



HIDROGEOLOGÍA DE LA ISLA DE SANTIAGO (CABO VERDE)

HYDROGEOLOGY OF SANTIAGO ISLAND (CABO VERDE)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

D^a CRISTINA SANZ HUESO

Dirigido por:

Dra. D^a MARIA DEL CARMEN CABRERA SANTANA

Alcalá de Henares, a 8 de julio de 2020

1. Índice

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	2
2. ZONA DE ESTUDIO.....	2
2.1 Localización.....	2
2.2 Climatología.....	3
2.3 Hidrología superficial	6
2.1 Geología.....	6
2.1.1 Formaciones volcánicas:	10
2.1.2 Formaciones sedimentarias del cuaternario (CC)	11
2.1 Suelos y vegetación.....	11
2.2 Recursos hídricos disponibles, usos y demandas.....	15
2.2.1 Abastecimiento	17
2.2.2 Saneamiento	19
2.3 Agricultura	20
3. HIDROGEOLOGÍA	20
3.1 Inventario de puntos de agua	22
3.2 Piezometría	26
3.3 Modelo hidrogeológico conceptual.....	27
3.4 Hidroquímica y calidad del agua.....	30
3.4.1 Temperatura:.....	31
3.4.1 pH:.....	32
3.4.2 Conductividad eléctrica:.....	34
3.4.1 Facies hidroquímicas.....	40
3.4.2 Hidroquímica isotópica	44
4. DISCUSIÓN.....	46
5. CONCLUSIONES.....	48
6. BIBLIOGRAFÍA.....	48

2. Índice de figuras

Figura 1. Localización de la isla de Santiago	3
Figura 2. Precipitación media anual entre 1961 y 2000.	4
Figura 3 Diferentes clases de aridez en la isla de Santiago.	5
Figura 4 Líneas de agua de las isla de Santiago	7
Figura 5 Geología de la isla de Santiago.	9
Figura 6. Corte geológico de la isla de Santiago (dirección NW-SE).	12
Figura 7. Corte geológico de la isla de Santiago (dirección NE-SW).	13
Figura 8. Corte geológico de la isla de Santiago (dirección NE-SW)	14
Figura 9 Ubicación de las desaladoras de agua de mar existentes en la isla de Santiago. ..	16
Figura 11. Camión cisterna en la zona de Santa Catarina.	17
Figura 11. Evolución de la población con acceso a agua potable	18
Figura 12. Diferentes tipos de suministro: a) Fuente; b) tanque automático; c) manantial; d) pozos	19
Figura 13. Localización de los pozos de captación de agua subterránea seleccionados por Lobo de Pina (2009).	23
Figura 14. Manantiales inventariados por Lobo de Pina (2009).	24
Figura 15. Pozos de gran diámetro inventariados por Lobo de Pina (2009).	25
Figura 16. Mapas piezométricos de la isla de Santiago para los años 1999 y 2002.	26
Figura 17. Modelo hidrogeológico de la isla de Santiago.	28
Figura 18. Localización espacial de los 133 puntos estudiados en el Proyecto Hydroarid.	32
Figura 19. Distribución espacial de la temperatura del agua subterránea en la isla de Santiago.	33
Figura 20. Distribución espacial del pH del agua subterránea en la isla de Santiago.	34
Figura 21. Distribución espacial de la conductividad eléctrica del agua subterránea en la isla de Santiago.	35
Figura 25. Distribución espacial del bicarbonato en el agua subterránea en la isla de Santiago.	37
Figura 26. Distribución espacial del cloruro del agua subterránea en la isla de Santiago.	38
Figura 26. Distribución espacial del sulfato del agua subterránea en la isla de Santiago. ..	39
Figura 27. Distribución espacial del nitrato del agua subterránea en la isla de Santiago.	40
Figura 22. Distribución de las principales facies hidroquímicas en las diferentes unidades hidrogeológicas. Diagrama de Stiff	42
Figura 23. Distribución de las principales facies hidroquímicas en las diferentes unidades hidrogeológicas. Diagrama de Piper	43
Figura 28. Evolución de la composición isotópica de ^{18}O y ^2H en las diferentes unidades geológicas de las isla de Santiago en comparación con la recta meteórica global y local .	45
Figura 29. Gráfico de $\delta^{18}\text{O}$ vs. δD en aguas subterráneas y agua de mar en comparación con la recta meteórica global	45
Figura 30. Distribución espacial del contenido de ^{18}O en aguas subterráneas en la isla de Santiago	46

3. Índice de tablas

Tabla 1. Promedios de los consumos de agua per cápita en la isla de Santiago	18
Tabla 2. Características de los puntos estudiados en el Proyecto Hydroarid	31
Tabla 3. Valores de temperatura en las diferentes unidades hidrogeológicas	32
Tabla 4. Valores del pH en las diferentes unidades hidrogeológicas	33
Tabla 5. Valores de la conductividad en las diferentes unidades hidrogeológicas	34
Tabla 6. Valores de la concentración de HCO ₃ en las diferentes unidades hidrogeológicas	36
Tabla 7. Valores de la concentración de Cl en las diferentes unidades hidrogeológicas ...	37
Tabla 8. Valores de la concentración de SO ₄ en las diferentes unidades hidrogeológicas..	38
Tabla 9. Valores de la concentración de NO ₃ en las diferentes unidades hidrogeológicas.	40
Tabla 10. Valores de transmisividad y extracciones de las diferentes unidades hidrogeológicas.....	47

RESUMEN

La situación geográfica de la isla volcánica de Santiago (Cabo Verde) marca un clima árido o semi árido. Los recursos hídricos de la isla son escasos, por lo que se ha llevado a cabo la construcción de presas y plantas desalinizadoras. Desde el punto de vista hidrogeológico, las formaciones geológicas se agrupan en tres unidades: Unidad Basal, Unidad Intermedia y Unidad Reciente. La primera constituye el zócalo impermeable en la mayor parte de la isla, mientras que la Unidad Intermedia se considera la más productiva hidrogeológicamente y la Unidad Reciente tiene un papel predominante en los procesos de recarga. La piezometría indica que el agua subterránea fluye desde los puntos más altos de la isla hasta la costa, con salidas intermedias en algunos valles. En algunas zonas costeras el ciclo está invertido, lo que favorece la intrusión salina. El modelo hidrogeológico conceptual de la isla contempla un acuífero central bajo la Fm Assomada y la Fm Pico da Antonia, pertenecientes a la unidad Intermedia. La hidroquímica del agua subterránea permite distinguir diversas facies. Algunas responden a la interacción agua roca: Cl-HCO₃-Na o HCO₃-Cl-Na, mientras que en las zonas costeras domina la facies Cl-SO₄-Na en aguas con alta salinidad. Los valores de nitratos son bajos en general, superando los 50 mg/L en la Unidad Reciente. Los isótopos ambientales ($\delta^{18}\text{O}$ y del $\delta^2\text{H}$) confirman el modelo de recarga en la zona de cumbres y descarga hacia el mar y apuntan a la existencia de procesos de evaporación del agua de precipitación y de escorrentía.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los recursos hídricos en la República de Cabo Verde son escasos, por lo que limitan el crecimiento económico del país y son objeto de diversos estudios y trabajos financiados fundamentalmente con fondos de cooperación internacional. El proyecto ADAPTaRES pertenece a la convocatoria Interreg de la Unión Europea dedicada a la Macaronesia (MAC 2014-2020) e incluye toda una serie de actuaciones encaminadas a demostrar la capacidad de adaptación al cambio climático en la Macaronesia a través de la reutilización de aguas residuales depuradas, el riego eficiente y la prevención y reducción de la contaminación. Dentro de este proyecto, se contempla específicamente la caracterización hidrogeológica de la isla de Santiago, como punto de partida para conocer la situación previa a las experiencias de reutilización que se plantean en la isla dentro del citado proyecto (<https://adaptares.com/es/>).

En el marco de dicho proyecto, el presente trabajo de fin de máster consiste en una recopilación de información bibliográfica sobre las características hidrogeológicas de la isla de Santiago, perteneciente al conjunto de islas que forman la República de Cabo Verde.

El objetivo principal es la síntesis y exposición del funcionamiento hidrogeológico de la isla. Este objetivo general lleva asociada una búsqueda exhaustiva de información sobre todos los aspectos que lo condicionan: climatología, geografía, geología, hidroquímica, suelo y vegetación, recursos hídricos, agricultura, usos y demandas del agua de la isla. Los objetivos propuestos permitirán avanzar en el conocimiento hidrogeológico del acuífero insular y en el planteamiento de futuros trabajos tendentes a su mejora. Todo ello redundará en aspectos aplicados, como una mejor planificación de los recursos subterráneos y la identificación de realidades que inciden en la degradación de la calidad de los mismos.

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1 Localización

La república de Cabo Verde se encuentra en el archipiélago volcánico macaronésico al cual también pertenecen las islas Canarias, Azores y Madeira, en el Océano Atlántico, a unos 460 km de la costa oeste del país africano de Senegal en el océano Atlántico. Está compuesta por diez grandes islas y cinco islotes. Santiago es la isla donde se encuentra la capital, Praia. Es la más grande y poblada de todas ellas, con aproximadamente un área de 990 km² (Figura 1).

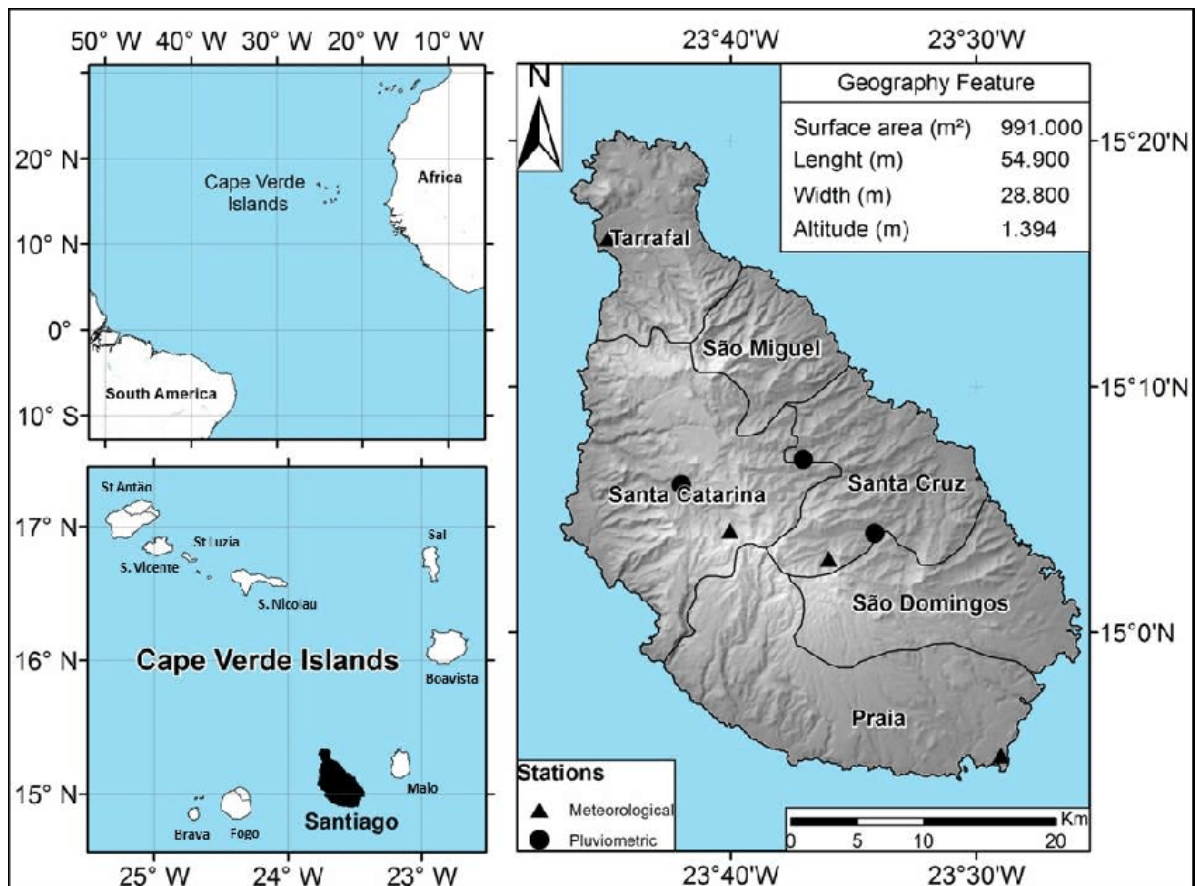


Figura 1. Localización de la isla de Santiago (Varela-Lopes et al., 2014).

2.2 Climatología

Debido a su situación geográfica, la isla de Santiago tiene un clima árido o semiárido compuesto por dos estaciones climáticas diferentes: una estación seca que se sucede entre noviembre y julio y una estación húmeda entre agosto y octubre. Durante la estación húmeda se producen lluvias muy irregulares, siendo el valor promedio anual 363 mm/año.

Estas precipitaciones están condicionadas por la orografía del terreno, viento, orientación, etc, dando lugar, en ocasiones, a largos periodos de sequía o grandes lluvias torrenciales (Pina, 2011).

En la Figura 2 se observan las precipitaciones medias entre 1961 y 2000 (Conçalves, 2012) en la que se recoge más cantidad de precipitación en las cumbres más altas mientras que la cantidad es mucho menor en la zona de costa.

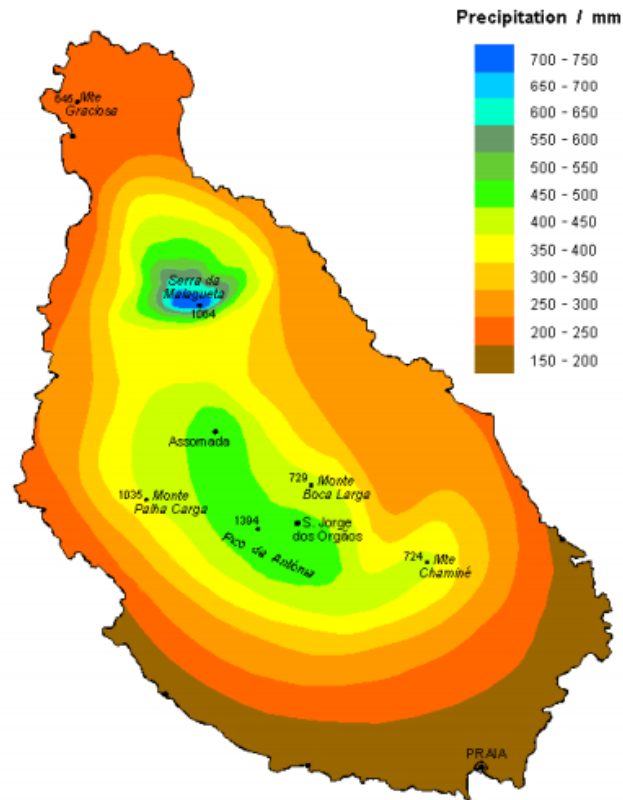


Figura 2. Precipitación media anual entre 1961 y 2000, (Conçalves, 2012)

Esta correlación entre altitud y precipitación llevó a la definición de zonas bioclimáticas (Lobo de Pina, 2009) con diferentes características (CNAG (Conselho Nacional de Águas) - INGRH, (Instituto Nacional de Gestão de Recursos Hídricos de Cabo Verde 2000):

- Entre 0 y 200 m de altitud se encuentra la llamada zona árida, la cual se caracteriza por un régimen desértico con una precipitación anual de menos de 300 mm y con vegetación de tipo herbáceo.
- Entre 200 y 400 m de altitud se encuentra la zona semiárida. En esta zona las precipitaciones anuales oscilan entre 300 y 400 mm. La vegetación natural difiere poco de la de la zona árida, aunque es más diversa.
- Entre 400 y 600 m de altitud se encuentra la zona semihúmeda, en la cual las precipitaciones interanuales varían entre 400 y 600 mm. Cabe señalar que en las estaciones hidrométricas ubicadas a altitudes superiores a 400 metros, hay pocos años cuyos registros indican valores de sequía extrema.
- Por encima de los 700 m de altitud se encuentra la zona húmeda con una precipitación anual promedio mayor a 600 mm. En términos de producción agrícola, es la más productiva, no solo en la isla de Santiago sino también en las islas de Santo Antão, São Nicolau y Fogo.

En la Figura 3 se distinguen los valores del índice de aridez promedio, calculados entre los años 1962 y 2005 de acuerdo con la definición de la ONU para varias estaciones pluviométricas en la isla de Santiago (www.desertificación.gob.ar, 2020). Este índice especifica cual es la situación hídrica de una región en base a la relación oferta/demanda hídrica (Peña Manjarrez et al, 2020).

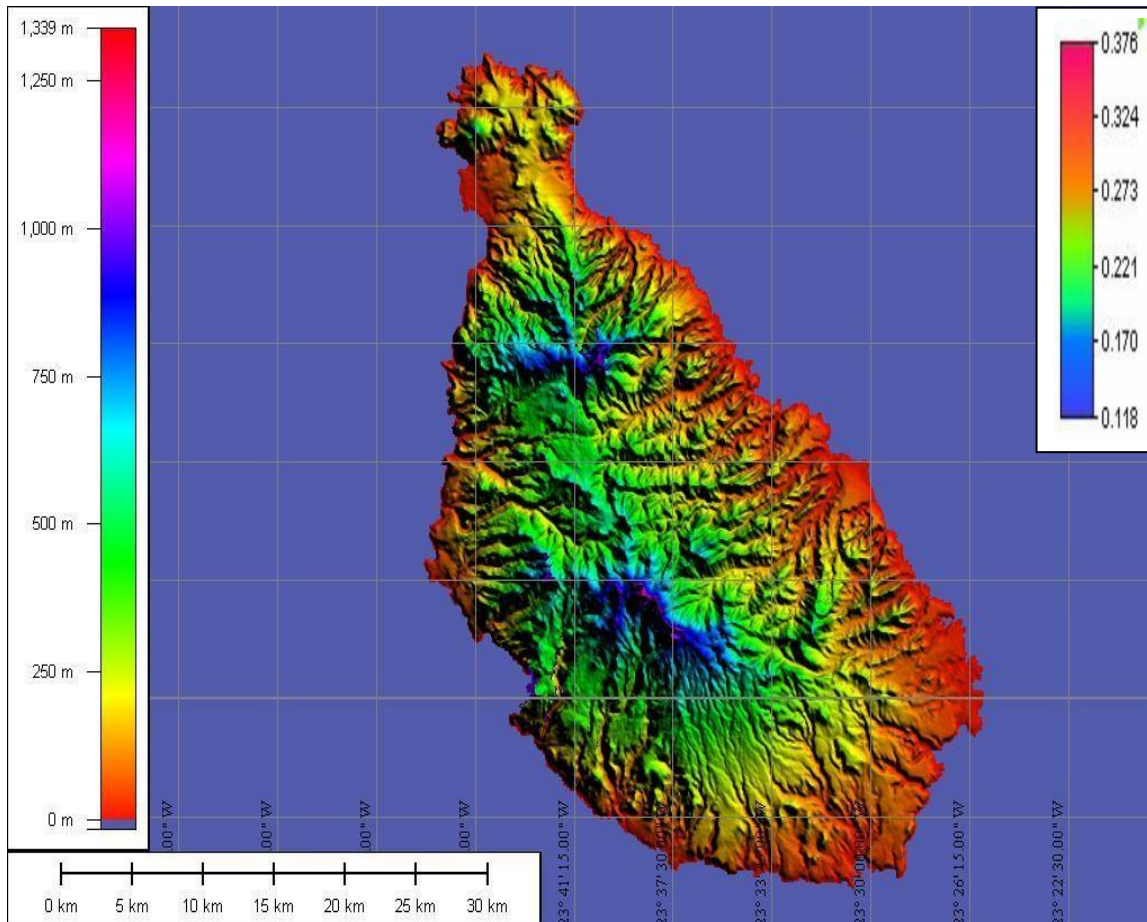


Figura 3 Diferentes clases de aridez en la isla de Santiago (INMG, 2005).

Se distinguen dos zonas con un índice de aridez visiblemente más bajo que el resto (zonas azules), correspondientes a una altitud de entre 750 m y 1000 m, mientras que este índice va en aumento en áreas más cercanas a la costa.

Otro de los factores fundamentales a tener en cuenta en la climatología de la isla es el viento, (Pina, 2011):

- En el nordeste de la isla, procedente de las Azores, el viento sopla la mayor parte del tiempo produciendo algunas lluvias, sobre todo en las zonas montañosas. Este es el llamado viento alisio marítimo, predominante en la zona.
- El viento que proviene del continente africano, los llamados vientos alisios

continentales, aportan un alto contenido de partículas de polvo provenientes del desierto del Sáhara. Este viento se produce en los meses de invierno y es seco y cálido.

- Los monzones: este tipo de viento es el que da lugar a la época de lluvias soplando desde el sur y suroeste de la isla.

También intervienen en el clima las brisas, que son vientos más suaves y se originan por la diferencia de temperatura entre la superficie de las islas y la de las aguas del océano.

La isla de Santiago tiene una temperatura anual promedio de 23.6 °C (Pina, 2011), con una amplitud térmica entre 21.3 °C y 25,6°C, encontrándose las temperaturas medias más altas en las zonas cercanas al mar, como la ciudad de Praia (datos del año 2005 calculados por INMG). Asimismo, a este ciclo de temperatura se une el ciclo de humedad, que sigue las mismas variaciones que ésta a lo largo del año, produciéndose sus valores más altos en el mes de septiembre y los más bajos en marzo. En cuanto a la insolación, los valores máximos de producen entre los meses de abril y mayo y los mínimos entre julio y agosto (Pina, 2011).

2.3 Hidrología superficial

La poca disponibilidad de agua superficial y la ausencia de mecanismos para su retención, combinados con precipitaciones bajas e irregulares, explican la gran dependencia de los habitantes de la región del agua subterránea. La mayoría de las veces, la escorrentía superficial solo se produce en la isla después de una caída de lluvia mayor de 20-25 mm/día (Lobo de Pina, 2009), en la estación húmeda, perdiéndose muchas veces en el mar o por evapotranspiración.

El desnivel topográfico de la isla tampoco ayuda demasiado ya que hace que el tiempo de residencia del agua en las corrientes superficiales sea muy corto, del orden de 3-4 horas y velocidades de flujo generalmente superiores a 5 m/s.

En el trabajo de Pina (2009) se realizaron los cálculos del volumen total de lluvia de las diferentes zonas, llegando a la conclusión de que las cuencas de Santa Cruz y de Santa Catarina son las que mayor precipitación reciben (Figura 4).

2.1 Geología

El archipiélago de Cabo Verde tiene un origen volcánico, ligado a la existencia de un punto caliente (hot spot). Su formación se debe a la subida de una pluma magmática del manto, a la que se ha denominado "Cabo Verde Rise", de unos 400 km de diámetro y 3000

m de profundidad. Una pluma de estas dimensiones se produce por una anomalía relacionada con una descompresión generalizada, que más tarde produce la fusión parcial del manto, originando las erupciones que han formado dichas islas (Lobo de Pina, 2009).

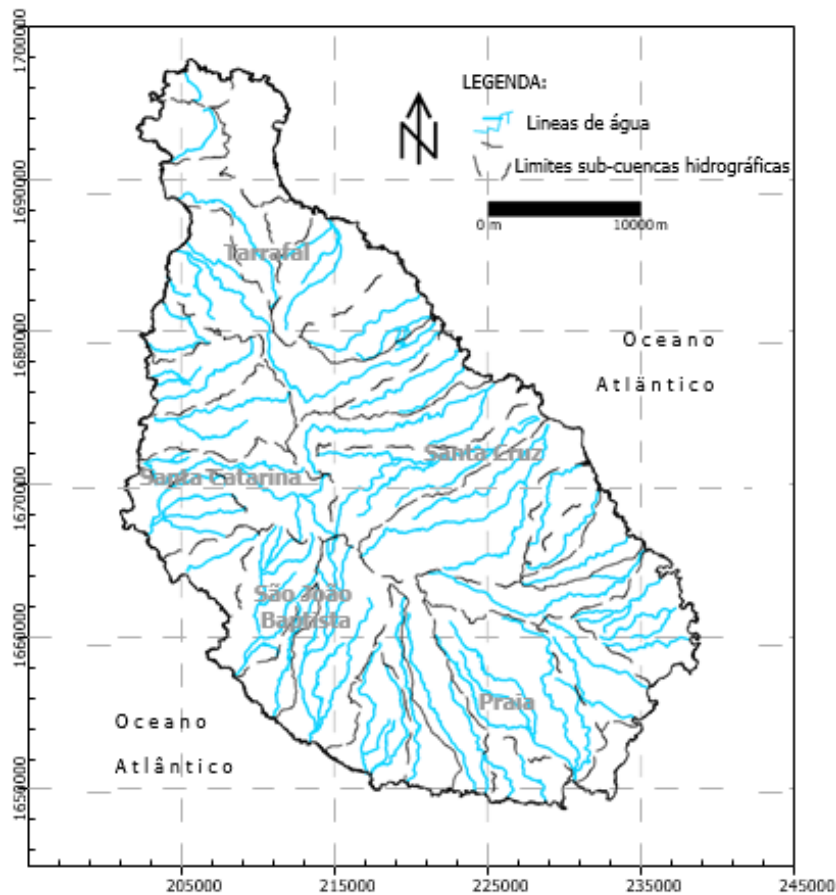


Figura 4 Líneas de agua de las isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

Como en todas las islas volcánicas de origen oceánico, las etapas de su formación son las siguientes: etapa inicial (la llamada ‘fase en escudo’), en la cual se produce un crecimiento muy rápido, creándose así el edificio volcánico de la isla en forma de escudo invertido (Pérez Torrado et al., 2010). A esta fase le siguen otras dos: el reposo volcánico y el rejuvenecimiento. Durante la fase de reposo volcánico la isla se aleja de la vertical del punto caliente mantélico (donde empezará a crearse otra isla) desconectándose así de su zona principal. Por tanto, lo único que influye en el relieve son los agentes geológicos externos, los cuales crean barrancos, anchas plataformas marinas, playas, etc. Por último, en la fase de rejuvenecimiento, la isla se aleja de la influencia del peso de la otra isla que está creciendo. Entonces, se producen nuevas erupciones volcánicas menos importantes y muy dispersas que simplemente cubrirán parcialmente los relieves erosivos previos (Pérez Torrado et al., 2010).

Así pues, las rocas eruptivas constituyen casi toda la parte emergida de la isla, tanto en superficie como en volumen, extendiéndose sobre varios tipos y formaciones geológicas de edades muy diferentes (Serralheiro, 1976) que ordenándolas de más antiguo a más reciente son:

- Primera etapa - Paleógeno (65 a 23 Ma) Se producen las erupciones submarinas iniciales seguidas de la fase en escudo, consistente en erupciones subaéreas. Esta etapa creó el antiguo complejo eruptivo interno.
- Segunda Etapa: Paleógeno a Neógeno (Oligoceno a épocas del Mioceno inferior, 36 a 20 Ma). Se produce una actividad volcánica más baja, predominando los fenómenos erosivos, con destrucción de los edificios volcánicos superficiales previos. Estos materiales erosionados han originado grandes depósitos submarinos.
- Tercera etapa: consiste en la formación de un monte submarino Neógeno (época del Mioceno inferior, 20 a 16 Ma). Se produce un aumento de nivel del mar por encima de la marca real de 450 m.
- Cuarta Etapa - Neógeno (época del Mioceno Medio, 16 a 12 Ma). Actividad efusiva muy intensa junto con grandes extensiones de áreas cubiertas. En esta etapa se forma la Fm Flamengos.
- Quinta etapa - Neógeno (épocas del Mioceno medio a superior, 12 a 5 Ma) Se produce un período de regresión a un nivel no menor a 250 m de altura. Se para la actividad volcánica, produciéndose la formación de potentes depósitos sedimentarios con facies marinas y terrestres. En esta etapa se forma la Fm Órgãos.
- Sexta etapa - Neógeno a Cuaternario (5 Ma hasta el presente). Antes del último período efusivo, el proceso generalizado de erosión y sedimentación eleva los depósitos de dunas y playas a unas decenas de metros sobre el nivel del mar (Pleistoceno), creándose así el Pico da Antonia y Assomada. La última actividad volcánica crea muchos materiales escoriáceos y conos piroclásticos. En el Holoceno, los depósitos terrestres se generalizan, como el de la playa de Arena y la Fm. Monte das Vacas.

A partir de lo anteriormente expuesto, se puede resumir que las formaciones existentes en la isla de Santiago se dividen en dos grandes grupos: las formaciones volcánicas y las

sedimentarias del cuaternario, las cuales ocupan zonas más pequeñas (Serralheiro, 1976; Lobo de Pina, 2009).

La figura 5 muestra la localización de las principales unidades geológicas de la isla:

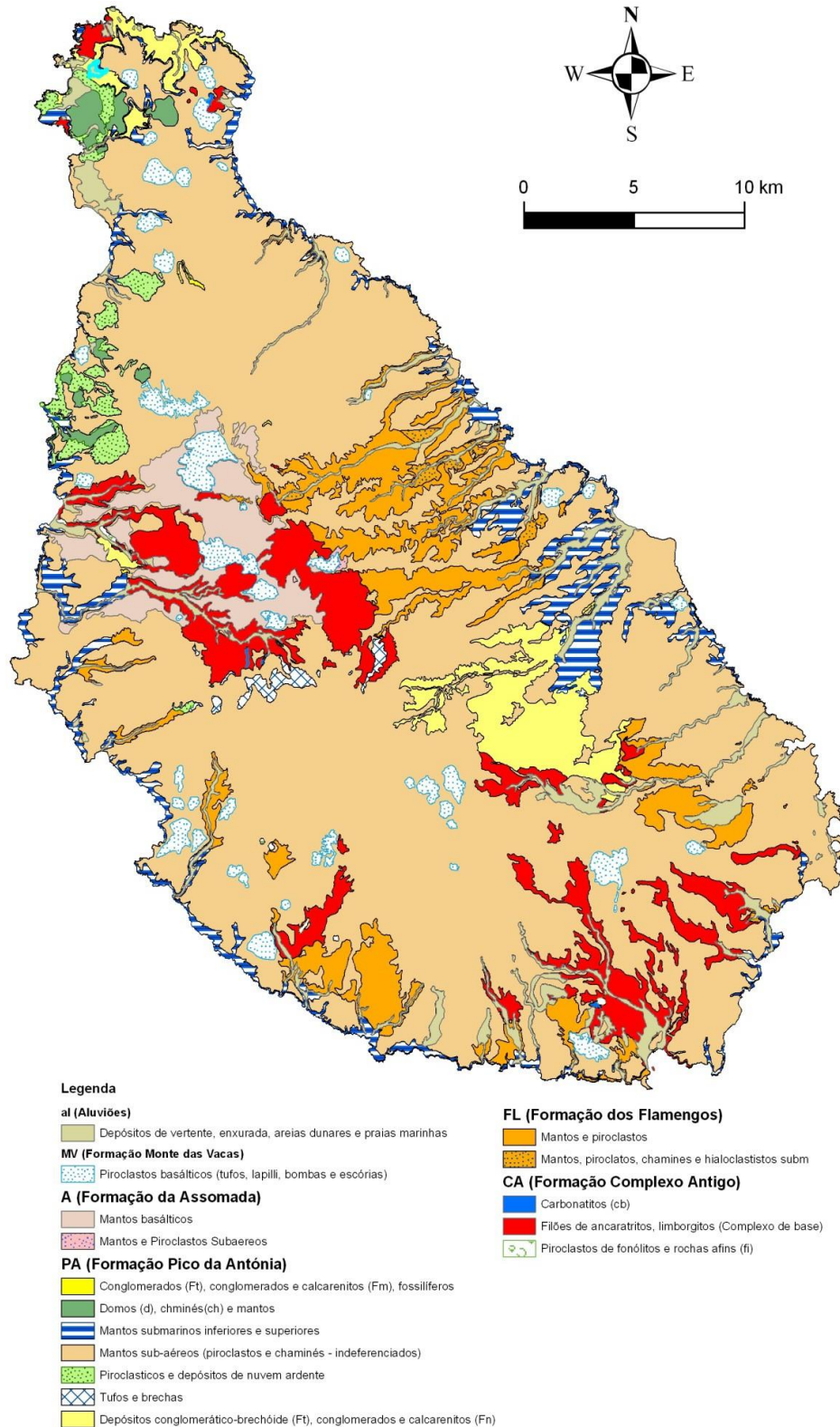


Figura 5 Geología de la isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

2.1.1 Formaciones volcánicas:

En la isla de Santiago existen rocas volcánicas de edades, formaciones y tipos muy distintos, encontrándose, como se comentó anteriormente distribuidas en distintas zonas atendiendo a sus diferentes características. De esta manera, las rocas más antiguas se encuentran en áreas más despobladas como los lechos de los ríos o el fondo de los valles, mientras que las rocas afaníticas, ocupan la mayor superficie de la isla.

- Complejo eruptivo interno antiguo (CA):

Como su propio nombre indica se trata de las rocas más antiguas de la isla que forman parte del origen de ésta, correspondiéndose con las primeras erupciones volcánicas (Serralheiro, 1976). Estas formaciones se pueden observar en la zona centro oeste de la isla, ubicadas en una gran depresión de meseta (500 m) entre el Pico da Antónia (1 392 m) y la Serra Malagueta (1 063 m) así como en el sur y sureste de la isla (Lobo de Pina, 2009). Encima de los materiales de esta formación existen formaciones de conglomerados con poca representación espacial (Lobo de Pina, 2009)

- Formación de los Flamengos (FL)

Esta formación cubre parte del CA y está formada por lavas y piroclastos de composición básica. Se pueden encontrar por encima de los 250 m a lo largo de toda la isla a excepción de la zona norte.

- Formación de los Órgãos (CB)

Está compuesta principalmente por rocas basálticas que forman bloques muy gruesos (pueden superar los 100 m), angulares, subangulares o redondeados. También existe una pequeña parte de rocas fonolíticas resultantes de fenómenos volcánicos secundarios. Se trata de una formación muy heterógena que intercala arenas y conglomerados con algunos episodios de lava, siendo muy vulnerables a la erosión. Como se puede observar en la Figura 5, afloran en la parte norte y suroeste de la isla, así como una muy pequeña extensión en el oeste.

- Complejo eruptivo del Pico da Antonia (PA)

Esta formación constituye el complejo volcánico más desarrollado en términos de duración como de volumen de materiales emitidos y representan más de la mitad de la superficie de la isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

La formación abarca materiales de actividades efusivas y explosivas, submarinas y terrestres, que tuvieron lugar en diferentes momentos (Serralheiro, 1976). Su base se localiza

sobre las formaciones de Órgãos y Flamengos y más raramente en el complejo eruptivo interno. Después de esta primera fase de formación, se produjo un proceso de erosión al que siguió una inmersión parcial. Tras una repetición de este proceso tuvo lugar una fase explosiva que dio lugar a materiales con una alta porosidad.

- Formación de Assomada (AS)

Esta formación se corresponde con un periodo eruptivo exclusivamente terrestre con flujos de lava y algunos piroclastos basálticos, después de un importante tiempo de reposo volcánico en el que domina la erosión (Conçalves, 2012).

- Formación del Monte das Vacas (MV)

Representa los últimos episodios volcánicos de la isla de Santiago. Se compone de conos de piroclastos de composición basáltica.

2.1.2 Formaciones sedimentarias del cuaternario (CC)

Estas formaciones recientes cubren el 8,5% de la superficie total de la isla y están formadas principalmente por depósitos de aluviones, vertientes o escorrentías, arenas de dunas y playas marítimas en varios niveles hasta la cota de elevación de 100 m (Serralheiro, 1976a). Coinciden con los principales arroyos transitorios de la isla, ya que llenan la mayoría de los valles erosionados (Conçalves, 2012). Las figuras 6, 7 y 8 muestran tres cortes geológicos donde se aprecian todas las formaciones descritas anteriormente.

2.1 Suelos y vegetación

Los suelos de origen volcánico ocupan una gran parte de la superficie de la isla de Santiago y, en general, son poco evolucionados, poco profundos y bastante rocosos. Son suelos ligeramente alcalinos y con un bajo contenido de materia orgánica, sin embargo, son ricos en algunos minerales bastante alterados (Lobo de Pina, 2009)).

Debido a la existencia de dos estaciones climáticas bastante extremas, estación seca y estación húmeda, se dan procesos de erosión del suelo muy diferenciados en una y otra. Por un lado, en la época húmeda, se producen grandes deslizamientos de tierra por las laderas y deslizamientos laterales de tierra en los márgenes cóncavos de los valles debido a la escorrentía que provocan las intensas lluvias. Por otro lado, en la época seca se producen procesos erosivos en las pendientes, bajo la acción de la gravedad, en el caso de la caída de material fino de la capa superior del suelo (Lobo de Pina, 2009)

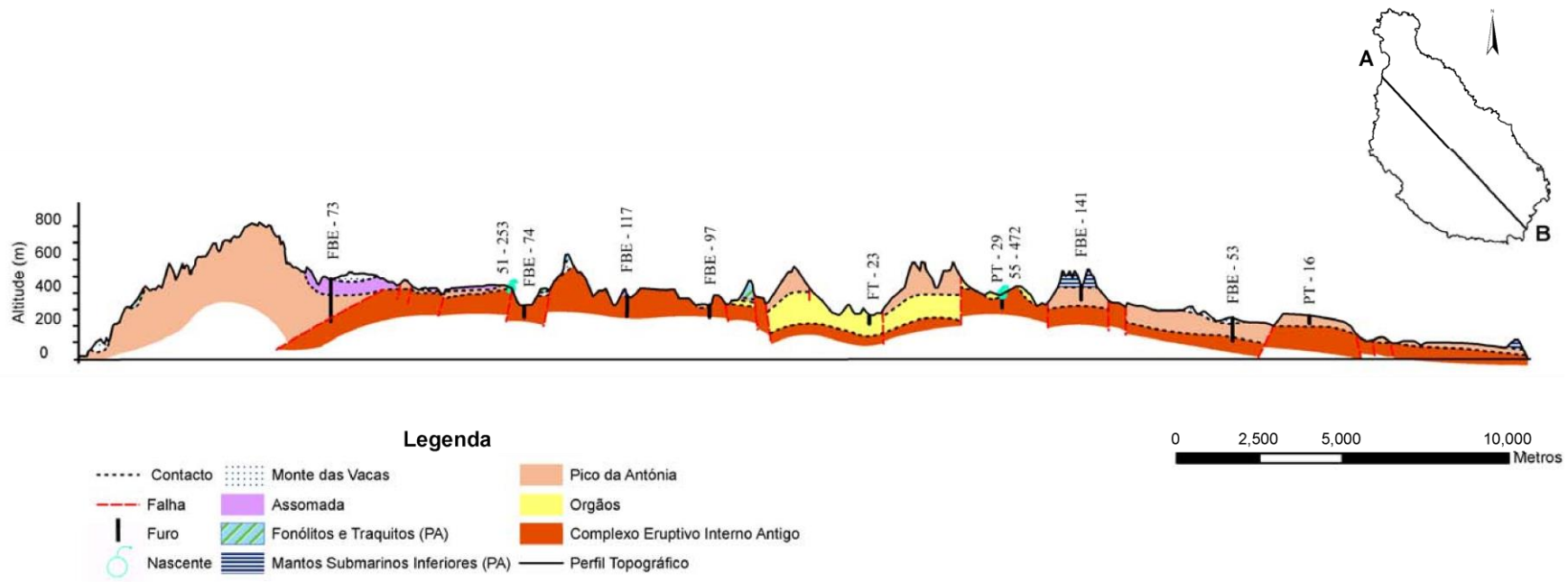


Figura 6. Corte geológico de la isla de Santiago (dirección NW-SE) (Lobo de Pina, 2009).

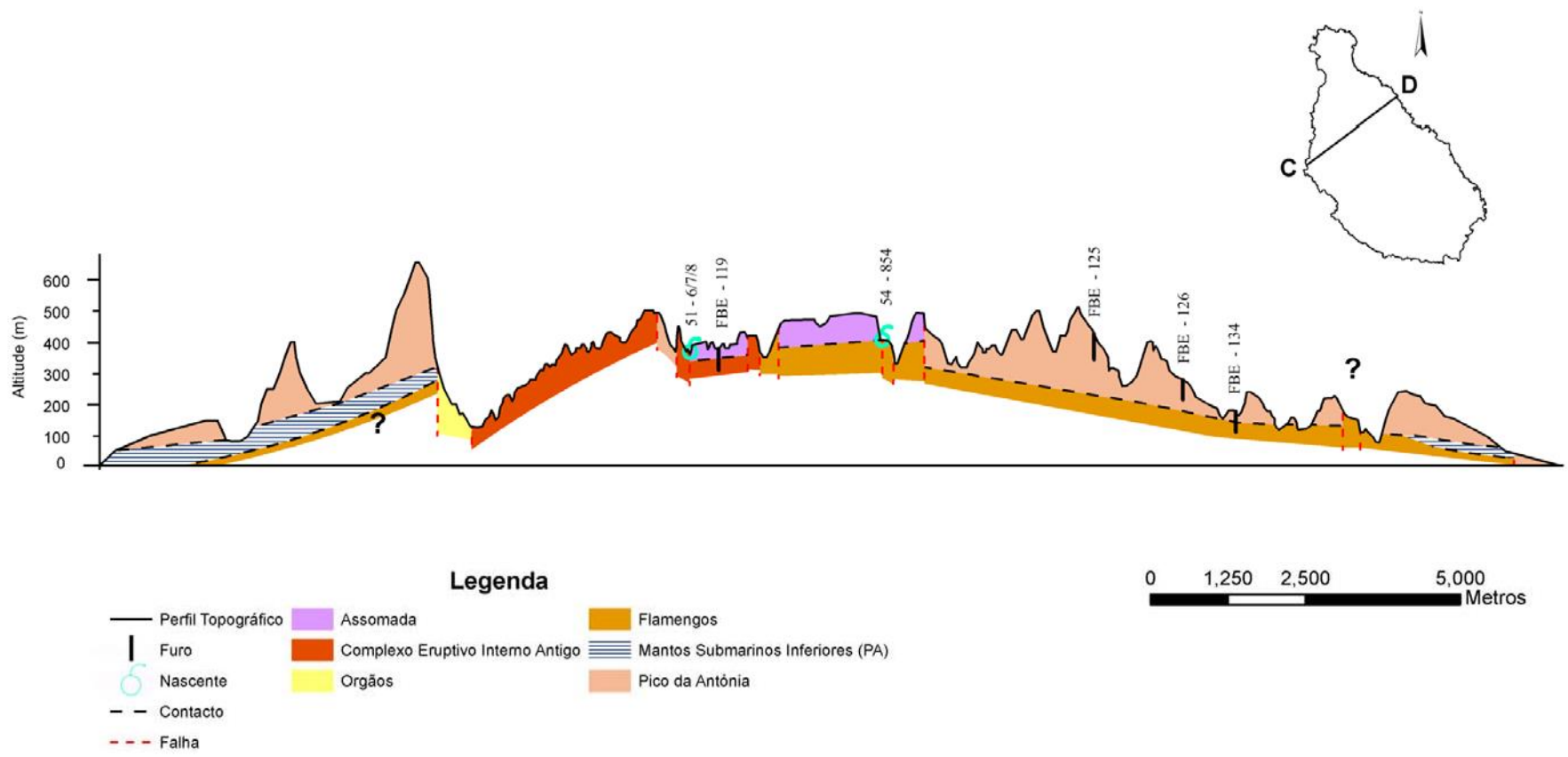


Figura 7. Corte geológico de la isla de Santiago (dirección NE-SW) (Lobo de Pina, 2009).

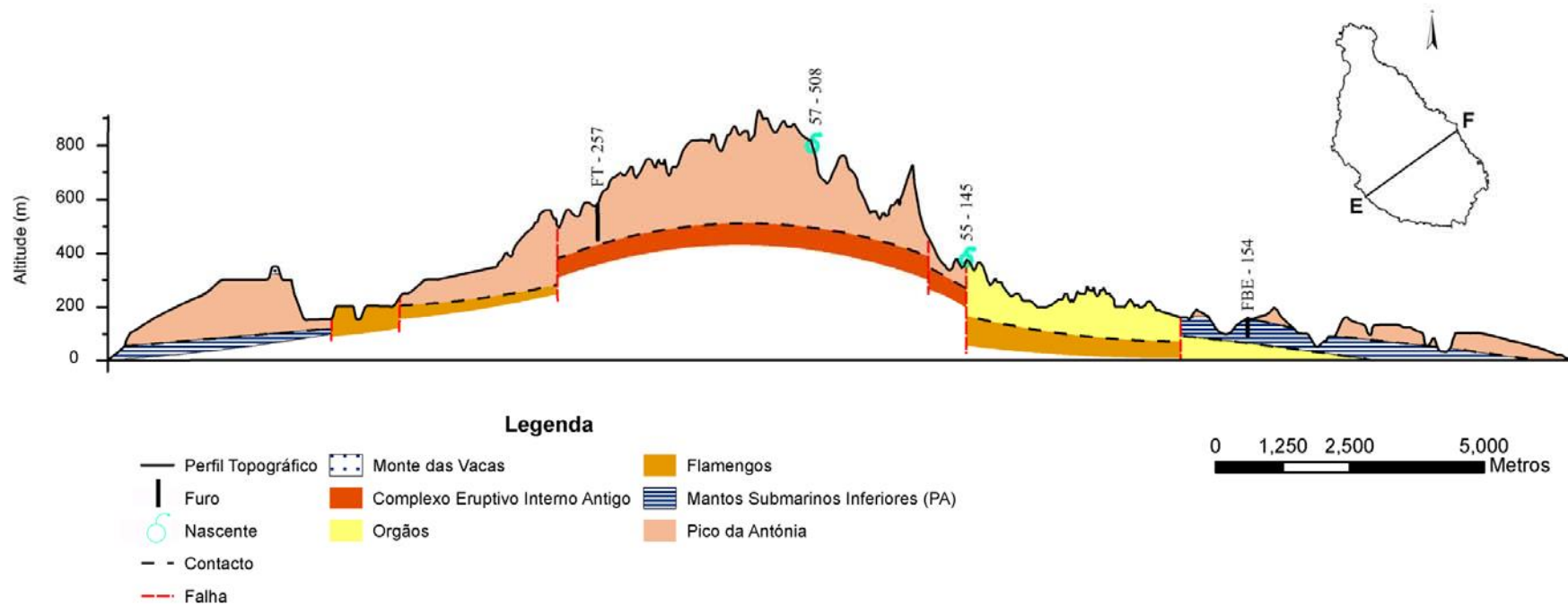


Figura 8. Corte geológico de la isla de Santiago (dirección NE-SW) (Lobo de Pina, 2009).

Desde el punto de vista hidrogeológico, los diferentes tipos de suelos volcánicos que cubren la isla de Santiago tienen capacidades de campo que pueden estimarse entre 50 y 200 mm/año y tasas de infiltración promedio que varían entre 40 mm/h para aluvión y 40 a 80 mm/h para basalto (Lobo de Pina, 2009).

Las condiciones climáticas de la isla de Santiago difícilmente permiten la existencia de una cubierta arbórea natural, excepto la vegetación adaptada al clima, compuesta de pastos, arbustos y especies leñosas (Lobo de Pina, 2009).

2.2 Recursos hídricos disponibles, usos y demandas

La entidad nacional que controla el servicio de agua en Cabo Verde es la Agencia Reguladora Económica (ARE). En la isla de Santiago se creó la "Compañía Intermunicipal de Agua y Saneamiento de Santiago y Aguas de Santiago", las cuales gestionan este recurso hídrico. La intención principal de esta entidad pública es asegurar una distribución rentable con calidad y cantidad adecuadas (Santamarta Cerezal, 2017).

Los recursos hídricos naturales provienen de las precipitaciones (lluvia o nieve fundamentalmente), las cuales, mediante escorrentía (superficial o subterránea) pasan a formar parte de los recursos, como su nombre indica, superficiales o subterráneos. Aplicando dicha información a la zona de estudio y habiendo estudiado previamente el clima y la geología de la isla, se llega rápidamente a la conclusión de que los recursos hídricos naturales en la isla de Santiago son escasos debido a su situación geográfica.

Aparte de las aguas subterráneas, como recurso hídrico, también existen pequeñas presas, enfocadas sobre todo al abastecimiento de la agricultura y ganadería. Dado que las precipitaciones son muy escasas o torrenciales, mucha de esta agua acaba en el mar. Por ello, se están realizando importantes esfuerzos en la mejora y aprovechamiento del agua de lluvia mediante presas que eviten que ese recurso no se aproveche (Santamarta Cerezal, 2017). No obstante, aunque la construcción de presas sea una solución para cubrir el abastecimiento, no se debe olvidar que estas construcciones introducen cambios en el nivel de ocupación de la tierra e implican nuevos riesgos de contaminación de los recursos hídricos, por lo que es importante evaluar previamente las posibles implicaciones tanto cuantitativa como cualitativa (Pina, 2011).

Estas medidas no son suficientes para cubrir las necesidades hídricas de la isla, que cuenta con alrededor de 500.000 habitantes y a unos 400.000 turistas (aunque se prevé que en 2021 se supere el millón de turistas) (Santamarta Cerezal, 2017). Además hay que atender a las

demandas de la agricultura y ganadería. Por ello, el gobierno de Cabo Verde está llevando a cabo un estudio para poder provocar lluvias artificialmente y así aumentar sus recursos hídricos, como ya se ha hecho en países con problemáticas similares como Marruecos y Sudáfrica (Santamarta Cerezal, 2017).

En los últimos años, se están instalando plantas desaladoras de agua de mar, como la de Palmarejo. La capacidad reportada por la empresa que la explota (www.accion.com) es de 10.000 m³/día de capacidad y está enfocada al abastecimiento urbano de Praia. Los datos del Instituto Tecnológico de Canarias, incluidos en el proyecto ISLHÁGUA apuntan a que actualmente, la desaladora de Palmarejo tiene una capacidad de 15000 m³/día (<http://www.islhagua.itccanarias.org/web/guest;jsessionid=3C6FC63B10600CA4638877A0D2C901E1>). Existen también desaladoras con capacidad menores instaladas en Calheta São Miguel, Cavibel y Sambala, esta última fuera de uso (Figura 9).



Figura 9 Ubicación de las desaladoras de agua de mar existentes en la isla de Santiago (modificada de figura suministrada por ITC, 2020).

Existe otro problema añadido a los recursos hídricos que es la vinculación del agua con la energía. Así, hay que considerar la cantidad de energía necesaria para hacer funcionar una desaladora, la cual se hace imprescindible para cubrir toda la demanda de agua de la isla. En general, la fuente de energía eléctrica de la isla proviene del petróleo aunque también se están intentando aprovechar los recursos naturales utilizando energía solar y eólica (Santamarta Cerezal, 2017). Debido al rápido crecimiento demográfico de la isla se está impulsando también desde el gobierno el Proyecto de Desarrollo del Sistema de

Abastecimiento de Agua (Santamarta Cerezal, 2017), en el que se consideran algunas medidas como el trasvase temporal de agua entre los municipios en la estación seca.

2.2.1 Abastecimiento

La distribución de aguas en la isla no llega aún a toda la población. Aunque en las ciudades llega a más del 65%, este porcentaje es inferior en el ámbito rural (Santamarta Cerezal, 2017).

El origen del agua potable suministrada a la población de la isla de Santiago depende de la zona donde se encuentren. De esta manera, para los habitantes del municipio de Praia, el agua procede en un 70% de plantas desalinizadoras, en un 20% de pozos que extraen el agua subterránea y el 10% de manantiales. En el caso de los habitantes de los municipios del interior de la isla, el abastecimiento proviene mayoritariamente de los pozos. Tanto en un caso como en el otro, el agua es distribuida posteriormente en camiones cisterna (Figura 9) (Lobo de Pina, 2009).



Figura 10. Camión cisterna en la zona de Santa Catarina (Fotografía de Cabrera, 2017).

En las zonas más rurales e inaccesibles por el terreno, se recurre de manera muy frecuente a las fuentes. Esto es algo muy extendido en toda la isla pero más en este tipo de zonas.

La estimación del consumo per cápita depende del suministro del sistema. En la tabla 1, se puede comprobar la gran diferencia existente entre, por un lado las zonas urbanas y rurales y por otro entre la conexión pública y otras formas de suministro como, por ejemplo, las fuentes. En ambos casos, el consumo promedio es inferior al recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011).

Tabla 1. Promedios de los consumos de agua per cápita en la isla de Santiago (Malik, K. (2013).

	CONEXIÓN PÚBLICA	OTRAS FORMAS DE SUMINISTRO
CENTROS URBANOS	50 L/habitante/ día	15 L/habitante/ día
ZONAS RURALES	25 L/habitante/ día	5-15 L/habitante/ día

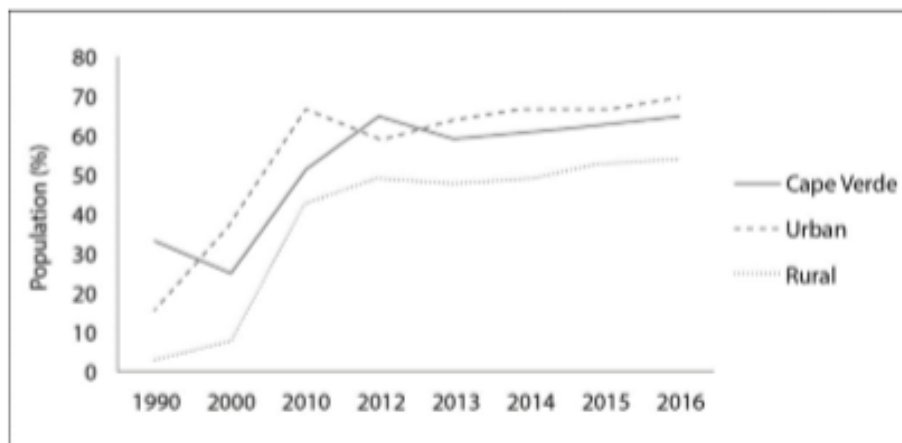


Figura 11. Evolución de la población con acceso a agua potable (Valente et al., 2019).

En esta gráfica se observa la evolución de la población con acceso a la red pública desde el año 1990 hasta 2006 y varios informes oficiales del Gobierno situando, en más de un 65 % a la población urbana y en más de un 50% la población rural. (Valente et al., 2019),

En los casos en que la población se abastezca a través de fuentes, camiones cisterna u otras fuentes (pozos y manantiales), el servicio es prestado por empresas privadas aunque bajo la responsabilidad pública de la entidad ADS (Aguas de Santiago). La Figura 12 muestra ejemplos precarios de suministro de agua, utilizados por la población sin cobertura de la red pública.

También es necesario suministrar en la isla para una actividad agrícola de aproximadamente 45.000 ha de extensión, el 90% con cultivos de secano, maíz y frijoles principalmente y un 10% que depende del regadío. Estos últimos cultivos se riegan por gravedad mediante pozos o galerías (Santamarta Cerezal, 2017).



Figura 12. Diferentes tipos de suministro: a) Fuente; b) tanque automático; c) manantial; d) pozos (Valente, 2019).

También se debe tener en cuenta que la escorrentía superficial que ocurre en la isla de Santiago durante la temporada de lluvias, a menudo se retiene y se usa en los diques de retención que se construyeron en toda la isla, con el objetivo de aumentar la recarga subterránea y evitar que toda el agua de escorrentía se pierda en el mar. Por lo tanto, en la temporada de lluvias, es habitual tener retención de agua en estos diques, que a menudo se utiliza a posteriori para el riego y ganadería.

El desarrollo industrial de la isla es más bien escaso y se centra en la hostelería, la construcción civil, la producción de electricidad y las pequeñas y medianas industrias de la industria alimentaria, situadas en el municipio de Praia. Su abastecimiento se realiza mayoritariamente a través de la red pública y un leve porcentaje procede de pozos privados.

En cuanto a las pequeñas industrias y hoteles situados en otros municipios de la isla se abastecen principalmente de agua subterránea mediante pozos de explotación (Lobo de Pina, 2009).

2.2.2 Saneamiento

En el año 2010, con la colaboración de la cooperación española gubernamental (AECID) y descentralizada (Gobierno Canario y Xunta de Galicia); la cooperación de Francia, Austria, Luxemburgo, Portugal y Holanda y la Unión Europea, se realizó un anteproyecto con todas las necesidades más urgentes que tiene la isla, siendo una de ellas las redes de saneamiento ya que un porcentaje muy pequeño de la población tiene acceso a ella, teniendo que recurrir, en muchos casos, a los ríos como lugares de descarga de las aguas residuales y otros desechos (Lobo de Pina, 2009).

Algunos municipios, como el de Santa Cruz, se han dotado de una Planta de Depuración de las Aguas Residuales con una capacidad adecuada a su población. Sin embargo, sólo una parte de las viviendas del municipio están conectadas al sistema de alcantarillado, desaprovechando una infraestructura de depuración ya existente y de gran envergadura. Otros municipios, no cuentan con ninguna infraestructura de recogida o tratamiento de las aguas servidas (como el Municipio de Sao Domingos). En todos los casos, ampliar o iniciar la cobertura del sistema de alcantarillado es prioritario, por las importantes consecuencias medioambientales e higiénicas derivadas del vertido descontrolado de las aguas servidas (García Matías et al,2010).

En 2015 también se lanzó un proyecto financiado por el Fondo de Agua y Saneamiento de la Cooperación Estadounidense para la remodelación de la EDAR de Praia. Por tanto, poco a poco se va avanzando en este tema tan importante para el desarrollo del país (García Matías et al,2010)

Cabe destacar también el proyecto ADAPTARES, el cual está enfocado a la reutilización de aguas depuradas, el riego eficiente y la prevención y reducción de la contaminación de las aguas para así poder paliar el déficit hídrico de todas las islas de Cabo Verde y Canarias (www.adaptares.com, 2020).

2.3 Agricultura

Otro de los aspectos a mejorar es la eficiencia del agua de riego. En la isla, las actividades de agricultura se centran en la caña de azúcar, el plátano y las hortalizas. También se dan productos más especializados de la zona como es el café, el vino y el ‘grogue’, una especie de aguardiente que procede de la caña de azúcar. Como técnica para mejorar la eficiencia del agua de riego se está empezando a optar por técnicas como el riego por goteo y el aprovechamiento del agua depurada, llevando un control de los contaminantes para asegurar la calidad de los productos (www.adaptares.com, 2020). En cuanto a la actividad ganadera también es bastante alta en la isla y sin embargo, sólo se cubre el 15% de la demanda de alimentos del país (Santamarta Cerezal, 2017).

3. HIDROGEOLOGÍA

La caracterización hidrogeológica de la isla de Santiago es bastante compleja debido a la heterogeneidad de su geología y a la complejidad de sus formaciones. Sus características principales dependen del tipo de volcanismo, el tamaño y la distancia a la fuente de emisión principal, la actividad tectónica, la edad y los materiales intrusivos no volcánicos (Lobo de

Pina, 2009). Las rocas basálticas suelen tener mayor permeabilidad que las de tipo ácido, y los flujos de lava más recientes son más permeables que los antiguos (Custodio y Llamas, 2001). La porosidad puede variar entre el 10 y el 50% en los materiales piroclásticos y hasta menos del 5% en lavas masivas (Lobo de Pina, 2009). La variación en la porosidad depende principalmente de su proceso de solidificación. Cuando el enfriamiento del magma es lento hay tiempo para que los gases escapen y cuando es rápido, no habrá tiempo para liberar los gases y, en consecuencia, cuando se enfría, la roca tendrá una textura vesicular. Sin embargo, con el tiempo, la porosidad en las rocas volcánicas disminuye debido a procesos de alteración en los que se llenan los espacios intersticiales de las rocas. De todas formas, cabe destacar que no todas las rocas volcánicas con un alto valor de porosidad total tienen un alto grado de permeabilidad (Lobo de Pina, 2009).

Atendiendo a estas características, las unidades hidrológicas en la isla de Santiago se han agrupado por el comportamiento de su formación común. Los datos provienen de estudios geológicos, de registros de pozos y de ensayos de bombeo, que permiten agruparlos como se indica a continuación (Lobo de Pina, 2009):

- Unidad Basal (semiconfinada):

La unidad inferior está compuesta por el antiguo complejo eruptivo interno (CA), la Fm. Flamengos (FL) y la Fm. Órgãos (CB). Es una unidad compacta, con afloramientos fuertemente alterados y, en consecuencia, tiene una permeabilidad relativamente baja frente a las unidades más recientes. Las formaciones de CA con cotas de entre 20 y 30 están en general fracturadas y alteradas. La formación es compacta debajo de esta capa sin agua subterránea (Gonçalves, 2012)

- Unidad Intermedia:

Esta es la unidad más productiva hidrogeológicamente hablando de la isla de Santiago. Incluye el complejo eruptivo del Pico da Antonia (PA) y la formación de Assomada (AS) (Gonçalves, 2012). La formación de PA está principalmente formada por rocas basálticas con algunos piroclastos, con decenas de metros de espesor. Este sistema forma el acuífero principal de la isla aunque muestra una gran permeabilidad que disminuye en profundidad y evita un rápido drenaje del escaso suministro de agua con alta velocidad de alimentación (Carreira et al., 2010). La formación de Assomada presenta características en común con los depósitos recientes de la Formación Pico da Antónia, también formada por lavas y piroclastos, que a veces se caracterizan por ser buenos acuíferos (Lobo de Pina, 2009). Estas

características hacen que estas formaciones cobren gran importancia en la isla desde el punto de vista hidrogeológico.

- Unidad reciente

Esta unidad está compuesta por la formación "Monte das Vacas" (MV) y por depósitos de Cuaternario. El primero está compuesto esencialmente por conos piroclásticos basálticos y es extremadamente permeable. Son áreas de recarga de agua de la formación de AP muy importantes, pero sin embargo no puede realizarse explotación directa ya que no es muy profunda (Conçalves, 2012).

En la formación del Cuaternario detrítico, los parámetros hidráulicos están en función del tamaño de grano, el grosor y el contenido de arcilla. Cuando estas formaciones cuaternarias son gruesas y libres de arcilla (capas de 40 m de espesor) pueden presentar altos valores de porosidad y permeabilidad, lo que hace posible que existan pozos de explotación de agua subterránea que proporcionan tanto el agua potable como de riego (Vailleux et al., 1974). Aguas abajo de los mismos valles, donde el grosor de la formación es más pequeño y los materiales son más finos, los valores de la transmisividad son mucho más pequeños.

3.1 Inventario de puntos de agua

El número de puntos de agua registrados en Santiago en 2014 era de más de 3000 (INGRH, 2014). Este número comprende manantiales, sondeos, cisternas y piezómetros, además de las obras clandestinas (Pina, 2014). El primer censo se realizó en los años 70 llevado a cabo por la Junta de Recursos Hídricos y a finales del año 1979, los puntos de la agua ya eran 2287 (Pina, 2014).

En términos de control de calidad, la institución - INGRH / ANAS ha diseñado una red de control mediante la cual asegura el monitoreo del 15.4% de los puntos de agua (353), siendo 211 sondeos, 39 manantiales, 14 piezómetros y 89 cisternas (Pina, 2014). Los pozos son monitoreados mensualmente por la institución ANAS, con mediciones de flujo e indicadores fisicoquímicos expeditos, como conductividad eléctrica, temperatura y sólidos disueltos totales, con el objetivo de una caracterización in situ (Valente, 2019).

La tesis doctoral de Pina (2009) seleccionó un total de 243 sondeos/piezómetros distribuidos de manera representativa por las tres unidades hidrogeológicas que conforman la isla de Santiago, desde el nivel del mar hasta los 700 metros de altitud (Figura 13). La selección de estos puntos de agua se llevó a cabo según dos criterios: las condiciones hidrogeológicas, que hacen posible o no la aparición de acuíferos; la distancia al mar, que

puede influir en la salinidad del agua y la altitud. Esta última por razones económicas, ya que influye en el consumo de energía, construcción, acceso, etc.

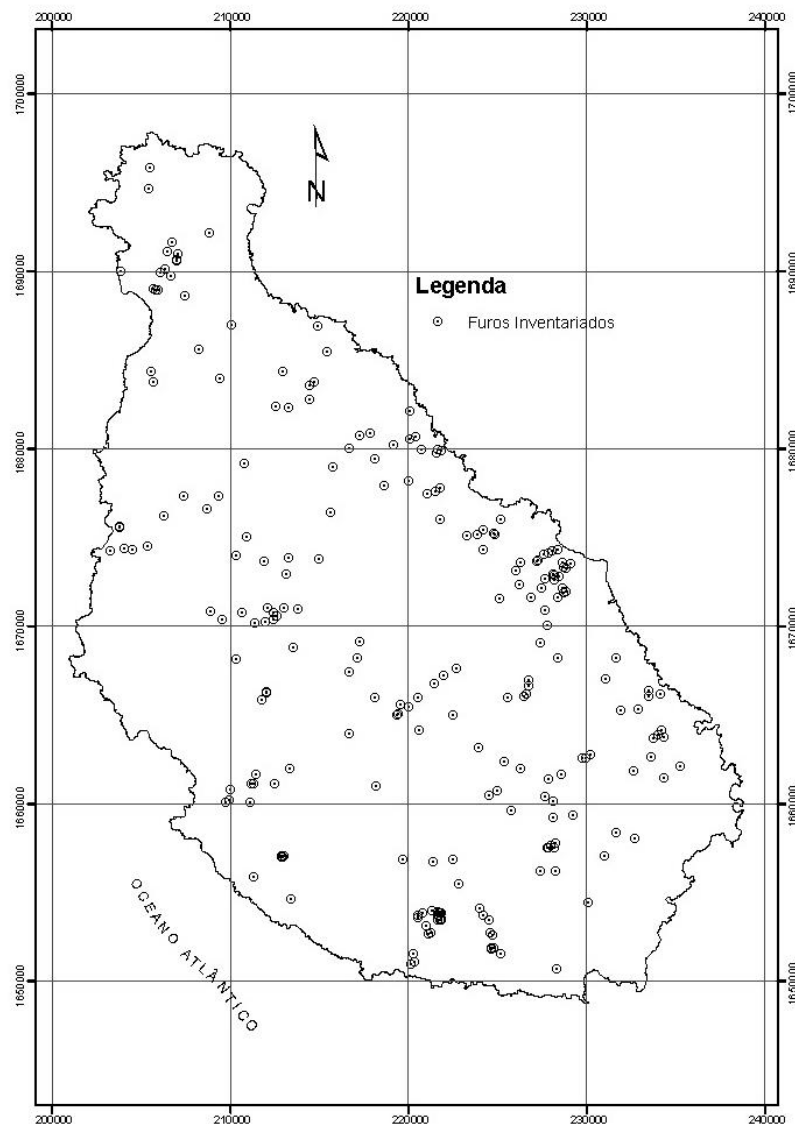


Figura 13. Localización de los pozos de captación de agua subterránea seleccionados por Lobo de Pina (2009).

El mecanismo de construcción utilizado en la mayoría de ellos fue la percusión y/o rotopercusión con diámetros entre 200 y 600 mm y profundidades de 30 a 270 metros. La mayoría de los pozos están cubiertos con tubos de hierro (el más antiguo) y PVC (el más reciente).

De igual forma, el trabajo de Lobo de Pina (2009) también seleccionó 323 manantiales de un total de 1199 que tiene inventariados el INGRH. La mayoría de ellos se pueden encontrar en la meseta central de la isla entre el Pico da Antónia y Serra Malagueta, dependiendo la distribución de ellos y de la geología, la cual es muy heterogénea (Figura 14). Alrededor del

70% de los manantiales se encuentran en el Complejo Eruptivo del Pico da Antónia; 16% en el antiguo complejo eruptivo interno; 6% en la formación Fm Flamengos; 3% en la Fm. Monte das Vacas; 3% en la Fm. de Orgaos; y, 2% en Fm. Assomada.

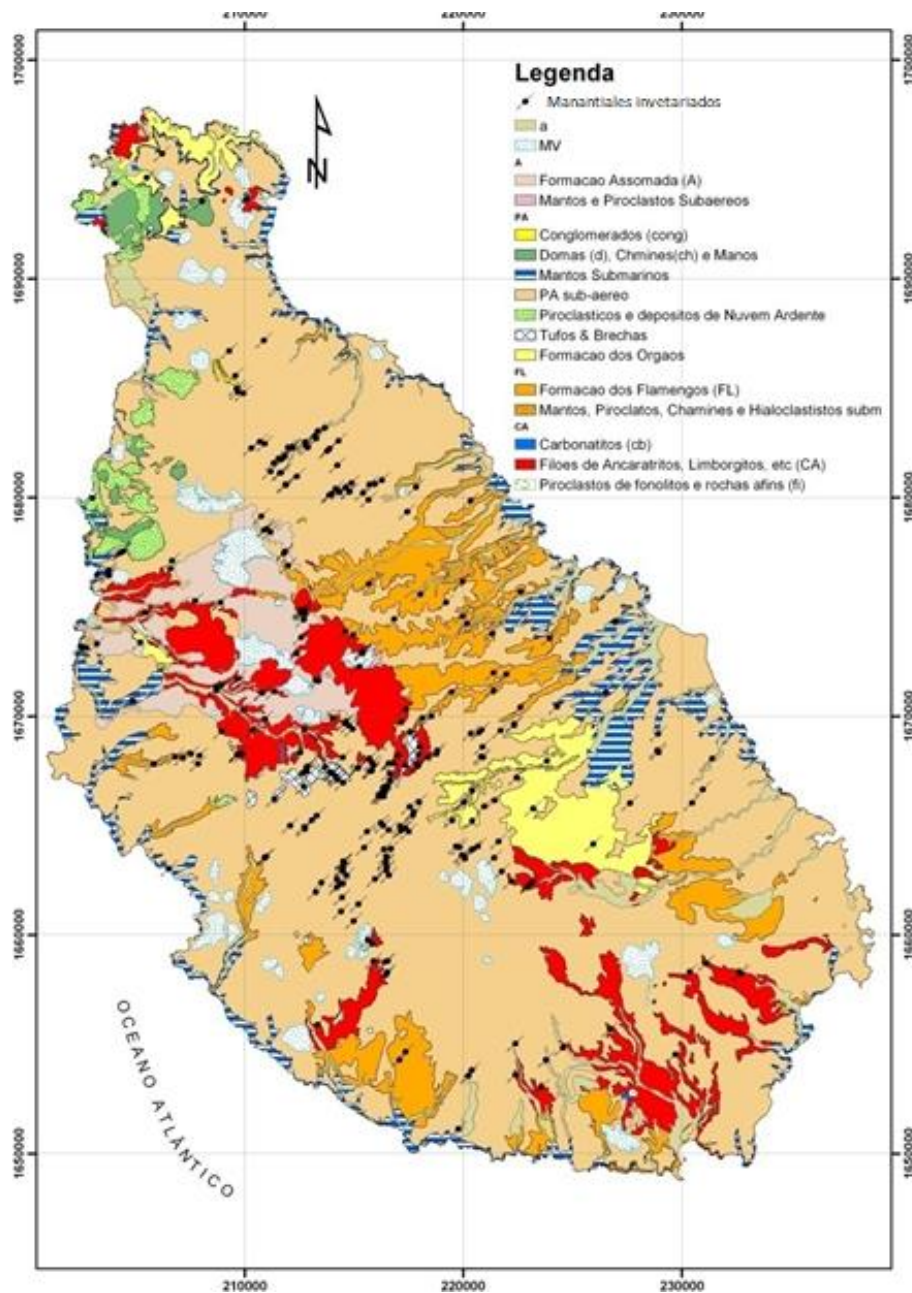


Figura 14. Manantiales inventariados por Lobo de Lobo de Pina (2009).

También se encuentran manantiales a diferentes altitudes como el manantial de Angrona (a unos tres metros de altitud) o el manantial de Mato Dentro (a unos 804 m), los cuales tienen un flujo muy variable dependiendo de las condiciones climatológicas. En cambio también se han localizado manantiales con flujos más estables, los cuales cobran gran importancia para el abastecimiento, por lo que se encuentran monitorizados por el INGRH.

El trabajo de Pina también ha realizado una selección de los pozos de gran diámetro existentes en la isla. En concreto, se ha seleccionado un total de 742 de un total de 1074 inventariados por el INGRH (Figura 15).

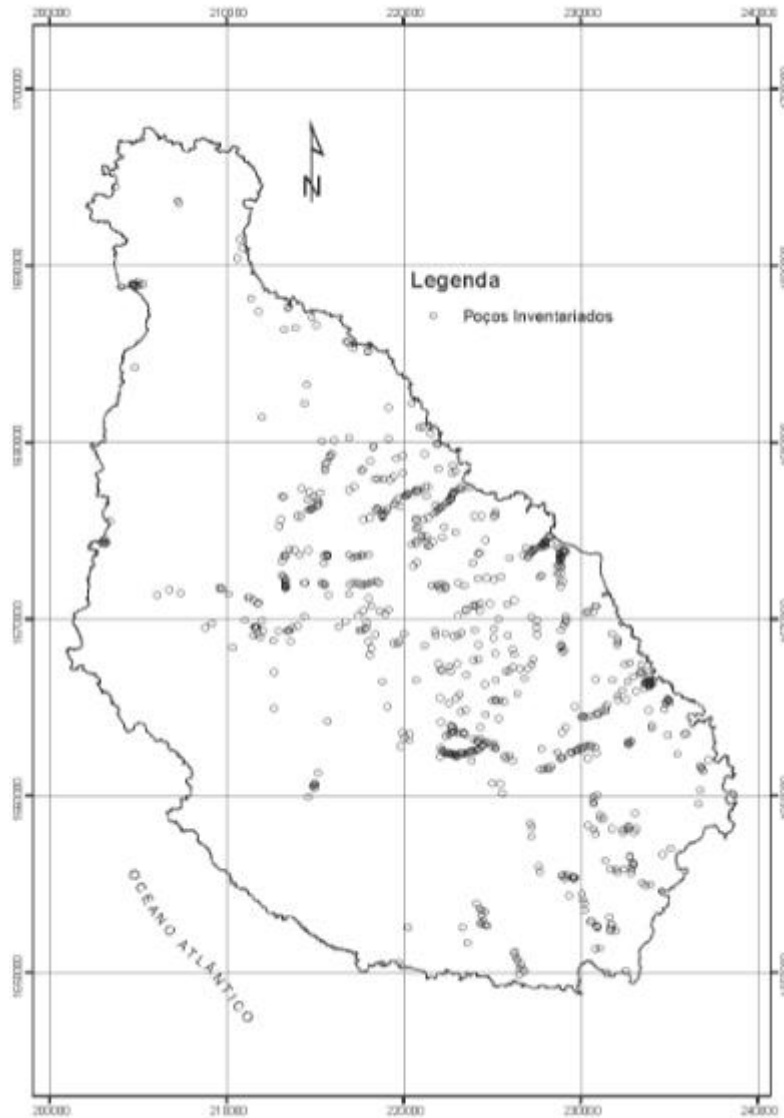


Figura 15. Pozos de gran diámetro inventariados por Lobo de Pina (2009).

Estos pozos tienen unas dimensiones muy variadas: de entre 1.5 y 3 m de diámetro y de entre 2.5 y 15 m de profundidad, llegando a los 2 o 3 metros por debajo del nivel freático, cubriéndose después con mampostería y basalto para evitar su colapso. La mayoría de estas construcciones se sitúan en la zona oriental de la isla, recolectando agua de acuíferos aluviales y/o en áreas de alteración de la formación de la base (basaltos fracturados). También se pueden encontrar algunos en la parte central de la isla, algunos de ellos situados a altitudes de más de 500 m. La productividad que se obtiene de ellos no es muy alta, con tasas de flujo promedio de entre 10 y 15 m³/día, sobre todo los construídos en formaciones CA y CB. Se puede llegar a caudales mayores (alrededor de 100 m³/ día) cuando los pozos están

excavados en materiales aluviales. El método de extracción de agua suele ser la motobomba aunque en algunos de ellos se utilizan molinos de viento. La excavación de pozos y extracción de agua de ellos comenzó en los años setenta del siglo XX, representando en aquella época un 50% del abastecimiento urbano y para la agricultura.

3.2 Piezometría

El análisis de la piezometría utiliza como base los datos de monitoreo del INGRH, que incluye la medición, tres veces al año, de niveles en piezómetros, pozos y medición de caudales. Los mapas piezométricos elaborados por Pina (2009) se muestran en la figura 16.

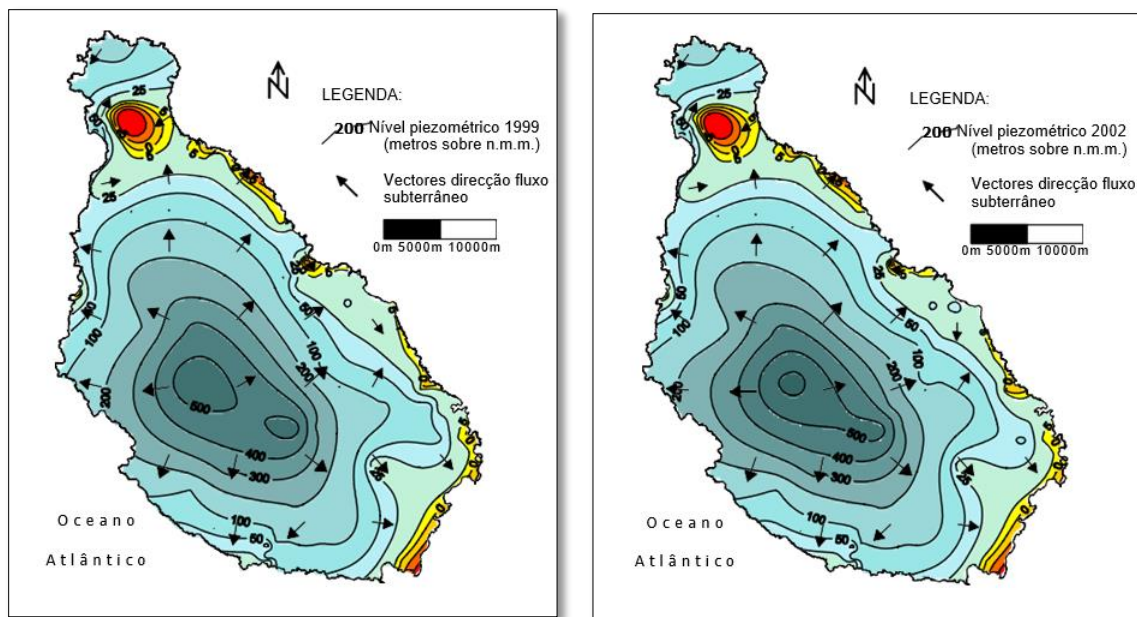


Figura 16. Mapas piezométricos de la isla de Santiago para los años 1999 y 2002 (Lobo de Pina, 2009).

A partir de dicha figura se deduce que a lo largo de los años ha cambiado el patrón de flujo debido al aumento de la explotación de los recursos hídricos subterráneos de la isla. Los valores corresponden a los promedios de los cuatro valores de los niveles piezométricos medidos trimestralmente, indicando las direcciones de flujo y utilizando rojo, naranja y amarillo para indicar las áreas donde el nivel piezométrico está por debajo del nivel promedio del mar.

En condiciones naturales, el agua subterránea fluye naturalmente de cumbre a costa y drena a valles y mar, siguiendo la topografía. El gradiente hidráulico es más alto (alrededor de 0.05 m.m^{-1}) en lugares de gran altitud, y mucho más pequeño en los más bajos (alrededor de 0.008 m.m^{-1}) (Lobo de Pina, 2009).

Existen áreas en el norte, en la costa este y sur de la isla donde el flujo natural está invertido, favoreciendo la intrusión salina y poniendo en riesgo la calidad del agua subterránea (Lobo de Pina, 2009). De este análisis a lo largo del tiempo derivan las siguientes conclusiones (Lobo de Pina, 2009):

- Existe, probablemente, una continuidad lateral del nivel piezométrico en toda la isla, ya que los pozos y piezómetros cercanos a la costa tienen niveles piezométricos menos profundos que en las áreas más altas del interior.
- Existe recarga de las aguas subterráneas debido a la precipitación, siendo ésta de dos tipos: recarga inmediata y recarga retardada. En los piezómetros se observa el ascenso de los niveles a los tres o incluso seis meses después de la precipitación.
- Los manantiales también sufren cambios en sus caudales debido a las lluvias (del orden de 200 m³/día)
- Se identifican niveles piezométricos por debajo del nivel del mar en el norte de la isla y la parte de la costa
- Las disminuciones más significativas en los niveles piezométricos se observan en pozos ubicados a altitudes más altas.
- La mayoría de los pozos ubicados cerca de la costa, tienen niveles piezométricos que oscilan unos pocos metros sobre el nivel promedio del mar (en general, entre 0-10 metros). En años más secos, la extracción de agua y la exploración insostenible producen una disminución pronunciada de los niveles, lo que aumenta el riesgo de salinización gradual del acuífero.
- Las variaciones en los niveles piezométricos son más significativas en los pozos profundos (> 3-5 m) que en los poco profundos (<0.5 m), lo que indica que las unidades hidrogeológicas más profundas reciben una recarga natural diferida y en menor cantidad.

3.3 Modelo hidrogeológico conceptual

El único modelo hidrogeológico propuesto para la isla de Santiago Pina (2009) se basa en la existencia de un acuífero central bajo las formaciones Assomada y Pico da Antonia (Figura 17). Dicho acuífero tiene un mayor espesor en la parte central y se va estrechando hacia la costa. Recibe infiltración directa o diferida de la precipitación del agua de lluvia o la condensación de niebla y es drenada por numerosos manantiales que descargan hacia los arroyos que surcan la isla hacia el mar. También puede descargar directamente al mar a lo largo de la costa en las áreas con gradiente hidráulico positivo (Lobo de Pina, 2009).

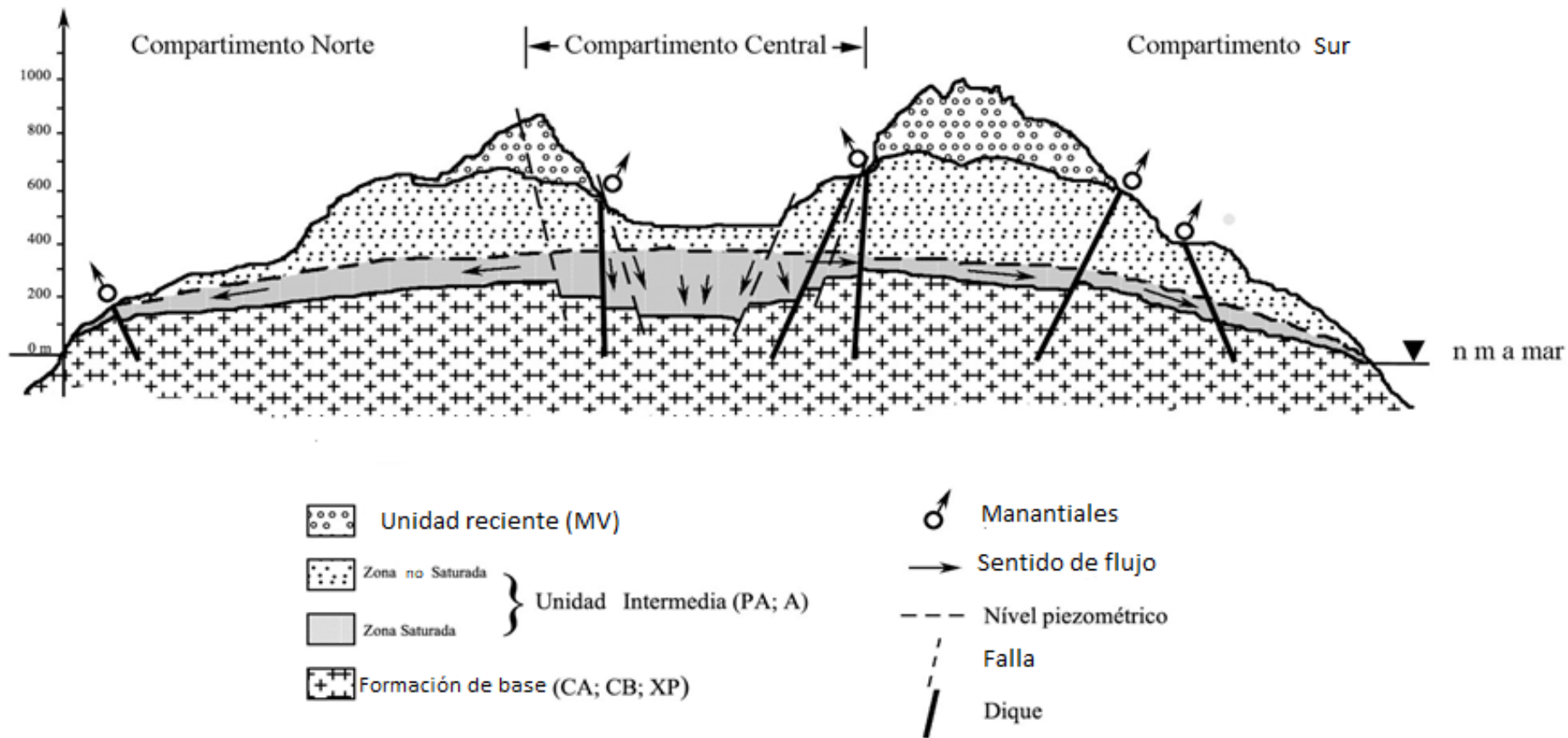


Figura 17. Modelo hidrogeológico de la isla de Santiago (modificado de Lobo de Pina, 2009).

Las formaciones de la Unidad Basal normalmente forman el sustrato impermeable del sistema acuífero. Sin embargo, en las áreas de la isla donde estas formaciones básicas son atravesadas por numerosos diques, pueden actuar como zonas preferenciales de descarga subterránea, formando manantiales. Las formaciones recientes actúan como áreas de infiltración preferenciales para el acuífero central.

La precipitación se infiltra fundamentalmente en zonas altas, circula verticalmente por gravedad a través de la zona no saturada y puede almacenarse temporalmente en acuíferos colgados de donde puede drenar el agua a niveles inferiores o a los manantiales. La zona no saturada se puede dividir en dos subzonas; una central y una lateral. Según este modelo (Lobo de Pina, 2009), en la subzona central, el agua circula verticalmente debido, a la existencia de fallas. En la subzona lateral el agua circula en forma de escalera. El comportamiento hidráulico a lo largo de estos compartimentos laterales a menudo se ve interrumpido por diques que constituyen estructuras verticales y sub-verticales y a menudo sirven como barreras.

En la zona saturada, la circulación del agua es horizontal o sub-horizontal sobre las capas impermeables y/o en interfaz con el agua de mar. A su vez, puede dividirse en varias zonas, según sus características hidráulicas. Una zona central, zonas de recarga y zonas de transición hacia la costa. Esta última zona se diferencia de las demás en que la circulación del agua es casi horizontal debido a la abundante red de diques casi verticales que la interceptan.

El gradiente hidráulico de las zonas costeras depende de la topografía de la zona y está condicionado por la explotación de las aguas subterráneas cercanas, lo que provoca una cada vez mayor intrusión marina en el acuífero (Lobo de Pina, 2009).

Al ser estas zonas las que mayor cantidad de precipitación reciben y siendo a su vez zonas permeables, son también las principales áreas de recarga de la isla, como por ejemplo la formación de Monte das Vacas, la cual tiene un extensión de 30 km², ocupando un 3.7% del área total de recarga de la isla (Lobo de Pina, 2009). No obstante, estas no son las únicas zonas de recarga de la isla, sino que también cobran gran importancia las áreas situadas bajo los valles de los ríos.

Hay que tener en cuenta que los acuíferos costeros deben encontrarse en equilibrio con el agua de mar, tanto desde un punto de vista espacial como temporal, por tanto es necesario tener un amplio conocimiento de este equilibrio para realizar su explotación (Lobo de Pina,

2009) ya que puede existir salinización por intrusión marina (Santamarta Cerezal, 2017). Aparte de esta fuente de contaminación, también se derivan otras procedentes de la naturaleza del suelo y de sus usos. Así pues, la naturaleza volcánica del suelo y el clima árido aumentan la salinidad de las aguas subterráneas así como el contenido de algunos elementos perjudiciales como el flúor. Y de los usos del suelo se deriva la contaminación por nitratos procedentes de lixiviados de la agricultura.

3.4 Hidroquímica y calidad del agua

El agua de lluvia que posteriormente se infiltrará en el suelo y pasará a formar parte del agua subterránea está compuesta, como es sabido, por átomos de hidrógeno y oxígeno, pero también contiene sales disueltas disociadas en cationes como sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) y aniones como cloruro (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}). También contiene gases disueltos como: Helio (He), Neón (Ne), Argón (Ar), Criptón (Kr) y Xenón (Xe). La hidroquímica utiliza también los isótopos estables y los radiactivos aportados por los rayos cósmicos que interactúan con la atmósfera superior, como son el tritio (^3H o T) es el isótopo de hidrógeno más pesado, el carbono 14 (^{14}C), el isótopo más pesado del carbono y el cloro 36 (^{36}Cl). Todos estos isótopos también han sido producidos por pruebas de bombas nucleares, proporcionando aportes adicionales a los sistemas naturales (Mazor, 2004).

Cuando la lluvia cae sobre el suelo y entra en contacto con las rocas, sufre cambios en su composición dependiendo de la textura, estructura y composición mineral del terreno donde precipite y se infiltre. Tanto la estructura como la textura influyen en la forma en que circula el agua en una roca, determinando el alcance de la relación agua-roca. En terrenos volcánicos, la composición mineralógica de la roca determina en gran medida la composición catiónica del agua subterránea. Los iones como Na, Ca, Mg y K se retienen débilmente en la estructura de silicato del mineral, dejando la estructura cristalina que se supone que ofrece una cierta resistencia a los procesos de disolución y pasando, con cierta facilidad, al agua (Custodio y Llamas, 2001). Estos procesos de disolución son, en general, una función del pH y la temperatura del agua.

Como ya se ha expuesto, la isla de Santiago está compuesta principalmente por rocas basálticas. Los silicatos que las componen tienen, por naturaleza, una cinética lenta siendo extremadamente favorable a los procesos de alteración química como: disolución, hidrólisis y oxidación (Gonçalves, 2012).

Gonçalves et al. (2012) llevaron a cabo el estudio de 22 puntos de agua utilizados por la población en la región de São Domingos. Estos autores mostraron cómo la interacción agua-roca explica la química del agua. Sin embargo, la influencia de la agricultura y la contaminación difusa por las aguas residuales también controlan las propiedades hidroquímicas, especialmente con respecto a las posibles contribuciones de cloruros. Uno de estos estudios, realizado en 2014, mostró una variación considerable en la conductividad eléctrica (369-1361 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo que refleja la variación en la salinidad. En estos terrenos volcánicos, la salinización de los acuíferos puede ser el resultado de los procesos de interacción de la roca de agua y de la evaporación concentrada relacionada con la deposición del aerosol marino, típico del clima árido (Valente et al., 2019).

Los datos sobre la hidrogeoquímica de la isla se basan en los trabajos del Proyecto Hydroarid, Pina (2009) y Gonçalves et al., (2012).

En la tabla 2 se muestra la distribución de puntos estudiados por Gonçalves et al. (2018), especificando el tipo de análisis, el tipo de punto de agua y la situación geológica. La figura 18 recoge la situación espacial de dichos puntos:

Tabla 2. Características de los puntos estudiados en el Proyecto Hydroarid (Gonçalves, 2012).

<i>Unidad hidrogeológica</i>	<i>Manantial</i>		<i>Pozo</i>		<i>Pozo de bombeo</i>	
	Químico	Isotópo	Químico	Isotópo	Químico	Isotópo
<i>Basal</i>	10	1			18	3
<i>Intermedia</i>	30	15			49	32
<i>Reciente</i>			25		1	9
<i>Total</i>	40	16	25		68	44

De entre los parámetros analizados, se han seleccionado los siguientes, considerados más significativos desde el punto de vista hidrogeológico:

3.4.1 Temperatura:

La temperatura es un factor fundamental a estudiar en cualquier proceso químico, ya que es absolutamente determinante. En el caso de las islas volcánicas, es un factor fundamental porque interviene en la solubilidad de los minerales y gases y en el equilibrio de las reacciones químicas. Tras el análisis de las muestras, el trabajo de Pina (2009) asegura que no existe prácticamente variación de temperatura con la profundidad, siendo ésta muy

similar a la del aire en los niveles más superficiales. Sin embargo, distingue las temperaturas de las tres unidades hidrogeológicas según se recoge en la Tabla 3.

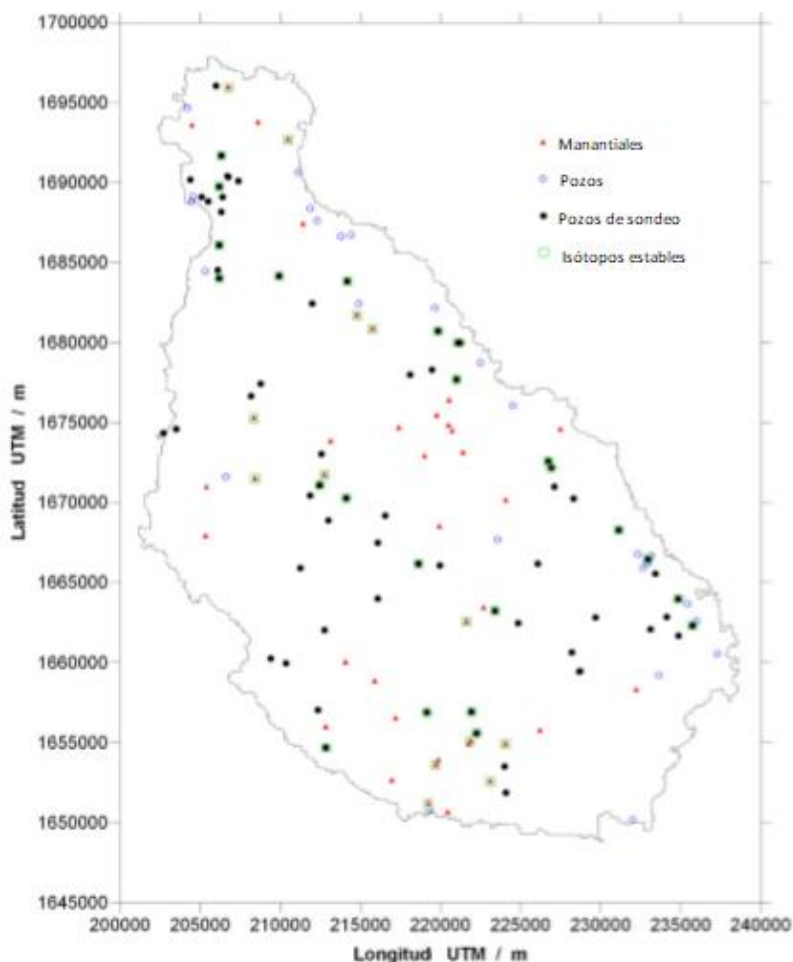


Figura 18. Localización espacial de los 133 puntos estudiados en el Proyecto Hydroarid (modificado de Gonçalves (2012)).

Tabla 3. Valores de temperatura en las diferentes unidades hidrogeológicas (Pina 2009).

<i>Unidad hidrogeológica</i>	<i>Temperatura mínima</i>	<i>Temperatura máxima</i>
<i>Basal</i>	21.4°C	29.8°C
<i>Intermedia</i>	20.3°C	34.9°C
<i>Reciente</i>	23.6°C	28.5°C

La figura 19 muestra la distribución espacial de la temperatura del agua subterránea (Lobo de Pina, 2009).

3.4.1 pH:

Medir el parámetro de pH es fundamental ya que interviene en diversos procesos que ocurren en el agua como el equilibrio, las reacciones ácido-base, la hidrólisis, la

polimerización, la adsorción, el equilibrio redox y en la definición de estados de saturación en relación con varios minerales (Langmuir, 1997).

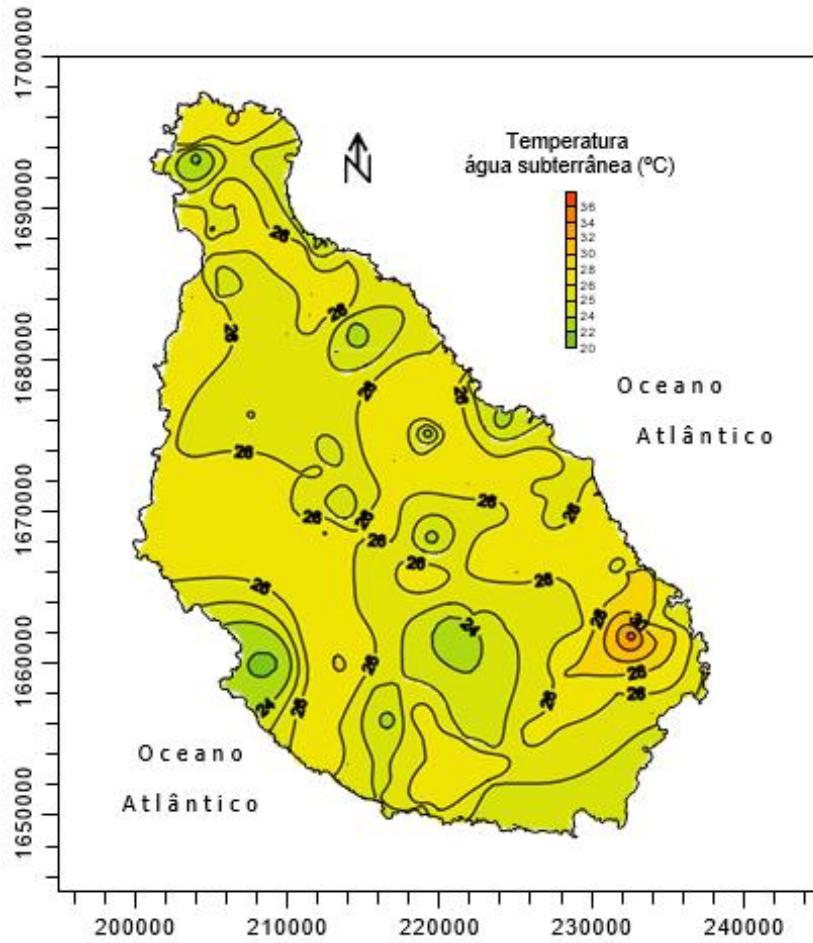


Figura 19. Distribución espacial de la temperatura del agua subterránea en la isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

Tras el análisis de las muestras de Pina (2009), se obtienen estos valores diferenciando, al igual que el parámetro de la temperatura, según las unidades hidrogeológicas:

<i>Unidad hidrogeológica</i>	<i>pH mínimo</i>	<i>pH máximo</i>
<i>Basal</i>	6.0	7.6
<i>Intermedia</i>	5.7	8.2
<i>Reciente</i>	6.5	7.5

Tabla 4. Valores del pH en las diferentes unidades hidrogeológicas (Lobo de Pina 2009).

Si se observa la distribución espacial del pH en la Figura 20:

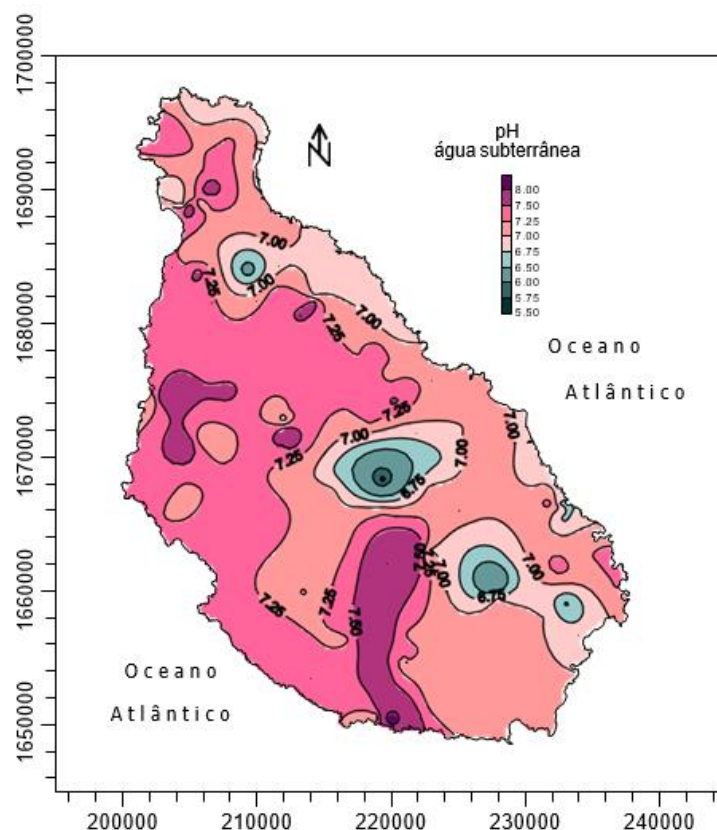


Figura 20. Distribución espacial del pH del agua subterránea en la isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

Se puede ver que las aguas subterráneas de la región oriental son ligeramente ácidas a neutras (6.75 a 7.25) y las regiones occidentales más alcalinas (> 7.25). Esta situación puede deberse a la existencia de los vientos alisios en la parte este de la isla, lo que genera más humedad y donde se produce el mayor número de extracciones de agua, siendo, por tanto, más corto el tiempo de residencia del agua y por consecuencia, el tiempo de interacción roca-agua menor que en la zona más al oeste de la isla (Gonçalves, 2012).

3.4.2 Conductividad eléctrica:

La conductividad eléctrica (CE) es, junto a los parámetros anteriormente mencionados, otro de los parámetros fundamentales que determinan la calidad del agua, indicando el grado de mineralización y/o el grado de contaminación. Este parámetro depende directamente de la temperatura y del contenido iónico. La tabla 5 muestra los valores de CE dependiendo de la unidad hidrogeológica.

Tabla 5. Valores de la conductividad en las diferentes unidades hidrogeológicas (Lobo de Pina, 2009).

Unidad hidrogeológica	Conductividad mínima	Conductividad máxima
Basal	440 $\mu\text{S/cm}$	2750 $\mu\text{S/cm}$
Intermedia	362 $\mu\text{S/cm}$	5350 $\mu\text{S/cm}$
Reciente	503 $\mu\text{S/cm}$	8550 $\mu\text{S/cm}$

Las cuencas hidrográficas muestreadas en la Unidad Reciente son principalmente pozos en sedimentos detríticos y los valores de conductividad crecen de manera significativa hacia la costa, mientras que en la Unidad Basal los valores medidos son más estables. Estas diferencias son debidas al entorno geológico donde se está capturando el agua y contradice de alguna manera la idea de que estas formaciones hidrogeológicas más antiguas, ubicadas a mayores profundidades y en áreas más altas de la isla, presentarían una conductividad eléctrica normalmente alta (Lobo de Pina, 2009).

Al igual que los parámetros anteriores se pueden visualizar los datos obtenidos de manera espacial a lo largo de la isla. De esta forma, se observa (Figura 21) que los valores más altos se dan en las áreas más cercanas a la costa y disminuye según se avanza hacia el interior, llegando a los valores más bajos en las zonas de mayor altitud y más alejados de la costa.

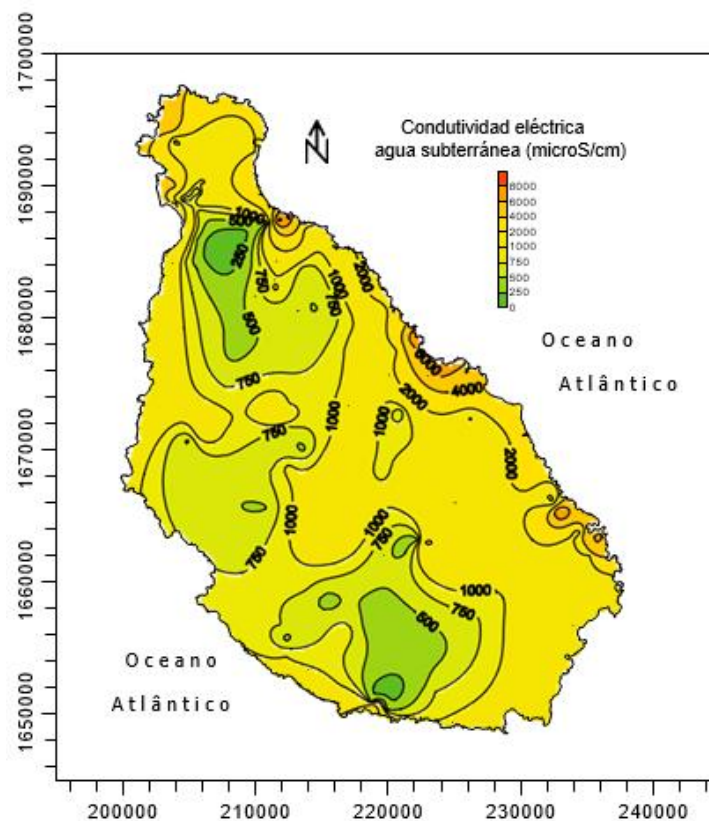


Figura 21. Distribución espacial de la conductividad eléctrica del agua subterránea en la isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

Se miden valores más altos en la parte oriental de la isla, zona más llana y con más número de habitantes por metro cuadrado y por tanto mayor demanda de agua subterránea. Por otro lado, se observan también algunas zonas del norte y sur con valores más bajos, los cuales corresponden a manantiales y sondeos en la Unidad Media. Así mismo, hay que tener en cuenta que casi todas las muestras en la Unidad Reciente son pozos, generalmente excavados

en materiales geológicos de alta permeabilidad (aluviones) y ubicados en las partes terminales de los arroyos al lado del río. Estos pozos suelen explotar volúmenes mayores de los recomendados, lo que implica un nivel de agua subterránea menor que la del mar, por tanto, un mayor riesgo de intrusión salina. Por último cabe destacar que no se han encontrado diferencias entre los valores calculados entre la época húmeda y la seca (Lobo de Pina, 2009).

En cuanto a los aniones más significativos, cabe destacar los siguientes:

- Bicarbonato (HCO_3):

El bicarbonato es el ión más abundante en la isla de Santiago debido principalmente al agua de lluvia y a la disolución de minerales carbonatados (Lobo de Pina, 2009).

La tabla 6 muestra su distribución según las unidades hidrogeológicas. Los valores más altos se encuentran en la unidad basal, disminuyendo hasta llegar a la unidad Reciente. Se puede relacionar de manera inversamente proporcional la cantidad de bicarbonato con el pH medido en las aguas subterráneas (Lobo de Pina, 2009).

Tabla 6. Valores de la concentración de HCO_3 en las diferentes unidades hidrogeológicas (Lobo de Pina, 2009).

<i>Unidad hidrogeológica</i>	<i>Concentración de HCO_3 mínima</i>	<i>Concentración de HCO_3 máxima</i>
<i>Basal</i>	146 mg/L	708 mg/L
<i>Intermedia</i>	78 mg/L	566 mg/L
<i>Reciente</i>	78 mg/L	372 mg/L

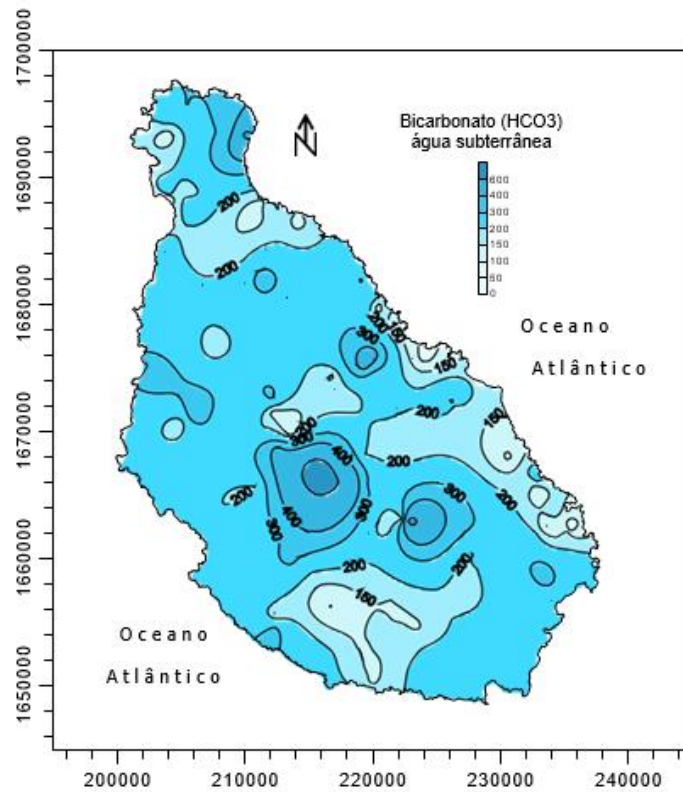


Figura 22. Distribución espacial del bicarbonato en el agua subterránea en la isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

- Cloruro (Cl):

La concentración de ión cloruro en la isla es debida, principalmente, al aerosol marino, que transporta y deposita sales de cloruro sódico, las cuales se infilltrarán más tarde disueltas en el agua de lluvia y/o niebla. Por otro lado, también influye la intrusión marina a lo largo de toda la costa (Lobo de Pina, 2009).

Realizando las comparativa según unidades hidrogeológicas (tabla 7) se aprecia que exceptuando los valores máximos de las unidades Intermedia y Basal los cuales no llegan a ser significativos debido a la sobreexplotación de las unidades hidrogeológicas cercanas a la costa (Lobo de Pina, 2009). La figura 26 muestra la distribución espacial de estos contenidos.

Tabla 7. Valores de la concentración de Cl en las diferentes unidades hidrogeológicas (Lobo de Pina 2009)

Unidad hidrogeológica	Concentración de Cl mínima	Concentración de Cl máxima
Basal	49 mg/L	535 mg/L
Intermedia	26.2 mg/L	5708 mg/L
Reciente	42.5 mg/L	14003 mg/L

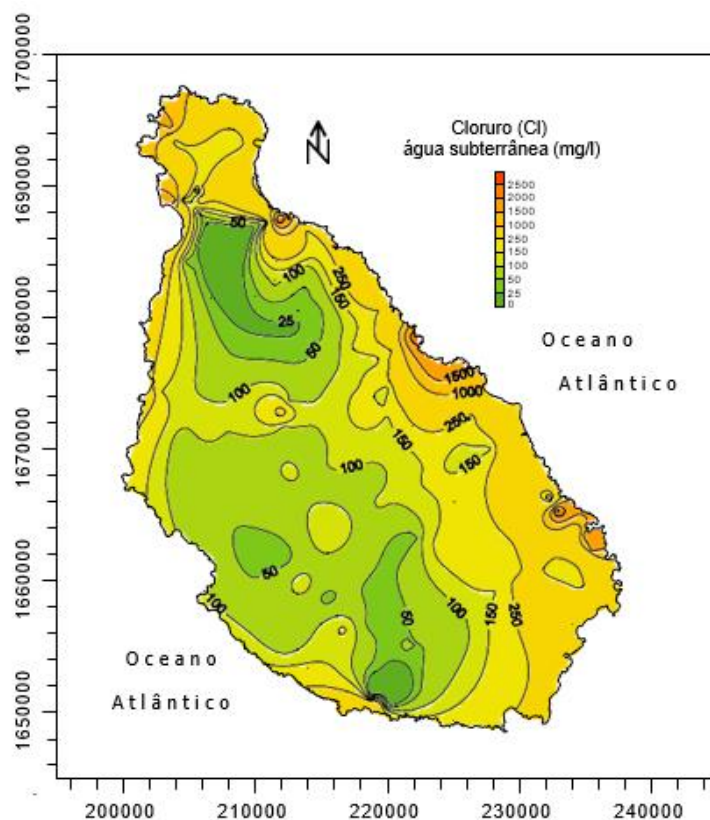


Figura 23. Distribución espacial del cloruro del agua subterránea en la isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009)

La mayor concentración de cloruro en el agua subterránea se encuentra en la costa este y noroeste (Gonçalves, 2012). Se han comparado las concentraciones de Cl con el Na, llegando a la conclusión de que relación solo es cercana a la del agua de mar para las muestras más diluidas. En las muestras más mineralizadas, el Na se queda retenido en los minerales arcillosos, lo que indica efectivamente que existe un proceso de salinización por intrusión salina (Lobo de Pina, 2009).

- Sulfato (SO₄):

Su distribución es bastante uniforme, exceptuando la costa este y la formación de Órgãos, perteneciente a la Unidad Basal (Figura 27). Se pueden observar sus concentraciones mínimas y máximas en la tabla 8:

Tabla 8. Valores de la concentración de SO₄ en las diferentes unidades hidrogeológicas (Pina 2009).

Unidad hidrogeológica	Concentración de SO ₄ mínima	Concentración de SO ₄ máxima
Basal	4.6 mg/L	296 mg/L
Intermedia	< 0.03 mg/L	364. mg/L
Reciente	18.2 mg/L	546 mg/L

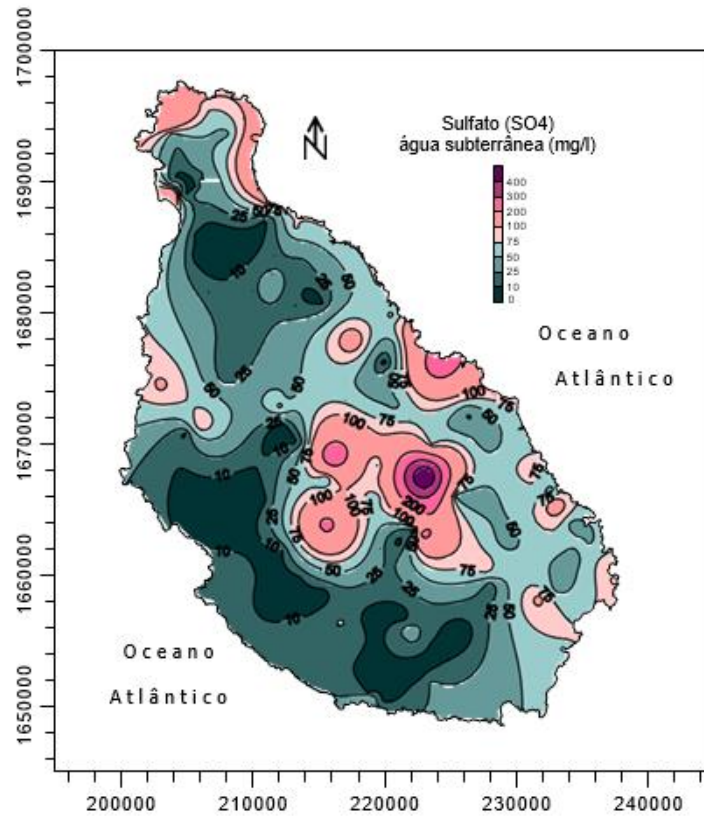


Figura 24. Distribución espacial del sulfato del agua subterránea en la isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

Los valores más altos se encuentran en el interior de la isla y están directamente relacionados con las rocas bicarbonatadas marinas, coincidiendo con las zonas donde se han encontrado concentraciones más altas de bicarbonato (Gonçalves, 2012). También se encuentran valores altos en las zonas costeras debido a la intrusión del agua del mar.

- Nitrato (NO_3):

El nitrato disuelto en las aguas subterráneas de la isla de Santiago procede de los fertilizantes, el estiércol y las fosas sépticas, fruto de la inexistencia de un saneamiento adecuado. En las dos campañas de mediciones realizadas por Lobo de Pina (2009) se encontró un 15% que excedían el valor máximo permitido para el consumo humano (VMA = 50 mg/L). Los valores promedio (entre 6 y 8.5 mg/L), son bajos pero es importante tenerlo en cuenta de cara al futuro ya que según se siga desarrollando la agricultura, estas concentraciones van a aumentar. La tabla 9 permite identificar que la unidad Reciente es la que mayor valores registra, concretamente en las cercanías de áreas agrícolas en la parte central y suroeste de la isla, (Figura 27) (Lobo de Pina, 2009).

Tabla 9. Valores de la concentración de NO₃ en las diferentes unidades hidrogeológicas (Lobo de Pina, 2009).

<i>Unidad hidrogeológica</i>	<i>Concentración de NO₃ mínima</i>	<i>Concentración de NO₃ máxima</i>
<i>Basal</i>	<0.1 mg/L	23.0 mg/L
<i>Intermedia</i>	<0.1 mg/L	20.6 mg/L
<i>Reciente</i>	<0.1 mg/L	66.6 mg/L

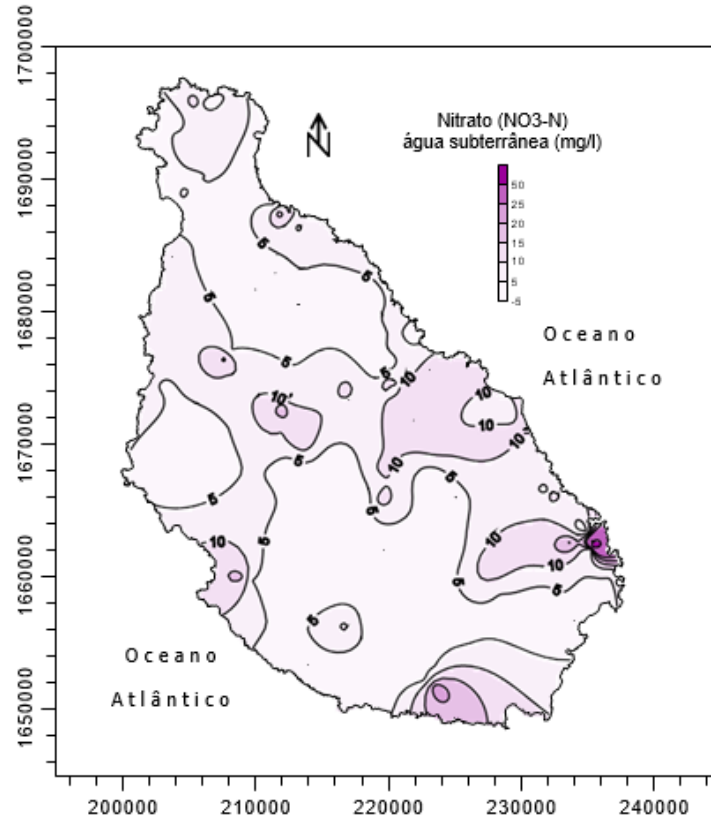


Figura 25. Distribución espacial del nitrato del agua subterránea en la isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

3.4.1 Facies hidroquímicas

En el trabajo de Lobo de Pina (2009) se elaboraron los diagramas de Stiff (figura 22) a partir de los análisis químicos realizados. Estos diagramas permiten diferenciar las diferentes facies hidroquímicas del agua subterránea.

Sin considerar episodios de contaminación, el agua subterránea tiene una composición de HCO₃-Cl-Na en las partes superiores de la isla, donde afloran las formaciones Unidad Basal y la Unidad de Acuíferos Intermedios y donde se produce gran parte de la precipitación. La presencia de iones de bicarbonato puede estar relacionada con la reacción de CO₂ del suelo durante el proceso de infiltración en las zonas de recarga y con las primeras etapas de disolución de minerales carbonatados e hidrólisis de minerales de silicato. En cuanto al pH

se sitúan en valores ácidos (aumentando sus valores en las zonas costeras) y conductividades eléctricas relativamente bajas ($<1000 \mu\text{S} / \text{cm}$), en parte justificadas por el hecho de que las aguas tienen tiempos de residencia relativamente cortos (Lobo de Pina, 2009).

El agua subterránea que circula en la Unidad Basal presenta facies del tipo clorurada sódica-bicarbonatada ($\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$), con valores de conductividad eléctrica que varían entre 440 y 2750 $\mu\text{S} / \text{cm}$, que aún pueden considerarse relativamente bajos. El Na es el catión dominante que alcanza valores medios de $\pm 160 \text{ mg/L}$, mientras que los aniones dominantes de Cl y HCO_3 alcanzan valores medios de 193 y 334 mg/L, respectivamente. El pH varía entre valores ácidos (6.0) y ligeramente alcalino (7.6) (Lobo de Pina, 2009).

La figura 23 muestra el diagrama de Piper elaborado por Lobo de Pina (2009), consignando las formaciones geológicas de origen de las muestras.

El agua subterránea que circula en la Unidad Intermedia, la unidad hidrogeológica con la productividad más alta de la isla, en general está poco mineralizada y tiene una facies hidroquímica del tipo clorurada bicarbonatada sódica ($\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$). En áreas donde se encuentran depósitos piroclásticos, hay un aumento significativo en el contenido de Na localmente. En esta zona, los valores de conductividad eléctrica son bastante moderados, alcanzando valores medios de 739 $\mu\text{S/cm}$, que pueden variar localmente a valores muy altos ($> 5000 \mu\text{S/cm}$), especialmente en áreas costeras donde el acuífero está sobreexplotado y se explota la formación del Pico da Antónia.

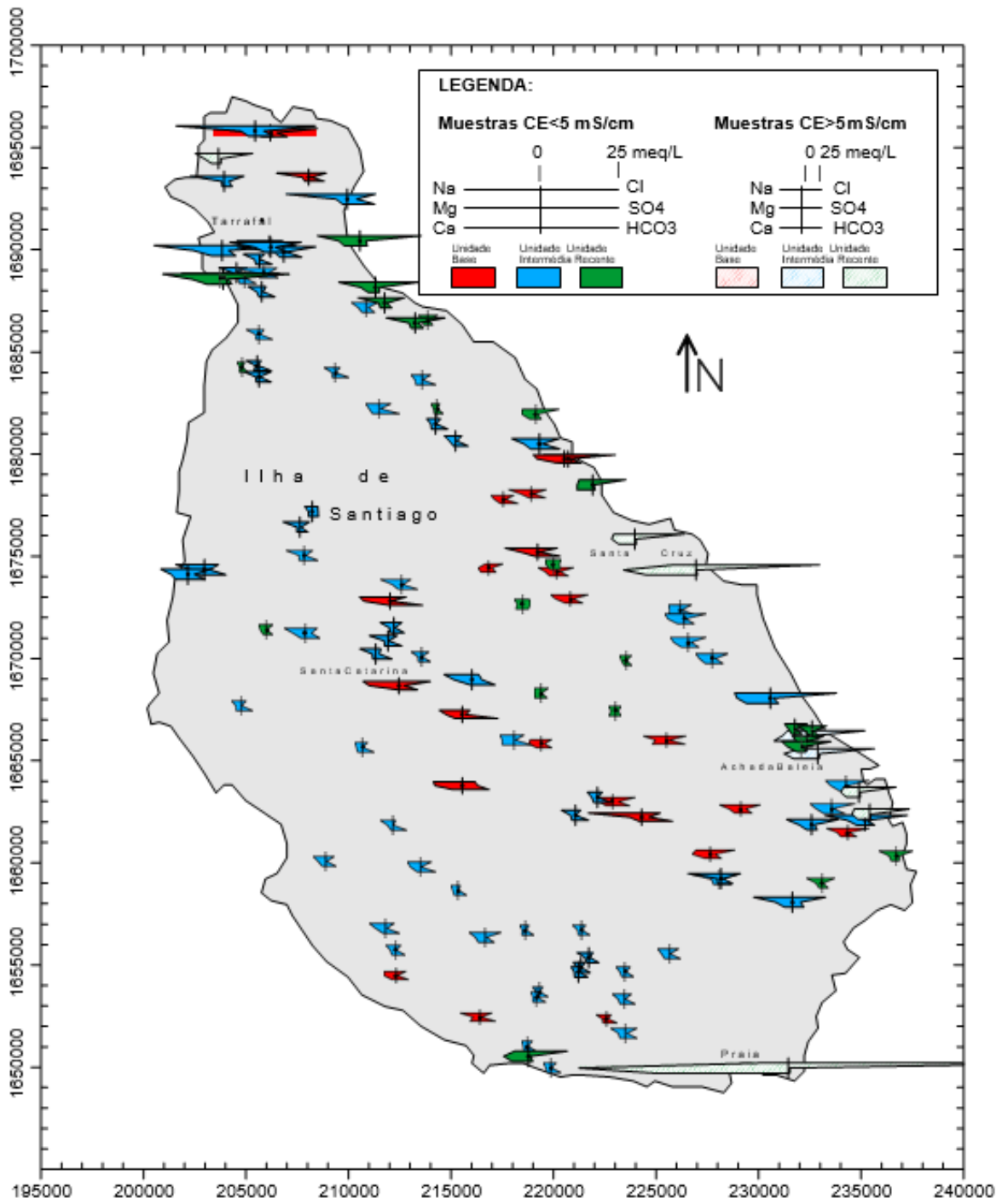


Figura 26. Distribuição de las principales facies hidroquímicas en las diferentes unidades hidrogeológicas. Diagrama de Stiff (Lobo de Pina, 2009).

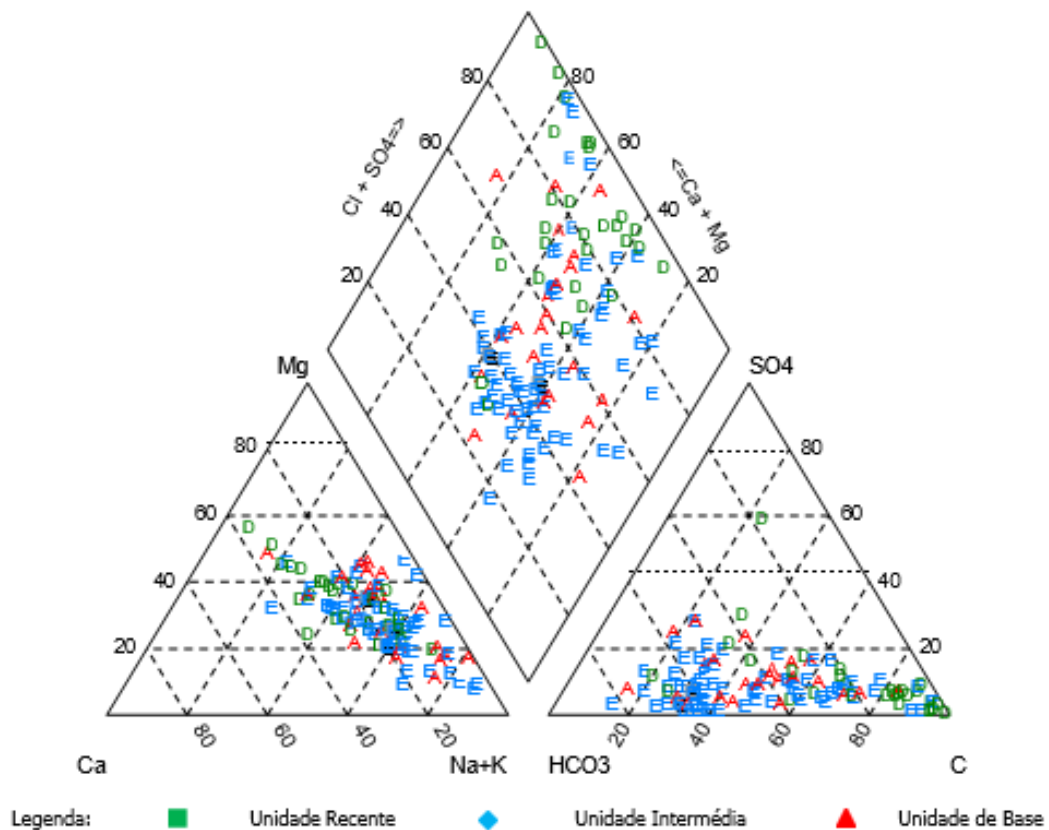


Figura 27. Distribución de las principales facies hidroquímicas en las diferentes unidades hidrogeológicas. Diagrama de Piper (Lobo de Pina, 2009)

En la Unidad Reciente la facies hidroquímica predominante es clorurada sódica (Cl-Na) asociada con valores medios de conductividad eléctrica ya mucho más altos (2500 a 3000 $\mu\text{S} / \text{cm}$), aunque también pueden encontrarse facies cloruradas magnésicas (Cl-Mg). Esta formación es muy permeable pero con capacidad de almacenamiento limitada, ya que facilita la infiltración de agua hacia los niveles subyacentes del acuífero y hacia el mar. Localmente, por lo tanto, constituyen importantes zonas de recarga durante los períodos de abundante precipitación.

Por tanto, se concluye que los factores que intervienen en estas facies hidroquímicas son: la composición química del agua de lluvia; las interacciones agua/gas/suelo durante el proceso de infiltración; interacciones agua/material acuífero durante el proceso de circulación profunda, la altitud, la distancia desde la costa y el tiempo de residencia en el acuífero. El grado de disolución e hidrólisis de los minerales que constituyen las rocas, la precipitación de nuevos minerales, el impacto de la actividad agrícola y la intrusión salina son los principales responsables del grado y tipo de mineralización presente en el agua subterránea, que puede producir cambios significativos en la calidad. Los cationes más abundantes encontrados en el agua subterránea de la isla de Santiago son, por orden de

abundancia: el sodio, magnesio, calcio, silicio y potasio (Lobo de Pina, 2009). Estos cationes surgen, principalmente, a partir de diferentes reacciones químicas entre el agua y los diferentes componentes del suelo, y en menor porcentaje por la actividad humana que provoca intrusión marina y contaminación agrícola.

3.4.2 Hidroquímica isotópica

El estudio de los isótopos ambientales, sirve como complemento a los estudios de hidrogeoquímica e hidrodinámica. Los isótopos estables de la molécula de agua se utilizan debido a que su composición isotópica es modificada por procesos meteóricos, dándole una firma isotópica característica, lo que ayuda a identificar el origen del agua subterránea.

Los isótopos utilizados normalmente en estudios hidrológicos en Cabo Verde son ^{18}O y ^2H . (Pina, 2011).

Se han realizado numerosos estudios sobre la química isotópica para caracterizar al agua subterránea de diferentes zonas de la isla. Barmen et al. (1984) determinaron la cantidad de tritio en ubicaciones norte, central y oriental de la isla; INGRH (1994) realizó un estudio similar, que incluía los primeros análisis químicos e isotópicos del agua de lluvia, el Proyecto Hydroarid (Gomes, 2007; Carreira et al. 2007; Carreira et al., 2008; Lobo de Pina, 2009, Carreira et al, 2013, Gonçalves et al., 2018) realizaron diferentes muestreos en 133 puntos, Condesso de Melo et al. (2008) realizaron un estudio con isótopos estables para identificar posibles áreas de recarga y el mecanismo de salinización de las aguas subterráneas en la costa este.

Lobo de Pina (2009) realizó la representación del $\delta^{18}\text{O}$ y del $\delta^2\text{H}$ en función de la altitud (figura 28) de la cual se deduce que la recarga del agua subterránea en altitudes altas está formada principalmente por agua de lluvia, mientras que la recarga en altitudes más bajas (< 200 m), representa una mezcla de agua de precipitación con agua de escorrentía ligeramente evaporada. La figura 29 presenta la relación entre el $\delta^{18}\text{O}$ y del $\delta^2\text{H}$ (Lobo de Pina, 2009).

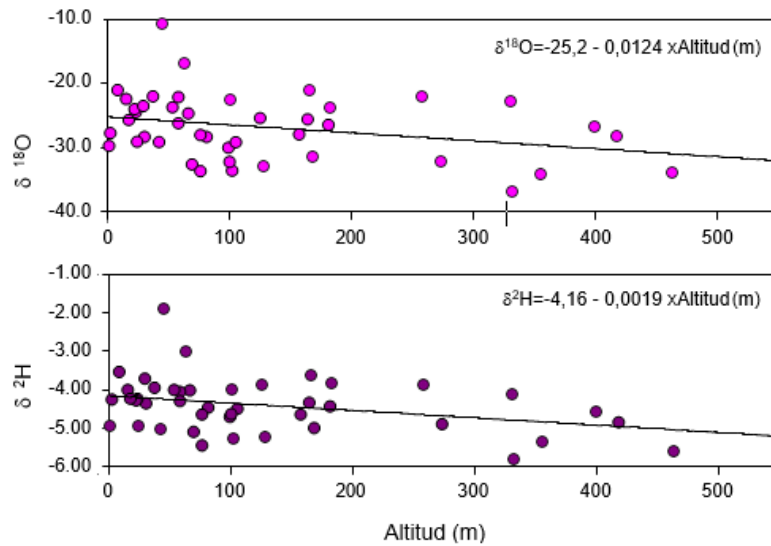


Figura 28. Evolución de la composición isotópica de ^{18}O y ^2H en las diferentes unidades geológicas de las isla de Santiago en comparación con la recta meteórica global y local (Lobo de Pina, 2009).

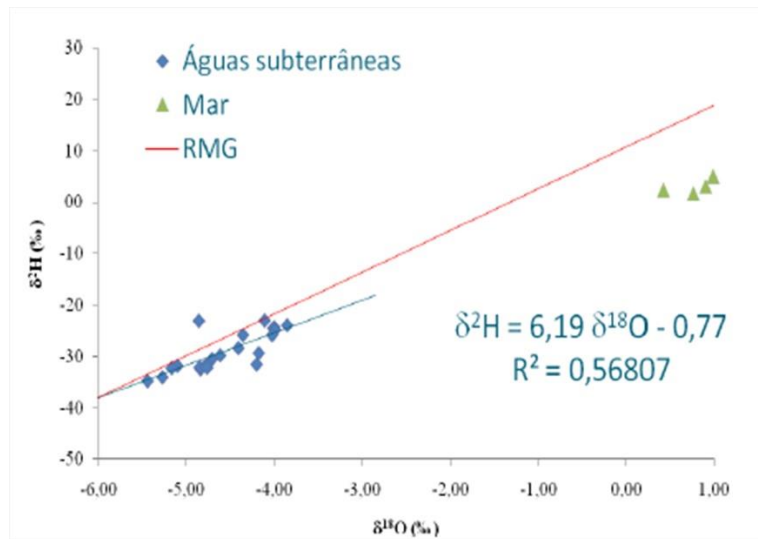


Figura 29. Gráfico de $\delta^{18}\text{O}$ vs. δD en aguas subterráneas y agua de mar en comparación con la recta meteórica global (Pina, 2011).

La distribución espacial de los contenidos isotópicos en el agua subterránea muestra un empobrecimiento en los isótopos pesados en la dirección NE-SW, de acuerdo con un gradiente perpendicular al alargamiento de la isla (Figura 30).

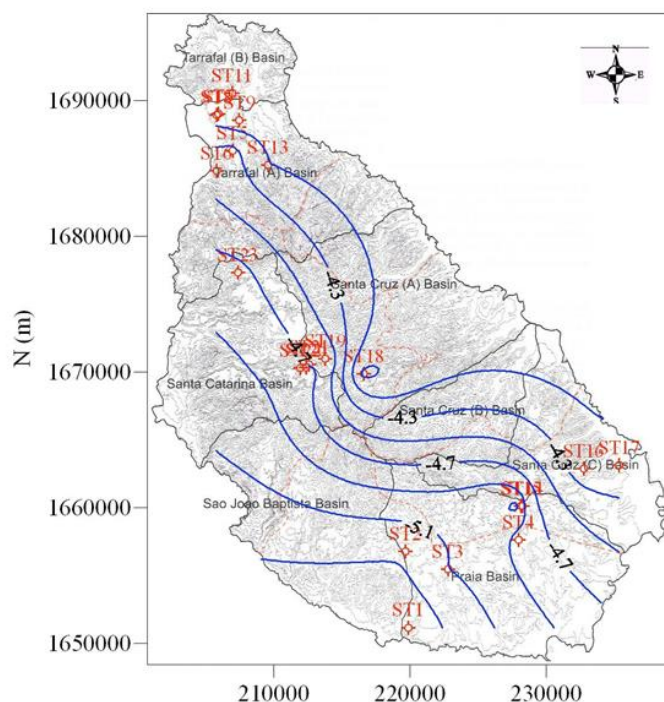


Figura 30. Distribución espacial del contenido de ^{18}O en aguas subterráneas en la isla de Santiago (Pina, 2011)

Este hecho sugiere que la progresión de las masas de aire húmedo que originan la precipitación responsable de la recarga de los acuíferos también es predominante en esa dirección.

4. DISCUSIÓN

La hidrogeología de la Isla de Santiago permite alinear su funcionamiento con el de otras islas oceánicas de origen volcánico, como Canarias (Cabrera y Custodio, 2008; Custodio y Cabrera, 2019). En general, puede aceptarse la existencia de un acuífero único insular, con un núcleo impermeable, que en el caso de Santiago estaría constituido por la Unidad Basal, cubierto por materiales más recientes y permeables. Estos últimos son los receptores de la mayor parte de la recarga, que se produce además en las cumbres de la isla y por los que discurre preferentemente el agua subterránea hacia el mar. Cuando afloran materiales menos permeables o bien porque las heterogeneidades del terreno así lo propician, se encuentran manantiales que en Santiago son aprovechados para abastecimiento.

En la tabla 10 se incluyen los parámetros hidráulicos de transmisividad y las tasas de extracción de las diferentes unidades hidrogeológicas.

Tabla 10. Valores de transmisividad y extracciones de las diferentes unidades hidrogeológicas. La información procede de Conçalves (2012) y Lobo de Pina (2009).

UNIDADES HIDROGEOLÓGICA	FORMACIONES GEOLÓGICAS	TRANSMISIVIDAD (m ² /s)	EXTRACCIÓN (m ³ /h)
UNIDAD BASE	Complejo eruptivo interno antiguo	0.2 - 5 × 10 ⁻⁵	de 5 a 15
	Formación de los Órgãos	0-10	5
	Lavas almohadilladas	0-25	20
UNIDAD INTERMEDIA	Complejo eruptivo del Pico da Antonia	10 ⁻¹ y 2x10 ⁻²	40
	Formación de Asommada	10 ⁻⁴ y 5x10 ⁻⁴	20 y 25 m ³ /h
UNIDAD RECIENTE	Zonas cuaternarias libres de arcillas (valles)	10 ⁻¹ - 2x10 ⁻²	40 m ³ /h
	Aguas arriba de los valles	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	8 m ³ /h

Con toda la información expuesta, se puede analizar la vulnerabilidad de las diferentes formaciones que conforman la isla y los posibles riesgos de contaminación de sus aguas subterráneas. Debido a la alta permeabilidad de las formaciones geológicas, la mayoría de las zonas de agua subterránea tienen una alta vulnerabilidad. Exceptuando las zonas con mayor altitud, donde la zona no saturada tiene mayor espesor (Lobo de Pina, 2009), estando por tanto el agua menos expuesta a la contaminación. La contaminación de las aguas subterráneas puede venir de dos fuentes: fuente humana (la más frecuente) y/o fuente natural (debido a las características geológicas del terreno). En concreto, la acción del hombre aporta contaminación de diferentes tipos: productos contaminantes resultantes de la agricultura: fertilizantes y pesticidas que aportan grandes cantidades de nitratos y fosfatos, residuos humanos (debido a la falta en muchos lugares de una red de saneamiento). Además, al este de la isla se localizan tres áreas donde se identifican procesos de salinización que se atribuyen a intrusión marina provocada por una sobreexplotación del agua subterránea, como

se evidencia en la figura 20. En la ciudad de Praia también se localiza un punto con una salinidad muy alta, posiblemente debido al mismo proceso.

5. CONCLUSIONES

La isla de Santiago se caracteriza por la existencia de tres unidades hidrogeológicas principales: Unidad Basal, Unidad Intermedia y Unidad Reciente, con diferentes características hidrogeológicas. La primera de ellas se caracteriza por una baja permeabilidad en relación con las formaciones geológicas más recientes, la Unidad Intermedia constituye el nivel principal del acuífero, a pesar de tener valores de permeabilidad muy variables debido a su gran heterogeneidad litológica y la Unidad Reciente, la cual es muy permeable y no permite la retención de agua, que se infiltra hacia el acuífero principal.

El mayor o menor grado de meteorización de los minerales que constituyen las rocas, la precipitación de nuevos minerales, el impacto de la actividad agrícola y la intrusión salina son los principales responsables del grado y tipo de mineralización presente en el agua subterránea, que puede producir cambios significativos en la calidad (Lobo de Pina, 2009).

En general, se consideran como áreas potenciales de recarga todas las áreas donde hay formaciones geológicas permeables de la Unidad Reciente y la Unidad Intermedia y Assomada. El área total de recarga es de aproximadamente unos 803 km². Quedan descartadas como áreas de recarga las formaciones geológicas de la Unidad Basal (Complejo Eruptivo Interno Antigo, Formación Flamengos y Formación de Órgaos) debido a su reducida permeabilidad no se consideraron áreas de recarga (Lobo de Pina, 2009).

6. BIBLIOGRAFÍA

- Barmen, G., Josefsson, G., Magnusson, M., Wernersson, H. (1984). A hydrogeological investigation on Santiago, Cape Verde Islands. A project within the bilateral programme of SAREC between Cape Verde and Sweden. Report. Lund Institute of Technology in Cooperation with the National Technical Institute of Cape Verde. Lund. 43 pp
- Carreira, P.M., Marques, J.M., Pina, A., Mota Gomes, A., Almeida, E., Gonçalves, R, Nunes, D., Monteiro Santo, F. (2007). Assessment of groundwater salinization mechanisms in Santiago Island – Cabo Verde: an environmental isotopic approach. In IAEA (ed.): *Advances in isotope hydrology and its role in sustainable water resources management*

- (HIS-2007), *Proceedings of an International Symposium on Advances in Isotope Hydrology*, 435-443.
- Carreira, P.M., Marques, J.M., Pina, A., Mota Gomes, A., Nunes, D., Monteiro Santo, F., (2008). Characterization of groundwater resources degradation at Santiago Island (Cabo Verde) ascribed to isotopic and geochemical signatures. *Water Pollution*, IX, 139-148.
- Carreira, P.M., Marques, J.M., Pina, A., Mota Gomes, A., Nunes, D., F., Monteiro Santo (2010). Groundwater assessment at Santiago Island (Cabo Verde): a multidisciplinary approach to a recurring source of water supply. *Water Resources Management*, 24: 1139-1159
- Carreira, P.M., Marques, Nunes, D., Monteiro Santo J.M., Gonçalves, R.D, Pina, A., Mota Gomes, A. (2013). Isotopic and geochemical tracers in the evaluation of groundwater residence time and salinization problems at Santiago Island, Cape Verde. *Procedia Earth and Planetary Science*, 7:113 – 117
- Condesso de Melo, M.T.; Silva, J.; Lobo de Pina, A.; Mota Gomes, A., Almeida, F.; Moura, R.; Marques da Silva, M.A. (2008). Use of geochemical tools to study groundwater salinization in volcanic islands: a case study in the Porto Santo (Portugal) and Santiago (Cape Verde) islands. *Proceedings of 20th Salt Water Intrusion Meeting*, Florida, June 23- 27.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (2001) - Hidrologia subterrânea. Tomos I e II, Ediciones Omega, S.A, Barcelona.
- García Matías, R y Filippi, F. (2010). Lineamientos, propuestas y herramientas prácticas de cooperación municipales en Cabo Verde, Municipalistas por la Solidaridad y el movimiento institucional (MUSOL) y AECID.
- <https://www.musol.org/images/stories/archivos/estudiocverde.pdf>
- Gonçalves, R.D. (2012). Hydrochemical water prediction (water quality) with Transient Electromagnetic Soundings (TEM). *Tesis Doctoral*. Universidade de Lisboa. Lisboa.
- Gonçalves, R.D., Monteiro Santos, F.A., Farzamian, M., Represas, P., Mota Gomes, A.F. Pina, L., Almeida, E.P. (2018). Water resources detection at Santiago Island, Cape Verde using electromagnetic methods. *EM&Potential methods*, 36, 53-59
- Gonçalves R.D., Valente, T., Pamplona, J. (2019). Water supply and access to safe water in developing arid countries. ICT, Institute of Earth Sciences, Pole of University of Minho,

Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal

Langmuir, D. (1997). Aqueous environmental geochemistry. Prentice Hall, New Jersey.

Lobo de Pina, A.F. (2005). Hydrogeochemical characterization of the main aquifer units of Santiago Island, Cabo Verde. *Proc. XIV Semana de Geoquímica/VIII Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa*, 379–382

Lobo de Pina, A.F. (2009). Hidroquímica e qualidade das águas subterrâneas da ilha de Santiago-Cabo Verde. *Tesis Doctoral*. Universidade de Aveiro. Departamento de Geociências.

Malik, K. (2013). Informe sobre desarrollo humano 2013. *P.N.U.D. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo)*,

https://www.undp.org/content/dam/venezuela/docs/undp_ve_IDH_2013.pdf

Accedido en 26 de mayo de 2020.

Mazor, E. (2004). Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, 3rd Ed., Marcel Dekker, Inc., New York and Basel.

https://www.undp.org/content/dam/venezuela/docs/undp_ve_IDH_2013.pdf

Peña Manjarrez, V., Vilchis Martínez, A.J. (2020). Automatización para el cálculo del índice de aridez, en un ambiente SIG.

Pérez-Torrado, F.J., Cabrera, M.C. (2010). Geología Gran Canaria. Barranco de Tamaraceite y Volcanes de Bandama. Geología 10-Gran Canaria. http://www.sociedadgeologica.es/archivos_pdf/gdia10_canarias_triptico.pdf

Pina, A.P.S.A. (2011). Fundamentos hidrogeoquímicos aplicados na bacia hidrográfica de santa cruz, ilha de Santiago - Cabo Verde como instrument a gestão de recursos hídricos. Universidade Federal do Ceará, *Trabajo Fin de Máster*, Curso de Pós-graduação em Geologia.

Santamarta Cerezal, J.C. Rodríguez-Martín, J., Duarte Melo Silva Victória, S.M, Lopes Monteiro, S.M., Hernández-Gutiérrez, L.E. (2017). Infraestructuras hidráulicas y recursos hídricos de Cabo Verde. *inGEOpress*, 263, 36-39.

Serralheiro, (1974). Santiago Island Geology (Cabo Verde). *Tesis doctoral*. Universidade de Lisboa, Portugal.

Vailleux, Y., Bourguet, L. (1974). La mise en valeur des eaux souterraines dans l'archipel

du Cap Vert. Rapport de fin de mission. Ministério de Coordenação Interterritorial. Brigada de Águas Subterrâneas de Cabo Verde. Praia. 291 pp.

Varela-Lopes, G.E. y Baldicero Molion, L.C. (2014). Precipitation Patterns in Cape Verde Islands: Santiago Island Case Study.

www.adaptares.com ADAPTAREs, Uso eficiente del agua y su reutilización para su adaptación al cambio climático en la Macaronesia. www.adaptares.com/es/adaptares. Accedido en 1 de junio de 2020.

www.islhagua.itccanarias.org. ISLHÁGUA. www.islhagua.itccanarias.org/web/guest/cabo-verde, Accedido en 3 de junio de 2020.

www.desertificacion.gob.ar. Observatorio Nacional de la Degradación de Tierras y Desertificación. www.desertificacion.gob.ar/tema/biofisicos-nacional/. Accedido en 1 de junio de 2020.

www.who.int, O.M.S (Organización Mundial para la Salud), <https://www.who.int/topics/water/es/>, Accedido en 26 de mayo de 2020.