



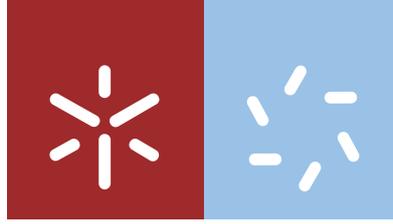
**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

Nemias Moniz Dos Reis Gonçalves

**Monitorização da qualidade da água e do solo  
na Ilha de Santiago-Cabo Verde: focos de  
degradação estratégicas/medidas de conservação**

**Este curso foi financiado pelos serviços de bolsas da Fundação Calouste Gulbenkian, através do processo, my-file: n°139758**





**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

Nemias Moniz Dos Reis Gonçalves

**Monitorização da qualidade da água e do solo  
na Ilha de Santiago-Cabo Verde: focos de  
degradação estratégias/medidas de conservação**

Tese de Doutoramento  
Doutoramento em Geologia - Geoconservação,  
Geologia Ambiental e Recursos Geológicos

Trabalho efetuado sob a orientação da  
**Professora Doutora Teresa Maria Fernandes Valente**

## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### ***Licença concedida aos utilizadores deste trabalho***



**Atribuição  
CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## **Agradecimentos**

*Para a concretização deste trabalho muitos foram aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a sua materialização, por isso, queria deixar um gesto de gratidão a todos.*

*Agradeço a Senhor Deus Criador, Onnipotente, Nosso Pai, Jesus Cristo, Nosso Salvador por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminhos nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades e pela capacidade de aproveitar aquilo de bom que a vida nos oferece.*

*À Professora Doutora Teresa Maria Valente, orientadora da Tese, agradeço o apoio, a partilha do saber e as valiosas contribuições para o trabalho. Acima de tudo, obrigado por me acompanhar nesta jornada, pela visita a Cabo Verde e por estimular o meu interesse pelo conhecimento e pela vida académica.*

*Ao Professor Doutor Jorge Pamplona, pela disponibilidade, paciência e dedicação demonstrada na elaboração dos mapas e desenvolvimento dos artigos, pela sua simpatia e por ter a coragem, disponibilidade e muita alegria em me acompanhar nas jornadas de Campo em Cabo Verde.*

*À minha colega de Doutoramento, Patrícia Gomes, pela partilha de informações, conhecimentos e colaboração, principalmente, nos trabalhos laboratoriais, ao Filipe, pelo incondicional apoio prestado na elaboração dos mapas.*

*À Dra. Lúcia Guise do Laboratório de Águas, do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho, agradeço a capacidade e o rigor das análises realizadas, à Professora Doutora Maria Amália Sequeira Braga, pela colaboração no estudo da mineralogia de solos.*

*A todo pessoal das mais diversas instituições em Cabo Verde pela disponibilização e fornecimento de informações uteis e indispensáveis para a realização deste trabalho.*

*A Adriana Mendonça, pessoa pela qual nutro de admiração especial, agradeço pelo encorajamento, motivações, pelo incondicional apoio prestado durante toda a etapa da elaboração deste trabalho, sugestões, organização do trabalho e correções. Agradeço pela disponibilidade, abertura, partilha de conhecimentos (que é muito), demonstrando ser uma pessoa ímpar, obrigado por tudo.*

*Agradeço a todos os meus amigos pelos momentos bons partilhados em especial ao Anilson Tomas, Silvano Anes, Gilson Andrade, Adnilson “Zebi”, Laduvick pelo apoio e acompanhamento nas saídas de campo.*

*Agradeço aos funcionários, responsáveis pela gestão e distribuição da água dos furos, do ADS (Águas de Santiago) pela colaboração prestada durante as colheitas das amostras de água.*

*A Ineida Romy e Agostinho Semedo “Manu”, obrigado pela camaradagem, incentivo, ideias brilhantes, e acima de tudo pela coragem e motivação transmitida aquando das nossas reflexões.*

*Agradeço à Fundação Calouste Gulbenkian pelo apoio, confiança e financiamento do curso, que se assim não fosse não possível percorrer este caminho. A esta instituição agradeço não só pelo financiamento do curso, também, pelo apoio moral, financeiro durante o período difícil que passei, concretamente o momento que fui submetido à intervenção cirúrgica.*

*Agradeço ao Instituto de Ciências da Terra, unidade financiada por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito dos projectos Ref<sup>o</sup>s UIDB/04683/2020 e UIDP/04683/2020*

*A Telma Carmicita Tavares minha esposa pelo carinho, amor, atenção, apoio, sacrifício, momentos agradáveis proporcionados durante este percurso e não só.*

*Não podia deixar de agradecer a minha família que em qualquer momento me serve de suporte a motivação para enfrentar os desafios que me é confiado.*

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## **Monitorização da qualidade da água e do solo na ilha de Santiago-Cabo verde: focos de degradação estratégias/medidas de conservação**

### **Resumo**

A promoção da sustentabilidade no uso do território e dos seus recursos é um tema de relevância acrescida face aos cenários atuais de disrupção climática, caracterizados por frequentes e persistentes secas em muitas regiões do Globo. O Arquipélago de Cabo Verde é exemplo deste contexto, motivando o desenvolvimento desta investigação focada na sua Ilha mais populosa (Ilha de Santiago), onde se estuda a água e o solo, enquanto recursos sob forte pressão, natural e antrópica. Esta investigação visa monitorizar e avaliar a qualidade da água e do solo e suas potencialidades na Ilha de Santiago. Realizou-se três campanhas de amostragem (nos anos 2016, 2017 e 2018) em pontos de água que representam diversas condições geológicas e de uso do solo. Em cada ponto foram efetuadas medições *in situ* de alguns parâmetros e posteriormente analisados parâmetros conducentes a classificações hidroquímicas e avaliação da qualidade para consumo e irrigação. O solo e sedimentos foram estudados na campanha de amostragem realizada em 2018. Partindo da caracterização geral das bacias hidrográficas, realizou-se um estudo enfocado na bacia hidrográfica de Santa Cruz, e em particular nas sub-bacias de S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos, por estarem sujeitas a intensa atividade agrícola. A análise da situação em termos de taxas de cobertura do sistema de abastecimento público revelou a existência de áreas críticas, especificamente nos municípios de S. Domingos e S. Salvador do Mundo, onde uma parte significativa da população ainda depende de fontes precárias que nem sempre atendem aos padrões legais de qualidade. O solo é outro recurso cuja preservação é crítica na Ilha de Santiago. A este nível, a investigação centrou-se nas áreas abastecidas pelas barragens de Poilão, Figueira Gorda e Faveta, cujo assoreamento tem sido reportado na bibliografia. Pôs-se em evidência a textura grosseira e a pobreza dos solos, especialmente em termos de matéria orgânica (com teores inferiores a 5%) e micronutrientes e a tendência de salinização marcada pelas tendências do sódio e da condutividade elétrica. Esta investigação veio confirmar a possibilidade de utilização dos sedimentos das albufeiras assoreadas como potencial estratégia de melhoria das propriedades dos solos nestas áreas. Relativamente aos processos de degradação por contaminação, os resultados na área de drenagem da lixeira da cidade da Praia indicam potencial mobilização de metais (Cu, Cr e Ni) a partir deste foco, registando-se concentrações que ultrapassam os limites estabelecidos pela norma de Ontário. Foi possível concluir que a monitorização dos vários pontos de água subterrânea não apresenta diferenças consistentes entre as três campanhas, o que conduziu à classificação hidroquímica, onde se evidenciou uma variedade de fácies, com predominância de águas cloretadas mistas e bicarbonatadas.

**Palavras-chave:** bacias hidrográficas; hidroquímica; monitorização; qualidade da água e do solo; salinização.

## **Monitoring of water and soil quality on the Santiago island -Cape Verde: foci of degradation strategies / conservation measures**

### **Abstract**

The promotion of sustainability in the use of the territory and its resources is an issue of added relevance in face of the current scenarios of climate disruption, characterized by frequent and persistent droughts in many regions of the globe. Cape Verde's Archipelago is an example of this context, motivating the development of this research focused on its most populated island (Santiago Island), where water and soil are studied as resources under strong pressure, natural and man-made. This research aims to monitor and evaluate water and soil quality and their potential in Santiago Island. Three sampling campaigns (in 2016, 2017 and 2018) were carried out in water points that represent various geological and land use conditions. At each point in situ measurements of some parameters were made and later parameters leading to hydrochemical classifications and quality evaluation for consumption and irrigation were analyzed. Soil and sediments were studied in the 2018 sampling campaign. Starting from the general characterization of the watersheds, a study was carried out focusing on the Santa Cruz watershed, and in particular in S. Miguel, Ribeira Seca and S. Domingos sub-basins, as it was subject to intense agricultural activity. The analysis of the situation in terms of coverage rates of the public supply system revealed the existence of critical areas, specifically in S. Domingos and S. Salvador do Mundo, where a significant part of the population still depends on precarious sources that do not always meet legal quality standards. The soil is another resource whose preservation is critical in Santiago Island. At this level, research has focused on the areas supplied by the Poilão, Figueira Gorda and Faveta barrages, whose siltation has been reported in the bibliography. The coarse texture and poverty of the soils were highlighted, especially in terms of organic matter (with levels below 5%) and micronutrients, and the tendency of salinization marked by trends in sodium and electrical conductivity. This research has confirmed the possibility of using sediments from silted reservoirs as a potential strategy for improving soil properties in these areas. Regarding the processes of degradation by contamination, the results in the drainage area of the garbage dump of the city of Praia indicate potential mobilization of metals (Cu, Cr and Ni) from this focus, registering concentrations that exceed the limits established by the Ontario standard. It was possible to conclude that the monitoring of the various points of groundwater does not present consistent differences between the three campaigns, which led to the hydrochemical classification, where a variety of facies was evidenced, with predominance of mixed and bicarbonated chlorinated waters.

**Keywords:** hydrochemistry; monitoring; river basins; salinization; water and soil quality.

## Índice Geral

<b>Agradecimentos</b> .....	iii
<b>Dedicatória</b> .....	xv
<b>Resumo</b> .....	v
<b>Abstract</b> .....	vi
<b>Índice Geral</b> .....	vii
<b>Índice de Tabelas</b> .....	ix
<b>Índice de Figuras</b> .....	xi
<b>Siglas e Abreviaturas</b> .....	xiv
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	2
1.1. A água em Cabo Verde enquanto cenário insular vulcânico.....	3
1.2. O solo em Cabo Verde enquanto cenário insular vulcânico.....	5
1.3. Interações água-rocha-solo com relevância ambiental.....	7
1.4. Justificação e motivações para o desenvolvimento da tese.....	8
1.5. Objetivos.....	9
1.6. Estrutura da tese.....	9
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	12
<b>CARATERIZAÇÃO GERAL DA ILHA DE SANTIAGO (CABO VERDE)</b> .....	13
2.1. Geografia.....	14
2.2. Clima.....	15
2.3. Geomorfologia.....	18
2.4. Geologia.....	23
2.5. Hidrogeologia.....	26
2.5.1. Unidades Hidrogeológicas da Ilha de Santiago.....	27
2.5.2. Descrição das Unidades Hidrogeológicas.....	28
2.5.3. Modelo hidrogeológico conceptual (simplificado).....	30
2.6. Solos.....	31
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	35
<b>3- ABORDAGEM METODOLÓGICA</b> .....	36
3.1- Trabalho de gabinete.....	36
3.2- Campo/ Amostragem.....	37
3.3- Trabalho de laboratório.....	40
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	44
<b>ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM CONTEXTO DE CLIMA ÁRIDO (CABO VERDE E ILHA DE SANTIAGO)</b> .....	45
4.1 - A água em climas áridos.....	45
4.2- Estratégias nacionais para o sistema de gestão da água.....	48
4.3 - Acesso a infraestruturas de água em Cabo Verde.....	49
4.4 - Abastecimento e qualidade da água na ilha de Santiago.....	50
4.4.1 - Consumo de água e principais fontes de água.....	50
4.4.2 - Acesso a infraestruturas de água na Ilha de Santiago.....	51
4.4.3 - Qualidade de água - o caso de S. Domingos.....	54
4.5 - Notas de síntese sobre o abastecimento de água.....	56

<b>CAPÍTULO 5</b> .....	58
<b>BACIAS HIDROGRÁFICAS DA ILHA DE SANTIAGO: CARACTERIZAÇÃO FIOGRÁFICA, HIDROQUÍMICA E QUALIDADE DA ÁGUA</b> .....	59
5.1. Bacias e sub-bacias hidrográficas: caracterização e descrição geral .....	61
5.2. Hidrogeoquímica e qualidade da água nas sub-bacias de S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos .....	64
5.2.1. Quimismo e classificações hidroquímicas .....	65
5.2.2. Qualidade da água e risco de salinização do solo .....	70
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	74
<b>ESTUDO DE VARIAÇÕES REGIONAIS – HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DA ÁGUA</b> .....	75
6.1.1- Parâmetros físico-químicos gerais (campo, alcalinidade, dureza e sílica) .....	83
6.1.2- Catiões .....	87
6.1.3 - Aniões .....	90
6.1.4 Componente vestigiais .....	93
6.2- Fatores de controlo do quimismo .....	94
6.3- Fácies hidroquímicas .....	98
6.4 Qualidade da água para o consumo humano e para rega .....	100
6.4.1- Água para o consumo humano .....	100
6.4.2- Água para uso agrícola .....	106
6.5- Tratamento estatístico: Matriz de correlação e análise multivariada de dados .....	109
6.6- Análise fatorial .....	112
6.7. – Análise discriminante .....	113
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	117
<b>PROPRIEDADES E GESTÃO DO SOLO E SEDIMENTOS - CASOS DE ESTUDO NA ÁREA DAS BARRAGENS DE SANTIAGO</b> .....	118
7.1- Conceitos fundamentais sobre solos e suas propriedades .....	119
7.2- Práticas agrícolas e degradação do solo .....	120
7.3- Principais barragens na Ilha de Santiago .....	122
7.4- O assoreamento das albufeiras das barragens – potencial agrícola .....	130
7.4.1- Propriedades dos solos e sedimentos na área das barragens .....	131
7.4.1.1- Atributos físico-químicos na área das albufeiras de Santiago .....	134
7.4.1.2- Atributos mineralógicos .....	149
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	158
<b>INFRAESTRUTURAS DE RESÍDUOS COMO FOCO DE CONTAMINAÇÃO DE SOLOS E SEDIMENTOS</b> .....	159
8.1- Produção de resíduos e estruturas de destino final na Ilha .....	159
8.2 O caso da lixeira da Praia .....	161
8.2.1- Características gerais da lixeira .....	161
8.2.2 - Propriedades dos solos e sedimentos na área envolvente da lixeira e impacte na qualidade ambiental .....	163
8.3 -Contaminação por metais na área envolvente à lixeira .....	165
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	169
<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	170
9.1- Conclusões .....	170
9.2- Recomendações e considerações finais .....	174
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	176

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Valores máximos (max.) e mínimos (min) da precipitação (série de 1990 a 2016) e temperatura (1981 a 2016).....	17
<b>Tabela 2</b> - Principais litologias das Formações e dos Complexos geológicos da Ilha de Santiago (adaptado de Serralheiro, 1976; Alves et al., 1979; Pina, 2009) – da formação ou do complexo mais recente para o mais antigo. ....	25
<b>Tabela 3</b> - Características das unidades hidrogeológicas (adaptado de BURGEAP, 1974; Pina, 2009).28	
<b>Tabela 4</b> - Classificação dos solos da ilha de Santiago segundo Faria, (1970) com correlação com a “USA Soil Taxonomy” (1975) e da FAO (2015). ....	32
<b>Tabela 5</b> – Métodos analíticos usados para análise das amostras de água. * - método indicado na legislação em vigor e de acordo com procedimento descrito em Rodier (1984). ....	41
<b>Tabela 6</b> - Principais fontes de abastecimento de água (%) na Ilha de Santiago.....	53
<b>Tabela 7</b> - Superfície e volumes totais de precipitação das principais bacias hidrográficas da Ilha de Santiago (adaptado de Lobo de Pina, 2009).....	63
<b>Tabela 8</b> – Hidroquímica nas sub-bacias hidrográficas mais agricultadas (T em °C; CE em $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; iões em $\text{mg}/\text{L}$ ; Id – limite de deteção do método). Campanhas do verão de 2003 (Lobo de Pina, 2009) e do verão de 2016 (presente trabalho). ....	65
<b>Tabela 9</b> – Caraterização de pontos de água na primeira campanha - Parâmetros de campo (pH, Condutividade elétrica -CE, Temperatura – Temp. e Sólidos Dissolvidos Totais - SDT), aniões e outros parâmetros físico-químicos gerais (Alk. - Alcalinidade, Dureza – Dz, Turvação e Oxidabilidade). ....	77
<b>Tabela 10</b> – Caraterização de pontos de água na primeira campanha – catiões maioritários e componente vestigial .....	78
<b>Tabela 11</b> – Caraterização de pontos de água na segunda campanha - Parâmetros de campo (pH, Condutividade elétrica -CE, Temperatura – Temp. e Sólidos Dissolvidos Totais - SDT), aniões e outros parâmetros físico-químicos gerais (Alk. - Alcalinidade, Dureza – Dz, Turvação e Oxidabilidade). ....	79
<b>Tabela 12</b> – Caraterização de pontos de água na segunda campanha – catiões maioritários e componente vestigial .....	80
<b>Tabela 13</b> – Caraterização de pontos de água na terceira campanha - Parâmetros de campo (pH, Condutividade elétrica -CE, Temperatura – Temp. e Sólidos Dissolvidos Totais - SDT), aniões e outros parâmetros físico-químicos gerais (Alk. - Alcalinidade, Dureza – Dz, Turvação e Oxidabilidade). ....	81
<b>Tabela 14</b> – Caraterização de pontos de água na terceira campanha – catiões maioritários e componente vestigial .....	82
<b>Tabela 15</b> - Dados estatísticos referentes a temperatura das águas amostradas.....	83
<b>Tabela 16</b> - Dados estatísticos referentes ao pH das águas amostradas.....	84
<b>Tabela 17</b> - Dados estatísticos referentes à condutividade das águas amostradas (valores em $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). ....	85
<b>Tabela 18</b> - Dados estatísticos referentes a alcalinidade das águas amostradas (valores em $\text{mg}/\text{L}$ $\text{CaCO}_3$ ). ....	86
<b>Tabela 19</b> - Dados estatísticos referentes a dureza total das águas amostradas (valores em $\text{mg}/\text{L}$ ). ..	86
<b>Tabela 20</b> - Dados estatísticos referentes à concentração de silício das águas amostradas (valores em $\text{mg}/\text{L}$ ). ....	87
<b>Tabela 21</b> - Dados estatísticos dos diferentes parâmetros químicos (Catiões) obtidos nas análises de laboratório para as amostras da zona de estudo (valores em $\text{mg}/\text{L}$ ). ....	88
<b>Tabela 22</b> - Dados estatísticos dos distintos parâmetros químicos (aniões) obtidos nas análises de laboratório para as amostras da zona de estudo (valores em $\text{mg}/\text{L}$ ). ....	90
<b>Tabela 23</b> - Valores médios dos parâmetros físico químicos selecionados para a avaliação da qualidade de águas subterrâneas da área de estudo com base na legislação vigente em Cabo Verde.....	102

<b>Tabela 24-</b> Resultado do teste de significância em que se obtém os coeficientes de correlação de Pearson entre os principais parâmetros analisados na presente tese. ....	109
<b>Tabela 25-</b> Formação hidrogeológica e profundidade dos pontos de água. ....	114
<b>Tabela 26 -</b> Matriz de confusão em validação cruzada. ....	114
<b>Tabela 27-</b> Classificação a priori e a posteriori, probabilidades de pertencer, coordenadas das observações e distâncias quadradas. ....	115
<b>Tabela 28-</b> Principais características da barragem de Poilão. Fonte: Estudo de impacte ambiental – barragem do Poilão-MAAP, 2005. ....	124
<b>Tabela 29 –</b> Características da água superficial da albufeira do Poilão usada para rega. ....	125
<b>Tabela 30-</b> Síntese das principais características da barragem de Figueira Gorda ....	127
<b>Tabela 31 –</b> Características da água da albufeira da Figueira Gorda usada para rega. ....	128
<b>Tabela 32 –</b> Síntese das características da barragem de Faveta ....	129
<b>Tabela 33 –</b> Características da água da albufeira da Faveta usada para rega (amostragem pontual em abril de 2018). ....	130
<b>Tabela 34-</b> Resultados das análises do pH, Condutividade elétrica /CE), sódio e teor de matéria orgânica (MO) dos solos amostrados. ....	135
<b>Tabela 35-</b> Concentrações típicas para o crescimento das plantas (Epstein, 1965) ....	143
<b>Tabela 36-</b> Valores das concentrações de macronutrientes das amostras em estudo. ....	144
<b>Tabela 37-</b> Valores das concentrações de micronutrientes das amostras em estudo. ....	148
<b>Tabela 38 –</b> DRX da fração < 2 mm de amostras de vários perfis na Ribeira Seca (Ol – Olivina; Px – Piroxena; Anf – Anfíbola; Arg – Minerais de argila; M – Mica; Q – Quartzo; F – Feldspato; P – Plagiocalse; Nef – Nefelina; Anl – Analcina; Ant – Anatase; Hem – Hematite; Mgh – Maghemite; Go – Goethite; tr – Vestigial). ....	150
<b>Tabela 39 –</b> DRX da fração < 2 µm de amostras de vários perfis na Ribeira Seca; Figueira Gorda e Faveta. Il – Illite; Sm – Esmectite; K-Sm – Interestratificado caulinite-esmectite; K – Caulinite; Hal – Halosite; Hem – Hematite; Mgh – Maghemite; Go – Goethite; All – Atofana; tr – Vestigial. ....	152
<b>Tabela 40-</b> Estimativas de produção de resíduos, por concelho, na ilha de Santiago (Inquérito sobre Recolha e Tratamento de Resíduos Urbanos, 2013, INE) ....	160
<b>Tabela 41-</b> Classificação textural das amostras analisadas. ....	165
<b>Tabela 42-</b> Resultados dos metais pesados nas diversas amostras colhidas (em comparação com os dados estabelecidos pela norma de Ontário e formação geológica onde está inserida a área da lixeira Cabral Pinto, 2010). ....	166

## Índice de Figuras

<b>Figura 1-</b> Imagens ilustrativas da exploração de Recursos na Ilha de Santiago: A e B- extração de areia nas praias; C- exploração no leito das ribeiras; D- Extração de seixos na praia .....	5
<b>Figura 2-</b> Localização geográfica do Arquipélago de Cabo Verde, dos grupos de Ilhas do Barlavento e de Ilhas do Sotavento e da Ilha de Santiago .....	13
<b>Figura 3-</b> Divisão administrativa da Ilha de Santiago. Adaptado de Instituto Nacional de Gestão do Território (INGT, 2019).....	14
<b>Figura 4-</b> Distribuição da precipitação média anual na Ilha de Santiago no período 1990 a 2016 (INMG) .....	17
<b>Figura 5</b> - Distribuição da temperatura media anual na Ilha de Santiago no período 1981 a 2016 (INMG).....	17
<b>Figura 6</b> - Hipsometria da Ilha de Santiago (Dados Cartográficos Municipais (2003) .....	18
<b>Figura 7</b> - Unidades Geomorfológicas da ilha de Santiago. Adaptado de Cartas de Grandes Unidades Geomorfológicas (Marques, 1990) .....	19
<b>Figura 8</b> – Mapa das Unidades Hidrogeológicas (adaptado de Carta Geológica de Cabo Verde à escala 1/25 000, Junta de Investigação do Ultramar, 1961 (Serralheiro, 1976; Pina, 2009) .....	26
<b>Figura 9</b> - Modelo conceptual genérico da hidrologia nas ilhas vulcânicas, adaptado de McDonald e outros (1983). .....	30
<b>Figura 10</b> - Distribuição dos tipos de solos na Ilha de Santiago (Carta de Zonagem Agro-ecológica e da Vegetação da Ilha de Santiago). .....	32
<b>Figura 11-</b> Colheita das amostras de água e medição, in situ (campo), dos parâmetros (pH, CE, TDS e Temp).....	38
<b>Figura 12-</b> Análise laboratorial das amostras.....	39
<b>Figura 13-</b> Colheita das amostras nas vertentes da linha de água e em terrenos agricultados.....	40
<b>Figura 14-</b> Esquema de preparação das amostras para os diferentes tipos de análises. ....	42
<b>Figura 15</b> - Evolução da população com acesso à rede pública de água em Cabo Verde de 1990 a 2016.....	49
<b>Figura 16</b> - Imagem de crianças carregando recipientes para recolha de água.....	50
<b>Figura 17</b> - Principais fontes de abastecimento de água em Cabo Verde. Fonte: INE (2017).....	50
<b>Figura 18</b> - Principais fontes de abastecimento de água - ilha de Santiago (INE, 2017).....	52
<b>Figura 19</b> - Diferentes meios de abastecimento de água na ilha de Santiago: A) chafariz; B) autotanque; C) nascentes; D) poços. ....	52
<b>Figura 20-</b> Evolução da população com acesso à rede pública na ilha de Santiago (2012-2020). ....	53
<b>Figura 21</b> - Distribuição das principais fontes de abastecimento de água por município. O tamanho dos círculos representa a proporção da população atendida pela rede pública. ....	54
<b>Figura 22</b> - Amostras que excedem os valores máximos admissíveis (Decreto-Lei nº 8/2004, de 23 de fevereiro da República de Cabo Verde). Dados de Gonçalves et al. (2015). TSD - Sólidos totais dissolvidos; Fe - Ferro total. ....	56
<b>Figura 23</b> - Bacias hidrográficas e sub-bacias mais importantes (principais vales agrícolas) da Ilha de Santiago. Adaptado de Heitor e Pina (2003) e Lobo de Pina (2009). ....	61
<b>Figura 24</b> - Distribuição da amostragem para classificação hidrogeoquímica das sub-bacias de S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos. * - O furo FT-39 é coincidente em ambos os trabalhos. ....	65
<b>Figura 25</b> – Classificação hidrogeoquímica (Diagrama de Piper) – sub-bacias hidrográficas de S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos. ....	67
<b>Figura 26</b> – Relações entre a condutividade elétrica e iões maiores na sub-bacia hidrográfica de S. Miguel. A. CE-Na; B. CE-Mg; C. CE-Cl; D. CE-Si; E. Na-Cl .....	68

<b>Figura 27</b> – Relações entre a condutividade elétrica e iões maiores na sub-bacia hidrográfica da Ribeira Seca. A. CE-Na; B. CE-Cl; C. CE-Si; D. Si-HCO <sub>3</sub> ; E. Na-Cl .....	69
<b>Figura 28</b> – Relações entre a condutividade elétrica e iões maiores na sub-bacia hidrográfica de S. Domingos. A. CE-Na; B. CE-Cl; C. CE-HCO <sub>3</sub> ; D. CE-SO <sub>4</sub> ; E. Na-Cl.....	70
<b>Figura 29</b> – Padrão de evolução temporal e espacial de aniões indicadores da qualidade da água – sub-bacias hidrográficas de: A- S. Miguel; B- Ribeira Seca; C- S. Domingos .....	71
<b>Figura 30</b> – Risco de salinização (diagrama SAR) – sub-bacias hidrográficas de S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos.....	73
<b>Figura 31</b> – Deposição de sais e fendas de retração num solo (sub-bacia de Ribeira Seca).....	73
<b>Figura 32</b> – Localização dos pontos de água tratados neste capítulo. ....	76
<b>Figura 33</b> - Diagrama binário da condutividade medido no campo em função da condutividade medido no laboratório. ....	85
<b>Figura 34</b> - Relação entre os valores médios dos principais catiões e a condutividade elétrica, com as respetivas retas de correlação linear. (a) sódio vs. condutividade; b) cálcio vs. condutividade; c) potássio vs. condutividade; d) magnésio vs. condutividade). ....	96
<b>Figura 35</b> - Relação entre os valores médios dos principais aniões e a condutividade elétrica, com as respetivas retas de correlação linear. (a) cloreto vs. condutividade; b) nitrato vs. condutividade; c) bicarbonato vs. condutividade; d) sulfato vs. condutividade). ....	97
<b>Figura 36</b> - Diagrama de Piper das amostras de águas subterrâneas analisadas .....	99
<b>Figura 37</b> - Número de amostras que ultrapassam o padrão de potabilidade em alguns parâmetros	105
<b>Figura 38</b> - Distribuição das amostras com os números de parâmetros que não respeitam o valor de potabilidade legalmente exigidos .....	106
<b>Figura 39</b> - Diagrama Riverside com a projeção das amostras de águas analisadas.....	108
<b>Figura 40</b> - Dendograma resultante da aplicação da classificação hierárquica às amostras de água da ilha de Santiago.....	111
<b>Figura 41</b> - Resultados da análise fatorial aplicada ao conjunto de 67 amostras .....	113
<b>Figura 42</b> – Distribuição das variáveis pelo fator discriminante (em cima) e apresentação dos centroides e elipsoides que descrevem os dois grupos pré-definidos. 1 – < 100 m; 2 - >=100 m (em baixo). ....	115
<b>Figura 43</b> – Paisagem da Ilha de Santiago que ilustram métodos e técnicas ancestrais de controlo da erosão (a- aloë vera; b- muretes e acácias; c- carapate; d- tendente) .....	122
<b>Figura 44</b> - Barragem de Poilão e da respetiva albufeira (Imagem aérea, obtida através do Google™ Earth, com indicação do muro, seta preta) .....	123
<b>Figura 45</b> - Situação atual da albufeira (completamente seca).....	125
<b>Figura 46</b> - Barragem de Figueira Gorda (Imagem aérea, obtida através do Google™ Earth, com a localização, seta preta).....	126
<b>Figura 47</b> - Barragem de Figueira Gorda e o seu estado atual (a- estrutura da barragem; b- albufeira seca) .....	127
<b>Figura 48</b> - Barragem de Faveta (imagem aérea, obtida através do Google™ Earth, com a localização, seta preta) .....	128
<b>Figura 49</b> - Estado atual da barragem de Faveta .....	129
<b>Figura 50</b> – Localização das áreas de amostragem nas bacias hidrográficas de Santa Cruz e da Praia. ....	132
<b>Figura 51</b> – Localização das amostras com representação de perfis ao longo da Ribeira Seca: a montante da albufeira (RS), na zona da albufeira (limite com água - PC e zona seca - PA) e a jusante da barragem (AC e SC).....	133

<b>Figura 52</b> – Teor de matéria orgânica na Ribeira Seca. (as colunas a vermelho representam o leito da ribeira).....	136
<b>Figura 53</b> - Análise comparativa dos valores de pH (H <sub>2</sub> O) e pH (KCl).....	137
<b>Figura 54</b> - Distribuição dos valores da condutividade elétrica sistemas fluviais estudados, de montante para jusante. (as colunas a vermelho representam o leito da ribeira). ....	139
<b>Figura 55</b> - Concentração do sódio nos sistemas fluviais estudados, de montante para jusante. (as colunas a vermelho representam o leito da ribeira).....	141
<b>Figura 56</b> - Diagrama triangular utilizado para a classificação da textura dos solos (escala de Atterberg).....	142
<b>Figura 57</b> – Distribuição das concentrações de cálcio nos sistemas fluviais embalsados (as colunas a vermelho representam o leito das ribeiras).....	145
<b>Figura 58</b> – Distribuição das concentrações de magnésio nos sistemas fluviais embalsados (as colunas a vermelho representam o leito das ribeiras).....	146
<b>Figura 59</b> – Variação da concentração de fósforo assimilável ao longo da Ribeira Seca (as colunas a vermelho representam o leito da ribeira).....	146
<b>Figura 60</b> – Variação da concentração de nitrato ao longo da Ribeira Seca (as colunas a vermelho representam o leito da ribeira).....	147
<b>Figura 61</b> – Padrão DRX de uma amostra da Ribeira Seca na fração < 2 mm, evidenciando a composição mineralógica principal.....	151
<b>Figura 62</b> – Padrão de DRX da fração < 2 µm da amostra PA3 (seca ao ar). Il – Ilite; Sm – esmectite; Hal – Halosite; Hem – Hematite; Mgh - Maghemite. A identificação da esmectite foi confirmada por saturação com etileno-glicol e aquecimento. ....	153
<b>Figura 63</b> – Padrão de DRX da fração a fração < 2 µm (lâmina orientada seca ao ar) da amostra FG-S2, evidenciando a presença de alofana (AlI). ....	154
<b>Figura 64</b> – Percentagem de minerais de argila nos perfis da Ribeira Seca (as colunas a laranja representam o leito da ribeira).....	155
<b>Figura 65</b> – Média da proporção de minerais de argila na fração < 2 mm e na fração < 2 µm no leito da Ribeira Seca. ....	155
<b>Figura 66</b> - Diagrama de gestão de RSU ilha de Santiago (Infraestrutura de Dados Espaciais de Cabo Verde. Divisão Administrativa <a href="http://www.sit.gov.cv">www.sit.gov.cv</a> ).....	160
<b>Figura 67</b> - Lixeira da Praia (Imagem aérea, obtida através do Google TM Earth Pro e indicação (delimitação a vermelho) da respetiva área ocupada).....	161
<b>Figura 68</b> - Tipos de resíduos depositados na lixeira da Praia (destaca-se a grande quantidade de plásticos e resíduos de construção/demolição).....	162
<b>Figura 69</b> - Coletores de lixo- lixeira da praia.....	162
<b>Figura 70</b> - Aterro sanitário (Imagem aérea, obtida através do Google TM Earth Pro representado pelo retângulo vermelho).....	163
<b>Figura 71</b> - Distribuição dos pontos de amostragem dos solos (LP-S0 e LP-S1) e sedimentos (restantes pontos) nas proximidades da lixeira.....	164
<b>Figura 72</b> - Variação da concentração de metais nas amostras de sedimentos ao longo da ribeira, de montante (PL_SD0) para jusante até ao estuário (LP_SD5). ....	167
<b>Figura 73</b> – Distribuição espacial das concentrações de cloreto e de nitrito.....	173

## **Siglas e Abreviaturas**

<b>ADL</b>	Análise Discriminante Linear
<b>ADS</b>	Águas de Santiago
<b>AM</b>	Amostras
<b>ANAS</b>	Agência Nacional de Água e Saneamento
<b>ARE</b>	Agência de Regulação Económica
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>CE</b>	Condutividade elétrica
<b>CI</b>	Cromatografia iónica
<b>DGASP</b>	Direção Geral de Agricultura Silvicultura e Pecuária
<b>FAO</b>	Fundo Mundial para a Alimentação
<b>ICP-OES</b>	Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente
<b>INE</b>	Instituto nacional de estatística
<b>INGRH</b>	Instituto Nacional de Gestão dos Recursos Hídricos
<b>INMG</b>	Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica
<b>MAAP</b>	Ministério do Ambiente Agricultura e Pesca
<b>MO</b>	Matéria Orgânica
<b>OMS</b>	Organização Mundial de Saúde
<b>ONU</b>	Organização das Nações Unidas
<b>PNUD</b>	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
<b>QGIS</b>	Quantum GIS
<b>SAR</b>	Relação de absorção de sódio
<b>SPSS</b>	Statistical Package for the Social Sciences
<b>TDS</b>	Sólidos dissolvidos totais
<b>UNESCO</b>	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>USSL</b>	United States Salinity Laboratory
<b>VMA</b>	Valor máximo admissível
<b>VMR</b>	Valor máximo recomendado
<b>VP</b>	Valor paramétrico

***Dedicatória***

*Dedico este trabalho aos meus filhos*

***CAPÍTULO 1***

---

**INTRODUÇÃO**

## **INTRODUÇÃO**

O uso sustentável dos recursos naturais, especialmente da água e do solo, tem assumido relevância crescente em contextos climáticos desfavoráveis, como é o caso dos climas áridos e semiáridos. Os desafios que se colocam a uma gestão adequada dos recursos são ainda maiores em territórios sujeitos a pressões antrópicas associadas ao crescimento da população e à prática desregulada de atividades económicas, como se verifica em muitos países em desenvolvimento.

Cenários atuais de disrupção climática, caracterizados por secas cada vez mais frequentes e persistentes, tornam a preservação e gestão sustentável do território e seus recursos ainda mais premente em regiões como a costa Oeste de África.

A água, componente fundamental à vida e essencial a uma grande variedade de atividades económicas, é um dos recursos naturais mais abundante no planeta, mas também um dos mais suscetíveis à degradação. A necessidade do seu uso para consumo humano (por exemplo, beber e cozinhar), e também para o desenvolvimento de atividades como a agricultura, transportes, indústria e recreação, põe em destaque a natureza crítica deste recurso, que se assume como parte integrante da vida. Afigura-se, porém, como um recurso limitado e limitante, como mostram os recorrentes problemas de escassez de água associados à seca em muitas partes do mundo, por vezes com consequências trágicas (Quevauvillier, 2002).

O arquipélago de Cabo Verde, os arquipélagos das Canárias, Açores, e Madeira, constituem a região da Macaronésia, conhecida pelas suas especificidades biogeográficas, incluindo a riqueza florística e faunística (Robinson, 1972). Esta identidade manifesta-se também ao nível dos recursos naturais, cuja similaridade se deve em grande parte, à origem vulcânica e a um conjunto complexo comum de interações água-rocha-vegetação-solo.

O estado da arte focado neste contexto territorial também sugere problemas idênticos relacionados com a gestão de recursos hídricos. Cerezal *et al.* (2013), Custodio, *et al.* (2016) e Ruiz-García *et al.* (2019) apresentam revisões bibliográficas e discutem problemas associados à qualidade da água, com referência às principais ameaças ao abastecimento nas Ilhas Canárias. De igual forma são diversos os trabalhos que se focam nos controlos ao nível da hidrogeoquímica e na salinização da água em várias ilhas do Arquipélago dos Açores (Cruz *et al.* 2011; Cruz & Andrade, 2017).

O presente trabalho foca-se assim neste contexto territorial e nesta temática, pela importância que estes recursos têm na vida do ser humano, no estado dos ecossistemas, e no desenvolvimento económico e social, especialmente em situações climáticas e de desenvolvimento que podem ser

desfavoráveis. O Arquipélago de Cabo Verde, e em particular a Ilha de Santiago, sobre a qual incide a presente investigação, é exemplo deste tipo de cenário.

### **1.1. A água em Cabo Verde enquanto cenário insular vulcânico**

A génese e a geologia das ilhas vulcânicas oceânicas condicionam o aproveitamento e as formas de gestão dos recursos hídricos. As principais fontes de água estão associadas aos recursos subterrâneos, donde emana a importância do tema da hidrogeologia de aquíferos vulcânicos. Nestes contextos geológicos uma característica fundamental é a grande permeabilidade inicial dos terrenos vulcânicos (Poncela, 2015). Por outro lado, como refere, Custodio *et al.* (1976), a natureza e estrutura das rochas vulcânicas determina que se possam ter poços com elevados fluxos e pequenas descidas de nível e outros praticamente estéreis, a muito curta distância e na mesma formação hidrogeológica. Em contexto insular, os problemas de quantidade e qualidade, especialmente dos aquíferos mais costeiros, tornam a gestão e o provimento de água ainda mais complexos (Carreira *et al.* 2010; Cruz *et al.* 2017; Gonçalves *et al.* 2015).

De uma maneira geral, no contexto da Macaronésia, em que se insere o território em estudo, os recursos hídricos obtêm-se principalmente através de poços, minas e galerias de água doce.

Para um melhor conhecimento da hidrogeologia e hidrogeoquímica desta região a revisão do estado da arte remete para um conjunto de trabalhos, dos quais se destacam:

- Ilhas Canárias – Muñoz Sanz (2005), Cruz Fuentes (2008), Poncela, (2015),
- Cabrera & Custodio (2016), Naira Suarez (2019) e Garcia (2020);
- Açores – Rodrigues, (2002), Cruz *et al.* (2017), Cruz & Andrade (2017), Soares (2017), Andrade *et al.* (2019) Tassi *et al.*, (2019);
- Madeira – Almeida *et al.* (1984), Gaspar (2001), Prada (2000, 2005) e Prada *et al.* (2012).

Em Cabo Verde, podem citar-se vários estudos de índole técnica e/ou científica (Vailloux *et al.* 1974; Serralheiro, 1976.) O primeiro trabalho de reconhecimento hidrogeológico do arquipélago foi realizado por Costa (1962), tendo contribuído também para a discussão da problemática do abastecimento de água para diversos fins, com o objetivo de preconizar soluções imediatas. De referir que o maior conhecimento hidrogeológico da ilha se deveu, essencialmente, ao projeto CVI 75/001, financiado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD).

Destacam-se ainda os relatórios elaborados pela INGRH & Cooperação Espanhola (1994) e da Agência Japonesa de Cooperação Internacional & INGRH (1999). Na sequência destes projetos podem citar-se diversos trabalhos sobre o comportamento hidrogeológico em terrenos vulcânicos, de entre os

quais se destacam Fernandopullé (1977, 1979), Mota Gomes (1980), Barmen *et al.* (1984), Akiti (1985), Dahlin *et al.* (1986), Poitrinal (1991), Heitor & Pina (2003), Mota Gomes *et al.* (2004), Lobo de Pina *et al.* (2004, 2005, 2006, 2009), Monteiro Santos *et al.* (2006), Carreira *et al.* (2007), Mota Gomes (2007), Condesso de Melo *et al.* (2008), Shakib Shahidian *et al.* (2013), Gonçalves e Valente, (2015) e Mota Gomes & Lobo de Pina (2015). Estes trabalhos mostram como no arquipélago de Cabo Verde, a proteção da água, pela sua escassez e fragilidade, é uma necessidade estratégia primordial. Com efeito, a água subterrânea é uma das principais fontes de água potável nas regiões com deficit de água superficial ou em territórios sem sistema centralizado de abastecimento. No entanto, em muitos casos a população consome água subterrânea de maneira desorganizada e sem controlo de qualidade, com consequente risco para a saúde publica.

Goncalves *et al.* (2015), apontam problemas sérios de qualidade da água em municípios mais rurais devido a fontes difusas de poluição associadas à atividade agrícola (infiltração de agrotóxicos, fertilizantes) e também à falta de saneamento, com descargas de esgotos domésticos a céu aberto. Embora estas regiões tenham geralmente menores densidades populacionais, os efeitos desta poluição difusa podem ser ainda mais visíveis, dado o menor universo de consumidores (Melian *et al.* 1999).

Nos municípios de S. Vicente, Sal e Praia (que disponibiliza cerca de 50% das necessidades de água para consumo doméstico) o controlo de qualidade é mais eficaz, uma vez que são abastecidos por águas dessalinizadas que previamente passam pelo laboratório de controlo de qualidade, pelo que se esperam problemas menores associados ao consumo de água (ANAS, 2017).

Nos outros municípios da ilha de Santiago (com destaque para o concelho de São Domingos) Gonçalves *et al.* (2019), e nas ilhas de Santo Antão, São Nicolau e Maio, a qualidade de água vem decaindo, sobretudo nas zonas litorais (Mota Gomes, 2007; Pina 2014; Lima *et al.* 2011). Os fenómenos de intrusão salina têm sido referidos neste contexto, causando grandes preocupações à população e às instituições responsáveis pela gestão dos recursos hídricos (Lobo de Pina, 2009).

A revisão da bibliografia indica, então, uma redução da qualidade da água, ligada frequentemente a salinização nas zonas litorais, como resultado direto da sobre-exploração dos aquíferos Carreira *et al.* (2018) e da extração de areia nas praias que destroem as barreiras naturais contra a intrusão salina (Fig. 1).



**Figura 1-** Imagens ilustrativas da exploração de Recursos na Ilha de Santiago: A e B- extração de areia nas praias; C- exploração no leito das ribeiras; D- Extração de seixos na praia

Os principais problemas ambientais, comuns a todas as ilhas, são resultantes de uma gestão inadequada de recursos naturais, que se associa ao crescimento populacional e à economia de consumo, e, por sua vez, incrementadas pela pobreza, que afeta, sobretudo, estas populações mais rurais. A estas atribuem-se também as maiores deficiências ao nível da educação ambiental, essencial para co-responsabilizar os consumidores no âmbito do tema da sustentabilidade. A tudo isto se soma o cenário de seca persistente, que contribui para a diminuição dos níveis de água subterrânea e superficial, com consequente impacto sobre a qualidade para consumo e para as atividades económicas, nomeadamente a produção agrícola e pecuária.

O tema da água deve ser tratado do ponto de vista quantitativo e qualitativo, dependente da natureza das substâncias nela dissolvidas e em suspensão, e atendendo ao propósito para o qual a água é requerida, (Hunt & Wilson, 1986). Assim, o trabalho realizado nesta tese concentra-se na hidrogeoquímica da Ilha de Santiago e considera a avaliação da qualidade da água em função da sua adaptabilidade ao uso para determinados fins (por exemplo, consumo humano ou irrigação).

## **1.2. O solo em Cabo Verde enquanto cenário insular vulcânico**

Os solos vulcânicos têm propriedades químicas especiais, nomeadamente associadas ao tipo de reserva mineral e à capacidade de reter água em presença de cinzas vulcânicas (Chapman, 2020).

De acordo com Neall (2006), os solos vulcânicos cobrem 1% de superfície da Terra e sustentam 10% da população, incluindo algumas das maiores populações humanas. No entanto, certos processos magmáticos podem conduzir a desequilíbrios químicos de elementos no material parental, com efeitos tóxicos.

Estes solos ocorrem em vários contextos, ocupando cerca de 124 milhões de ha da superfície terrestre, em diversos climas, desde o frio e húmido do Alasca ao subtropical e tropical semiárido do Hawai (Mizota & Reeuwijk, 1989).

Face à importância que solo possui para o ordenamento do território de Cabo Verde, onde o combate à desertificação e o controlo de erosão e contaminação constituem questões de extrema importância, impõe-se a necessidade de realizar estudos sobre as suas propriedades e eventuais níveis de contaminação. Citam-se a título de exemplo os trabalhos clássicos de Teixeira & Barbosa (1958), Amaral Ilídio (1964); Nunes (1962, 1968), Faria (1970, 1987), Faria & Bizarro (1961), Rogado (1996), Wit (1996), Sabino (1985), Constantino et al. (1979) e Diniz & Matos (1986, 1987, 1988, 1999). Mais recentemente destacam-se os estudos realizados por Hernández Regla (2008), Pinto, (2010), Tavares Jacques (2010), Madeira & Ricardo (2014), Menegatto, (2014) e Marques (2016).

Em Cabo Verde a degradação da qualidade do solo está associada à intensidade e má distribuição das chuvas e à elevada declividade de parte do território. Estes aspetos, associados a propriedades físico-químicas desfavoráveis (textura, estrutura e composição) contribuem para a baixa aptidão agrícola de muitos dos solos. Ao enquadramento geográfico e climático somam-se os problemas de urbanização desregrada que agravam a perda de solo devido à erosão hídrica e eólica. Com efeito, muitos dos trabalhos de investigação referidos atrás focam-se na problemática da erosão e da perda de solo. Por exemplo, Menegatto, (2014) descreve os diferentes tipos de solo presentes nas várias ilhas, mas refere também fatores de degradação com influência sobre a pedogénese. Este autor aponta as práticas agrícolas rudimentares num relevo vulcânico de alta declividade como responsáveis por perdas significativas de solo. Podem também apontar-se outros fatores de degradação como o sobre pastoreio, a extração descontrolada de inertes, alta densidade de poços, agricultura de sequeiro nas encostas, uso indiscriminado de pesticidas e fertilizantes em vales intensamente agricultados. A salinização, já apontada como problema de qualidade da água, é outro dos aspetos, suscetível de condicionar a baixa aptidão agrícola. De acordo com Velstra e Voorde (2009), esta forma de degradação do solo deve-se à presença de sal/cloreto em excesso na água de porosidade, impedindo o seu uso agrícola ótimo.

Um solo saudável contribui para a mitigação das alterações climáticas, devido à capacidade de armazenamento de carbono, desde que manuseado de forma adequada (Parelho, 2018). O teor de matéria orgânica é, pois, um aspeto essencial a avaliar nas propriedades do solo e um dos mais suscetíveis às práticas agrícolas inadequadas. Da prática de uma agricultura sustentável depende não só a conservação da matéria orgânica e do solo enquanto sistema, mas também a qualidade da água, principalmente nas bacias hidrográficas com intensa agricultura de regadio.

### **1.3. Interações água-rocha-solo com relevância ambiental**

A composição química da água superficial e subterrânea é em primeiro lugar determinada pelo que se designa de interação água-rocha. No entanto, as características da água são resultado de interações muito diversas, não só com a litologia, mas também com a vegetação e solo. Em condições insulares, os aerossóis têm muitas vezes um papel relevante, devido a evaporação de solutos concentrados, resultando na cristalização de minerais como a calcite e o gesso. A hidroquímica é, pois, controlada por muitos processos como refere Dune (2012), de que são exemplo a combinação da evaporação e a precipitação mineral que podem levar a concentrações elevadas de sódio, cloreto e/ou sulfatos.

Uma das funções ecológicas essenciais do solo é o seu papel condicionador do ciclo hidrológico, nomeadamente como filtrador de substâncias poluentes. Por exemplo, a percolação da água através de solos ricos em matéria orgânica pode baixar o pH, levando à dissolução de minerais mais solúveis (Dune, 2012). Neste sentido não se pode dissociar a qualidade da água das propriedades e qualidade do solo.

Segundo Doran e Parkin (1994), a qualidade do solo pode ser entendida como a capacidade para exercer várias funções, dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica, a fertilidade e assegurar a saúde humana e a qualidade ambiental. Numa aceção mais atual, este conjunto de funções enquadra-se no âmbito dos serviços de ecossistemas.

A importância destas funções, em especial no quadro do ciclo hidrológico, justifica a necessidade de monitorização da qualidade dos dois recursos (água e solo), com os seguintes objetivos estratégicos para o território:

- Conservar e melhorar a qualidade do solo como aspeto crítico em termos de qualidade ambiental, nomeadamente com recurso a sedimentos de barragens;
- Aumentar a eficiência da utilização (por exemplo, nutrientes, pesticidas e água de irrigação) dos sistemas de produção;
- Aumentar a resistência dos sistemas de produção à erosão;

- Melhorar as propriedades texturais e estruturais do solo como medida de proteção à erosão e minimizar o impacto sobre os aquíferos;
- Aumentar o teor de matéria orgânica do solo como forma de preservação e de fomento da produtividade;

Embora a perda por erosão seja a forma de degradação mais referida nos estudos sobre solos em Cabo Verde, destes objetivos estratégicos emana a necessidade de identificar outros fatores, nomeadamente, a já referida salinização e eventuais fenómenos de contaminação associados ao uso de agroquímicos nos vales intensamente agricultados e à proliferação de lixeiras selvagens. Adicionalmente, a ausência de infraestruturas de saneamento básico é um aspeto generalizado no país, com consequências em termos de produção de resíduos, emissão de poluentes e eventual degradação da qualidade do solo e da água.

#### **1.4. Justificação e motivações para o desenvolvimento da tese**

Situado em contexto de clima árido e semiárido com precipitações irregulares, Cabo Verde enfrenta fenómenos de degradação agravados pelas crescentes pressões antrópicas sobre os seus recursos. O provimento de água para consumo humano e irrigação depende fortemente dos recursos subterrâneos.

Na última década o país viu-se provido de um conjunto de barragens que pretendiam complementar estes recursos e obviar os problemas crescentes de escassez incrementados pela seca. Com a aposta nestas infraestruturas hidráulicas previa-se um fomento da atividade agrícola associada a culturas de regadio.

Os pontos anteriores procuraram colocar em destaque estas pressões sobre a água e o solo em Cabo Verde. O País integra no seu quadro jurídico um conjunto de dispositivos legais, como Lei de Bases da Política do Ambiente (Lei n.º 86/IV/93, de 26 de junho) e que regulamenta várias preocupações ambientais. Podem ainda citar-se os diplomas que definem os critérios e normas de qualidade da água e a sua classificação (Decreto-Lei n.º 8 de 2004 de 23 de fevereiro) e o código da água e saneamento (Lei n.º 96/VII/2015). Por sua vez, o Decreto-Lei n.º 2/2007, de 19 de julho, estabelece os princípios e normas de utilização de solos.

É nesta linha de preocupações que se enquadra o trabalho de investigação da presente tese, com foco em Cabo Verde, e em especial na sua ilha mais populosa (Ilha de Santiago). A pequena dimensão, insularidade, cenário climático e demográfico e condições de desenvolvimento, justificam a oportunidade deste tema de trabalho, enfocado nas necessidades de gestão sustentável dos recursos naturais.

Os resultados deste trabalho visam uma caracterização da situação da Ilha que possa auxiliar a implementação de medidas de monitorização por parte das entidades responsáveis pela gestão do território e dos recursos naturais, contribuindo assim para zelar pela proteção do meio ambiente tendo em consideração, em particular, a qualidade da água.

### **1.5. Objetivos**

O tema central desta tese é a monitorização da qualidade da água na Ilha de Santiago (Cabo Verde) e a avaliação do grau de conflitualidade entre a preservação destes recursos e outras atividades antrópicas.

Para a sua concretização apontam-se os seguintes objetivos específicos:

- Inventariar pontos de água no território em estudo;
- Analisar a situação em termos de abastecimento público;
- Estudar as propriedades hidroquímicas nas diferentes formações hidrogeológicas da Ilha de Santiago;
- Avaliar e interpretar fenómenos de controlo da hidroquímica, quer ao nível global da Ilha, quer nas sub-bacias hidrográficas mais agricultadas;
- Avaliar a qualidade da água em função dos usos principais – consumo doméstico e agricultura;
- Identificar focos de impacte ambiental com incidência na qualidade da água e do solo, assim como, avaliar a sua natureza e magnitude (o caso da lixeira da cidade da Praia);
- Conhecer as propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo e avaliar a possibilidade de uso de sedimentos de barragens assoreadas para melhoria de propriedades do solo;

Estes objetivos visam contribuir para promoção de uma utilização sustentável dos recursos, em especial a água, possibilitando a sua proteção a longo prazo.

### **1.6. Estrutura da tese**

A tese está estruturada em nove capítulos, encaminhando a apresentação e discussão de resultados no sentido do seu foco principal – Monitorização da água e do solo e avaliação de potenciais formas de degradação destes recursos na Ilha de Santiago (Cabo Verde).

Na Introdução situa-se o âmbito da tese, enquadrando-o na hidrogeoquímica de terrenos vulcânicos e na problemática da preservação do solo em áreas agrícolas. Faz-se uma revisão do estado da arte sobre estes temas a diferentes escalas, desde a região da Macaronésia, passando pelo arquipélago de Cabo Verde, até à Ilha de Santiago. Neste capítulo, de índole genérica, justifica-se a

motivação do tema face ao cenário climático e de desenvolvimento do território e definem-se os principais objetivos.

O capítulo 2 - Caracterização geral da Ilha de Santiago (Cabo Verde) - descreve a área de estudo, abordando as diversas componentes do território com influência nas propriedades da água e do solo e na sua suscetibilidade à degradação.

Capítulo 3, apresenta a abordagem metodológica que suporta a investigação. Destaca as etapas do trabalho, protocolos de monitorização e mencionam-se os principais métodos analíticos aplicados às amostras de diferentes tipos de materiais (água, solo e sedimentos).

A escassez de água em climas áridos e em países em desenvolvimento é um problema crescente face aos cenários cada vez mais recorrentes de seca. Cabo Verde e em especial a Ilha de Santiago, enquanto exemplo deste tipo de panorama, foram analisados quanto às taxas de cobertura, formas de abastecimento e níveis de qualidade.

O capítulo 4 (Abastecimento de água em contexto de clima árido – Cabo Verde e Ilha de Santiago) que aborda a situação da Ilha em termos de abastecimento público, serviu de suporte a um trabalho publicado na revista “Journal of Earth Sciences & Environmental Studies”, intitulado Water Supply and Access to Safe Water in Developing Arid Countries.

No capítulo 5 - Bacias hidrográficas da Ilha de Santiago: caracterização fisiográfica, hidroquímica e qualidade da água - caracterizam-se as principais bacias hidrográficas da ilha, procurando avaliar padrões de evolução espacial e temporal do quimismo na bacia hidrográfica de Santa Cruz. Este capítulo é a base de um trabalho submetido e em processo de revisão na revista “Water” com o título Hydrochemistry and evolution of water quality in a context of aridity and increasing agriculture in three sub-basins of Santiago Island (Cape Verde).

O capítulo 6 apresenta e discute os resultados da monitorização de pontos de água distribuídos pela Ilha, contemplando diferentes formações hidrogeológicas e condições ambientais, nomeadamente quanto a uso do território. O uso de várias ferramentas estatísticas procura avaliar potenciais fatores de controlo do comportamento hidroquímico do sistema aquífero da Ilha. Dele resultou um resumo para as XI Jornadas Ibéricas de Infraestruturas de Dados Espaciais (JIIDE, 2020), 28 a 30 outubro, Évora, Portugal, intitulado Linear Discriminant Analysis for groundwater’s geochemical fingerprinting in Santiago Island (Cape Verde, Western Africa).

O capítulo 7 foca-se nas áreas das barragens que foram construídas para colmatar dificuldades de escassez de água e fomentar a atividade agrícola. Analisam-se as propriedades do solo, sob diversas perspetivas, no sentido de avaliar o estado de degradação e eventuais estratégias de

preservação. Ainda considerando o tópico da potencial degradação de solos e sedimentos, agora por contaminação, o capítulo 8 é dedicado à avaliação do efeito da principal lixeira da Ilha de Santiago, em particular quanto à presença de elementos potencialmente tóxicos.

Por fim no capítulo 9 apresentam as principais conclusões desta investigação.

***CAPÍTULO 2***

---

***CARATERIZAÇÃO GERAL DA ILHA DE SANTIAGO (CABO VERDE)***

## **CARATERIZAÇÃO GERAL DA ILHA DE SANTIAGO (CABO VERDE)**

A República de Cabo Verde é um arquipélago constituído por dez ilhas, localizando-se na costa Oeste da África (Fig.2). Praia é a cidade capital e está localizada na ilha de Santiago. Com uma superfície de 991 km<sup>2</sup>, esta ilha é a mais populosa, com cerca de 55% da população. O Instituto Nacional de Estatística (INE) de Cabo Verde prevê a manutenção desta distribuição maioritária da população na ilha de Santiago, antecipando que esta hospedará mais de 60% da população do país no ano de 2030 (INE, 2018).



**Figura 2**– Localização geográfica do Arquipélago de Cabo Verde, dos grupos de Ilhas do Barlavento e de Ilhas do Sotavento e da Ilha de Santiago

Como outras regiões da Macaronésia (Açores, Madeira e Ilhas Canárias), Cabo Verde tem um regime de chuvas torrenciais, com distribuição irregular de precipitação (Ventura, 2015; Cerezal et al. 2013). O clima pode ser classificado como árido com duas estações - seca e chuvosa (Mota Gomes, 2007).

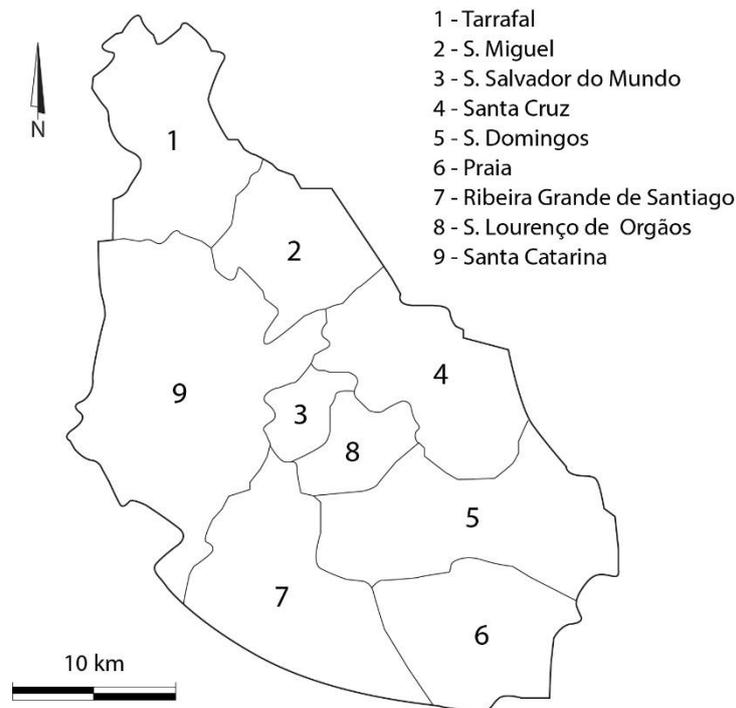
A Ilha de Santiago tem origem vulcânica sendo formada por rochas de composição e génese variadas, predominando os basaltos e os piroclastos. Não existem cursos de água perenes sendo, portanto, a disponibilidade de água dependente principalmente da precipitação (Lobo de Pina, 2009). A ilha é caracterizada por uma rede de drenagem constituída por linhas de água temporárias, que são frequentemente usadas como estradas ou ocupadas pela agricultura e pela exploração ilegal de agregados durante os períodos de seca, que são cada vez mais longos.

Nas secções seguintes apresentar-se-á com mais detalhe a caracterização da Ilha de Santiago sob diversas perspetivas: geografia, clima, geomorfologia, geologia, solos e hidrogeologia. Neste sentido, efetuou-se uma revisão da bibliografia e da cartografia disponíveis.

## 2.1. Geografia

A ilha de Santiago, incluída no grupo de Ilhas de Sotavento, tem uma forma adelgada e fica situada na parte Sul do Arquipélago entre os paralelos 15° 20' e 14° 50' de latitude Norte e os meridianos 23° 50' e 23° 20' de longitude Oeste (Fig.2). Tem um comprimento máximo de 54,9 km entre a Ponta Moreia, a Norte, e a Ponta Mulher Branca, a Sul, e uma largura máxima de 29 km entre a Ponta Janela, a Oeste, e a Ponta Praia Baixo, a Leste. Com uma área de 991 km<sup>2</sup>, é a maior ilha correspondendo a cerca de 25% da área total do arquipélago. Na sua parte Norte observa-se um estreitamento pronunciado, entre Chão Bom, a Oeste, e Porto Formoso, a Leste, da ordem dos 6 km (Alves *et al.* 1979).

A nível administrativo a ilha é constituída por nove concelhos: Tarrafal, S. Miguel, S. Salvador do Mundo, Santa Cruz, S. Domingos, Praia, Ribeira Grande de Santiago, S. Lourenço dos Órgãos e Santa Catarina (Fig.3).



**Figura 3-** Divisão administrativa da Ilha de Santiago. Adaptado de Instituto Nacional de Gestão do Território (INGT, 2019)

A Ilha de Santiago possui uma população estimada em 274044 habitantes (131552 do sexo masculino e 142492 do sexo feminino, correspondente a 55,7% da população total de Cabo verde (INE, 2010).

## 2.2. Clima

O arquipélago de Cabo Verde, ao largo da costa ocidental do continente africano, encontra-se situado numa vasta zona de climas de tipo árido e semiárido que atravessa a África desde o Atlântico ao Mar Vermelho e se prolonga pela Ásia. Esta faixa é influenciada por três massas de ar principais: os centros de altas pressões subtropicais do Atlântico Norte (anticiclone dos Açores), a Zona Convergência Intertropical (ZIT dos autores de língua inglesa) e a monção do Atlântico Sul, que carrega ventos quentes e húmidos (S e SW), sendo responsável pelas chuvas de verão, de agosto a outubro, o chamado "tempo das águas" (Mota Gomes, 2007).

O clima do arquipélago de Cabo Verde é caracterizado por duas estações bem diferenciadas: estação seca (dezembro a junho) onde se faz sentir a influência do sector oriental do anticiclone dos Açores, muitas vezes interrompida por episódios de precipitação de fraca intensidade, devida a invasões de ar polar; estação húmida (agosto a outubro), onde ocorre mais de 90% da precipitação anual. Os meses de junho e novembro são considerados os meses de transição (Costa, 2004).

A precipitação anual é escassa e muito irregular (200-400 mm/ano), com valores distintos de ilha para ilha, exibindo mesmo grandes variações entre ilhas. Segundo Amaral (1964), "a chuva é o elemento dominante da diferenciação estacional do ano e o eixo em torno do qual gira o Mundo do cabo-verdiano". A temperatura varia entre 25°C e 27°C nos meses mais quentes e 22°C a 24°C nos meses mais frios (Gomes *et al.* 2004).

Durante o ano, o arquipélago sofre o efeito do predomínio dos ventos alísios resultantes de massas de ar que convergem de zonas de alta pressão (anticiclónicas) nos trópicos, para zonas de baixa pressão (ciclónicas) no Equador. O vento alísio do hemisfério norte sopra de nordeste para sudoeste enquanto o alísio do hemisfério sul sopra do Sudeste.

A influência dos ventos alísios é mais marcante em zonas costeiras e de baixa latitude (Hernandez, 2008).

Em Santiago, o clima da ilha caracteriza-se pela prolongada época seca e pelo irregular período de precipitações (Cunha, 1961). A aridez da Ilha de Santiago resulta da sua localização na zona de influência do Sahara e da sua posição relativamente aos ventos alísios que sopram ao longo de todo o ano, e por toda a ilha, tendencialmente dos quadrantes N a NE e registando a intensidade máxima entre janeiro e maio Carreira et al. (2010), o que não favorecendo a ocorrência de precipitação, tem um importante papel na difusão e transporte dos aerossóis marinhos.

O clima desta ilha também é condicionado pelo relevo muito acidentado, com duas cadeias montanhosas (Pico de Antónia e Serra da Malagueta) unidas por uma área de planalto (Planalto de

Santa Catarina) que correspondem a sectores de forte condensação e onde se concentram as bacias de alimentação das principais ribeiras. O litoral apresenta as áreas planas e áridas, com vales abertos, às vezes formando extensas várzeas de terras férteis constituídas por materiais aluvionares.

É, assim, evidente a existência de variações locais do clima de acordo com a ação da altitude articulada com a orientação das massas de relevo. Podemos encontrar cambiantes de maior aridez no litoral, maior humidade nos pontos altos, precipitação mais abundante na vertente oriental, pois está aberta à penetração dos ventos alísios que se carregam de humidade e escassez de precipitação na vertente ocidental abrigada destes ventos (Amaral, 1964).

São características climáticas desta ilha, a pequena variação de temperaturas médias entre a estação seca - 22°C em fevereiro - e a estação húmida - 27°C em setembro Carreira *et al.* (2010) e as precipitações médias anuais baixas. A precipitação média anual não ultrapassa os 300 mm para 65% do território, situado a menos de 400 m de altitude, enquanto nas zonas situadas a cotas superiores (Pico da Antónia e Serra Malagueta), as precipitações totais anuais podem atingir os 700 mm ou mais num bom ano de chuva, devido em parte à influência do relevo ou à passagem de depressão tropicais, que provocam chuvas torrenciais (Victoria, 2006).

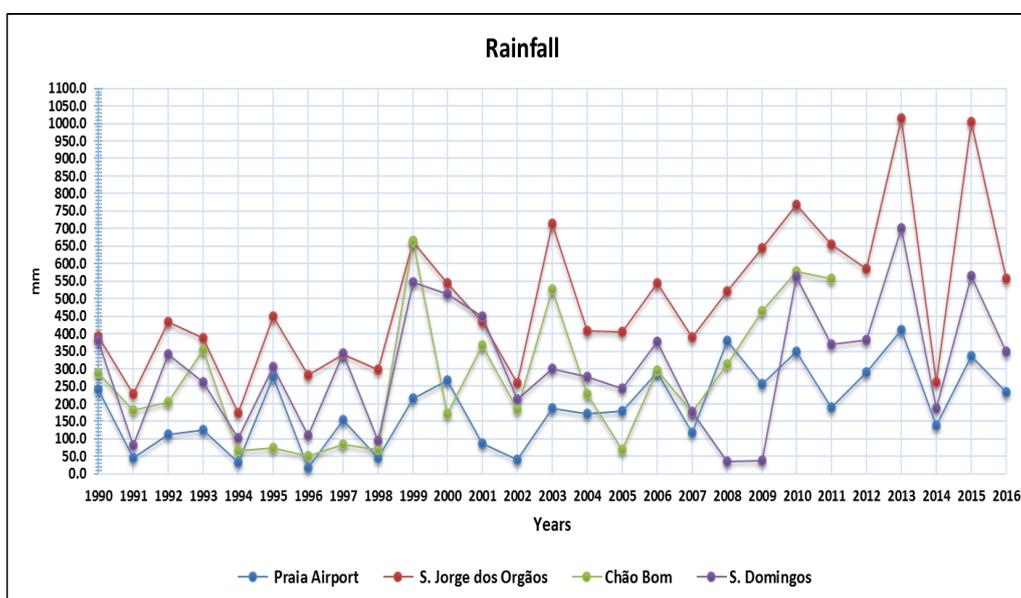
A estação húmida limita-se praticamente aos meses de agosto e setembro, mesmo nas áreas em que se verifica menor concentração estacional, registando estes dois meses mais de 75% da precipitação média anual. O período de chuvas dura em média 15 a 25 dias nas áreas áridas e 45 a 55 dias nas semiáridas. De acordo com Costa, (2004), o número de dias de chuva não ultrapassa anualmente os 4% no litoral meridional e os 9% no sector montante da bacia da Ribeira Seca e no norte da ilha. O relevo e a natureza convectiva das precipitações fazem com que a sua intensidade seja grande. Na Serra de Malagueta, a duração modal dos períodos chuvosos é de três dias e nos meses de setembro e outubro, sendo a precipitação de aproximadamente 100 mm.

A variação destes parâmetros climáticos expressa-se na Tabela 1, que sintetiza os dados das estações meteorológicas com registos mais consistentes.

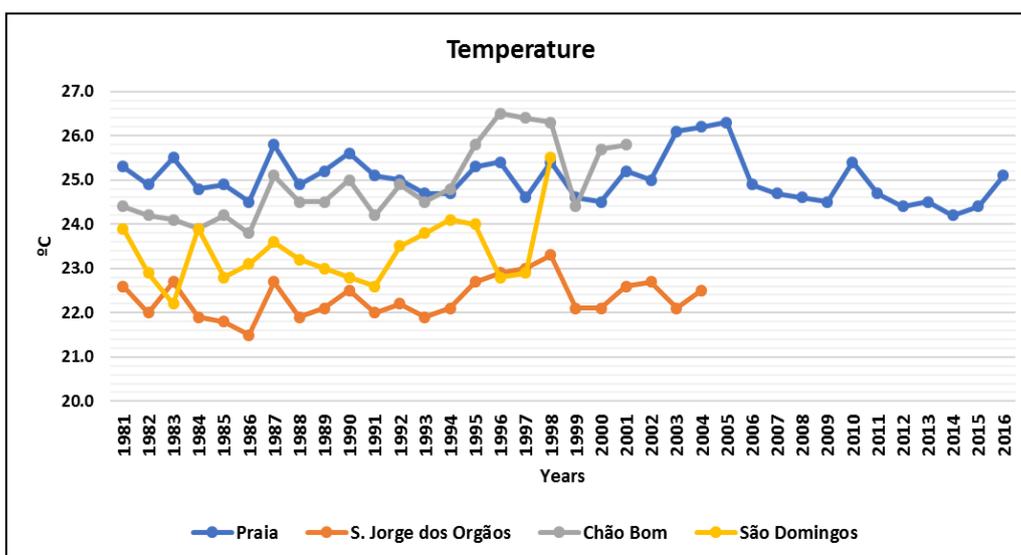
**Tabela 1** - Valores máximos (max.) e mínimos (min) da precipitação (série de 1990 a 2016) e temperatura (1981 a 2016).

Estação	Precipitação (mm)		Temperatura (°C)	
	max	min	max	min
Praia-Aeroporto	410	17.8	26.3	24.2
S. Jorge dos Órgãos	1013	174	23.3	21.5
Chão Bom	664	51,3	26.5	23.8
S. Domingos	707	35.8	25.5	22.2

As figs. 4 e 5 mostram respetivamente a variação anual da precipitação e temperatura com base nos dados das estações meteorológicas existentes na Ilha.



**Figura 4**-Distribuição da precipitação média anual na Ilha de Santiago no período 1990 a 2016 (INMG)



**Figura 5** - Distribuição da temperatura media anual na Ilha de Santiago no período 1981 a 2016 (INMG)

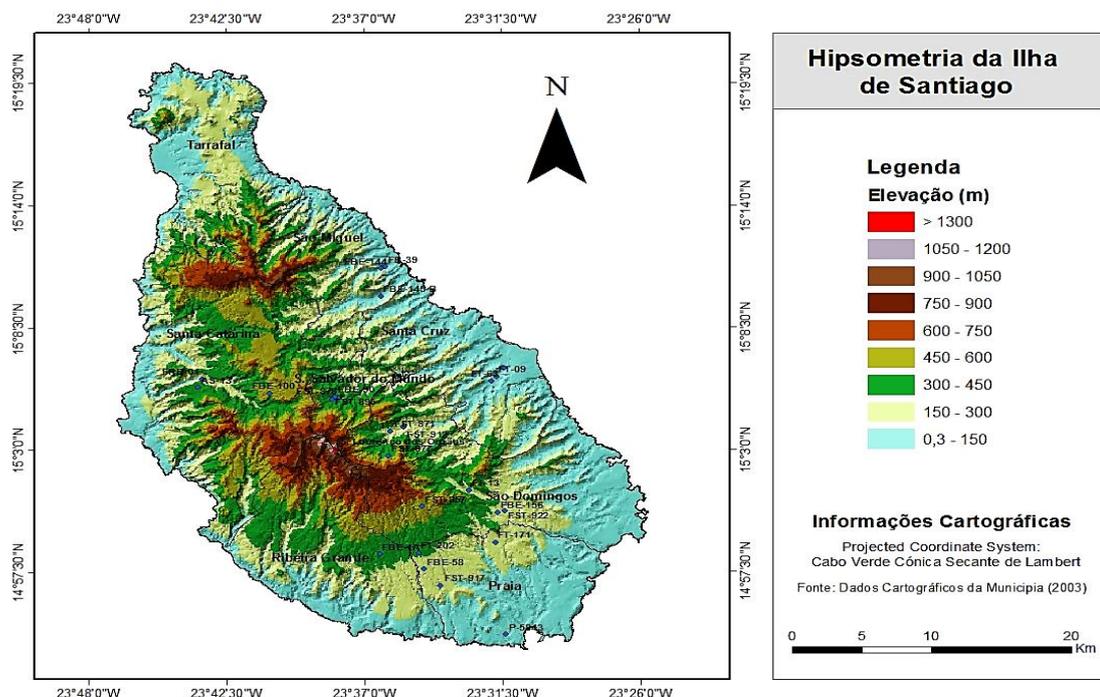
### 2.3. Geomorfologia

O arquipélago de Cabo Verde, porque inserido nas regiões insulares de natureza vulcânica, apresenta no geral morfologias complexas, caracterizadas sobretudo pelas grandes altitudes, grandes pendentes de terreno, orografia acentuada e extensas achadas. Estas são as principais características geomorfológicas que marcam e determinam de forma significativa o modelo hidrológico da ilha, com particular ênfase na escorrência superficial e com incidência, também, na hidrodinâmica subterrânea.

A erosão tem atuado intensamente sobre as formas originais resultante da atividade vulcânica pelo que, muitas vezes, não é possível identificar na ilha os centros vulcânicos antigos (Assunção, 1968).

A Ilha de Santiago apresenta uma grande diversidade de formas de relevo desde os mais acentuados constituídos por picos e encostas declivosas e com afloramentos rochosos, separados com frequência por vales profundos (formas jovens) até as superfícies planas, que se desenvolvem principalmente na periferia da ilha (Faria, 1970).

Possui uma altitude média de 278,5 m, sendo a altitude máxima de 1392 m (Maciço do Pico da Antónia). A ilha apresenta duas zonas montanhosas assimétricas (Fig.6), o Maciço do Pico da Antónia (1392 m), a sul, e a Serra da Malagueta (1063 m), a norte, separadas por uma área planáltica a 550 m de altitude média, arquitetada de cones e outros relevos em vários estados de destruição (Amaral, 1964).

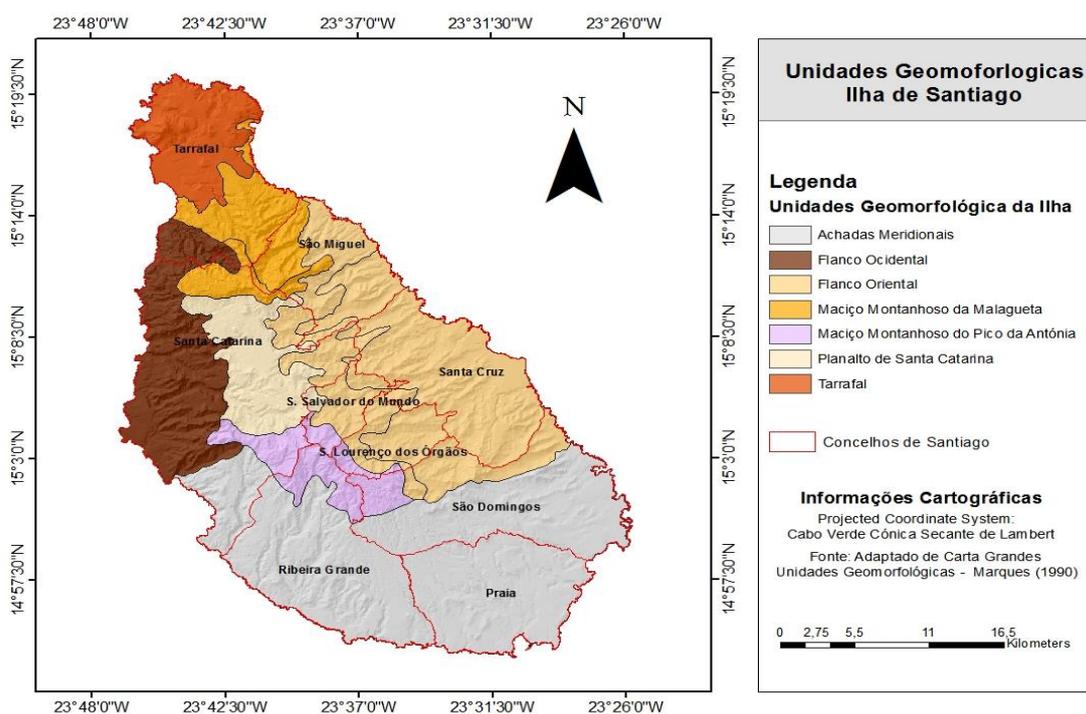


**Figura 6** - Hipsometria da Ilha de Santiago (Dados Cartográficos Municipais (2003))

Amaral, (1964) e Marques, (1990), consideram que na Ilha de Santiago existem sete unidades geomorfológicas (Fig.7): Achadas Meridionais (I); Maciço Montanhoso do Pico da Antónia (II); Planalto de Santa Catarina (III); Flanco Oriental (IV); Maciço Montanhoso da Malagueta (V); Tarrafal (VI); Flanco Ocidental (VII).

### (I) Achadas Meridionais

Iniciam-se no sopé meridional do Maciço Montanhoso do Pico da Antónia até ao mar, abaixo dos 500 m de altitude (Marques, 1983).



**Figura 7** - Unidades Geomorfológicas da ilha de Santiago. Adaptado de Cartas de Grandes Unidades Geomorfológicas (Marques, 1990)

Nesta unidade geomorfológica dois terços das bacias hidrográficas têm altitudes superiores, por vezes muito superiores, à altitude média da ilha (278,5 m). Verifica-se também que o declive médio das bacias é quase sempre elevado (entre 6,2% e 9,6%), o que se explica pelo fato destas terem as suas cabeceiras no Maciço do Pico da Antónia (Marques, 1987).

Nos fundos dos principais troços dos vales em canhão (ribeiras da Trindade, Grande, São João, entre outras), existem pequenos regadios alimentados por água obtida de galerias e/ou de furos de captação, sendo que as nascentes são raras.

Esta unidade é geralmente caracterizada por chuvadas episódicas da «monção» de Sudoeste e/ou a ação eólica do vento de Este (“lestada”). Estas áreas são normalmente ocupadas por pastagens

das regiões áridas. As referidas áreas têm sido objeto de intensas campanhas de arborização nos últimos vinte e cinco anos.

As Achadas Meridionais constituem atualmente um meio com tendência recente tanto para a pedogénese nas áreas florestadas (exemplo, Achadas de São Filipe e Mosquito), como com tendência antiga para a morfogénese, nas áreas totalmente despidas de vegetação.

## **(II) Maciço Montanhoso do Pico da Antónia**

É uma importante e acidentada área montanhosa que culmina no Pico da Antónia (1392 m de altitude). Trata-se de uma unidade que representa a região meridional da bordeira da última grande caldeira da ilha de Santiago (Serralheiro, 1976). O maciço eleva-se a partir dos 600 m de altitude e continua-se um pouco para NW constituindo o relevo de Palha Carga. Os relevos isolados de Monte Brianda e Pedroso podem ainda ser considerados como resíduos da antiga bordeira.

As encostas meridionais, alcantiladas e áridas, estão sujeitas às chuvadas episódicas, violentas e abundantes, provocadas pela chamada monção do Sudoeste. Por seu lado, as encostas Norte e Nordeste, viradas ao planalto de Santa Catarina, estão francamente sob o domínio dos alísios, principalmente de novembro a julho. Surgem assim, aos 800 m de altitude, as «pastagens de altitude» (Pina, 2014; Teixeira *et al.* 1958) e, pouco mais acima, o perímetro florestal.

## **(III) Planalto de Santa Catarina**

O Planalto de Santa Catarina é limitado, a Norte e a Sul, pelos maciços montanhosos do Pico da Antónia e da Serra Malagueta. A Oeste ainda se destaca os relevos de Palha Carga, Monte Brianda e Pedroso, constituindo a região central da ilha de Santiago. Com cerca de 500 m de altitude, forma uma extensa área planáltica, por vezes interrompida por cones eruptivos que a erosão tem vindo a dismantelar. Esta unidade parece representar o fundo erodido da antiga caldeira dum grande vulcão do Mio-Pliocénico (Serralheiro, 1976).

A monotonia do planalto, em que os declives médios variam entre 2% e 12%, é interrompida por algumas estruturas vulcânicas da Formação do Monte das Vacas, como são o Monte Jagau, Monte Felicote, etc. O planalto é cortado por alguns vales em canhão – bacias hidrográficas de Águas Belas e Sansão, no fundo dos quais existem regadios (Marques, 1990 e Mota Gomes, 2007).

## **(IV) Flanco Oriental**

A unidade geomorfológica do Flanco Oriental, localizado entre Porto Formoso e Praia Baixo, encontra-se muito erodida e é constituída pelas bacias hidrográficas das ribeiras de S. Domingos, Praia Formosa, Seca, Picos, Santa Cruz, Salto, Flamengos e S. Miguel. Trata-se de uma área exposta aos

alísios que sopram de outubro a julho e cuja ação benéfica se começa a fazer sentir a partir dos 300 m de altitude. Intermittentemente, a “lestada” sopra com certa intensidade na região litoral baixa entre outubro e junho (Lobo de Pina, 2009).

A elevada erosão aqui verificada, deve-se à dinâmica natural e de ocupação do solo (práticas agrícolas e urbanização). O processo de erosão dos solos é mais acentuado devido à ausência ou fraqueza de coberto vegetal, à variabilidade acentuada das formas de relevo, aos acentuados declives e à forte erodibilidade. A prática das culturas mais comuns de sequeiro (milho e feijão-congo) dominam todas as encostas, certamente devido ao facto de estarem sujeitas à exposição dos ventos húmidos de Nordeste (Mota Gomes, 2007). Estas culturas exigem várias mobilizações do solo ao longo dos seus ciclos vegetativos (função da imprevisibilidade das precipitações) originando constantes movimentos de massa (creep) devido aos fortes declives médios das encostas.

As cabeceiras das ribeiras situam-se no Planalto de Santa Catarina ou nos maciços montanhosos do Pico da Antónia ou da Malagueta. Localizam-se em zonas alcantiladas com declives médios superiores a 25%; os seus troços médios apresentam declives médios entre 5% e 25% (Marques, 1987).

Na transição para o litoral, os declives médios dominantes daquelas bacias hidrográficas passam a variar entre 2% e 12%; nas achadas litorais baixas – Pedra Badejo e Achada Fazenda – os declives médios situam-se entre 0% e 5%.

#### **(V) Maciço Montanhoso da Malagueta**

Localizado a Norte (1063 m de altitude), é limitado a Sul por uma escarpa vigorosa, de orientação E-W no cimo da qual se localizam os pontos mais elevados (Diniz, et al., 1986). Caracteriza-se por uma escarpa dissimétrica, e cuja linha de cimos desce suavemente para o Tarrafal e para o Este.

A encosta Norte do maciço está exposta aos alísios, daí uma razão para a existência de coberto vegetal bastante denso. A coroa-la, desenvolve-se importante perímetro florestal e algumas pastagens de altitude.

As encostas da Malagueta são fortemente alcantiladas, principalmente as de NE e de NW. A dinâmica erosiva ao longo das suas encostas abruptas é essencialmente função da ação da gravidade. A ação antrópica pouco se faz notar nesta unidade.

Os declives médios destas encostas são sempre superiores a 25% (Marques, 1987).

Do lado NE, a unidade desenvolve-se em direção ao litoral e engloba as bacias hidrográficas de São Miguel e Principal; do lado NW acontece o mesmo, abrangendo a bacia da Ribeira Grande

(Tarrafal). Os cursos de água, tanto principais como secundários, estão profundamente encaixados até perto do litoral, onde já correm em vales em canhão que cortam achadas de média altitude. Os fundos dos vales encontram-se, na totalidade, pavimentados por detritos onde predominam os blocos, mesmo assim, nos cursos abertos a NW existem alguns regadios.

## **(VI) Tarrafal**

A unidade geomorfológica do Tarrafal corresponde a uma região vulcânica insular que veio a coalescer com a ilha de Santiago propriamente dita (Serralheiro, 1976). Trata-se de uma área de achadas (Achada Grande, Ponta da Achada, Achada Tomás, Achada Bilim, etc.) escalonadas entre 20 m e 300 m de altitude, com declives médios compreendidos entre 2% e 5% e constituídas por formações do Complexo Eruptivo do Pico da Antónia.

A estrutura de achadas ocidentais (entre 20 e 100 m de altitude) domina uma extensa plataforma de abrasão marinha, coberta por depósitos recentes de enxurrada e por algumas dunas, compreendida entre Tarrafal e Chão Bom. Os depósitos de enxurrada são alimentados pela destruição das frentes das escoadas lávicas e, segundo Marques (1990), misturam-se com os de uma linha de costa recente.

Os ventos alísios só favorecem a fachada NE da unidade. O restante território, que representa a maior área, está exposto a W e, assim, corresponde-lhe acentuada aridez, a qual, todavia, está sendo contrariada eficazmente pelo desenvolvimento de coberto vegetal efetuado à custa da captação de águas subterrâneas por intermédio de furos. Tarrafal pode-se considerar neste momento, e globalmente, como uma unidade de transição (integrada) para a fase de pedogénese (Mota Gomes, 2007).

Além da Bacia Hidrográfica da Ribeira Grande, existem ainda três pequenas bacias que cortam as achadas e/ou que se encaixam entre morros. São as de Lobrão, Fazenda e Fontão. Caracterizam-se por, numa área restrita, se encaixarem vigorosamente, o que pressupõe problemas recentes de instabilidade do meio

Grande parte da unidade já se encontra muito bem compartimentada, graças à florestação a que se procedeu; neste momento já se pode falar de silvo-pastorícia e procede-se a culturas de sequeiro bem compartimentadas. No entanto, na área de Chão Bom continuam a sentir-se os efeitos desastrosos provocados pela dinâmica morfogenética que afeta o Maciço da Malagueta.

## **(VII) Flanco Ocidental**

Esta unidade representa a transição entre o planalto de Santa Catarina e o mar. Do ponto de vista litológico-geológico encontram-se, de forma esparsa, formações do complexo filoniano de base, sobre a qual jazem escoadas lávicas e tufos do Complexo Eruptivo do Pico da Antónia e os mantos de fácies basáltica da Formação da Assomada.

Trata-se de uma região extremamente árida, muito declivosa, e que desce abruptamente para o mar. As encostas desenvolvem-se paralelamente à linha de costa com declives médios que variam em geral entre 12% e 25% (Marques, 1987).

O litoral é quase sempre de arriba viva. As bacias hidrográficas mais significativas nesta unidade, com declives médio entre 4,2% e 16,7% (Marques, 1990), são as das ribeiras de Cuba, Laxa, Barca, Sansão, Águas Belas, Selada e Angra.

Dada a forma dos vales e o tipo climático reinante, praticamente não há regadio.

Quanto às culturas de sequeiro (principalmente a do milho), são as únicas que se praticam episodicamente numa região quase desabitada. Trata-se de uma unidade em franca morfogénese. O Flanco Ocidental é, possivelmente, a unidade geomorfológica em que a dinâmica da desertificação tem a sua expressão mais concreta, só semelhante à das chãs litorais da ilha de São Nicolau.

### **2.4. Geologia**

O arquipélago de Cabo Verde é na sua totalidade de origem vulcânica, estando localizado no bordo Sudoeste da denominada plataforma senegalesa, a Oeste da zona magnética calma do fundo do Oceano Atlântico e a cerca de 2000 km a Leste da localização atual do rift médio atlântico (Serralheiro, 1976).

O arquipélago assenta sobre uma elevação do fundo oceânico em forma de domo “Cape Verde Rise”, de cerca de 400 km de diâmetro e a 3000 m de profundidade, correspondendo as ilhas aos extremos de edifícios vulcânicos situados sobre o domo. Um domo destas dimensões, deve-se certamente a uma importante anomalia, possivelmente relacionada com a descompressão generalizada, e que mais tarde produziria a fusão parcial do manto, originando assim as erupções que teriam formado as ilhas.

Em Paepe *et al.* (1976), alude-se que nas margens do arquipélago encontram-se rochas formadas em ambiente continental (sienitos nefelínicos e carbonatitos) que poderiam mostrar uma certa influência de características continentais no magmatismo de Cabo Verde. Contudo, as

caraterísticas isotópicas das lavas permitem clarificar a génese oceânica. Também as camadas sobrejacentes do arquipélago são de formação oceânica, apresentando uma depressão na descontinuidade de Mohorovicic, devida à acumulação de material vulcânico.

De acordo com Serralheiro, (1976), as primeiras manifestações vulcânicas no arquipélago deram-se no Paleogénico na ilha do Maio, no entanto, admite-se que a Ilha de Santiago teve essas manifestações num período não muito posterior.

Geralmente, as formações mais antigas afloram nos vales e nas proximidades da foz das grandes ribeiras em locais aonde a erosão vem escavando as formações recentes.

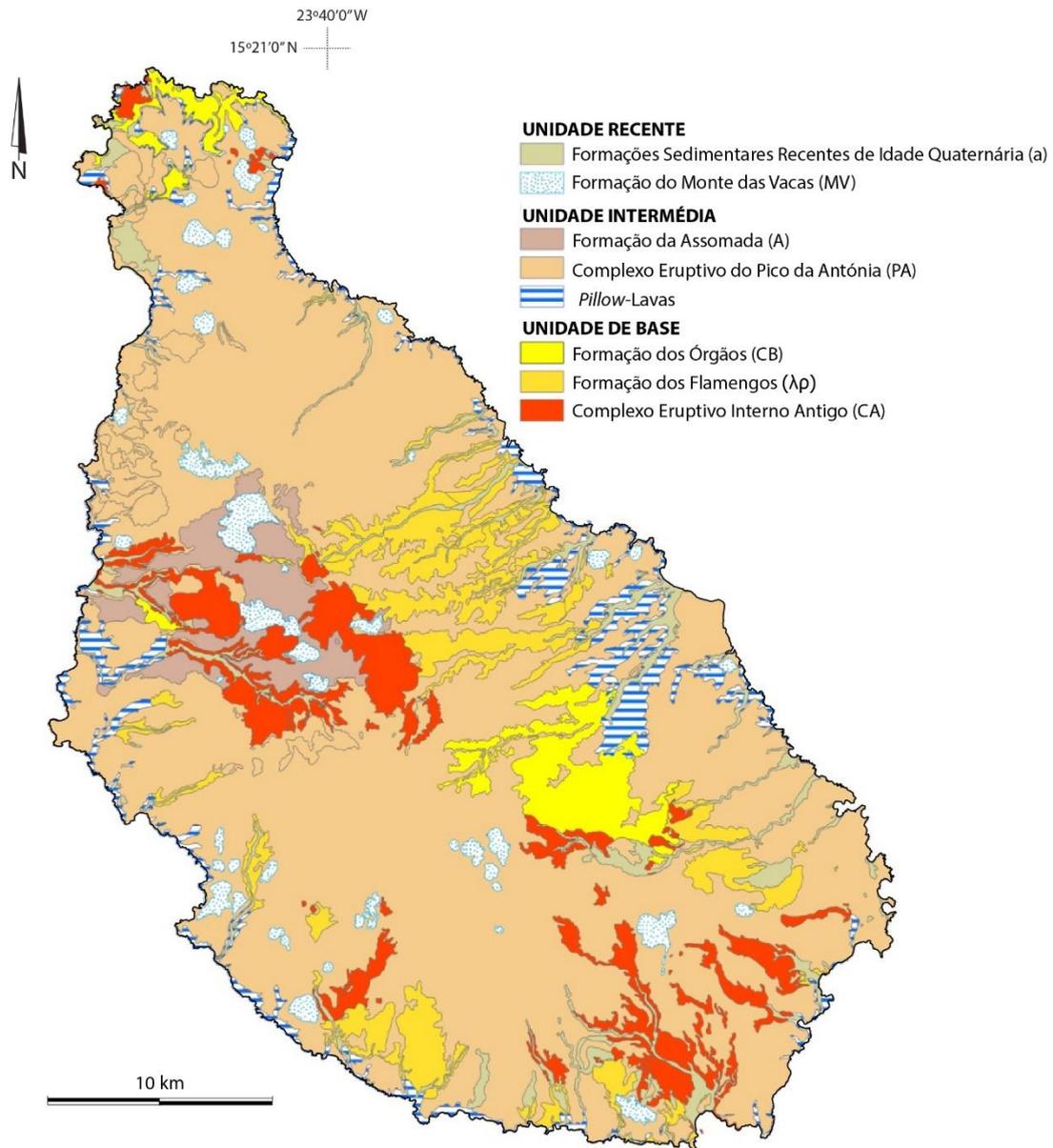
A Ilha de Santiago é constituída por principalmente por materiais vulcânicos e Vulcano clásticos, aflorando predominantemente basaltos e produtos piroclásticos ( $\approx 91\%$ ), limburgitos ( $\approx 5\%$ ) e fonólitos ( $\approx 2\%$ ). Ocorrem, embora em menor extensão, trefitos, leucititos e nefelinitos, podendo, ainda, ser observadas, associações de rochas sedimentares agrupadas em fácies marinhas e terrestres. As rochas magmáticas da ilha distribuem-se por vários tipos de formações geológicas de diferentes idades. As formações mais antigas estão localizadas, maioritariamente, em sectores muito erodidos (por exemplo os leitos de ribeiras). Por seu lado, as rochas metamórficas são quase inexistentes e a sua presença limita-se a pequenas evidências de fenómenos de metamorfismo de contacto.

Na tabela 2 apresenta-se a sequência Vulcano-estratigráfica da Ilha de Santiago (Serralheiro, 1976 & Alves *et al.* 1979) as principais litologias (em alguns casos também as associações mineralógicas) das suas formações e complexos geológicos.

No âmbito dos objetivos desta investigação, pareceu de relevante importância que a Geologia da Ilha de Santiago fosse apresentada num Mapa de Unidades Hidrogeológicas (para detalhes ver as secções 2.5.1. e 2.5.2.), o qual naturalmente incluísse as litologias dominantes pertencentes às diferentes formações e complexos geológicos (Fig.8), em vez desta ser apresentada num mapa geológico clássico.

**Tabela 2** - Principais litologias das Formações e dos Complexos geológicos da Ilha de Santiago (adaptado de Serralheiro, 1976; Alves *et al.*, 1979; Lobo de Pina, 2009) – da formação ou do complexo mais recente para o mais antigo

<b>Formação/Complexo Geológico</b>	<b>Litologia (associação mineralógica)</b>
<b>Formações Sedimentares Recentes de Idade Quaternária (a)</b>	Aluviões, eluviões, dunas, depósitos de vertente poligénicos e de distintas granulometrias
<b>Formação do Monte das Vacas (MV)</b>	Basanitos: cones de piroclastos basálticos (olivina, piroxena e titanomagnetites)
<b>Formação da Assomada (A)</b>	Basanitos (olivina – por vezes muito alterada para idingsite –, piroxena, plagioclase, óxidos. Melanefelinitos (olivina, piroxena, óxidos, mica, nefelina)
<b>Complexo eruptivo do Pico da Antónia (PA)</b>	Basanitos (olivina, piroxena, plagioclase e óxidos). Melanefelinitos (olivina, piroxena, óxidos, mica, nefelina). Nefelinitos (piroxena, nefelina, óxidos). Frequente a presença de xenólitos peridotitos e gabroicos inclusos nas lavas. <i>Pillow</i> -lavas (carbonatos, idingsite, zeólitos, serpentina).
<b>Sedimentos posteriores à Formação dos Órgãos e anteriores às lavas submarinas inferiores da Formação do Pico da Antónia</b>	Conglomerados e calcarenitos fossilíferos.
<b>Formação lávica pós-Formação dos Órgãos</b>	Traquitos
<b>Formação dos Órgãos (CB)</b>	conglomerática-brechoide com clastos de origem basáltica, raramente fonolítica. O cimento aglutinante, muito transformado, contém abundante material carbonatado e zeolítico, de origem secundária.
<b>Formação dos Flamengos (<math>\lambda\rho</math>)</b>	Basanitos [plagioclase, olivina, piroxena, plagioclase, feldspatoides (nefelina) e óxidos]. Melanefelinitos [olivina, piroxena, feldspatoides (nefelina) e óxidos]. Lavas com inclusões frequentes de xenólitos peridotíticos e gabroicos. <i>Pillow</i> -lavas (carbonatos, idingsite, zeólitos, serpentina).
<b>Conglomerados ante Formação dos Flamengos</b>	Conglomerados constituídos por clastos heterométricos semelhantes às rochas da Formação dos Flamengos ( $\lambda\rho$ ).
<b>Complexo Eruptivo Interno Antigo (CA)</b>	Complexo filoniano de base de natureza essencialmente basáltica. Intrusões de rochas granulares silicatadas. Brechas intravulcânicas e filões brechoídes. Intrusões e extrusões fonolíticas e traquíticas; Carbonatitos



**Figura 8** – Mapa das Unidades Hidrogeológicas (adaptado de Carta Geológica de Cabo Verde à escala 1/25 000, Junta de Investigação do Ultramar, 1961 (Serralheiro, 1976; Pina, 2009)

## 2.5. Hidrogeologia

Em ilhas vulcânicas a circulação da água depende, sobretudo, das suas características litológicas primárias, resultantes da origem da própria rocha e, em menor grau, das características litológicas secundárias resultantes de processos posteriores, de acordo com a evolução geológica. As características litológicas primárias relacionam-se com o volume, a frequência e o grau de associação de cavidades, poros e fissuras, sendo em regra responsáveis pelas propriedades hidráulicas das formações mais recentes (Rodrigues, 2002).

A complexidade geológica e estrutural que caracteriza normalmente as ilhas vulcânicas faz com que os estudos hidrogeológicos neste tipo de ambientes tenham muitas vezes que recorrer à

integração conjunta de resultados de técnicas de investigação de geologia, hidrogeologia e geofísica para se obter um conhecimento mais detalhado do comportamento das formações aquíferas (Carreira *et al.* 2018).

Em regiões vulcânicas a geometria do aquífero é controlada principalmente pelos contrastes de permeabilidade entre os distintos materiais (e.g., em regra, as rochas vulcânicas de composição basáltica apresentam maior permeabilidade que as rochas vulcânicas mais ácidas e, as lavas mais recentes são mais permeáveis que as mais antigas).

Também exerce um controlo importante a disposição espacial das unidades subvulcânicas associadas ao vulcanismo (Lameli, 2001). Por fim, é de notar que, para além destes fortes controlos geológicos, a escassez dos recursos hídricos de superfície da ilha de Santiago está intimamente relacionada com as precipitações baixas e irregulares ocorridas durante os últimos anos.

### **2.5.1. Unidades Hidrogeológicas da Ilha de Santiago**

Com base na sequência vulcano-estratigráfica da Ilha de Santiago Serralheiro, (1976) e apoiada por vários trabalhos de hidrogeologia realizados na ilha de Santiago (Alves *et al.* 1979; Gomes *et al.* 2004; Lobo de Pina, 2009), foram estabelecidas três Unidades Hidrogeológicas, com características diferenciadas: Unidade Recente (I), Unidade intermédia (II) e Unidade de Base (III) – (Fig.8).

A diversidade de formações e complexos geológicos que constituem os ambientes insulares vulcânicos, caracterizados pelos mais variados parâmetros hidrodinâmicos, conferem ao meio vulcânico um carácter altamente heterogéneo e anisótropo de tal modo que dificulta a aplicação do conceito de Volume Elementar Representativo (VER) (Drogue, 1988).

A diversidade de valores de transmissividade obtidos nas diferentes unidades hidrogeológicas manifesta-se desde valores mais elevados que ocorrem nos aquíferos constituídos da Unidade Recente – Formações Sedimentares Recentes de Idade Quaternária (Fig.8; Tabela 3), até valores mais baixos obtidos, por exemplo, para a Unidade de Base –Complexo Eruptivo Interno Antigo (Fig.8; Tabela 3). Este facto, põe em evidência a importância da idade dos edifícios vulcânicos, nas características hidrodinâmicas dos aquíferos, demonstrando que, quanto mais antigas forem as formações vulcânicas, menos permeáveis e transmissivas são (Join, et al., 1988).

**Tabela 3** - Características das unidades hidrogeológicas (adaptado de BURGEAP, 1974; Pina, 2009).

Unidades	Formações Geológicas	Produtividade e litologias relacionadas	Transmissividade (m <sup>2</sup> /s)
<b>Unidade Recente</b>	Formações Sedimentares Recentes de Idade Quaternária (a)	Variável segundo espessura e percentagem de argila A montante – vales pequenos e espessura reduzida A jusante dos grandes vales – vales amplos e aluviões espessos, com areias grosseiras e limpas	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-5</sup> 10 <sup>-1</sup> a 2·10 <sup>-2</sup>
	Formação do Monte das Vacas (MV)	Zona privilegiada de infiltração	-
<b>Unidade Intermédia</b>	Formação da Assomada (A)	Basalto alveolar e piroclastos Espessa sucessão de camadas	10 <sup>-4</sup> a 5·10 <sup>-4</sup>
	Complexo Eruptivo do Pico da Antónia (PA)	Variável em função do tipo de litologia: Camadas de rochas basálticas com intercalações de piroclastos e tufos Predominância de tufos e brechas Predominâncias de pillow-lavas Brecha de base das grandes camadas	1·10 <sup>-4</sup> a 5·10 <sup>-4</sup> 0,2 a 3·10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-1</sup> a 2·10 <sup>-2</sup> 10 <sup>-1</sup> a 2·10 <sup>-2</sup>
<b>Unidade de Base</b>	Formação dos Órgãos (CB)	Variável segundo a percentagem de piroclastos e aparecimento de filões	0,2 a 5·10 <sup>-5</sup>
	Formação dos Flamengos (λρ)	Variável segundo a relação pillow-lavas/brechas Estéril nas zonas de tufos	0,2 a 5·10 <sup>-5</sup>
	Complexo Eruptivo Interno Antigo (CA)	Variável segundo o grau de fracturação e aparecimento de filões Estéril nas zonas de tufos	0,2 a 5·10 <sup>-5</sup>

## 2.5.2. Descrição das Unidades Hidrogeológicas

Nesta secção far-se-á uma descrição das três Unidades Hidrogeológicas que constituem a Ilha de Santiago (Unidade Recente (I), Unidade intermédia (II) e Unidade de Base (III)), dada a sua anisotropia, tanto relativa à diversidade de formações e complexos geológicos, como em função da variabilidade dos seus parâmetros hidrodinâmicos.

### (I) Unidade Recente

Esta unidade apresenta uma elevada permeabilidade, associada a uma elevada porosidade. A sua localização em zonas de maior altitude, com alto índice de pluviosidade, e devido à sua permeabilidade, privilegia a infiltração da água. No entanto, não permite a retenção da água infiltrada, devido às suas características, o que faz com que a água seja drenada rapidamente para níveis inferiores, chegando assim ao Complexo Eruptivo do Pico da Antónia (PA).

As Formações Sedimentares Recentes de Idade Quaternária (ver tabela 2) comportam-se de acordo com as respetivas granulometrias, espessuras e percentagens de argilas. Assim, quando espessas, grosseiras e isentas de argila, possuem muita porosidade e permeabilidade, pelo que permitem furos de grande produtividade, como se pode observar na parte terminal da Ribeira dos Flamengos, Achada Baleia, Seca e na Ribeira dos Picos, chegando a atingir caudais médios de exploração de 40 m<sup>3</sup>/h, com uma exploração média de 12 h/dia. Em Santiago, estes depósitos são muito heterogéneos, apresentando características aquíferas variáveis em profundidade (Pina, 2014).

A Formação do Monte das Vacas (MV) é muito permeável, não permitindo a retenção das águas, que se infiltram, em direção ao aquífero principal. Localmente constituem importantes zonas de recarga das unidades aquíferas subjacentes.

## **(II) Unidade Intermédia**

A Formação da Assomada (A) atinge por vezes espessuras de dezenas de metros, na parte central (Planalto da Assomada). O caudal de exploração ronda em média 20-25 m<sup>3</sup>/h, com uma exploração média de 10-12 h/dia e rebaixamento pouco significativo.

O Complexo Eruptivo do Pico da Antónia (PA) é a unidade geológica mais extensa e espessa da ilha, apresentando uma permeabilidade muito superior à série de base, tornando-se assim o aquífero principal da ilha. Nesta formação quando predominam as pillow-lavas, fácies submarina, podem obter-se caudais acima da média da ilha, como por exemplo, 40 m<sup>3</sup>/h, com uma exploração média de 12 h/dia e, por vezes, chegando a atingir 20 h/dia.

Santos *et al.* (2006), consideram o Complexo Eruptivo do Pico da Antónia (PA), tanto nas fácies terrestres como submarina, como o aquífero mais importante das unidades hidrogeológicas dos Concelhos de Santa Cruz e S. Domingos.

Os maiores relevos da ilha estão associados às zonas onde esta formação recebe infiltração direta da precipitação. As descargas, muitas vezes sob a forma de nascentes, são normalmente relacionadas com fraturas ou zonas de contacto desta formação com outras formações de permeabilidade mais baixa. Comparando com a Unidade de Base, o seu coeficiente de armazenamento é relativamente elevado, contudo, ao apresentar uma permeabilidade muito heterogénea, nem sempre permite uma rápida drenagem dos níveis aquíferos.

## **(III) Unidade de Base**

O coeficiente de armazenamento desta unidade varia conforme a formação/complexo geológico, sendo a permeabilidade em regra reduzida devido à forte alteração das rochas.

A Formação dos Flamengos ( $\lambda_p$ ) é caracterizada por caudais que não ultrapassam os 15 m<sup>3</sup>/h, com uma transmissividade baixa, de cerca de 0,2 a  $5 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s. excepcionalmente, quando predominam as pillow-lavas, pode obter-se caudais acima da média, como por exemplo, 20 m<sup>3</sup>/h, com uma exploração média de 10-12 h/dia e um rebaixamento pouco significativo. Também é importante o papel hidrogeológico dos filões que ocorrem nesta formação, visto comportarem-se como barreiras ou como drenos (Jica *et al.* 1999).

Na Formação dos Órgãos (CB), para além das características semelhantes às outras formações desta Unidade de Base, a sua produtividade varia consoante a percentagem de piroclastos e a ocorrência de filões e fraturas, podendo ter captações com produtividades de 10 m<sup>3</sup>/h e com um caudal médio na ordem dos 3 m<sup>3</sup>/h (Jica *et al.* 1999).

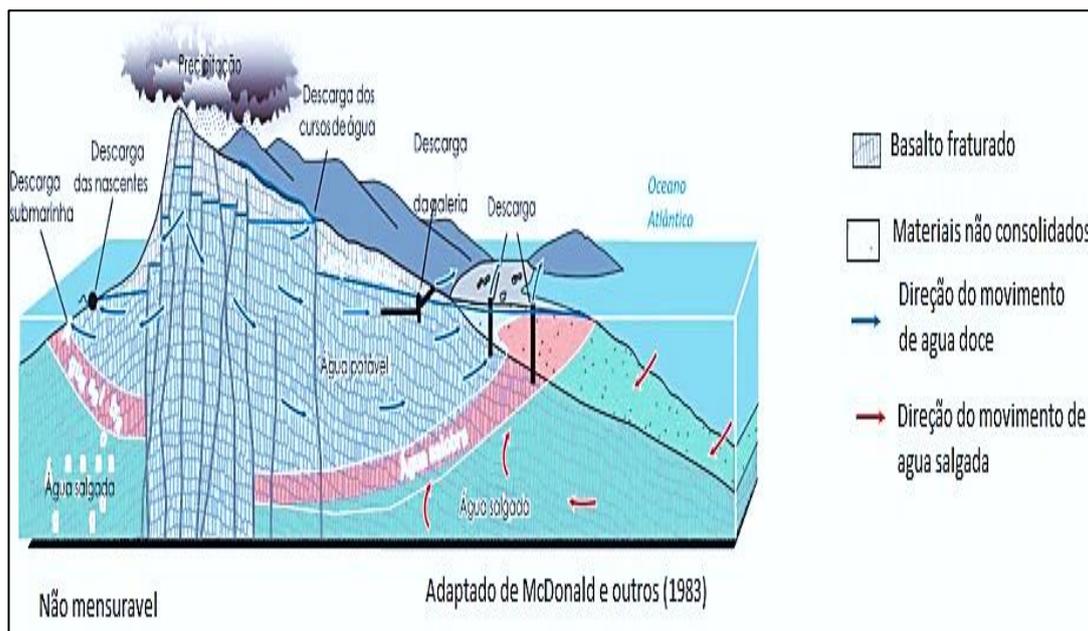
Estudos geofísicos efetuados por Rabadan, (1992) em zonas de afloramento da formação do Complexo Eruptivo Interno Antigo demonstram que existe uma camada alterada ou meteorizada com uma espessura variável, debaixo da qual se encontra a rocha alterada, muito fraturada, com espessura de 10-20 m e porosidade elevada (5-10%).

Debaixo desta zona encontra-se a rocha 'mãe', muito compacta e praticamente improdutiva.

### 2.5.3. Modelo hidrogeológico conceptual (simplificado)

No país em geral e Santiago em particular não existem rios perenes, porque a pouca chuva, devido aos terrenos abruptos, escorre rapidamente para o oceano, evapora ou é absorvida pelas plantas; apenas uma ínfima parte consegue infiltrar recarregando os aquíferos através das rochas permeáveis (Ventura, 2015)

De acordo com USGS, (2010), a água subterrânea move-se pelo baixo gradiente, da elevação superior para a parte inferior de cada bacia hidrográfica, infiltrando-se em poços (furos), nascentes, riachos, galerias e, finalmente, em direção aos oceanos por infiltração submarina, seguindo o modelo da Fig.9, proposto por Macdonald et al. (1983).



**Figura 9** - Modelo conceptual genérico da hidrologia nas ilhas vulcânicas, adaptado de McDonald e outros (1983).

A ilha de Santiago apresenta do ponto de vista hidrogeológico um grande reservatório central de água subterrânea constituído essencialmente pelas formações da Unidade Intermédia. Este reservatório central tem uma forma lenticular, com uma maior espessura na parte central e estreitando em direção à costa. Recebe infiltração direta ou diferida da água da chuva ou da condensação dos nevoeiros e é drenado por inúmeras nascentes e/ou ribeiras que sulcam a ilha em direção ao mar.

Pode descarregar também diretamente no mar ao longo da costa nas zonas de gradiente hidráulico positivo (Lobo de Pina, 2009).

Segundo Lobo de Pina, (2009), as formações da Unidade de Base formam normalmente a base impermeável do sistema aquífero insular. Nas zonas da ilha onde estas formações de base são atravessadas por inúmeros filões (Assomada, Sansão, Covão Grande, Achada Gregório, Engenho, Palha Carga e Ribeira de Sedeguma), podendo estes atuar como zonas de descarga subterrânea preferencial do sistema aquífero sobrejacente, principalmente sob a forma de nascentes. Destaca-se que esta rede filoniana pode ser tão intensa que pode compartimentar e confinar localmente o sistema aquífero.

Situação diferente acontece nas formações aquíferas relacionadas com a Unidade Recente que funcionam como áreas de infiltração preferencial para o reservatório central, pelo facto de serem muito permeáveis, principalmente a Formação do Monte das Vacas (MV), que pela sua litologia (piroclastos) apresentam permeabilidades elevadas, constituindo uma das zonas de recarga privilegiada (Mota Gomes, 2007)

## **2.6. Solos**

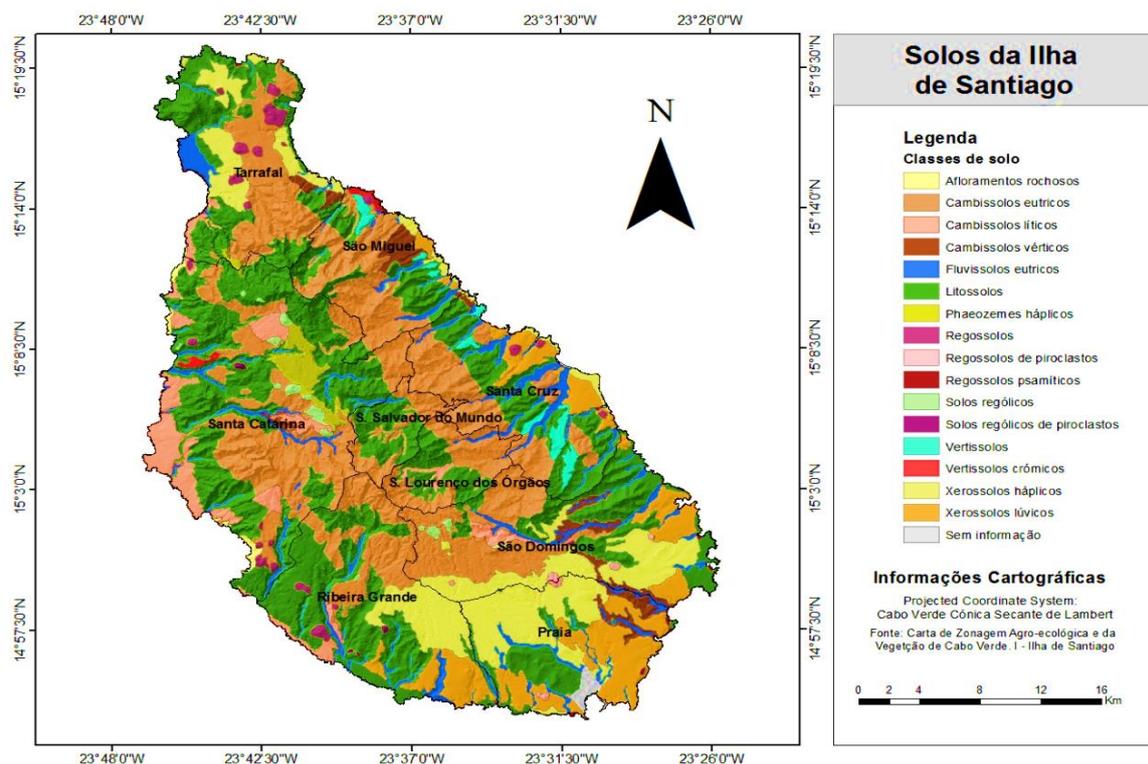
Faria, (1970) enfatiza a estreita relação entre as características dos solos da Ilha de Santiago e a litologia, tendo em conta que, a maior parte da ilha é constituída por basaltos e materiais piroclásticos (97%). De acordo com o referido autor o fator pedogenético “geologia/rocha mãe” estende-se a vários aspetos, tais como variações relacionadas com a presença, tanto de formações intrusivas ou plutónicas como de extrusivas ou vulcânicas, aspetos texturais e estruturais muito diversificados com repercussões do ponto de vista pedológico.

Na tabela 4 apresenta-se a classificação dos solos da Ilha de Santiago, tomando como referência os estudos realizados por Faria, (1970), a classificação americana ( Soil Taxonomy, 1975) e a classificação da FAO/Unesco, (2015). Esta tabela mostra a correspondência entre as três classificações por serem os termos usualmente encontrados na bibliografia sobre solos na Ilha.

**Tabela 4** - Classificação dos solos da ilha de Santiago segundo Faria, (1970) com correlação com a “USA Soil Taxonomy” (1975) e da FAO (2015).

(Faria, 1970)	USA Soil Taxonomy (1975)	FAO (2015)
<b>Solos incipientes</b>	Litossolos	<b>Litossolos</b>
	Regossolos	<b>Regossolos</b>
	Aluviossolos modernos	<b>Fluviossolos eutrícos</b>
<b>Solos pouco evoluídos</b>	Litólicos	<b>Cambissolos</b>
<b>Solos iso-húmicos (Molissols)</b>	Solos Castanhos (Xerolls)	<b>Castanzemes</b>
<b>Solos iso-húmicos (Aridisols)</b>	Solos Pardos subáridos (Orthids)	<b>Xerossolos</b>
<b>Vertissolos (Vertisols)</b>	Xererts	<b>Vertissolos</b>
<b>Paraferralíticos (Alfisols)</b>	<b>Pardos vermelhos (Xeralfs)</b>	<b>Luviossolos</b>

A cartografia mostra a diversidade de características e a distribuição espacial dos solos da Ilha de Santiago, sendo os cambissolos eutrícos, litossolos e os xerossolos háplico as classes dominantes (Fig.10).



**Figura 10** - Distribuição dos tipos de solos na Ilha de Santiago (Carta de Zonagem Agro-ecológica e da Vegetação da Ilha de Santiago).

Para melhor compressão dos aspetos pedológicos da Ilha descrevem-se brevemente as propriedades gerais das tipologias dominantes.

Os Cambissolos correspondem a solos pouco evoluídos (Perfil AC), azonais, pardos e castanho-avermelhados, formados a partir de rochas não calcárias. São solos com pelo menos um princípio de diferenciação dos horizontes do subsolo, evidenciados por mudanças na estrutura, cor, teores de argila ou teor de carbonato.

Estes solos são caracterizados por meteorização leve a moderada do material parental e pela ausência de quantidades apreciáveis de argila, matéria orgânica, compostos de alumínio e/ou ferro. Os Cambissolos também abrangem solos que não satisfazem uma ou mais características de diagnóstico de outros da Base de Dados Mundial de referência para os recursos do solo (RSGs), incluindo os altamente meteorizados (FAO/Unesco, 2015).

A estrutura do horizonte A pode ser grumosa, granulosa ou nuciforme e poliédrica ou prismática em profundidade. As diferenças entre subclasse dependem do teor (+/-) em matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC) e liberação dos sesquióxidos de ferro (efeitos pedoclimáticos do solo).

Os litossolos são delgados, rochosos, colocados imediatamente sobre a rocha-mãe, não apresentando, portanto, horizontes diferenciados; podem ser eutróficos ou distróficos (FAO/Unesco, 2015). São solos minerais, de erosão, azonais, jovens, pouco evoluídos associados a afloramentos de rochas consolidada dura, de basaltos ou rochas afins e fonólitos ou traquitos. A pouca espessura varia entre 10 a 20 cm, consoante a topografia, mas geralmente, em encostas de declive acentuado, com muito material pedregoso e cascalhento, são raros horizontes genéticos. Têm um predomínio das frações grosseiras, baixo teor em argila e matéria orgânica, CTC elevada (Ca e Mg), pH variável (6,5-7,1).

Os xerossolos são solos pardos a pardo-avermelhados, com horizonte superficial descarbonatado, e estrutura granulosa a anisoforme; em profundidade podem ser poliédricos (média e fina), têm baixo teor de cálcio e matéria orgânica variando entre 0,8-1,8%, quando existe vegetação (FAO/Unesco, 2015).

Estes solos podem ser classificados em:

**(a)** solos pardos subáridos normais: apresentam um perfil AC, ocorrem em encostas de 30-50% de declive, apresentam uma espessura efetiva (0,45 – 0,50 m), cor pardo a pardo avermelhada, estruturas finas a médias em profundidade. O teor em matéria orgânica varia entre 0,70 e 1,40%;

**(b)** Solos pardos subáridos avermelhados: perfil AC; distribuem-se por topografias planas a ligeiramente inclinadas, apresentam espessura efetiva variável, em geral, entre 0,45 e 0,70 m, cores avermelhadas e o Horizonte A, apresenta-se geralmente subdividido em dois;

**(c)** Solos pardos subáridos vertissólicos: estes solos apresentam estrutura prismática grosseira e média nos horizontes superficiais; distribuem-se por topografias planas a ligeiramente onduladas, com uma espessura efetiva que oscila entre 0,45 e 1 m;

**(d)** Solos pardos subáridos com crosta calcária: estes solos apresentam um perfil AC, A (B)C com; O horizonte B é rico em argila e o Horizonte C tem concreções de carbonato.

Estes solos distribuem-se por topografias ligeiramente onduladas até declives > 20%, a espessura varia de 0,45- 0,80 m.

***CAPÍTULO 3***

---

***ABORDAGEM METODOLÓGICA***

### **3- ABORDAGEM METODOLÓGICA**

A abordagem geral seguida nesta investigação compreende métodos e técnicas aplicados em fases de índole e com objetivos diversos: planeamento e análise em gabinete/pesquisa bibliográfica, levantamentos e campanhas de amostragem em campo, trabalho de caracterização analítica efetuado em laboratório, preparação de base de dados e tratamento gráfico e estatístico; interpretação de resultados. A interpretação de resultados incluiu a comparação com dados bibliográficos, nomeadamente sobre o quimismo da água e solos, obtidos em trabalhos anteriores sobre a Ilha.

Na apresentação da abordagem metodológica optou-se por descrever brevemente a natureza dos trabalhos realizados em gabinete, no campo e no laboratório.

#### **3.1- Trabalho de gabinete**

O estudo iniciou-se com a compilação da informação/ dados bibliográficos sobre a área de estudo, nomeadamente enquadramento geográfico, geológico, climático, hidrológico e pedológico. Dentro desta compilação incluem-se inventários dos pontos de água e do solo, dados meteorológicos, dados químicos da água e do solo, nomeadamente com revisão sobre o estado da arte no arquipélago e na Ilha de Santiago.

Neste contexto de gabinete refere-se o tratamento e interpretação de resultados. Inclui-se também a preparação de cartografia para planeamento de amostragens, bem como a elaboração de mapas finais

##### **➤ Tratamento de dados**

A organização dos dados obtidos relativos à área em estudo foi feita com base no uso das ferramentas como QGIS e Arc-Gis e GoogleTm Earth. Foram utilizados os programas Aquachem, Diagrammes e Qualigraf para a caracterização hidroquímica da água mediante a projeção de dados em diagramas de Piper, entre outros, com intuito de caracterizar a qualidade da água subterrânea para diferentes usos. Para efeitos de risco de salinização, o SAR foi calculado usando a seguinte equação, do US Salinity Laboratory Staff 1954:

$$\text{Sodium Absorption Ration (SAR)} = \frac{r\text{Na}^{2+}}{\sqrt{r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2}}$$

Adicionalmente procedeu-se a um sumário estatístico e análise de correlações, mediante o programa Microsoft Excel. A análise estatística Cluster foi efetuada com o programa IBM SPSS Statistics, versão 24, usando o método Ward.

Adicionalmente, com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial e os principais fatores de controlo da qualidade das águas subterrâneas no universo dos locais do inventário de pontos de água procedeu-se a um tratamento estatístico de tipo Análise Discriminante Linear (ADL). Foi usada uma técnica supervisionada de reconhecimento de padrões cuja abordagem começa com a alocação de todos os indivíduos (amostras) para um suporte pré-conhecido espacial ou temporal, designado como grupo. Nesta investigação a ADL foi usado para avaliar a variação da qualidade da água em profundidade, procurando identificar as semelhanças ou dissimilaridades entre os locais amostrados e as variáveis de qualidade da água subterrânea mais significativas, responsáveis pelas variações espaciais em 3D.

### **3.2- Campo/ Amostragem**

#### **i) Água**

O período de amostragem da água decorreu nos anos 2016 (agosto e setembro), 2017 (fevereiro e março) e 2018 (fevereiro).

Procedeu-se à elaboração de um inventário de pontos de água, cuja dispersão cobre diferentes formações geológicas, diferentes concelhos e diferentes usos da água, de modo a representar a potencial variabilidade geológica a antropogénica.

Para além destes locais de amostragem que pretendem avaliar fatores de controlo da variabilidade espacial, procedeu-se à monitorização de um furo, selecionado no concelho de São Domingos - furo FST-924. Esta monitorização decorreu entre os meses de dezembro de 2016 e janeiro de 2017, durante doze semanas, com o objetivo de identificar eventuais variações sazonais.

A localização dos pontos de amostragem, incluindo o furo FST-924, mostra-se no decorrer da apresentação e tratamento dos resultados (Capítulo 6).

Em cada local de amostragem procedeu-se à colheita de três subamostras: i) uma, em recipiente de 1000 mL, destinada a análise de parâmetros físico-químicos, tais como alcalinidade, oxidabilidade e sólidos suspensos; ii) outra, com um volume de 100 mL, destinada a análise de aniões por cromatografia iónica, sujeita a filtração em campo com um filtro-seringa descartável em PET de porosidade 0,45 µm; iii) outra, em frasco de 50 mL, igualmente filtrada em campo e acidificada com HNO<sub>3</sub> a pH < 2 (Standard Methods 3010B), destinada a análise de metais. Todos os recipientes de armazenamento consistiram de frascos de polietileno de alta densidade (frascos Kartel), previamente sujeitos a descontaminação de acordo com a norma ASTM 5245 (ASTM, 1992).

Durante a colheita cumpriram-se determinados requisitos destinados a evitar a contaminação das amostras, nomeadamente uso de luvas, lavagem dos frascos com água ultrapura e enxaguamento com a própria amostra (Standard Methods 1060A).

Além da recolha das amostras em cada ponto, procedeu-se a medições in situ, de parâmetros expeditos (Fig 11): pH, condutividade elétrica (CE), sólidos dissolvidos totais (TDS) e temperatura com um medidor multiparamétrico portátil, marca ORION, modelo Star 5. Após a colheita, as amostras foram armazenadas num recipiente refrigerado a uma temperatura inferior a 4°C, protegido da luz solar e finalmente transportadas para o laboratório a fim de serem analisadas (Fig. 12).



**Figura 11-** Colheita das amostras de água e medição, in situ (campo), dos parâmetros (pH, CE, TDS e Temp)



**Figura 12-** Análise laboratorial das amostras

## **ii) Solos e sedimentos**

A amostragem dos sedimentos e solos realizou-se no mês de março de 2018, que teoricamente corresponde ao período da estação seca. No entanto, de notar a dificuldade real de aplicação deste conceito no âmbito do presente estudo, uma vez que na ilha não chove há muito tempo.

Procedeu-se à recolha das amostras com auxílio de uma pá de aço inoxidável que permitiu recolher, aproximadamente, 1 a 2 Kg de amostra da porção superficial até uma profundidade máxima de 20 cm. Todas as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos com identificação do local de amostragem e data, e posteriormente transportadas para o Laboratório de Pedologia do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho.

A amostragem incidiu essencialmente na bacia hidrográfica de Santa Cruz, por ser a mais sujeita a pressão antropogénica, nomeadamente associada a atividade agrícola, e por nela se situarem as principais barragens em processo de assoreamento. Adicionalmente colheram-se amostras de solo e sedimento de corrente nas imediações da cidade da Praia, com objetivo de avaliar eventual contaminação com origem na maior lixeira do Ilha.

O esquema de amostragem, em 3 sub-bacias, contemplou em geral a colheita de amostras de sedimento no leito da linha de água principal, de montante para jusante, incluindo, quando possível, a albufeira da barragem. Adicionalmente colheram-se amostras de solo nas vertentes da linha de água, sujeitas a agricultura de regadio e/ou sequeiro (figura 13). A localização das amostras, com os

respetivos perfis (incluindo sedimento da linha de água/fundo da albufeira e solo das vertentes) mostra-se no decorrer da apresentação e tratamento dos resultados (Capítulos 7 e 8).



**Figura 13** - Colheita das amostras nas vertentes da linha de água e em terrenos agricultados.

### **3.3- Trabalho de laboratório**

O trabalho laboratorial contempla a preparação de amostras e a realização de determinações analíticas incidentes sobre águas, solos e sedimentos colhidos em campo.

#### **➤ Métodos de análise química da água**

Os aniões cloreto, brometo, fluoreto, nitrato, nitrito, fosfato e sulfato, foram analisados por cromatografia iónica com supressão química, mediante um cromatógrafo marca Methrom, modelo 761 Compact. A alcalinidade foi analisada por volumetria, de acordo com o método 2320B (Standard

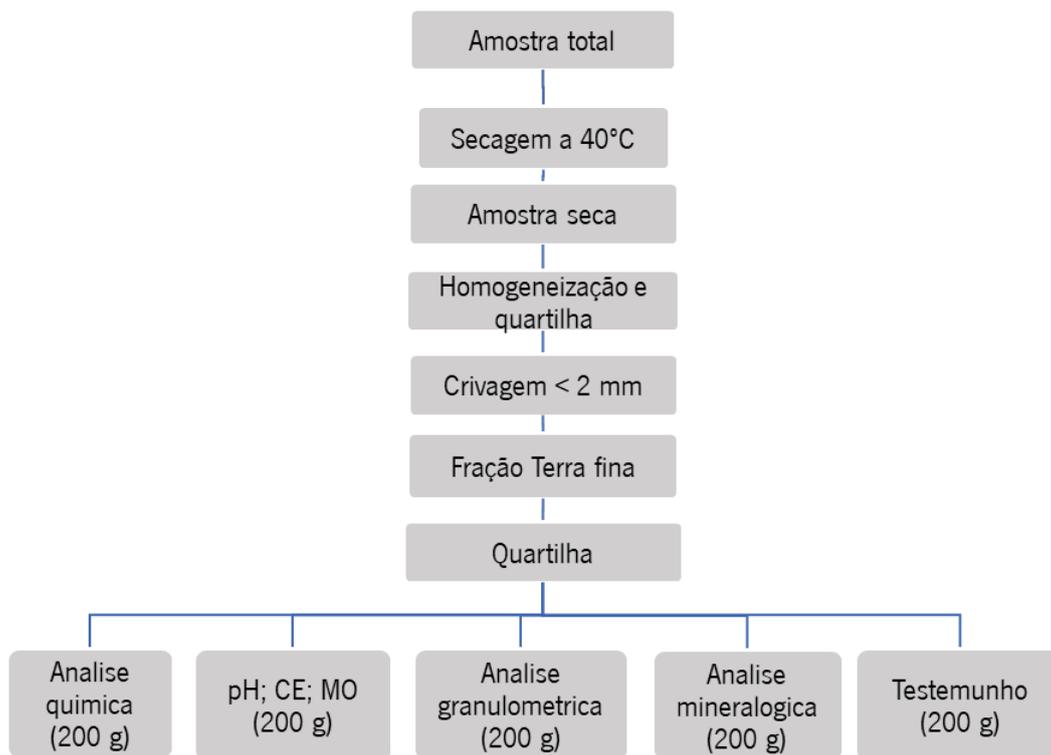
Methods) e a oxidabilidade de acordo com uma titulação de retorno através do método de oxidação em meio ácido sulfúrico com permanganato (Rodier, 1984). Os sólidos suspensos totais determinaram-se por gravimetria, com secagem a  $105^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Os metais e arsênio foram analisados por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente – ótico e massa (ICP-OES/MS), no laboratório Actlabs (Canadá). Todos os procedimentos foram realizados com reagentes pró-análise e água ultrapura, produzida em sistema Millipore. A tabela 5 sintetiza os métodos analíticos e a respectiva referência.

**Tabela 5** – Métodos analíticos usados para análise das amostras de água. \* - método indicado na legislação em vigor e de acordo com procedimento descrito em Rodier (1984).

<b>PARÂMETRO</b>	<b>TÉCNICAS</b>	<b>MÉTODOS DE REFERÊNCIA (AWWA, 1992)</b>
<b>Metais</b>	ICP – MS ICP-OES	Standard Methods 3113 B
<b>ANÁLISE DE ANIÕES</b>		
<b>Brometo</b>	Cl	S-9 (Metrohm, 2000)
<b>Cloreto</b>	Cl	S-9 (Metrohm, 2000)
<b>Fosfato</b>	Cl	S-9 (Metrohm, 2000)
<b>Fluoreto</b>	Cl	S-9 (Metrohm)
<b>Iodeto</b>	Cl	S-9 (Metrohm, 2000)
<b>Nitrato</b>	Cl	S-9 (Metrohm, 2000)
<b>Nitrito</b>	Cl	S-9 (Metrohm, 2000)
<b>Sulfato</b>	Cl	Standard Methods 4500 E
<b>ANÁLISE DE OUTROS PARÂMETROS</b>		
<b>Alcalinidade</b>	Volumetria	Standard Methods 2320 B
<b>Oxidabilidade</b>	Oxidação em meio ácido sulfúrico com permanganato	.*
<b>Sólidos Suspensos Totais</b>	Gravimetria	Standard Methods 2540 D

### ➤ **Preparação e análise de solos e sedimentos**

O esquema de preparação de amostras de solo e sedimento cumpriu o conjunto de operações, representado na fig.14, de forma a gerar subamostras representativas para as diferentes determinações analíticas.



**Figura 14-** Esquema de preparação das amostras para os diferentes tipos de análises.

No caso dos solos e sedimentos das albufeiras procedeu-se à determinação do pH e condutividade elétrica (CE) por potenciometria com auxílio de um medidor marca Hanna, de acordo com o seguinte procedimento: - O pH foi medido numa suspensão em água (pH-H<sub>2</sub>O) e em solução salina (pH-KCl) na proporção 1-2,5; - A CE foi medida em suspensão na proporção 1-2,5 em H<sub>2</sub>O (Wike, 2005).

A textura foi determinada com base na análise granulométrica, tendo sido adotada para o efeito a Escala de Atterberg recomendada pela Sociedade Internacional da Ciência do Solo e o diagrama do (USDA, 2011). Adicionalmente procedeu-se à análise do teor de matéria orgânica e de um conjunto de elementos com relevância na fertilidade dos solos Lombardi *et al.* (2002): Ca, Mg, Na, K, B, Cu, Fe, S, Zn, NO<sub>3</sub>, P, Mn. Estas análises foram efetuadas no laboratório do Actlabs, Canadá, obedecendo às normas OMAFA (Ontário Ministry of Agriculture & Food) para estudo de nutrientes em solos. De notar que as concentrações de metais não se referem a teores totais, mas antes a teores biodisponíveis, obtidos após extração com ácido dietilenotriaminopentaacético (DTPA) e posterior análise por ICP-OES ([www.actlabs.com](http://www.actlabs.com)).

Já no caso das amostras de solo e sedimento na envolvente da lixeira da cidade da Praia, a análise de metais, também efetuada no laboratório Actlabs, fez-se por ICP-OES, após pulverização com recurso a um moinho de ágata e sujeitas a digestão extração com água regia.

A mineralogia determinou-se por difração de raios-x (DRX), no laboratório de DRX do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho (DCT-UM). A análise por DRX fez-se num difractómetro Philips PW1710, operando com radiação  $\text{CuK}\alpha$ , tensão de 40 kV e intensidade de 20 mA.

Os difratogramas da fração terra fina obtiveram-se com um varrimento no intervalo angular  $3^\circ$  a  $65^\circ 2\theta$ . A semi-quantificação da mineralogia presente fez-se usando a intensidade dos picos diagnósticos, como por exemplo para o quartzo (3.34 Å); mica (10 Å); Feldspato-K (3.24 Å); plagioclase (3.18-3.20 Å); goethite (4.18-4.20 Å) e minerais de argila (4.43-4.49 Å).

A identificação da fração  $< 2 \mu\text{m}$  fez-se em lâminas orientadas secas ao ar e com aplicação de tratamentos químicos e térmicos, de acordo com o método usado no laboratório de argilas do DCT/UM, incluindo operações rotineiras de lavagem, centrifugação, sifonagem e decantação. Para cada amostra foram obtidos três difratogramas no intervalo angular que comporta as reflexões mais intensas dos minerais de argila ( $2$  a  $35^\circ 2\theta$ ) Brindley et al. (1980), correspondendo à lâmina orientada seca ao ar, após tratamento químico com etileno glicol e após aquecimento a  $490^\circ\text{C}$  (C).

***CAPÍTULO 4***

---

***ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM CONTEXTO DE CLIMA ÁRIDO – CABO VERDE  
E ILHA DE SANTIAGO***

## **ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM CONTEXTO DE CLIMA ÁRIDO (CABO VERDE E ILHA DE SANTIAGO)**

O abastecimento de água em países em desenvolvimento, principalmente em condições climáticas adversas, coloca numerosas questões de ordem social, económica e ambiental. A relevância destes aspetos no contexto de Cabo Verde, extrapoláveis a outros países em desenvolvimento, deu origem à publicação “WATER SUPPLY AND ACCESS TO SAFE WATER IN DEVELOPING ARID COUNTRIES” Gonçalves *et al.* (2019), que por sua vez se baseia no conteúdo do presente capítulo.

Analisa-se aqui a situação do abastecimento de água nesta região da África Ocidental, em relação à taxa de cobertura pública e à qualidade da água, focando os dados quantitativos no arquipélago de Cabo Verde, e em especial na sua ilha mais populosa (Santiago).

### **4.1 - A água em climas áridos**

A água é um bem essencial para a vida humana que deve ser usado e gerido de forma sustentável. O acesso a água potável é uma necessidade básica, mas existem muitas regiões do mundo com situações precárias ou mesmo sem infraestruturas de abastecimento de água com qualidade mínima. De acordo com OMS/UNICEF, (2012; 2015), 1/6 da população mundial não tem acesso a água potável. A OMS estima que a situação irá piorar até 2050, afetando 90% da população nos países em desenvolvimento. Por outro lado, um provimento adequado de água é vital para as condições de saneamento e, conseqüentemente, para garantir a saúde pública (Carter, 2006).

Segundo Irmiler *et al.* (2013), o abastecimento de água deve ser orientado no sentido da melhoria da água fornecida pelas concessionárias, a fim de atender a um padrão de qualidade específico. Por sua vez, o conceito de água potável é geralmente atribuído à água fornecida para uso humano, inclusive para beber, cozinhar e lavar.

O nível de distribuição pelas redes públicas é fortemente variável no universo das maiores cidades africanas (Wallingford, 2003). Por exemplo, este autor apresentou uma produção de água na ordem de 30 L/habitante/dia e 286 L/habitante/dia, respetivamente, para Luanda em Angola e Gabarone no Botsuana.

No entanto, os serviços básicos nas áreas rurais são consideravelmente menos disponíveis Brinkerhoff *et al.* (2018) ou até inexistentes. Estes autores apresentam uma revisão sobre questões espaciais que afetam a disponibilidade de serviços nas áreas rurais dos países em desenvolvimento.

Atualmente, os países áridos de África enfrentam os efeitos das mudanças climáticas, bem como da evolução demográfica, económica e política que podem restringir o desenvolvimento sustentável dos sistemas de gestão da água (Feyera *et al.* 2018). Estas regiões terão de lidar com situações especialmente complexas devido à escassez de água o que, por outro lado, poderá forçar a resolução dos problemas da sua qualidade. Neste âmbito, o crescente incremento populacional enquanto promove mais procura, também, aumenta as dificuldades das entidades de gestão da água. Além disso, a gestão da água pode ser mais complexa em contextos insulares, especialmente em pequenas ilhas, onde a influência marinha pode restringir a qualidade da água (Cruz *et al.* 2017), isto é, nos sectores onde o efeito de salinização dos recursos hídricos subterrâneos pode comprometer as condições de abastecimento de qualidade (Lima *et al.* 2011).

A gestão do abastecimento de água em climas áridos, como Cabo Verde, tem sido objeto de extensa bibliografia. Marques *et al.* (2011) apresentam um modelo normativo para Cabo Verde, propondo uma metodologia de avaliação da qualidade do serviço público. Esta metodologia é baseada em indicadores e pontuações que permitem classificar o desempenho do sistema variando de excelente a mau.

Falkenmark, (2013) salientou o clima como o principal fator restritivo e, conseqüentemente, a necessidade de estratégias para lidar com a grave falta de água em muitos países africanos. Da mesma forma, Vörösmarty, (2000) demonstram o impacto a grande escala, nos países em desenvolvimento que sofrem com a escassez de água, em resultado das mudanças climáticas e do aumento de episódios de seca extrema. Cirilo, (2008) refere, para a região árida do nordeste do Brasil, a adoção de uma política hídrica centrada numa estratégia de fornecimento público para longas distâncias. Relativamente às taxas de cobertura pública, Milliken, (2001) refere a necessidade de considerar fatores sociais, económicos e ambientais, de modo a que se alcance o equilíbrio entre oferta e a procura, de uma forma rentável.

Nos países em desenvolvimento, o acesso à água depende frequentemente de pontos de água sem monitorização e controle de qualidade, tais como fontes, lagos e rios. As infraestruturas de exploração e distribuição são geralmente insuficientes ou apresentam dificuldades de gestão. Há muito que se mantém esta situação. Damme, (2001) já havia identificado estes problemas, mostrando evidências de deficiente monitorização e controle de qualidade, falta de pessoal técnico especializado e recursos económicos limitados. Mais recentemente, Irmiler *et al.* (2013) também identificam como duas das questões fundamentais do ponto de vista hídrico, nos países em desenvolvimento, a baixa taxa de cobertura pública e a qualidade da água, causadas principalmente

pela sua escassez devido à aridez e às secas frequentes. Na ausência de uma rede pública eficiente, os fornecedores de água podem suprir esta lacuna, mas, por norma, obrigando a população a percorrer grandes distâncias para se abastecer. Esta tarefa é, na generalidade dos casos, atribuída a mulheres e a crianças (Kjellen *et al.* 2006).

A escassez aumenta o valor económico da água, implicando a existência dum mercado de água nestes países, o qual deve ser devidamente regulado (Rogers *et al.* 2002; Irmiler *et al.* 2013). Um relatório das Nações Unidas de 2007 apresenta uma breve análise do papel que as tarifas e os subsídios devem ter como estratégia para o fornecimento de água nesses países.

De facto, as tarifas geralmente são incapazes de suportar os custos de operação e manutenção das redes existentes (Desalegn, 2005; OECD, 2009). Neste contexto, Komiver (2005) analisou o impacto dos subsídios em Cabo Verde. O autor concluiu que havia uma grande disparidade entre a proporção do montante do subsídio para os agregados familiares pobres e o aplicado a todos os agregados familiares (apenas um para cinco).

Atualmente Cabo Verde apresenta um crescimento económico acelerado e um forte aumento populacional. No entanto, este país foi classificado pela ONU como sendo um país em desenvolvimento (ONU, 2013), com 27% da população a viver abaixo da linha da pobreza (Bank, 2011). O abastecimento público de água é considerado um problema crítico e desafiador para o desenvolvimento sustentável do país.

No panorama acima descrito para o desenvolvimento de países com climas áridos, pode assumir-se que o abastecimento de água potável constitui um desafio determinante para Cabo Verde, tendo as recentes secas severas aumentado, a já de si problemática, escassez de água. Assim, as entidades de gestão devem encontrar estratégias de adaptação para se acomodarem a um clima em mudança (Asefa *et al.* 2014).

Lima, (2013) regista o compromisso do Governo de Cabo Verde em cumprir os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), especialmente no que diz respeito à quantidade da população sem água potável (OMS/UNICEF, 2015). Nesta linha, foram realizadas reformas no sector da água e saneamento, de molde a melhorar a eficiência dos serviços públicos (Marques *et al.* 2011).

Considerando agora as 17 metas estabelecidas pela ONU como Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para a Agenda 2030 (ONU, 2015) o setor da Água mantém-se e assume-se de forma ainda mais premente como uma prioridade.

A Agência Reguladora Económica (ARE) é a entidade nacional que controla o serviço de água em Cabo Verde, sendo responsável pelo sector público, nomeadamente pelo desenvolvimento de taxas de cobertura pública de água potável.

Na ilha de Santiago várias medidas foram implementadas, nomeadamente a criação da “Empresa Intermunicipal de Água e Saneamento de Santiago - Águas de Santiago”. O objetivo principal deste organismo é garantir a distribuição económica e em quantidade e qualidade adequadas (ARE, 2015). No entanto, a região é cada vez mais sensível às mudanças climáticas e, conseqüentemente, enfrenta uma crescente falta de água. Este facto, conjuntamente com as tendências atuais do crescimento da população em Cabo Verde, pode levar um forte incremento da procura de água. Esta mesma situação estende-se a toda a África Subsaariana (TNC, 2016). O investimento insuficiente na gestão de recursos hídricos agrava o impacto económico das secas, podendo levar ao aumento da procura de água (TNC, 2016).

Neste sentido, o presente capítulo tem como objetivos: i) analisar a situação da cobertura de abastecimento de água em Cabo Verde e na ilha de Santiago; ii) avaliar a viabilidade e sustentabilidade do serviço de abastecimento público; e iii) avaliar a qualidade dos recursos hídricos em regiões com baixa cobertura da rede pública de distribuição (o caso do município de S. Domingos).

#### **4.2- Estratégias nacionais para o sistema de gestão da água**

O clima árido, com precipitação rara e irregular, é o principal fator de controlo da disponibilidade de água potável. Atualmente, as dificuldades no abastecimento de água são agravadas pelo aumento da população e da urbanização, juntamente com os recentes períodos de secas severas, têm como consequência o aumento da vulnerabilidade do sistema de gestão da água, que impõe a redução dos impactos desses eventos negativos, a fim de atender às necessidades de água em diferentes cenários (Vieira *et al.* 2018).

O plano de ação nacional para a gestão integrada dos recursos hídricos destacou a necessidade de desenvolver esse sector para satisfazer a crescente procura de água doce. Assim, a oferta deveria aumentar para mais de 70 milhões de m<sup>3</sup> em 2020, em comparação com os 42 milhões de m<sup>3</sup> em 2007. No entanto, a procura deve aumentar para 100 milhões de m<sup>3</sup> no mesmo período (Empréstimo, 2013). Dado o potencial limitado dos recursos hídricos superficiais, o suprimento depende fortemente das fontes de água subterrânea. No entanto, o bombeamento excessivo está a promover a intrusão de água salgada, que afeta os recursos de água subterrânea (Carreira *et al.* 2010; Gonçalves *et al.* 2015). Atualmente, a dessalinização da água do mar é uma

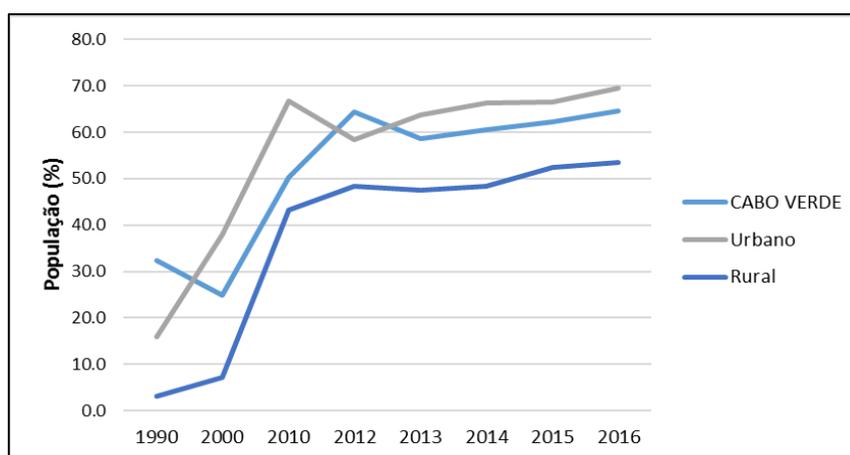
estratégia nacional para ajudar no desenvolvimento do serviço público de abastecimento de água (Marques *et al.* 2011).

De acordo com o plano nacional de saneamento básico de 2010, o volume total de água subterrânea explorada no arquipélago foi estimado em 99,409 m<sup>3</sup>/dia, representando a Ilha de Santiago 53,989 m<sup>3</sup>/dia. As nascentes representam 44% desse valor total, enquanto os orifícios e poços representam 28-29%, respetivamente (Ventura, 2009).

### 4.3 - Acesso a infraestruturas de água em Cabo Verde

De acordo com as informações oficiais disponíveis, houve progresso em relação à oferta pública em Cabo Verde, pois a proporção da população atendida pela rede pública aumentou consideravelmente. De facto, essa proporção aumentou de 32,4% em 1990 para 64,6% em 2016 (INE, 2017).

Embora a proporção da população com acesso à rede pública em 2016 tenha atingido mais de 60%, existem desigualdades entre as áreas urbanas e rurais, em favor dos centros urbanos (Fig.15).



**Figura 15** - Evolução da população com acesso à rede pública de água em Cabo Verde de 1990 a 2016.

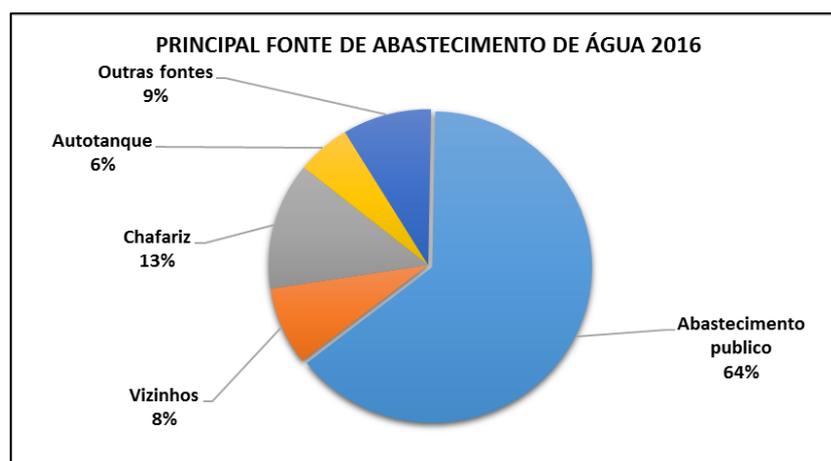
**Fontes:** Censo do INE (1990, 2000, 2010) e vários relatórios oficiais do Governo (QUIBB - 2006, 2007 e IMC 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016).

O consumo de água per capita em Cabo Verde é baixo, sendo de 40-60 L em áreas com abastecimento público doméstico e de 10-20 L em fontanários (PNUD, 2013). Esse valor não atende ao padrão mínimo recomendado de 20 a 40 L/ habitante/dia (OMS, 2011; INGRH, 2010). No entanto, nas áreas rurais, as fontes públicas e os tanques de automóveis têm importância particular (INE, 2017). Essas fontes são mais dispendiosas, tanto em tempo, como em preço, pois os domicílios dispendem tempo para a obtenção da água (Fig.16).



**Figura 16** - Imagem de crianças carregando recipientes para recolha de água.

Cerca de 64% da população é fornecida pela rede pública, 13% por fontanários (chafariz) e 6% por autotanques. Assim, 83% da população tem acesso a um abastecimento de água mais ou menos seguro, mas 17% é fornecida precariamente (Fig.17).



**Figura 17** - Principais fontes de abastecimento de água em Cabo Verde.

Fonte: INE (2017)

#### **4.4 - Abastecimento e qualidade da água na ilha de Santiago**

##### **4.4.1 - Consumo de água e principais fontes de água**

Em 2013, a Ilha de Santiago tinha 236000 habitantes e 63392 domicílios, o que indicava cerca de 4 habitantes por domicílio. Esta ilha possui mais da metade da população de Cabo Verde e as projeções demográficas do INE, (2017) indicam que a população da Ilha de Santiago estaria a aumentar progressivamente até 2020, com uma taxa de crescimento anual de 1,4%.

De acordo com os dados do PNUD, (2013), a estimativa do consumo per capita nos centros urbanos depende da oferta do sistema: em média, é de 50 L/habitante/dia da rede pública (doméstica) e 15 L/habitante/dia de fontanários.

Nas áreas rurais, o consumo é variável: 25-50 L/habitante/dia para conexões domésticas e entre 5-15 L/habitante/dia para outras formas de suprimento. Esse consumo médio está abaixo do recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2011).

O aumento da tendência demográfica para Santiago implica maior procura de água potável. Assim, o Projeto de Desenvolvimento do Sistema de Abastecimento de água realizado pelo governo (Empréstimo, 2013) considerou algumas medidas para atender a essas necessidades, destacando-se a transferência temporária de água entre os municípios na estação seca.

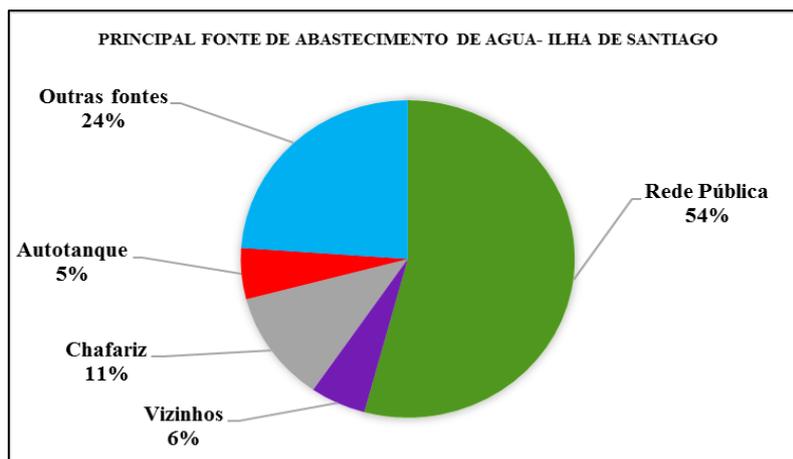
A ilha possui um total de 2287 pontos de água identificados e georreferenciados, na forma de poços tubulares, cisternas, piezômetros e cursos de água, além dos clandestinos (Pina, 2014). Atualmente (2017-2018) existem projetos para fortalecer a rede de distribuição, como os sistemas de Faveta e Poilão e duas barragens de água construídas recentemente (DouroECI, 2018).

Em termos de controlo de qualidade, a instituição - INGRH / ANAS garante a monitorização de 15,4% dos pontos de água (353), sendo 211 poços tubulares, 39 nascentes, 14 piezômetros e 89 cisternas (Pina, 2014). Os poços são monitorizados mensalmente pela ANAS, com medições de caudal e de indicadores físico-químicos expeditos (condutividade elétrica, temperatura e sólidos totais dissolvidos), visando uma caracterização *in situ*.

#### **4.4.2 - Acesso a infraestruturas de água na Ilha de Santiago**

O modelo de gestão da água em Santiago, como nas outras ilhas do arquipélago, é de alguma forma peculiar, conforme descrito por Bosa (2015). Baseia-se na coexistência de instituições públicas e privadas: as nascentes e pequenos poços são administrados por privados; os furos e os grandes poços são controlados pelo estado, sendo de fato administrados principalmente pelas comunidades.

Na ilha de Santiago 54% da população é atendida pela rede de distribuição pública, embora utilizando diferentes formatos de oferta. No entanto, 24% da população é abastecida por poços e nascentes, entre outros, que podem ser considerados fontes não potáveis (INE, 2017; IMC-CV,2016) – Fig.18.



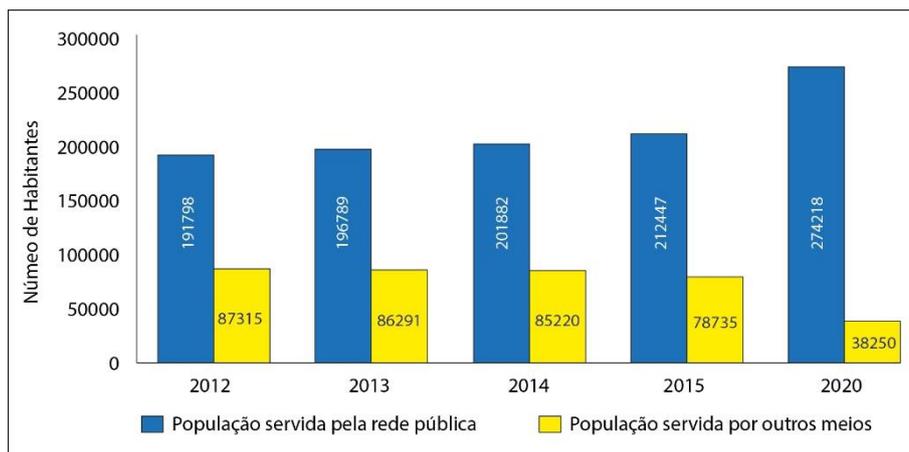
**Figura 18** - Principais fontes de abastecimento de água - ilha de Santiago (INE, 2017).

Nos casos em que a população se abastece através de fontanários, camiões-tanque ou por outros meios (por exemplo, poços e nascentes), o serviço é prestado por empresas privadas, embora sob a responsabilidade pública da ADS (Águas de Santiago) – Fig.19.



**Figura 19** - Diferentes meios de abastecimento de água na ilha de Santiago: A) chafariz; B) autotanque; C) nascentes; D) poços.

Em 2015, 212447 habitantes foram abastecidos pela rede pública, enquanto 78735 habitantes dependiam de outras fontes de abastecimento. Espera-se que até 2020 a população abastecida pela rede pública alcance os 274218 habitantes, enquanto o número de habitantes abastecidos por outros meios diminua para 38250 (ARE, 2015) – Fig.20.



**Figura 20-** Evolução da população com acesso à rede pública na ilha de Santiago (2012-2020).

Fonte: (ARE, 2015; MEF EBES).

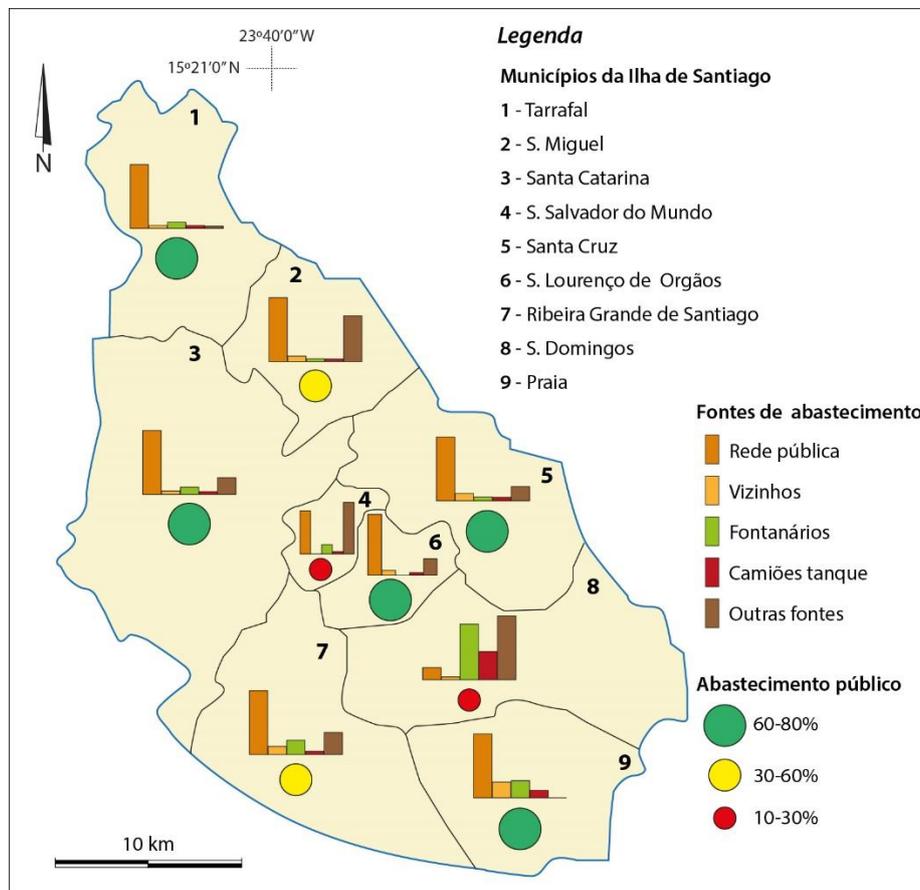
Em 2015, a captação média de água para consumo público em Santiago foi estimada em cerca de 40 L/habitante/dia. Até 2020 o valor de captação mínima estaria em 60 L/habitante/dia (ARE, 2015).

Em relação à ligação à rede pública, os municípios de S. Lourenço dos Órgãos, Santa Catarina, Santa Cruz e Tarrafal estão acima da média nacional (Tabela 6). No entanto, existem municípios com uma proporção significativa da população (acima de 30%) dependente de fontes precárias (poços, nascentes). Essa situação é mais preocupante nos casos de São Domingos e São Salvador do Mundo, pois nem 25% da população tem conexão com a rede pública. Especificamente, no município de São Domingos a rede pública não atinge os 10%.

**Tabela 6 -** Principais fontes de abastecimento de água (%) na Ilha de Santiago.

Município	Rede pública	Vizinhos	Chafari	Autotanque	Outras fontes
<b>Tarrafal</b>	80,0	3,6	8,7	5,5	2,2
<b>Santa Catarina</b>	66,9	5,6	7,4	2,7	17,4
<b>Santa Cruz</b>	66,8	8,5	4,8	2,4	17,4
<b>Praia</b>	62,7	13,0	16,1	7,9	0,3
<b>S. Domingos</b>	6,5	0,7	34,7	17,9	40,1
<b>S. Miguel</b>	50,9	5,6	3,8	3,2	36,4
<b>S. Salvador do Mundo</b>	24,2	0,1	13,2	3,1	59,4
<b>S. Lourenço dos Órgãos</b>	73,9	3,5	0	0,8	21,8
<b>Ribeira Grande de Santiago</b>	55,8	7,8	13,2	3,3	19,9
<b>Cabo Verde (média)</b>	64	8	13	6	9

A Figura 21 ilustra graficamente a situação observada nos nove municípios de Santiago, evidenciando a dependência de fontes precárias de abastecimento nos municípios de S. Salvador do Mundo e S. Domingos.



**Figura 21** - Distribuição das principais fontes de abastecimento de água por município. O tamanho dos círculos representa a proporção da população atendida pela rede pública.

#### 4.4.3 - Qualidade de água - o caso de S. Domingos

A caracterização dos recursos hídricos na ilha de Santiago foi realizada por vários autores, principalmente focados na hidrogeologia e na bioquímica das águas subterrâneas. Por exemplo, Monteiro et al. (2006) apresentam resultados de pesquisas geofísicas (VLF) na região de Santa Cruz, revelando os padrões de contaminação de aquíferos por ação da água do mar. Na mesma linha, Carreira, et al. (2010 e 2019) combinaram métodos geoquímicos e isotópicos para estudar os aquíferos costeiros da ilha de Santiago. Da mesma forma, a salinidade aparece como uma questão relevante, principalmente para os sistemas de água subterrânea em zonas de vale agrícola. A sobre-exploração e a baixa precipitação são apontadas como as principais causas do alto teor de sal. De facto, Carreira *et al.* (2010) e identificam a contaminação antropogénica pela agricultura e a salinização como responsáveis pela degradação dos aquíferos. Gomes (2007) também estabeleceu

um modelo hidrogeológico da Ilha, correlacionando dados geológicos, hidrológicos e hidroquímicos dos recursos hídricos.

O trabalho termina com evidências de contaminação por salinização nos poços localizados em algumas formações de pillow-lavas, principalmente na região de S. Domingos. Nesta tese também se procede à análise da qualidade da água na Ilha. No entanto, este ponto do estudo foca-se no concelho de S. Domingos com base em dados do autor (Gonçalves *et al.* 2015).

S. Domingos está localizado na parte sudeste da ilha de Santiago. Estende-se da costa para o interior, ocupando uma área de 134,6 km<sup>2</sup>. Este município possui uma das menores taxas de cobertura da rede públicos de abastecimento tendo os habitantes, como consequência, que recorrer a outros meios de abastecimento, normalmente sem monitorização e controlo de qualidade (Tabela 6; Fig.21).

Gonçalves *et al.* (2015) caracterizam a qualidade da água, no município de S. Domingos, com base na amostragem de 22 pontos de água utilizados pela população.

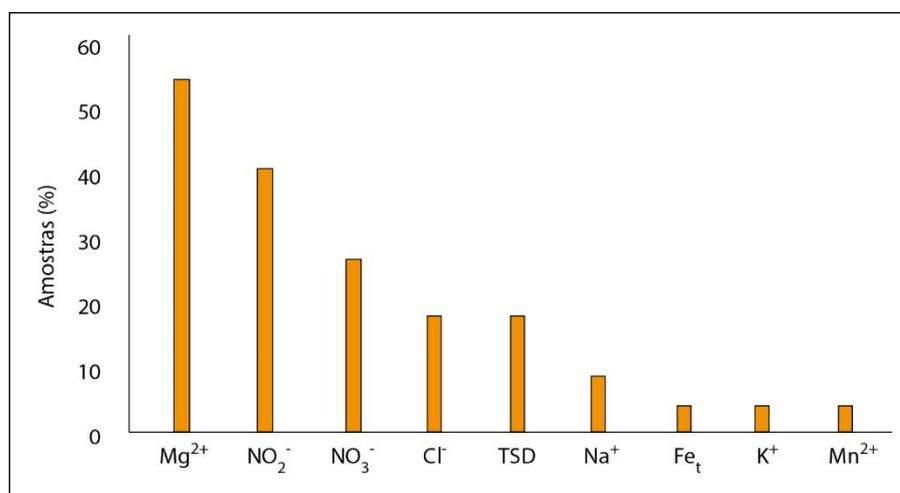
Este trabalho mostrara como a interação água-rocha explica o quimismo da água.

No entanto, a influência da agricultura e da poluição difusa por esgotos, também, controlam as propriedades hidroquímicas, especialmente no que diz respeito às potenciais contribuições do cloreto. Este estudo, realizado em 2014, mostrou uma variação considerável na condutividade elétrica (369 a 1361  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), refletindo a variação na salinidade. Segundo, por exemplo, Carreira *et al.* (2010) e OMS, (2011) nestes terrenos vulcânicos, a salinização dos aquíferos pode resultar dos processos de interação água-rocha e da evapo-concentração da deposição do aerossol marinho, típico de climas áridos.

A infiltração da água de irrigação pode ser mencionada como fonte de salinização, visto esta ser geralmente salina (Cruz-Fuente, 2008). As altas concentrações de cloreto obtidas (média de 181 mg/L, com máximo de 450 mg/L), também podem indicar contribuição fecal, devido às más condições de saneamento básico (Gonçalves *et al.* 2015). A região não possui tratamento de águas residuais e esgotos, os quais correm livremente para o solo e para as águas superficiais. Estes argumentos são reforçados pela obtenção de uma concentração muito alta de nitratos, atingindo um valor máximo de 214 mg/L, consideravelmente acima dos padrões de qualidade estabelecidos pela legislação de Cabo Verde e pela OMS (OMS, 2011).

A avaliação da conformidade dos 22 pontos de água em relação ao quadro jurídico de Cabo Verde é apresentada na Fig.22. Por exemplo, o magnésio excede a referência legal (50 mg/L) em cerca de 55% dos pontos analisados, enquanto o nitrito é responsável pela falta de qualidade em

cerca de 41% das amostras. Por outro lado, os resultados não mostraram contaminação de natureza metálica. Numa perspetiva geral, apenas 36% dos pontos de água analisados em São Domingos atendem aos padrões de qualidade.



**Figura 22** - Amostras que excedem os valores máximos admissíveis (Decreto-Lei n.º 8/2004, de 23 de fevereiro da República de Cabo Verde). Dados de Gonçalves et al. (2015). TSD - Sólidos totais dissolvidos; Fe - Ferro total.

#### 4.5 - Notas de síntese sobre o abastecimento de água

O abastecimento de água é um tópico crítico nos países em desenvolvimento, que deve ser gerido levando em consideração questões sociais, económicas e ambientais.

Em condições de escassez de água, é provável que os sistemas de abastecimento não atendam à crescente procura futura. O abastecimento limitado de água é em regra acompanhado por baixas condições de saneamento, com os esgotos escorrendo para o solo, águas superficiais e reservatórios de águas subterrâneas, o que vai aumentar o potencial de poluição e degradação de fontes de água doce.

A presente investigação abordou tópicos tais como a proporção da população com acesso à água potável, tipos de fontes de água e modelos de abastecimento, além de questões de qualidade numa das regiões (S. Domingos) com menor taxa de cobertura da rede pública. Ao analisar a situação global em Cabo Verde, verificou-se que esta varia fortemente a nível nacional e, ainda, entre os cenários urbano e rural. Apesar da evolução do serviço público nos últimos anos, a taxa de cobertura não cumpre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A revisão presente neste capítulo revelou alguns grupos problemáticos na Ilha de Santiago, que é a ilha mais populosa de Cabo Verde, que possui 24% da população sem abastecimento público. Especificamente, nos municípios de S. Domingos e S. Salvador do Mundo, uma parte significativa da população ainda depende de fontes precárias que nem sempre atendem aos padrões

legais de qualidade (poços e fontanários não controlados). Além disso, os habitantes precisam de se deslocar uma certa distância para obter água, que na maioria das vezes não é monitorizada, nem tratada.

As limitações do abastecimento público de água identificadas na ilha de Santiago podem ser extensivas a outros países em desenvolvimento de África.

O capital insuficiente para a construção de infraestruturas é um forte fator limitante para a expansão das taxas de cobertura de abastecimento de água e para garantir a monitorização e controle da qualidade da água. Além disso, a escassez de água é uma realidade inevitável em países áridos, o que tende a agravar-se com as alterações climáticas. Portanto, um sistema público de abastecimento de água eficaz e extensivo para grande parte da população é um dos principais desafios que os países em desenvolvimento estão atualmente a enfrentar.

***CAPÍTULO 5***

---

***PRINCIPAIS BACIAS HIDROGRÁFICAS NA ILHA DE SANTIAGO – REVISÃO SOBRE  
HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DA ÁGUA***

## **BACIAS HIDROGRÁFICAS DA ILHA DE SANTIAGO: CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA, HIDROQUÍMICA E QUALIDADE DA ÁGUA**

A qualidade da água é uma questão que suscita grande preocupação, especialmente em condições de escassez. Nos países em desenvolvimento, com climas áridos e semiáridos, avaliar a qualidade da água e proporcionar uma gestão adequada dos recursos hídricos torna este desafio ainda maior.

A bacia hidrográfica é normalmente considerada uma unidade fisiográfica conveniente para o planeamento dos recursos hídricos. Segundo vários autores, a bacia hidrográfica representa a unidade mais apropriada para o estudo qualitativo e quantitativo dos recursos hídricos, bem como dos fluxos de sedimentos, nutrientes e outros poluentes (Granell-Pérez, 2004; Vörösmarty et al., 2010; Tang & Lettenmaier, 2012).

Numa bacia hidrográfica, a água está frequentemente sujeita a pressões e alterações devidas a atividades antrópicas que podem degradar-se, limitando as potenciais utilizações da água e afetando a saúde pública. Assim, uma abordagem baseada na bacia hidrográfica poderá ser um fator-chave para uma utilização sustentável da água (H.Zheng *et al.* 2013).

A Ilha de Santiago apresenta um défice hídrico permanente e problemas de erosão, devido ao seu clima e geomorfologia, a que se junta a ação antrópica (por exemplo, a perda de vegetação devido ao sobre pastoreio) que dificulta, a já de si limitada, utilização da água e do solo. Gonçalves *et al.* (2019) analisa as dificuldades de gestão dos recursos hídricos em climas áridos, agravadas pelas pressões relacionadas com o crescimento demográfico e as atividades antrópicas descontroladas.

As águas superficiais são sazonais ou inexistentes e as águas subterrâneas tornam-se a fonte recorrente de abastecimento de água. Devido à escassa precipitação, a gestão da água doce encontra-se num equilíbrio frágil, especialmente com a água do mar nas zonas costeiras. Sendo uma ilha a sobre-exploração dos aquíferos costeiros e a poluição estão entre os principais problemas relacionados com a avaliação e gestão dos recursos de águas subterrâneas na Ilha de Santiago. Vários autores (Christofoletti, 1980; Pina *et al.* 2006; Mota Gomes, 2007) referem que a sobre-exploração das águas subterrâneas nos vales próximos da costa pode aumentar o risco de salinização. Este problema tem vindo a agravar-se com a crescente falta de chuva ao longo dos últimos anos.

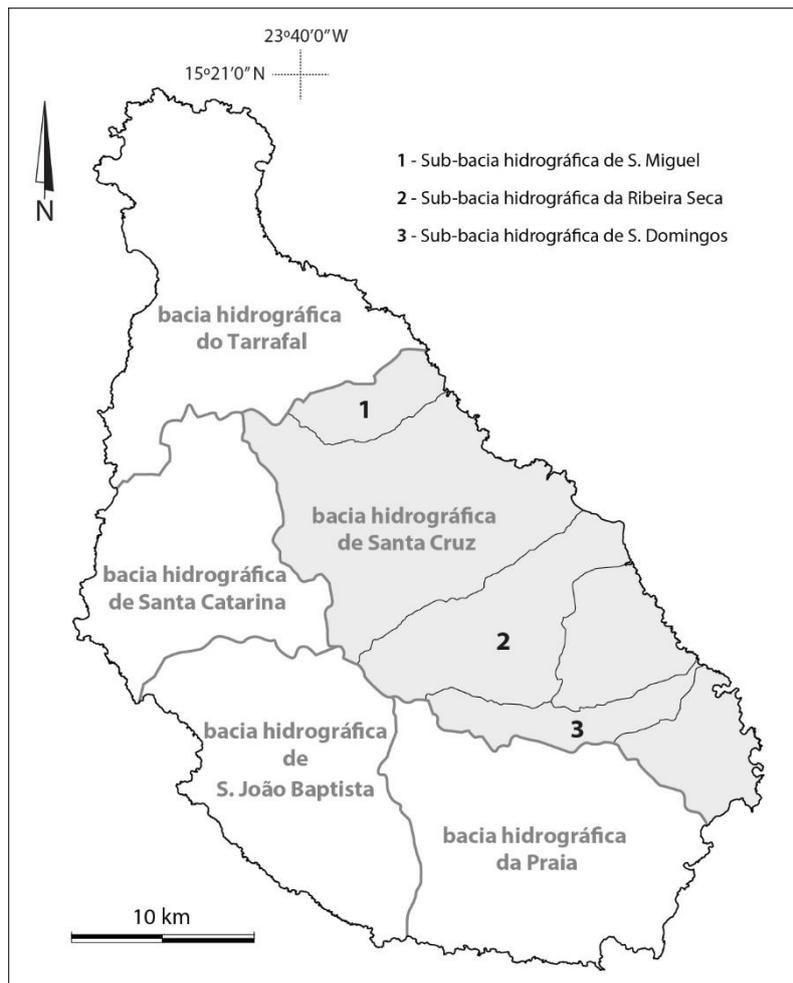
A preocupação com a degradação da qualidade da água é grande, uma vez que a maioria da população da Ilha de Santiago vive perto da costa e tem a agricultura como atividade principal. A construção de barragens tem servido para reforçar o abastecimento de água à agricultura, tentando assim atenuar a sobre-exploração de poços e furos.

Os trabalhos de investigação anteriores tratam a ilha como um todo e a revisão da literatura sugere a necessidade de compreender possíveis diferenças ao longo do território, condicionadas pela variação dos fatores climáticos, geológicos e de ordenamento do território, que se podem manifestar em termos de hidroquímica.

Como resultado da sua geomorfologia, a ilha possui numerosas bacias hidrográficas que suportam a maior parte das fontes de água. Assim, considerou-se que uma abordagem a nível da bacia poderia ser um nível de organização adequado para contribuir para o conhecimento do território.

A Ilha de Santiago possui cinco bacias hidrográficas (Fig.23) e numerosos cursos de água sazonais dependentes da estação das chuvas. Perto do oceano, os vales estão cheios de sedimentos aluvionares do Quaternário, sendo estes os considerados melhores para a agricultura. Os vales selecionados são intensamente cultivados ao longo do ano, uma vez que a água de irrigação é maioritariamente proveniente de poços locais e da extração de águas subterrâneas. Existem várias atividades que podem degradar a qualidade da água nestas bacias, sendo um exemplo, a exploração descontrolada de recursos naturais limitados (por exemplo, areia, gravilha e piroclastos). No entanto, a agricultura, sendo a atividade económica mais importante da ilha, é potencialmente responsável pelo impacto ambiental mais relevante nalgumas das bacias hidrográficas, contrariando o princípio de que a agricultura deve promover a utilização sustentável dos recursos hídricos e a aplicação de estratégias de conservação do solo. A importância desta atividade económica justificou a abordagem de se centrar este estudo nas sub-bacias hidrográficas, localizadas no lado Este da Ilha de Santiago, com utilização agrícola de alta intensidade: S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos.

Este capítulo tem os seguintes objetivos principais: (i) caracterização geral das bacias hidrográficas considerando o estado da arte; (ii) análise da hidroquímica na bacia e nas sub-bacias mais agrícolas; (iii) avaliação da influência da agricultura e de outros fatores de controlo na qualidade da água.



**Figura 23** - Bacias hidrográficas e sub-bacias mais importantes (principais vales agrícolas) da Ilha de Santiago. Adaptado de Heitor e Pina (2003) e Lobo de Pina (2009).

### 5.1. Bacias e sub-bacias hidrográficas: caracterização e descrição geral

Para Christofolletti, (1988), a bacia hidrográfica pode ser definida como "a área drenada por um sistema fluvial, funcionando como um sistema aberto", onde cada um dos elementos, materiais e energias presentes no sistema tem a sua própria função, estando estruturados e intrinsecamente relacionados entre si.

A rede hidrográfica, responsável pela drenagem de uma bacia, tem configurações ou arranjos espaciais que refletem a estrutura geológica e a composição morfogenética da área da bacia.

No que respeita à conservação dos recursos naturais, o conceito foi alargado, num âmbito que ultrapassa os aspetos hidrológicos e hidrogeológicos, envolvendo a estrutura biofísica da bacia hidrográfica, bem como os padrões de utilização da água e do solo e respetivas implicações ambientais. Neste sentido, salienta-se a importância de utilizar, relativamente à bacia hidrográfica, o

conceito de unidade espacial de gestão, tal como para os ecossistemas, tanto para investigação, como para a gestão ambiental (Bormann *et al.* 1967).

A ocupação desordenada do território contíguo às bacias hidrográficas, com as rápidas alterações resultantes das atividades humanas, acelera os desequilíbrios nos solos, nos taludes e declives, nos vales fluviais e em toda a drenagem numa bacia. Cunha *et al.* (1996) sublinham que entre as principais atividades que causam a degradação das bacias hidrográficas se encontram a desflorestação, as práticas agrícolas, a atividade extrativa e a urbanização.

As bacias hidrográficas, devido às condições orográficas da Ilha de Santiago e à baixa pluviosidade, desempenham um papel central no abastecimento de água e no desenvolvimento das práticas agrícolas. A população da ilha é fortemente dependente da agricultura para se autossustentar, pelo que este setor desempenha um papel basilar no desenvolvimento económico.

A topografia da Ilha Santiago é caracterizada pela grande densidade de vales profundos (ver Capítulo 2, secção 2.3), que partindo das zonas mais altas em direção ao oceano, facilitam o transporte de materiais detriticos e a perda de solo por erosão, o que conseqüentemente causa dificuldades no desenvolvimento da cobertura vegetal. Estes vales são alimentados pelo maciço do Pico da Antónia, que é a zona de drenagem mais importante, com uma densa rede de vales situada a Este. Do mesmo modo, a Serra da Malagueta é cortada por numerosos vales profundos que correm de acordo com a inclinação estrutural; na sua evolução, algumas das cabeceiras da rede de drenagem aproximam-se da morfologia de escarpa (Capítulo 2, Fig. 6). As cabeceiras das bacias contíguas à Serra da Malagueta são sectores de grande pluviosidade, pelo que são frequentes as cheias durante a época das chuvas, visto leitos destas bacias serem relativamente planos, aumentando a sua altitude muito suavemente para montante.

Como já previamente referido, a Ilha de Santiago possui cinco bacias hidrográficas principais (Fig. 23) com superfícies e volumes totais de precipitação distintos (Tabela 7).

**Tabela 7**– Superfície e volumes totais de precipitação das principais bacias hidrográficas da Ilha de Santiago (adaptado de Lobo de Pina, 2009).

Bacia hidrográfica	Área da bacia (km <sup>2</sup> )	Volume total de precipitação (hm <sup>3</sup> )
Tarrafal	188	45
Santa Cruz	355	121
Santa Catarina	128	62
S. João Batista	155	47
Praia	179	33

Entre estas bacias hidrográficas, a de Santa Cruz sendo a de maior área (355 km<sup>2</sup>) e de maior volume total de precipitação (121 hm<sup>3</sup>) é conhecida pela sua importância agrícola (Pina, 2006; Ventura, 2009). Dentro desta bacia, devido ao seu maior potencial agrícola, foram selecionadas, para uma análise mais detalhada, as sub-bacias de S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos (Fig. 23; sub-bacias **1**, **2** e **3**).

A sub-bacia hidrográfica de S. Miguel (14,4 km<sup>2</sup>), próxima da linha de costa, é limitada, tanto a Norte como a Sul, por encostas com declives na ordem dos 20°. No interior, a largura do vale varia entre 500 m e 1,5 km, estreitando-se junto ao mar (Gonçalves, 2012).

Nesta sub-bacia as aluviões do Quaternário são muito pouco profundas e de granulometria fina, exceto para os locais a jusante, ou seja, próximos da linha de costa. Juntamente com as estruturas características do basalto (mais ou menos fraturadas) existem, também, as pillow-lavas e os leitos esverdeados de tufo. O furo mais profundo vai até 35 m abaixo do nível médio do mar, não existindo conhecimento geológico direto para além desta profundidade (Jica, 2010).

No que se refere às atividades agrícolas, estas estão limitadas às zonas próximas da linha costeira. É uma agricultura de “alto nível de intuição e pouco aparato técnico” (Menegatto, 2014). As principais culturas praticadas são o de banana, cana de açúcar, batata, milho, feijão e algumas árvores frutíferas.

A sub-bacia hidrográfica da Ribeira Seca – localizada no lado Este-central da Ilha de Santiago (Fig. 23, **2**), 10 km a Norte do vale de S. Domingos, perto da aldeia de Santa Cruz – é a maior sub-bacia da ilha sendo a de maior extensão agrícola.

Segundo Diniz *et al.* (1986), com uma área de drenagem de cerca de 72 km<sup>2</sup>, a sub-bacia hidrográfica da Ribeira Seca representa quatro zonas agroclimáticas: semiárida (49%), árida (20%), sub-húmida (20%) e húmida (11%).

Além de ser a maior sub-bacia hidrográfica da ilha, possui também a maior taxa de ocupação do solo e, conseqüentemente, necessita de mais água para irrigação.

A utilização dominante das terras é na agricultura de sequeiro, nomeadamente para as culturas de base (milho e feijão) e de amendoim (83%). A restante superfície agrícola é utilizada em culturas de regadio (banana, cana-de-açúcar, frutas, produtos hortícolas, mandioca e batata doce) – 5% – e floresta (4%). A restante área da sub-bacia é constituída por afloramentos rochosos (1%) e construções (7%). A pecuária é uma atividade importante na bacia hidrográfica, uma vez que a maioria dos agricultores familiares possui animais que frequentemente se alimentam em liberdade (Baptista, 2016).

Os solos, desenvolvidos em substrato basáltico, são principalmente superficiais e pobres em matéria orgânica (MO), geralmente de baixa a média fertilidade (INIDA, 1997) e de textura média a grosseira, apresentando sintomas acentuados de erosão. Os solos mais profundos com maior teor de MO podem ser encontrados nos planaltos de encostas menos íngremes (“Achadas”). Nos fundos dos vales ou ribeiras, os solos aluviais são predominantes e utilizados para a agricultura de regadio.

Das três sub-bacias em estudo a de S. Domingos é a mais meridional. Ocupa uma área de 44,3 km<sup>2</sup>, incluindo parte do planalto das “Achadas” do Sul e tem uma extensão de 16 km. Nesta sub-bacia, a precipitação tem um valor próximo da média anual da Ilha de Santiago, cerca de 360 mm. É uma região que depende muito das práticas agrícolas, apesar da produção de legumes verdes estar em declínio, especialmente no sector mais próxima da linha de costa. Jica (2010), indicava uma área cultivada de 694 ha (sequeiro: 594 ha; regadio: 100 ha), no entanto, de acordo com os dados apresentados pelo INE, (2018) apontam para valores superiores, 1930.1 ha (sequeiro: 1751.1 ha; regadio 179 ha).

## **5.2. Hidrogeoquímica e qualidade da água nas sub-bacias de S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos**

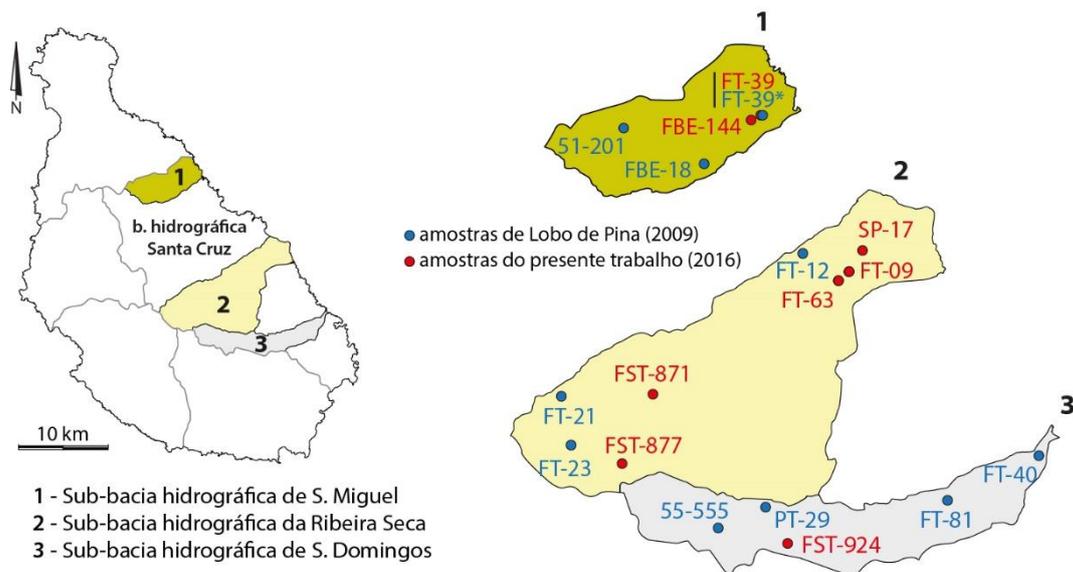
Lobo de Pina, (2009) aponta a dependência da variabilidade composicional das águas subterrâneas na Ilha de Santiago face às características geológicas e ao tempo de residência.

Para além do controlo geológico, é de salientar que outros fatores poderão influenciar o quimismo da água, nomeadamente atividade antrópica que se manifesta por exemplo na sobre-exploração dos recursos.

A escassez e a falta de abastecimento público controlado obrigam as populações a usar água proveniente de furos e poços sem monitorização. Frequentemente os pontos de água conhecidos pela sua falta de qualidade (elevada condutividade) são usados para irrigação. Estes aspetos justificam a abordagem que se apresenta nesta secção dedicada às características hidroquímicas de furos localizados nas três sub-bacias hidrográficas sujeitas a maior pressão antrópica. De modo a avaliar padrões de evolução hidroquímica e eventuais alterações de qualidade da água ao longo do tempo esta

secção apresenta e discute resultados de uma campanha efetuada no âmbito desta tese (junho de 2016) comparando-os com dados obtidos na bibliografia (especificamente de Pina, 2009; Carreira *et al.* 2010).

Na Figura 24 apresenta-se a distribuição dos pontos de água analisados nas três sub-bacias avaliadas na bacia hidrográfica de Santa Cruz. As referências indicadas nesta figura remetem para o trabalho de Lobo de Pina (2009), representadas por círculos azuis. Do inventário de pontos de água estudados nesta tese em toda a ilha, selecionaram-se para este capítulo os correspondentes às três sub-bacias em análise (círculos vermelhos).



**Figura 24** - Distribuição da amostragem para classificação hidrogeoquímica das sub-bacias de S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos. \* - O furo FT-39 é coincidente em ambos os trabalhos.

### 5.2.1. Quimismo e classificações hidroquímicas

Na Tabela 8 apresentam-se as propriedades gerais da água nas sub-bacias obtidas em campanhas realizadas no verão de 2003 (Lobo de Pina, 2009) e neste trabalho (verão de 2016).

**Tabela 8** – Hidroquímica nas sub-bacias hidrográficas mais agricultadas (T em °C; CE em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; iões em mg/L; ld – limite de deteção do método). Campanhas do verão de 2003 (Lobo de Pina, 2009) e do verão de 2016 (presente trabalho).

S. Miguel													
Amostras	T	pH	CE	Na	K	Ca	Mg	Si	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>
51-201	24,2	7,2	527	77,9	8,9	27,2	23,3	16,9	56,7	220,0	9,1	4,9	< ld
FBE-18	27,5	7,1	525	68,1	9,9	27,2	22,0	17,3	70,9	188,0	4,6	4,9	< ld
FBE-144	27,8	7,4	1289	78,8	8,8	77,1	60,3	23,1	218,8	285,8	35,7	23,6	< ld
FT-39	27,0	7,8	1711	130,0	12,7	79,5	82,3	24,7	315,1	327,5	82,8	13,6	< ld
FT-39*	26,0	6,9	1439	113,0	9,9	57,0	70,7	30,0	248,7	276,0	50,3	3,38	< ld
Ribeira Seca													
FT-21	26,7	7,1	1351	243,0	6,4	24,8	53,5	16,9	85,1	556,0	81,9	< ld	< ld
FT-23	26,7	7,2	1041	166,0	17,9	40,0	31,3	16,7	106,4	312,0	63,7	12,1	< ld
FST-877	27,9	7,8	1467	230,0	8,4	54,7	19,7	11,8	168,1	321,5	230,9	14,8	6,17
FST-871	32,0	7,3	1311	232,0	4,8	34,1	5,7	12,3	144,5	286,1	218,2	8,73	4,16
FT-12	25,2	7,1	1311	66,4	5,9	82,8	64,7	23,3	229,3	176,0	23,1	5,89	< ld
FT-63	28,6	7,9	1213	67,0	7,3	95,5	49,9	20,1	185,9	320,9	57,5	45,5	5,6

FT-09	27,9	7,9	975	54,7	5,7	82,0	42,0	19,5	134,0	286,2	44,4	46,9	3,9
SP-17	28,2	8,0	1370	67,2	7,4	111,0	56,2	19,0	232,7	320,9	63,7	41,5	5,8
<b>S. Domingos</b>													
FST-924	30,7	7,1	1927	281,0	8,7	61,5	69,2	17,6	26,3	546,1	172,9	317,0	9,8
55-555	22,8	8,0	433	34,2	6,6	19,3	21,0	20,8	41,2	176,0	7,2	1,7	< ld
PT-29	24,6	7,0	2110	438,0	9,9	8,0	43,7	21,7	127,6	661,0	227,6	4,9	< ld
FT-81	25,5	6,9	1282	84,5	7,5	85,7	50,9	24,4	198,0	288,0	38,4	11,8	< ld
FT-40	27,7	7,2	1394	93,0	5,7	82,2	63,3	22,6	259,3	193,0	36,8	3,6	< ld

De uma maneira geral, a mineralização é menor nas amostras da sub-bacia hidrográfica de S. Miguel, que apresentam condutividades elétricas entre 525 e 1711  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Observa-se uma tendência para aumentar na Ribeira Seca (com valores superiores a 975  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e S. Domingos, onde se registam os dois valores mais elevados (1927 e 2110  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respetivamente nas amostras FST-924 e PT-29). Este comportamento acompanha a tendência geral dos parâmetros Ca e Na. O mesmo se passa com o sulfato, com valores genericamente mais baixos em S. Miguel (4.6-82.8 mg/L), e mais elevados na Ribeira Seca (23.1-231 mg/L).

Os nitratos e nitritos, tipicamente associados a fenómenos de poluição difusa (orgânica) estão presentes em todas as bacias, mas com padrões variáveis. Na sub-bacia de S. Domingos destaca-se a amostra FST-924, com concentrações muito elevadas de nitrato e nitrito. De notar que os valores estabelecidos na legislação Cabo-verdiana são de 50 mg/L e 0.1 mg/L, respetivamente para o nitrato e nitrito. Portanto, este furo revela a existência de um fenómeno de contaminação orgânica. Esta pode ter origem fecal, agrícola e mesmo industrial, dada a sua localização numa zona fortemente agricultada (banana, cana de açúcar) e nas imediações de uma destilaria de aguardente de cana. Esta atividade pode também estar a controlar o quimismo na Ribeira Seca (a sub-bacia mais agricultada), como sugere a ocorrência sistemática de nitrato e nitrito.

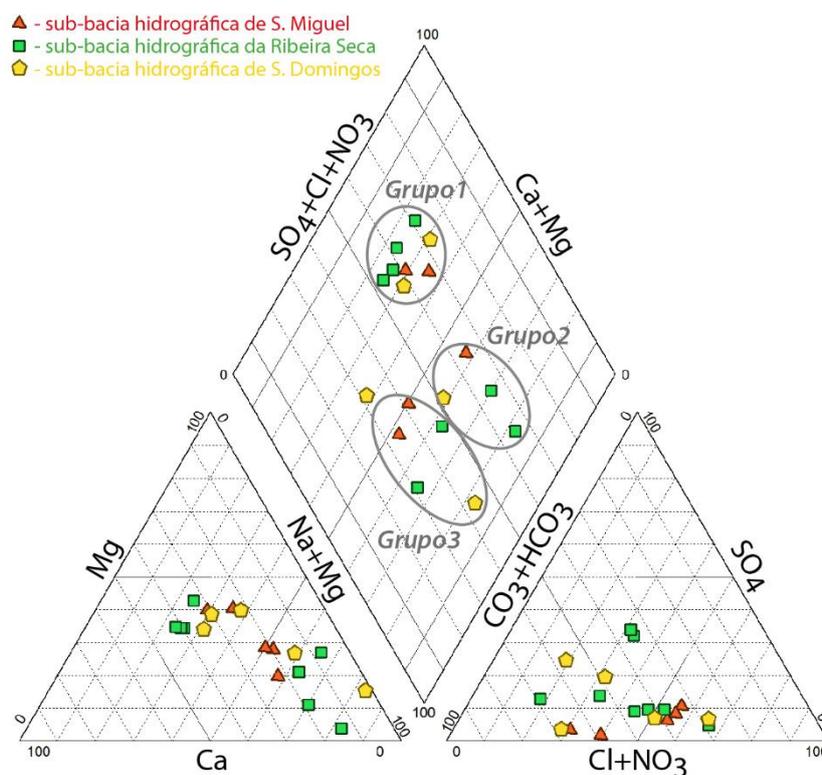
Em termos de classificação hidroquímica, trabalhos anteriores, como o de Lobo de Pina (2009) indicam que nas zonas mais altas da ilha, onde aparecem as formações do Aquífero Intermédio (capítulo 2, Fig. 8), as águas são bicarbonatadas sódicas ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ) e as das zonas mais próximas da costa apresentam fácies cloretada magnesiana ( $\text{Cl-Mg}$ ) ou cloretada sódica ( $\text{Cl-Na}$ ).

Os resultados obtidos no presente trabalho com os dados mais recentes (campanha de 2016) nestas três sub-bacias indicam uma tendência geral que se aproxima da detetada noutros trabalhos, nomeadamente Lobo de Pina (2009) e Carreira et al. (2010) para a totalidade da Ilha, Pina (2011) com dados da bacia de Santa Cruz e Gonçalves (2015) em S. Domingos.

Assim, o diagrama de Piper (Fig. 25) sugere que predominam águas de natureza mista (Grupo 1 -  $\text{Ca+Na+HCO}_3\text{+Cl}$ ;  $\text{Ca+Na+HCO}_3\text{+Cl}$  e Grupo 3 -  $\text{Ca+HCO}_3\text{+Cl}$ ;  $\text{Na+HCO}_3\text{+Cl}$ ;  $\text{Na+HCO}_3$ ) e um grupo de águas cloretadas-sódicas (Grupo 2) e ainda uma amostra de fácies  $\text{Mg-HCO}_3$ .

Pina (2011) também mostra esta dispersão de fácies nos vales de S. Domingos, Ribeira Seca e S. Miguel, com predomínio de classificações mistas. De acordo com este autor, em S. Miguel as águas são bicarbonatadas sódicas ou sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas. À semelhança, em S. Domingos o mesmo autor indica águas bicarbonatadas sódicas ou sulfatadas ou cloretadas sódicas. Já no caso da Ribeira Seca, as fácies identificadas são sulfatadas ou cloretadas sódicas ou sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas.

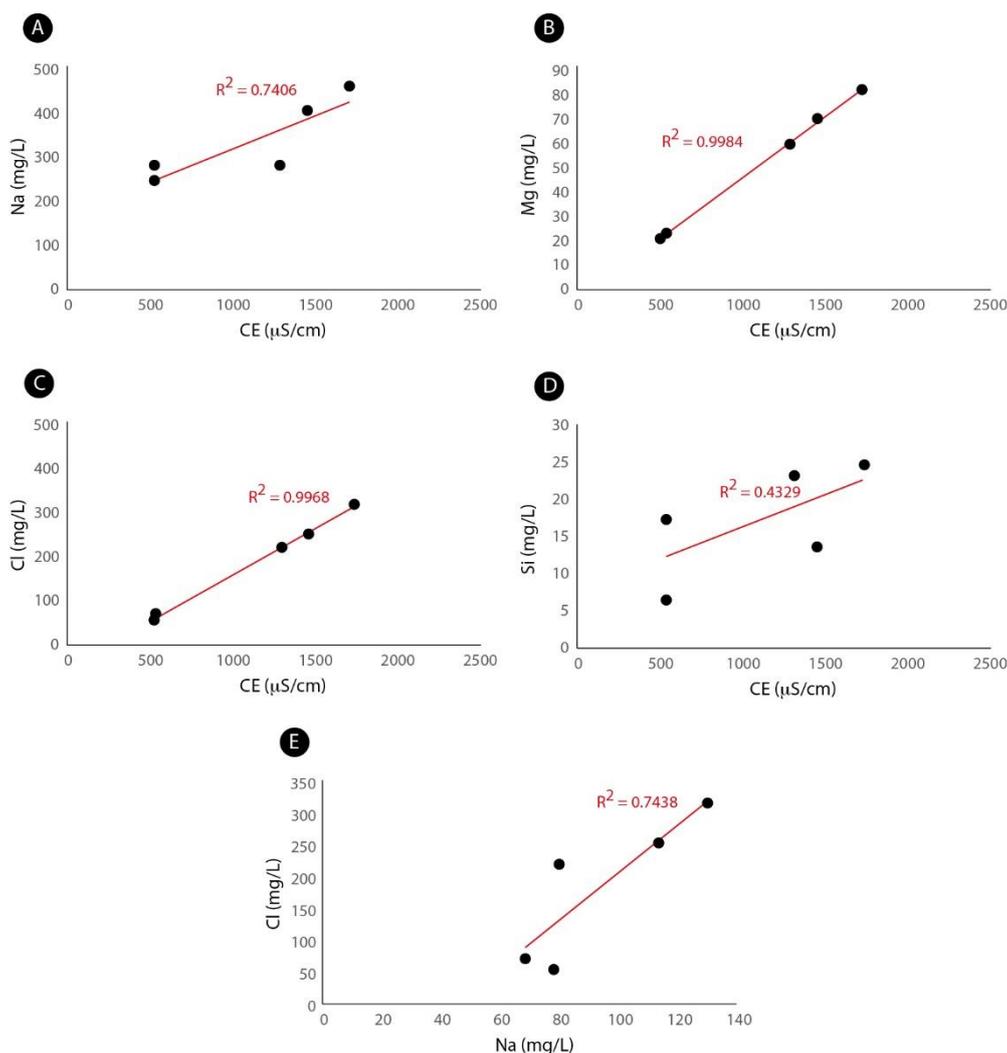
No presente estudo, o diagrama de Piper (Fig. 25) mostra esta dispersão de classificações, não indicando uma tendência clara de diferenciação entre as três sub-bacias. Águas cloretadas sódicas ocorrem nos três casos, correspondendo aos pontos de água mais próximos da costa. Por sua vez, a amostra bicarbonatada magnesiana foi identificada na sub-bacia de S. Domingos, no ponto mais afastado da costa (55-555, Fig. 24), indiciando um controle geológico em detrimento do marinho.



**Figura 25** – Classificação hidrogeoquímica (Diagrama de Piper) – sub-bacias hidrográficas de S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos.

Os processos hidrogeoquímicos que controlam o quimismo nestas sub-bacias podem inferir-se com base nas relações representadas nas figuras 26, 27, e 28. Estas relações sugerem a contribuição dos iões maiores para a mineralização (expressa através da CE). Para esta representação selecionaram-se os iões Na, Mg, Si, Cl, HCO<sub>3</sub> e SO<sub>4</sub>, de modo a avaliar o tipo de assinatura: predominantemente marinha, geológica (interação água-rocha) ou antrópica.

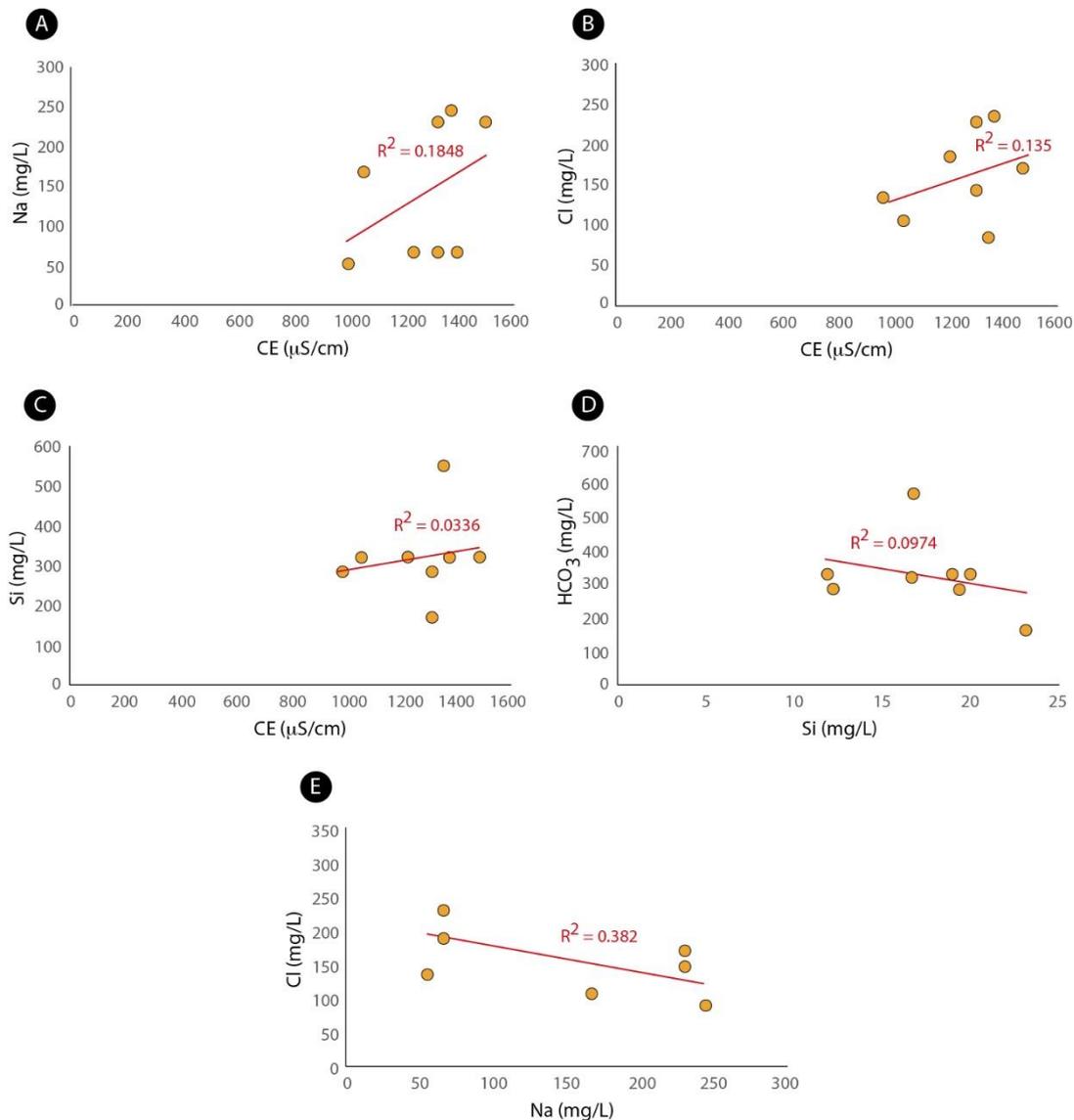
Na sub-bacia de S. Miguel (Fig. 26) observam-se correlações elevadas entre a CE e Na ( $R^2 = 0.7406$ ), CE e Mg ( $R^2 = 0.9984$ ) e CE e Cl ( $R^2 = 0.9968$ ). Por sua vez, a correlação CE e Si é mais baixa ( $R^2 = 0.4329$ ). Este padrão de comportamento sugere uma contribuição maioritária de origem marinha, ora associada a fenómenos de intrusão salina, ora à deposição e lixiviação de aerossóis. Tal assinatura comprova-se também pela elevada correlação, Na e Cl ( $R^2 = 0.7438$ ). Tendências semelhantes foram observadas por Carreira et al. (2010) para amostras dos principais vales da Ilha de Santiago e, também, por Cruz e Andrade (2017), num estudo efetuado em ilhas do Arquipélago dos Açores.



**Figura 26** – Relações entre a condutividade elétrica e iões maiores na sub-bacia hidrográfica de S. Miguel. A. CE-Na; B. CE-Mg; C. CE-Cl; D. CE-Si; E. Na-Cl

Na sub-bacia hidrográfica da Ribeira Seca (Fig. 27) as correlações não põem em evidência mecanismos específicos de controlo da hidroquímica. No entanto, a relação entre Na-Cl ( $R^2 = 0.382$ ) – Figura 27E, parece indicar alguma contribuição marinha, embora, apesar de baixa, destaca-se das demais. As baixas correlações entre CE-Si e Si-HCO<sub>3</sub>, respetivamente,  $R^2 = 0.0336$  e  $R^2 = 0.0974$  (Fig.

27C, D), poder-se-ão dever a uma eventual reduzida influência da interação água-rocha. É de registar que a CE aqui medida é mais elevada do que nas outras duas sub-bacias. Também a intensa atividade agrícola praticada em toda a extensão desta bacia contribuirá para o seu quimismo, sendo mais um aspeto que determina a inexistência de um fator único de controlo que pudesse ser evidenciado pelas correlações.



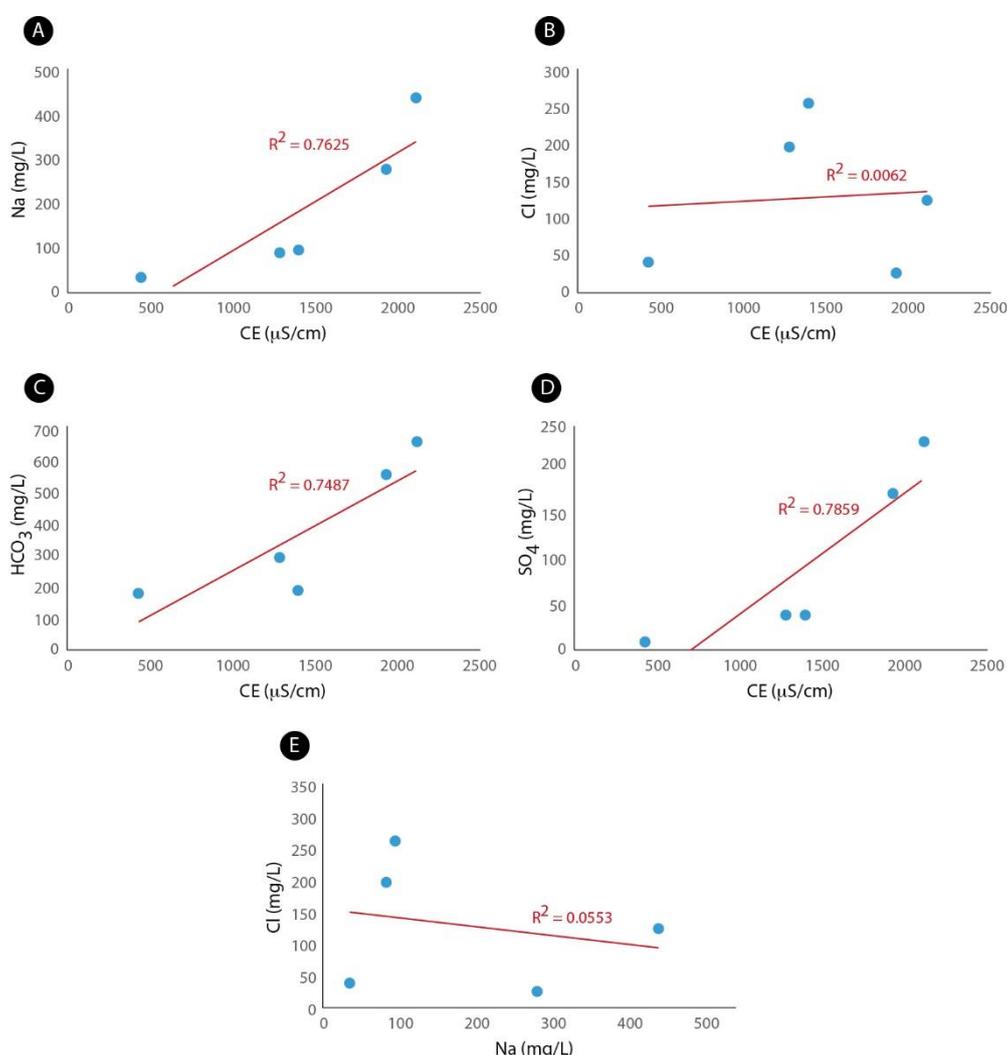
**Figura 27** – Relações entre a condutividade elétrica e iões maiores na sub-bacia hidrográfica da Ribeira Seca.

A. CE-Na; B. CE-Cl; C. CE-Si; D. Si-HCO<sub>3</sub>; E. Na-Cl

Na sub-bacia de S. Domingos a contribuição marinha não é evidente, embora se registre uma boa correlação CE-Na ( $R^2 = 0.7625$ ). A ausência de correlações CE-Cl e Na-Cl parece corroborar uma assinatura de caráter geológica e/ou antrópica. Por sua vez, o ião bicarbonato aparece aqui com correlação elevada (CE-HCO<sub>3</sub> de  $R^2 = 0.7487$ ), sugerindo a influência de fenómenos de interação água-rocha associados à meteorização das rochas vulcânicas silicatadas, com libertação de metais alcalinos

e alcalino terrosos e produção de alcalinidade. Tal como referem, Custodio e Llamas (1983) e Cruz e Andrade (2017), a relação Mg/Ca pode também ajudar a esclarecer esta predominância de um controlo geológico em detrimento da influência marinha. Com efeito, nesta sub-bacia a relação varia entre 5 e 0,8, encontrando-se os valores mais baixo próximo da costa (FT-81 e FT-40, Fig. 28). Os autores citados indicam que relações Mg/Ca superiores a 1, em contexto de rochas vulcânicas, estão em concordância com contribuições da rocha-mãe.

A correlação mais elevada observa-se entre a CE-SO<sub>4</sub> (R<sup>2</sup> = 0.7859). Assim, para além do controle geológico, as concentrações elevadas de sulfato e nitrato podem indicar a contribuição de poluição associada à atividade agrícola e industrial, aliás, em concordância com a localização referida atrás.

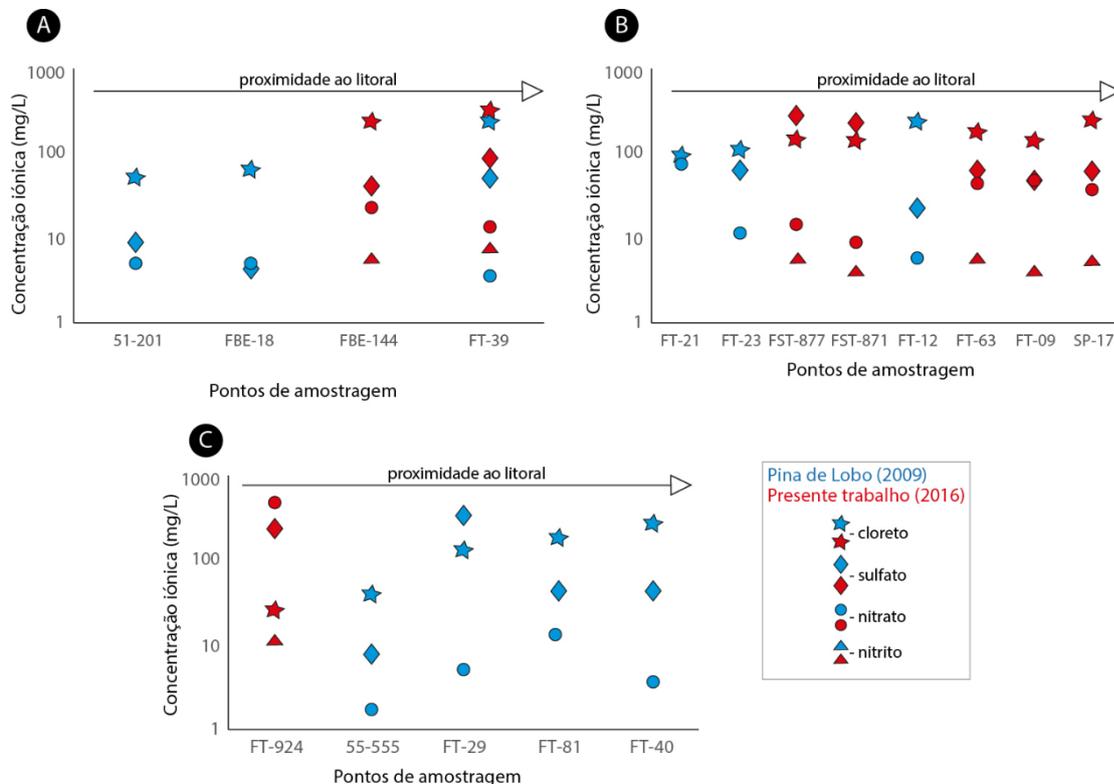


**Figura 28** – Relações entre a condutividade elétrica e iões maiores na sub-bacia hidrográfica de S. Domingos. A. CE-Na; B. CE-Cl; C. CE-HCO<sub>3</sub>; D. CE-SO<sub>4</sub>; E. Na-Cl

### 5.2.2. Qualidade da água e risco de salinização do solo

Os dados apresentados na tabela 8 podem servir, de forma expedita, para avaliar uma eventual evolução da qualidade da água entre os verões de 2003 e 2016. Esta avaliação deve ser analisada

com cuidado, atendendo ao pequeno número de amostras e ao facto de, embora próximos, não serem pontos de água coincidentes (exceto FT-39, na bacia de S. Miguel). A Figura 29 mostra um conjunto de parâmetros de qualidade, que pretendem mostrar a evolução temporal e de montante para jusante, ou seja, com objetivo de detetar diferenças com a proximidade à costa.



**Figura 29** – Padrão de evolução temporal e espacial de aniões indicadores da qualidade da água – sub-bacias hidrográficas de: A- S. Miguel; B- Ribeira Seca; C- S. Domingos

Os nitritos e os nitratos são aqui analisados como potenciais indicadores de contaminação agrícola e fecal. Todas amostras analisadas em 2003 apresentam valores de nitrito abaixo de limite de deteção do método (pelo que não têm representação nos gráficos da Fig. 29). Pelo contrário, as analisadas em 2016 têm concentrações acima do limite legal (0.3 mg/L). Situação idêntica verifica-se para o nitrato, sulfato e cloreto, que genericamente ocorre com concentrações mais elevadas nas amostras de 2016. Este comportamento constata-se para todos os parâmetros no ponto FT-39, que é o único coincidente nas duas campanhas. De uma maneira geral, este padrão, visível nas três sub-bacias, indicia uma diminuição da qualidade da água entre os dois períodos em apreço.

A Figura 29 mostra uma distribuição dos pontos de montante para jusante, ou seja, das cotas mais elevadas até às secções de cotas mais baixas e largas dos vales, que terminam na linha de costa oriental.

A sub-bacia de S. Miguel revela alguma oscilação na evolução espacial dos indicadores antrópicos, especificamente o no nitrato e sulfato (Fig. 29A). No entanto, o cloreto revela uma tendência crescente ao longo do vale, de montante para jusante. Este padrão confirma a influência marinha.

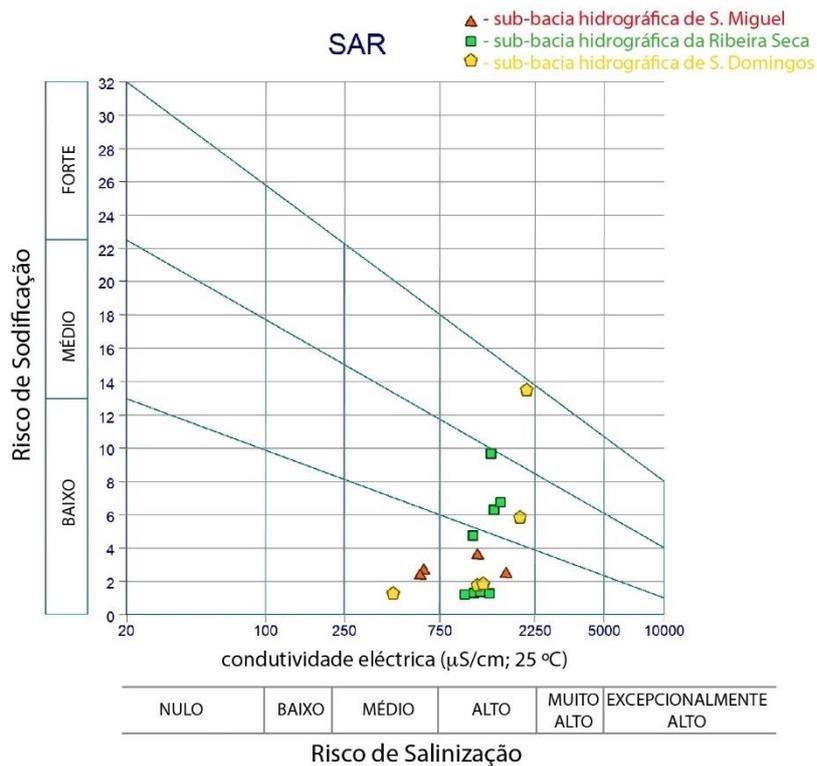
A sub-bacia da Ribeira Seca (Fig. 29B) é intensamente agricultada em toda a sua extensão, embora com grande variação na intensidade e no tipo mais ou menos rudimentar das práticas. Este aspeto pode explicar a irregularidade detetada nos indicadores usados, nomeadamente no nitrito e sulfato, impedindo a observação de um padrão claro de variação espacial.

Na sub-bacia de S. Domingos (Fig. 29C) o comportamento espacial é controlado pela localização da amostra FST-924, que como já se referiu atrás se situa nas imediações de uma instalação industrial e numa zona fortemente agricultada. Assim, os indicadores nitrito, nitrato e sulfato têm as concentrações mais elevadas a montante. Pelo contrário, o cloreto aumenta de forma regular com a proximidade à linha de costa, revelando a influência marinha, ora associada à intrusão ora à deposição de aerossóis.

De acordo com Qadir *et al.* (2004), a salinização pode não influenciar significativamente a textura do solo. No entanto, a ocorrência de processos de crustificação salina superficial afeta a circulação de água e ar, com consequências na produtividade, uma vez que criam condições desfavoráveis à penetração das raízes e à capacidade de retenção de água. Qadir e Schubert (2002) referem ainda que solos salinizados apresentam desequilíbrios na disponibilidade de nutrientes, interferindo assim também com a fertilidade.

O diagrama SAR (Fig. 30) sugere problemas de qualidade da água, neste caso associados ao risco de salinização e sodificação provocada pelo uso desta água para fins de irrigação. A projeção neste diagrama coloca todas as amostras em situação de risco alto de salinização, ainda que baixo a médio de risco de absorção de sódio, à exceção de uma das amostras da sub-bacia de S. Domingos (PT-29), em concordância com a elevada concentração de sódio obtida nesta amostra (Tabela 8). As amostras com menor risco de sodificação situam-se na sub-bacia de S. Miguel, em concordância com o já descrito em termos de quimismo.

Na Figura 31 ilustra-se a deposição salina (eflorescências brancas de cloreto de sódio) e fendas de retração (solo com teor de argila alto), aliás um fenómeno que é recorrente na altura de escassez de água, num campo agrícola da sub-bacia da Ribeira Seca.



**Figura 30** – Risco de salinização (diagrama SAR) – sub-bacias hidrográficas de S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos

Tratando-se de sub-bacias em que se assiste a um aumento da agricultura de irrigação, este fenómeno tende a manter-se e mesmo a intensificar-se, especialmente com a persistência de condições de seca. Portanto, a monitorização da água nestas três sub-bacias é um aspeto essencial no sentido de contrariar a potencial degradação ambiental, com risco de perda de fertilidade e produtividade do solo.



**Figura 31** – Deposição de sais e fendas de retração num solo (sub-bacia de Ribeira Seca)

***CAPÍTULO 6***

---

***ESTUDO DE VARIAÇÕES REGIONAIS – HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DA  
ÁGUA***

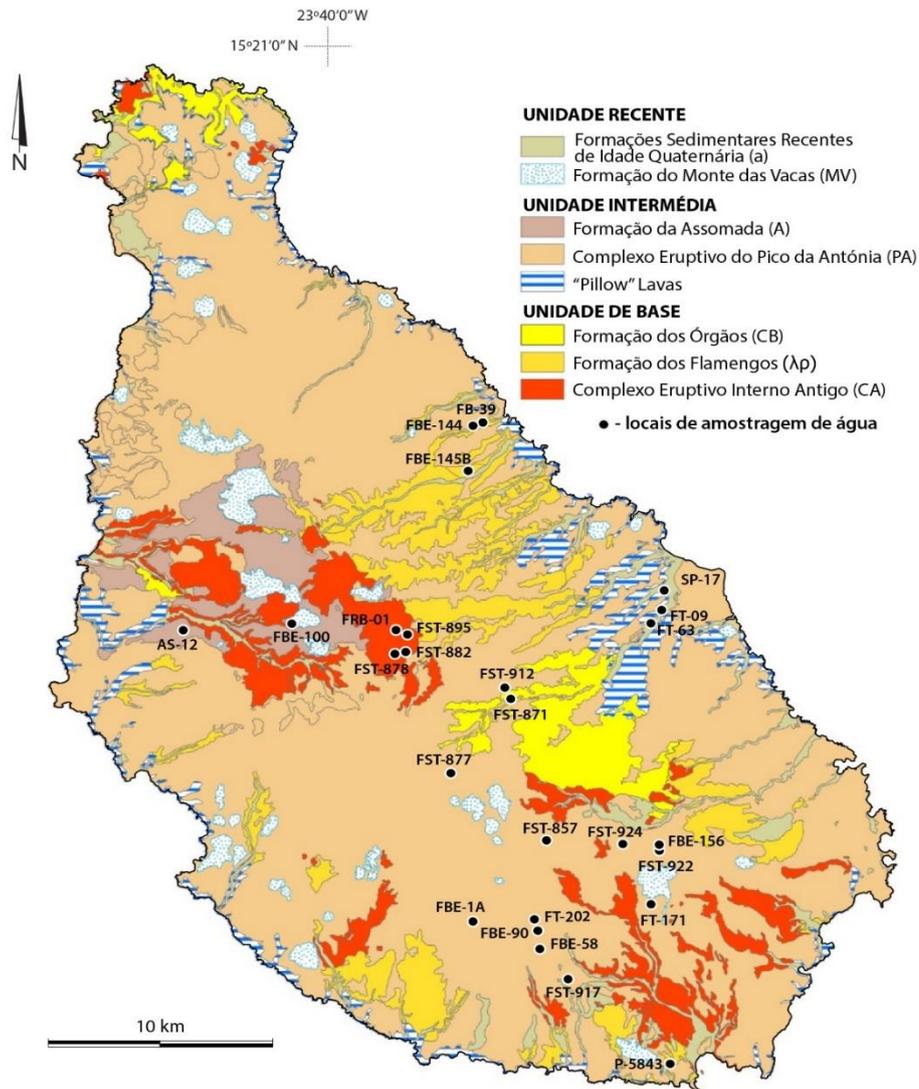
## **ESTUDO DE VARIAÇÕES REGIONAIS – HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DA ÁGUA**

O quimismo da água está dependente de vários fatores, sendo de destacar as propriedades do meio onde circulam. Para a região em estudo, com terrenos vulcânicos, à semelhança de outras formações geológicas, as características químicas das águas subterrâneas dependem dos processos de interação água-rocha, por sua vez controlados por aspetos, tais como o clima; composição da chuva; tempo de contacto com a rocha; temperatura da água; litologia e respetiva alterabilidade (Custodio, 1978).

A grande maioria dos minerais que formam os terrenos vulcânicos não é muito solúvel, principalmente os silicatos, embora sejam facilmente alterados pela presença de CO<sub>2</sub> dissolvido em quantidades suficientes. Outro fator de extrema importância que interfere no quimismo da água é a ação humana, com a introdução de contaminantes no solo, resultante dos produtos (inseticidas, herbicidas, adubos azotados e sulfatados, calcário, entre outros) utilizados na agricultura.

Tal como descrito em capítulos anteriores, na Ilha de Santiago tem-se rochas vulcânicas de composição e génese variadas, com predomínio das rochas de composição basáltica, constituídas maioritariamente por minerais de natureza silicatada. Normalmente estes minerais apresentam uma cinética bastante lenta, mesmo assim, os basaltos são no grupo das rochas de origem vulcânica, aquele que é mais sensível a processos de alteração química, passíveis de mobilização de silício, magnésio e outros metais, especialmente alcalinos e alcalino-terrosos (Berner *et al.* 1996).

No presente trabalho a caracterização física e química das águas subterrâneas da ilha de Santiago baseou-se na análise de amostras, de poços e furos usados principalmente para consumo humano e/ou agrícola. Os resultados que aqui se apresentam resultam de três campanhas de amostragens (em 2016, 2017 e 2018), contemplando os pontos de água da figura 32, tal como se descreveu no capítulo de abordagem metodológica. A referência das amostras segue a denominação oficial usada pelas entidades de gestão dos recursos hídricos em Cabo Verde.



**Figura 32** – Localização dos pontos de água tratados neste capítulo.

Nas tabelas 9 a 14 apresenta-se a composição da água, obtida nas três campanhas, para um conjunto de parâmetros, que se discutem a seguir pela ordem:

- Parâmetros globais, com as medições de campo, alcalinidade, dureza total e silício;
- Componente maioritária, incluindo aniões e catiões;
- Componente vestigial, que se refere a elementos químicos que ocorrem geralmente na ordem das  $\mu\text{g/L}$ .

**Tabela 9** – Caracterização de pontos de água na primeira campanha - Parâmetros de campo (pH, Condutividade elétrica -CE, Temperatura – Temp. e Sólidos Dissolvidos Totais - SDT), aniões e outros parâmetros físico-químicos gerais (Alk. - Alcalinidade, Dureza – Dz, Turvação e Oxidabilidade).

	<b>pH</b>	<b>C.E</b>	<b>TDS</b>	<b>Temp.</b>	<b>Alcalinidade</b>	<b>Oxidabilidade</b>	<b>Dz</b>	<b>Turvação</b>	<b>HCO<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>4</sub></b>	<b>Cl</b>	<b>NO<sub>3</sub></b>	<b>F</b>	<b>NO<sub>2</sub></b>	<b>Br</b>	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>
<b>Amostras</b>		µS/cm	mg/L	°c	mg/L	mg/L		NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<b>AS-12</b>	7.83	678	461.04	29.1	172.75	0.86	16.1	0.4	209.34	11.51	69.27	35.96	0,481	1,435	0,121	< 0.03
<b>FB-39</b>	7.75	1711	1283.25	27	270.00	0.81	161.8	0.12	327.54	82.82	315.06	13.58	0,111	7,915	0,899	< 0.03
<b>FBE-100</b>	7.59	479	325.72	27	137.60	0.79	34	0.16	167.23	7.50	41.89	38.14	0,045	0,877	0,049	< 0.03
<b>FBE-144</b>	7.49	1289	966.75	27.8	234.95	0.86	137.4	0.23	285.76	35.64	218.78	23.64	0,108	5,473	0,404	< 0.03
<b>FBE-145 B</b>	7.83	1441	1080.75	29.5	279.50	0.70	67.8	0.34	338.71	20.54	241.11	6.29	0,053	5,684	0,554	< 0.03
<b>FBE-156</b>	7.15	691	469.88	28	133.40	0.72	56.2	0.09	162.52	25.23	109.15	28.61	0,112	3,236	0,318	< 0.03
<b>FBE-1A</b>	7.43	372	252.96	30.1	104.65	0.86	34.4	0.1	127.33	7.41	38.62	14.18	0,039	0,333	0,032	< 0.03
<b>FBE-58</b>	7.42	423	287.64	27.9	117.85	0.68	24.9	0.22	143.40	9.96	42.26	11.31	0,024	0,857	0,078	< 0.03
<b>FBE-90</b>	7.60	1778	1333.5	27.6	592.10	0.84	208.7	0.3	719.46	279.17	129.10	0.20	0,042	2,367	0,215	< 0.03
<b>FRB-01</b>	7.82	1375	1031.25	32.9	414.00	0.86	140.7	0.26	501.76	94.57	136.58	35.58	0,071	5,012	0,307	< 0.03
<b>FST-857</b>	7.23	368	488	25.4	70.15	0.82	21.8	0.35	85.44	10.19	46.00	25.74	0,075	1,022	0,101	< 0.03
<b>FST-871</b>	7.27	1311	983.25	32	234.95	0.81	39.8	0.15	286.11	218.19	144.52	8.73	0,471	4,160	0,146	< 0.03
<b>FST-877</b>	7.84	1467	1100.25	27.9	265.30	0.75	74.4	0.16	321.46	230.97	168.06	14.77	0,100	6,172	0,268	< 0.03
<b>FST-878</b>	7.36	1980	1485	30.3	621.65	0.68	211	0.39	756.67	323.63	137.32	0.20	0,055	3,798	<0,01	< 0.03
<b>FST-895</b>	7.83	1890	1417.5	27.5	553.80	0.58	201.2	0.19	671.06	324.46	133.39	0.01	0,088	3,768	0,090	< 0.03
<b>FST-912</b>	7.86	1489	1116.75	28.7	271.40	0.80	79.3	0.15	328.72	208.13	8.45	173.34	0.098	7,377	0,362	< 0.03
<b>FST-917</b>	7.66	592	402.56	30	190.81	0.86	19.6	0.09	231.73	18.35	54.12	6.65	0,667	1,020	0,136	< 0.03
<b>FST-922</b>	6.61	862	586.16	29.2	127.05	0.87	69.8	0.2	154.94	28.15	156.65	27.82	0,123	3,891	0,486	< 0.03
<b>FST-924</b>	7.90	1927	1445.25	30.7	451.20	0.54	130.7	0.22	546.10	172.86	26.25	317.00	0,042	9,794	0,865	< 0.03
<b>FT-09</b>	7.88	975	488	27.9	236.35	0.89	124	0.21	286.16	44.38	134.02	46.89	0,138	3,941	0,317	< 0.03
<b>FT-171</b>	7.01	798	488	28.4	125.30	0.88	64.6	0.19	152.71	44.40	131.20	24.47	0,156	3,621	0,476	< 0.03
<b>FT-202</b>	7.52	386	262.48	26.8	113.13	0.85	32.7	0.15	137.56	8.97	38.23	11.80	0,027	0,336	0,030	< 0.03
<b>FT-63</b>	7.88	1213	909.75	28.6	265.10	0.89	145.4	0.3	320.98	57.45	185.81	45.49	0,113	5,644	0,346	< 0.03
<b>P-5843</b>	7.69	2900	2175	29.4	181.90	0.72	249.2	0.32	220.84	73.75	609.97	280.70	0,054	9,414	1,187	< 0.03
<b>SP-17</b>	7.98	1370	1027.5	28.2	265.60	0.66	167.2	0.14	320.97	63.72	232.73	41.54	0,045	5,809	0,598	< 0.03

**Tabela 10** – Caracterização de pontos de água na primeira campanha – cátions maioritários e componente vestigial

	<b>Ca</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>K</b>	<b>Si</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>	<b>Ba</b>	<b>Sr</b>	<b>Mn</b>	<b>As</b>	<b>Bi</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>Zn</b>
<b>Amostras</b>	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	mg/L	µg/L	mg/L	µg/L	µg/L								
<b>AS-12</b>	8.8	103	7.3	32	15	< 0.1	0.04	< 20	170	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	20	< 2	11	< 5	< 10	< 0.05	50	9
<b>FB-39</b>	79.5	130	82.3	12.7	24.7	< 0.1	0.05	60	1060	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	3	< 5	< 5	< 10	< 0.05	30	18
<b>FBE-100</b>	19.7	47.9	14.3	9.3	21.4	< 0.1	0.07	< 20	240	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	3	< 5	< 5	< 10	< 0.05	30	12
<b>FBE-144</b>	77.1	78.8	60.3	8.8	23.1	< 0.1	0.09	50	840	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	13
<b>FBE-145 B</b>	41.7	193	26.1	49.1	20.3	< 0.1	0.07	70	600	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	15	< 5	< 10	< 0.05	< 10	27
<b>FBE-156</b>	30.7	61.3	25.5	5.8	22	< 0.1	0.05	< 20	330	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	3	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	34
<b>FBE-1A</b>	19	24.3	15.4	4.7	20.1	< 0.1	0.11	< 20	210	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 1	< 0.05	10	12
<b>FBE-58</b>	12.7	46	12.2	10.1	12.7	< 0.1	0.07	< 20	310	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	30	16
<b>FBE-90</b>	82.7	115	126	17.2	28.8	< 0.1	0.67	40	3630	0.03	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	< 10	18
<b>FRB-01</b>	83.8	110	56.9	19.6	16.8	< 0.1	0.09	80	1540	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	3	31	< 5	< 10	< 0.05	< 10	261
<b>FST-857</b>	13.2	40.5	8.6	6.1	18.5	< 0.1	0.15	< 20	230	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	7	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	221
<b>FST-871</b>	34.1	232	5.7	4.8	12.3	< 0.1	0.03	< 20	280	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	29	< 5	< 10	< 0.05	< 10	10
<b>FST-877</b>	54.7	230	19.7	8.4	11.8	< 0.1	0.14	< 20	450	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	2	24	< 5	< 10	< 0.05	< 10	51
<b>FST-878</b>	108	80	103	23	30.1	< 0.1	0.17	40	2700	0.11	< 30	< 20	< 2	6	< 20	< 2	< 5	6	< 10	< 0.05	< 10	9
<b>FST-895</b>	83.2	155	118	18.4	22.7	< 0.1	0.1	30	3390	0.04	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	7	< 5	6	< 10	< 0.05	< 10	81
<b>FST-912</b>	56.7	229	22.6	7.7	15.4	< 0.1	0.08	< 20	700	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	3	28	< 5	< 10	< 0.05	< 10	37
<b>FST-917</b>	10.3	101	9.3	10.1	9.8	< 0.1	0.04	< 20	370	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	4	7	< 5	< 10	< 0.05	20	12
<b>FST-922</b>	36.1	68.6	33.7	5.3	21.6	< 0.1	0.13	< 20	380	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	3	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	19
<b>FST-924</b>	61.5	281	69.2	8.7	17.6	< 0.1	0.06	40	2660	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	20	< 5	< 10	< 0.05	< 10	33
<b>FT-09</b>	82	54.7	42	5.7	19.5	< 0.1	0.06	< 20	560	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	9	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	22
<b>FT-171</b>	37.4	63	27.2	11.2	20.4	< 0.1	0.06	< 20	500	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	4	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	41
<b>FT-202</b>	18.1	30.4	14.6	7.7	18.9	< 0.1	0.07	< 20	210	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	15
<b>FT-63</b>	95.5	67	49.9	7.3	20.1	< 0.1	0.1	< 20	690	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	12
<b>P-5843</b>	163	240	86.2	35.4	20.9	< 0.1	0.17	80	2640	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	< 10	7
<b>SP-17</b>	111	67.2	56.2	7.4	19	< 0.1	0.06	< 20	810	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	16

**Tabela 11** – Caracterização de pontos de água na segunda campanha - Parâmetros de campo (pH, Condutividade elétrica -CE, Temperatura – Temp. e Sólidos Dissolvidos Totais - SDT), aniões e outros parâmetros físico-químicos gerais (Alk. - Alcalinidade, Dureza – Dz, Turvação e Oxidabilidade).

	<b>pH</b>	<b>C.E</b>	<b>TDS</b>	<b>Temp.</b>	<b>Alcalinidade</b>	<b>Oxidabilidade</b>	<b>Dz</b>	<b>Turvação</b>	<b>HC<sub>o3</sub></b>	<b>SO<sub>4</sub></b>	<b>Cl</b>	<b>NO<sub>3</sub></b>	<b>F</b>	<b>NO<sub>2</sub></b>	<b>Br</b>	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>
<b>Amostras</b>		µS/cm	mg/L	°c	mg/L	mg/L	mg/L	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
<b>AS-12</b>	7.49	647	439.96	29.5	172.55	0.85	17.1	0.63	209.87	11.169	60.79	30.544	0,459	3,020	0,169	<0,03
<b>FB-39</b>	7.87	1688	1266	27	270.20	0.68	159.6	0.17	327.24	94.576	307.373	13.12	0,081	4,753	0,642	<0,03
<b>FBE-100</b>	7.18	474	322.32	28.9	134.50	0.78	33.7	0.23	163.84	6.877	36.908	32.498	0,052	0,065	0,042	<0,03
<b>FBE-144</b>	7.12	1258	943.5	27.5	254.75	0.87	1352	0.20	310.39	45.321	212.52	23.996	0,051	8,656	0,477	<0,03
<b>FBE-145 B</b>	7.73	1319	989.25	28.8	345.00	0.87	106.4	0.56	418.64	59.335	210.398	15.395	0,079	10,009	0,505	<0,03
<b>FBE-1A</b>	7.27	360	244.8	27	106.80	0.89	33.9	0.18	130.06	7.158	35.333	12.553	<0,01	0,055	0,051	<0,03
<b>FBE-58</b>	6.85	219	148.92	27.9	128.05	0.78	25.5	0.19	156.11	10.915	40.262	10.317	0,072	1,288	0,056	<0,03
<b>FBE-90</b>	7.45	1677	1257.75	24.9	587.00	0.59	166.3	0.20	716.14	207.113	122.749	0.075	0,066	3,887	0,702	<0,03
<b>FRB-01</b>	7.59	1389	1041.75	30.6	433.30	0.88	146.1	0.32	526.58	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>FST-857</b>	6.50	351	238.68	21.4	68.93	0.78	21.1	0.15	84.06	10.035	43.273	27.095	0,068	0,783	0,054	<0,03
<b>FST-871</b>	7.61	845	574.6	29.3	226.10	0.80	43.8	0.09	274.72	222.425	146.606	8.724	0,262	6,371	0,194	<0,03
<b>FST-877</b>	7.68	1255	941.25	28.4	350.40	0.76	116.8	0.17	425.47	92.157	137.907	41.182	<0,01	6,133	0,199	<0,03
<b>FST-878</b>	7.22	1793	1344.75	26.9	542.50	0.45	53.2	0.21	660.74	322.587	147.153	0.25	0,073	4,387	0,664	<0,03
<b>FST-912</b>	7.49	1493	1119.75	28.4	347.20	0.73	137.8	0.19	422.27	170.597	177.194	45.829	0,056	5,146	0,229	<0,03
<b>FST-917</b>	7.45	580	394.4	34.2	180.75	0.86	19.8	0.44	219.90	15.481	46.157	7.487	0,525	1,224	0,029	<0,03
<b>FST-922</b>	7.75	863	586.84	28.2	131.95	0.86	71.3	0.24	160.08	26.679	154.35	27.396	<0,01	6,255	0,563	<0,03
<b>FST-924</b>	7.56	1565	1173.75	28.2	450.80	0.54	144	0.17	547.98	203.709	321.881	35.013	0,064	11,119	0,641	<0,03
<b>FT-09</b>	7.83	1111	833.25	26.8	267.35	0.83	138.3	0.28	324.00	56.359	138.169	43.032	<0,01	5,724	0,334	<0,03
<b>FT-171</b>	7.13	800	544	24.6	130.90	0.87	65.3	0.19	159.48	44.316	126.234	24.83	0,025	5,773	0,429	<0,03
<b>FT-202</b>	7.23	368	250.24	26.2	112.88	0.75	32.4	0.20	137.47	8.722	35.598	10.809	<0,01	0,352	0,038	<0,03
<b>FT-63</b>	7.39	1240	930	26.4	264.70	0.72	149.6	0.10	322.14	61.715	174.48	41.57	0,056	9,312	0,311	<0,03
<b>P-5843</b>	7.46	1938	1453.5	28.5	181.75	0.54	158.5	0.18	221.10	61.051	418.126	180.445	0,048	16,273	0,852	<0,03
<b>SP-17</b>	7.47	1396	1047	29.6	260.30	0.89	174.4	0.30	316.64	64.492	235.25	37.075	0,064	7,019	0,630	<0,03
<b>FST-882</b>	7.43	1040	780	25.5	436.10	0.83	111.2	0.23	530.61	66.676	55.067	0.029	0,049	0,262	0,100	<0,03
<b>FBE-153 BIS</b>	7.89	738	5014	28.6	137.30	0.86	60.5	1.65	166.23	28.122	96.315	26.47	0,029	3,486	0,295	<0,03

**Tabela 12** – Caracterização de pontos de água na segunda campanha – cátions majoritários e componente vestigial

	<b>Ca</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>K</b>	<b>Si</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>	<b>Ba</b>	<b>Sr</b>	<b>Mn</b>	<b>As</b>	<b>Bi</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>Zn</b>
<b>Amostras</b>	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	mg/L	µg/L	mg/L	µg/L	µg/L								
<b>AS-12</b>	9.1	102	8	30	16.4	< 0.1	0.01	< 20	190	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	9	< 5	< 10	< 0.05	50	7
<b>FB-39</b>	76.7	134	82.9	12.1	26.2	< 0.1	0.03	60	1060	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	13
<b>FBE 100</b>	18.9	50.5	14.8	8.8	23	< 0.1	0.02	< 20	250	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	30	9
<b>FBE-144</b>	74.3	82.1	60.9	8.3	24.7	< 0.1	0.03	50	890	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	12
<b>FBE-145 B</b>	68.2	137	38.2	29.2	19.3	< 0.1	0.02	50	820	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	8	< 5	< 10	< 0.05	< 10	8
<b>FBE-1A</b>	18.2	25.1	15.7	4.6	21	< 0.1	0.02	< 20	220	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	9
<b>FBE-58</b>	12.6	50.6	12.9	9.8	13.6	< 0.1	0.02	< 20	330	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	30	7
<b>FBE-90</b>	50.3	154	116	18.2	17.5	< 0.1	0.03	< 20	2600	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	38	6	6	< 10	< 0.05	< 10	228
<b>FRB-01</b>	85.5	115	60.6	18.5	18.2	< 0.1	0.03	70	1640	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	2	29	7	< 10	< 0.05	< 10	14
<b>FST-857</b>	12.4	42.5	8.7	5.7	20.1	< 0.1	0.02	< 20	240	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	124
<b>FST-871</b>	36.2	245	7.6	4.7	13.1	< 0.1	< 0.01	< 20	300	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	26	< 5	< 10	< 0.05	< 10	13
<b>FST-877</b>	76.5	132	40.3	9.3	17.8	< 0.1	0.02	< 20	510	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	5	< 5	< 10	< 0.05	< 10	13
<b>FST-878</b>	17.1	46	36.1	5.4	18	< 0.1	0.02	< 20	640	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	< 10	< 5
<b>FST-912</b>	93.3	164	44.5	7.1	17.6	< 0.1	0.01	< 20	1050	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	15	< 5	< 10	< 0.05	< 10	52
<b>FST-917</b>	10	97.5	9.8	9.7	10.4	< 0.1	0.02	< 20	370	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	6	< 5	< 10	< 0.05	20	11
<b>FST-922</b>	36.5	72.9	34.8	5	22.9	< 0.1	0.02	< 20	400	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	11
<b>FST-924</b>	68.4	288	75.6	8.4	16.8	< 0.1	0.02	40	2930	0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	19	< 5	< 10	< 0.05	< 10	30
<b>FT-09</b>	91	60.9	47.3	6	21.1	0.1	0.01	< 20	660	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	7
<b>FT-171</b>	37.2	65.8	28.1	10.6	22	< 0.1	0.01	< 20	510	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	10
<b>FT-202</b>	17.4	31.9	15	7.6	19.9	< 0.1	0.02	< 20	220	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	6
<b>FT-63</b>	96.2	72.7	53.4	7	21.8	< 0.1	0.03	< 20	750	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	24
<b>P-5843</b>	101	202	57.5	26.1	22.7	< 0.1	0.02	40	1710	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	8
<b>SP-17</b>	114	72.2	60.4	7.4	20.2	< 0.1	0.02	< 20	880	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	104
<b>FST-882</b>	50.1	87.5	61.1	11.5	25.6	< 0.1	0.02	100	1010	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	37	5	< 5	< 10	< 0.05	< 10	40
<b>FBE-153 BIS</b>	33	65.3	27.5	5.4	23.3	< 0.1	0.02	< 20	360	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	7	< 5	21	< 10	< 0.05	20	259

**Tabela 13** – Caracterização de pontos de água na terceira campanha - Parâmetros de campo (pH, Condutividade elétrica -CE, Temperatura – Temp. e Sólidos Dissolvidos Totais - SDT), ânions e outros parâmetros físico-químicos gerais (Alk. - Alcalinidade, Dureza – Dz, Turvação e Oxidabilidade).

	<b>pH</b>	<b>C.E</b>	<b>TDS</b>	<b>Temp.</b>	<b>Alcalinidade</b>	<b>Oxidabilidade</b>	<b>Dz</b>	<b>Turvação</b>	<b>HCO<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>4</sub></b>	<b>Cl</b>	<b>NO<sub>3</sub></b>	<b>F</b>	<b>NO<sub>2</sub></b>	<b>Br</b>	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>
<b>Amostras</b>		µS/cm	mg/L	°c	mg/L	mg/L		NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<b>AS-12</b>	8.39	240	163	28.10	126.05	0.52	0,119	0.67	147.19	11.53	59.9	35.61	21.3	1,773	0,121	<0,03
<b>FT-39</b>	7.5	1300	975	26.30	257.1	0.72	0,547	0.58	312.77	92.64	299.2	13.16	163.4	12,467	0,020	0,027
<b>FBE-144</b>	7.31	1020	765	26.70	244.5	0.74	0,598	0.4	297.64	52.76	223.8	24.93	143.5	1,443	0,047	0,146
<b>FBE-145</b>	7.92	1120	840	28.20	262.7	0.77	0,422	0.23	318.48	58.26	204.6	4.64	61	5,768	0,097	<0,03
<b>FBE-1A</b>	7.96	371	252	28.80	98.6	0.54	0,050	0.21	120.08	1.96	9.0	3.50	35.4	0,333	<0,01	<0,03
<b>FBE-58</b>	8.9	325	221	28.40	121.8	0.50	0,244	0.28	148.41	11.36	38.7	12.00	25.5	1,236	<0,01	<0,03
<b>FST-857</b>	8.7	282	192	25.80	68.5	0.56	0,129	0.39	83.46	10.39	42.2	26.16	22.4	1,630	0,055	<0,03
<b>FST-871</b>	7.79	1040	780	30.60	174.05	0.72	0,157	0.27	211.59	255.51	126.3	8.29	45.3	8,036	0,311	<0,03
<b>FST-878</b>	6.95	1710	1283	26.40	716	0.74	0,517	0.5	872.43	406.27	146.8	0.12	228	1,451	<0,01	<0,03
<b>FST-912</b>	7.52	1140	855	30.00	246	0.63	0,157	0.3	299.10	266.60	146.2	0.01	70.3	3,077	0,220	<0,03
<b>FST-917</b>	8.12	521	354	25.90	92.25	0.61	0,108	0.36	112.30	12.30	46.3	10.95	25.7	1,502	0,191	<0,03
<b>FST-922</b>	8	887	603	26.30	114.35	0.68	0,422	0.31	139.01	29.02	152.3	30.15	74.3	6,761	0,047	<0,03
<b>FT-09</b>	7.2	1063	797	27.40	248.3	0.70	0,020	0.13	302.33	47.89	115.7	39.94	126.3	6,329	0,017	<0,03
<b>FT-202</b>	7.95	376	256	26.30	120.25	0.74	0,500	0.18	146.47	8.93	35.5	11.41	33	1,366	0,036	<0,03
<b>FT-63</b>	7.82	1275	956	26.20	253	1.08	0,334	0.38	306.45	60.92	164.6	40.18	148.3	10,512	0,047	<0,03
<b>P-58-43</b>	7.14	1444	1083	28.80	176.45	0.79	0,953	0.24	214.96	66.63	438.1	226.65	184.7	8,449	0,039	<0,03
<b>FST-882</b>	7.9	1085	814	20.50	436.5	0.65	1 194	0.35	530.60	62.40	48.2	0.20	112.6	1,941	0,025	<0,03
<b>P-SC-43F</b>	7.27	1685	1264	26.10	244.5	0.72	1 367	0.34	298.04	62.19	514.1	36.16	300	3,641	<0,01	<0,03

**Tabela 14** – Caracterização de pontos de água na terceira campanha – cátions majoritários e componente vestigial

	<b>Ca</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>K</b>	<b>Si</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>	<b>Ba</b>	<b>Sr</b>	<b>Mn</b>	<b>As</b>	<b>Bi</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>Zn</b>
<b>Amostras</b>	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	mg/L	µg/L	mg/L	µg/L	µg/L								
<b>AS-12</b>	1.5	7.6	9.8	31.1	16.3	< 0.1	0.01	< 20	240	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	40	9
<b>FT-39</b>	9.1	39	84.3	11.8	24.7	< 0.1	0.02	60	1180	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	17
<b>FBE-144</b>	8.6	85.5	64.9	9.6	22.3	< 0.1	0.05	50	960	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	6	< 10	< 0.05	20	15
<b>FBE-145</b>	5.9	214	25.1	49.3	20.5	< 0.1	0.01	70	600	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	16	< 5	< 10	< 0.05	< 10	13
<b>FBE-1A</b>	9.2	28.1	16.2	5.6	19.9	< 0.1	0.01	< 20	230	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	6
<b>FBE-58</b>	12.9	51.5	12.6	9.4	12.4	< 0.1	0.03	< 20	330	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	30	42
<b>FST-857</b>	13.3	44.6	9.1	6.7	18.9	< 0.1	0.01	< 20	260	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	59
<b>FST-871</b>	39.2	256	6.1	5.4	11.7	< 0.1	< 0.01	< 20	330	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	28	< 5	< 10	< 0.05	< 10	13
<b>FST-878</b>	115	253	113	26.1	34.4	< 0.1	0.03	50	3420	0.04	< 30	< 20	< 2	4	< 20	13	5	11	< 10	< 0.05	< 10	138
<b>FST-912</b>	51	256	19.3	8	14.6	< 0.1	< 0.01	< 20	580	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	4	37	< 5	< 10	< 0.05	< 10	24
<b>FST-917</b>	13.1	71.1	12.6	9.5	11.7	< 0.1	0.02	< 20	450	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	30	14
<b>FST-922</b>	38.6	74.7	35.7	8.7	21.2	< 0.1	0.05	< 20	420	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	25
<b>FT-09</b>	82.1	59.2	44.2	6.4	19.7	< 0.1	0.02	< 20	580	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	12
<b>FT-202</b>	18.2	33	14.8	8.6	18.6	< 0.1	0.02	< 20	220	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	9
<b>FT-63</b>	95	73	53.3	8	19.9	< 0.1	0.02	< 20	710	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	20	14
<b>P-58-43</b>	118	215	66.7	27.7	20.8	< 0.1	0.02	50	2110	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	5	< 10	< 0.05	10	20
<b>FST-882</b>	50.5	91.8	62.1	11.6	24.1	< 0.1	0.02	90	1060	0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	20	< 5	< 5	< 10	< 0.05	< 10	55
<b>P-SC-43F</b>	198	91.3	102	8.9	18.4	< 0.1	0.02	< 20	1620	< 0.01	< 30	< 20	< 2	< 2	< 20	< 2	< 5	< 5	< 10	< 0.05	10	18

### 6.1.1- Parâmetros físico-químicos gerais (campo, alcalinidade, dureza e sílica)

#### ➤ Temperatura

A temperatura afeta os processos e parâmetros hidroquímicos, tais como o teor de oxigênio dissolvido, a cinética das reações e a capacidade dos seres vivos para resistir a certos poluentes (USGS, 2018).

Nas águas subterrâneas, a temperatura está condicionada pelo tipo de terreno em que circulam, que está parcialmente dependente da temperatura atmosférica, na parte mais superficial, e, sobretudo, do calor interno da terra gerado por diversos processos, nomeadamente a desintegração radioativa de elementos como o urânio e o tório. De uma maneira geral, as águas subterrâneas têm temperaturas relativamente constantes, que se relacionam então com a temperatura atmosféricas da área. Incrementos relativamente à temperatura do ar resultam do gradiente térmico associado à profundidade (Schoeller, 1962).

Em terrenos vulcânicos a temperatura é um fator importante na caracterização das águas subterrâneas, visto que em zonas vulcanicamente ativas e com gradientes geotérmicos elevados, pode potenciar a solubilidade dos minerais e dos gases, condicionando fortemente o constante desequilíbrio químico.

No caso particular da ilha de Santiago, a variação anual da temperatura das águas é pequena, convergindo, na maioria dos casos, para valores próximos dos da temperatura média anual do ar, com os quais tendem a entrar em equilíbrio.

De acordo com a classificação de Schoeller, (1962), que se baseia no incremento relativamente à temperatura do ar, a maioria das águas analisadas, são orto termais ou normais. uma vez que a variação da temperatura das águas é pequena, aproximando-se na maioria das medições, a valores próximos dos da temperatura média anual do ar.

Na tabela 15, estão representados os valores estatísticos, mínimos, máximos, da temperatura das águas na ilha de Santiago. O valor médio varia entre 27 e 28.7, ao que corresponde um coeficiente de variação relativamente baixo, sugerindo homogeneidade dos resultados.

**Tabela 15-** Dados estatísticos referentes a temperatura das águas amostradas

<b>Colheita</b>	<b>N*</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>Coef. Variação (%)</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>
<b>Ag/set. 2016</b>	25	28.7	28.4	1.7	5.9	32.9	25.4
<b>Mar/abr. 2017</b>	25	27.7	28.2	2.4	8.5	34.2	21.4
<b>mar/18</b>	18	27	26.6	2.4	8.9	30.6	20.5

#### ➤ pH

A atividade do hidrogênio  $H^+$  na água pode ser aferida pelo parâmetro pH que corresponde ao logaritmo negativo daquele valor ( $pH = -\log [H^+]$ ). Entre as numerosas reações que o pH controla, encontram-se a solubilidade e a taxa de dissolução da maior parte dos minerais (Langmuir, 1997).

O pH é determinado através de um eletrodo de íão hidrogênio de vidro com potencial conhecido. A calibração é realizada com soluções tampão de pH conhecido, normalmente pH 4, pH 7 e pH 9.

Como se pode ver na tabela 16, a estatística descritiva referente ao pH indica valores médios de 7.58; 7.42 e 7.80 para os anos 2016, 2017 e 2018, respetivamente.

**Tabela 16-** Dados estatísticos referentes ao pH das águas amostradas

<b>Colheita</b>	<b>N*</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>Coef. Variação (%)</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>
<b>Ag/set. 2016</b>	25	7.58	7.66	0.34	4.43	7.98	6.6
<b>Mar/abr.2017</b>	25	7.42	7.46	0.32	4.29	7.89	6.5
<b>mar/18</b>	18	7.80	7.86	0.68	8.71	8.90	6.95

A maioria das amostras analisadas apresenta pH superior a 7, o que lhes confere um caráter alcalino. Não se apresentam como águas agressivas, nem se observa uma variação sazonal considerável dos valores do pH.

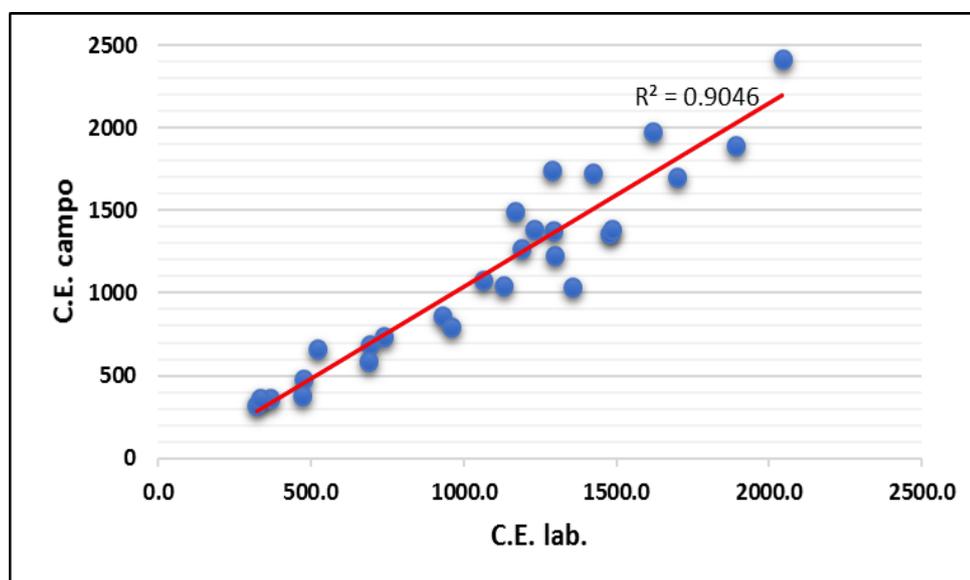
#### ➤ **Condutividade Elétrica**

A condutividade elétrica é a capacidade da água para conduzir eletricidade. Mede-se como a condutividade que existe entre dois eletrodos paralelos de  $1 \text{ cm}^2$  de superfície cada um e separados um centímetro localizado dentro da água, de modo a que os meios de medição podem ser considerados infinitos. A condutividade cresce com a temperatura, sendo que para cada aumento de  $1^\circ \text{ C}$  na temperatura da solução, corresponde um acréscimo de 2% na condutividade (Custodio *et al.* 1996). Por este motivo, a medição da condutividade elétrica faz-se a uma temperatura de referência, que normalmente é de  $25^\circ \text{ C}$ .

A condutividade elétrica é de extrema importância, porque ajuda a compreender o efeito da corrosão da água, dependendo da temperatura. Permite, ainda, detetar a infiltração da água do mar num dado aquífero. O seu aumento pode ser resultante de processos que se desenvolvem na superfície da Terra e que consistem na fragmentação de decomposição dos minerais e dos processos de poluição pontual ou difusa Feth *et al.* (1964).

A condutividade, à semelhança do pH, foi medida tanto no campo como no laboratório. Na figura 33, pode-se observar muito boa correlação entre ambos os valores, apesar de, no caso da amostra P-58-43 com condutividade superior a  $2000 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$  o valor de campo é superior ao obtido algum tempo depois no laboratório. Este resultado poderia explicar-se como produto da precipitação de certas

substâncias na amostra devido a possíveis trocas de pH e temperatura, durante o seu armazenamento e transporte. O elevado valor de condutividade indica um aumento de salinidade da água neste ponto de amostragem.



**Figura 33-** Diagrama binário da condutividade medido no campo em função da condutividade medida no laboratório.

Na tabela 17 estão apresentados os resultados estatísticos referentes à condutividade elétrica. O valor médio é 1190  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para o ano de 2016, 1056  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para 2017 e 938  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para 2018. Pode-se constatar que há também uma diminuição para os valores mínimos e máximos.

**Tabela 17-** Dados estatísticos referentes à condutividade das águas amostradas (valores em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Colheita	N*	Media	Mediana	Desv. Padrão	Coef. Variação (%)	Max.	Min.
Ag/set. 2016	25	1190.6	1289	639.54	53.72	2900	368
Mar/abr. 2017	25	1056.28	1111	504.39	47.75	1938	219
mar/18	18	938	1051.50	432.09	46.07	1710	240

### ➤ Alcalinidade

A alcalinidade mede a capacidade da água para neutralizar ácidos ou, de outra forma, a de aceitar prótons, resultando do efeito acumulado das bases em solução (Langmuir, 1997).

Resulta, normalmente, da ação primordial do bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ) e do carbonato ( $\text{CO}_3$ ) dissolvidos na água. De acordo com Drever (1997), a concentração relativa de uma espécie carbonatada ou outra é em função do pH, sendo mais abundante os bicarbonatos a pH abaixo de 8.3 e os carbonatos acima desse valor.

Sais de ácidos fracos, como os ácidos húmicos, podem também se interferir com a medição. O composto iônico de sílica pode também interferir especialmente quando o pH está acima de 8,5 (Rodier, *et al.* 2009).

À exceção do bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), os restantes aniões estão normalmente nas águas em muito baixas concentrações, pelo que, na maioria das águas subterrâneas a alcalinidade está maioritariamente relacionada com os teores de bicarbonato (Lima, 2010).

Nas águas subterrâneas analisadas o pH oscila entre 6.61 e 8.9, nos diferentes anos da amostragem, com o valor médio do pH inferior a 8, sendo assim, na maior parte das águas analisadas a espécie carbonatada dominante é o bicarbonato.

Os valores estatísticos, bem como o máximo e o mínimo, das amostras de águas em estudo estão patentes na tabela 18.

**Tabela 18-** Dados estatísticos referentes a alcalinidade das águas amostradas (valores em  $\text{mg/L CaCO}_3$ ).

Colheita	N*	Media	Mediana	Desv. Padrão	Coef. Variação (%)	Max.	Min.
<b>Ag/set. 2016</b>	25	257.2	234.95	157.79	61.35	621.7	70.2
<b>Mar/abr. 2017</b>	25	260.9	254.75	143.1	54.85	587	68.9
<b>mar/18</b>	18	222.3	210.48	135.8	61.09	716	68.5

A alcalinidade das águas analisadas é, em geral elevada, variando a sua média entre 222 e 261  $\text{mg/L}$ , consoante a campanha. Os coeficientes de variação de 61.35% a 61.09% mostram que existe uma certa dispersão dos dados em relação ao valor médio.

### ➤ Dureza Total

A dureza de uma água está relacionada com a concentração de iões suscetíveis de reagirem com sabão sódico, provocando a sua precipitação.

Segundo Greenberg *et al.* (1992) a dureza de uma água é definida como a soma dos iões cálcio e magnésio, expressa sob a forma de  $\text{mg/L}$  de  $\text{CaCO}_3$ , podendo ser determinada pela expressão:  $D_t (\text{mg/L CaCO}_3) = 2,497 [\text{Ca}^{2+} (\text{mg/L})] + 4,118 [\text{Mg}^{2+} (\text{mg/L})]$ .

Segundo Custodio e Llamas (1983), as águas com dureza total inferior a 50  $\text{mg/L CaCO}_3$  são do tipo brandas, de 50 a 100  $\text{mg/L CaCO}_3$  são pouco duras, de 100 a 200  $\text{mg/L CaCO}_3$  são duras e acima de 200  $\text{mg/L CaCO}_3$  são muito duras. A dureza da água varia geograficamente, dada a natureza geológica dos terrenos que atravessa e com os quais tem contacto.

Pode-se analisar os valores estatísticos, máximos e mínimos, que se encontram na tabela 19.

**Tabela 19-** Dados estatísticos referentes a dureza total das águas amostradas (valores em  $\text{mg/L}$ ).

Colheita	N*	Media	Mediana	Desv. Padrão	Coef. Variação (%)	Max.	Min.
<b>Ag/set. 2016</b>	25	100.51	74.40	70.11	69.76	249.20	16.10
<b>Mar/abr. 2017</b>	25	92.87	106.40	55.56	59.83	174.40	17.10
<b>mar/18</b>	18	101.17	72.30	71.74	70.91	300.00	21.30

A leitura dos dados apresentados na tabela 20, mostra que tendo como referência Custodio e Llamas (1983), na generalidade, as águas analisadas classificam-se como pouco duras.

Nota-se que existe uma pequena oscilação nos valores médios. Os valores mínimos encontrados (16.1, 17.1 e 21.3) correspondentes, respetivamente aos anos 2016, 2017 e 2018, indicam amostras de água branda.

### ➤ **Silício (Si)**

O silício é, a seguir ao oxigénio, o elemento mais abundante da crosta terrestre.

Normalmente aparece sob a forma de óxido (sílica) no quartzo e surge combinado com metais em vários outros minerais que constituem a classe dos silicatos. A maior parte da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) presente nas águas é resultante do ataque das águas aos silicatos.

Krauskopf *et al.* (1967) fez algumas experiências onde provou que a sílica em solução está na maior parte das vezes sob a forma de ácido silícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) não ionizado (Falcão, 1978).

Os dados estatísticos, máximos e mínimos da sílica, determinados para as águas encontram-se na tabela 20.

**Tabela 20-** Dados estatísticos referentes à concentração de silício das águas amostradas (valores em mg/L).

Colheita	N*	Media	Mediana	Desv. Padrão	Coef. Variação (%)	Max.	Min.
<b>Ag/set. 2016</b>	25	19.34	20.10	4.54	23.45	30.10	9.80
<b>Mar/abr. 2017</b>	25	19.73	20.10	3.89	19.73	26.20	10.40
<b>mar/18</b>	18	19.45	19.80	6.08	31.27	34.40	11.70

As concentrações máximas de sílica correspondem às amostras de águas referente ao ano 2018, onde atingem o valor máximo de 34.4 mg/L. O coeficiente de variação é muito baixo, o que justifica a média calculada, demonstrando que não existe uma grande disparidade entre os valores mínimos e máximos alcançados nessas águas.

A concentração média de sílica nas águas analisadas é baixa, variando de 19.34 a 19.73 mg/L, o que, segundo, Custodio (1978), enquadra-se nos valores normais para as regiões vulcânicas, entre 10 e 40 mg/L.

### **6.1.2- Catiões**

Nas regiões vulcânicas, a água subterrânea ao infiltrar-se e circular em profundidade, entra em contacto direto com o solo e com as rochas vulcânicas que formam as principais unidades hidrogeológicas, reagindo com os minerais constituintes.

As amostras de água analisadas cumprem, independentemente do seu conteúdo iônico, a sequência de concentração Na>Ca>Mg>K. Estes cátions têm na sua origem processos naturais de interação água-rocha e processos potenciados pela atividade humana como a intrusão salina e a contaminação agrícola.

Na tabela 21 apresentam-se os dados estatísticos relativos a estes cátions.

**Tabela 21-** Dados estatísticos dos diferentes parâmetros químicos (Cátions) obtidos nas análises de laboratório para as amostras da zona de estudo (valores em mg/L).

	Colheita	N*	Media	Mediana	Desv. Padrão	Coef. Variação (%)	Max.	Min.
<b>Na</b>	<b>ag./set. 2016</b>	25	117.95	101.00	78.73	66.75	281	24.3
	<b>mar/abr. 2017</b>	25	103.86	82.10	66.20	63.74	288	25.1
	<b>mar-18</b>	118	86.55	256.00	0.62	72	28.1	28.1
<b>Ca</b>	<b>ag./set. 2016</b>	25	56.82	54.70	38.79	68.27	163	8.80
	<b>mar/abr. 2017</b>	25	52.16	50.10	33.69	64.58	114	9.10
	<b>mar-18</b>	18	59.40	44.85	45.76	77.04	198	11.5
<b>Mg</b>	<b>ag./set. 2016</b>	25	43.69	27.20	36.05	82.52	126	5.70
	<b>mar/abr. 2017</b>	25	40.71	38.20	27.42	67.36	116	7.60
	<b>mar-18</b>	18	41.77	30.40	31.02	74.26	113	6.10
<b>K</b>	<b>ag./set. 2016</b>	25	13.46	8.80	11.23	83.40	49.1	4.70
	<b>mar/abr. 2017</b>	25	11.06	8.40	7.48	67.66	30	4.60
	<b>mar-18</b>	18	14.02	9.15	10.55	75.23	49.3	5.40

### ➤ **Sódio (Na)**

O sódio é o elemento mais abundante do grupo dos metais alcalinos na tabela periódica, destacando-se como um dos mais abundantes encontrados nas águas subterrâneas.

Segundo Hem, (1985) o sódio está presente na maioria dos minerais, apresenta baixa estabilidade química entre os mesmos, possui solubilidade elevada e difícil de precipitar na maioria dos compostos químicos em solução.

Ao sódio associam-se tipicamente minerais como a albite, a halite e a criolite. Além da albite, participa também na composição de outras plagioclases e outros silicatos como as micas, anfíbolos e piroxenas (Reimann *et al.* 1998).

É um dos cátions mais abundantes nas amostras de água do presente estudo, sendo que o seu valor médio representa cerca de 50% dos cátions principais em solução, desempenhando um papel relevante para a mineralização total da água.

Ao longo do período de amostragens, a dispersão é considerável, já que os coeficientes de variação são de 66,6%, 63,7% e 72%, respectivamente, para os anos 2016, 2017 e 2018 (tabela 21).

A elevada percentagem do sódio nas águas subterrâneas da ilha de Santiago pode ser causada pelo aerossol marinho na atmosfera insular que deposita os sais de cloreto de sódio (halite) ao longo do tempo ou pela intrusão salina, uma vez que o sódio é o principal constituinte da água do mar.

### ➤ **Cálcio (Ca)**

O cálcio é o quinto elemento mais abundante nas rochas da crosta terrestre, ocorrendo com uma concentração média de 36.300 mg/L. É um elemento essencial de muitos minerais que formam as rochas ígneas, nomeadamente as piroxenas, as anfíbolas e as plagióclases (Lima, 2010).

As suas concentrações nas águas são controladas pelos minerais de solubilidade retrógrada, como a calcite, e a anidrite. Os fatores que afetam a solubilidade destes minerais condicionam também a concentração do cálcio nas águas subterrâneas, entre esses, destaca-se a pressão parcial do CO<sub>2</sub>, uma vez que a perda deste gás conduz à precipitação de calcite (Keith, 1993).

Nas águas subterrâneas da ilha de Santiago, a concentração média do cálcio nos anos 2016, 2017 e 2018 varia, respetivamente, entre 56,82 mg/L, 52,16mg/L e 59,4 mg/L.

Importa também salientar a grande instabilidade composicional das águas ao nível de cálcio, já que a dispersão dos dados se traduz por coeficientes de variação relativamente elevados, na ordem de 68,7%, 64,58% e 77,04% (tabela 21).

### ➤ **Magnésio (Mg)**

O magnésio (Mg) está entre os elementos mais abundantes na crosta terrestre e é um constituinte comum nas águas naturais. Os minerais ferromagnesianos das rochas magmáticas e os carbonatos de magnésio das rochas carbonatadas são duas das fontes mais importantes de magnésio (Simons, 2010). A sua concentração na água subterrânea, menor proporção que o cálcio, deve-se à dissolução de dolomites e numerosos silicatos que contêm magnésio, troca catiónica, intrusão de água de mar etc.

O valor médio do conteúdo de magnésio obtido no conjunto de águas subterrâneas dos aquíferos estudados é 43.69 mg/L, 40.71 mg/L e 41.77 mg/L, para os anos 2016, 2017 e 2018 respetivamente, o que supõe uma pequena oscilação neste período de tempo. O valor mínimo oscila entre 5.7 mg/L, 7.6 mg/L e 6.1 mg/L e o máximo entre 126 mg/L, 116 mg/L e 113 mg/L (tabela 21).

O coeficiente de variação, sendo relativamente elevado demonstra que não existe homogeneidade entre os valores da média aritmética.

A concentração do magnésio na água subterrânea pode ter um controlo essencialmente geológico (como se referiu em capítulo anterior), dependendo assim da localização dos aquíferos e da sua profundidade, já que a maior profundidade se supõe maior tempo de contacto com a rocha.

### ➤ **Potássio (K)**

Segundo Alves *et al.* (1979) a origem do potássio nas águas subterrâneas pode estar relacionada com processos de interação água – rochas vulcânicas alcalinas (escoadas lávicas, vulcanitos, traquitos), ricas em minerais como os feldspatos potássicos, feldspatoides e zeólitos, que são identificados abundantemente nas fissuras do Complexo eruptivo interno antigo, onde ocorrem frequentemente sob a forma de cristais bem desenvolvidos

Nas águas subterrâneas da ilha de Santiago, a concentração média do potássio nos anos 2016, 2017 e 2018 varia, respetivamente, entre 13.46 mg/L, 11.06 mg/L e 14.02 mg/L. As amostragens apresentam valores de dispersão altos (83.40%, 67.66% e 75.23%), demonstrando grande heterogeneidade dos dados.

### **6.1.3 - Aniões**

Os aniões, quando comparados com os catiões, revelam menor afinidade com o meio rochoso que lhes deu origem. Na ilha de Santiago, o anião mais abundante nas águas subterrâneas é o bicarbonato, seguido do cloreto, sulfato e nitrato  $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ .

Convém frisar que estes aniões podem ter na sua origem processos naturais de interação água-rocha e outros resultam maioritariamente de processos potenciados pela atividade humana como a contaminação agrícola.

Os resultados estatísticos que se podem observar na tabela 22 representam extremos dos aniões maiores em solução, das águas em estudo.

**Tabela 22-** Dados estatísticos dos distintos parâmetros químicos (aniões) obtidos nas análises de laboratório para as amostras da zona de estudo (valores em mg/L).

	<b>Colheita</b>	<b>N*</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>Coef. Variação (%)</b>	<b>Max.</b>	<b>Min.</b>
<b>HCO<sub>3</sub></b>	<b>Ag/set. 2016</b>	25	312.2	286.11	191.47	61.33	756.7	85.4
	<b>Mar/abr. 2017</b>	25	317.3	310.39	174.24	54.92	716.1	84.1
	<b>mar/18</b>	18	270.1	256.30	165.57	61.31	872.4	83.5
<b>SO<sub>4</sub></b>	<b>Ag/set. 2016</b>	25	96.08	44.40	106.64	110.99	324.5	7.41
	<b>Mar/abr. 2017</b>	25	79.07	57.85	84.33	106.65	322.6	6.88
	<b>mar/18</b>	18	84.31	55.51	105.52	125.16	406.3	1.96
<b>Cl</b>	<b>Ag/set. 2016</b>	25	141.9	133.39	125.82	88.64	609.97	8.45

	<b>Mar/abr. 2017</b>	25	145	138.04	101.40	69.93	418.1	35.3
	<b>mar/18</b>	18	156.2	136.26	128.81	82.46	514.1	9.01
<b>NO<sub>3</sub></b>								
	<b>Ag/set. 2016</b>	25	49.30	24.47	83.69	169.75	317	0.01
	<b>Mar/abr. 2017</b>	25	28.99	25.65	35.30	121.76	180.5	0.03
	<b>mar/18</b>	18	29.11	12.58	46.46	159.56	226.7	0.01

#### ➤ **Bicarbonato (HCO<sub>3</sub>)**

O bicarbonato é a fase mais estável para o pH menor que 10. Procede fundamentalmente da dissolução de CO<sub>2</sub> atmosférico e do solo, bem como dos carbonatos, essencialmente calcários e dolomites das litologias encaixantes.

Nas águas naturais com pH entre 7 e 8, os carbonatos ocorrem maioritariamente na forma de HCO<sub>3</sub> (ião bicarbonato), com vestígios de ácido carbónico. Quando o pH é superior a 8.3 predominam os iões carbonato (Rodier *et al.* 2009).

Na presença de bastante cálcio, o bicarbonato é retirado da água através da precipitação de CaCO<sub>3</sub> (Hiscock, 2009).

O bicarbonato é, na maioria das águas amostradas, o anião mais importante. As suas concentrações médias mais elevadas (317.3 mg/L) ocorrem no ano de 2016, sendo que nos anos 2016 e 2018, os valores oscilam entre 312.2 mg/L e 270.07 mg/L, respetivamente (tabela 22).

A hidrólise de silicatos, nomeadamente da piroxena, presente com grande expressão nos basaltos, mas também dos feldspatos constitui um fator potenciador da dissolução deste anião nas águas subterrâneas de Santiago. Verifica-se ainda uma grande dispersão dos dados, comprovada pelo elevado coeficiente de correlação, o que explica a enorme instabilidade dos dados em relação à média aritmética e conseqüentemente não existe estabilidade composicional ao nível do bicarbonato.

#### ➤ **Cloreto (Cl)**

O cloro é o elemento mais abundante do grupo dos halogéneos. Apesar de ocorrer em vários estados de oxidação, desde Cl<sup>-1</sup> até Cl<sup>+7</sup>, em forma mais reduzida o cloreto (Cl) é a única expressão em água em contacto com a atmosfera (Hem, 1985).

A circulação de iões cloreto no ciclo hidrológico é em grande parte através de processos físicos. Este controlo foi demonstrado através de ensaios com traçadores em águas subterrâneas descritos por Kaufman *et al.* (1956).

O cloreto está presente em todas as águas naturais, mas as concentrações são normalmente baixas. Na maioria das correntes de superfície, as concentrações de cloreto são menores que as do sulfato ou bicarbonato. Exceções ocorrem quando há contribuição de fluxos com alto teor de cloro ou

resíduos industriais ou à influência de marés oceânicas. É geralmente muito solúvel e muito difícil de precipitar e não sofre oxidação nem redução em águas naturais (Hem, 1985).

É considerado um ião tipicamente conservativo e um excelente traçador químico, dado que experimenta intercâmbios na água. É o anião mais abundante na água do mar e o seu conteúdo na água da chuva depende da distância da costa e da intensidade de precipitação. Na zona de estudo, os valores muito altos deste ião devem-se à influência do aerossol marinho, que transporta e deposita sais de cloreto de sódio que se dissolvem na água da chuva e mesmo dos nevoeiros infiltrando em profundidade. Nas zonas mais próximas da costa onde afloram formações aluvionares e rochas sedimentares, dá-se a origem dos cloretos provenientes da lixiviação de minerais ferromagnesianos e resultantes do contacto com áreas com forte interação com o mar (intrusão salina).

O enriquecimento das águas subterrâneas em cloreto encontra-se essencialmente associado à dissolução de NaCl e à adição a partir da chuva (Berner & Berner, 1987).

A concentração média dos cloretos é de 141.9 mg/L, 145 mg/L e 156.20 mg/L, respetivamente, para os anos 2016, 2017 e 2018, o que demonstra que houve um aumento apreciável para este período. Esse facto pode ser explicado, pela falta de precipitação que tem assolado o país em geral e a ilha em particular provocando a sobre-exploração dos aquíferos, ficando assim vulnerável à influência dos fatores anteriormente indicados.

O valor máximo atingido é excepcionalmente elevado 610 mg/L para o ano de 2016, 418.1 mg/L para 2017 e 514.1 mg/L para 2018, mas são casos pontuais, uma vez que cerca de 80% dos valores estão abaixo de 200 mg/L. Os valores altos do coeficiente de variação, demonstram grande dispersão dos dados (tabela 22).

#### ➤ **Sulfato (SO<sub>4</sub>)**

O sulfato é um constituinte natural da água e essencial à vida. A concentração de sulfatos em águas naturais é muito variável, por razões geológicas e antropogénicas como, por exemplo, a adição de fertilizantes que contêm enxofre (Mendes *et al.* 2004).

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), o Homem está exposto a um consumo médio diário de cerca de 500 mg de sulfatos provenientes da água, do ar e dos alimentos.

No entanto, em áreas com abastecimento de água contendo altos níveis de sulfatos, pode constituir a principal fonte de exposição.

De acordo com Mota Gomes (2007), Lobo De Pina (2009) e Pina (2014), na ilha de Santiago a presença de sulfatos poderá estar relacionada com a presença de rochas carbonatadas

correspondentes à fácies marinha da formação dos órgãos e os sulfatos são encontrados nas Aluviões e nos depósitos das vertentes pertencentes à Unidade Aquífera Recente.

Nesta investigação nota-se que as concentrações mais elevadas estão nas zonas onde se pratica a agricultura, o que indica que a principal fonte de sulfato podem ser as atividades agrícolas, já que utilizam frequentemente os fertilizantes como suporte.

A concentração média de  $\text{SO}_4^{2-}$  é 96.08 mg/L para o ano 2016, 79.07 para 2017 e 84.3 para 2018, com um valor máximo de 322.6 mg/L, 406.3 mg/L e 406.3 mg/L para os anos 2016, 2017 e 2018, respetivamente, o que demonstra uma subida acentuada nesse período (tabela 22).

Os valores máximos obtidos ultrapassam o máximo admissível da norma da OMS e a própria legislação vigente no país (Decreto-lei nº8 de 2004), que é de 250 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano.

#### ➤ **Nitrato ( $\text{NO}_3$ )**

O nitrato ocorre nas águas por dissolução de rochas como os evaporitos ou por oxidação bacteriana de matéria orgânica de origem animal (Cetesb, 2009).

A sua presença na água deve-se à composição da matéria orgânica, à contaminação por aplicação de fertilizantes agrícolas, efluentes de explorações pecuária intensivas, efluentes urbanos e industriais lixiviados de despejo de resíduos sólidos (Rubio *et al.* 1998).

As concentrações excessivas de nitrato, acima de 45 mg/L, na água potável assumem-se como um indicador de contaminação e podem causar metemoglobinemia em crianças. A ocorrência de nitrato e nitrito na água tem sido bastante estudada devido à relação com a saúde pública.

Na zona em estudo a concentração media deste elemento é 49.30 mg/L, 28.99 mg/L e 29.1 mg/L, para os anos 2016, 2017 e 2018, o que parece indicar uma redução considerável desse anião, como se pode evidenciar na (tabela 22).

Segundo a OMS e a legislação vigente no país, relativa às águas destinadas ao consumo humano, a concentração máxima admissível é de 50 mg/L de nitratos, sendo que a maioria das análises realizadas na zona de estudo respeita esse limite.

#### **6.1.4- Componente vestigiais**

Os elementos vestigiários, embora ocorram nas águas em concentrações muito baixas, são muito importantes principalmente pela elevada toxicidade (por exemplo o Al, As, Cd, Pb). A pesquisa efetuada para a maior parte dos metais tipicamente vestigiais não permitiu a sua quantificação na

maioria das amostras. Com efeito, encontram-se abaixo do limite de deteção do método analítico, pelo que não se apresenta o tratamento estatístico que foi efetuado para os restantes parâmetros.

## **6.2- Fatores de controlo do quimismo**

As variações da temperatura das águas subterrâneas não são muito significativas, aproximando-se das temperaturas médias do ar nos níveis aquíferos mais superficiais nas proximidades da costa. Em alguns casos, o valor elevado da temperatura pode indiciar estratificação térmica de alguns aquíferos.

O pH tem um valor mínimo 6.61 e máximo de 8.9, sendo a maioria das amostras apresentam valores superiores a 7, o que lhes confere um carácter alcalino. Não se apresentam águas agressivas, nem uma variação sazonal significativa dos valores do pH.

Considera-se que diferenças ao nível da litologia encaixante e dos terrenos drenados podem justificar esta variação.

Os vários pontos de água estão localizados em meios com distintas litologias, sugerindo nalguns casos mistura ou sobreposição de materiais vulcânicos com materiais carbonatados, justificando-se assim a variação de pH (1.49), que dada a natureza logarítmica da escala é ainda considerável.

Nas águas subterrâneas, os valores da condutividade elétrica são normalmente usados como indicadores do grau de mineralização. No entanto, o aumento da condutividade elétrica pode resultar não só de processos naturais de interação água-rocha (nomeadamente, a dissolução) mas também de processos de contaminação (industrial, doméstica, agrícola, intrusão salina), sendo por isso muitas vezes, também, utilizada na monitorização destes processos de origem antrópica.

Segundo McNeely (1979) as águas com condutividade inferior a  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  classificam-se como doces. No entanto, para valores superior a  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$  e inferior a  $3000 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ , são consideradas ligeiramente salobras. Para as amostras em estudo, o valor médio é de  $1061 \mu\text{S}/\text{cm}$ , enquadrando-se nas águas ligeiramente salobras. Destaca-se que muitas amostras têm valor de condutividade muito inferior a  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ , classificando-se como água doce.

Em determinadas situações, a salinização da água pode também ocorrer devido ao transporte de partículas de sais pelos ventos que sopram dos mares para os continentes incorporando-se no solo e devido a interação água-rocha os sais dissolvem-se na água. Quando as ondas do mar chocam com barreiras ou rochas, a água pulveriza-se no ar, podendo ser transportada a lugares muito distantes, dependendo da direção e velocidade do vento. Este facto pode verificar-se, quando se determina a quantidade de sais na água da chuva em diferentes distâncias do mar (Rhoades *et al.* 1992). Devido à intensa exploração dos aquíferos nas regiões costeiras, são comuns os processos de salinização.

Com base na classificação de Custodio e Llamas (1983), a dureza, cujo valor médio é de 98.18mg/L, enquadra-se nas águas pouco duras. A dureza da água varia geograficamente, dada a natureza geológica dos terrenos que a água atravessa e com os quais tem contacto. Uma água dura está associada a zonas onde os solos são de natureza calcária ou dolomítica e uma água macia está associada a zonas onde os solos são de natureza granítica ou basáltica.

Em geral, as águas subterrâneas, pelo seu maior contacto com as formações geológicas, são mais duras que as águas de superfície.

Os valores médios da concentração dos principais catiões presentes em solução, relativos às três amostragens efetuadas, em função da condutividade elétrica média da água, que se traduz indiretamente a respetiva mineralização, foram projetados no gráfico (figura 34), permitindo evidenciar as principais relações existentes e relacioná-las com os processos hidrogeoquímicos.

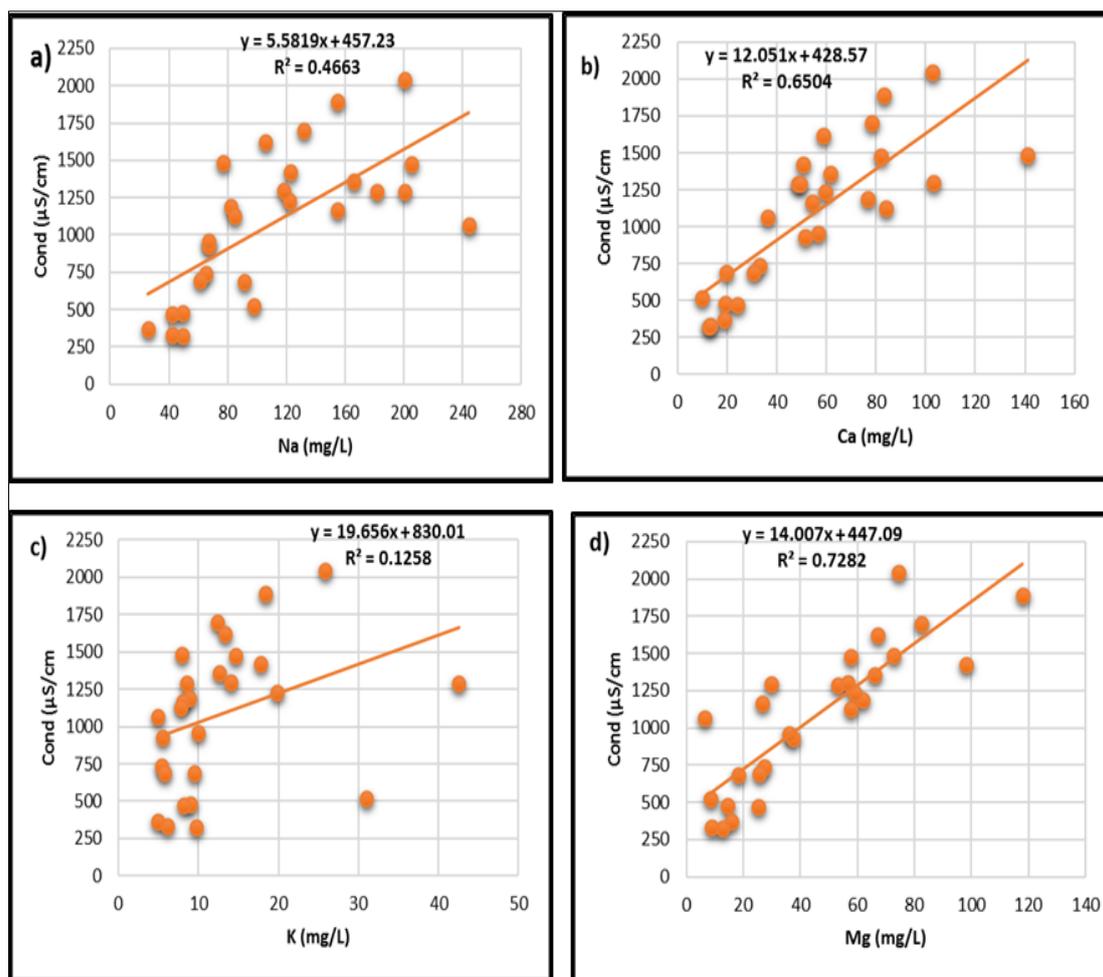
A projeção do sódio em função da condutividade mostra uma relação linear positiva ( $r=0,4663$ ) (figura 34a). Este valor de correlação linear sugere que, a concentração de sódio controla parcialmente a mineralização das águas em estudo.

Os catiões, cálcio ( $r=0,6504$ ) e magnésio ( $r=0,7282$ ) apresentam, na maioria das águas analisadas, uma relação linear, bem marcada com a condutividade, figuras 34 b e d, respetivamente, o que reflete uma origem comum para todos eles, relacionada com o principal fenómeno mineralizador das águas.

O coeficiente de correlação linear entre a concentração em potássio e a condutividade elétrica é, bastante ténue quando se considera o conjunto das amostras ( $r=0,1258$ ) (figura 34c). A ausência de correlação positiva forte, deve-se ao facto de existirem águas cuja mineralização se deve à dissolução de rochas basálticas.

Numa análise geral, é notório, excetuando o caso do potássio, a existência de uma relação linear positiva, forte, marcada entre a concentração nos catiões principais e a mineralização da água, refletida pelos valores elevados de coeficiente de correlação entre as variáveis analisadas.

A relação existente entre os catiões e a condutividade está associada aos processos comuns de entrada deste em solução, através da dissolução de silicatos e no caso do sódio pode também estar associado à adição de sais marinhos.



**Figura 34-** Relação entre os valores médios dos principais cátions e a condutividade elétrica, com as respectivas retas de correlação linear. (a) sódio vs. condutividade; b) cálcio vs. condutividade; c) potássio vs. condutividade; d) magnésio vs. condutividade).

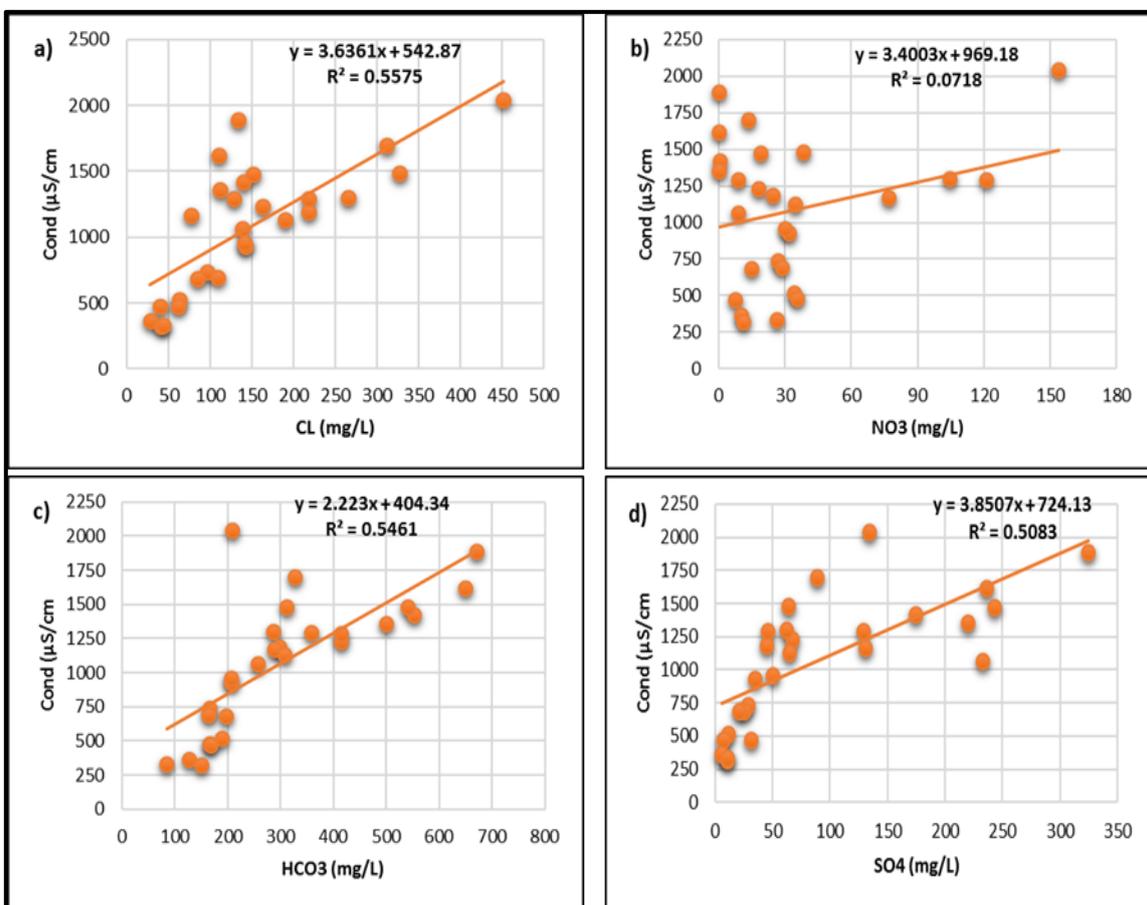
Na figura 35 estão projetados os valores médios dos principais aniões presentes em solução nas três amostragens efetuadas, em função da condutividade elétrica da água, com as respectivas retas de correlação linear.

A projeção da concentração em cloretos com a condutividade elétrica traduz-se num valor de coeficiente de correlação linear igual a 0,5575, que indica a influência, mediana, desta espécie sobre a mineralização das amostras em estudo.

Da figura 35b observa-se a existência de duas tendências distintas indiciando que a condutividade e os nitratos não são correlacionáveis. Nota-se que existe uma tendência em que um aumento dos valores de condutividade mantendo-se os valores de nitratos e outra onde se verifica o aumento de nitrato sem que ocorra grande aumento de condutividade, o que pode indiciar que, muito provavelmente, estamos na presença de poluição agrícola.

O coeficiente de correlação linear da concentração do bicarbonato em função da condutividade elétrica é 0,5461, sugerindo que este anião contribui significativamente para a mineralização total da água. Verifica-se um ligeiro aumento da condutividade com o aumento do ião bicarbonato em solução (figura 35c), o que poderá estar associado à dissolução de silicatos, promovendo uma libertação de  $\text{HCO}_3$  para a água, e à diluição de voláteis vulcânicos.

Da análise da figura 35d, é possível notar que existe uma correlação positiva entre a condutividade e a concentração em sulfato, com o valor de 0,5083. Verifica-se, então, que o aumento da condutividade, e assim da mineralização das águas subterrâneas, indicia ser independente do sulfato.



**Figura 35-** Relação entre os valores médios dos principais aniões e a condutividade elétrica, com as respetivas retas de correlação linear. (a) cloreto vs. condutividade; b) nitrato vs. condutividade; c) bicarbonato vs. condutividade; d) sulfato vs. condutividade).

À semelhança do que acontece com os cátions, é possível observar que existe uma correlação linear positiva entre as variáveis bem marcada (excetuando o nitrato), traduzida por um coeficiente de correlação mediano entre os aniões e a mineralização dos fluidos.

A caracterização hidroquímica das amostras de água nesta investigação, foi realizada com base na análise dos resultados analíticos obtidos para os principais iões em solução, conforme se passa de seguida a referir.

### **6.3- Fácies hidroquímicas**

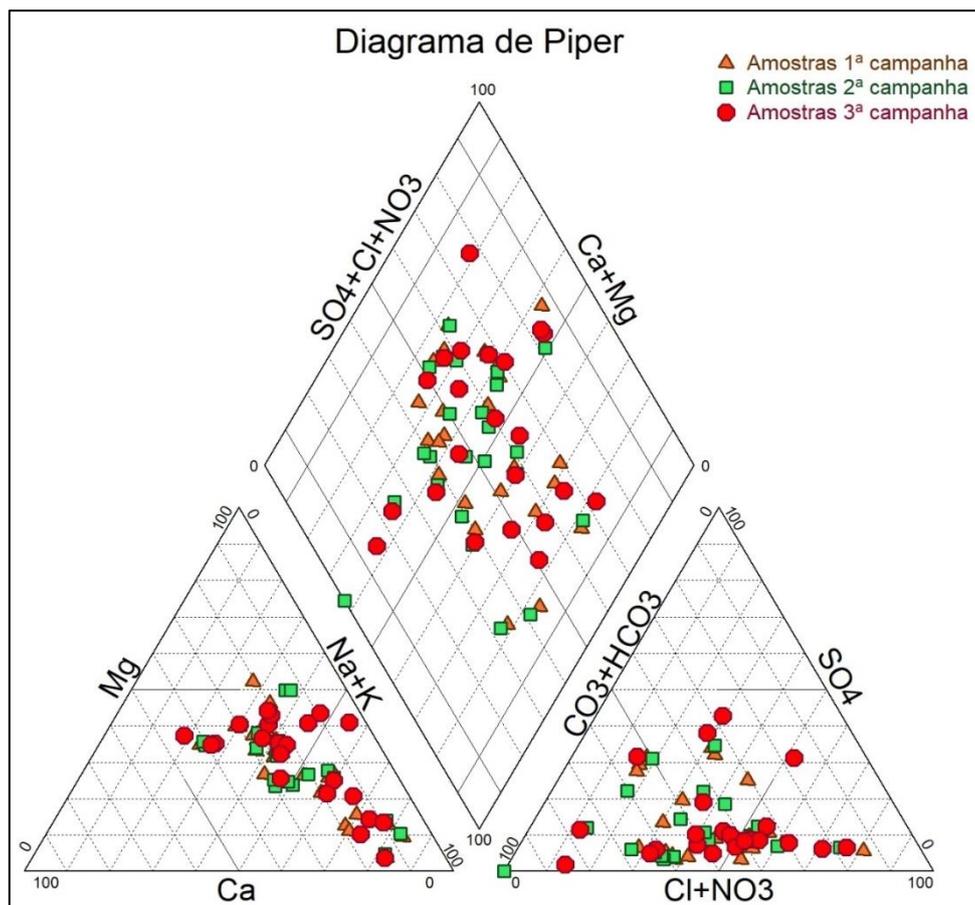
Trabalhos anteriores de Mota Gomes (2007) e Lobo de Pina (2009) indicam que as fácies hidrogeoquímicas predominantes na ilha de Santiago, de acordo com as unidades hidrogeológicas, correspondem a fácies hidroquímica do tipo cloretada-bicarbonatada sódica (Cl-HCO<sub>3</sub>-Na) para a Unidade de base; fácies bicarbonatada-cloretada sódica (HCO<sub>3</sub>-Cl-Na) para a Unidade Intermédia; e, Unidade Recente cuja fácies predominante é a cloretada sódica (Cl-Na).

Segundo estes autores, na ausência de episódios de contaminação, as águas subterrâneas têm uma composição do tipo Na-HCO<sub>3</sub>-Cl nas zonas mais altas da ilha, onde afloram as formações da Unidade Aquífera de Base e Intermédia e onde ocorre grande parte da precipitação. Esta composição, quando em amostras de reduzida condutividade, revela a influência do aerossol marinho na composição da água de infiltração recente. A presença de ião bicarbonato poderá estar relacionada com a reação do CO<sub>2</sub> do solo durante o processo de infiltração nas zonas de recarga e com os primeiros estádios de dissolução de minerais carbonatados e hidrólise de minerais silicatados. Os valores de pH destas águas são ligeiramente ácidos (<7,0) e as condutividades elétricas relativamente baixas (<1000 µS/cm), em parte justificados por as águas terem tempos de residência ainda relativamente curtos.

Para classificar as amostras de água colhidas no âmbito desta investigação, fez-se a projeção dos dados analíticos no digrama de Piper, que garante a caracterização da fácies hidroquímica, importante para detetar a mistura das águas, precipitações, dissoluções, modificações etc.

Este tipo de gráficos possibilita a projeção de um elevado número de pontos de água permitindo classificar e comparar grupos de águas distintos, com base nos iões predominantes, recorrendo ao losango no topo (Custodio *et al.*1983).

No diagrama de Piper da figura 36, projetam-se os pontos representativos da composição maioritária das amostras de água da ilha de Santiago.



**Figura 36-** Diagrama de Piper das amostras de águas subterrâneas analisadas

Como se pode verificar pelo diagrama de Piper (com as amostras das três campanhas), as características químicas não diferem de forma clara ao longo do período em análise. Esta observação já tinha sido feita a propósito da análise da evolução temporal nas três sub-bacias da bacia hidrográfica de Santa Cruz (capítulo 5).

Da análise das amostras em estudo, as águas classificam-se nas seguintes fácies: Cloretadas Mistas (24%), Bicarbonatadas (23%), Sódicas mistas (20%), sódicas bicarbonatadas (15%), Mistas (15%), Sódicas cloretadas (1%) e magnésiana bicarbonatadas (1%) das amostras.

Estas classificações, juntamente com as correlações referidas no ponto anterior mostram que a composição química das águas na ilha de Santiago tem variações regionais, influenciadas por vários fatores como: a geologia, tempo de residência, composição da água da chuva, impacto das atividades antrópicas, altitude, interação água-rocha durante o período de infiltração, distância à costa. Acresce ainda que o impacto das atividades agrícola, intrusão salina, aerossol marinho e precipitação de novos minerais, são os principais responsáveis pelo grau e tipo de mineralização presentes na água.

No que que concerne a monitorização ao longo do tempo (três campanhas de amostragem) não se verificou grandes variações apesar destes pontos de água estarem sob uma intensa exploração e serem afetados pela falta de chuva que tem assolado o País nos últimos anos.

#### **6.4- Qualidade da água para o consumo humano e para rega**

O conceito de qualidade da água depende intrinsecamente do destino da mesma.

Assim, as exigências para uma água destinada ao consumo humano são diferentes das destinadas ao uso industrial ou para rega.

A qualidade da água pode ser definida por um conjunto de características físico-químicas, microbiológicas, biológicas, etc., que lhe são próprias. A qualidade será BOA ou MÁ para um determinado uso, em função das características se enquadrarem ou não nas normas exigidas para os fins em vista.

A água representa um bem essencial à manutenção da vida, pelo que deve ser acessível à comunidade, e apresentar condições de potabilidade como ser salubre, limpa e isenta de qualquer perigo para a saúde pública (WHO, 2004).

Os aspetos da qualidade da água, cada vez mais, são interiorizados como fundamentais para garantia de saúde das comunidades. Há uma tendência para uma tomada de consciência cada vez maior de que a água representa saúde. E que com a melhoria dos serviços de abastecimento de água há uma melhoria direta na saúde da população. Nestas condições, a qualidade da água não poderá continuar a ser preterida relativamente à quantidade, pelo que se constata a necessidade de criação e cumprimento dos instrumentos normativos que permitam controlar a qualidade da água destinada ao consumo humano (Decreto-Lei n.º 8 /2004 de 23 de fevereiro).

Nesta investigação recorreu-se aos parâmetros que se acabou de referir para avaliar a qualidade da água para consumo humano e para rega.

##### **6.4.1- Água para o consumo humano**

A qualidade da água para consumo humano é determinada por documentos legais elaborados, tanto a nível nacional como internacional. As tabelas usadas para a realização desta investigação constam maioritariamente no Decreto-Lei nº8/2004, que faz parte do quadro legal da República de Cabo Verde.

As características da água para ser considerada de qualidade para consumo humano não colocar em risco a saúde, deve ser agradável ao paladar e à vista dos consumidores e não causar a

deterioração ou destruição das diferentes partes do sistema de abastecimento (Decreto-lei nº236/98 de 1 de agosto).

O controlo da qualidade da água destinada ao consumo humano tem por objetivo proteger a saúde humana dos efeitos nocivos resultantes de qualquer contaminação da água destinada ao consumo humano, assegurando a sua salubridade e limpeza, ou seja, esta água é caracterizada por não conter microrganismos, parasitas nem quaisquer substâncias químicas, em quantidades ou concentrações que constituam um perigo potencial para a saúde humana.

Visando a avaliação da qualidade das águas em estudo para consumo humano, procurou-se analisar todos os parâmetros físico-químicos, identificando os que excediam os valores recomendados pela legislação em vigor.

Na tabela 23 apresenta-se alguns parâmetros e respetivos valores padrão (Decreto-Lei nº8/2004), indicando os valores médios registados nas amostras analisadas. Pode-se ainda identificar as amostras que ultrapassam os valores máximos admissíveis, para as águas destinadas ao consumo humano e para rega. As amostras a laranja representam as que respeitam os limites paramétricos, enquanto as amostras representadas a vermelho representam as que ultrapassam os valores máximo admissíveis pela legislação.

**Tabela 23-** Valores médios dos parâmetros físico químicos selecionados para a avaliação da qualidade de águas subterrâneas da área de estudo com base na legislação vigente em Cabo Verde.

	pH	C.E	Ca	Cl	Mg	Na	K	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Turv	Dz	NO <sub>2</sub>
<b>AS-12</b>	7.9	521.7	9.8	63.3	8.4	97.5	31.0	11.4	34	0.6	18.2	2.1
<b>FB-39</b>	7.8	1699.5	78.1	311.2	82.6	132.0	12.4	88.7	13.4	0.1	160.7	8.4
<b>FBE-100</b>	7.4	476.5	19.3	39.4	14.6	49.2	9.1	7.2	35.3	0.2	33.9	0.5
<b>FBE-144</b>	7.3	1189	76.7	218.4	62.0	82.1	8.9	44.6	24.2	0.3	138.7	5.2
<b>FBE-145 B</b>	7.8	1293.3	48.6	218.7	29.8	181.3	42.5	46.0	8.8	0.4	78.4	7.2
<b>FBE-153 BIS</b>	7.9	738	33.0	96.3	27.5	65.3	5.4	28.1	26.5	1.7	60.5	3.5
<b>FBE-156</b>	7.2	691	30.7	109.2	25.5	61.3	5.8	25.2	28.6	0.1	56.2	3.2
<b>FBE-1A</b>	7.6	367.7	18.8	27.7	15.8	25.8	5.0	5.5	10.1	0.2	34.6	0.2
<b>FBE-58</b>	7.7	322.3	12.7	40.4	12.6	49.4	9.8	10.7	11.2	0.2	25.3	1.1
<b>FBE-90</b>	7.9	1421.7	50.5	139.6	98.3	122.5	17.8	174.3	0.4	0.3	148.7	3.1
<b>FRB-01</b>	8.3	1231.3	59.4	162.6	59.2	122.0	19.8	67.0	18.1	0.3	118.6	5.0
<b>FST-857</b>	7.5	333.7	13.0	43.8	8.8	42.5	6.2	10.2	26.3	0.3	21.8	1.3
<b>FST-871</b>	7.6	1065.3	36.5	139.1	6.5	244.3	5.0	232.0	8.6	0.2	43.0	2.9
<b>FST-877</b>	7.5	1477.3	82.1	150.9	57.7	205.0	14.6	243.1	18.7	0.2	139.7	6.2
<b>FST-878</b>	7.5	1619.3	58.5	110.9	67.1	105.9	13.3	236.2	0.2	0.4	125.6	3.2
<b>FST-882</b>	7.6	1356.7	61.4	111.6	66.1	166.2	12.6	219.2	0.0	0.3	127.6	1.1
<b>FST-895</b>	7.8	1890	83.2	133.4	118	155.0	18.4	324.5	0.0	0.2	201.2	3.8
<b>FST-912</b>	7.8	1167.7	54.4	77.3	26.6	154.7	8.1	130.3	76.7	0.2	80.9	5.2
<b>FST-917</b>	7.7	686.3	19.6	84.2	18.3	91.1	9.5	20.9	14.8	0.3	37.9	1.2
<b>FST-922</b>	7.2	929.3	51.6	142.2	37.6	66.9	5.6	34.2	31.7	0.3	89.1	5.6
<b>FST-924</b>	7.8	1289.3	49.4	127.9	53.2	200.7	8.6	128.5	121.1	0.2	102.6	10.5
<b>FT-09</b>	7.7	1128.7	84.0	190.5	57.9	84.9	7.8	64.5	34.4	0.2	141.9	5.3
<b>FT-171</b>	7.3	957.7	56.5	140.7	36.2	67.3	9.9	49.9	29.8	0.2	92.7	4.7
<b>FT-202</b>	7.8	471.3	24.1	61.2	25.3	41.9	8.1	31.3	7.6	0.2	49.4	0.7
<b>FT-63</b>	7.5	1299	103.2	266.1	56.7	118.2	14.0	61.9	104.6	0.3	159.9	8.5
<b>P-5843</b>	8.2	2042.7	102.5	451.7	74.5	200.7	25.8	133.6	153.7	0.2	177	11.4
<b>SP-17</b>	7.6	483.7	141	327.4	72.9	76.9	7.9	63.5	38.3	0.3	213.9	5.5
<b>Valor padrão em Cabo Verde</b>	6.5 - 8.5	400	-100	25 - 250	30 - 50	20 - 200	10 - 12	25 - 250	25 - 50	0.4 - 5	- 500	- 3

Da análise à tabela 23, constata-se que apenas seis amostras (destacadas a laranja), perfazendo 22% das amostras, cumprem com rigor os valores paramétricos estabelecidos pela legislação vigente no país. As restantes 21 amostras (destacadas a vermelho), 78%, não respeitam os valores máximos admissíveis para algum ou alguns parâmetros

O Cálcio tem valores superiores ao legalmente aceitável em duas amostras, o que representa 7.4% das amostras de água em estudo.

Relativamente ao Cloreto, destaca-se o incumprimento da amostra P- 58-43 e PA. Com efeito, essas amostras ultrapassam os valores estabelecidos pela legislação (250 mg/L), representando 7.4% do conjunto das amostras analisadas.

Em relação ao magnésio, verifica-se que 48% das amostras em estudo apresentam valores acima do valor máximo admissível (50 mg/L).

No que diz respeito ao sódio, constata-se que ultrapassa o limite estabelecido em 2 amostras, correspondendo a 7.4% de todas as amostras de água analisadas. Destaca-se a amostra FST-871 com o valor médio de 244.3 mg/L.

Os resultados obtidos nas análises para presença de potássio indicam que 41% das amostras apresentam valores acima do valor máximo admissível na legislação em vigor no país. O potássio é um elemento fundamental à nutrição humana, e está presente em diversos alimentos, como carnes, peixes e frutas, não existindo evidência de que a sua presença na água potável possa causar qualquer dano à saúde do consumidor, embora exista uma preocupação para indivíduos de grupos de alto risco, como portadores de insuficiência renal, hipertensão e diabetes, por exemplo, para ingestão de águas tratadas com potássio (Cetesb, 2012).

Os sulfatos estão entre os iões mais abundantes em águas naturais, podendo ser de origem geológica, resultado de contaminação por águas residuais, fertilizantes e intrusão salina. De acordo com a OMS, e com o conhecimento atual não existem riscos para a saúde associados aos sulfatos na água para o consumo humano. No entanto, alerta-se para o facto de elevadas concentrações poderem conferir sabor e ter efeito laxante. O Decreto-Lei nº8 de 2004 estabelece 250 mg/L como valor máximo admissível para água destinada ao consumo humano. Nesta investigação, nota-se que 1 (uma) amostra ultrapassa esse valor. Os nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) representam um dos compostos azotados de maior importância, na medida em que são um componente essencial à formação da biomassa das plantas e dos animais e assumem-se também como um contaminante relevante nas águas superficiais e subterrâneas utilizadas na produção de água para consumo humano (ex: abundância nos fertilizantes aplicados na agricultura).

A principal consequência para a saúde da presença de nitratos na água está associada à sua potencial conversão em nitritos, e não à sua presença per si. O Decreto-Lei n.º 8 /2004 de 23 de fevereiro, tendo por objetivo proteger a saúde humana dos efeitos nocivos resultantes da eventual contaminação dessa água, define um valor paramétrico para os nitratos de 50 mg/l. Os resultados obtidos apontam para quatro amostras, correspondente a 14.8%, cujo o valor ultrapassa os limites paramétricos estabelecidos pela legislação Cabo-verdiana.

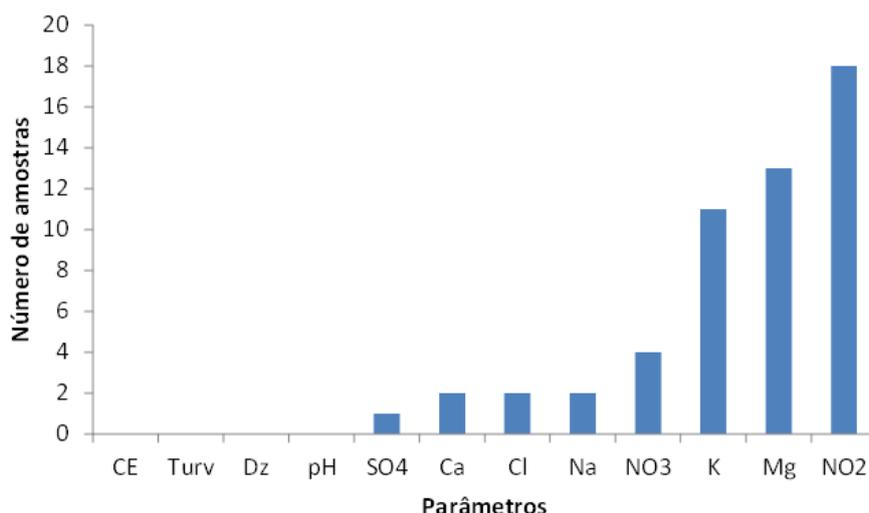
Os nitritos, destacam-se por representarem o elemento, de entre os parâmetros, que apresentam maior incumprimento, com 18 (dezoito) amostras, correspondente a 66.7% do total das amostras de águas subterrâneas.

Os nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) são produto da oxidação do amónio ou da redução dos nitratos. Na água, em condições de oxidação normais, a conversão dos nitritos em nitratos é quase imediata. A sua presença na água deverá, por isso ser pontual e temporária. A sua origem pode ser biológica, resultante da redução microbiana dos nitratos, ou química, por oxidação do amónio/amoníaco proveniente, por exemplo, da desinfecção de água através das cloraminas, em especial a temperaturas elevadas.

Atendendo aos valores apresentados quanto à presença de nitritos torna-se imperativo tomar medidas adequadas para a resolução deste problema, uma vez que, os nitritos, quando consumidos diretamente ou formados no estômago na sequência da redução dos nitratos, fixam na hemoglobina e possibilitam o desenvolvimento da doença metahemoglobinemia ou cianose (ou doença do bebé azul) que conduz à morte por asfixia.

No que se refere à condutividade elétrica, turvação e dureza, os resultados mostram que os teores de todas amostras de águas estão dentro dos padrões de potabilidade, isto é, inferiores aos respetivos valores paramétricos.

Com base nos critérios estabelecidos para a qualidade da água para o consumo humano, faz-se uma análise dos parâmetros que ultrapassam os valores padrões legalmente estabelecidos, conforme se pode analisar na figura 37.



**Figura 37-** Número de amostras que ultrapassam o padrão de potabilidade em alguns parâmetros

Analisando os critérios que definem/avaliam a qualidade da água para o consumo humano, nota-se que a amostra P-58-43 é a que apresenta maior incumprimento, com 6 parâmetros cujos resultados ultrapassam o valor máximo admissível (figura 38).

Embora este ponto de água esteja a ser usado essencialmente para rega e construção civil requer alguma atenção e acompanhamento por parte das autoridades competentes.

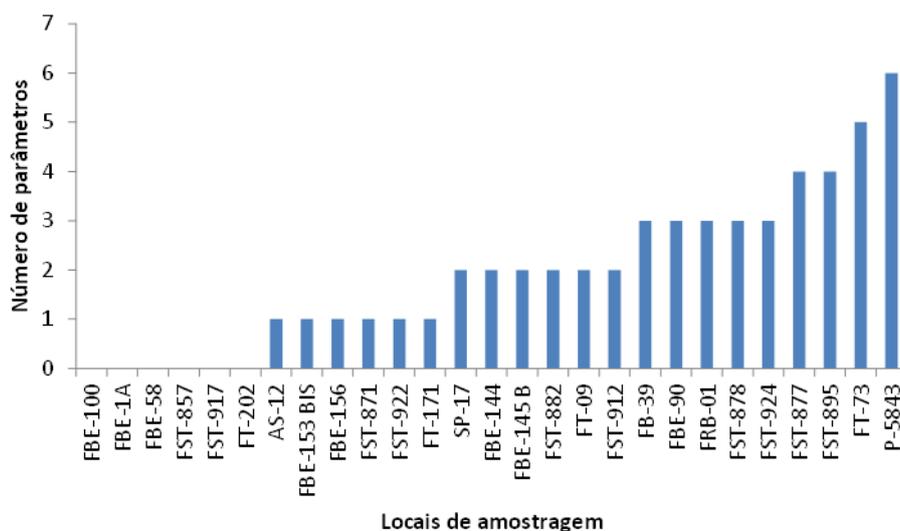
Na figura 38, apresentam-se as amostras que denotam os incumprimentos identificados.

A amostra FT-63, apresenta incumprimento em 5 parâmetros, seguindo-se FST-895 e FST- 877 que não respeitam os valores padrões em 4 parâmetros.

Com 3 parâmetros em incumprimento surgem as amostras FST-924, FST-878, FRB-01, FBE-90, FB-39.

As amostras FST-912, FT-09, FST-882, FBE-145B, FBE-144, SP-17 apresentam 2 parâmetros acima dos valores padrões estabelecidos na legislação em vigor no país, seguidos pelas amostras FT-171, FST-922, FST-871, FBE-156, FBE-153BIS, AS-12, FG com 1 parâmetro cujo o valor ultrapassa os limites máximos admissíveis.

As amostras que respeitam na íntegra o padrão de potabilidade são FT-202, FST-917, FST-857, FBE-58, FBE-1A, FBE-100.



**Figura 38-** Distribuição das amostras com os números de parâmetros que não respeitam o valor de potabilidade legalmente exigidos

Nota-se que a nível físico-químico, os resultados evidenciam que 22.2% das amostras da água em estudo cumprem integralmente os critérios de avaliação da qualidade da água destinada ao consumo humano, o que é manifestamente baixo.

Enfatiza-se a necessidade de avaliar a qualidade microbiológica destas águas, uma vez que a maioria dos pontos de água se situam nas áreas agrícolas e a proteção não é a mais adequada nos furos. Nota-se que as amostras colhidas na unidade Intermédia são as que apresentam padrão de potabilidade. Outro aspeto a destacar é que os pontos de água situados nas zonas agrícolas apresentam um nível bastante elevado de nitrito, pelo que são necessárias medidas urgentes de forma a debelar esta situação.

#### 6.4.2- Água para uso agrícola

A água imprópria para consumo humano pode muitas vezes ser usada para outros fins, que exigem grande consumo de água: irrigação agrícola, rega de espaços verdes (incluindo jardins e áreas florestais), lavagem de ruas, sanitários públicos, combatem a incêndios e abastecimento de fontes decorativas (Silva *et al*/2007).

Segundo Davis e De Wiest (1971), os critérios de classificação dependem do tipo de planta, do volume de rega, da qualidade do solo e do clima local.

A qualidade da água para a rega é fundamental para a continuidade da fertilidade dos solos. Existem várias classificações para as águas destinadas a rega. Uma das mais utilizadas é do “U.S. Salinity Laboratory Staff” (USSLS, 1954), usando o diagrama Riverside, onde é representada a razão de

adsorção do sódio (SAR) em função da condutividade elétrica. De acordo com Custodio e Llamas (1983) este índice traduz o efeito da concentração relativa de cátions na acumulação de sódio no solo e é calculado pela seguinte fórmula:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

Sendo as concentrações expressas em miliequivalentes por litro (meq/L). O sódio pode produzir efeitos prejudiciais como a redução da permeabilidade e o aumento da dureza do solo, devido à troca de íons cálcio e magnésio com o sódio.

O diagrama de Riverside (figura 39) permite assim avaliar a qualidade das águas para o uso agrícola, combinando as diferentes classes de perigo de salinização de solo (C) e perigo de alcalinização do solo (S). As águas em estudo agrupam-se em três setores (C2-S1, C3-S1, C3-S2).

De acordo com Custodio e Llamas (1983), as respectivas classes podem ser descritas de seguinte modo:

**i) Perigo de salinização:**

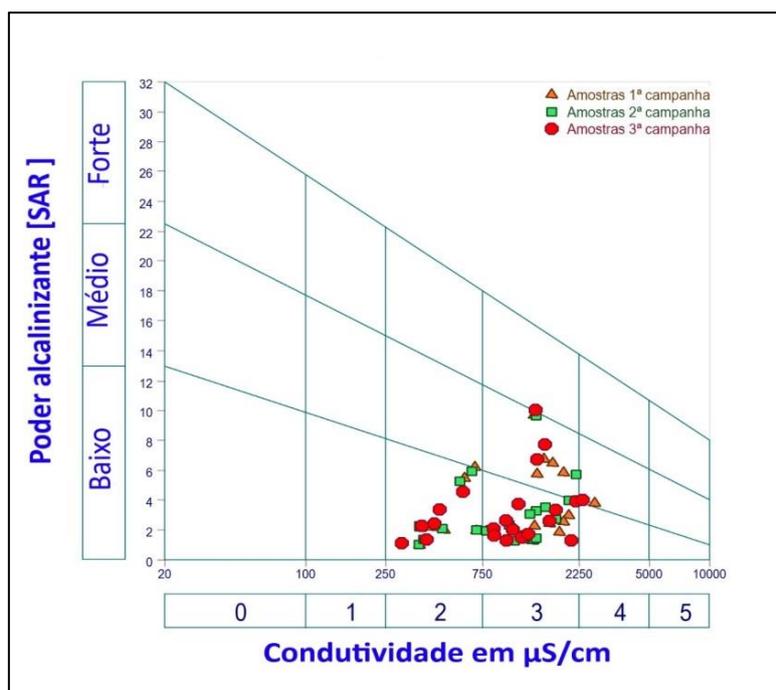
C2 – águas de salinidade média podendo ser usadas para rega em quantidades moderadas desde que ocorra alguma lixiviação, possibilitando o desenvolvimento de culturas com alguma tolerância aos sais;

C3 – águas muito salinas com condutividade elétrica entre 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 2250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , que não devem ser usados em solos com drenagem deficiente e quando são utilizadas há que gerir bem as culturas e a salinidade do solo.

**ii) Perigo de alcalinização:**

S1 – águas com baixo teor de sódio, aplicável em quase todos os tipos de solo sem grande risco de desenvolver níveis preocupantes de concentração de sódio por troca iónica;

S2 – águas que apresentam um teor médio de sódio que pode causar problemas de alcalinização em solos de textura fina com baixa lixiviação e com elevada capacidade de troca catiónica. Por outro lado, podem ser aplicadas em solos grosseiros com boa permeabilidade.



**Figura 39-** Diagrama Riverside com a projeção das amostras de águas analisadas

Como se pode ver na figura 39 as amostras (63%) projetadas no campo C3-S1 podem ser classificadas como razoáveis para rega, apesar de possuírem alto risco de salinização conferido pelo alto valor da condutividade, mas torna-se indispensável uma boa gestão da cultura e da exploração do recurso água. Apesar de haver alto risco de salinização verifica-se baixo risco de absorção do sódio. 33,3% das amostras são consideradas boas para a rega, pois estão projetadas no sector C2-S1, conferindo-lhes um risco moderado de salinização e baixo perigo de absorção de sódio. Nestas amostras existe uma certa margem de manobra no que se refere à exploração e gestão das culturas, mas requerem cuidados devido ao facto de nos últimos anos o nível de precipitação ter diminuído drasticamente.

Destaca-se a amostra FST-871 que se enquadra no sector C3-S2 apresentando-se com maior risco de salinização e alcalinização.

Em síntese, nota-se que a água analisada requer alguma atenção pelo facto de possuírem o perigo de salinização relativamente alto em cerca de 67% das amostras, e perigo de salinização moderado em cerca de 33%, não existindo amostras com perigo de salinização baixo.

Relativamente à alcalinização (risco de sódio), cerca de 96% das amostras possui um risco de absorção de sódio baixo e só 4% das amostras (FST-871), possui risco médio de alcalinização.

Os resultados indicam uma certa degradação da qualidade dos recursos hídricos na ilha, causado, principalmente, pela sobre exploração dos aquíferos e da limitada recarga que tem

acontecido nos últimos anos, muito por culpa da fraca precipitação e da seca que tem assolado a ilha de Santiago, particularmente nos últimos dois anos. Permite ainda aferir que urge a necessidade de tomadas de medidas concernentes ao uso da água e melhoria de condições de acesso a água da rede doméstica. É necessário também a modernização nas práticas agrícolas, com maior uso da rega gota-gota, e a reutilização das águas residuais como forma de aliviar o “stress hídrico na ilha”, pelo que se considera que esta investigação facultou pistas importantes e contribuiu para retratar a atual situação, evidenciando a necessidade de monitorização e controlo sistemático.

## 6.5- Tratamento estatístico: Matriz de correlação e análise multivariada de dados

Com a finalidade de extrair mais informação das análises físico-químicas, nomeadamente quanto aos fatores de controlo da hidroquímica, procedeu-se a uma análise de dados recorrendo a diferentes ferramentas estatísticas.

### ➤ Matriz de correlação

A matriz de correlação de Pearson pode ser uma ferramenta útil para identificar relações entre os parâmetros analisados e eventualmente auxiliar na interpretação de assinaturas geoquímicas.

A tabela 24 representa a matriz de correlação de Pearson obtida para os principais parâmetros, em que se considera a correlação estatisticamente significativa ao nível da probabilidade igual a 0,01 e 0,05. Selecionaram-se 14 parâmetros, aplicados a todas as amostras analisadas.

**Tabela 24-** Resultado do teste de significância em que se obtêm os coeficientes de correlação de Pearson entre os principais parâmetros analisados na presente tese.

	pH	C.E	Si	Na	Ca	Mg	K	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	Turv	Temp	Alk	Dz
pH	1													
C.E	,068	1												
SiO <sub>2</sub>	-,347	,358	1											
Na	,193	,709 <sup>**</sup>	-,174	1										
Ca	-,010	,833 <sup>**</sup>	,327	,375	1									
Mg	,032	,840 <sup>**</sup>	,575 <sup>**</sup>	,330	,707 <sup>**</sup>	1								
K	,236	,359	,107	,336	,171	,226	1							
SO <sub>4</sub>	,005	,711 <sup>**</sup>	,178	,668 <sup>**</sup>	,389	,635 <sup>**</sup>	,104	1						
Cl	-,059	,717 <sup>**</sup>	,264	,446	,800 <sup>**</sup>	,471	,355	,117	1					
NO <sub>3</sub>	-,041	,388 <sup>**</sup>	-,075	,498 <sup>**</sup>	,403	,112	,162	-,026	,578 <sup>**</sup>	1				
Turv	,337	-,137	,147	-,129	-,141	-,112	,053	-,142	-,098	-,055	1			
Temp	,184	,079	-,498 <sup>**</sup>	,377	,040	-,227	,148	,039	,139	,259	,088	1		
Alk	,113	,776 <sup>**</sup>	,332	,518 <sup>**</sup>	,507 <sup>**</sup>	,826 <sup>**</sup>	,293	,856 <sup>**</sup>	,162	-,043	-,108	-,029	1	
Dz	,011	,906 <sup>**</sup>	,484	,382	,929 <sup>**</sup>	,919 <sup>**</sup>	,214	,550 <sup>**</sup>	,693 <sup>**</sup>	,284	-,137	-,097	,716 <sup>**</sup>	1

Pode-se deduzir que existem muitos parâmetros correlacionados entre si (destacados a azul), sendo de destacar o conjunto condutividade elétrica (C.E.), Alcalinidade (Alk) e dureza (Dz). Destaca-se também o conjunto denominado “grupo catiónico” formado pelos parâmetros correlacionados com magnésio (Mg), cálcio (Ca) e sódio (Na) e o “grupo aniônico” formado pelos parâmetros sulfato ( $\text{SO}_4$ ) e cloreto (Cl).

#### ➤ **Análise multivariada de dados**

A estatística multivariada aplicada à monitorização ambiental tem sido frequentemente utilizada no tratamento dos resultados obtidos a partir de análises físico-químicas, com o uso de ferramentas computacionais que permitem explorar estes dados para verificar a existência de similaridades entre as amostras. São diversos os métodos e técnicas de tratamento disponíveis, incluindo classificadores que permitem reconhecimento de padrões.

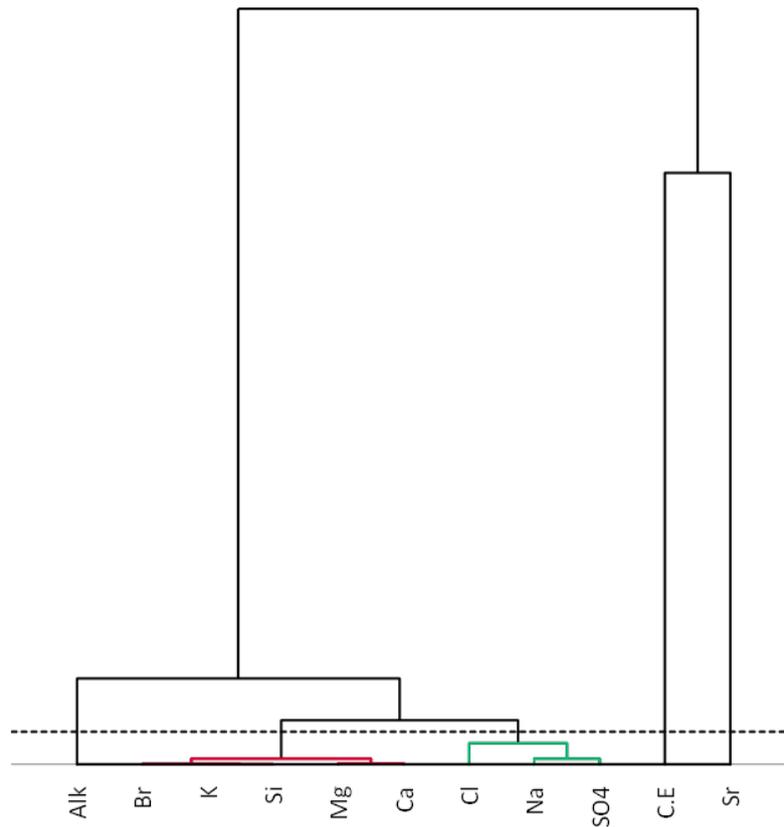
#### ➤ **Classificação hierárquica**

A análise de Cluster designa uma série de procedimentos estatísticos sofisticados que podem ser usados para classificar e organizar um conjunto de variáveis para as quais se conhece informação pormenorizada, por observação das semelhanças e dissemelhanças entre elas. Essa informação conhecida é organizada em grupos relativamente homogêneos (Clusters).

Sokal et al. (1963) deram uma grande contribuição para o desenvolvimento destes métodos o que fez com que tenham sido aplicados a um leque muito diversificado de ciências, destacando a classificação hierárquica como a mais utilizada nas ciências da terra.

Na presente tese a análise de Cluster (AC) foi empregada com o intuito de evidenciar similaridade hidroquímica entre pontos monitorizados, considerando o conjunto das características físico-químicas das águas.

Na figura 40 apresenta-se o dendograma resultante da aplicação da classificação hierárquica para as amostras de água analisadas nas três campanhas (n=67) A regra de agrupamento foi o método Ward, (1963) tomando como medida a distância Euclidiana. A escala apresentada mostra o afastamento ou proximidade entre as variáveis.



**Figura 40** - Dendograma resultante da aplicação da classificação hierárquica às amostras de água da ilha de Santiago

Observando a figura 40 verifica-se, para a distância de corte igual a 30 %, a existência de cinco grupos de variáveis:

I – Alcalinidade (Alk);

II- Br, K, Si, Mg, Ca;

III- Cl, Na, SO<sub>4</sub>;

IV- Condutividade Elétrica (C.E.);

V – Sr

A condutividade elétrica, alcalinidade e estrôncio apresentam-se como parâmetros discriminadores, na medida em que formam grupos singulares. Este padrão sugere a relação destes três parâmetros com a diversidade de processos de controlo da hidroquímica, nomeadamente a contribuição marinha e o controlo geológico/litológico.

Ou seja, quer a entrada de água do mar, quer a dissolução de silicatos e carbonatos presentes nas formações hidrogeológicas da ilha condicionam os valores de CE e de Alk.

Por sua vez, o estrôncio tanto pode ter origem marinha, como resultar da dissolução de rochas carbonatadas, onde tipicamente substitui o cálcio. Os aniões cloreto, sódio e sulfato ocorrem no

mesmo grupo, confirmando a relação esperada pela contribuição marinha, associada aos fenômenos de salinização. Destaca-se um grupo que inclui uma série de parâmetros maioritariamente relacionados com a interação água-rocha (como o Si, Ca, K e Mg).

## **6.6- Análise fatorial**

O método de análise fatorial permite reduzir a informação presente num universo de dados com X variáveis, identificando um número reduzido de fatores que, por sua vez, representam as variáveis originais, com perda mínima de Informação (Bisquerra, 1989).

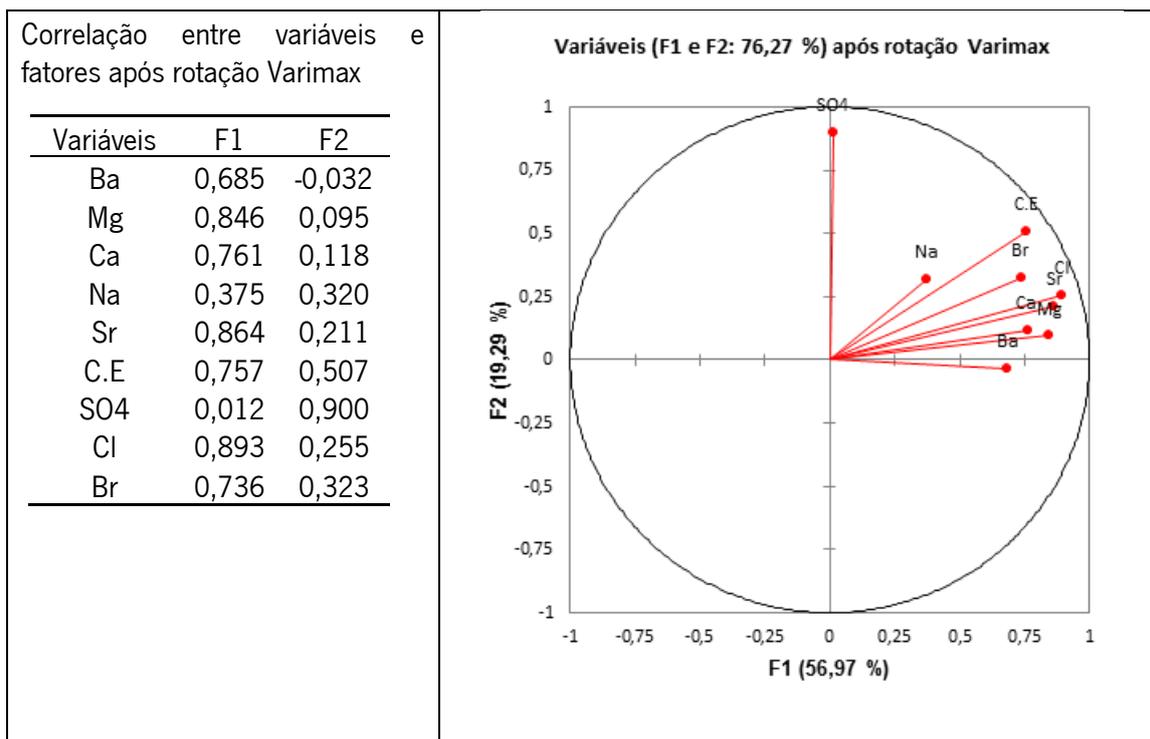
Com a aplicação de análise fatorial aos dados físico-químicos da água pretende-se evidenciar vetores que expliquem o comportamento hidrogeoquímico do conjunto de pontos de água amostrados. Para tal, selecionou-se um conjunto de variáveis (parâmetros) que à partida poderão estar a condicionar a hidroquímica e, assim, explicar padrões de comportamento.

Os resultados da aplicação desta ferramenta sugerem que este conjunto de variáveis se relaciona com dois fatores principais. Na figura 41 apresenta-se o posicionamento dos parâmetros relativamente a estes dois fatores, de tal forma que as coordenadas do gráfico representam o peso que cada parâmetro exerce.

Estas relações podem sugerir a seguinte atribuição dos fatores:

- ✓ - Fator 1 – contribuição marinha, relacionada com a forte salinização que se observa por toda a ilha e processos de interação água-rocha;
- ✓ -Fator 2 – contribuição antrópica, possivelmente associada a poluição de origem agrícola, com mobilização de sulfato.

O ião sulfato relaciona-se fortemente e de forma positiva apenas com o fator 2, enquanto os restantes parâmetros têm correlação forte ou moderada com o fator 1. O conjunto de parâmetros mais relacionado com o fator 1 inclui indicadores marinhos, como o cloreto, brometo e estrôncio. Por sua vez, outros catiões como o magnésio e cálcio podem também relacionar-se com fenômenos de interação água-rocha, como a dissolução de silicatos e carbonatos. A condutividade elétrica correlaciona-se com os dois fatores, explicando quer a salinização, quer a componente sulfatada associada à poluição agrícola.



**Figura 41** - Resultados da análise fatorial aplicada ao conjunto de 67 amostras

### 6.7. – Análise discriminante

A Análise Discriminante é uma metodologia estatística multivariada que permite alocar um conjunto de observações a grupos previamente definidos ou, ainda, a classificação de novos indivíduos, de acordo com a classificação prévia estabelecida (Johnson *et al.* 1988), com base em atributos medidos nos indivíduos que compõem cada um dos grupos. Esta técnica é utilizada para avaliar a proximidade entre grupos e definir se o conhecimento prévio dos atributos considerados permite a classificação de novas observações, com um erro mínimo.

A análise discriminante pode ser utilizada visando, entre outras: testar a integridade dos agrupamentos previamente estabelecidos; definir as variáveis discriminantes; estimar a probabilidade de classificações corretas ou a verificação da validade de classificações prévias.

Usou-se análise discriminante (AD) para avaliar as variações espaciais da água subterrânea na Ilha de Santiago. Esta abordagem começa com a alocação dos indivíduos (amostras) a um suporte espacial pré-conhecido, designado como grupo. Neste caso, a AD foi usada para avaliar a variação com a profundidade, no sentido de determinar um controlo geológico, nomeadamente evidências da existência de um sistema aquífero multicamadas.

De uma maneira geral, as várias ferramentas estatísticas não sugeriram a existência de variações sazonais relevantes, uma vez que não discriminam significativamente as três campanhas. Assim, apresentam-se os resultados obtidos com os dados da campanha de 2017, por ser aquela que

reúne os pontos de água comuns às três campanhas, com 16 amostras representativas das várias formações e litologias presentes na Ilha.

A tabela 25 resume os pontos de água usados nesta análise, com as respetivas litologias dominantes e profundidades.

**Tabela 25-** Formação hidrogeológica e profundidade dos pontos de água.

<b>Amostras</b>	<b>Unidade</b>	<b>Formação</b>	<b>Litologia dominante</b>	<b>Prof (m)</b>
<b>FT-63</b>	Recente	Aluvião	Aluviões	8
<b>P-5843</b>	Base	Flamengos	pillow lavas, brechas e tufos	97
<b>FBE-145B</b>	Base	Flamengos	pillow lavas; brechas; tufos	78
<b>FST-912</b>	Base	Flamengos	pillow lavas; brechas; tufos	120
<b>FST-92</b>	Intermédia	Pico Antónia/pillow lavas	pillow lavas, tufos, basaltos	120
<b>FBE-58</b>	Intermédia	Pico Antónia/pillow lavas	basaltos, piroclastos, pillow lavas, brechas de base, tufos	100
<b>AS-12</b>	Intermédia	Assomada	basalto alveolar e piroclastos	18
<b>FB-39</b>	Base	Flamengos	pillow lavas; brechas; tufos	43
<b>FBE-1A</b>	Intermédia	Pico da Antónia/pillow lavas	basaltos, piroclastos, pillow lavas, brechas de base, tufos	124
<b>FST-882/895</b>	Base	Complexo eruptivo antigo	tufos, mármore, basaltos	126
<b>FST-917</b>	Intermédia	Pico Antónia/pillow lavas	basaltos, piroclastos, pillow lavas	55
<b>FST-878</b>	Base	Complexo eruptivo antigo	tufos, mármore, basaltos	140
<b>FT-09</b>	Intermédia	Pillow lavas	pillow lavas	156
<b>FST-857</b>	Intermédia	Pico da Antónia e pillow lavas	basaltos, piroclastos, pillow lavas, brechas de base, tufos	105
<b>FST-871</b>	Base	Órgãos/Flamengos?	piroclastos; alguns filões	180
<b>FT-202</b>	Intermédia	Pico da Antónia	basaltos, piroclastos e tufos	52
<b>FBE-144</b>	Base	Flamengos	pillow lavas; brechas; tufos	120

Nesta abordagem analisa-se a semelhança entre os pontos de amostragem e procura-se identificar as variáveis de qualidade da água que podem ter mais influência nas variações espaciais 3D. Com base na informação patente na tabela 25, as amostras foram classificadas previamente de acordo com o atributo qualitativo “profundidade” codificado da seguinte forma:

- ✓ Grupo 1 – pontos de água com profundidade inferior a 100 m
- ✓ Grupo 2 – pontos de água com profundidade superior ou igual a 100 m.

Os resultados da AD mostram que a classificação a priori é adequada para descrever o universo de variação espacial, pois apenas um pequeno número de amostras (quatro) sofre reclassificação, como indicam a matriz de confusão em validação cruzada (Tabelas 26 e 27).

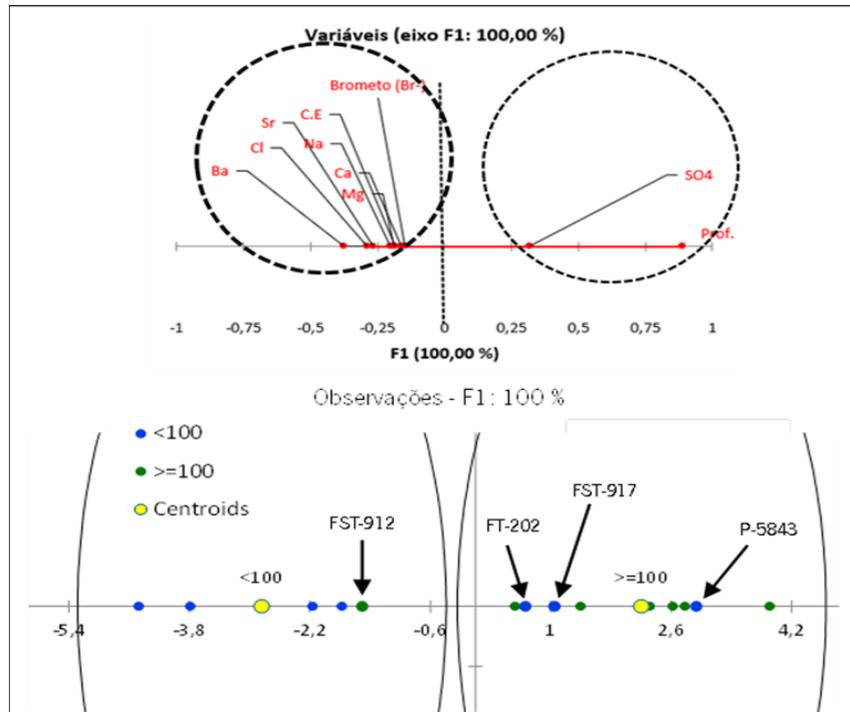
**Tabela 26** – Matriz de confusão em validação cruzada.

<b>de \ a</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Total</b>	<b>% correto</b>
<b>1</b>	4	3	7	57,14%
<b>2</b>	1	8	9	88,89%
<b>Total</b>	5	11	16	75,00%

**Tabela 27-** Classificação a priori e a posteriori, probabilidades de pertencer, coordenadas das observações e distâncias quadradas.

Observação	A priori	A posteriori	1	2
AS-12_2 <sup>a</sup> C	1	1	1,000	0,000
FB-39_2 <sup>a</sup> C	1	1	0,759	0,241
FBE-144_2 <sup>a</sup> C	2	2	0,004	0,996
FBE-145 B_2 <sup>a</sup> C	1	1	0,623	0,377
FBE-1A_2 <sup>a</sup> C	2	2	0,000	1,000
FBE-58_2 <sup>a</sup> C	2	2	0,000	1,000
FST-857_2 <sup>a</sup> C	2	2	0,291	0,709
FST-871_2 <sup>a</sup> C	2	2	0,000	1,000
FST-878_2 <sup>a</sup> C	2	2	0,000	1,000
FST-912_2 <sup>a</sup> C	2	1	0,968	0,032
FST-917_2 <sup>a</sup> C	1	2	0,422	0,578
FST-922_2 <sup>a</sup> C	2	2	0,001	0,999
FT-09_2 <sup>a</sup> C	2	2	0,000	1,000
FT-202_2 <sup>a</sup> C	1	2	0,438	0,562
FT-63_2 <sup>a</sup> C	1	1	1,000	0,000
P-5843_2 <sup>a</sup> C	1	2	0,000	1,000

A figura 42 mostra as correlações entre as variáveis e as observações com o fator (F1) que descreve 100 % da variância, colocando em evidência as amostras que sofreram reclassificação.



**Figura 42** – Distribuição das variáveis pelo fator discriminante (em cima) e apresentação dos centroides e elipsoides que descrevem os dois grupos pré-definidos. 1 – < 100 m; 2 - >=100 m (em baixo).

A forte correlação da profundidade com o fator 1 indicia que este explica a variação espacial 3D. Tem-se um conjunto de variáveis correlacionado negativamente com a profundidade, que aponta para uma assinatura marinha. Tal salinização, já descrita em pontos e capítulos anteriores, pode resultar quer da deposição de spray marinho, quer da ascensão de água salgada através do sistema de falhas. O papel que os contactos litológicos – gerados entre diferentes episódios vulcânicos e/ou mesmo diferentes escoamentos lávicos numa mesma fase – podem desempenhar neste processo, também, não deve ser subestimado, uma vez que parte destes contactos estão submersos no mar e, sendo muitas vezes sub-horizontais ou pouco inclinados, permitirão facilmente a circulação de água salgada nas suas interfaces e, deste modo, a sua penetração em zonas mais internas da ilha.

A amostra FST 912 foi reclassificada do grupo 2 para o grupo 1. Trata-se de um furo a 120 m, mas tal reclassificação sugere comportamento de um aquífero com influência marinha. Este facto pode explicar-se pela intensa salinização que ocorre em toda a Ilha.

Nas restantes amostras reclassificadas verifica-se o seguinte: a FST-917 (Pico Antónia/pillow lavas); FT-202 (Formação dos Flamengos) e a P-5843 (Formação dos Flamengos), à priori classificadas como pertencendo ao grupo 1 (menos de 100 m de profundidade) passam para o grupo 2. Na realidade, atendendo às profundidades destas amostras (FST 917 – 55 m; FT 202 – 52 m e P5843 - 97 m, pode sugerir-se um reajuste à segmentação do sistema aquífero para o intervalo 50-60 m. Ou seja, os dois grupos corresponderão a um sistema aquífero mais superficial até 50-60 m, e outro acima desta profundidade. O exercício de AD feito com uma pré-classificação a 60m confirma uma taxa de acerto de 100%.

Conclui-se que, este levantamento na Ilha de Santiago aponta para a existência de um sistema aquífero multicamadas com assinatura geoquímica específica considerando o inventário de pontos de água como suporte espacial. Os resultados alcançados podem ser de grande utilidade para as autoridades locais na gestão da poluição e na tomada de decisões para melhor proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

***CAPÍTULO 7***

---

***PROPRIEDADES E GESTÃO DO SOLO E SEDIMENTOS - CASOS DE ESTUDO  
NA ÁREA DAS BARRAGENS DE SANTIAGO***

## **PROPRIEDADES E GESTÃO DO SOLO E SEDIMENTOS - CASOS DE ESTUDO NA ÁREA DAS BARRAGENS DE SANTIAGO**

O solo é um recurso natural de extrema importância para o Homem e para os restantes seres vivos, sendo fundamental a manutenção da sua sustentabilidade e prevenir a sua destruição por ação das atividades antrópicas. Dependendo do contexto, a palavra "solo" pode ter significados muito diferentes. Uma definição simples de solo é o material em que as plantas crescem e que lhes fornece suporte físico, e outras condições de sobrevivência, como água e nutrientes.

O solo pode ser definido como um componente fundamental da biosfera, complexo e dinâmico, constituído por uma fase sólida, composta por materiais orgânicos e minerais, que variam na sua composição química, tamanho e forma, formando um sistema poroso partilhado pelas fases líquida e gasosa (Varenes, 2003; Ferreras et al. 2009). A pedosfera é assim a esfera em interação complexa com as restantes esferas terrestres (biosfera, hidrosfera, atmosfera e litosfera) através dos físicos, nomeadamente o hidrológico e dos ciclos biogeoquímicos dos elementos. A FAO (2006), define-o como um corpo natural constituído por camadas compostas por rochas e minerais desgastados pelo tempo, material orgânico, ar e água. É o produto final da influência combinada do clima, topografia, organismos (flora, fauna e humanos) nos materiais originais (rochas e minerais) ao longo do tempo, processo denominado pedogénese. O solo difere do seu material de origem na textura, estrutura, consistência, cor, outras características físicas e químicas e composição mineralógicas. Acresce-lhe, relativamente à rocha original, uma componente biológica fundamental para a essência do conceito de solo.

Segundo Joffe (1936), o solo é um corpo natural, diferenciado em horizontes com minerais e constituintes orgânicos, geralmente não consolidados, de profundidade variável, que difere do material parental abaixo em morfologia, propriedades físicas e constituição, propriedades e composição química e características biológicas. A sua evolução, em termos de pedogénese progressiva ou regressiva, uso, formas de manuseamento sustentável e eventuais medidas de proteção e/ou degradação dependem do conhecimento das propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo.

O ser humano é eminentemente dependente dos solos e das suas qualidades, por isso, apesar de ser um recurso não renovável, constitui um componente fundamental dos ecossistemas e da vida, uma vez que desempenha funções importantes (ambientais, económicas, sociais, e culturais), tais como: produção alimentar e de biomassa; fonte de matérias-primas; armazenamento, filtração e transformação; habitat e suporte de biodiversidade, reservatório de água e de carbono; é igualmente a

base do sistema agrícola e um espaço para outras atividades humanas, onde se inclui a deposição de resíduos (Costa *et al.* 2007).

O conhecimento sobre as propriedades e o estado do solo é especialmente relevante em climas semiáridos e áridos e regiões costeiras, bem como outros cenários com condições que agravam a suscetibilidade à degradação. Cabo Verde e a Ilha de Santiago encaixam neste tipo de contexto climático, topográfico e de uso do solo.

Este capítulo é, pois, dedicado ao tema das propriedades do solo e da potencial utilização de sedimentos de barragem para melhorar a produtividade dos solos.

### **7.1- Conceitos fundamentais sobre solos e suas propriedades**

A qualidade do solo, definida por Larsson *et al.*(1991) e Karlen *et al.* (1997) como a aptidão para o uso e a sua capacidade funcional, depende de numerosas variáveis, entre as quais se destaca o equilíbrio entre condicionantes geológicas, hidrológicas, químicas, físicas e biológicas (Bruggen *et al.*2000). A prática agrícola com sucesso depende das propriedades adequadas de natureza física, química, biológica e mineralógica. Em conjunto estas propriedades controlam o movimento da água, a disponibilidade de nutrientes e a presença de elementos com potencial de gerar toxicidade. A fertilidade e a produtividade do solo estão dependentes destas características.

Entre as propriedades físicas destacam-se a textura e a estrutura, pela forma como definem o tipo, dimensão, quantidade e continuidade dos poros (Braida *et al.* 2006), e conseqüentemente condicionam capacidade de uso do solo.

A textura está relacionada com o tamanho das partículas minerais. Refere-se especificamente às proporções relativas dos diferentes lotes granulométricos (areia, limo e argila) num determinado solo (Brady, 1984). Para além da importância taxonómica, a textura controla o regime hídrico, térmico, o comportamento mecânico e o desempenho dos nutrientes no solo (Ferreira *et al.* 2001; Campos *et al.* 2007). Varennes (2003) destaca que o uso e gestão do solo dependem da sua textura e de características diretamente influenciadas por ela, como a plasticidade, a permeabilidade à água, a facilidade de mobilização e a fertilidade. pela sua influência no regime hídrico, térmico, no comportamento mecânico e no desempenho dos nutrientes no solo (Alexandre *et al.* 2001).

Do ponto de vista textural, os solos podem incluir-se em várias classes, constituindo genericamente solos de textura grosseira, como os arenosos, variando entre texturas moderadamente grosseiras, médias e moderadamente finas; e solos argilosos, que constituem texturas finas.

A estrutura, sendo uma propriedade complexa, pode simplificarmente associar-se ao grau, tipo e dimensão dos agregados. É, pois, uma propriedade essencial para a estabilidade dos solos, incluindo

a formação de agregados organo-minerais que conferem resistência à erosão e contribuem para a manutenção da matéria-orgânica do solo. A quantidade de argila, a presença de carbonato de cálcio e compostos de ferro podem atuar como material de cimentação, condicionando a formação de agregados estáveis (Cammeraat *et al.* 1998)

A textura e estrutura estão também dependentes da mineralogia do solo. A composição mineral determina também a chamada reserva mineral do solo, que assegura o fornecimento de nutrientes e por isso controla desde logo a fertilidade. A capacidade de troca catiónica, propriedade química fundamental para a produtividade, está intimamente dependente do tipo de minerais, em especial minerais de argila presentes. Solos ricos em esmectite têm tipicamente capacidades de troca catiónica mais elevada do que os solos ricos em caulinite. Os óxidos-hidróxidos de ferro, minerais secundários comuns no solo, são conhecidos pela baixa capacidade de troca catiónica (Brady, 1984). Igualmente a presença de minerais portadores de elementos potencialmente tóxicos pode afetar o desenvolvimento vegetal e conseqüentemente o uso agrícola.

## **7.2- Práticas agrícolas e degradação do solo**

O uso agrícola do solo pode afetar as propriedades referidas atrás, condicionando a capacidade de retenção de nutrientes e promovendo formas de degradação. Assim, a atividade agrícola tem relação direta com a fertilidade, suscetibilidade à erosão, salinização, acidificação, compactação e mesmo contaminação.

A erosão acelerada dos solos cultivados prolongadamente resulta em fracas condições de agregação e na lixiviação de materiais finos, deixando uma textura arenosa. Esta aparece geralmente associada a baixos teores de matéria orgânica, alta compactação e dificuldades de cobertura vegetal (Reynolds *et al.* 2008).

A degradação física do solo é um fator limitante na produção agrícola e na manutenção dos serviços de ecossistemas. Esta degradação é especialmente gravosa em climas semiáridos, pelo que ao baixar a capacidade de retenção de nutrientes cria-se uma ameaça à produtividade agrícola em cenários como o da Ilha de Santiago.

Cammeraat *et al.* (1998), apontam o uso contínuo de práticas agrícolas tradicionais como fonte de deterioração da qualidade do solo, comprometendo a produtividade. Já Gebremedhin *et al.* (2017) apontam a crescente expansão de práticas agrícolas como responsáveis pela perda de nutrientes e afetação da fertilidade.

A formação de crostas no solo é uma forma de degradação física que se desenvolve a partir de camadas contínuas de solo não agregado e de solos expostos e submersos (Mitiku *et al.* 2006).

De acordo com Costa (2009), em Cabo Verde, a erodibilidade das vertentes constitui uma das principais preocupações da degradação ambiental, dada a conjugação de diversos fatores naturais, entre os quais sobressaem, o declive acentuado das vertentes, a fraca cobertura vegetal e o contexto climático já descrito, caracterizado por chuvas escassas, mas de elevada intensidade.

Nesta região o sobre aproveitamento agro-silvo-pastoril contribui também para acentuar a degradação do solo e da cobertura vegetal. Na ilha de Santiago as práticas agrícolas tradicionais foram alterando as condições das vertentes e assim gerando formas de relevo próprias, com suscetibilidades variáveis à degradação. Marques (1981), destaca que nas Achadas os solos que apresentam boas características, de profundidade efetiva e fraca pedregosidade e protegidos da ação dos ventos poderão ser objeto de exploração agrícola, dependendo dos recursos hídricos existentes. No entanto, para tal é necessário melhorar a fertilidade dos solos como um fator fundamental na conservação da produtividade agrícola e dos solos.

Também segundo Hernández (2008), sob o ponto de vista agrícola apenas os fundos de vale e encostas adjacentes de declives suaves e as Achadas são utilizáveis sem ou com reduzidas restrições. Sendo assim, a introdução de técnicas de defesa do solo é primordial.

De uma maneira geral, em Santiago pratica-se uma agricultura tradicional, de sustentação familiar, apoiada em explorações de pequena dimensão, muito fragmentada e com práticas rudimentares (Tavares, 2008; Menegatto *et al* 2014). A cultura mista de milho e feijões é a mais comum, sobretudo para uso doméstico, por vezes, complementada com outras culturas de rendimento, como é o caso da cultura de amendoim (RGA, 2015).

Para minimizar o impacto da erosão hídrica, favorecendo a retenção do solo e regularização de vertentes, tornaram-se estruturas típicas os muretes, banquetas ou caldeiras, que diminuem a declividade (Varela *et al.* 2014). Porém, quando a sua capacidade de retenção é ultrapassada, agravam-se as condições de escoamento o que facilita a formação de ravinas, de grande dimensão e extensão. Convém frisar ainda o papel da vegetação neste controlo da erosão, nomeadamente através da plantação de babosa (*Aloe barbadensis*), algarobas (*Prosopis juliflora*), tendente (*Azadirachta*), Espinho catchupa (*Dichrostachys cinerea*) espontânea, Lantuna (*Lantana Câmara*), Carapate (*Furcraea gigantea*) e Acácia halosericea. Nos vales e nas rechãs, dominam a policultura, alternando terras de sequeiro e de regadio (Tavares *et al.* 2008; Varela *et al.* 2014).



**Figura 43** –Paisagem da Ilha de Santiago que ilustram métodos e técnicas ancestrais de controlo da erosão (a- aloe vera; b- muretes e acácias; c- carapate; d- tendente)

No ambiente topográfico, climático e socioeconómico de Santiago, as atividades agrícolas, em expansão, assumem assim particular preocupação como forma de degradação do solo (Monteiro *et al.* 2020).

A construção de barragens, neste clima semiárido e de escassez de água, surgiu como estratégia impulsionadora da expansão agrícola. Por este motivo, procedeu-se à caracterização destas barragens, bem como do solo e sedimentos nas áreas de maior expansão agrícola.

### **7.3- Principais barragens na Ilha de Santiago**

A descrição da ilha de Santiago pôs em destaque a necessidade de políticas para minimizar o efeito de secas cada vez mais prolongadas, pois não existem cursos de água perenes e a precipitação é escassa. Quando ocorre é rapidamente escoada para o mar, dificultando a recarga dos aquíferos.

Um dos objetivos da construção de barragens foi recuperar terrenos agrícolas, uma vez que proporcionam reservatórios que asseguram o provimento de água em períodos de escassez, permitindo aumentar a agricultura de regadio, mais rentável.

A construção de uma barragem modifica as condições de transporte de sedimentos, representando, usualmente, uma quebra na repetição da sequência normal, com formação de deltas na extremidade a montante da albufeira, assoreamento desta e erosão a seguir à restituição, como refere Lysne *et al.* (2003). Os sedimentos depositados nas albufeiras são o resultado natural da erosão

da bacia hidrográfica, que está dependente, principalmente, do regime hidrológico e das características geomorfológicas da bacia (Lameiro, 2009).

### ➤ **Barragem de Poilão**

A Barragem de Poilão localiza-se na sub-bacia da Ribeira Seca, na ilha de Santiago, a  $15^{\circ} 23'54''$  de latitude norte e  $23^{\circ} 33' 19''$  de longitude oeste (Figura 44). Esta Ribeira engloba uma das mais importantes bacias da ilha, alongando de Pedra Badejo, numa direção a sudoeste e a uma distância, aproximadamente, de 16 km para o interior. A maior largura da bacia hidrográfica é de 7 km (capítulo V).



**Figura 44-** Barragem de Poilão e da respetiva albufeira (Imagem aérea, obtida através do Google™ Earth, com indicação do muro, seta preta)

O tamanho da área de receção é de aproximadamente 72 km<sup>2</sup>. A altitude vai do nível médio da água do mar, até 1394 m, no Pico da Antónia, no extremo oeste da bacia. As partes mais baixas do vale da Ribeira Seca são extensivamente cultivadas, constituindo uma das mais importantes áreas de cultivo do país (Gomes *et al*/2005).

A barragem foi construída em 2006 com capacidade de armazenar cerca de 1,2 milhões de m<sup>3</sup> de água, para irrigar uma área de aproximadamente 70 ha. A área da bacia controlada pelo local da barragem de Poilão é de 28 km<sup>2</sup>, ocupando 39 % da área total da bacia (Gominho, 2010).

Na tabela 28 encontram-se resumidas as principais características da barragem de Poilão.

**Tabela 28-** Principais características da barragem de Poilão. Fonte: Estudo de impacte ambiental – barragem do Poilão-MAAP, 2005.

<b>Tipo de barragem</b>	<b>Barragem de gravidade em alvenaria</b>
<b>Altura máxima</b>	26 m
<b>Área de captação a montante</b>	28 km <sup>2</sup>
<b>Função</b>	Irrigação
<b>Área beneficiada</b>	63-70 ha
<b>Desenvolvimento do coroamento</b>	153 m
<b>Capacidade da albufeira</b>	1200000 m <sup>3</sup> /ano
<b>Caudal de ponta de cheia</b>	320 m <sup>3</sup> /ano T=30 anos 557 m <sup>3</sup> /ano T= 200 anos
<b>Área de albufeira</b>	17 ha
<b>Comprimento da albufeira</b>	1235 m
<b>Profundidade total de fundação</b>	Previsto= 8-9; Real= 16 m

A barragem está implantada nos conglomerados brechóides, relativamente compactos, do CB ou Formação dos Órgãos. Do ponto de vista litológico, esta formação geológica é constituída por depósitos de conglomerado brechóides, sobretudo continentais, mas apresentando, por vezes, fácies marinhas e calcarenitos (Gomes, 2005).

De acordo com Afonso (2006), a construção da barragem teve um grande impacto, pelo facto de armazenar e fornecer recursos hídricos para suprir as necessidades da população em tempo de seca, incluindo a promoção de práticas agrícolas mais rentáveis.

De salientar que a escassez de precipitação nos últimos anos (2017, 2018) provocou a seca quase total da albufeira, o que tem causado uma grande preocupação, não só à população local como em todas as entidades responsáveis pela gestão dos recursos hídricos naquela barragem.

Estudos de batimetria realizados em 2013 descrevem a problemática do assoreamento desta albufeira, estimando uma taxa de sedimentação anual próxima de 90.000 m<sup>3</sup>/ano. À data desse estudo, os autores do trabalho (Araújo *et al.* 2014) indicam que a capacidade de armazenamento terá diminuído para metade em 7 anos.

A figura 45 mostra o estado que se encontra a barragem, completamente seca, devido a falta de precipitação que tem assolado o país nos últimos anos.



**Figura 45-** Situação atual da albufeira (completamente seca).

A tabela 29 mostra as características da água da barragem do Poilão, com base numa amostragem pontual realizada em abril de 2018. De realçar o elevado valor de pH, acima da gama ótima de crescimento da generalidade das culturas (Varela *et al.* 2014). A relação entre os valores de nitrato e nitrito, em torno de 5 mg/L, também sugere condições de anóxia. Ainda assim, de estranhar a concentração baixa de nitrato na água superficial, quando comparada com os valores de excesso de nitrato indicados por Fonseca *et al.* (2014), com mínimo em torno de 90 mg/L. São essencialmente os iões cloreto e sulfato que contribuem para o valor de condutividade, acima dos 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Os elementos potencialmente tóxicos, como o Al, Cd, Cr, Pb e As encontram-se na gama de  $\mu\text{g}/\text{L}$ , sempre abaixo dos valores de deteção do método analítico (com exceção do Ni que ocorre com 11  $\mu\text{g}/\text{L}$ ).

**Tabela 29** – Características da água superficial da albufeira do Poilão usada para rega.

pH	CE	Alcalinidade		Oxidabilidade	Cloreto	Sulfato	Nitrato	Nitrito	Fosfato	
	( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )				(mg/L)					
<b>9.44</b>	1290	151		14.3	327	266	0.02	4.45	<0.03	
Ca	Na	Mg	K	Fe	Cu	Mn	Al	Zn	Cd	Ni
(mg/L)										
<b>43.6</b>	160	79.7	15.9	0.07	5	<0.01	<0.1	6	<2	11
									( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	

### ➤ Barragem de Figueira Gorda

A Barragem de Figueira Gorda fica localizada na ribeira de Boaventura, concelho de Santa Cruz, a  $15^{\circ} 13' 54''$  de latitude norte e  $23^{\circ} 59' 68''$  de longitude oeste, a 0,5 km da localidade de Figueira Gorda (Figura 46).

O local onde se encontra implementada a barragem reúne boas condições topográficas, e geológicas por estar inserido na formação geológica Pico de Antónia e Flamengos que não apresenta quaisquer sinais visíveis de alteração e numa bacia hidrográfica com índices de pluviometria superior à média da ilha de Santiago. Com efeito, a precipitação máxima anda em torno de 400-600 mm/ano, encontrando-se servida por uma zona a montante com pluviometria anual máxima da ordem dos 800-900mm (DGASP, 2012).



**Figura 46-** Barragem de Figueira Gorda (Imagem aérea, obtida através do Google™ Earth, com a localização, seta preta).

De acordo com a DGASP (2012), a barragem é do tipo Gravidade de alvenaria, com betão armado no núcleo central, possuindo um comprimento de 138 m e altura total de 25 m. A largura do coroamento é de 4 m, o mínimo adotado pelas normas para permitir a circulação de pessoas. A capacidade de armazenamento da albufeira à cota máxima da soleira do descarregador, é de  $1.819.090 \text{ m}^3$ , sendo o volume útil ou disponível  $1.455.272 \text{ m}^3$ . A água armazenada destina-se à irrigação de perímetros no vale da ribeira de Boaventura e de Santa Cruz num total de 80 ha. A adução de água aos perímetros irrigados é feita por uma conduta principal em FF e PEAD diam.300, com duas derivações que permite a alimentação de 2 reservatórios sendo um de  $1000 \text{ m}^3$  e outro de  $500 \text{ m}^3$ . As características da barragem são apresentadas na tabela 30.

**Tabela 30-** Síntese das principais características da barragem de Figueira Gorda

<b>Tipo de barragem</b>	<b>Barragem de gravidade em alvenaria</b>
<b>Altura máxima</b>	25 m
<b>comprimento</b>	138 metros
<b>Função</b>	Irrigação
<b>Área beneficiada</b>	80 ha
<b>Desenvolvimento do coroamento</b>	153 m
<b>Capacidade da albufeira</b>	1.819.000 m <sup>3</sup> /ano
<b>Volume útil</b>	1.455.272m <sup>3</sup>

O principal objetivo da construção desta barragem é o aproveitamento da água da chuva, por forma suprir as necessidades agrícolas da população desta região e arredores, sendo a agricultura uma das suas principais vocações e fonte de rendimento. A barragem foi contruída no ano de 2014, tendo recebido água nos primeiros anos da sua existência.

No entanto devido a falta de chuva e longo período de seca que tem assolado o país nos últimos anos, esta barragem encontram seca, à semelhança das restantes barragens da ilha de santiago (fig. 47).



**Figura 47-** Barragem de Figueira Gorda e o seu estado atual (a- estrutura da barragem; b- albufeira seca)

A tabela 31 resume as propriedades da água da albufeira numa amostragem pontual em abril de 2018. De uma maneira geral, os parâmetros sugerem melhor qualidade da água comparativamente com a albufeira do Poilão, particularmente no que respeita a elementos potencialmente tóxicos, que neste caso estão todos abaixo do limite de deteção.

**Tabela 31** – Características da água da albufeira da Figueira Gorda usada para rega.

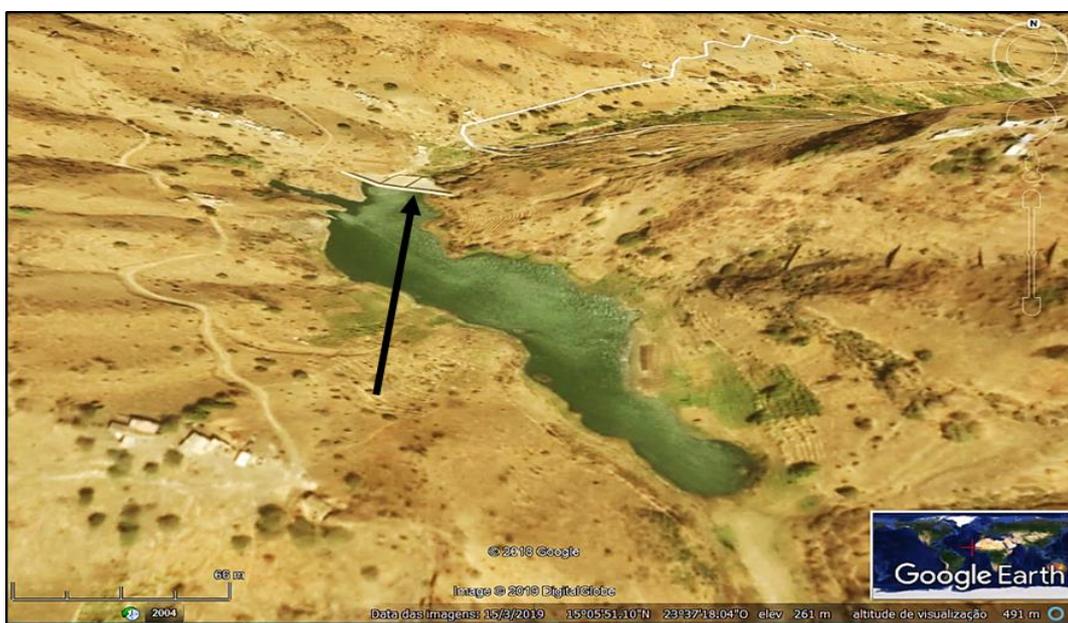
pH	CE	Alcalinidade	Oxidabilidade	Cloreto	Sulfato	Nitrato	Nitrito	Fosfato		
	( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )				( $\text{mg}/\text{L}$ )					
<b>8.59</b>	810	181	27.8	167	36.5	0.95	3.703	<0.03		
Ca	Na	Mg	K	Fe	Cu	Mn	Al	Zn	Cd	Ni
				( $\text{mg}/\text{L}$ )					( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	
<b>18.4</b>	98.4	52.8	18.0	0.02	<2	<0.01	<0.1	<5	<2	<5

### ➤ Barragem de Faveta

A Barragem de Faveta situada na localidade que lhe dá nome, a  $15^{\circ}09'72''$  de latitude norte e  $23^{\circ}62'93''$  de longitude oeste, pertence ao concelho de São Salvador do Mundo (Figura 40).

Foi construída em março de 2013, com a finalidade de captação e armazenamento de água para fins agrícolas. Está inserida na sub-bacia hidrográfica de Picos sendo a área da bacia dominada pela barragem de  $7,92 \text{ km}^2$  (Varela, 2014).

A barragem é do tipo gravidade de alvenaria de pedra implantada ao longo de um alinhamento reto, de 103 m de comprimento e 30 m de altura. O paramento do montante é vertical e a jusante com uma inclinação 1,0V:0,8H (DGASP, 2011).



**Figura 48-** Barragem de Faveta (imagem aérea, obtida através do Google™ Earth, com a localização, seta preta)

A água armazenada na barragem é destinada à agricultura. A albufeira à cota tem uma capacidade de armazenamento de  $568.873 \text{ m}^3$  de volume útil e  $136.964 \text{ m}^3$  de volume morto. O volume total é de  $705.837 \text{ m}^3$ , ocupando uma área inundada de  $7,06 \text{ mha}$ .

Contudo, o sistema de captação e adução constituído com dois orifícios de entrada circular com 0,4 m de diâmetro, localizados no paramento de montante da barragem e protegidos por grelhas metálicas finas, seguidos de conduta de PEAD DN400 embebida no corpo da barragem e terminando numa válvula de isolamento D400 (DGASP, 2011).

**Tabela 32** – Síntese das características da barragem de Faveta

<b>Tipo de barragem</b>	<b>Barragem de gravidade em alvenaria</b>
<b>Altura máxima</b>	30 m
<b>comprimento</b>	103 metros
<b>Função</b>	Irrigação
<b>Área beneficiada</b>	40ha
<b>Capacidade da albufeira</b>	705.837 m <sup>3</sup> /ano
<b>Volume útil</b>	568.873m <sup>3</sup>

A barragem de Faveta enquadra-se na política de desenvolvimento e armazenamento de águas superficiais para suprir as demandas da população, principalmente, rural que dependem da agricultura para se autossustentar. Conforme se ilustra a figura 49 a barragem/albufeira apresenta-se seca. Há dois anos tinha uma boa quantidade de água que foi utilizada para os fins agrícolas, indo de encontro com uma das principais finalidades da sua construção.



**Figura 49** - Estado atual da barragem de Faveta

A tabela 33 mostra um conjunto de parâmetros hidroquímicos que indicam tratar-se da albufeira com a mineralização mais baixa dos três reservatórios estudados.

**Tabela 33** – Características da água da albufeira da Faveta usada para rega (amostragem pontual em abril de 2018).

pH	CE	Alcalinidade		Oxidabilidade	Cloreto	Sulfato	Nitrato	Nitrito	Fosfato		
	( $\mu\text{S/cm}$ )				(mg/L)						
<b>8.64</b>	660	186		2.48	110	76.1	0.05	3.67	<0.03		
Ca	Na	Mg	K	Fe	Cu	Mn	Al	Zn	Cd	Ni	
				(mg/L)							( $\mu\text{g/L}$ )
<b>36.7</b>	63.5	46.4	9.1	0.02	<2	<0.01	<0.1	<5	<2	<5	

#### 7.4- O assoreamento das albufeiras das barragens – potencial agrícola

Fonseca (2002) aponta as barragens como sendo dos mais destrutivos empreendimentos humanos, com enormes impactos negativos e irreversíveis sobre os ecossistemas aquáticos e recursos hidrológicos. A autora realça a modificação da morfologia das praias e da definição da posição da linha de costa, uma vez que grande parte dos sedimentos fica retida nas albufeiras, resultando no seu assoreamento. O processo de assoreamento, diretamente associado a fenómenos erosivos (Guerra *et al.* 1995) é, pois, um dos grandes problemas das barragens, diminuindo o volume de armazenamento de água.

O problema do assoreamento das albufeiras não se limita à diminuição da quantidade de água disponível, mas também pode ter efeitos ao nível da qualidade. Refere-se a este propósito a potencial carga poluente dos sedimentos acumulados, tal como apontam diversos autores em distintos contextos climáticos (Rocha, 1998; Fonseca *et al.* 2016; Fonseca, 2018). Com efeito, no fundo das albufeiras ocorre a acumulação preferencial de materiais orgânicos e minerais, que podem ter carácter dual: podem ser fontes poluentes (por exemplo metais e outros elementos tóxicos). Devido à circulação contínua de elementos químicos através da interface sedimento-água, estes materiais são libertados para a coluna de água, sendo esta a principal razão para a degradação da sua qualidade (Fonseca, 2002). No entanto, tal como referido, estes podem também ser nutrientes para as plantas (Pinho *et al.* 2019).

Zhou apud Yang (2006) considera a utilização de técnicas de conservação do solo como uma das melhores estratégias de gestão de sedimentos com recurso a redução da afluência de sedimentos à albufeira.

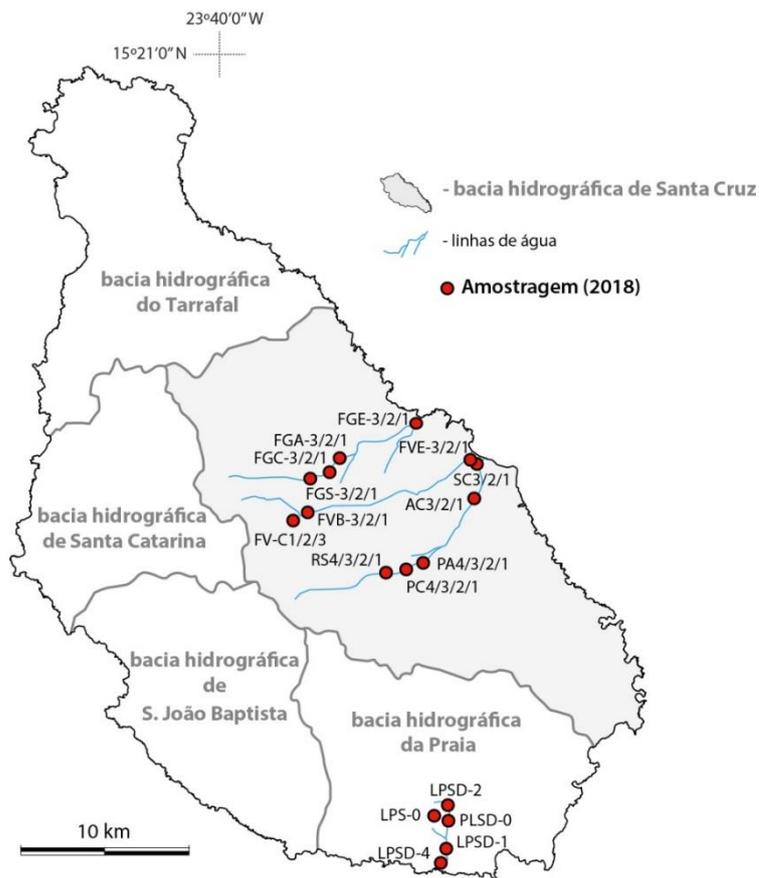
Segundo Batuca e Jordaan (2000), as medidas estruturais de conservação do solo compreendem a construção de barreiras de retenção, frequentemente utilizadas em Cabo Verde, que, podem ser efetivas na retenção de partículas finas, mas nas grandes bacias hidrográficas o seu custo pode ser um aspeto impeditivo.

Na ilha de Santiago as barragens construídas, com especial destaque para a do Poilão, têm servido como uma barreira de retenção, não só da água, mas também dos sedimentos que pouco tem sido aproveitado para a prática agrícola. Excetuam-se as margens das albufeiras que são aproveitadas pelos agricultores para pequenos cultivos. Com efeito, o assoreamento das barragens em Santiago tem causado problemas ao nível da diminuição da capacidade de armazenamento, acompanhando a redução da capacidade produtiva dos campos agrícolas a jusante (Araújo *et al.* 2014).

Não obstante, o processo de assoreamento pode ser encarado como um potencial de valorização agrícola, através do uso dos sedimentos enriquecidos em nutrientes que podem melhorar as propriedades do solo (Fonseca *et al.* 1998; 2003; 2009; Araújo *et al.* 2019; Fonseca *et al.* 2018; Pinho *et al.* 2019). Investigação sobre este potencial de reutilização foi já realizada em Cabo Verde e noutros locais, como indicam os trabalhos de Araújo *et al.* (2014), que se referem especificamente o assoreamento da albufeira do Poilão, Fonseca *et al.* (2014), Fonseca *et al.* (2018) e Araújo *et al.* (2019). Um estudo realizado por investigadores da Universidade de Évora em colaboração com o Instituto de Investigação e Desenvolvimento Agrário de Cabo Verde (INIDA) propõe a possibilidade de uso dos sedimentos da albufeira do Poilão, enriquecidos em nutrientes, como forma de reabilitação da albufeira e melhoria da produtividade dos solos adjacentes (Fonseca *et al.* 2014).

#### **7.4.1- Propriedades dos solos e sedimentos na área das barragens**

A figura 50 mostra a localização das áreas de amostragem nas bacias hidrográficas de Santa Cruz, onde se localizam três das principais barragens de uso agrícola, e na bacia hidrográfica da Praia. No primeiro caso, a amostragem visou o estudo de sedimentos e solos em relação com o potencial aproveitamento de sedimentos das albufeiras em processo de assoreamento. No segundo caso, a área de amostragem situa-se nas imediações da lixeira da Praia, visando avaliar potenciais fenómenos de contaminação associados ao transporte/lixiviação com origem nos resíduos.



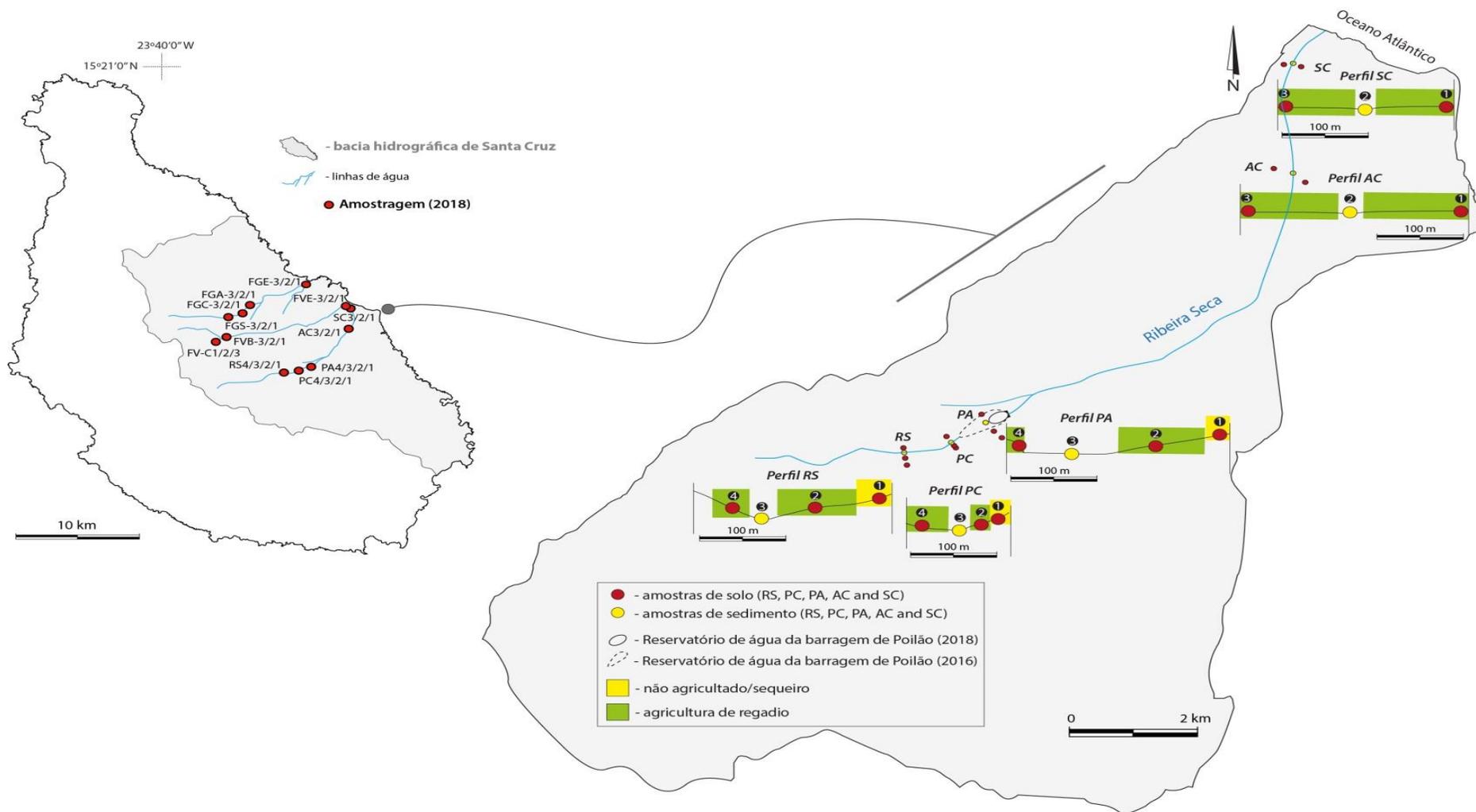
**Figura 50** – Localização das áreas de amostragem nas bacias hidrográficas de Santa Cruz e da Praia.

Para melhor se compreender o protocolo de amostragem aplicado nas três ribeiras embalsadas, representa-se na figura 50, o esquema usado na Ribeira Seca para estudar a albufeira do Poilão. Ao longo do sistema são definidos perfis de amostragem, que incluem colheita de sedimento no leito, incluindo na albufeira assoreada, e de solo nas vertentes (margem direita e esquerda). Assim, por exemplo, tem-se para um perfil a montante da albufeira –RS, quatro pontos:

- RS1 e RS2 – solo na margem direita
- RS3 – no leito da ribeira (sedimento de corrente)
- RS4 – solo na margem esquerda

Procurou-se representar a área das albufeiras, sempre que possível com amostragens no limite máximo do reservatório de água (no Poilão é o perfil PC) e na zona seca, sujeita a assoreamento no momento da amostragem (Perfil PA). As zonas com agricultura mais intensa situam-se nas zonas de maior largura dos vales, pelo que se definiram perfis próximos da costa (no caso da Ribeira Seca, os perfis AC e SC).

O tipo de agricultura representa-se pela cor verde ou amarela, quando se trata de cultura de regadio ou solo não agricultado/sequeiro, respetivamente.



**Figura 51** – Localização das amostras com representação de perfis ao longo da Ribeira Seca: a montante da albufeira (RS), na zona da albufeira (limite com água - PC e zona seca - PA) e a jusante da barragem (AC e SC).

#### **7.4.1.1- Atributos físico-químicos na área das albufeiras de Santiago**

De modo a determinar a qualidade para fins agrícolas foram efetuadas análises de propriedades dos sedimentos e dos solos na área das principais barragens. Consideraram-se parâmetros como o pH (indicador da acidez/alcalinidade), condutividade elétrica (CE) e sódio (Na) como indicadores de salinização. Procedeu-se ainda à determinação do teor de matéria orgânica e outras propriedades condicionantes do uso agrícola, como a textura, o fósforo, a concentração de micronutrientes e metais biodisponíveis. A tabela 34 apresenta os valores de pH, CE, Na e teor de matéria orgânica nos sistemas fluviais onde se localizam as barragens descritas atrás.

**Tabela 34-** Resultados das análises do pH, Condutividade elétrica /CE), sódio e teor de matéria orgânica (MO) dos solos amostrados.

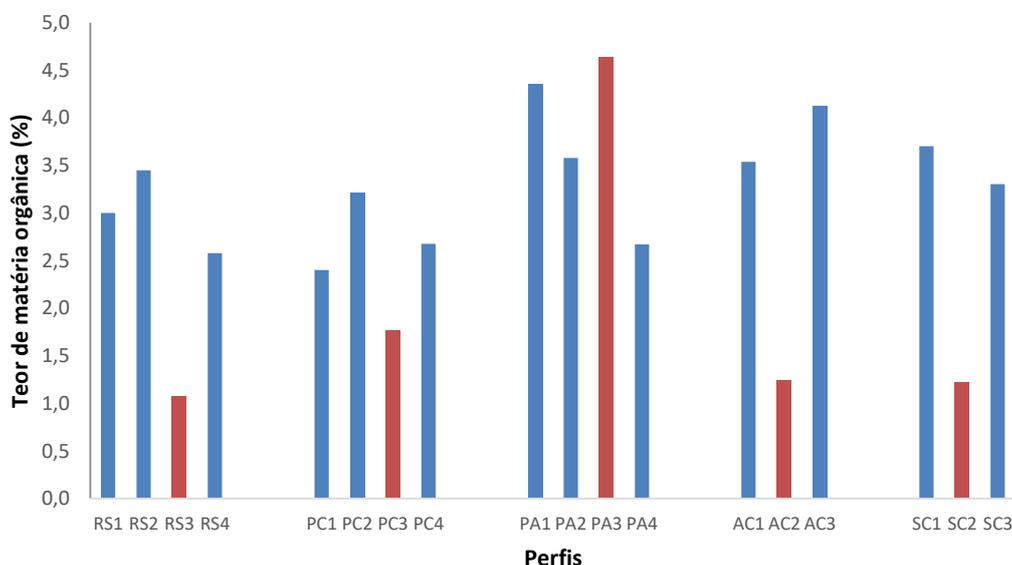
	<b>Amostras</b>	<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>	<b>pH (KCl)</b>	<b>CE (µs/cm)</b>	<b>Na (mg/L)</b>	<b>MO (%)</b>
<b>BARRAGEM DE FIGUEIRA GORDA</b>	FG-S1	7.52	6.43	224	265	3.1
	FG-S2	8.05	6.63	145.5	167	1.3
	FG-S3	7.07	6.01	260	175	3.1
	FG-C1	7.20	6.65	66.2	101	3.9
	FG-C2	7.12	6.49	830	356	3.3
	FG-C3	8.09	6.60	137.4	290	4.8
	FG-A1	7.63	6.93	304	191	3.4
	FG-A2	7.74	6.88	615	428	4.0
	FG-A3	7.72	6.46	260	303	3.1
	FG-E1	7.93	6.64	1525	1093	4.8
<b>BARRAGEM DE FAVETA</b>	FG-E2	7.40	6.58	6300	4783	3.0
	FG-E3	7.94	7.25	310	511	2.3
	FV-C1	7.77	6.41	154.2	178	2.0
	FV-C2	7.63	6.06	140	241	3.2
	FV-C3	7.75	6.63	2300	122	4.5
	FV-B1	7.53	6.42	2300	101	3.9
	FV-B2	7.88	6.81	2270	213	2.6
	FV-B3	7.85	6.23	230	273	4.5
	FV-E1	8.19	7.11	2780	800	3.7
	FV-E2	8.47	7.12	1140	399	1.2
<b>BARRAGEM DE POILÃO</b>	FV-E3	8.29	7.04	2410	705	3.3
	RS1	7.76	5.78	100	176	3.0
	RS2	8.17	6.92	180	247	3.4
	RS3	-	-	-	190	1.1
	RS4	8.28	6.75	200	255	2.6
	PC1	7.4	6.05	160	168	2.4
	PC2	7.67	6.19	240	239	3.2
	PC3	8.14	6.58	190	167	1.8
	PC4	8.19	6.30	190	127	2.7
	PA1	7.15	5.66	150	81	4.4
<b>BARRAGEM DE POILÃO</b>	PA2	7.15	6.29	490	248	3.6
	PA3	7.67	6.79	860	292	4.6
	PA4	7.35	6.79	670	250	2.7
	AC1	7.82	7.10	420	259	3.5
	AC2	7.78	7.13	180	125	1.2
	AC3	7.78	7.14	260	251	4.1
	SC1	8.19	7.11	2780	800	3.7
	SC2	8.47	7.12	1140	399	1.2
	SC3	8.29	7.04	2410	705	3.3

### ➤ **Matéria orgânica (MO)**

A matéria orgânica do solo é essencial como provimento de carbono e para assegurar o complexo de troca do solo. Simultaneamente, deste parâmetro depende uma boa agregação, trabalhabilidade e resistência à erosão. Os solos podem ser classificados de acordo com o seu teor em matéria orgânica, mas a maioria dos solos agrícolas são considerados minerais, mas com teores de MO que não estão abaixo dos 5%.

Os resultados obtidos confirmam a pobreza dos solos, uma vez que o teor de MO é inferior a 5% em todas as amostras. No caso da ribeira Seca (onde se situa a barragem do Poilão) os valores de MO aproximam-se dos 5% na zona da albufeira assoreada (PA). Na figura 52 representa-se a variação do teor de MO ao longo da ribeira.

Nos cinco perfis nota-se que os valores mais baixos (coluna a vermelho) correspondem à amostra de leito da ribeira, tal como representado atrás no esquema de amostragem. Excetua-se o ponto PA3 por se situar na albufeira assoreada, e que por isso acumula MO, com teores 2.5 vezes superior às restantes amostras de sedimento. Este incremento sugere a possibilidade de aproveitamento do sedimento da barragem, para melhorar o solo das vertentes adjacentes, onde a MO não excede frequentemente os 3%.



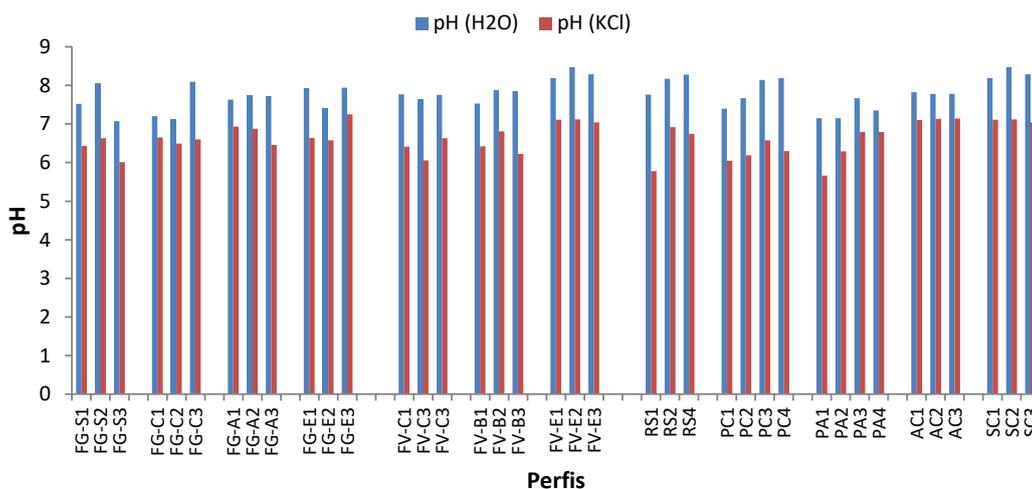
**Figura 52** – Teor de matéria orgânica na Ribeira Seca. (as colunas a vermelho representam o leito da ribeira).

### ➤ **pH**

O pH do solo é influenciado por vários fatores, incluindo: material de origem, precipitação, decomposição da matéria orgânica, vegetação nativa, tipo de cultura, profundidade do solo, uso de fertilizantes químicos e condições de saturação, associadas a anóxia.

Os solos podem ser naturalmente ácidos, em condições de escassez de bases, por vezes lixiviadas por elevadas precipitações (Lopes et al., 1991). Não é, no entanto este o caso dos solos de Cabo Verde, cujo clima seco não promove a lixiviação de bases, como o Ca e o K. Com efeito, para as áreas em estudo, têm-se valores de pH na gama neutra a alcalina, à semelhança do registado em trabalhos anteriores (Varela et al., 2014). Os resultados mostram que o pH dos sedimentos e dos solos analisados varia entre 8,47 e 7,07 (tabela 31), o que corresponde a classificações entre neutro e alcalino (Varennes, 2003). Esta classificação é sustentada pela presença de rochas carbonatadas na área de estudo. Assim, tal como referem os autores citados, este parâmetro reflete as condições tipicamente observadas nos solos de Cabo Verde.

Conforme se antecipava, os valores de pH (H<sub>2</sub>O) são maiores do que os pH (KCl) (figura 53). Esse facto é resultante do efeito da solução de KCl, que, em contacto com o solo induz a troca de catiões devido à troca do ião K<sup>+</sup>, pelo hidrogénio, indicando a existência de posições de troca, associada por exemplo aos minerais de argila.



**Figura 53-** Análise comparativa dos valores de pH (H<sub>2</sub>O) e pH (KCl)

A variação do pH tem uma influência muito grande nas culturas agrícolas, sendo de destacar que a maioria das culturas se desenvolvem melhor quando o pH está entre 6,0 e 7,0, mas a acidez não retarda o crescimento de todas as culturas. Pelo contrário, algumas culturas necessitam de condições ácidas para seu desenvolvimento (Lopes, 1995).

De acordo com Gepeq (1998), as alterações de alguns minerais bem como o uso de fertilizantes podem tornar o solo ácido, prejudicando o crescimento de alguns vegetais como a soja, o feijão e o trigo, e diminuir a ação de micro-organismos presentes nesse compartimento.

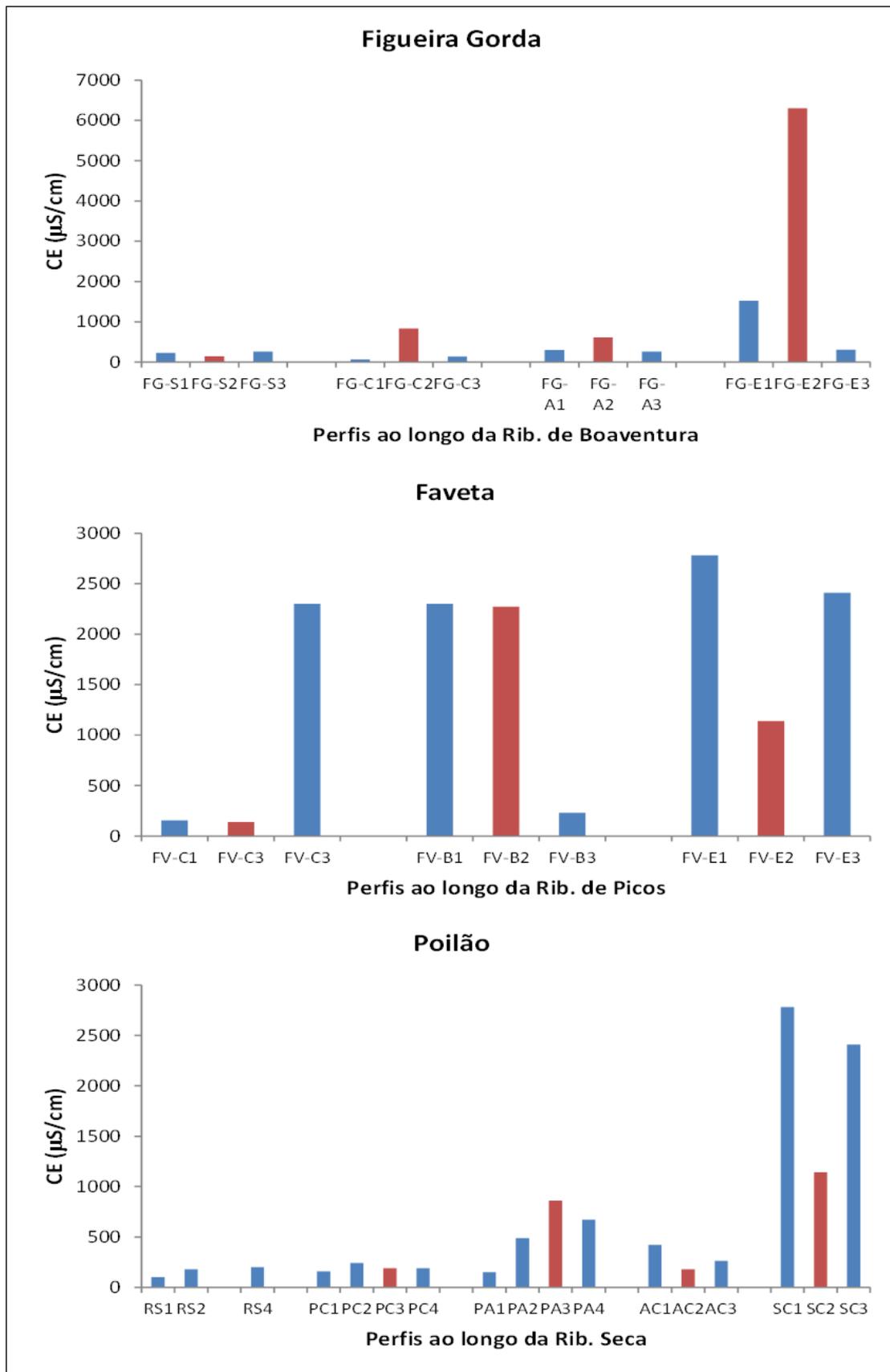
Em regiões áridas e com pouca chuva, pode ocorrer alcalinização excessiva do solo por acumulação de bases, o que pode ser prejudicial ao crescimento dos vegetais.

➤ **Condutividade elétrica**

Uma das formas de determinar o teor de sais do solo é através da medição da condutividade elétrica. Em geral, a condutividade varia nos solos analogamente aos teores de sais presentes em solução do solo, seja por condições naturais ou pela atuação incorreta de outros fatores de produção.

A condutividade elétrica apresenta valores excepcionalmente elevados em algumas amostras (tabela 31), destacando-se perfis junto ao mar (como é o caso do FG-E, em especial a amostra no leito FG-E2). Este valor pode explicar-se pela localização no estuário, e numa zona fortemente afetada pelo avanço do nível do mar, provocado pela excessiva exploração da areia e cascalho da praia.

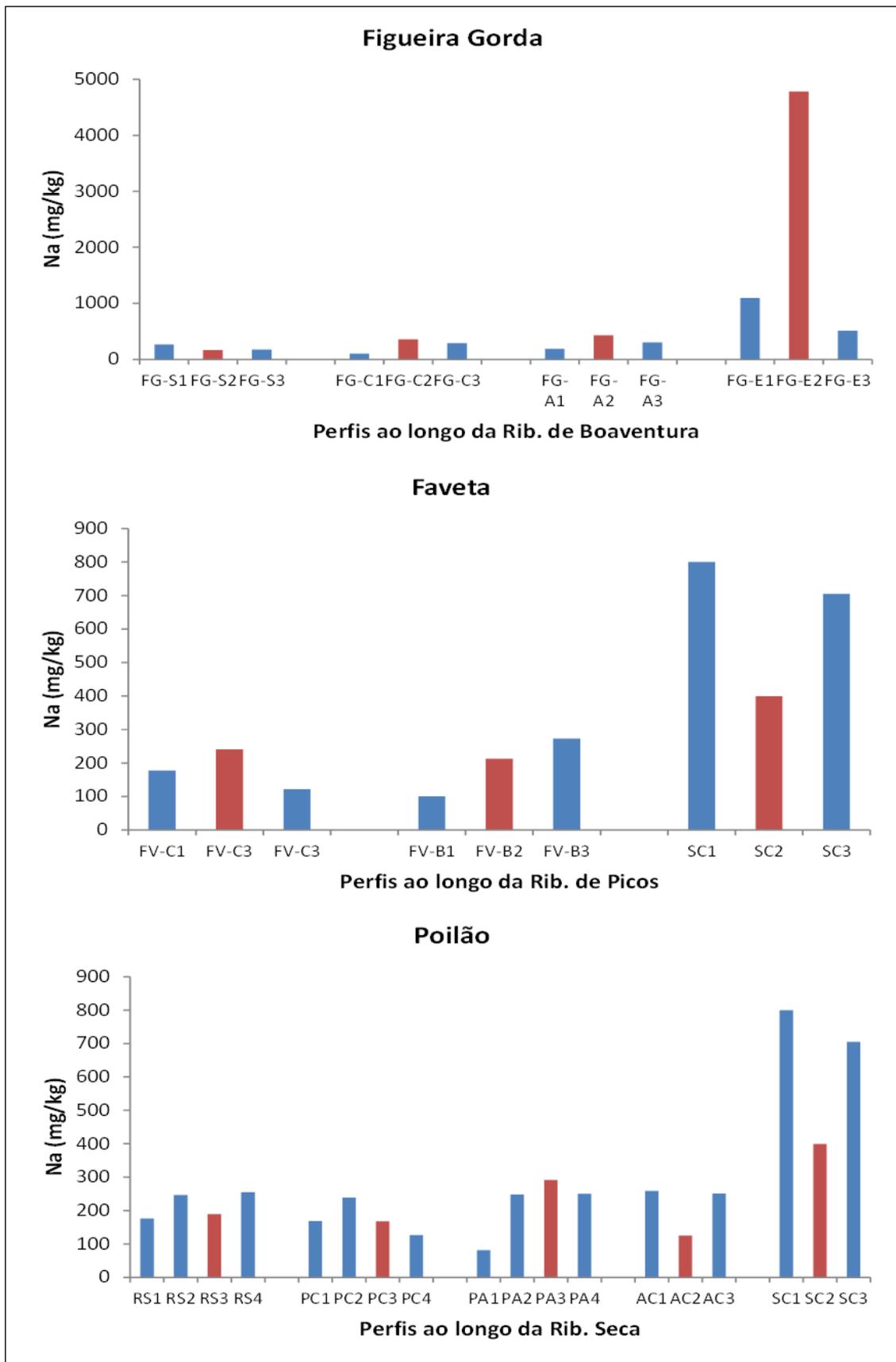
A variação da condutividade elétrica ao longo das ribeiras (de montante para jusante) representa-se na figura 54, observando-se uma tendência de aumento com a proximidade ao mar. Para além dos referidos perfis no estuário, destacam-se outros pontos (FV-C3, FV-B1, FV-B2, SC1 e SC3), cuja elevada CE pode ser explicada pela tendência de salinização, nestas condições de aridez e reduzida precipitação, tal como já foi referido por Tomé, (1997).



**Figura 54-** Distribuição dos valores da condutividade elétrica sistemas fluviais estudados, de montante para jusante. (as colunas a vermelho representam o leito da ribeira).

Klar (1988) afirma que as culturas respondem diferentemente às concentrações salinas, podendo ser classificadas de acordo com os valores dessa condutividade. No entanto os solos salinos podem ser facilmente identificados em condições naturais pela presença de uma crosta branca e por encontrarem-se normalmente floculados, devido à presença de sais em excesso, associada à ausência de quantidades significativas de sódio trocável (Gheyi, 2000). De uma maneira geral, esta tendência observada para a CE, é corroborada pela distribuição da concentração de sódio, que se apresenta na figura 55. A presença deste elemento é fortemente controlada pela influência marinha, estando a distribuição de valores também relacionada com a salinização que se observa na ilha e referida por outros autores (Pina, 2011; Cruz Fuentes, 2008). Os trabalhos citados referem que a maioria dos solos da ilha está sujeita à degradação por salinização, em consequência principalmente da utilização de água salobra na irrigação, da erosão e da extração de areia nos leitos das ribeiras.

A figura 55 evidencia a influência do mar, nomeadamente provocada pela dispersão do spray marinho ao longo do sistema fluvial. A maior concentração do sódio ocorre nos perfis FG- E e SC, que se localizam à beira das praias.

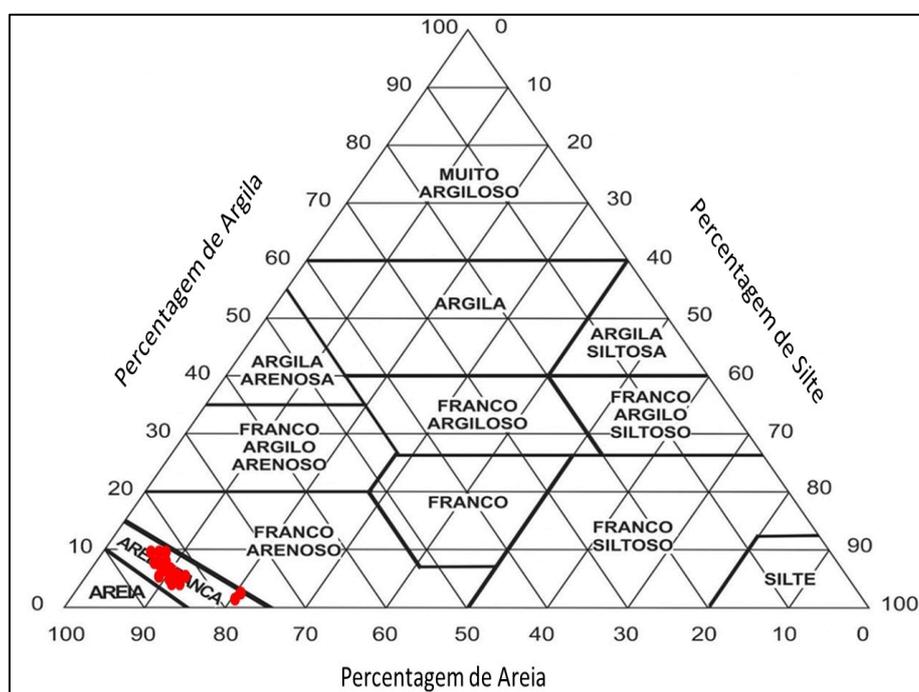


**Figura 55** - Concentração do sódio nos sistemas fluviais estudados, de montante para jusante. (as colunas a vermelho representam o leito da ribeira)

## ➤ Textura

A textura refere-se às proporções relativas das partículas ou frações de areia, silte e argila na terra fina seca ao ar (fração < 2 mm). As principais classes texturais do solo são definidas pelas percentagens de areia (entre 0,05 mm e 2 mm), silte (menores que 0,05 mm, mas maiores que 0,002 mm) e argila (menores que 0,002 mm) de acordo com as linhas mais escuras mostradas no diagrama triangular. Os resultados foram projetados no diagrama da Figura 56.

A textura é a propriedade física do solo que menos sofre alteração ao longo do tempo. Possui grande relevância na irrigação pois, como referido atrás, tem influência direta na taxa de infiltração de água, na aeração, na capacidade de retenção de água, na nutrição, como também na aderência ou força de coesão nas partículas do solo.



**Figura 56-** Diagrama triangular utilizado para a classificação da textura dos solos (escala de Atterberg).

Em síntese, todas as amostras analisadas na área das três barragens em estudo apresentam, textura grosseira. São solos maioritariamente com textura areno-franca, proporcionando uma fraca estabilidade dos seus agregados tornando-os facilmente erodidos e com fraca capacidade de retenção de água. Os resultados projetados no diagrama estão de acordo com as observações e registos acerca da textura de campo. Com efeito o manuseamento dos solos sugeriu caráter áspero, não formando bola ou filamento.

Portanto, ao contrário do que se poderia esperar devido aos processos de meteorização, erosão seletiva e transporte, não se nota um aumento de frações finas (argila e silte) no sedimento

comparativamente com os solos das vertentes. No entanto, deve notar-se que nestas condições de aridez, em que as ribeiras estão longos períodos completamente secas, os seus leitos são também cultivados, pelo que se verifica frequentemente mistura de materiais.

### ➤ Nutrientes

Entende-se por nutriente um elemento que contribui para o crescimento e a saúde de um organismo, sendo essencial para que este complete o seu ciclo de vida. No caso das plantas são nutrientes essenciais os seguintes elementos: nitrogénio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cloro, ferro, manganês, zinco, cobre e níquel (Bonner *et al.* 1965). O mesmo autor defende que os nutrientes indispensáveis são absorvidos pelas plantas em quantidades específicas, necessárias para o seu desenvolvimento e podem ser divididos de acordo com a concentração relativa nos tecidos da planta em micro e macronutrientes. Os macronutrientes NO<sub>3</sub>, K, Ca, Mg, P, e S, fazem parte de moléculas essenciais, são necessários em grandes quantidades e tem função estrutural. Os micronutrientes Cl, Fe, B, Mn, Zn, Cu e Mo, fazem parte das enzimas e tem função reguladora, sendo necessários em quantidades menores. No entanto, esta divisão não significa que um nutriente seja mais importante do que outro, apenas que eles são necessários em quantidades e concentrações diferentes, cujos valores típicos de apresentam na tabela 35.

**Tabela 35-** Concentrações típicas para o crescimento das plantas (Epstein, 1965)

<b>Elemento</b>	<b>mg kg<sup>-1</sup></b>
<b>Azoto (N)</b>	15.000
<b>Potássio (K)</b>	10.000
<b>Cálcio (Ca)</b>	5.000
<b>Magnésio (Mg)</b>	2.000
<b>Fosforo (p)</b>	2.000
<b>Enxofre (S)</b>	1.000
<b>Cloro (Cl)</b>	100
<b>Ferro (Fe)</b>	100
<b>Boro (B)</b>	20
<b>Manganês (Mn)</b>	50
<b>Zinco (Zn)</b>	20
<b>Cobre (Cu)</b>	6

A disponibilidade de nutrientes é influenciada pelo balanço entre solo e água, que por sua vez condiciona as condições de pH e potencial redox, em constante variação nestes sistemas em assoreamento (Lopes, 1995).

A tabela 36 mostra uma seleção de elementos que atuam como micronutrientes.

**Tabela 36-** Valores das concentrações de macronutrientes das amostras em estudo (Macronutrientes (mg/kg))

		Ca	K	Mg	S	NO3	P
<b>BARRAGEM DE POILÃO</b>	RS1	6520	209	1981	4	<0.5	4
	RS2	5867	627	1516	10	5	23
	RS3	3937	267	1133	27	1	7
	RS4	7090	204	1916	29	1	8
	PC1	6520	373	830	2	<0.5	5
	PC2	6082	932	1159	17	12	17
	PC3	6700	459	1982	15	9	14
	PC4	6372	518	1611	4	<0.5	13
	PA1	4437	519	1589	7	13	6
	PA2	5256	897	1206	33	1	153
	PA3	7800	531	2154	190	14	26
	PA4	6737	210	1613	263	32	21
	AC1	5319	673	1639	26	17	33
	AC2	4230	1482	1185	8	12	19
	AC3	5065	682	1819	19	7	47
	<b>BARRAGEM DE FIGUEIRA GORDA</b>	SC1	6758	949	2459	126	58
SC2		3414	465	1108	61	7	10
SC3		6294	709	2707	84	4	8
FG-S1		7233	984	2992	10	3	7
FG-S2		4069	446	1122	5	2	9
FG-S3		4944	935	1425	7	4	22
FG-C1		5370	542	1470	4	<0.5	71
FG-C2		6279	538	1841	305	9	24
FG-C3		6819	635	2311	4	<0.5	4
FG-A1		3291	1483	1001	10	5	126
FG-A2		6729	724	2621	319	<0.5	36
FG-A3		4854	592	1762	14	3	19
<b>BARRAGEM DE FAVETA</b>	FG-E1	4501	1110	2040	66	18	25
	FG-E2	4957	982	2275	372	21	23
	FG-E3	3663	627	1328	20	7	19
	FV-C1	3933	390	1295	15	4	14
	FV-C2	6151	175	1675	27	<0.5	24
	FV-C3	5577	340	1311	2	<0.5	6
	FV-B1	5566	727	1682	10	9	37
	FV-B2	5327	341	1875	11	2	19
	FV-B3	7212	636	2283	13	<0.5	13
FV-E1	6758	949	2459	126	58	57	
FV-E2	3414	465	1108	61	7	10	
FV-E3	6294	709	2707	84	4	8	

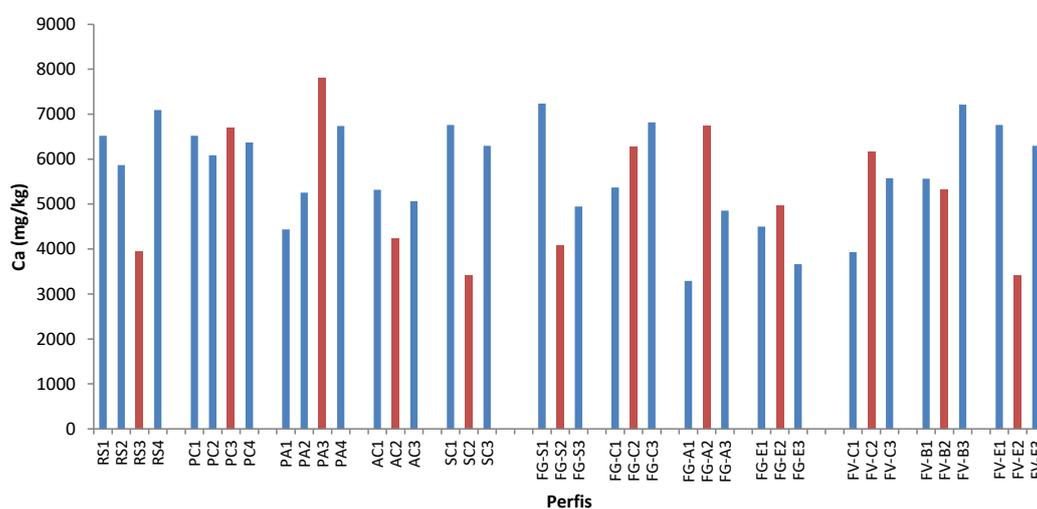
As concentrações dos macronutrientes nomeadamente o cálcio (os solos calcários, áridos, contêm os maiores níveis deste nutriente), o magnésio (vem da meteorização das rochas que contêm

minerais como biotite, hornblenda e clorite) e potássio (libertado à medida que os minerais do solo são meteorizados), registam valores considerados normais, tomando em consideração a geologia da área de estudo.

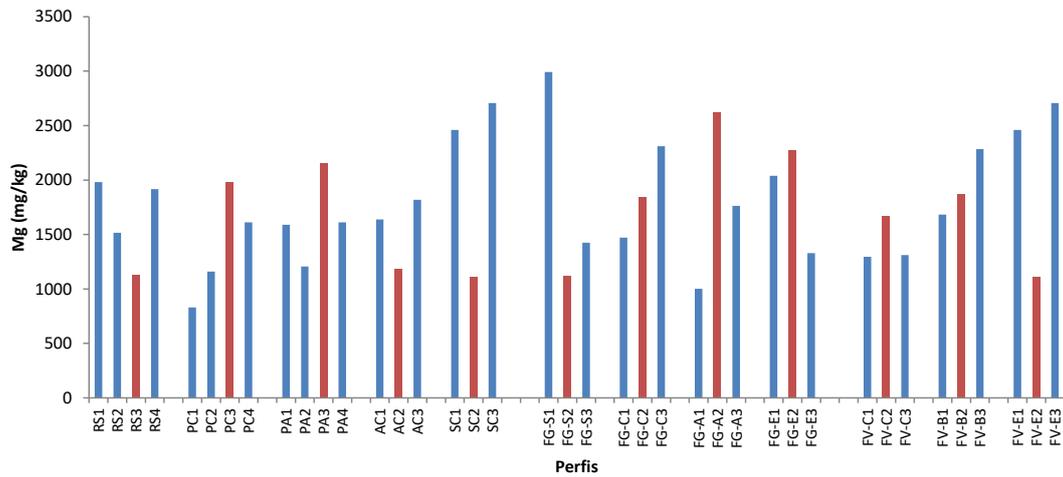
Os solos geralmente contêm menos magnésio do que cálcio, pois o primeiro é mais suscetível à lixiviação. Além disso, a maioria do material de origem contém menos magnésio do que cálcio. Na área destas barragens determinaram-se concentrações máximas de Ca e Mg, respetivamente de 7000 e 2992 mg/kg.

Podem ocorrer deficiências, mais frequentemente em solos arenosos, ácidos, formados sob condições de elevado índice pluviométrico, o que não é o caso presente. As deficiências também podem ocorrer em solos calcários onde a água de irrigação contém altos níveis de bicarbonato, ou ainda em solos alcalinos (sódicos) (Lopes, 1995).

Tal como se refere anteriormente, a presença das principais bases de troca, Ca e Mg, ocorre em consonância com o material parental que sofre meteorização. As concentrações observadas são da ordem ou superiores aos valores indicados como adequados para a nutrição das plantas (Epstein, 1965). O sedimento nas áreas das albufeiras assoreadas mostra um enriquecimento nestas bases de troca (PA3, FG-A2 e FV-C2) (Figuras 57 e 58).



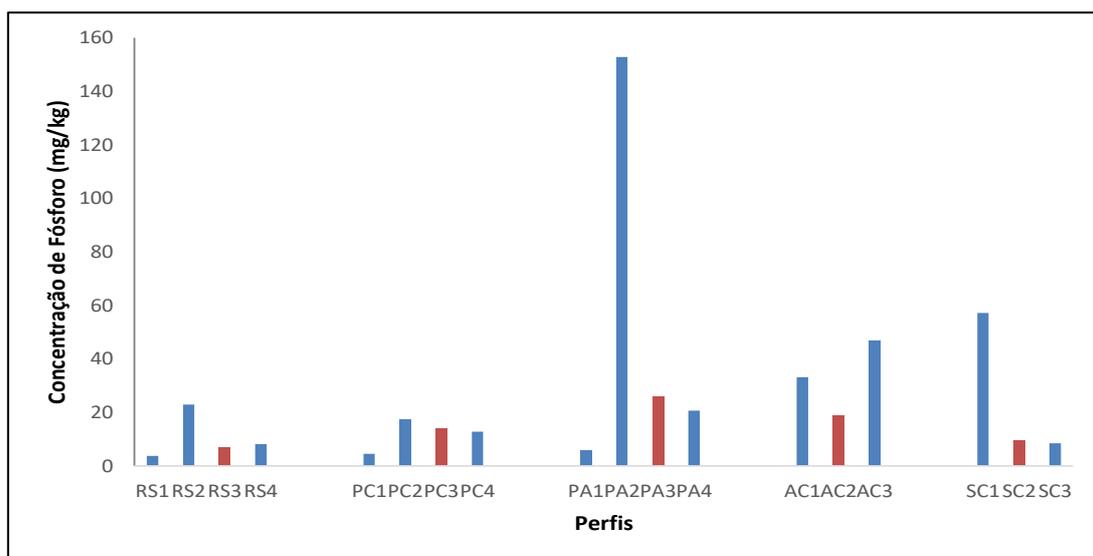
**Figura 57** – Distribuição das concentrações de cálcio nos sistemas fluviais embalsados (as colunas a vermelho representam o leito das ribeiras)



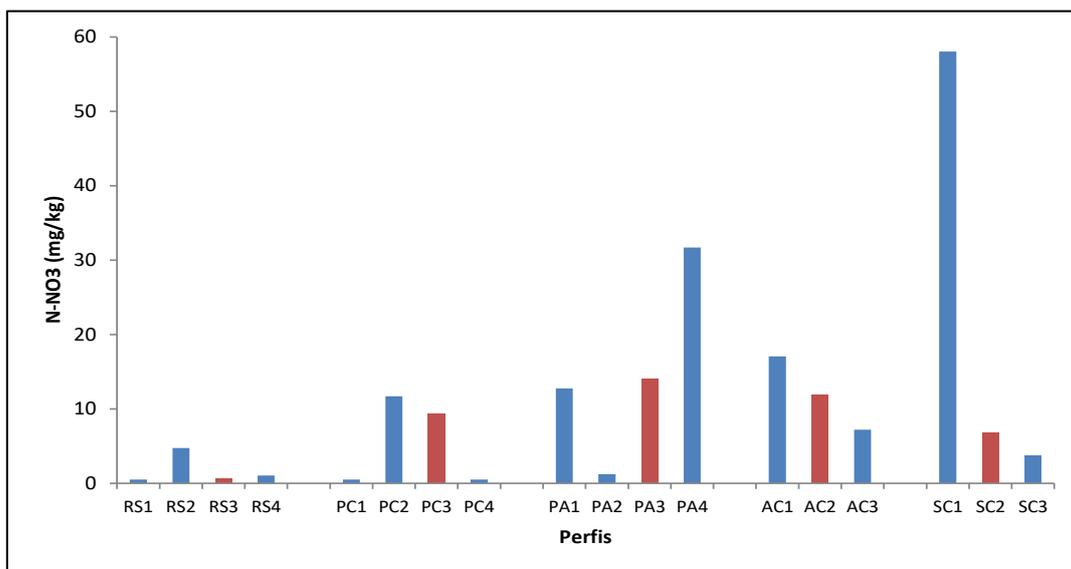
**Figura 58** – Distribuição das concentrações de magnésio nos sistemas fluviais embalsados (as colunas a vermelho representam o leito das ribeiras)

O P é um nutriente importante, que à semelhança do que se observou para a MO, ocorre em todos os casos com baixos valores de disponibilidade para as plantas. A figura 59 mostra a distribuição deste nutriente ao longo da ribeira Seca, onde se localiza a albufeira do Poilão. Nota-se um aumento progressivo para jusante, o que se explica pela maior intensidade agrícola no vale, com uso de fertilizantes. O sedimento da albufeira (amostra PA2) apresenta concentrações superiores de fósforo, indicando um enriquecimento deste nutriente no sedimento.

Na zona da albufeira (Perfil PA) também se nota um incremento de N-NO<sub>3</sub> relativamente ao solo colhido a montante (Figura 60). Os valores mais elevados a jusante (por exemplo SC1) estão relacionados com o uso de fertilizantes azotados nesta zona de cultivo intenso de banana.



**Figura 59** – Variação da concentração de fósforo assimilável ao longo da Ribeira Seca (as colunas a vermelho representam o leito da ribeira)



**Figura 60** – Variação da concentração de nitrato ao longo da Ribeira Seca (as colunas a vermelho representam o leito da ribeira)

Na tabela 37 estão apresentados os valores das concentrações dos micronutrientes das amostras em estudo.

**Tabela 37-** Valores das concentrações de micronutrientes das amostras em estudo

<b>Micronutrientes</b>						
	<b>Amostras</b>	<b>Mn</b>	<b>B</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>
<b>BARRAGEM DE POILÃO</b>	RS1	8.5	1.0	0.8	7.8	0.3
	RS2	19.2	0.8	1.4	7.5	0.7
	RS3	17.4	0.2	0.5	7.2	0.3
	RS4	8.0	0.4	1.0	7.0	0.3
	PC1	4.8	0.3	1.5	5.2	0.2
	PC2	9.0	0.9	1.4	6.3	0.3
	PC3	21.0	0.3	0.7	9.6	0.5
	PC4	10.3	0.6	1.4	8.0	0.3
	PA1	19.6	0.5	1.9	14.2	0.3
	PA2	13.1	0.5	3.2	20.8	1.7
	PA3	71.7	0.7	10.8	126.0	0.5
	PA4	32.3	0.4	7.9	23.8	0.4
	AC1	11.0	1.2	1.0	7.2	0.8
	AC2	14.0	0.4	1.2	8.5	1.5
	AC3	17.4	1.3	1.1	8.7	0.9
	SC1	11.9	1.8	1.0	7.1	0.7
	SC2	24.8	0.7	1.4	15.9	0.4
	SC3	6.6	1.2	1.0	7.5	0.3
<b>BARRAGEM DE FIGUEIRA GORDA</b>	FG-S1	12.9	0.6	1.8	8.7	0.3
	FG-S2	15.5	0.3	0.5	7.3	0.4
	FG-S3	11.9	0.9	1.4	14.5	0.4
	FG-C1	7.6	0.4	1.8	24.1	0.2
	FG-C2	37.0	0.8	2.9	29.8	0.5
	FG-C3	7.4	0.4	0.9	7.8	0.2
	FG-A1	17.2	1.1	1.6	21.9	1.1
	FG-A2	24.4	0.8	7.7	79.6	0.6
	FG-A3	5.2	0.8	1.8	9.1	0.3
	FG-E1	8.3	1.9	1.3	6.8	0.4
	FG-E2	39.1	2.3	2.0	17.8	0.9
	FG-E3	16.4	1.6	0.6	6.5	1.2
<b>BARRAGEM DE FAVETA</b>	FV-C1	31.2	0.6	0.8	10.8	0.8
	FV-C2	24.2	0.3	1.5	11.5	0.5
	FV-C3	5.9	0.3	1.9	10.4	0.4
	FV-B1	14.0	0.6	1.5	13.7	0.4
	FV-B2	18.9	0.3	1.2	11.2	0.4
	FV-B3	5.9	0.5	1.8	12.3	0.3
	FV-E1	11.9	1.8	1.0	7.1	0.7
	FV-E2	24.8	0.7	1.4	15.9	0.4
	FV-E3	6.6	1.2	1.0	7.5	0.3

A concentração de zinco bio disponível pode considerar-se baixa, atendendo às necessidades da generalidade das culturas. Os solos com deficiência de zinco foram definidos com valores inferiores a 1,5 mg/kg. No entanto a sua deficiência em solos agrícolas limita a produção, com perdas de rendimento que pode alcançar os 40 % (Noulas *et al.* 2018). Os resultados obtidos sugerem limitações em termos de biodisponibilidade de zinco, uma vez que os valores estão geralmente abaixo de 1.5 mg/kg. Nota-se, no entanto, um enriquecimento nalgumas amostras, nomeadamente na zona de assoreamento da albufeira do Poilão, onde se obteve o valor mais elevado (1.7 mg/kg), sugerindo uma vez mais o potencial agrícola dos sedimentos.

À semelhança do zinco, o boro apresenta valores muito baixos, o que de acordo com Sillanpää, (1982), provoca restrições à produção agrícola. A sua deficiência tem sido relatada em solos altamente lixiviados ou desenvolvidos a partir de depósitos calcários, aluviais e oceânicos (Takkar *et al.* 1989 e Razzak *et al.* 1996). Os fatores que influenciam a deficiência do boro no solo são pH elevado, seca, textura arenosa, cultivo intensivo, falta de matéria orgânica e uso de fertilizantes (Drene *et al.* 1942; Rashid *et al.* 2004).

Nas zonas em estudo esses fatores assumem um papel importante, uma vez se verificam todas estas condições e propriedades propícias à falta de disponibilidade deste nutriente.

Os valores de ferro, cobre e manganês são ligeiramente superiores aos de zinco e boro, mas de forma geral podem considerar-se baixos nos solos em análise. Segundo Gorny *et al.* (2000), quanto menor o teor de argila, menor a concentração de micronutrientes, uma vez que a argila tem uma elevada capacidade de adsorção, contribuindo para a capacidade de troca catiónica. Uma vez mais, a textura arenosa não favorece a disponibilidade destes micronutrientes.

#### **7.4.1.2- Atributos mineralógicos**

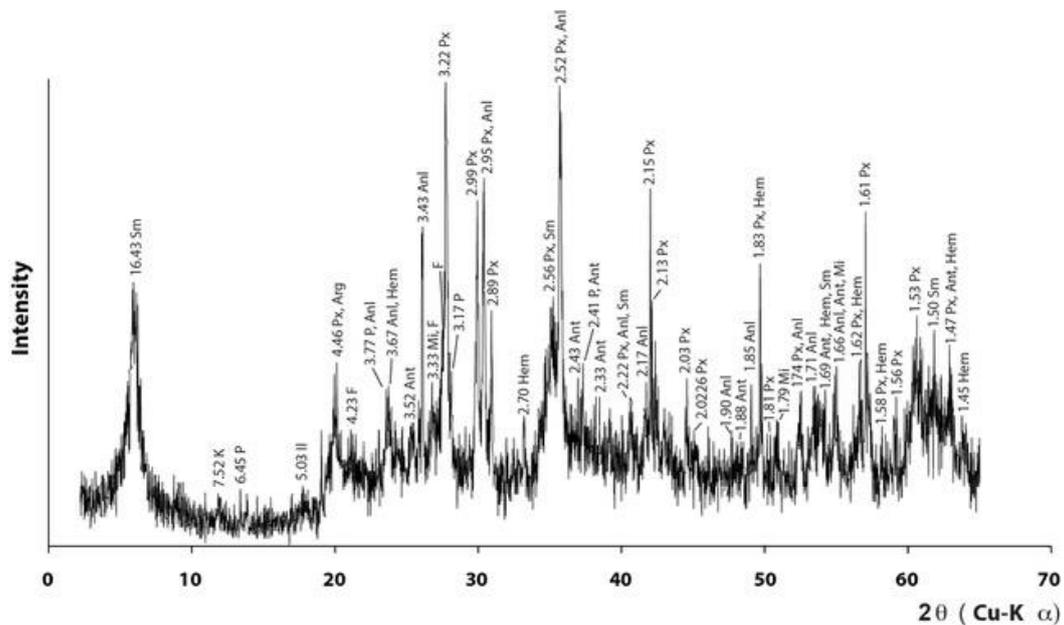
A composição mineralógica obtida por DRX na fração terra fina, das diferentes áreas estudadas caracteriza-se pela presença de olivina, piroxena, anfíbola, quartzo, feldspato, plagioclase, nefelina, micas, minerais de argila (esmectite, interstratificado caulinite-esmectite, caulinite e/ou haloisite e serpentina), analcite, anatase, hematite, maghemite e goethite. Na tabela 38 observa-se a estimativa dos vários minerais num conjunto de amostras da Ribeira Seca.

**Tabela 38** – DRX da fração < 2 mm de amostras de vários perfis na Ribeira Seca (Ol – Olivina; Px – Piroxena; Anf – Anfíbola; Arg – Minerais de argila; M – Mica; Q – Quartzo; F – Feldspato; P – Plagiocalse; Nef – Nefelina; Anl – Analcina; Ant – Anatase; Hem – Hematite; Mgh – Maghemite; Go – Goethite; tr – Vestigial)

<b>Amostra</b>	<b>Ol</b>	<b>Px</b>	<b>Anf</b>	<b>Arg</b>	<b>Mi</b>	<b>Q</b>	<b>F</b>	<b>P</b>	<b>Nf</b>	<b>Anl</b>	<b>Ant</b>	<b>Hem</b>	<b>Mgh</b>	<b>Go</b>
<b>RS1</b>	-	29	-	20	1	-	-	5	-	8	tr	-	37	tr
<b>RS3</b>	2	53	-	8	1-	-	-	tr	-	5	-	6	26	-
<b>RS4</b>	-	23	-	8	tr	-	-	tr	-	22	4	6	37	-
<b>PC1</b>	-	41	-	6	-	-	-	-	-	-	-	4	35	-
<b>PC2</b>	4-	52	-	6	2	-	-	tr	-	6	-	3	27	-
<b>PC3</b>	-	26	-	10	tr	-	-	10	-	9	-	13	32	-
<b>PC4</b>	-	25	-	7	8	-	-	-	-	tr	tr	14	46	-
<b>PA1</b>	-	17	-	12	tr	15	-	-	-	-	8	12	35	-
<b>PA2</b>	-	30	-	10	5	10	-	-	-	7	-	10	28	-
<b>PA3</b>	-	24	-	17	2	-	tr	-	-	-	-	15	42	-
<b>PA4</b>	-	38	5	9	4	5	-	-	-	8	-	2	20	-
<b>AC1</b>	7	25	-	16	1	-	-	tr	-	-	-	9	43	tr
<b>AC2</b>	28	27	-	5	2	-	-	tr	-	3	-	-	30	6
<b>AC3</b>	9	41	-	10	2	-	-	tr	tr	-	-	9	29	-
<b>SC1</b>	-	38	-	13	tr	-	-	4	-	-	5	7	33	-
<b>SC2</b>	4	48	1	4	1	-	-	tr	-	-	5	5	32	-
<b>SC3</b>	-	37	-	11	2	-	-	-	tr	-	4	10	36	-

Esta mineralogia reflete a litologia da área de estudo. Encontram-se os minerais primários típicos das rochas basálticas, como a piroxena. Por sua vez, os minerais secundários do solo, retratam os processos de meteorização associados à pedogénese, que conduzem à formação de minerais de argila, como a esmectite e óxidos-hidróxidos de ferro, como a maghemite.

A piroxena é o mineral predominante, sendo o seu intervalo de variação de 17% a 53% seguido de maghemite cuja estimativa varia entre 20% e 46%, considerando todas as amostras estudadas. Os minerais de argila são também ubíquistas, mas ocorrem em quantidades mais pequenas ( $\leq 20\%$ ), tal como a hematite ( $\leq 15\%$ ). Os restantes minerais estão presentes em quantidades muito pequenas, mesmo vestigiais, ou não são detetados na maioria das amostras. A figura 61 representa o padrão de DRX da composição mineralógica do pó da fração terra fina e sua identificação numa amostra selecionada como representativa (amostra RS4).



**Figura 61** – Padrão DRX de uma amostra da Ribeira Seca na fração < 2 mm, evidenciando a composição mineralógica principal.

Na fração argila (< 2 μm) identificaram-se os seguintes minerais: ilite, esmectite, interestratificado irregular caulinite-esmectite, minerais de caulino, óxidos-hidróxidos de ferro (hematite, maghemite e goethite) e alofana. A Tabela 39 mostra a semi-quantificação da composição mineralógica desta fração mais fina.

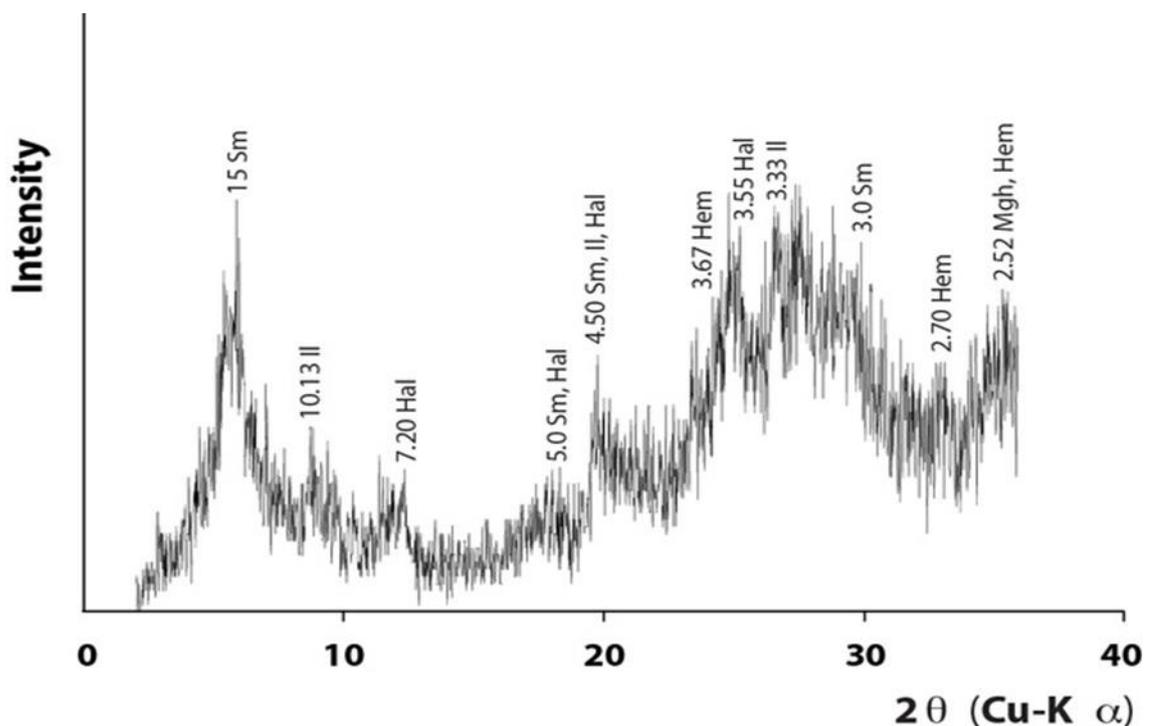
**Tabela 39** – DRX da fração < 2 µm de amostras de vários perfis na Ribeira Seca; Figueira Gorda e Faveta. Il – Ilite; Sm – Esmeectite; K-Sm – Interestratificado caulinite-esmeectite; K – Caulinite; Hal – Halosite; Hem – Hematite; Mgh – Maghemite; Go – Goethite; All – Arofana; tr – Vestigial.

<b>Amostra</b>	<b>Il</b>	<b>Sm</b>	<b>K-Sm</b>	<b>K/Hal</b>	<b>Hem</b>	<b>Mgh</b>	<b>Go</b>	<b>All</b>
<b>RS1</b>	3	42	-	3	10	42	-	-
<b>RS3</b>	4	11	tr	-	21	62	-	-
<b>RS4</b>	11	54	15	-	20	tr	-	-
<b>PC1</b>	8	20	-	8	17	47	-	-
<b>PC2</b>	26	51	-	23	-	tr	tr	-
<b>PC3</b>	6	64	tr	-	-	-	30	-
<b>PC4</b>	13	21	31	14	-	-	21	-
<b>PA1</b>	16	24	-	14	-	34	12	-
<b>PA2</b>	33	21	-	38	-	-	8	-
<b>PA3</b>	25	33	-	25	17	tr	-	-
<b>PA4</b>	8	79	-	5	-	-	8	-
<b>AC1</b>	44	-	25	8	-	tr	23	-
<b>AC2</b>	7	42	-	6	24	21	-	-
<b>AC3</b>	10	49	-	25	-	-	16	-
<b>SC1</b>	20	46	tr	16	18	-	-	tr
<b>SC2</b>	7	22	-	tr	17	54	-	tr
<b>SC3</b>	7	63	-	tr	30	-	-	-
<b>FG-S1</b>	tr	77	-	8	-	tr	15	-
<b>FG-S2</b>	15	-	-	tr	-	tr	tr	85
<b>FG-S3</b>	20	-	-	13	-	-	20	47
<b>FG-C1</b>	19	-	-	54	-	1	27	-
<b>FG-C2</b>	5	-	-	3	15	54	-	23
<b>FG-C3</b>	tr	-	-	tr	-	76	2	22
<b>FG-E1</b>	27	-	-	24	-	-	49	-
<b>FG-E2</b>	15	62	tr	23	-	-	tr	-
<b>FV-C1</b>	tr	68	10	7	-	-	15	-
<b>FV-C3</b>	26	12	tr	62	-	-	tr	-
<b>FV-B2</b>	16	38	-	14	-	-	12	23
<b>FV-B3</b>	5	31	-	18	-	-	-	46
<b>FV-E1</b>	20	46	tr	16	18	-	-	tr
<b>FV-E2</b>	7	22	-	tr	17	54	-	tr
<b>FV-E3</b>	7	63	-	tr	30	-	-	-

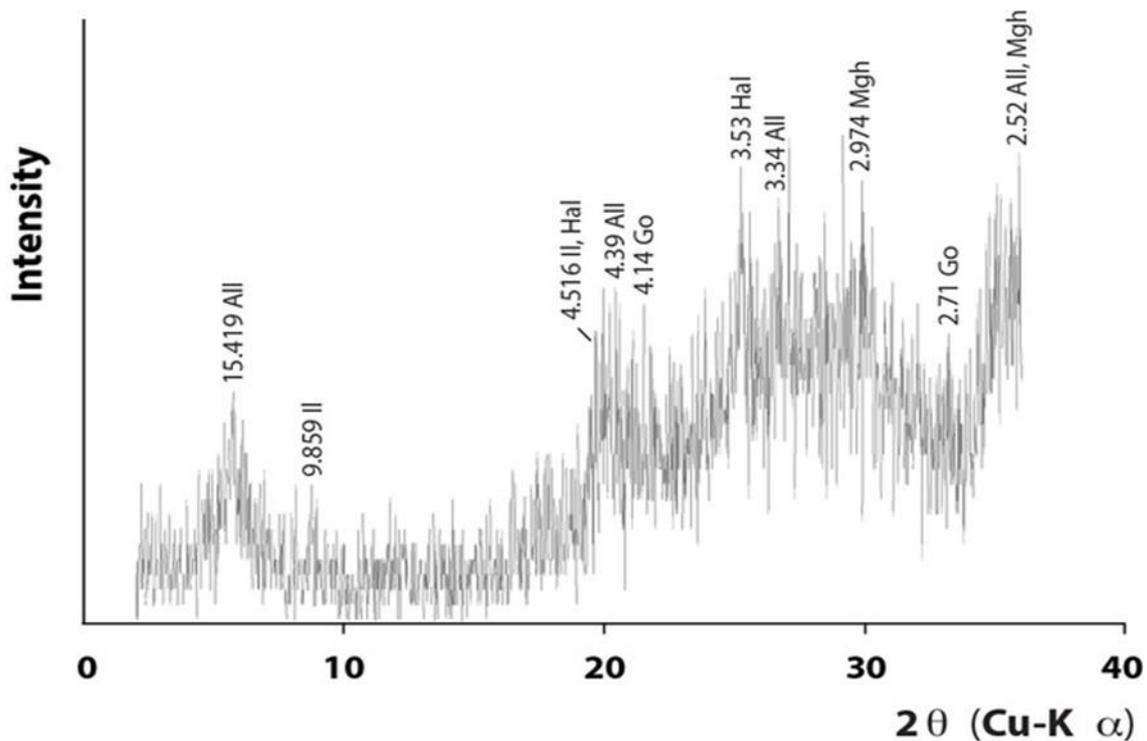
Esmectite e ilite são os minerais de argila presentes em todas as amostras, mas a quantidade de esmectite é maior do que a da ilite, aspecto já observado por Fonseca et al. (2014) nos sedimentos do Poilão. Enquanto para a esmectite o intervalo de variação é de 11 % a 79 %, para a ilite é  $\leq 44$  %. Os minerais de caulino (caulinite e/ou halosite) ocorrem em todas as amostras com referências PA e AC, sendo as percentagens médias de 21% e de 13%, respectivamente nas referidas áreas de estudo. Nas outras áreas a caulinite e/ou halosite ocorre com teores variando entre 0 e 23%. O interestratificado caulinite-esmectite apenas está presente nalgumas amostras, sendo vestigial nalgumas delas. A alofana identificou-se nas amostras do sistema Figueira Gorda (FG) e com teores que variam entre 0 e 85 %, enquanto no sistema da Faveta (FV) apenas está presente em duas amostras com teores entre 23 % e 46 % (Tabela 39).

Entre os óxidos de ferro a maghemite ocorre com valores muito mais elevados ( $\leq 76\%$ ) do que a hematite ( $\leq 30\%$ ). O teor do hidróxido de ferro, goethite, varia entre 0 e 49 %.

As figuras 62 e 63 mostram o padrão de DRX de preparações orientadas da fração  $< 2 \mu\text{m}$  com vista à sua identificação.



**Figura 62** – Padrão de DRX da fração  $< 2 \mu\text{m}$  da amostra PA3 (seca ao ar). Il – Ilite; Sm – esmectite; Hal – Halosite; Hem – Hematite; Mgh - Maghemite. A identificação da esmectite foi confirmada por saturação com etileno-glicol e aquecimento.

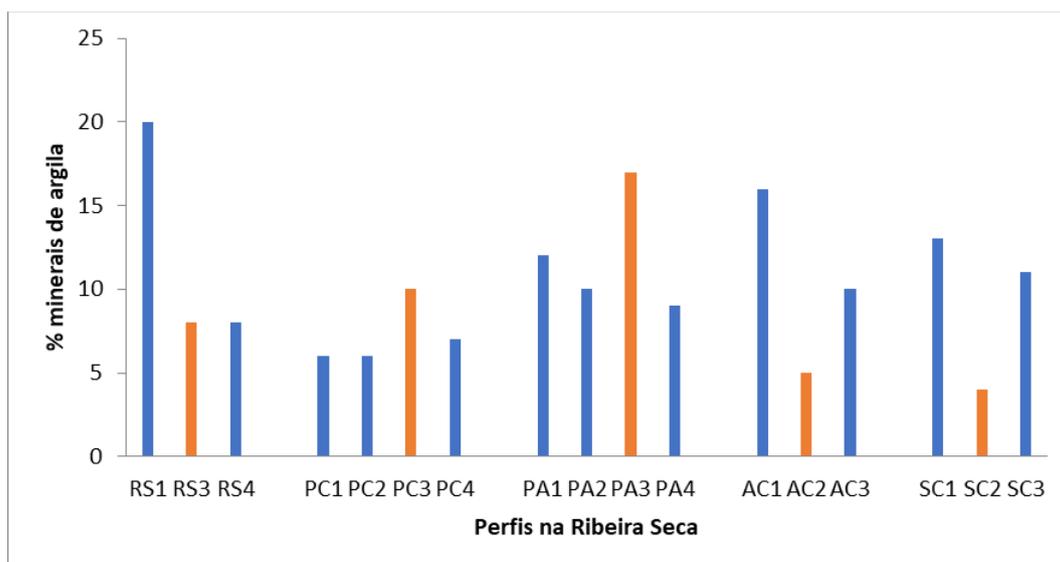


**Figura 63** – Padrão de DRX da fração a fração < 2 μm (lâmina orientada seca ao ar) da amostra FG-S2, evidenciando a presença de alofana (All).

Na maior parte das amostras FG e FV os valores de d e respectivos índices hk dos padrões de DRX parecem indicar a presença de halosite (7 Å) (Valente, et al., 2015). Comparando os dados de DRX da caulinite e da possível halosite (7 Å), nota-se que estes apresentam padrões de variada ordem-desordem, predominando a desordem estrutural nos minerais de caulino das áreas estudadas. Um facto que apoia a presença de halosite foi observado no comportamento da amostra aquando da preparação das lâminas orientadas da fração <2 μm. As amostras “saltam” da lâmina após secas ao ar, devido ao hábito da halosite (Moore et al., 1997).

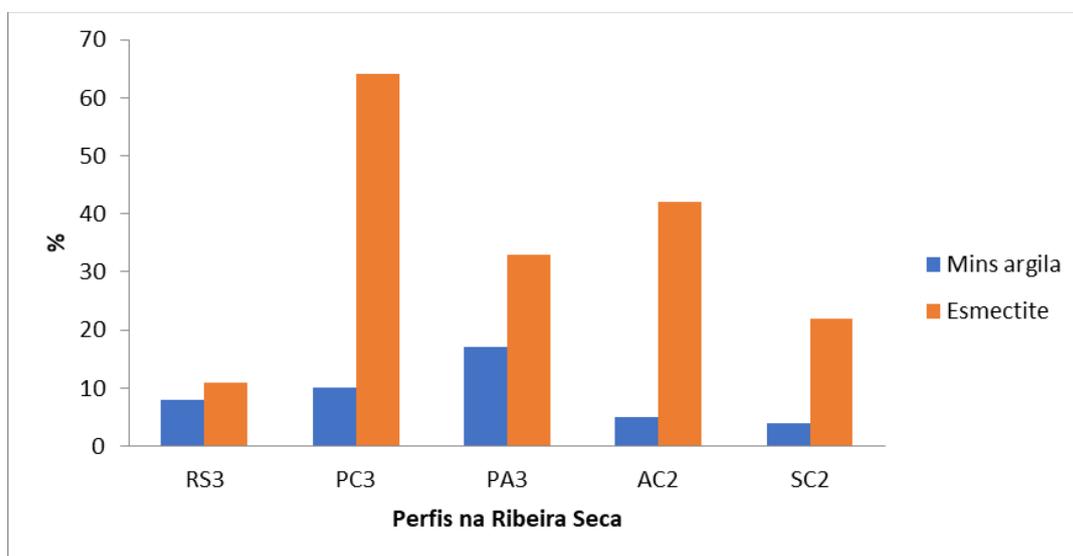
A hematite foi identificada pelas reflexões mais importantes a 2.70-2.71 Å e 2.51 -2.52 Å. A forma simétrica e aguda daquelas reflexões caracteriza uma hematite de boa cristalinidade, na maior parte das amostras. Em algumas amostras a forma larga de alguns picos e a sua baixa intensidade caracterizam uma hematite desordenada. A maghemite foi identificada pelas reflexões a 2.95 Å e 2.52 Å nas preparações orientadas da fração <2 μm. Na totalidade das amostras a forma e a intensidade dos picos a 4.18 Å - 4.21 Å e 2.69 Å (figura 63) sugerem goethite desordenada.

De uma maneira geral, não se observa uma tendência clara de enriquecimento dos sedimentos em minerais de argila, o que está de acordo com o discutido a propósito da textura, que é grosseira nos sedimentos e nos solos das vertentes adjacentes. Na albufeira do Poilão nota-se uma ligeira concentração de minerais de argila em PA3, correspondente à zona com mais sedimento (figura 64).



**Figura 64** – Percentagem de minerais de argila nos perfis da Ribeira Seca (as colunas a laranja representam o leito da ribeira)

Na figura 65 representa-se a média de minerais de argila na fração < 2 mm e de esmectite na fração argila nos pontos correspondentes ao leito (sedimento). Uma vez mais, não se deteta uma diferença considerável, embora se note um ligeiro incremento de proporção na zona de cauda da albufeira (PC).



**Figura 65** – Média da proporção de minerais de argila na fração < 2 mm e na fração < 2 μm no leito da Ribeira Seca.

A mineralogia do solo determina a reserva mineral e consequentemente afeta a fertilidade e produtividade do solo. Os minerais concentrados na fração mais fina afetam particularmente muitas das propriedades físicas (como a textura, agregação e consequente resistência à erosão) e químicas do solo. Constituem o complexo de troca, formando com a matéria orgânica complexos que afetam a agregação e fundamentalmente a capacidade de troca catiónica (CTC). Minerais de argila do grupo da

esmectite, por exemplo, são conhecidos pela sua elevada capacidade troca catiónica, comparativamente com a caulinite. Os óxidos— hidróxidos de ferro são também minerais secundários típicos do solo, mas que pouco contribuem para a CTC. Em excesso, estes minerais podem provocar problemas de cimentação.

Em geral, estes atributos mineralógicos são coerentes com outras propriedades e com as condições ambientais, nomeadamente climáticas, geológicas e de uso do solo. Por exemplo, a textura grosseira dos solos está de acordo com teores relativamente baixos de minerais de argila e com concentrações baixas de nutrientes. Já as bases de troca ocorrem em concentrações adequadas, função do material parental de origem basáltica. A proximidade ao mar condiciona o comportamento de alguns parâmetros, como o Na e a CE. Igualmente, os teores mais elevados de P e N estão nos vales alargados próximos da costa em consonância com o uso mais intenso do solo na bacia. Por sua vez, o enriquecimento dos sedimentos nas albufeiras em assoreamento nota-se em especial no caso do Poilão. No entanto, este enriquecimento, em nutrientes e MO é inferior ao observado noutros contextos, nomeadamente nos trabalhos de Araujo *et al.* (2014) e Pinho *et al.* (2019). Ainda assim, é de relevar que nesta investigação a amostragem refere-se à parte superficial (15 cm). Por exemplo, é possível que ocorram maiores incrementos a maior profundidade, onde se verificarão condições mais redutoras, logo propícias à preservação de MO.

Assim, apesar das tendências não serem aparatosas não se deve excluir o potencial destes sedimentos de assoreamento de barragem. A sua adição aos solos pobres das vertentes adjacentes poderá melhorar, com baixos custos, as propriedades do solo e conseqüentemente a produtividade e resistência à erosão, enquanto se preserva a capacidade de armazenamento dos reservatórios. Com esta estratégia pode reduzir-se a aplicação de fertilizantes químicos, constituindo uma abordagem mais sustentável na gestão dos recursos solo e água.

Perante tal problema, e devido a falta de chuva nos últimos anos, uma estratégia das autoridades nacionais passou pela iniciativa de proceder à remoção dos sedimentos, visando o seu aproveitamento noutros sítios, servindo assim para o enriquecimento dos campos.

Os sedimentos do fundo das albufeiras são reconhecidos como locais preferenciais de deposição de materiais orgânicos e minerais, em particular, nutrientes, metais pesados e bactérias, considerados no seu conjunto como fontes poluentes. Devido à circulação contínua de elementos químicos através da interface sedimento-água, estes materiais são libertados para a coluna de água, sendo esta a principal razão para a degradação da sua qualidade (Fonseca, 2002).

De ressaltar que devido à grande porosidade e conseqüente perigo de erosão é aconselhável a rotação de culturas, o que na área de estudo não é uma prática habitual, tendo os agricultores optados

pelo cultivo sistemático dos mesmos produtos (cana de açúcar, bananeira, cebola e tomate). Devido à pouca fertilidade dos solos faz-se o uso de fertilizantes que influi negativamente nos solos, provocando danos na própria cultura, e contribuindo potencialmente para a degradação dos recursos hídricos.

***CAPÍTULO 8***

---

***INFRAESTRUTURAS DE RESÍDUOS COMO FOCO DE CONTAMINAÇÃO DE SOLOS E SEDIMENTOS***

## **INFRAESTRUTURAS DE RESÍDUOS COMO FOCO DE CONTAMINAÇÃO DE SOLOS E SEDIMENTOS**

Na ilha de Santiago a acumulação de resíduos apresenta-se à partida como um potencial foco de contaminação que se entendeu merecedor de avaliação. A lixeira da cidade da Praia é a principal estrutura de destino final de resíduos em toda a Ilha, pelo que se selecionou como área de estudo para avaliar o seu efeito sobre o solo e a linha de água que recebe a drenagem e eventuais lixiviados da lixeira. Dadas as características de aridez, esta linha de água é temporária, permanecendo quase sempre seca. Assim, na ausência de água, a avaliação do efeito da lixeira fez-se sobre os sedimentos de corrente e sobre o solo na área envolvente.

### **8.1- Produção de resíduos e estruturas de destino final na Ilha**

O termo resíduo tem sofrido evolução na sua definição e esta depende essencialmente do setor de origem. Neste caso, a lixeira da cidade da Praia recebe resíduos indiferenciados, mas a sua maioria pode classificar-se como resíduos sólidos urbanos, ou seja, trata-se maioritariamente dos resíduos gerados pelos agregados populacionais nas suas atividades domésticas. No entanto, a falta de estruturas especializadas faz com que esta lixeira receba outros materiais, nomeadamente sucatas e escombros.

A eliminação dos resíduos é um problema ambiental em muitas partes do mundo, sendo responsável por fenómenos de poluição do meio ambiente quando se faz de forma descontrolada e sem tratamento. Nestas condições, tal como se verifica na área de estudo, os resíduos podem afetar a qualidade dos sistemas fluviais, solo e/ou ar

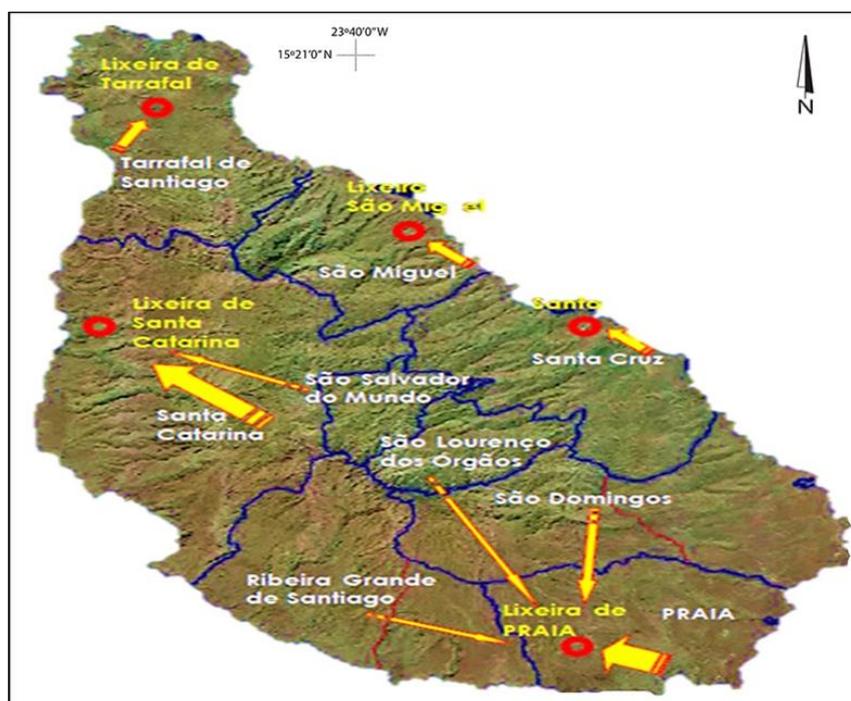
O setor dos resíduos na ilha de Santiago reflete o padrão de consumo relacionado com os hábitos, costumes e evolução demográfica. Esta evolução demográfica ficou marcada pelo aumento intensivo da população nos principais centros urbanos associada a um êxodo rural e a migrações a partir de outras ilhas do arquipélago. Esta tendência, já referida em capítulos anteriores, explica a concentração da população na cidade da Praia. Embora prolifera pequenas lixeiras nos vários concelhos da ilha (figura 66), é na capital que se estabeleceu a principal estrutura de destino final, controlada pelas autoridades municipais.

A produção real dos resíduos não é conhecida, no entanto, estimativas feitas atingem um valor de cerca 74762.3 t/ano para toda ilha, (tabela 40) (INE, 2013). A tabela mostra como a Praia pode representar efetivamente o principal problema em termos de acumulação de resíduos.

**Tabela 40-** Estimativas de produção de resíduos, por concelho, na ilha de Santiago (Inquérito sobre Recolha e Tratamento de Resíduos Urbanos, 2013, INE)

Concelho	Resíduos (t/ano)
Tarrafal	4.795,8
Santa catarina	6.131,7
Santa Cruz	4.667,5
Praia	55.758,2
São Domingos	1.543,6
São Miguel	537,6
São Salvador do Mundo	438,0
São Lourenço dos Órgãos	576,0
Ribeira Grande de Santiago	313,9
<b>Total da ilha de Santiago</b>	<b>74762.</b>

Os municípios de Ribeira Grande de Santo Antão, S. Domingos, S. Salvador do Mundo, S. Lourenço dos Órgãos e Ribeira Grande de Santiago por não possuírem instalações para o tratamento e eliminação de resíduos urbanos recorrem a instalações localizadas nos municípios vizinhos. S. Domingos e Ribeira Grande de Santiago recorrem ao vazadouro municipal da Praia, S. Salvador do Mundo recorre à lixeira municipal de Santa Catarina de Santiago, S. Lourenço dos Órgãos recorre à lixeira municipal de Santa Cruz (IDECV, 2019).



**Figura 66-** Diagrama de gestão de RSU ilha de Santiago (Infraestrutura de Dados Espaciais de Cabo Verde. Divisão Administrativa [www.sit.gov.cv](http://www.sit.gov.cv))

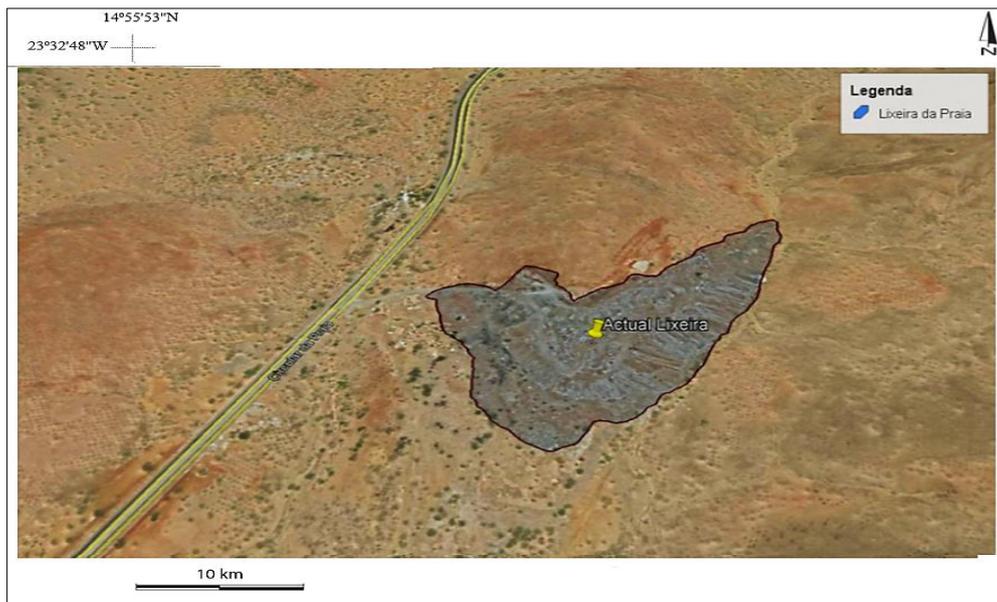
## 8.2 O caso da lixeira da Praia

A poluição associada à produção de lixo pode causar diversos problemas, nomeadamente em termos de saúde pública, promover a degradação ambiental, e afetar o uso do solo, com consequências económicas e sociais. O despejo incorreto de resíduos sólidos é, pois, um dos principais focos de contaminação do solo, podendo culminar na sua completa inutilização.

Além da transmissão de doenças, as lixeiras podem causar deslizamento de encostas, enchentes, danos na paisagem, assoreamento das linhas de água e a contaminação do ar, da água, sedimentos e solo.

### 8.2.1- Características gerais da lixeira

Está localizada a aproximadamente 2,3 km do perímetro externo da cidade da Praia, com as seguintes coordenadas geográficas: 14°55'53" de latitude norte e 23°32'48" de longitude oeste. O seu acesso faz-se a partir do anel rodoviário da Praia, por um trilho de terra, próximo à estrada que leva à Cidade Velha. Ocupa uma área aproximada de 69.092 m<sup>2</sup>. Figura 67.



**Figura 67-** Lixeira da Praia (Imagem aérea, obtida através do Google TM Earth Pro e indicação (delimitação a vermelho) da respetiva área ocupada)

É de destacar a natureza indiferenciada dos resíduos presentes na lixeira. Desde logo, observam-se grandes quantidades de resíduos de construção, principalmente na área de acesso. Na área de descarga, para além dos tipicamente associados às habitações (domésticos), pode observar-se grande diversidade de tipos, incluindo sucata, eletrodomésticos, têxteis, entre outros (figura 68).



**Figura 68-** Tipos de resíduos depositados na lixeira da Praia (destaca-se a grande quantidade de plásticos e resíduos de construção/demolição)

De acordo com os dados fornecidos pela camara municipal da Praia, em média, são depositados cerca de 37 camiões de lixo, por dia, nesta lixeira. Não existe um critério de definição da tipologia de resíduos pelo que as pessoas, mesmo a título individual, aproveitam para descarregar todo o tipo de material descartável. É visível a grande quantidade de escombros, o que dificulta a própria incineração dos materiais.

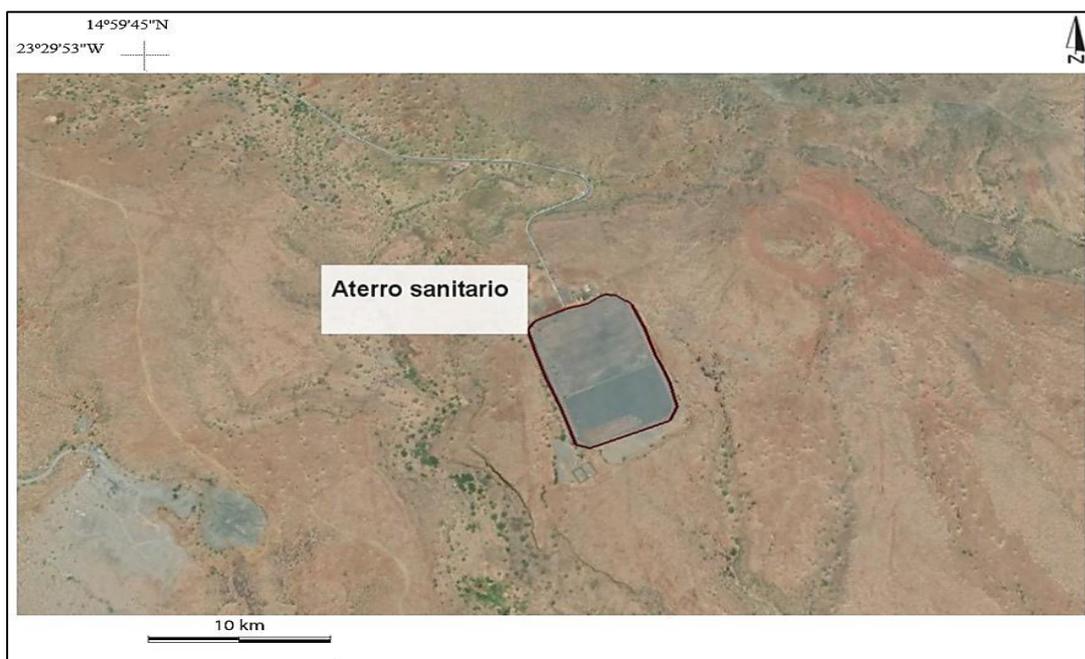
A esta lixeira associa-se um problema social relevante, já identificado pelas entidades municipais, e que se refere ao grande número de coletores de lixos (figura 69). A Câmara Municipal registrou 70 adultos e 26 jovens (incluindo jovens com menos de 15 anos) (CMP, 2019).



**Figura 69-** Coletores de lixo- lixeira da praia

Não existe qualquer tipo de vedação, permitindo assim a entrada de animais (cães, vacas, etc), contribuindo para agravar o cenário de risco para a saúde pública.

De modo a ultrapassar esta situação e promover uma adequada política entrou em funcionamento o aterro sanitário (figura 70). Nele, o lixo é enterrado no solo, não sendo deixado a céu aberto evitando possíveis doenças.



**Figura 70-** Aterro sanitário (Imagem aérea, obtida através do Google TM Earth Pro representado pelo retângulo vermelho)

Com a entrada em operação do novo Aterro Sanitário, um plano de vedação e regeneração para toda a área deve ser realizada, uma vez que todos os tipos de resíduos, incluindo os perigosos, são transportados e descarregados.

### **8.2.2 - Propriedades dos solos e sedimentos na área envolvente da lixeira e impacte na qualidade ambiental**

O conhecimento das propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos pode auxiliar na tomada de decisões quanto ao uso e/ou eventual necessidade de remediação.

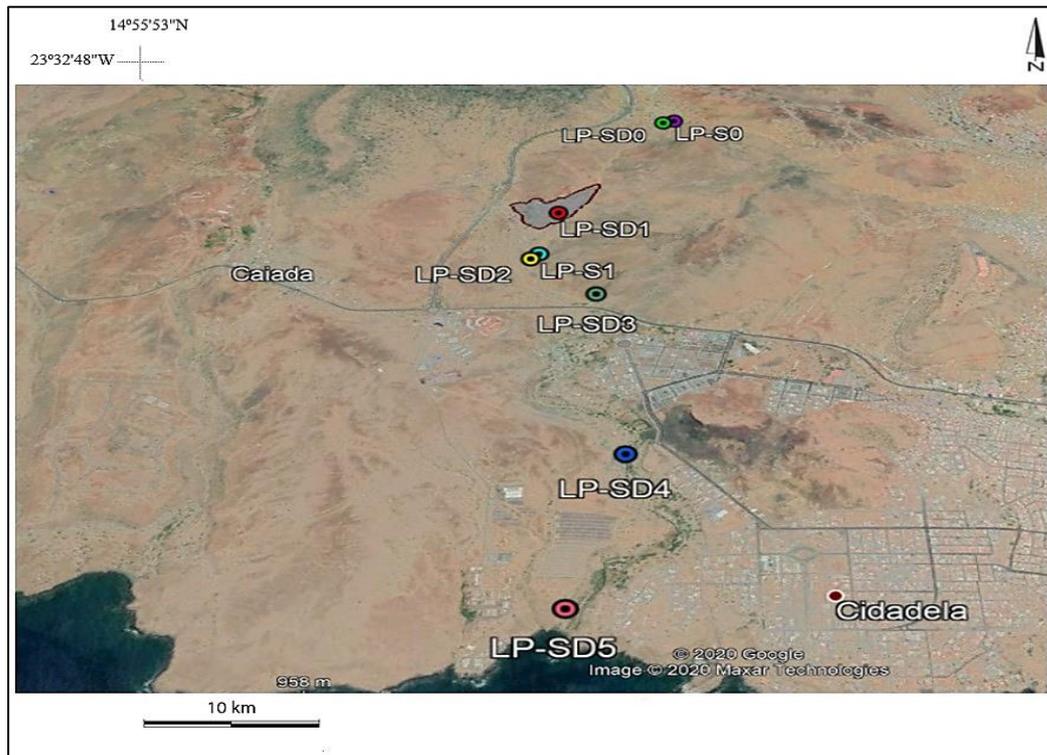
Na envolvente da lixeira é essencial para se avaliar a existência de fenómenos de contaminação associados à decomposição dos resíduos e eventual mobilidade dos seus componentes.

Neste contexto procedeu-se a uma campanha de amostragem, incluindo locais a montante e jusante da lixeira, para averiguar se existe contaminação provocada pelos materiais despejados no

local, especificamente no que respeita a elementos potencialmente tóxicos, como os metais e eventual relação com a textura e mineralogia.

A localização das amostras foi representada na figura 50 do capítulo anterior.

Na figura 71 mostra-se a distribuição dos pontos de amostragem na área envolvente a lixeira, incluindo solos e sedimentos de corrente.



**Figura 71-** Distribuição dos pontos de amostragem dos solos (LP-S0 e LP-S1) e sedimentos (restantes pontos) nas proximidades da lixeira.

A tabela 41 mostra as proporções de fração areia, limo e argila, que indicam a classificação textural das amostras. No diagrama de classificação textural dos solos (amostras LP-S0 e LP-S1) com base na escala de Atterberg, incluem-se nos solos arenosos. De igual modo, os sedimentos têm também textura grosseira, arenosa. Apesar da semelhança textural, é de notar, tal como esperado, que o teor mais elevado de fração argila (4.6%) se observe na amostra de solo.

**Tabela 41-** Classificação textural das amostras analisadas

<b>Amostras</b>	<b>Argila (&lt;0,002mm)</b>	<b>Limo (0,002-0,05mm)</b>	<b>Areia (0,05-2mm)</b>	<b>Classe de textura</b>
LP-S0	4.6	17.4	78.0	<b>Arenosa</b>
LP-S1	2.1	20.7	77.2	<b>Arenosa</b>
LP-SD1	N. D	n. d	n. d	<b>n. d</b>
LP-SD2	N. D	n. d	n. d	<b>n. d</b>
LP-SD3	2.1	20.3	77.5	<b>Arenoso</b>
LP-SD4	1.7	19.4	78.9	<b>Arenoso</b>
LP-SD5	0.415	24.0	75.6	<b>Arenoso</b>

### **8.3 -Contaminação por metais na área envolvente à lixeira**

Os metais tendem a concentrar-se nos solos e sedimentos mediante diversos processos de enriquecimento, quer de natureza geogénica quer antrópica. Assim, nestes materiais geológicos podem encontrar-se metais e metaloides em concentrações muito variáveis, por vezes abaixo do limite de deteção dos métodos analíticos (Alloway, 2012).

Estes elementos químicos, muitos deles com elevada toxicidade (como por exemplo o Ni, Cd, Cr), provêm não só da rocha-mãe, mas também de várias fontes antropogénicas. Neste caso, destaca-se a lixeira como sendo uns potenciais focos da mobilização e conseqüente enriquecimento dos sedimentos e solos nestes elementos. A contribuição para o enriquecimento do solo pode relacionar-se com o transporte eólico de partículas a partir da lixeira.

Assim, a análise de metais pesados é uma ferramenta de base para detetar padrões espaciais e/ou temporais de contaminação, mesmo que em baixas concentrações (Ferreira *et al.* 2010).

A tabela 39 mostra a concentração, na área envolvente da lixeira da Praia, de alguns elementos químicos no solo e nos sedimentos da linha de água que recebe a drenagem da lixeira (figura 71). Nesta tabela apresenta-se também, para efeitos de comparação, a concentração máxima dos mesmos elementos estipulada pela norma de Ontário (Branch *et al.* 2011).

Tal como descrito a propósito da caracterização geológica da Ilha de Santiago, estão identificadas diversas formações geológicas, cuja geoquímica foi detalhadamente descrita por Cabral Pinto, (2010). Assim, é de esperar que o respetivo quimismo exerça influência sobre os valores encontrados. De modo a avaliar a possível contribuição geológica, a tabela providencia também as concentrações obtidas na bibliografia para a formação dos Flamengos, com base nos

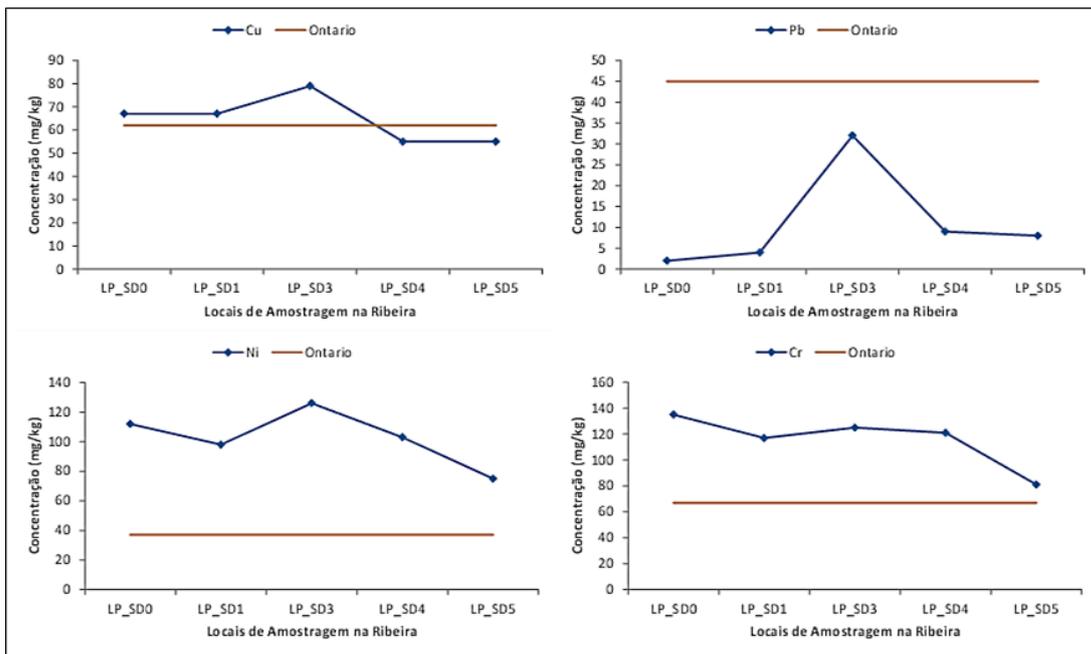
dados apresentados por Cabral Pinto (2010). Estes podem de forma expedita servir para efeitos de comparação com um fundo regional.

Analisando a tabela é possível verificar que certos elementos químicos ultrapassam o valor máximo estabelecido pela norma de Ontário e os valores médios da formação dos Flamengos. No entanto, de acordo com Fergusson (1990), não se pode associar a presença desses metais somente a atividades antropogénicas, uma vez que, como referido atrás, a rocha-mãe pode ter uma contribuição importante neste contexto geológico.

**Tabela 42-** Resultados dos metais pesados nas diversas amostras colhidas (em comparação com os dados estabelecidos pela norma de Ontário e formação geológica onde está inserida a área da lixeira Cabral Pinto, 2010).

Amostras	Metais pesados						
	mg/kg						
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg
<b>LP-S0</b>	66	102	5	<0.5	344	151	<1
<b>LP-S1</b>	71	90	4	<0.5	355	191	<1
<b>Referencia Ontário para solos</b>	16	120	31	0.6	26	16	0.892
<b>Referencia formação geológica (Flamengos)</b>	60.1	87	3.4	0.20	115.5	140.3	0.01
<b>LP-SD0</b>	67	91	<2	<0.5	135	112	<1
<b>LP-SD1</b>	67	94	4	<0.5	117	98	<1
<b>LP-SD2</b>	68	115	4	<0.5	130	116	<1
<b>LP-SD3</b>	79	102	32	<0.5	125	126	<1
<b>LP-SD4</b>	55	110	9	<0.5	121	103	<1
<b>LP-SD5</b>	55	104	8	<0.5	81	75	<1
<b>Referencia Ontário para sedimentos</b>	62	290	45	1	67	37	0.16
<b>Referencia formação geológica (Flamengos)</b>	57.1	80.0	2.50	0.10	112.50	139.1	-

A figura 72 mostra o padrão de distribuição espacial das concentrações de alguns metais nos sedimentos na linha de água recetora da drenagem. Embora não se detete uma diferença considerável entre o local a montante (LP-SD0) e na base da lixeira (LP-SD1), verifica-se um aumento generalizado das concentrações em LP-SD3 (aproximadamente 800 m da lixeira). De notar que este é um local de acumulação de lixo e entulho de natureza diversa, o que pode contribuir para estes valores.



**Figura 72-** Variação da concentração de metais nas amostras de sedimentos ao longo da ribeira, de montante (LP\_SD0) para jusante até ao estuário (LP\_SD5).

O Cu apresenta valores que não respeitam os limites estabelecidos pela norma de Ontário e também estão acima da formação dos Flamengos em quatro amostras (LP-SD0, LP-SD1, LP-SD2, LP-SD3). Relativamente ao Cr é notório que em todas as amostras foram ultrapassados os valores estabelecidos na norma de Ontário e em cinco amostras para a referência da formação dos Flamengos. Destaque ainda para Ni em que os valores não se enquadram nos limites da referida norma, no entanto, estão em consonância com a referência da formação geológica em que se encontra inserida a área de trabalho. Não se deteta incumprimento relativamente ao Pb e Hg, o que se poderá justificar quer pela falta de contribuição geológica quer pela imobilidade destes elementos químicos a partir de resíduos.

Os resultados obtidos sugerem, pois, uma possível contaminação com origem na lixeira para os metais Cu, Cr e eventualmente o Ni. O incumprimento da norma de Ontário causa preocupação, tanto mais nos casos em que a contribuição geogénica não explica as concentrações elevadas. De referir que as condições de aridez limitam a ocorrência de fenómenos mobilizadores dos metais, como oxidação, corrosão, dissolução.

A textura grosseira dos solos e sedimentos (tabela 41) também não favorece a acumulação de metais por reações de adsorção superficial. Na sequência de eventos de pluviosidade podem criar-se condições para a dissolução e transporte destes elementos, com consequente contaminação das águas de escorrência e dos sedimentos da linha de água. Neste sentido torna-se

imprescindível a tomada de atitudes no sentido de atenuar o despejo de lixo a céu aberto numa área tão próxima do centro urbano, com grande movimento de pessoas e animais. Isto, associado à enorme quantidade de plásticos dispersos e transportados pelo vento, é causador de forte impacto ambiental negativo numa zona com crescimento de edificado. Note-se ainda que nas proximidades da lixeira está a construir-se o campus universitário da Universidade Pública de Cabo Verde, que contribuirá para o aumento populacional daquela zona, aumentando o risco para a saúde pública.

***CAPÍTULO 9***

---

***CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES***

## **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **9.1- Conclusões**

A República de Cabo Verde, à semelhança de outros países em desenvolvimento, encontra-se especialmente vulnerável a vários riscos naturais e antrópicos. Embora, nos últimos anos, se tenha avançado de forma relevante na prevenção destes riscos, a situação está ainda longe de ser a desejável.

Na maior ilha do Arquipélago, Santiago, a água subterrânea assume um papel de grande importância, pois o abastecimento para consumo humano e para satisfazer as necessidades de irrigação na agricultura é assegurado principalmente por furos, poços e nascentes. Neste sentido, torna-se fundamental uma monitorização adequada deste recurso tão limitado, por forma a minimizar os impactos nocivos no ambiente e na população, principalmente face às condições da sua crescente escassez.

De salientar que o abastecimento de água é um tópico crítico nos países em desenvolvimento, que deve ser gerido levando em consideração questões sociais, económicas e ambientais. Nesta tese analisou-se a situação global em Cabo Verde, constatando-se que esta varia fortemente a nível nacional e, ainda, entre os cenários urbano e rural. Apesar da evolução positiva do serviço público nos últimos anos, a sua taxa de cobertura não cumpre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. Neste sentido, revelaram-se algumas áreas mais problemáticas na Ilha de Santiago, que é a ilha mais populosa de Cabo Verde, mas possui ainda 24% da população sem abastecimento público. Como pontos mais críticos, esta tese identificou os municípios de S. Domingos e S. Salvador do Mundo, onde uma parte significativa da população ainda depende de fontes precárias que nem sempre atendem aos padrões legais de qualidade (poços e fontanários não controlados). Além disso, os habitantes precisam de se deslocar diariamente, por vezes grandes distâncias, para obter água, que na maioria das vezes não é monitorizada, nem tratada.

Neste contexto de escassez apresentou-se uma revisão do estado da arte visando a caracterização geral das bacias hidrográficas da Ilha de Santiago, que depois se focou em três sub-bacias da bacia hidrográfica de Santa Cruz (S. Miguel, Ribeira Seca e S. Domingos) por serem as mais sujeitas a grande pressão agrícola. Usando dados obtidos no âmbito desta tese e comparando-os com informação recolhida na bibliografia, apresentou-se uma análise de evolução espacial e temporal da hidroquímica e qualidade da água, que se concluiu ser controlada por fatores variados.

Os resultados obtidos nestas três sub-bacias mostram a ocorrência de águas cloretadas sódicas, correspondendo aos pontos de água mais próximos da costa. Uma amostra bicarbonatada magnesiana foi identificada na sub-bacia de S. Domingos, no ponto mais afastado da costa (55-555), indiciando um controlo geológico em detrimento do marinho. Este mostrou ainda que os nitratos e nitritos, tipicamente associados a fenómenos de poluição difusa (orgânica), estão presentes nas três sub-bacias, mas com padrões variáveis. Destaca-se a amostra FST-924 (na sub-bacia de Domingos), com concentrações muito elevadas destes dois aniões. Atendendo a que os valores estabelecidos na legislação Cabo-verdiana são de 50 mg/L e 0.1 mg/L, respetivamente para o nitrato e nitritos, este furo revela a existência de um fenómeno de contaminação orgânica.

Pode ser de origem fecal, agrícola e mesmo industrial, dada a sua localização numa zona fortemente agricultada (cultura da banana, cana de açúcar) e nas imediações de uma destilaria de aguardente de cana. Os resultados obtidos sugerem que esta atividade pode também estar a controlar o quimismo na Ribeira Seca (a mais agricultada). A comparação de dados de trabalhos anteriores (verão 2003, do trabalho de Lobo de Pina, 2009) com os obtidos para o verão de 2016 (presente tese) sugere um padrão de diminuição da qualidade da água entre os dois períodos em apreço.

No que que concerne à monitorização dos vários pontos de água dispersos pela Ilha de Santiago, não se verificaram variações consideráveis ao longo do tempo (nas três campanhas de amostragem realizadas em 2016, 2017 e 2018). Da análise hidroquímica das amostras estudadas, que cobrem diferentes contextos hidrogeológicos e de uso do solo, extrai-se que as águas se classificam da seguinte forma: cloretadas mistas (24%), bicarbonatadas (23%), sódicas mistas (20%), sódicas bicarbonatadas (15%), mistas (15%), sódicas cloretadas (1%) e magnesiana bicarbonatadas (1%).

A análise da qualidade da água para rega levanta preocupação pelo facto de se observar perigo de salinização relativamente alto em cerca de 67% das amostras, e perigo de salinização moderado aproximadamente em 33%, não existindo nenhuma amostra com perigo de salinização baixo. A situação não é tão problemática relativamente ao risco de alcalinização, uma vez que cerca de 96% das amostras possui um risco de absorção de sódio baixo e só 4% das amostras, possui risco médio de alcalinização.

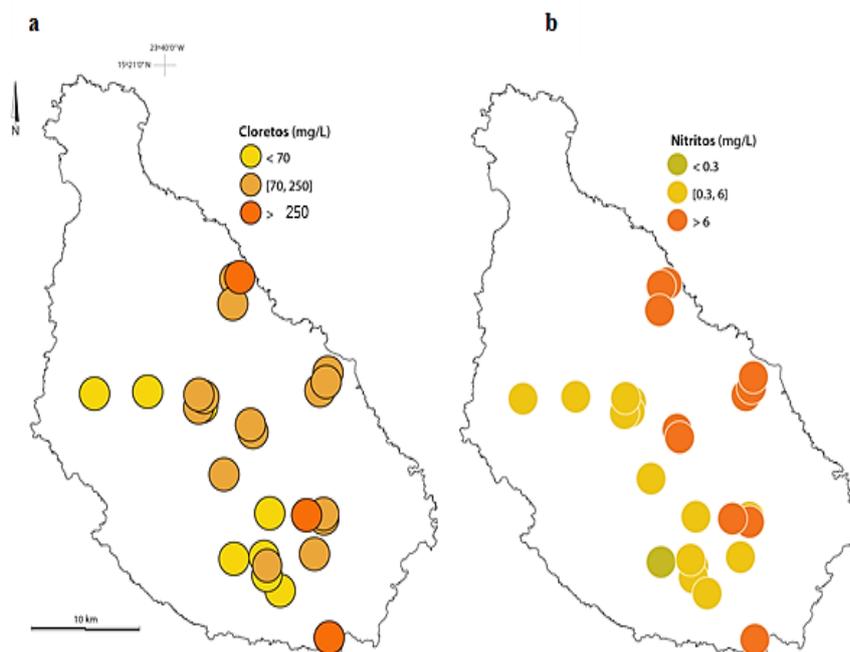
As várias ferramentas estatísticas aplicadas ao universo de amostras (matriz de correlação, classificação hierárquica, análise fatorial e análise discriminante) confirmaram que composição química das águas na Ilha de Santiago tem variações regionais, influenciadas por vários fatores. A análise hierárquica cluster mostrou que a condutividade elétrica, a alcalinidade e o estrôncio se

apresentam como parâmetros discriminadores. Este padrão sugere a relação destes três parâmetros com a contribuição marinha e o controlo geológico/litológico. Por sua vez, discriminou-se um grupo que inclui o cloreto e o sódio, confirmando a relação esperada pela contribuição marinha e, portanto, associada a fenómenos de salinização. Tem-se ainda um grupo que inclui uma série de parâmetros maioritariamente relacionados com a interação água-rocha (tais como Si, Ca, K e Mg). Estes controlos foram também sugeridos pela análise fatorial, que põe em destaque a contribuição marinha, que se relacionou com forte salinização em toda a ilha e os processos de interação água-rocha. Por sua vez, na análise discriminante as amostras foram classificadas previamente de acordo com o atributo qualitativo profundidade, o que veio a apontar para a existência de dois grupos que corresponderão a um sistema aquífero mais superficial até 50-60 m, e outro acima desta profundidade.

Esta análise discriminante evidencia um conjunto de variáveis correlacionado negativamente com a profundidade, o que indica uma vez mais para uma assinatura marinha. Tal salinização, já demonstrada por outras ferramentas, pode resultar quer da deposição de aerossol marinho, quer da ascensão de água salgada através dos diferentes sistemas de falhas.

Portanto, as várias abordagens suportadas pela hidroquímica puseram em destaque, como fatores de controlo do quimismo, efeitos relacionados com a intrusão salina e aerossol marinho, com a interação água-rocha, através da dissolução de minerais silicatados e carbonatados, e com o impacto das atividades antropogénicas.

Estes controlos manifestam-se na distribuição espacial de dois indicadores críticos para a avaliação da qualidade da água, o cloreto e o nitrito. A figura 73 (a, b) mostram esta variação, refletindo dois tipos de fenómenos amplamente referidos ao longo desta investigação: salinização e poluição. Com efeito, as classes de concentração mais elevadas observam-se, na generalidade, nos vales alargados de maior atividade agrícola (NE-SW) e junto à linha litoral e, ainda, em regiões de concentração populacional.



**Figura 73**– Distribuição espacial das concentrações de cloreto e de nitrito.

O solo é outro recurso cuja preservação, dependente de uma gestão adequada, é crítica neste contexto insular, principalmente dadas as condições de forte erosão, clima árido e desenvolvimento económico assente na intensificação da agricultura de regadio.

Os resultados obtidos nas áreas envolventes das principais barragens mostram a pobreza dos solos, uma vez que o teor de matéria orgânica é inferior a 5%.

As amostras analisadas na área de três barragens (Poilão, Figueira Gorda e Faveta) apresentam textura grosseira. São solos maioritariamente com textura areno-franca, proporcionando uma fraca estabilidade dos seus agregados, tornando-os facilmente erodidos e com fraca capacidade de retenção de água. Esta textura, associada ao estudo da mineralogia está de acordo com os baixos teores de micronutrientes. No caso da Ribeira Seca (onde se situa a barragem do Poilão) os resultados evidenciam ligeiros incrementos ao nível de MO e outros constituintes com interesse agrícola (de que é exemplo o fósforo) no sector da albufeira fortemente assoreada.

A avaliação da degradação por efeitos de contaminação química centrou-se num dos principais focos de impacte ambiental, representado pela maior lixeira da Ilha - lixeira da Praia. As concentrações de metais foram comparadas com os valores estabelecidos na norma de Ontário e com o fundo regional representado pelos teores da Formação dos Flamengos.

Concluiu-se que ao longo da ribeira que recebe a drenagem da lixeira, as concentrações de Cu no sedimento não respeitam os limites estabelecidos pela norma de Ontário e, também, se apresentam acima da Formação dos Flamengos em várias amostras. Destaca-se, no entanto o Cr pela sua elevada toxicidade e pelo fato de ultrapassar os valores da norma em todas as amostras. Não se deteta incumprimento relativamente ao Pb e Hg, o que se poderá justificar pela falta de contribuição geológica e pela imobilidade destes elementos químicos a partir de resíduos. As condições de aridez limitam a ocorrência de fenómenos mobilizadores dos metais, como oxidação, corrosão, dissolução. Apesar disto, os resultados obtidos sugerem uma potencial contaminação com origem na lixeira para Cu, Cr e Ni.

## **9.2-Recomendações e considerações finais**

A escassez de água é uma realidade inevitável em países áridos, o que tende a agravar-se com as alterações climáticas. Portanto, um sistema público de abastecimento de água eficaz e extensivo a grande parte da população é um dos principais desafios que os países em desenvolvimento estão atualmente a enfrentar. Para isso, o financiamento de investimentos, a cooperação internacional e a implementação de políticas hídricas bem orientadas são fundamentais para o desenvolvimento sustentável de países como Cabo Verde.

Na Ilha de Santiago, e em especial na bacia hidrográfica de Santa Cruz, assistiu-se nos últimos anos a um aumento da área de agricultura de irrigação, com consequências nas propriedades da água e do solo, incluindo a disseminação. Este fenómeno tenderá a manter-se e mesmo a intensificar-se, com consequências graves, especialmente com a persistência de condições de seca. Portanto, a monitorização da água é um aspeto essencial no sentido de contrariar a potencial degradação ambiental, com risco de perda de fertilidade e produtividade do solo.

É necessário também a modernização nas práticas agrícolas, com maior uso da rega gota-gota. Alguns estudos sugerem também a reutilização de águas residuais para rega, como estratégias de gestão da água. No entanto, a este respeito enfatiza-se a necessidade de avaliar a qualidade microbiológica das águas, tanto mais que a situação em termos de saneamento básico, com esgotos a céu aberto, pode ser um risco acrescido para os poços e furos. Note-se que o nitrito foi um dos parâmetros que registou maior número de incumprimentos, geralmente em pontos de água situados nas zonas agrícolas e com maior ocupação humana.

Uma adequada gestão da água e do solo passa pelo controlo do uso de fertilizantes químicos, como forma de aumentar a fertilidade do solo. Este aumento de fertilidade e de produtividade

depende da melhoria das propriedades do solo, que genericamente é pobre. O incremento no teor de MO e P na área das albufeiras assoreadas sugere um possível aproveitamento do sedimento de albufeiras, como estratégia de preservação dos dois recursos (água e solo).

O clima árido limita em parte a os fenómenos de contaminação com origem em infraestruturas de acumulação de resíduos. No entanto, torna-se imprescindível, aliás como se observou na área da lixeira da Praia, a tomada de atitudes no sentido de atenuar o despejo de resíduos a céu aberto. Isto, associado à enorme quantidade de plásticos dispersos e transportados pelo vento, é causador de forte impacto ambiental negativo numa zona em forte crescimento de edificado.

Em suma, os resultados alcançados ao nível das classificações hidroquímicas, da qualidade da água para consumo e irrigação e das propriedades do solo podem ser de grande utilidade, para as autoridades locais e mesmo nacionais, na gestão da poluição e na tomada de decisões para a proteção dos recursos naturais. A forte interação entre o solo e os recursos hídricos subterrâneos implica que esta gestão de recursos se faça de forma integrada, suportando-se desde logo na criação de zonas de proteção dos pontos de água como forma de minimizar os impactes da agricultura e outras atividades antrópicas sobre o sistema aquífero.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afonso, C. B. (2006). Impacte Ambiental da Barragem de Poilão (Bachelor's thesis).
- Albuquerque, A. W., Lombardi Neto, F., Srinivasan, V. S., & Santos, J. R. (2002). Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6(1), 136-141.
- Alexandre, C., Marques da Silva, J. R., & Ferreira, A. G. (2001). Comparação de dois métodos de determinação da textura do solo: sedimentometria por raios X vs. método da pipeta.
- Alloway, B. J. (Ed.). (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
- Almeida Gominho, M. F. de. (2010). Identificação da Rede de Monitorização da Quantidade de Água da Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca-Cabo Verde. *Princípios e Monitorização. Águas Subterrâneas*.
- Alves, C. M., Macedo, J. R., Silva, L. C., Serralheiro, A. P. F. A. F., & Faria, A. P. (1979). Estudo geológico, petrológico e vulcanológico da ilha de Santiago (Cabo Verde). *Garcia de Orta*, 3(1-2), 47-74.
- Amaral, I. (1964). *Santiago de Cabo Verde: a terra e os homens*.
- ANAS e ARE. (2017). *Relatório Anual dos Serviços de Água e Saneamento em Cabo Verde - RASAS-CV. Cabo verde*
- Aragón, M. S. (2005). Niveles de metales pesados y elementos asociados en suelos de la Provincia de Almería: parámetros que los afectan y riesgos de contaminación. *Universidad de Granada. ARE, 2015*
- Araújo, A., Hernandez, R., Fonseca, R., & Matos, J. (2014). Avaliação da taxa de sedimentação na Barragem do Poilão (Ilha de Santiago, Cabo Verde).
- ARE, Agencia de Regulação Economica. (2015). *Sistema tarifário águas de Santia-go. Relatório final. Praia- Cabo Verde : s.n., 2015. p. 21.*
- Asefa, T., Clayton, J., Adams, A., & Anderson, D. (2014). Performance evaluation of a water resources system under varying climatic conditions: Reliability, Resilience, Vulnerability and beyond. *Journal of Hydrology*, 508, 53-65.
- Assunção, C. T. (1968). *Geologia da província de Cabo Verde. ASTM, 1992*
- Bandurski, R. S., Bonner, J., & Varner, J. E. (1965). *Plant Biochemistry. Bon ner und Varner, ed.), Academic Press, New York, 467-490. Brady, 1984*

- Bank, World. (2011). The World Bank Annual Report 2011 : Year in Review. Washington, DC. © World Bank : s.n., 2011
- Baptista Santos Costa, I. D. (2016). Optimizing soil and water management in dryland farming systems in Cabo Verde.
- Berner, E. K., & Berner, R. A. (1987). The global water cycle: geochemistry environment (No. 551.49 B47).
- Berner, E. K., & Berner, R. A. (1996) Global Environment: Water, Air, and Geochemical Cycles.
- Bisquerra, R. (1989). Conceptual introduction to multivariate analysis. Promotions and University Publications, Barcelona, 808.
- Bormann, F. H., & Likens, G. E. (1967). Nutrient cycling. *Science*, 155(3761), 424-429.
- Bosa, M. S. (2015). Water institutions and management in Cape Verde. *Water*, 7(6), 2641-2655.
- Brady, N. C. (1984). Some important physical properties of mineral soils. *The Nature and Properties of Soils*. 9th ed. New York: Macmillan, 35-71. Braida et al., 2006
- Braida, J. A., Reichert, J. M., Veiga, M. D., & Reinert, D. J. (2006). Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(4), 605-614.
- Branch, Standards Development e Environment, Ontario Ministry of the. (2011). Rationale for the development of soil and ground water standards for use at contaminated sites in ontario
- Brindley, G. W., & Brown, G. (1980). Quantitative X-ray mineral analysis of clays. *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*, 5, 411-438.
- Brinkerhoff, D. W., Wetterberg, A., & Wibbels, E. (2018). Distance, services, and citizen perceptions of the state in rural Africa. *Governance*, 31(1), 103-124.
- Cabral Pinto, M. M. S. (2010). Cartografia Geoquímica da Ilha de Santiago com uma densidade de amostragem média/baixa. University of Aveiro (PhD thesis).
- Cammeraat, L. H., & Imeson, A. C. (1998). Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France. *Geomorphology*, 23(2-4), 307-321.
- Campos, M. C. C., Júnior, J. M., Pereira, G. T., Montanari, R., & Siqueira, D. S. (2007). Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. *Revista Ciência Agronômica*, 38(2), 149-157.
- Carreira, P. M., de Pina, A. L., Gomes, A. M., Marques, J. M., & Santos, F. M. (2018). Geochemical and Isotopic Marks for Tracing Groundwater Salinization: Santiago Island, Republic of

Cape Verde, Case Study. In Conference of the Arabian Journal of Geosciences (pp. 161-164). Springer, Cham.

Carreira, P. M., Marques, J. M., Pina, A., Gomes, A. M., Fernandes, P. A. G., & Santos, F. M. (2010). Groundwater assessment at Santiago Island (Cabo Verde): a multidisciplinary approach to a recurring source of water supply. *Water Resources Management*, 24(6), 1139-1159.

Cerezal, J. C. S. (2013). Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos.

Cerezal, J. C. S., & Martín, J. R. (2013). Aprovechamientos de los recursos hídricos superficiales en un medio insular y volcánico. *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos: Métodos, técnicas y Experiencias en las Islas Canarias*, Colegio de Ingenieros de Montes, 157-182.

CETESB, C. A. D. E. D. (2013) Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo.

Chapman, Susan. (2020). Volcanic Soils- Soil Sciences Teacher Resources. <https://www.soils4teachers.org/volcanic>. [Online] 03 de 03 de 2020.

Christofolletti, A. (1980). Geomorfologia (No. 551.4 CHRI).

Christofolletti, A. (1988). Geomorfologia. Editora Blucher.

Cirilo, J. A. (2008). Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. *Estudos avançados*, 22(63), 61-82.

CMP, Camara Municipal da Praia.( 2019). Relatório anual sobre controlo e gestão da lixeira. Praia :

Companhia ambiental do estado de São Paulo (CETESB). (2009). Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo.

Costa, F. L. (2004). Contributos para o conhecimento da perda de solo na bacia da Ribeira Seca (Santiago, Cabo Verde).

Costa, F. L., & Nunes, M. C. (2007). Susceptibilidade à Erosão Hídrica na Bacia da Ribeira Seca (Santiago, Cabo Verde).

Costa, F. L., & Nunes, M. D. C. (2008). Distribuição espacial da susceptibilidade à erosão hídrica nas bacias das ribeiras de Picos e Seca (Santiago, Cabo Verde).

Costa, M.A. (1962). Acerca do reconhecimento hidrogeológico do Arquipélago de Cabo Verde e abastecimento de água às populações. Praia, Cabo verde :

Cruz, J. V., Andrade, C., Pacheco, D., Mendes, S., & Cymbron, R. (2017). Nitrates in Groundwater Discharges from the Azores Archipelago: Occurrence and Fluxes to Coastal Waters. *Water*, 9(2), 125.

Cruz, J. V., Coutinho, R., Pacheco, D., Cymbron, R., Antunes, P., Freire, P., & Mendes, S. (2011). Groundwater salinization in the Azores archipelago (Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 62(6), 1273-1285.

Cruz, J. V., Melo, C., Medeiros, D., Costa, S., Cymbron, R., Rocha, S., ... & Martins, F. (2017). Water management and planning in a small island archipelago: the Azores case study (Portugal) in the context of the Water Framework Directive. *Water Policy*, 19(6), 1097-1118.

Cruz-Fuentes, T. (2008). Contribución de la modelación numérica e hidroquímica al conocimiento del acuífero de La Aldea (Gran Canaria) [Contribution of numerical and hydrochemical modelling to the knowledge of the La Aldea aquifer] (Doctoral dissertation, PhD Thesis, University of Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas).

Cunha, F. R. (1961). O balanço hidrológico na ilha de Santiago (Cabo Verde). L. da Silvas.

Cunha, S. D., & Guerra, A. J. T. (1996). Degradação ambiental. *Geomorfologia e meio ambiente*, 4, 337-379.

Custodio, E. (1974). Contribuciones al conocimiento geohidroquímico de la Isla de Lanzarote (Islas Canarias, España). In *Simposio Internacional sobre Hidrología de Terrenos Volcánicos*. Gobierno Español-UNESCO-PNUD. Arrecife de Lanzarote.

Custodio, E. (1996). Groundwater problems in general and in Spain in particular. *European Water Pollution Control*, 5(6), 68-82.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea* (Vol. 2). Barcelona: Omega.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrogeología subterránea*. Ed. Ómega, 2.

Custodio, E., & Universitat Politècnica de Barcelona. (1978). *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Centro de estudios hidrograficos.

Custodio, E., Andreu-Rodes, J. M., Aragón, R., Estrela, T., Ferrer, J., García-Aróstegui, J. L., & del Villar, A. (2016). Groundwater intensive use and mining in south-eastern peninsular Spain: Hydrogeological, economic and social aspects. *Science of the Total Environment*, 559, 302-316.

Davis, S., & De Wiest, R. (1971). *Hidrología*, Ediciones Ariel. Barcelona, España.

Desalegn, W. B. (2005). *Water Supply Coverage and Water Loss in Distribution Systems: The Case of Addis Ababa*. ITC.

DGASP. (2011). "Construção de Barragens na Ilha de Santiago . Cabo Verde : s.n., 2011.

Diniz, A. C., & De Matos, G. C. (1986). *Carta de Zonagem Agro-Ecológica e da vegetação de Cabo Verde*. I. Ilha de Santiago. Garcia de Orta. Serie de botanica.

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. Defining soil quality for a sustainable environment, 35, 1-21.

DouroECI (2018). Detailed design of two water supply systems in Santiago Island. [accessed in June 2018]

Dregne, H. E., & Powers, W. L. (1942). Boron Fertilization of Alfalfa and Other Legumes in Oregon 1. *Agronomy Journal*, 34(10), 902-912.

Drever, J. I. (1997). *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments*. Prentice Hall. Eaglewood Cliffs, New Jersey, USA.

Drogue, C. (1988). Scale effect on rock fissuration porosity. *Environmental Geology and Water Sciences*, 11(2), 135-140.

Dunne, J. P., and Coauthors, (2012): GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *J. Climate*, 25, 6646-6665, doi:10.1175/JCLI-D-11-00560.1

Epstein. (1965). Mineral metabolism. *Plant Biochemistry*. London : y (J.Bonner and J.E. Varner, eds.) Academic Press, 1965. pp. 438-466.

Falcão, H. (1978). Perfil analítico de águas minerais. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral.

Falkenmark, M. (2013). Growing water scarcity in agriculture: future challenge to global water security. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(2002), 20120410.

FAO.(2006). World References Base for Soil Resources. *World soil resources reports*, 103, 1-128.

FAO/Unesco. (2015). Base de dados de Referencia Mundial para recursos do solo. Roma : IUSS Grupo de trabalho Relatorios 106, 2015. ISBN 978-92-5-108369-7.

Faria, F. X. (1970). Os solos da ilha de Santiago. *Estud. Ensaios Doc*, 1-157.

Fergusson, J. E. (1990). The heavy elements: chemistry, environmental impact and health effects\Jack E. Fergusson (No. 628.53 F4.).

Fernandopullé, D. (1977). Aperçu sur les ressources en eau et les possibilités d'aménagement hydrauliques Iles du Cap Vert. *Projet CTP-CVI/75/001*. Praia, 41.

Fernandopullé, D. (1979). Recherche et mise en valeur des eau souterraines. *Rapport terminal. Projet*, 106(75), 001.

Ferreira, A. P., Horta, M. A. P., & da Cunha, C. D. L. N. (2010). Avaliação das concentrações de metais pesados no sedimento, na água e nos órgãos de *Nycticorax nycticorax* (Garçada-noite) na Baía de Sepetiba, RJ, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(2), 229-241.

Ferreira, C.A., et al. (2001). Deposição de material orgânico e nutrientes em plantios de *Eucalyptus grandis* em diferentes regimes de adubação. s.l. : Embrapa Florestas-Artigo em periódico indexado (ALICE).

Ferreras, C., & Fidalgo, C. E. (1991). *Biogeografía y edafogeografía*. Madrid. Síntesis.

Ferreras, C., Hernández, E. D., Martínez-Costa, O. H., & Aragón, J. J. (2009). Subunit interactions and composition of the fructose 6-phosphate catalytic site and the fructose 2, 6-bisphosphate allosteric site of mammalian phosphofructokinase. *Journal of Biological Chemistry*, 284(14), 9124-9131.

Feth, J. H. F., Robertson, C. E., & Polzer, W. L. (1964). Sources of mineral constituents in water from granitic rocks, Sierra Nevada, California and Nevada (No. 1535-I). US Govt. Print. Off.

Fonseca, R. M. F. (2002). Impactos ambientais associados a barragens e a albufeiras. *Estratégia de re-aproveitamento dos sedimentos depositados. DAMS: Impacts and Hazards*, 17.

Gebremedhin, A.; Badenhorst, P.E.; Wang, J.; Spangenberg, G.C. & Smith, K.F. (2019) – Prospects for Measurement of Dry Matter Yield in Forage Breeding Programs Using Sensor Technologies. *Agronomy*, vol. 9, n. 2, p. 65–83. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020065>

GHEYI, H. R. (2000). Problemas de salinidade na agricultura irrigada. *Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido*. Fortaleza: DCS/UFC, 329-346. Gomes, 2005

Gomes, A. D. M. (2007). *Hidrologia e Recursos Hídricos da ilha de Santiago (Cabo Verde)*. Aveiro: Universidade de Aveiro.

Gonçalves, N., Valente, T. M. F., & Grande, J. A. (2015). *Qualidade da água no Concelho de São Domingos (Ilha de Santiago, Cabo Verde)*.

Gonçalves, Nemias, Valente, Teresa e Pamplona, Jorge (2019). *Water Supply and Access to Safe Water in Developing Arid Countries*. 27 de Abril de 2019, Vol. 4, pp. 589-599.

Gorny, J.R., et al. (2000). Quality changes in fresh-cut pear slices as affected by cultivar, ripeness stage, fruit size, and storage regime. 2000, pp. 541-544

GRANELL-PÉREZ, M. del C. (2004) *Trabalhando Geografia com as Cartas Topográficas*. 2a ed. Ijuí: Ed. Unijuí, 128p.il.

Greenberg, A.E., Clesteri, E.S. e Eaton, A.D. (1992). Standart methods for examination of water and wastewater. Washington : American Public Health Association, 1992. p. 1.217. Vol. 2.

Guerra, A. (1995). Processos Erosivos nas Encostas. Cap. 4. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos, 2.

Heitor, A. M. & Pina, A. P. (2003) – Águas subterrâneas em Cabo Verde, qualidade da água na ilha de Santiago. 6º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos PALOP, pg 819-827. Praia. Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.

Hernández, R. (2008). Caracterização dos solos da ilha de Santiago (Cabo Verde) numa perspectiva de sustentabilidade ambiental (Master's thesis, Centro Documentação da Universidade de Aveiro).

Herrera Lameli, C. (2001). Caracterización hidrogeoquímica del macizo de Betancuria. Fuerteventura, Archipiélago de Canarias. Universitat Politècnica de Catalunya.

Hirpa, F. A., Dyer, E., Hope, R., Olago, D. O., & Dadson, S. J. (2018). Finding sustainable water futures in data-sparse regions under climate change: Insights from the Turkwel River basin, Kenya. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 19, 124-135.

Hiscock, K. M. (2009). *Hydrogeology: principles and practice*. John Wiley & Sons.

Hunt, D. T., Hunt, D. T. E., Wilson, A. L., & Wilson, A. L. (1986). *The chemical analysis of water: general principles and techniques* (Vol. 2). Royal Society of Chemistry.

IDECV. (2019). Diagrama de gestão de RSU ilha de Santiago- Divisão administrativa. Praia.

INE, (2017). Estatísticas das famílias e condições de vida- Inquérito Multi-Objectivo Contínuo 2016. Praia, Cabo Verde.

INE, Instituto Nacional de Estatística.(2018). Recenseamento Geral da Agricultura. Praia : s.n., 2018.

INE. (2010). Recenseamento Geral da População e Habitação. Cabo Verde :

INGRH, Instituto Nacional Gestão dos Recursos Hídricos (2010). Plano de Ação Nacional para Gestão Integrada dos recursos hídricos - PAGIRE,. Praia- Cabo Verde : serie nº 45, 2, da Republica de Cabo Verde:.

INGT, Instituto Nacional de Gestão do Território (2019). Divisão administrativa da ilha de Santiago- Cabo Verde. 2019.

Irmiler, I., Liu, L. (2013). *Water Pricing in Cape Verde*. Master Geographien der Globalisierung, Goethe-Universität Frankfurt am Main.

Jica e INGRH. (1999) The Study of Ground Water Development in Santiago. s.l. : KOKUSAI KOGYO Co, LTD,, 1999.

Jica, Agência de cooperação internacional Japão. (2010). O estudo do desenvolvimento rural integrado das bacias hidrográficas da ilha de Santiago da República de Cabo Verde . Cabo Verde :

Joffe, J. S. (1936). *Pedology*. *Soil Science*, 42(4), 313.

Johnson, R.A. e Wichern, D.W. (1988). *Applied multivariate statistical analysis*. New Jersey : Prentice Hall, 1988. p. 607.

Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.

Kaufman, W. J., & Orlob, G. T. (1956). An evaluation of ground-water tracers. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 37(3), 297-306. Keith, 1993)

Keith, N. (1993). *Geothermal Fluids Chemistry and Exploration Techniques*.

Kjellén, M., & McGranahan, G. (2006). Informal water vendors and the urban poor (pp. 978-1). London: International Institute for Environment and Development. Klar (1988)

Krauskopf, K. B., & Bird, D. K. (1967). *Introduction to geochemistry* (Vol. 721). New York: McGraw-Hill.

Lameiro, L. F. (2009). Sedimentação em albufeiras e estudo da possibilidade de utilização dos sedimentos em alimentação artificial de praias.

Langmuir, D. (1997). *Aqueous environmental geochemistry* (No. 551.48 L3.).

Larson, W. E., & Pierce, F. J. (1991). Conservation and enhancement of soil quality. In *Evaluation for sustainable land management in the developing world: proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World*, Chiang Rai, Thailand, 15-21 September 1991. [Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management, 1991].

Lima, A. D. S., & Garcia, E. M. O. (2011). Gestão de águas subterrâneas em ambientes insulares: caso de estudo da ilha do Maio (Cabo Verde).

Lima, A. S. (2010). *Composição e origem das águas minerais naturais: exemplo de Caldas da Saúde*. Coimbra: Almedina.

Lima, D. M. (2013). *Contribuição para Evolução do Abastecimento de Água em Zonas Rurais da Ilha de Santiago, Cabo Verde* (Master's thesis, Universidade Técnica de Lisboa-IST).

Lysne, D., Glover, B., Stole, H., & Tesaker, E. (2003). Sediment transport and sediment handling. Hydraulic Design. Norwegian University of Sciences and Technology, Noruega-Trondheim.

Macias, F. (1993) Información de suelos y evaluación del impacto ambiental: situación actual y perspectivas de futuro. Boletín de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, pp. 4,7-20.

Marques, M. (1983). Ensaio de Compartimentação da Paisagem nas Achadas Meridionais da Ilha de Santiago. CEP do IICT em colaboração com o ICE, 21.

Marques, M. Monteiro. (1987). Ensaios de cartas de declives médio para a ilha de Santiago (República de Cabo Verde). Lisboa : Garcia da Orta, Série de Estudos Agronómicos.

Marques, Manuel M. (1990). Caracterização das grandes unidades geomorfológicas da Ilha de Santiago (República de Cabo Verde): contribuição para o estudo da compartimentação da paisagem. Cabo Verde :

Marques, R. C., Simões, P., & Berg, S. (2013). Water sector regulation in small island developing states: an application to Cape Verde. *Water Policy*, 15(1), 153-169.

McDonald, D. G., Walker, R. L., & Wilkes, P. R. H. (1983). The interaction of environmental calcium and low pH on the physiology of the rainbow trout, *Salmo gairdneri*: II. Branchial ionoregulatory mechanisms. *Journal of Experimental Biology*, 102(1), 141-155.

McNeely, R. N., Neimanis, V. P., & Dwyer, L. (1979). Water quality sourcebook. A guide to water quality parameters. 1979 89 p, 6 fig, 8 tab, 38 ref, 1 append. Melian, et al, 1999

Mendes, B. S., & Santos, J. O. (2004). Qualidade da água para consumo humano. Lidel.

Menegatto, M.S. (2014). Distribuição Espacial dos Solos em Cabo Verde: Uma Análise da Aridez e do Balanço Pedogenético em Ilhas Vulcânicas. s.l. : VII Congresso Brasileiro de Geógrafos, Universidade de São Paulo.

Milliken, J. (2001). Qualitative research and marketing management. *Management Decision*.

Mitiku, H., Herweg, K. G., & Stillhardt, B. (2006). Sustainable land management: A new approach to soil and water conservation in Ethiopia.

Mizota, C., & Van Reeuwijk, L. P. (1989). Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. *Soil Monograph 2*. ISRIC. Wageningen, 185.

Monteiro, F., Fortes, A., Ferreira, V., Pereira Essoh, A., Gomes, I., Correia, A. M., & Romeiras, M. M. (2020). Current status and trends in cabo verde agriculture. *Agronomy*, 10(1), 74.

Moore, D. M., & Reynolds Jr, R. C. (1997). X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, 2nd edn Oxford University Press. New York, NY.

Mota Gomes, A. (2007). Hidrogeologia e recursos hídricos da ilha de Santiago (Cabo Verde) (Doctoral dissertation, Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Portugal).

Mota Gomes, A., & Lobo de Pina, A. F. (2004, August). Condesso de Melo, MT, Marques da Silva, MA (2005). The importance of groundwater resources for the sustainable development of the Santiago Island (Cape Verde). In General Proceedings: 32nd International Geological Congress, Florence, Italy.

Mota Gomes, A., & Lobo de Pina, A. F. (2004, August). Condesso de Melo, MT, Marques da Silva, MA (2005). The importance of groundwater resources for the sustainable development of the Santiago Island (Cape Verde). In General Proceedings: 32nd International Geological Congress, Florence, Italy.

Neall, Vincent. (2006). Volcanic Soils. Land Use, Land Cover And Soils Sciences. 01 de janeiro de 2006, p. 23.

Noulas, C., Tziouvalekas, M., & Karyotis, T. (2018). Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 49, 252-260.

OECD. (2009). *Managing Water for All. An OECD Perspective on Pricing and Financing - Key Messages for Policy Makers*.

OMS, Organização Mundial de Saude. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. s.l. : WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. 4th ed., 2011. ISBN 978 92 4 154815 1.

OMS/UNICEF. (2015). *Joint Water Supply, Sanitation Monitoring Programme, and World Health Organization. Progress on sanitation and drinking water: 2015 update and MDG assessment*. 2015.

ONU, Organização das Nações Unidas. (2015). *17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. s.l. : ONU, 2015.

Paepe, R., & Vanhoorne, R. (1976). The Quaternary of Belgium in its relationship to the stratigraphical legend of the geological Map. *Mémoires pour servir a l'Explication des Cartes géologiques et minières de la Belgique*, 18: 1-38.

Paepe, R. & Baeteman, C. (1979). The Belgian coastal plain during the Quaternary. The Quaternary history of the North Sea. *Acta Universitatis Upsaliensis*, 2, 147-158.

Parelho, C. P. F. D. M. (2018). Solos vulcânicos: um tesouro negro. *Açoriano Oriental*, 28-29.

Pina, A. (2014). *As águas subterrâneas e a vulnerabilidade aquífera na ilha de Santiago-cabo verde*.

Pina, A. F. L. (2009). Hidroquímica e qualidade das águas subterrâneas da ilha de Santiago-Cabo Verde (Doctoral dissertation, Tese de doutoramento, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro).

Pina, A. P. (2011). Fundamentos Hidrogeoquímicos Aplicados na Bacia Hidrográfica de Santa Cruz, Ilha Santiago–Cabo Verde, Como Instrumento para a Gestão dos Recursos Hídricos.

Pina, A., Gomes, M., Santos, F., & Almeida, E. (2006). Caracterização Geoelectrica da Zona Este (Santa Cruz) da Ilha de Santiago (Cabo Verde). *Revista Científica*, (2), 143-151.

Pinho, C., Fonseca, R., Araújo, A., Araújo, J., & Nogueira, P. (2019). Análise de viabilidade do reaproveitamento de sedimentos dragados como fertilizantes naturais em solos agrícolas de duas barragens da República Dominicana.

PNUD. (2013). Preparação da IIIª Conferência Internacional sobre Desenvolvimento Sustentável nos Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (prepared by Carvalho, J.). Relatório nacional. República de Cabo Verde .

Poncela Poncela, R. (2015). Hidrogeología del sistema acuífero volcánico de La Palma (Islas Canarias).

Qadir, M., & Oster, J. D. (2004). Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Science of the total environment*, 323(1-3), 1-19.

Qadir, M., & Schubert, S. (2002). Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. *Land Degradation & Development*, 13(4), 275-294.

Quevauvillier P. (2002), *Quality Assurance for Water Analysis*, John Wiley & Sons Ltd, England, ISBN: 978-0471899624.

Rabadan, E. (1992). Estudio sísmico del eje de la presa de Trindade. Inédito. Madrid.

Rashid, A., & Ryan, J. (2004). Micronutrient constraints to crop production in soils with Mediterranean-type characteristics: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 27(6), 959-975.

Razzaq, A., & Rafiq, M. (1996). Soil classification and survey. *Soil science*, 405-437.

Reiman, C., & Caritat, P. D. (1998). Chemical elements in the environment. *Pactsheets for the Geochemist and Environmental Scientist* Springer Verlag, Berlin-Heidelberg.

Reynolds, W. D., & Topp, G. C. (2008). Soil water desorption and imbibition: tension and pressure techniques. *Soil sampling and methods of analysis*. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, 981-997.

RGA. (2015). Recenseamento Geral da Agricultura. Cabo Verde.

Rhoades, J. D., Kandiah, A., & Mashali, A. M. (1992). The use of saline waters for crop production-FAO irrigation and drainage paper 48. FAO, Rome, 133.

Ribeiro, Krukemberghe Divino Kirk da Fonseca. (2020). Mundo da educação. <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/biologia/poluicao-solo.htm>. [Online] 10 de janeiro de 2020.

Rodier, J., Bernard, L., & Nicole, M. (2009). L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Dunod, 9eme éd. Paris. ISBN 987-2-10-054179-9.

Rodrigues, F. C. (2002). Hidrogeologia da ilha Terceira (Açores-Portugal). PhD dissert. Universidade dos Açores, Portugal.

Rogers, P., De Silva, R., & Bhatia, R. (2002). Water is an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. *Water policy*, 4(1), 1-17.

Rozas, J. (2010). Diccionario de términos edafológicos.

Rubio, J. M., & Magán, P. R. (1998). Aguas subterráneas: captación y aprovechamiento. PROGENSA (Promotora General de Estudios, SA).

Ruiz-García, A., Carrascosa-Chisvert, M. D., Mena, V., Souto, R. M., Santana, J. J., & Nuez, I. (2019). Groundwater Quality Assessment in a Volcanic Mountain Range (South of Gran Canaria Island, Spain). *Water*, 11(4), 754.

Santos, F. A. M., Almeida, E. P., Gomes, M., & Pina, A. (2006). Hydrogeological investigation in Santiago Island (Cabo Verde) using magnetotellurics and VLF methods. *Journal of African Earth Sciences*, 45(4-5), 421-430.

Schoeller, H. (1962). *Les eaux souterraines* (No. BOOK). Masson.

Serralheiro, A. (1976). *A Geologia da ilha de Santiago, Cabo Verde*.

Sillanpää, M. (1982). *Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study* (Vol. 48). Food & Agriculture Org.

Silva, T. O. D., & Menezes, R. S. C. (2007). Adubação orgânica da batata com esterco e, ou, *Crotalaria juncea*: II-disponibilidade de N, P e K no solo ao longo do ciclo de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(1), 51-61.

Simons, J. (2010). *Plain Talk about Drinking Water: Questions and Answers about the Water you drink*. EUA : American Water Works Association, 2010.

Sokal, R. R., & Sneath, P. H. A. (1963). *Principles of numerical taxonomy* San Francisco. CA and London: WH Freeman.

Takkar, P. N., Chhibba, I. M., & Mehta, S. K. (1989). Twenty years of coordinated research on micronutrients in soils and plants, 1967-87.

Tang, Q., & Lettenmaier, D. P. (2012). 21st century runoff sensitivities of major global river basins. *Geophysical Research Letters*, 39(6).

Tavares, J., Ferreira, A. J. D., Spencer, J., Reis, A., Baptista, I., Carvalho, J. O., ... & Rendall, A. (2008). Characterization of the Ribeira Seca–Santiago Island–Cape Verde Hotspot. In *Field Guide to the DESIRE 2nd plenary meeting*. INIDA, Praia.

Taxonomy, S. (1975). *Agriculture Handbook No. 436*. US Department of Agriculture, Washington, DC.

Teixeira, A., & Barbosa, L. (1958). *A agricultura de Cabo Verde. Cartas agrícolas. Problemas agrários. Memórias, 2ª Ser., Ministério do Ultramar. Memórias da Junta de Investigação do Ultramar, Lisboa, 2, 179.*

TNC. (2016). *Sub-Saharan Africa's Urban Water Blueprint: Securing Water Through Water Funds and Other Investments in Ecological Infrastructure*.

Tomé Júnior, J. B. (1997). *Manual para interpretação de análise de solo. Guaíba: agropecuária, 19997.*

USGS, U. S. Geological Survey Water Science School. (2018). *Water Properties and Measurements*. [Online] 15 de dezembro de 2018. URL: <http://water.usgs.gov/edu/waterproperties.html>.

Vailleux, Y., & Bourguet, L. (1974). *La mise en valeur des eaux souterraines dans l'archipel du Cap Vert*. BURGEAP, Ministerio da Coordenação interterritorial, Brigada de Aguas Subterraneas do Cabo Verde Final Mission Rep, 140, 291.

Valente, T., Gomes, P., Braga, M. S., Dionísio, A., Pamplona, J., & Grande, J. A. (2015). Iron and arsenic-rich nanoprecipitates associated with clay minerals in sulfide-rich waste dumps. *Catena*, 131, 1-13.

Valente, T., Gonçalves, N., & Pamplona, J. (2019) *Water Supply and Access to Safe Water in Developing Arid Countries*.

Van Bruggen, A. H., & Semenov, A. M. (2000). In search of biological indicators for soil health and disease suppression. *Applied Soil Ecology*, 15(1), 13-24.

Van Damme, H. (2001). *Domestic water supply, hygiene, and sanitation. Overcoming Water Scarcity and Quality Constraints*. IFPRI 2020 Focus 9, Brief, 3.

Varela, A., et al. (2014) *Impacto das técnicas de conservação do solo e da água na produção agrícola e no solo da bacia da Ribeira Seca*. [autor do livro] F. Cardoso Pinto. Cabo Verde- Agronomia e Recursos Naturais. Santiago : ISAPress-Lisboa, 2014.

- Varenes, A.de (2003). Produtividade dos solos e ambiente.
- Ventura, J. E. (2009). A problemática dos recursos hídricos em Santiago. Proceedings of the 2nd "Congresso Lusófono de Ciência Regional, Cabo Verde, Redes e Desenvolvimento Regional, pp. 409-435. [Abstract in English].
- Ventura, J. E. (2015). A problemática dos recursos hídricos em Santiago.
- Victória, S. M. D. M. S. (2012). Caracterização geológica e geotécnica das unidades litológicas da Cidade da Praia (Santiago, Cabo Verde).
- Vieira, E. D. O., & Sandoval-Solis, S. (2018). Water resources sustainability index for a water-stressed basin in Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 19, 97-109.
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *nature*, 467(7315), 555-561.
- Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *science*, 289(5477), 284-288.
- Wallingford, H. R. (2003). Handbook for the assessment of catchment water demand and use.
- Ward Jr, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*, 58(301), 236-244.
- Water and Sanitation Program-Africa, & Carter, R. (2006). Investigating options for self-help water supply: from field research to pilot interventions in Uganda. World Bank. Water and Sanitation Program-Africa.
- WHO/UNICEF Joint Water Supply, Sanitation Monitoring Programme, & World Health Organization. (2015). Progress on sanitation and drinking water: 2015 update and MDG assessment. World Health Organization.
- Zheng, H., Robinson, B. E., Liang, Y. C., Polasky, S., Ma, D. C., Wang, F. C., ... & Daily, G. C. (2013). Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(41), 16681-16686.

## **Legislações**

Decreto-Legislativo n.º 2 de 19 de julho de 2007. I SÉRIE – N.º 26 SUP. «B. O.» da República de Cabo Verde

Decreto-Lei n.º 8 /2004 de 23 de fevereiro. I SÉRIE – N.º 6 «B. O.» da República de Cabo Verde

Lei n.º 86/IV/93, de 26 de junho, define as bases da política do ambiente, Resolução no 15/IV/93

Lei n.º 96/VII/2015, de 29 de julho. I SÉRIE- N.º46 «B:O» da República de Cabo Verde

Decreto-lei n.º236/98 de 1 de agosto, do Ministério de Ambiente. Diário da República n.º 176/1998, Série I-A de 1998-08-01