismo microbiológico na interface sedimento-água; (2) as formas orgânicas de azoto provenientes dos efluentes domésticos, poderão sofrer nitrificação utilizando as bactérias o oxigénio da água. Embora com estes valores de potencial redox os sedimentos libertem elementos metálicos como o Fe e Mn (Beutel *et al.*, 2008), os seus teores na coluna de água são baixos.

Tabela 1. Valores de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) nos solos da bacia de drenagem, nos sedimentos e na coluna de água da albufeira do Poilão.

Table 1. Nitrates concentration in the soils of the drainage basin, in the bottom sediments and water column.

Solos		Sedimentos		Coluna de Água	
Amostras	( $\text{NO}_3^-$ ) ( $\text{mgkg}^{-1}$ )	Amostras	( $\text{NO}_3^-$ ) ( $\text{mgkg}^{-1}$ )	Amostras	( $\text{NO}_3^-$ ) ( $\text{mgL}^{-1}$ )
S Poilão 1	152	P1 Sup	1976	P1 Sup	190
S Poilão 2	151	P1	2963	P1	116
S Poilão 3	907	P2 Sup	2176	P2 Sup	92
S Poilão 4	1266	P2	3026	P2	161
S Poilão 5	1122	P3 Sup	1185	P3 Sup	273
S Poilão 6	329	P3	830	P3	203
S Poilão 7	174	P4 Sup	1031	P5 Sup	114
S Poilão 8	282	P4	870	P5	243
S Poilão 9	758	P5 Sup	3039	P7 Sup	211
S Poilão 10	334	P5	4632	P7	187
S Poilão 11	1637	P6 Sup	3247	Média	179
S Poilão 12	440	P6	4898	Máximo	273
S Poilão 13	456	P7 Sup	2920	Mínimo	92
Média	616	P7	4666		
Máximo	1637	P8 Sup	2609		
Mínimo	151	P8	3164,0		
		Média	2702		
		Máximo	4898		
		Mínimo	830		

A coluna de água é alcalina, com valores que oscilam entre 8,6-8,8 à superfície, 7,4-8,5 no fundo, possivelmente devido à presença de elevada quantidade de bases (Ca, Mg) provenientes da alteração das rochas basálticas da bacia. Considerando que valores de condutividade superiores a  $100 \mu\text{Scm}^{-1}$  indicam ambientes com impacto antrópico, os valores medidos, que oscilam entre 921-1472  $\mu\text{Scm}^{-1}$  revelam fortes níveis de poluição.

Sendo um sistema bastante crítico relativamente ao excesso de nitratos, diminuição da capacidade de armazenamento de água e falta de oxigenação, uma das soluções viáveis à sua reabilitação poderá consistir na remoção dos sedimentos do fundo, onde os nutrientes preferencialmente se concentram. Este processo terá maior viabilidade se os sedimentos removidos possuírem boas características para remineralização dos solos envolventes.

A erosão selectiva das partículas mais finas dos solos é visível através do aumento significativo da fracção siltosa nos sedimentos. A mineralogia da fracção argilosa é dominada por esmectite, menores quantidades de ilite degradada, óxidos de ferro e rara caulinite. Nos

sedimentos, o grau de cristalinidade é mais baixo e surgem maiores quantidades de minerais interstratificados, denotando a mistura de materiais durante o ciclo sedimentar.

As análises de avaliação da fertilidade dos sedimentos e a sua comparação com os solos parentais, apontam para que as transformações mineralógicas e químicas decorrentes dos processos de erosão-transporte-deposição das partículas da bacia, associados a produtos orgânicos igualmente lixiviados e a um ambiente fortemente redutor, enriquecem os sedimentos em alguns nutrientes minerais e orgânicos necessários ao desenvolvimento vegetal, sendo porém este enriquecimento inferior ao encontrado em sistemas mediterrânicos e tropicais, similares (Fonseca *et al.*, 1998, 2003, 2009).

Os teores dos elementos que ocorrem sob formas orgânicas (azoto, carbono) provenientes de fontes naturais mas, maioritariamente, sob forma de descargas de águas residuais e fertilizantes, são superiores nos sedimentos (Fig. 1). A biodegradação destes resíduos orgânicos pela microflora do lago é acompanhada por diminuição da concentração de oxigénio dissolvido na água, aumentando os níveis de anóxia. Dado o meio fortemente anaeróbio, as bactérias possivelmente apenas têm acção na oxidação dos compostos que mais fortemente fornecem energia, carboidratos, proteínas e compostos azotados, não degradando as complexas moléculas fosfatadas.

Possivelmente por este motivo, pelo elevado teor de nitratos e pela alcalinidade do meio, os teores das formas mais solúveis de fósforo são mais baixos que nos solos parentais, embora os valores da sua forma total sejam semelhantes (valores médios  $\pm 200 \text{mgKg}^{-1}$ ). Esta baixa solubilidade regista-se igualmente na coluna de água ( $\pm 0,02 \text{mgL}^{-1}$ ) e na água intersticial dos sedimentos ( $\pm 0,05 \text{mgL}^{-1}$ ).

Nos solos e sedimentos, os valores da capacidade de troca catiónica, que traduzem a capacidade das partículas de reter e trocar iões com as plantas, são elevados ( $>60 \text{cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$ ), à semelhança da maioria dos materiais de origem basáltica. Contudo, os teores das bases de troca que maior significado têm na nutrição vegetal ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), são significativamente superiores nos sedimentos, revelando a importância que a meteorização das rochas basálticas, seguida das transformações químicas-mineralógicas inerentes aos processos de transporte e deposição na albufeira, poderão ter, na fertilidade dos materiais depositados. Os valores destes elementos na água intersticial, que representa a forma imediatamente disponível à assimilação, são igualmente elevados ( $\text{Ca} \pm 60 \text{mgL}^{-1}$ ;  $\text{Mg} \pm 94 \text{mgL}^{-1}$ ).

Os micronutrientes metálicos, essenciais ao crescimento das plantas e com elevado coeficiente de eficácia como activadores de sistemas enzimáticos, apresentam nos solos da bacia valores disponíveis muito abaixo dos valores considerados médios em solos minerais. Nos sedimentos, o meio fortemente redutor aumenta significativamente a sua solubilidade para níveis considerados adequados à nutrição vegetal.

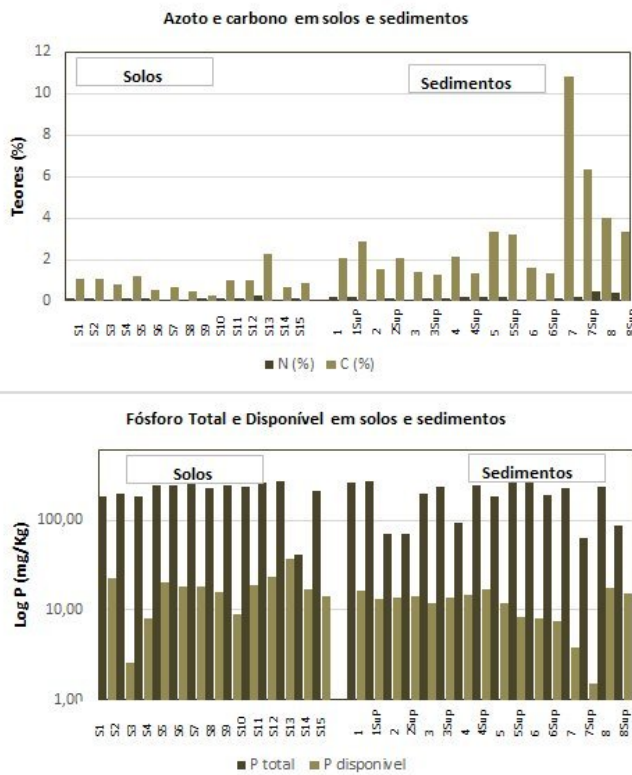


Fig. 1. Concentração de azoto, carbono e de formas totais e disponíveis de fósforo, nos solos e sedimentos.

Fig. 1. Concentrations of nitrogen, carbon, and total and available forms of phosphorus in soils and sediments.

## 5. Conclusões

Num sistema crítico caracterizado por excessivo assoreamento, teor excessivo de nitratos nos sedimentos e coluna de água e condições de anóxia, a estratégia de reabilitação mais viável consiste na remoção dos sedimentos do fundo, onde os nutrientes preferencialmente se concentram, a par de uma gestão apropriada da bacia no que respeita ao uso do solo e a utilização de boas práticas agrícolas e saneamento básico adequado. A extracção dos sedimentos através de processos de dragagem será economicamente mais viável e sustentável, se os sedimentos puderem ser utilizados para remineralização e enriquecimento dos solos da bacia. As análises geoquímicas apontaram para um enriquecimento dos sedimentos relativamente aos solos parentais, em alguns nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, sob formas facilmente assimiláveis. Embora macronutrientes como o fósforo e potássio apresentem solubilidade mais baixa nos sedimentos, a sua utilização como aditivos

agrícolas, embora apresente menores vantagens que em sistemas estudados em climas mediterrâneo e tropical, pode contudo ser vantajosa. Além disso, atendendo a que a exposição em ambiente oxidante poderá aumentar a capacidade de mobilização destes elementos e que a sua fina granulometria poderá reter maior quantidade de água, dado ser imperativo a reabilitação do lago, pensa-se que a sua adição aos solos vizinhos degradados, poderá trazer melhorias significativas da qualidade de vida dos pequenos produtores que habitam nas proximidades.

Uma das prioridades do Governo Cabo-Verdiano é a construção de mais barragens em diversas ilhas. Tal prioridade requer uma perfeita gestão dos recursos hídricos, tornando-se necessário o desenvolvimento de estratégias de forma a minimizar os impactos ambientais.

## Agradecimentos

Os autores agradecem aos Ministérios do Ambiente, Habitação e Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Rural de Cabo Verde, o financiamento e apoio do projecto “Reutilização de produtos de erosão depositados na Barragem de Polião para Agricultura”. Agradecimentos ao INIDA pelo apoio logístico e material durante as campanhas.

## Referências

- Araújo, A., Hernandez, R., Fonseca, R., Matos, J., 2014. Avaliação da taxa de sedimentação na Barragem do Poilão (Ilha de Santiago, Cabo Verde). *Comunicações Geológicas*, **101(Especial II)**, 597-600.
- Beutel, M., Leonard, T.M., Stephen, R.D., Moore, B.C., 2008. Effects of aerobic and anaerobic conditions on P, N, Fe, Mn, and Hg accumulation in waters overlaying profundal sediments of an oligo-mesotrophic lake. *Water Research*, **42**, 1953–1962.
- Fonseca, R., Barriga, F., Fyfe, W., 1998. Reversing desertification by using dam reservoir sediments as agriculture soils. *Episodes*, **21(4)**, 218-224.
- Fonseca, R., Barriga, F., Fyfe, W., 2003. Dam Reservoir Sediments as Fertilizers and Artificial Soils. Case Studies from Portugal and Brazil. In: K. Tazaki, (Ed.). *Water and soil environments, biological and geological perspectives, International Symposium Kanazawa University 21st Century COE Program*, 55-62.
- Fonseca, R., Barriga, F.J.A.S., Canário, T., Theodoro, S., 2009. Mineralogy and geochemistry of Brazilian reservoir sediments: an approach to the green revolution in tropical environments. In: P. Van Straaten, N. Oram, (Eds). *Second International Rocks for Crops Conference*, Kenya, 171-198.
- Hernandez, R., 2008. Caracterização dos solos da ilha de Santiago (Cabo Verde) numa perspectiva de sustentabilidade ambiental. Tese de mestrado, Universidade de Aveiro (não publicado), 370 p.
- Pinto, M., 2010. Cartografia geoquímica da ilha de Santiago com uma densidade de amostragem média/baixa. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro (não publicado), 470 p.
- Serralheiro, A., 1976. A geologia da ilha de Santiago (Cabo Verde). *Boletim Museu Laboratório Mineralógico Geológico Faculdade de Ciências de Lisboa*, **14(2)**, 218 p.