



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Departamento de Física

## TESIS DOCTORAL

# Funcionamiento Hidrogeológico del Área de los Barrancos de Moya y Azuaje, Norte de Gran Canaria



**Maria del Pilar Hernández Quesada**  
**Las Palmas de Gran Canaria, 2015**





UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

PROGRAMA DE DOCTORADO: FÍSICA, MATEMÁTICAS, GEOLOGÍA Y CLIMA

TESIS DOCTORAL

FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO  
DEL ÁREA DE LOS BARRANCOS DE  
MOYA Y AZUAJE,  
NORTE DE GRAN CANARIA

TESIS PRESENTADA POR:

MARÍA DEL PILAR HERNÁNDEZ QUESADA

DIRIGIDA POR:

Dra. MARÍA DEL CARMEN CABRERA SANTANA

Dr. EMILIO CUSTODIO GIMENA

LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, 2015





A MI FAMILIA...

El trabajo del pensamiento se parece a la perforación de un pozo: el agua es turbia al principio, más luego se clarifica

Proverbio chino



# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	XVII
<b>RESUMEN</b> .....	XIX
<b>ABSTRACT</b> .....	XXI
<b>CAPITULO 1. Introducción</b> .....	3
1.1. Objetivos.....	4
1.2. Antecedentes.....	5
1.3. Antecedentes de conocimiento. Estado del arte.....	8
1.4. Metodología.....	19
<b>CAPITULO 2. Área de estudio</b> .....	23
2.1. Gran Canaria.....	23
2.2. Delimitación del área de estudio.....	26
2.3. Características de área de estudio.....	28
2.3.1. Relieve, clima, suelo y vegetación.....	28
2.3.2. Características hidrogeológicas.....	34
2.4. Socio-economía.....	37
<b>CAPITULO 3. Marco geológico</b> .....	43
3.1. Marco geológico del Archipiélago Canario.....	43
3.2. Marco geológico de Gran Canaria.....	44

3.2.1. Etapa de crecimiento submarino.....	44
3.2.2. Etapa juvenil.....	46
3.2.2.1. Edificio en escudo.....	46
3.2.2.2. Caldera de colapso.....	47
3.2.2.3. Estadio Post-caldera.....	48
3.2.3. Etapa de inactividad volcánica.....	49
3.2.4. Etapa de rejuvenecimiento.....	50
3.2.4.1. Roque Nublo.....	50
3.2.4.2. Post-Roque Nublo.....	50
3.3. Geología del área de estudio.....	52
3.3.1. Geología superficial.....	53
3.3.1.1. Formación Fonolítica.....	53
3.3.1.2. Grupo Roque Nublo.....	55
3.3.1.3. Grupo Post Roque Nublo.....	56
3.3.1.4. Volcanismo Holoceno.....	57
3.3.2. Geología del subsuelo.....	58
3.3.2.1. Origen de los datos.....	58
3.3.2.2. Descripción y geometría de los materiales.....	59
<b>CAPITULO 4. Características hidrogeológicas.....</b>	<b>67</b>
4.1. Características hidrogeológicas de los materiales volcánicos...	67
4.2. Caracterización hidrogeológica de las cuencas de los Barrancos de Moya y Azuaje.....	68
4.2.1. Nacientes.....	69

4.2.1.1. Localización espacial de los nacientes.....	71
4.2.1.2. Características de los nacientes.....	71
4.2.2. Captaciones de agua subterráneas. Pozos, galerías y sondeos.....	74
4.2.3. Piezometría.....	77
4.2.4. Parámetros hidráulicos.....	85
4.2.4.1. Introducción.....	85
4.2.4.2. Ensayos de bombeo.....	85
4.2.5. Explotación.....	91

## **CAPITULO 5.Aspectos hidrogeoquímicos e isotópicos**

<b>ambientales.....</b>	<b>95</b>
5.1.Introducción.....	95
5.1.1. Consideraciones generales relativas a terrenos volcánicos.	95
5.1.2. Características generales de Gran Canaria.....	96
5.2.Metodología.....	98
5.2.1. Procedencia de datos.....	98
5.2.2. Muestreos realizados.....	100
5.2.2.1. Agua subterránea.....	100
5.2.2.2. Agua de lluvia.....	101
5.2.3. Determinaciones de campo.....	102
5.2.4. Determinaciones de laboratorio.....	102
5.2.5. Tratamiento de los datos analíticos.....	103
5.3.Caracterización del agua de lluvia.....	105

5.3.1. Caracterización química del agua de lluvia.....	105
5.3.2. Contribución del aerosol marino y polvo atmosférico a la precipitación.....	115
5.4. Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas...	124
5.4.1. Datos de partida.....	124
5.4.2. Distribución de las familias hidroquímicas en el área de estudio.....	125
5.4.2.1. Nacientes.....	125
5.4.2.2. Resto de captaciones.....	126
5.4.3. Distribución espacial de los parámetros físicos-químicos...	133
5.4.4. Análisis multivariante.....	154
5.4.4.1. Matriz de correlación y análisis clúster.....	154
5.5. Isótopos Ambientales.....	161
5.5.1. Isótopos estables de oxígeno e hidrógeno: $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^2\text{H}$ .....	161
5.5.1.1. Isótopos estables de oxígeno e hidrógeno en el agua de lluvia del área de estudio: $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^2\text{H}$ .....	162
5.5.1.2. Isótopos estables de oxígeno e hidrógeno en el agua subterránea: $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^2\text{H}$ .....	165
5.5.2. Isótopos estables del carbono inorgánico disuelto total (TDIC) en el agua subterránea: $\delta^{13}\text{CTDIC}$ .....	169
5.6. Interacción agua-roca.....	171
5.6.1. Presión parcial de $\text{CO}_2$ .....	172
5.6.2. Isótopos de estroncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ).....	173
<b>CAPITULO 6. Evaluación de la recarga.....</b>	<b>177</b>
6.1. Introducción.....	177
6.2. Cálculo de la recarga mediante el balance del ión cloruro.....	178

6.2.1. Metodología.....	178
6.2.2. Estimación de la recarga del área de estudio por balance de cloruros.....	179
6.2.3. Resultados.....	183
6.3. Cálculo de la recarga por balance diario del agua en el suelo..	183
<b>CAPITULO 7. Discusión.....</b>	<b>187</b>
7.1. La estructura geológica como condicionante de la hidrogeología.....	187
7.2. Papel y evolución temporal de los nacientes.....	188
7.3. Explotación y evolución piezométrica.....	191
7.4. Hidrogeoquímica.....	193
7.4.1. Agua de lluvia.....	193
7.4.2. Agua subterránea.....	194
7.5. Isótopos ambientales.....	195
7.6. Balance preliminar de aguas subterráneas y uso de reservas de agua subterránea.....	196
<b>CAPITULO 8. Conclusiones.....</b>	<b>201</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>207</b>

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1. Esquemas de funcionamiento hídrico natural y con explotación intensiva en Canarias.....	12
Figura 1.2. Esquema simplificado del modelo hidrogeológico de las islas Hawaii (Gingerich y Oki, 2000).....	15
Figura 2.1. Encuadre geográfico de la zona de estudio (fuente Google Earth y ortofoto Grafcan 1998).....	23
Figura 2.2. Precipitación media anual en Gran Canaria periodo 1949/50 a 2005/06) (PHGC 2010).....	24
Figura 2.3. Delimitación del área de estudio, municipios que abarca y topónimos de los barrancos principales.....	27
Figura 2.4. Mapa de pendientes, situación de las presas y estaciones pluviométricas presentes en la zona de estudio y zona de ocupación del Parque Rural de Doramas (Sánchez Díaz, 1995).....	29
Figura 2.5. Desviación acumulada de la precipitación anual sobre la media de las estaciones 6 y 98 para los periodos de que se dispone de datos.....	30
Figura 2.6. Representación gráfica de la pluviometría media anual frente a la cota.....	32
Figura 2.7. Situación de las captaciones existentes en la zona de estudio.....	36
Figura 2.8. Mapa formación vegetal y tipos de cultivos de la zona de estudio (Sánchez Díaz, 1995).....	39
Figura 3.1. Mapa geológico simplificado de Gran Canaria (Pérez-Torrado, 2008).....	45
Figura 3.2. Cuadro resumen de la división cronoestratigráfica de Gran Canaria (modificado de Pérez-Torrado, 2008).....	46
Figura 3.3. Distribución de los materiales volcánicos correspondientes a la etapa inicial del edificio en escudo y deslizamientos ocurridos en esa etapa entre 14,5 a 14,0 Ma (modificado de Socorro et al., 2005).....	47
Figura 3.4. Distribución de depósitos traquíticos-riolíticos (ignimbritas)	



emitidos en la primera fase de resurgencia caldérica y delimitación de la Caldera de Tejada (14,0 a 13,3 Ma) (modificado de Socorro et al., 2005).....	48
Figura 3.5. Distribución de materiales traquitico-fonolíticos en los dominios intra y extracaldérico y magmatismo intrusivo (14,0 a 7,3 Ma) (modificado de Socorro et al., 2005).....	49
Figura 3.6. Distribución de los materiales del Grupo Roque Nublo. Se indican los deslizamientos gravitacionales que produjeron el Volcán Roque Nublo (modificado de Socorro et al., 2005).....	51
Figura 3.7. Distribución del vulcanismo Post-Roque Nublo (3,6 Ma a la actualidad) (modificado de Socorro et al., 2005).....	52
Figura 3.8. Mapa geológico de la zona de estudio (modificado de Balcells et al., 1990 y Rodríguez González, 2009).....	54
Figura 3.9. Mapas topográficos de los techos de las formaciones geológicas que se encuentran en el subsuelo en la zona de estudio..	62
Figura 3.10. Geometría de las formaciones presentes en el subsuelo del área de estudio. Los planos representados son los techos de las formaciones presentes en el área de estudio.....	63
Figura 4.1. Situación de los nacientes de los que se tiene referencia en la zona de estudio según diversas fuentes documentales.....	70
Figura 4.2. Esquema constructivo de un pozo típico tradicional de la zona de estudio al que se le adosan otras obras (Informe para la inscripción en el Registro Insular de Aguas del CIAGC, 1992).....	75
Figura 4.3. Galería el Caidero, Valleseco.....	76
Figura 4.4. Sondeo Montaña del Calvario, Firgas.....	77
Figura 4.5. Piezometría del periodo 1970-72. Valores en metros.....	80
Figura 4.6. Piezometría del periodo 1980-81. Valores en metros.....	81
Figura 4.7. Piezometría para el año 1997. Valores en metros.....	82
Figura 4.8. Piezometría para el periodo 2008-09. Valores en metros.....	83
Figura 4.9. Evolución de los niveles piezométricos en el periodo 1970-2010.	84

Figura 4.10. Situación de los pozos donde se tomaron datos de ensayos de bombeo y recuperación.....	86
Figura 4.11. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de bombeo realizado en el pozo 0688 TP (año 1993).....	87
Figura 4.12. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de recuperación realizado en el pozo 0688 TP (año 1993).....	87
Figura 4.13. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de bombeo realizado en el pozo 1158 TP (año 1992).....	88
Figura 4.14. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de bombeo realizado en el pozo 3033 TP (año 1992).....	89
Figura 4.15. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de recuperación realizado en el pozo 3033 TP (año 1992).....	89
Figura 4.16. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de bombeo realizado en el pozo 3228 TP (año 1992).....	90
Figura 5.1. Secciones químicas realizadas en el proyecto SPA-15 (1975)..	97
Figura 5.2. Situación de la estaciones pluviométricas muestreadas.....	101
Figura 5.3. Representación gráfica de la conductividad eléctrica frente a la semisuma de los iones mayoritarios para los análisis con error aceptable del balance de cationes y aniones.....	105
Figura 5.4. Diagrama de escalas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de la estación 036, Mondragones, tabla de resumen estadístico de la conductividad eléctrica, pH e iones principales, datos de ubicación y observaciones.....	109
Figura 5.5. Diagrama de escalas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de la estación 055, Las Madres y tabla de resumen estadístico de la conductividad eléctrica, pH e iones principales, datos de ubicación y observaciones.....	110
Figura 5.6. Diagrama de escalas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de la estación 203 y resumen estadístico de la conductividad eléctrica, pH e iones principales.....	111
Figura 5.7. Diagrama de escalas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de la estación 037, Lomo Majadillas y tabla de	

resumen estadístico de la conductividad eléctrica, pH e iones principales, datos de ubicación y observaciones.....	112
Figura 5.8. Diagrama de escalas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de la estación 098-174, Retamilla-Montañón y tabla de resumen estadístico de la conductividad eléctrica, pH e iones principales, datos de ubicación y observaciones.....	113
Figura 5.9. Representación gráfica temporal de la conductividad eléctrica del agua de lluvia por estación y PM10 acumulado en el periodo de muestreo en la estación situada en el ICG-Polideportivo Antonio Afonso (Aruacas) y representación de la precipitación, de la mediana acumulada en los periodos de muestreo de todas las estaciones y de las estaciones 036 y 174.....	114
Figura 5.10. Correlación de las relaciones iónicas del agua de lluvia con agua de mar y PM 10, estos últimos de Viana (2003).....	123
Figura 5.11. Mapa de diagramas de Stiff modificados, diagrama de Schoeller-Berkaloff y tabla de datos de campo: fecha, CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), $T^a$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) y pH.....	126
Figura 5.12 Mapa hidrogeoquímico con los diagramas de Stiff modificados de los muestreos seleccionados de las captaciones del área de estudio.....	127
Figura 5.13. Mapa hidrogeoquímico con los diagramas de Stiff modificados antes (A) y después (B) de la reprofundización de los pozos.....	129
5.14. Representación gráfica de pH medido en el campo frente pH medido en el laboratorio.....	133
Figura 5.15. Representación espacial, histograma y descriptiva del pH de campo.....	134
Figura 5.16. Representación gráfica de la temperatura atmosférica frente a la temperatura del agua.....	135
Figura 5.17. Representación de la distribución espacial, histograma y descriptiva de la temperatura del agua subterránea.....	136
Figura 5.18. Representación gráfica de la conductividad eléctrica de campo frente a la conductividad eléctrica de laboratorio ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )...	137

Figura 5.19. Representación espacial, histograma y descriptiva de la conductividad eléctrica del agua subterránea.....	138
Figura 5.20. Representación gráfica de la sílice frente a pH de campo.....	139
Figura 5.21. Representación gráfica de la sílice frente a la temperatura..	140
Figura 5.22. Representación gráfica de la sílice frente a TDIC.....	140
Figura 5.23. Representación espacial, histograma y descriptiva de la concentración de sílice en el agua subterránea.....	141
Figura 5.24. Representación espacial, histograma y descriptiva del TDIC de las aguas subterráneas calculado a partir de la ecuación de Tillmans...	143
Figura 5.25. Representación espacial, histograma y descriptiva del ión bicarbonato (mg/L) en las aguas subterráneas.....	145
Figura 5.26. Representación espacial, histograma y descriptiva de los cloruros.....	146
Figura 5.27. Representación espacial, histograma y descriptiva de los sulfatos (mg/L) en aguas subterráneas.....	148
Figura 5.28. Estado de saneamiento de los núcleos de población en el norte de Gran Canaria (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, PHGC, 2010).....	149
Figura 5.29. Representación espacial, histograma y descriptiva de los nitratos (mg/L) en aguas subterráneas.....	150
Figura 5.30. Representación espacial, histograma y descriptiva de la relación iónica $\log [r(\text{Mg}+\text{Ca})/r(\text{Na}+\text{K})]$ en aguas subterráneas.....	151
Figura 5.31. Representación espacial, histograma y descriptiva de la relación iónica $\log (r\text{Na}/r\text{K})$ en aguas subterráneas.....	153
Figura 5.32. Dendograma según el análisis Clúster jerárquico por el método de Ward, empleando como medida de distancia la euclídea. Situación de los grupos resultantes del análisis considerando las variables: pH lab, CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), $\text{SiO}_2$ (mg/L), Ca (meq/L), Mg (meq/L), Na (meq/L), $\text{HCO}_3$ (meq/L), $\text{SO}_4$ (meq/L), Cl (meq/L), y $\text{NO}_3$ (meq/L)...	156
Figura 5.33. Dendograma según el análisis Clúster jerárquico por el método de Ward, empleando como medida de distancia la euclídea.	

Situación de los grupos resultantes del análisis considerando las variables: pHl, SiO <sub>2</sub> (mg/L), Ca (meq/L), Mg (meq/L), Na (meq/L), HCO <sub>3</sub> (meq/L), SO <sub>4</sub> (meq/L), Cl (meq/L), y NO <sub>3</sub> (meq/L).....	158
Figura 5.34. Dendograma según el análisis Clúster jerárquico por el método de Ward, empleando como medida de distancia la euclídea. Situación de los grupos resultantes del análisis considerando las variables: pH lab, sílice (mg/L), bicarbonatos (meq/L) y las relaciones iónicas r(Mg+Ca)/r(Na+K), rNa/rK, rMg/rCa, rNa/rCl y rSO <sub>4</sub> /rCl.....	161
Figura 5.35. Representación gráfica de la relación isotópica de δ <sup>2</sup> H y δ <sup>18</sup> O (‰SMOW) en el agua de lluvia de las cinco estaciones situadas en el área de estudio y de diferentes LAM con pendiente 8 y d=10, d=15 y d=20.....	163
Figura 5.36. Relación de la composición isotópica promedio ponderada de δ <sup>2</sup> H y δ <sup>18</sup> O (‰ SMOW) del agua de lluvia por estación pluviométrica.....	165
Figura 5.37. Gradiente altitudinal obtenido a partir de la composición isotópica promedio ponderada del δ <sup>18</sup> O del agua de lluvia muestreada (δ <sup>18</sup> O=-0,0017h-2,08; gradiente altitudinal:-0,17‰/100m).....	165
Figura 5.38. Gradiente altitudinal obtenido a partir de la composición isotópica promedio ponderada del δ <sup>2</sup> H del agua de lluvia muestreada (δD=-0.012h-1,67; gradiente altitudinal:-1,2‰/100m).....	166
Figura 5.39. Representación gráfica de la relación isotópica de δ <sup>2</sup> H y δ <sup>18</sup> O (‰SMOW) en el agua subterránea del área de estudio, de LAMM y LAML.....	166
Figura 5.40. Relación para el δ <sup>18</sup> O (‰SMOW) entre las muestras de agua subterránea y la recta altitudinal local.....	168
Figura 5.41. Relación para el δ <sup>2</sup> H (‰SMOW) entre las muestras de agua subterránea y la recta altitudinal local.....	168
Figura 5.42. Representación gráfica de la concentración de cloruros del agua subterránea, agua de mar y medias de las estaciones pluviométricas 147 y 036, frente a la relación isotópica del δ <sup>18</sup> O	

(‰SMOW) respectiva.....	169
Figura 5.43. Presión parcial de CO <sub>2</sub> calculada para los análisis de agua subterránea considerados.....	172
Figura 5.44. Mapa geológico, situación y resultados obtenidos para la relación isotópica <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr en 10 muestras de agua subterránea de la zona de estudio.....	174
Figura 6.1. Mapa de isoyetas, situación de las áreas de recarga y cálculo de la recarga media para cada área.....	182
Figura 7.1. Hidrogramas de: a) Naciente de Las Madres.....	188
Figura 7.2. Evolución del nivel piezométrico en el periodo comprendido entre 1970 (fuente SPA-15, 1975) y 2008 a lo largo de los fondos de los barrancos principales de las cuencas de los Barrancos de Moya y Azuaje.....	189
Figura 7.3. Mapa resumen de tendencias en el tiempo de los niveles piezométricos y caudales medios continuos equivalentes.....	192
Figura 7.4. Simulación de balance hídrico medio preliminar en hm <sup>3</sup> en distintas épocas en la zona de estudio.....	197

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1. Valores de los parámetros hidráulicos determinados para diferentes formaciones (SPA-15, 1975).....	25
Tabla 2.2. Parámetros de las cuencas e intercuenca que forman la zona de estudio. (PHGC, 2010).....	27
Tabla 2.3. Estaciones pluviométricas situadas en la zona de estudio (CIAGC, 2011). Se resalta en color azul las estaciones que han sido muestreadas en la presente tesis.....	31
Tabla 2.4. Valores medios del coeficiente de escorrentía para las cuencas estudiadas (SPA-15, 1975).....	35
Tabla 2.5. Presas y estanques de la zona de estudio (PHGC, 2010).....	35

Tabla 2.6. Datos de población y densidad de población de los municipios que forman parte de la zona de estudio (INE, 2013).....	37
Tabla 2.7. Censo ganadero de los municipios que forman parte de la zona de estudio (Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación del Gobierno de Canarias, 2013).....	38
Tabla 4.1. Tabla resumen de los nacientes de la zona.....	72
Tabla 4.2. Resumen del número de datos disponibles para la elaboración de las piezometrías, clasificados por clase de nivel.....	78
Tabla 4.3. Resumen de las transmisividades obtenidas en los ensayos de bombeo y las obtenidas en el SPA-15 (1971).....	90
Tabla 4.4. Tabla resumen de explotación anual para distintos periodos...	91
Tabla 5.1. Composiciones porcentuales y relaciones iónicas características de las rocas de Gran Canaria (modificado de Custodio,1978).....	98
Tabla 5.2. Resumen de los datos de química de laboratorio incluidos en la base de datos.....	99
Tabla 5.3. Resumen de los datos de análisis isotópicos incluidos en la base de datos.....	99
Tabla 5.4. Técnicas de laboratorio empleadas por el laboratorio de la Granja del cabildo de GC.....	102
Tabla 5.5. Error admisible en el balance de cationes y aniones dependiendo de la conductividad eléctrica (CE) de la muestra (Custodio y Llamas, 1976).....	103
Tabla 5.6. Localización de las estaciones pluviométricas y periodo de muestreo de las muestras de agua de lluvia completas disponibles. Precipitación acumulada y días con lluvia por periodo muestreado	106
Tabla 5.7. Tabla con datos de cota, distancia al mar, mediana y desviación estándar de la conductividad eléctrica y tipo de agua de lluvia muestreada por estación pluviométrica del área de estudio...	115
Tabla 5.8. Concentración de los iones mayoritarios en agua de lluvia, aportes del aerosol marino determinado por balance conservativo de cloruros y porcentaje de la aportación marina a la	

concentración de los iones mayoritarios. Composición química promedio del mar según Goldberg (1963).....	118
Tabla 5.9. Captaciones que se han descartado para el estudio químico de las aguas por su alto contenido en nitratos.....	125
Tabla 5.10. Resumen de distribución espacial preferente de las familias hidroquímicas del área de estudio.....	128
Tabla 5.11. Captaciones que han sido reprofundizadas. Representación de los diagramas de Stiff modificados, profundidad, pH de campo y pH de laboratorio antes y después de la reprofundización.....	130
Tabla 5.12. Coeficiente de correlación de Pearson de las concentraciones iónicas y la cota de captación (de fondo de pozo). Los valores marcados de amarillo indican correlación significativa.....	155
Tabla 5.13. Mediana y desviación estándar de los grupos formados en el dendograma de la figura 5.32.....	157
Tabla 5.14. Mediana y desviación estándar de los grupos formados en el dendograma de la figura 5.33.....	159
Tabla 5.15. Mediana y desviación estándar de los grupos formados en el dendograma de la figura 5.34.....	160
Tabla 5.16. Datos de promedio ponderado de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ (‰ SMOW) de agua de lluvia acumulada para los periodos de muestreo en la zona de estudio.....	164
Tabla 5.17. Resumen de cantidad, procedencia y años de los análisis isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de agua subterránea disponibles.....	167
Tabla 5.18. Datos de contenido de $\delta^{13}\text{CTDIC}$ , concentración $\text{HCO}_3$ y pH..	171
Tabla 5.19. Resumen del origen y cantidad de datos disponibles de la relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en las rocas de Gran Canaria presentes en la zona de estudio.....	173
Tabla 6.1. Datos obtenidos para la deposición atmosférica de cloruros (A) en la zona de estudio.....	179
Tabla 6.2. Datos estimados para el balance de cloruros en la escorrentía en la zona de estudio.....	180



Tabla 6.3. Valores estimados para el cálculo de la recarga en cada colector de precipitación y recarga calculada (en mm/año y en porcentaje respecto a la precipitación).....	180
Tabla 6.4. Recarga obtenida mediante el balance diario de agua en el suelo en el periodo 1980-2013 en cada una de las áreas (Naranjo et al., 2015).....	184
Tabla 7.1. Estimación por áreas de los volúmenes anuales medios de recarga y de las extracciones, según datos tomados en los inventarios de puntos de agua llevados a cabo en el Proyecto MAC-21 (1980) para la presente tesis (2010).....	196

## **ANEJOS**

A.2.1. Situación de puntos de agua.

A.3.1. Columnas geológicas

A.4.1. Fichas e hidrogramas de los nacientes

A.4.2. Propiedades Constructivas

A.4.3. Datos de explotación

A.4.4. Evolución temporal de niveles piezométricos

A.4.5. Datos piezométricos

A.4.6. Datos de ensayos de bombeo.

A.5.1. Datos químicos de laboratorio

A.5.2. Datos químicos de campo

A.5.3. Datos isotópicos

A.5.4. Datos químicos de laboratorio del agua de lluvia

A.5.5. Diagrama Shöeller-Berkaloff

A.5.6. Tabla selección de análisis por captación



## **AGRADECIMIENTOS**

El camino llega a su fin, éste ha sido especialmente gratificante pero duro durante los últimos años en los que he tenido que compaginarlo con otros trabajos ajenos a la investigación. Han habido buenos y malos momentos pero siempre he aprendido algo de ellos. El resultado obtenido es fruto de la colaboración y esfuerzo de muchas personas e instituciones a las que estoy profundamente agradecida, en especial a:

Mis directores Dra. María del Carmen Cabrera Santana y Dr. Emilio Custodio Gimena por haber confiado en mí y estar siempre ahí dando su tiempo, apoyo, ánimo, experiencia, conocimientos,... A Mari Carmen además por haber apostado por mí para este proyecto e involucrar en él a Emilio, por compartir trabajo y amistad y prestarme su ayuda en todo momento. A Emilio también por contagiarme sus conocimientos e ideas y deslumbrarme siempre con su sencillez y calidad humana.

A Francisco José Pérez Torrado por su apoyo, colaboración y su ayuda incondicional para resolver cualquier duda y sobre todo por transmitirme sus conocimientos y su entusiasmo por la vulcanología.

A la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria especialmente al Departamento de Física por ofrecerme sus instalaciones y el material logístico necesario para el desarrollo de este trabajo.

Al Excmo. Cabildo Insular de Gran Canaria por haberme concedido una “Beca de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Temas de Interés para Canarias”, que me ha permitido poder realizar esta tesis.

A los proyectos de investigación en los que se han enmarcado los trabajos de esta tesis, el proyecto (CGL2009-12910-C03-02) REDESAC (Recarga y Descarga de Acuíferos) y el Programa CONSOLIDER-TRAGUA (CSD2006-00044) del Ministerio de Ciencia e Innovación.

Al Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, a José Luis Guerra Marrero y Luis Fernando Martín Rodríguez, por su apoyo y por facilitar la realización de los análisis de muestras de agua así como la consulta de documentación de archivos y bases de datos.

A la Dirección General de Aguas del Gobierno de Canarias y al Instituto Geológico y Minero de España (IGME) por proporcionarme valiosa información procedente de estudios no publicados que se encontraban en sus archivos.

A la Heredad de Aguas de Arucas y Fargas por poner a mi disposición su archivo y facilitarme los datos de aforo históricos de nacientes, datos muy valiosos para la realización de este trabajo.

Al Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad de Castilla la Mancha y en especial a David Sanz Martínez y Juan José Gómez-Alday por su

hospitalidad, disponibilidad y por ayudarme a dar forma a todos esos datos recopilados para la elaboración del mapa geológico 3D.

A los diferentes laboratorios, Laboratorio de la Granja del Cabildo de Gran Canaria, Laboratorio del Servicio General de Análisis de Isótopos Estables de la Facultad de Ciencias de Salamanca y al Laboratorio de Geocronología y Geoquímica Isotópica (IBERCRON) de la Universidad del País Vasco, que han colaborado en el análisis de muestras, por su profesionalidad y eficiencia.

A todas aquellas personas y entidades que permitieron que fuera posible el trabajo de campo, en especial a la Heredad de Aguas de Arucas y Firgas y a su encargado Pedro Santiago Henríquez (Mino) por su ayuda, sus historias y su café. También al Agua de Firgas, a la Cdad de Aguas de Fontanales, a FSM (Félix Santiago Melián) y todos aquellos que desinteresadamente hicieron posible las visitas a los puntos de muestreo.

Agradecer a todas las personas que me acompañaron en las salidas de campo, compañeras de laboratorio y familia y en especial a mi compañero de campo, José Mata Sánchez (mi suegro), siempre recordaré con cariño todas las anécdotas compartidas y su impaciencia en las esperas. Estas salidas de campo me han servido también para conocer y crear vínculos más fuertes con mis compañeras, así como compartir mi trabajo con mi familia. Lo que hace que recuerde siempre esos momentos con mucho cariño.

A mis compañeros de laboratorio Alejandro, Annetty, Gemma, Tatiana, Isora, Laura y Esmeralda, por el buen ambiente de trabajo, colaboración y sentimiento de equipo. Además de desayunos, congresos..., en resumen por todos esos inolvidables momentos compartidos. En especial a Laura y Esmeralda con quien los lazos tan fuertes las han convertido en parte de mi familia. También mi agradecimiento a Jordi Sánchez-Vila por estar siempre ahí como lazo de unión entre Barcelona-Las Palmas, la distancia nunca existía para su ayuda en todo lo que necesitara y estuviera a su alcance.

Dedicarle este trabajo a mi familia, las personas más importantes en mi vida, que siempre me han apoyado y que sin ellas seguro no lo hubiera conseguido. A mi marido que siempre con amor ha estado a mi lado, ayudándome y entendiéndome. A mis hijos que siempre han estado cerca, deseosos de ayudar y dándome fuerzas para seguir adelante. Agradecerles la comprensión por los momentos que no pude compartir con ellos al estar inmersa en este trabajo.

A todos, muchas gracias

## **RESUMEN**

La isla de Gran Canaria presenta una morfología circular en planta y un perfil transversal cónico, disectado por una red de barrancos radiales. La hidrogeología de la isla está caracterizada por un acuífero único insular, con una superficie piezométrica en forma de domo con flujo radial de centro hacia la costa. A escala de mayor detalle se pueden diferenciar acuíferos pero interrelacionados. Esta tesis se centra en la caracterización del sistema acuífero de las Cuencas de los Barrancos de Moya y Azuaje, situado al norte de Gran Canaria. La zona se ha identificado como la de mayor recarga de la isla en sus zonas de cumbre y medianías. El agua subterránea fluye hacia costa, con parte de la descarga en los profundos barrancos, siguiendo el modelo insular.

Se ha caracterizado un complejo sistema acuífero multicapa, heterogéneo y anisótropo, formado por apilamientos de formaciones volcánicas con edades desde el Mioceno hasta el Holoceno, con diferentes parámetros hidráulicos. La reconstrucción de la geología profunda ha permitido identificar a la Fm. Fonolítica del Mioceno como el sustrato hidrogeológico de la zona.

La pluviometría del área de estudio se caracteriza por su irregularidad, tanto espacial como temporal, con medias en zonas altas de 700 mm/a y de 200 mm/a en zonas bajas. El estudio de la composición química del agua de lluvia en muestreos totales (deposición seca y deposición húmeda) ha permitido identificar la influencia de aportes de sales procedentes del aerosol marino y del polvo atmosférico y la variabilidad de mineralización del agua de lluvia causada por la altitud, distancia al mar y por la frecuencia y cantidad de precipitaciones.

La mineralización del agua subterránea aumenta de cumbre a costa desde aguas  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  de baja mineralización y poco evolucionadas en zonas de cumbre, aguas  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ,  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  y  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ , con mayor mineralización en medianías y aguas  $\text{Cl-Na}$  muy mineralizadas en zonas costeras. Se ha identificado una franja de dirección aproximada Este-Oeste con aporte de gases de origen volcánico, principalmente  $\text{CO}_2$ , que confiere al agua una mayor mineralización. No se observa evolución temporal en la química del agua subterránea, ni fenómenos de intrusión marina aunque hay algún punto con concentraciones altas de nitratos.

La explotación del agua subterránea se produce mediante 373 puntos de agua, de los que 74 están fuera de uso. Son fundamentalmente pozos excavados de 3 m de diámetro. En las últimas décadas se ha producido un descenso progresivo del nivel piezométrico causado por las extracciones, lo que ha dado lugar al descenso de caudal y desaparición de muchos de los nacientes que existían. En esta tesis se ha analizado la evolución de los nacientes desde 1906 y se ha estimado la recarga mediante el método del balance de la deposición atmosférica de cloruro. Resultado una recarga total

media de unos 9,6 hm<sup>3</sup>/año en los 67,2 km<sup>2</sup> del área, o sea un valor medio de 142,8 mm/año.

La principal contribución de esta tesis consiste en la definición validada del modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero con el apoyo hidrogeoquímico e isotópico ambiental, de modo que es la contribución científica de base para estudios posteriores.

## **ABSTRACT**

Gran Canaria Island has an almost round morphology with a conical shape, dissected by deep gullies. The hydrogeology of the island is characterized by an island water table, dome-shaped, with radial flow from the central high altitude areas towards the coast and with some intermediate outflows. On a smaller scale, there different aquifers can be singled out, but interrelated. This thesis focuses on the characterization of the aquifer system of the Moya and Azuaje gullies basins, located at the north of Gran Canaria. The area has been identified as the main recharge zone in the island in its higher and mid elevation parts. Groundwater flows to the coast, with some outflows under natural conditions in the bottom of the gullies, following the insular model pattern.

A complex multilayer, heterogeneous and anisotropic aquifer system has been identified. It is composed by a piling of volcanic formations with ages from the Miocene to the Holocene, with different hydraulic parameters. The resolution of deep geology has allowed the identification of the Miocene phonolitic Fm. as the hydrogeological bottom in the area.

Rainfall in the study area is characterized by its spatial and temporal irregularity, average of 700 mm/y in high areas and 200 mm/y in the low areas. The study of the chemical composition of rainwater samples containing total (bulk) deposition (dry and wet) has identified the influence marine spray and atmospheric dust contributions and the variability of the rainwater mineralization caused by altitude, distance to the sea, and frequency and amount of rainfall.

Groundwater mineralization increases from the high zones to the coast, from  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  low mineralized and poorly evolved water in the high parts to  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ,  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  and  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$  waters in the mid areas and  $\text{Cl-Na}$ , high mineralized waters in coastal areas. A strip of East-West approximate direction with volcanic gases contributions, mainly  $\text{CO}_2$ , has been identified, which favors a higher water mineralization. Neither time evolution of groundwater chemistry nor seawater intrusion has been observed, although there are some wells with high nitrate concentrations.

Groundwater exploitation is made through 373 water points, of which 74 are out of use They are mainly 3 m diameter dug wells. In recent decades there has been a progressive drawdown of the water table caused by the high exploitation, which has produced the decrease and disappearance of many of the springs. This thesis has analyzed the spring's evolution since 1906 and the aquifer chloride mass balance method. The result is a total average recharge of about 9.6 million  $\text{m}^3$ /year in the 67,25  $\text{km}^2$  of the area or about an average 142,8 mm/year.

The main contribution of this thesis consists in the validated definition of the conceptual model of the aquifer system functioning with hydrogeochemical and environmental isotope support. So it is the scientific basis of later studies.



# ***1. Introducción***



## 1. Introducción

En la Historia de Canarias el agua ha sido uno de los elementos decisivos de su evolución. Además de los nacientes y tramos de cursos con agua, muchas veces alejados de sus hábitats, los primeros canarios se las ingeniaron para captar el agua que cubriese sus necesidades a través de piletas en riscos, pocetas en barrancos y acequias. Desde los primeros momentos, el agua procedente de las cumbres quedó ligada a las tierras bajas donde se situaba la producción de la primera riqueza insular de exportación, el azúcar. Su gestión y aprovechamiento generaron entidades privadas conocidas como Heredamientos o Heredades. A finales del siglo XIX y mediados del XX, al introducirse los cultivos de exportación (plátanos y tomates) se recurrió a nuevas obras de captación de agua (pozos, galerías, tomaderos, presas), con una amplia red de canales para la distribución. En el primer tercio del siglo XX ya era notorio el agotamiento de nacientes y las interferencias entre explotadores del agua subterránea, lo que llevó a modificar las condiciones del carácter privado de la explotación del agua subterránea de la entonces vigente Ley de Aguas española de 1876 mediante la instauración de un Régimen Especial en 1924 que limitaba el libre acceso. En el segundo tercio del siglo XX los acuíferos ya mostraban síntomas de agotamiento, se dictaron nuevas leyes, el agua pasó a ser un bien de dominio público, aunque conservando opcionalmente su carácter privado para los aprovechamientos existentes que no pidiesen una concesión pública, y se recurre a la desalinización del agua de mar y salobre y a la reutilización de las aguas servidas (Suárez Moreno, 2009).

La investigación llevada a cabo se enmarca dentro de los trabajos iniciados en el norte de la isla de Gran Canaria para caracterizar la hidrogeología y estudiar los procesos de recarga en la zona en la que se consideraba se producía la mayor parte de la recarga insular. El trabajo surgió atendiendo a las necesidades planteadas por el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria en 2006 para cumplir sus objetivos de acotar y reducir la incertidumbre de los términos del balance hídrico.

La zona se incluyó posteriormente en los trabajos desarrollados dentro del proyecto REDESAC (Recarga y Descarga de Acuíferos, CLG2009-12910-C03), financiado por la CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología), que luego pasó a depender del MINECO (Ministerio de economía y Competitividad). El proyecto REDESAC ha consistido en 3 subproyectos coordinados, cada uno de ellos con un grupo de investigación, los cuales tienen como objetivo común la investigación y desarrollo de las técnicas de estimación de la recarga a los acuíferos y de su descarga en situaciones y áreas concretas. Los tres grupos de investigación se localizan en el Departamento de Ingeniería del Terreno,

Cartográfica y Geofísica de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), en el Departamento de Física de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) y en el Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), que tienen como Investigadores principales respectivos al Dr. Emilio Custodio (coordinador), la Dra. María del Carmen Cabrera y la Dra. Marisol Manzano. Ha estado activo entre 2009 y 2013. Aunque oficialmente cerrado, continúa la explotación y extensión de los trabajos y progresos realizados.

El trabajo de investigación propiamente dicho se ha desarrollado en la ULPGC mediante una beca de investigación del Excmo. Cabildo Insular de Gran Canaria para la caracterización hidrogeológica de la zona, concedida en 2007.

La zona se caracteriza por haber presentado históricamente una intensa utilización de las aguas subterráneas, primeramente mediante captación y conducción de manantiales (nacientes), que desaparecieron en gran parte en el primer tercio del siglo XX, y posteriormente mediante pozos y galerías. La geología en profundidad no era conocida en detalle. En el área existen zonas con aportes de gases de origen volcánico que afectan a la hidroquímica de las aguas subterráneas.

## 1.1 Objetivos

Este trabajo de investigación surge como consecuencia del reducido conocimiento hidrogeológico de detalle que se tiene de la zona Norte de la isla de Gran Canaria, la de mayor riqueza en agua de la isla. Hasta la actualidad, la mayoría de los trabajos desarrollados en la zona han sido generales, referentes al conjunto de la isla (SPA-15, 1975; PHGC, 1991, 1992, 1998, 2010, 2015) o se han centrado en cuestiones hidrogeológicas muy locales (Macau Vilar y Hernández del Toro, 1955). Ello es a pesar de la notoria importancia del área como generadora de recursos de agua subterránea.

Esta tesis se centra en la caracterización del sistema acuífero de las Cuencas de los Barrancos de Moya y Azuaje y su entorno, identificadas como las zonas de mayor recarga de la isla en la planificación hidrológica (CIAGC, 2010). Se pretende formular un modelo conceptual del flujo del agua subterránea en el sistema, utilizando para ello diferentes herramientas hidrogeológicas. Para ello se estudia:

- La disposición en profundidad de las unidades geológicas a partir de la recopilación de perfiles geológicos de pozos descritos en el proyecto MAC-21 (Proyecto de Planificación y Explotación de los Recursos de Agua de las Islas Canarias, realizado entre 1980-1982

y no publicado) y en la Actualización del Conocimiento Hidrogeológico de la isla de Gran Canaria (CIAGC, realizado en 1990 y sin publicar).

- El análisis de las explotaciones de agua así como su evolución temporal, relacionándolo con las formaciones explotadas. Para este objetivo se ha creado una base de datos en la que se recopilan los datos de aforos históricos de los nacientes de las Heredades de Agua, los inventariados en proyectos llevados a cabo en la zona y los tomados en las campañas de campo realizadas para este estudio.
- La caracterización y cuantificación del flujo subterráneo, procediendo a evaluar la recarga, estudiar la relación entre las diferentes unidades hidrogeológicas y caracterizar hidrogeoquímica e isotópicamente las aguas para así poder formular las relaciones de recarga, residencia y transporte del agua subterránea y poder confirmar el modelo conceptual que se ha de elaborar.

## 1.2 Antecedentes

El Primer estudio hidrogeológico general de la isla de Gran Canaria que se ha localizado es del año 1926, titulado **“Gran Canaria y sus aguas subterráneas”** (Ascanio y León, 1926). El autor recorrió la isla y en sus notas de campo describió el comportamiento hidrogeológico de la isla, dividiéndola en cuencas. Detalló el barranco de La Virgen, situado en la zona de estudio, con sus numerosos y abundantes “chorros” y definió “los grandes nacientes de la Madre del Agua que aparecen en el cauce del barranco y donde el agua brota de grietas del risco o de algunas escorias formando una fuente que quizás rinda 80 L/s”.

En 1955, Federico Macau Vilar y Manuel Hernández del Toro, Ingenieros del Servicio Geológico de Obras Públicas, realizaron un **“Estudio Hidrogeológico de la cuenca del Barranco de La Retamilla, Anden y de La Virgen, hasta el Naciente de las Madres”** (Macau Vilar y Hernández del Toro, 1955), por petición de la Heredad de Arucas y Firgas. En él se describe la geología de la cuenca y se estudian las causas de la disminución de caudal de los diversos nacientes de la zona, en especial los Nacientes de las Madres, en el que se trata de demostrar la influencia de otras explotaciones utilizando la fluoresceína como trazador.

Macau Vilar publicó en 1957 el **“Estudio Hidrológico de Gran Canaria”** (Macau Vilar, 1957) en el que detalla y clasifica los nacientes que observó, destacando la influencia de la geología en la hidrología subterránea y superficial.

El gran hito en la hidrología de Canarias lo constituye el **“Estudio Científico de los recursos de Agua en las Islas Canarias, SPA/69/515”** (abreviadamente y en adelante Proyecto SPA-15), desarrollado durante el periodo 1970-1975. Fue realizado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y la Dirección General de Obras Hidráulicas por parte Española y UNESCO por parte Internacional, dentro del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). En él se estudió la hidrología de superficie y subterránea a nivel regional en todas las islas del archipiélago canario, con mayor énfasis en Gran Canaria. Constituye el punto de partida de numerosos trabajos ya que sigue siendo en la actualidad la investigación hidrológica de carácter general más completa hasta ahora realizada en el archipiélago canario.

Además de los estudios convencionales de Geología, Geofísica, Hidrología e Hidrogeoquímica, incluyendo isótopos ambientales, una de las principales aportaciones colaterales de este proyecto, derivado de actuaciones paralelas del MOP, es el exhaustivo inventario de captaciones. Los datos de este inventario han servido de base para muchas investigaciones futuras. Para la presente tesis se ha recopilado la información de las fichas del inventario, siendo 93 las captaciones visitadas en la zona de estudio.

En el SPA-15 se determinaron las características hidráulicas de las formaciones. Para ello fueron seleccionados 35 pozos en toda la isla, en los que se realizaron 100 ensayos de bombeo y recuperación. Los valores obtenidos en estos ensayos se han tomado como base en trabajos posteriores, así como para las modelaciones de flujo del agua subterránea llevadas a cabo en la isla. Colateral al SPA-15 se realizó un primer modelo eléctrico R-C (de resistencias y capacidades), construido en los laboratorios del Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP). También se realizaron, por encargo al Gabinete de Aplicaciones Nucleares a las Obras Públicas (GNOP), del CEDEX (MOP), ensayos de flujo con isótopos radioactivos artificiales en diversos pozos y sondeos de la isla. En esta época, y también en relación con el proyecto, se hizo un especial esfuerzo en sondeos de reconocimiento por el Parque de Maquinaria del SGOP y se perforaron algunos pozos experimentales por parte del Parque de Perforación de Pozos del IRYDA.

Posteriormente se desarrolló el **“Proyecto de Planificación y Explotación de los Recursos de Agua de las Islas Canarias (MAC-21, 1980-81)”**, dependiente de la Comisión Interministerial Coordinadora de las Actuaciones del Estado en Materia de Agua en las Islas Canarias. Los trabajos integrados dentro de este proyecto, realizados por la empresa INTECSA, empezaron de forma efectiva en 1978, y su génesis deriva del proyecto SPA-15. Uno de los objetivos del MAC-21 fue actualizar y completar los inventarios y estudios específicos sobre los recursos del agua que existían hasta aquel momento. Para

ello se llevó a cabo un nuevo inventario de puntos de agua en la isla de Gran Canaria, de los que 204 puntos se encuentran en la zona de estudio. Estos datos han sido incluidos en la base de datos y utilizados para esta tesis.

A partir de los datos piezométricos tomados en este proyecto y las estimaciones de los parámetros hidráulicos aportados por el SPA-15 se elaboró un primer modelo matemático de simulación del flujo subterráneo en Gran Canaria, paralelo al realizado en Tenerife (INTECSA, 1981; Custodio et al., 1981), además de la construcción de un modelo analógico de capacidades y resistencias en los laboratorios del Servicio Geológico de Obras Pública en Madrid.

En Diciembre de 1984 el IGME publicó **“Control Piezométrico y de Calidad de las Aguas Subterráneas en los Acuíferos Costeros de la isla de Gran Canaria, Análisis del periodo 1979-1983”** (IGME, 1984), encaminado a un mejor conocimiento y protección de los acuíferos costeros. Este trabajo se incluye dentro del Programa Gestión y Conservación de los Acuíferos (PGCA). En este proyecto se estableció una red de control, centrada en tres zonas: Arinaga-Tirajana, Gáldar-Guía y Maspalomas, con tomas de muestras bianuales de niveles piezométricos y muestras de agua para su análisis químico. De este proyecto se ha dispuesto de los datos tomados en 5 captaciones del subsistema acuífero Gáldar-Guía que están dentro del área de estudio.

En 1989 se llevó a cabo la tesis doctoral **“Hydrochimie et géochimie isotopique de circulations souterraines en milieu volcanique sous climat sémi-aride (Grande Canarie, Îles Canaries)”** (Gasparini, 1989), en la que se estudió la recarga y circulación del agua subterránea, caracterizando hidroquímica e isotópicamente las aguas de lluvia de la isla de Gran Canaria y las subterráneas del Macizo de Amurga, situado al sur de Gran Canaria. Para la caracterización del agua de lluvia, la isla se dividió en dos sectores, el Norte y el Sur; tres de las cinco estaciones de la red de muestreo del sector Norte se encuentran dentro de la zona de estudio de la presente tesis.

En 1991, el Plan Hidrológico de Gran Canaria (PHGC) desarrolló el proyecto **“Actualización del Conocimiento Hidrogeológico de la isla de Gran Canaria”** (PHGC, 1991), encaminado a recabar la información que en estudios anteriores había quedado imprecisa y a complementar aquella que por su naturaleza se modifica con el tiempo. Se realizó un inventario de 136 pozos en los que se tomaron muestras, se midieron niveles y se levantaron columnas geológicas detalladas a partir de los descensos al interior de los mismos. Con esta información se realizaron una serie de cortes hidrogeológicos radiales y perimetrales de la isla, se analizaron los comportamientos acuíferos de las distintas unidades y se determinaron sus parámetros hidráulicos. Los datos de

14 puntos de agua situados en la zona han sido incluidos en la base de datos elaborada para el presente estudio.

El **Plan Hidrológico de Gran Canaria (PHGC), en sus cuatro ediciones, PHGC (1992), PHGC (1998), PHGC (2010), PHGC (2015)**, incluye estudios hidrológicos a nivel insular que dan una visión de los recursos de agua disponibles en la isla, su origen y disponibilidad, así como de las extracciones. Junto con las directrices fija los instrumentos de planificación hidrológica.

En 1997 se inició el **Inventario de Puntos de Agua del Norte de Gran Canaria (CIAGC 1997-2001)**, realizado por la empresa Acapimar y completada en 2001 por AT Hidrotecnia. Esta base de datos, facilitada por el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, ha servido para la elaboración de la base de datos de esta tesis. En ella se recogen datos de 487 puntos de agua de la zona de estudio.

### **1.3 Antecedentes de conocimiento. Estado del arte.**

Antes de 1970 la información técnica en las Islas Canarias era casi inexistente, aunque ya se había desarrollado una buena parte de la infraestructura de captación de aguas superficiales y subterráneas, se sabía poco de la hidrogeología del archipiélago con perspectiva general. Los estudios generales eran anecdóticos y los locales se reducían a informes internos o de particulares de escasa o nula accesibilidad. En Gran Canaria existían algunas excepciones, como la ya mencionada publicación de Ascanio y León (1926) y los trabajos realizados por el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) para resolver problemas concretos, siendo el principal autor el Ingeniero Federico Macau Vilar. En Tenerife también existían trabajos relacionados con la calidad del agua de galerías del profesor Fernández Caldas, de la Universidad de La Laguna y los del profesor Telesforo Bravo sobre las características y funcionamiento de las galerías. En cuanto a las islas volcánicas en general, únicamente había estudios de cierto detalle en la isla de Ohau, en el archipiélago de Hawaii.

Ya a principios del siglo XX, como consecuencia de la explotación intensiva de aguas subterráneas en las islas, se comenzó a observar un descenso de niveles, deterioro de la calidad del agua e interferencias entre captaciones, provocando todo ello conflictos, pleitos y denuncias, que dieron origen a la legislación especial de 1924 y las que siguieron, dentro de una Ley de Aguas nacional en que las aguas eran del dominio privado. Eso suponía una intervención administrativa que no se había abordado en otros lugares de España. En la década de 1960, ante una situación de escasez y conflicto que se



iba agudizando y de la necesidad de mayor intervención pública para proteger un bien común básico, hacía falta conocer los recursos de agua en Canarias y cómo afrontar su gestión racional. Por otro lado, Canarias ofrecía unas posibilidades excepcionales de estudio, únicas en el mundo por las numerosas captaciones profundas y la experiencia práctica acumulada. Su abordaje podría servir para resolver los problemas existentes, proporcionando una base de conocimiento general extrapolable a las otras islas volcánicas existentes, muchas de ellas densamente pobladas, aunque con frecuencia en climas más lluviosos. Este conocimiento podría ser también aplicable a terrenos volcánicos continentales en climas áridos y semiáridos.

Esto es lo que favoreció que el Gobierno de España solicitase al Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) el lanzamiento de un estudio de amplio alcance para cubrir esas deficiencias de conocimiento científico y técnico, en parte al amparo de lo propugnado por el Decenio Hidrológico (1965–1975) de UNESCO. Así se acordó financiar y realizar el Estudio Científico de los Recursos de Agua en Canarias, con las siglas SPA–69–515, y abreviadamente Proyecto SPA–15. En este proyecto se realizaron inventarios de detalle de las captaciones existentes y del aprovechamiento del agua subterránea, además de las aguas superficiales, un conjunto de estudios locales y un notable esfuerzo de perforaciones de reconocimiento y piezométricas.

Al final del Proyecto se había conseguido un notable conocimiento científico y técnico, que se podría contrastar con la experiencia en hidrogeología volcánica en otros lugares y trasladarlo a la comunidad hidrológica. Esto se llevó a cabo en el Simposio de Arrecife de Lanzarote de 1975, con notables contribuciones para esa época, aunque no se pudo publicar hasta varios años después (CEDEX, 1988), con distribución limitada. También se editó un trabajo de síntesis del conocimiento aportado, junto con los resultados de estudios complementarios en Canarias (Custodio, 1978), además de una serie de comunicaciones en congresos y reuniones internacionales, las que después han sido la base de difusiones en publicaciones sobre la hidrogeología volcánica insular (Falkland, 1991) y general (Custodio, 2007), y con énfasis en Canarias (Custodio y Cabrera, 2002; Cabrera, et al., 1997).

Los modelos conceptuales previos de la hidrogeología de islas volcánicas hacían en general referencia a complejos sistemas compartimentados, atribuyendo gran importancia a los manantiales colgados, pero sin apenas datos cuantitativos. Con carácter general y con una visión más profundamente hidrodinámica, el proyecto SPA–15 modificó determinadas preconcepciones y mostró los siguientes aspectos (Custodio, 2011):

1) A efectos de estudio y gestión existe un único sistema acuífero insular en materiales volcánicos anisótropos, heterogéneos en detalle, con unidades

diferenciables territorialmente y con notables cambios verticales y laterales, que están en relación con las estructuras genéricas y evolutivas de cada una de las islas, pero interrelacionados. Todo ello es conceptualizable con suficientes observaciones y reconocimientos.

2) Los principios clásicos de la hidrología subterránea son aplicables a nivel insular y también en detalle cuando las condiciones locales se pueden definir adecuadamente. Así existe un nivel freático y niveles piezométricos expresables mediante mapas piezométricos, aunque con posibles flujos verticales importantes en áreas de recarga y descarga, que se pueden estudiar y cuantificar mediante la aplicación de la Ley de Darcy en un contexto macroscópico. Las fuertes pendientes del terreno con materiales recientes permeables pueden dar lugar a niveles freáticos profundos, a veces de hasta algunos centenares de metros.

3) Es posible describir y cuantificar a escala general el flujo y transporte de soluto por el medio volcánico mediante el concepto de medio continuo y por lo tanto es posible la modelación numérica a nivel general.

4) Las islas volcánicas se pueden describir hidrogeológicamente como un núcleo (o varios núcleos en islas compuestas) de baja permeabilidad, con diversa elevación, y un conjunto de formaciones menos alteradas que lo recubren y bordean, por donde fluye buena parte del agua subterránea. El papel de los diques, objeto de numerosas discusiones, no siempre es el de barrera al flujo, pudiendo llegar a ser un elemento de permeabilización según su orientación, en determinadas circunstancias.

5) Existe una relación roca-agua que explica la composición química del agua, en función de donde se origina la mineralización, bien sea el suelo edáfico en ausencia de aportes endógenos de CO<sub>2</sub> o bien de la roca almacén en caso de dominar ese aporte. Además esto permite estudiar el flujo, los efectos climáticos y evaluar la recarga por balance de la deposición salina atmosférica. Los efectos de metamorfismo hidrotermal son importantes en cuanto que reducen drásticamente la permeabilidad y conforman el núcleo volcánico.

6) De similar manera, la caracterización hidrogeológica se puede hacer aplicando técnicas isotópicas ambientales, como los isótopos estables del agua y el tritio. El carbono-13 es un buen indicador de posibles aportes profundos de CO<sub>2</sub> o de su ausencia. En Canarias existe un exceso de deuterio en la precipitación que es característico de ambientes secos, como el que corresponde a su área geográfica, que produce una marca distinta de la oceánica media. El radiocarbono es una herramienta de uso difícil y dudoso, que requiere una buena conceptualización hidrogeoquímica previa para obtener resultados confiables, y a veces no es interpretable.

7) La recarga puede ser una fracción importante de la precipitación en las áreas lluviosas y no se anula en las áreas áridas si hay materiales volcánicos recientes con suelo poco desarrollado. En áreas de baja precipitación, tanto más cuanto más próximas al litoral, la recarga natural es salobre y muestra signos de evaporación con fraccionamiento isotópico, lo que la distingue de la mezcla con aguas de intrusión marina.

8) La generación de escorrentía superficial es analizable por métodos de balance del agua en el suelo, con la peculiaridad de la frecuente alta permeabilidad del suelo.

9) La explotación del agua subterránea conlleva descensos de niveles, que pueden ser grandes, en especial cuando se hace en las áreas altas, con consumo de reservas durante un largo periodo transitorio, de décadas de duración. Eso sucede aún sin que la explotación supere a la recarga (Custodio, 2002), y es muy característico de la explotación del agua subterránea en el interior insular.

La figura 1.1 ilustra este modelo para una isla con un núcleo de baja permeabilidad, como puede ser la isla de Gran Canaria.

La evolución del conocimiento después del SPA-15 debe considerarse en función de los cambios en los contextos externos. Se produce una rápida evolución económica y social, con un notable aumento poblacional y con reducción de las superficies regadas, más tecnificadas en cuanto al riego y su equipamiento, y con cultivos en evolución adaptativa. Ante la limitación de los recursos naturales y la falta de sustentabilidad hidrológica se hace necesario incorporar nuevos recursos, entre los que destaca la desalinización de aguas marinas y también de aguas salobres subterráneas (desalobración); estos recursos son costosos y están disponibles en las áreas costeras. Su bombeo para servir agua a cotas altas supone un gran consumo energético adicional. Paulatinamente se incorpora la reutilización del agua usada como un nuevo recurso para agricultura, usos urbanos, turísticos y recreativos, con un adecuado tratamiento y red de distribución, y más recientemente con reducción de la salinidad por osmosis inversa; sin embargo el progreso es lento, no sólo por el coste sino por la variabilidad de la calidad del agua de partida y la garantía de caudales. Otros recursos, como la lluvia artificial –ha sido experimentado– y la captación de la lluvia horizontal, no parecen tener un potencial significativo a nivel insular. Se ha iniciado la evolución hacia el concepto de recursos integrados de aguas para abordar la escasez, aprovechar mejor las características y posibilidades de cada fuente de recursos y dar un mejor servicio, en un contexto de ahorro y uso eficiente. Esto permite combinar los recursos de agua subterránea –los principales a nivel general– con las escasas aguas superficiales, la desalinización de aguas marinas y salobres y con

la progresiva incorporación de la reutilización a medida que se van solucionado los problemas de calidad y variabilidad.

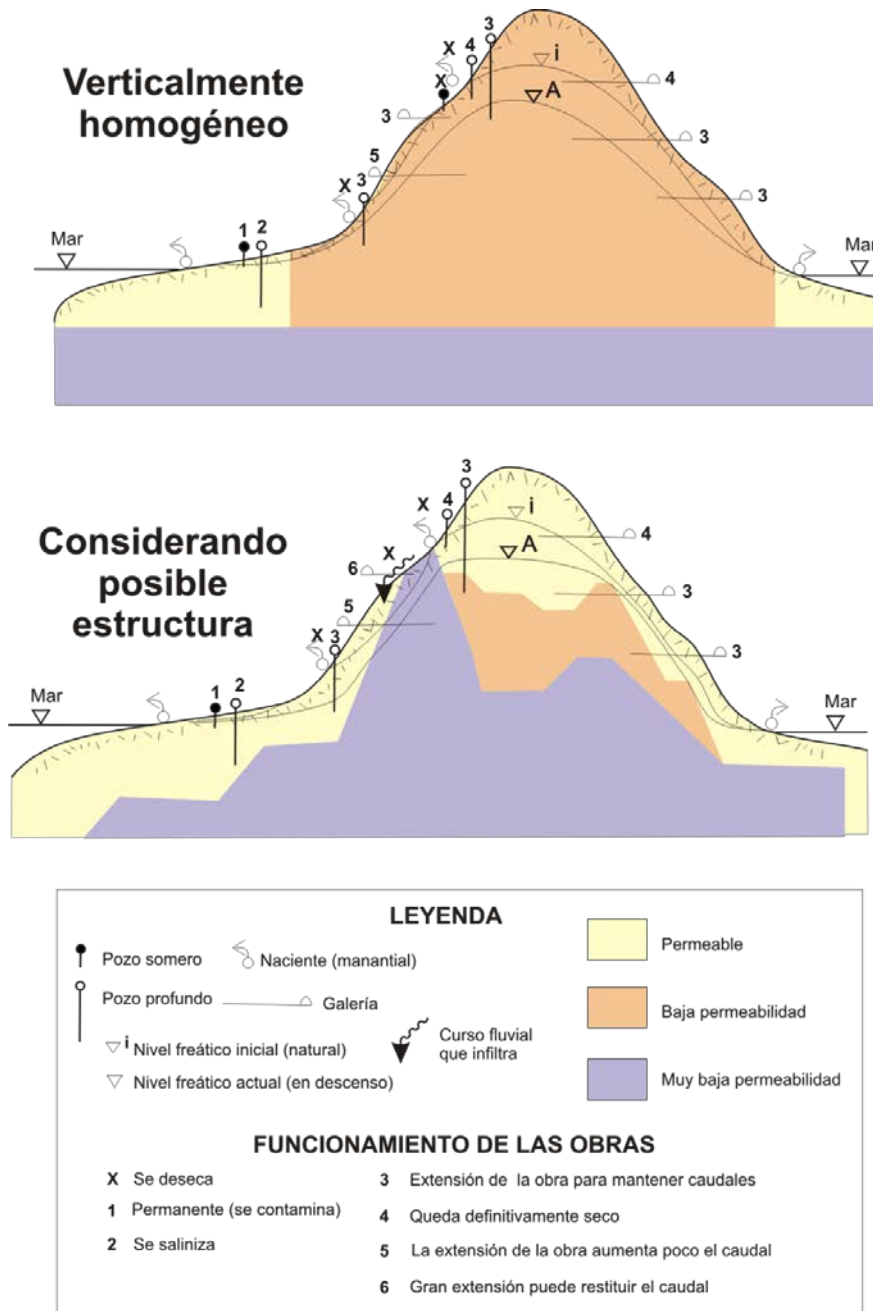


Figura 1.1. Esquemas de funcionamiento hídrico natural y con explotación intensiva en Canarias. Corresponde a una isla alta y el corte está inspirado en Gran Canaria. La figura superior muestra el caso de un núcleo de baja permeabilidad sobre un substrato muy poco permeable y con una periferia de materiales volcánicos jóvenes o sedimentos. La figura inferior trata de introducir la existencia de una cierta estructura volcánica interna con un zócalo de muy baja permeabilidad, caldera central en parte deslizada, con relleno materiales de baja permeabilidad y un recubrimiento de materiales volcánicos jóvenes intra y extracaldera. En ambos casos los gradientes piezométricos costeros varían poco entre la situación natural inicial y la actual de explotación intensiva en “medianías” y “cumbres” (Custodio y Cabrera, 2002).

Un notable avance ha sido la incorporación de la Universidad al estudio e investigación de los recursos de agua, tanto en Canarias (Las Palmas de Gran Canaria y La Laguna) como de diversos lugares de la Península que colaboran con Canarias y la creación de unos pocos organismos de investigación y estudio. Así:

- En **Gran Canaria** se ha establecido la existencia de un proceso de recarga con aguas salinas por efecto climático en zonas áridas o semi-áridas, como el Sureste de Gran Canaria (Macizo de Amurga) (Gasparini et al., 1990), el acuífero de La Aldea, al Oeste de Gran Canaria (Muñoz, 2005; Cruz-Fuentes et al., 2014a; 2014b) y el sur del acuífero costero de Telde (Cabrera y Custodio, 2004a).

La existencia de fenómenos de intrusión marina ha sido puesta de manifiesto especialmente en la franja costera del Este de Gran Canaria (Cabrera y Custodio, 2004b; Hernández et al., 2010; Cabrera, 2011), donde además se superpone la contaminación por retornos de riego que afectan a la salinización del agua subterránea, dando lugar a altos contenidos en nitratos en el acuífero (Cabrera y Custodio, 1998).

La recarga por retornos de riego con aguas reutilizadas en el Noreste de la isla de Gran Canaria ha sido objeto de estudio dentro del Programa CONSOLIDER-TRAGUA (Cabrera et al., 2012). Los trabajos realizados se han encaminado a estudiar la incidencia al medio circundante del Campo de golf de Bandama, regado con aguas reutilizadas desde 1973 y especialmente al acuífero subyacente. Para ello, se ha desarrollado un proyecto multidisciplinar que ha permitido caracterizar el suelo, la zona no saturada y el acuífero afectado por las aguas de riego del campo de golf, así como el agua de riego, el agua de lixiviado del suelo y el agua del acuífero (Estévez et al., 2012a; Estévez et al., 2013a). Los contenidos en contaminantes emergentes han sido objeto de estudios de detalle, tanto en cuanto a su comportamiento en suelos volcánicos (Estévez et al. 2014) como en cuanto a su presencia en el acuífero subyacente (Estévez et al., 2012b). Desde el punto de vista hidrogeológico, se ha puesto de manifiesto que el acuífero recibe aportes contaminantes de origen diverso, como la existencia de fosas sépticas, el riego de cultivos con agua regenerada en la zona de estudio y la rotura de las tuberías sépticas de la zona, sin que sea la reutilización de aguas regeneradas las que aporten la mayor cantidad de contaminantes emergentes a las aguas subterráneas (Estévez et al., 2013b).

El proyecto REDESAC, dentro del que se encuadra la presente tesis, ha dado ya algunos resultados preliminares respecto a la cuantificación de la recarga. Así, se ha demostrado la validez del método del balance de la

deposición total de cloruros considerando la escorrentía subterránea (Naranjo et al., 2014) y su comparación con el balance del agua en el suelo (Naranjo et al., 2015).

- En **Tenerife** los métodos hidroquímicos e isotópicos confirmaron el modelo hidrogeológico de la isla mediante los trabajos de Hoppe (1987) y Custodio et al. (1987).

El acuífero de Las Cañadas del Teide ha sido estudiado en detalle en Marrero (2010). La caracterización geológica y geométrica del acuífero y la caracterización hidrogeoquímica e isotópica ambiental del agua de recarga y el agua subterránea permitió determinar la zona de medianías como la principal área de recarga. El trabajo incluye la evaluación de la recarga mediante el método del balance de la deposición total de cloruros (Marrero et al., 2010). Además, se prestó especial atención a la contribución de los gases endógenos y su afección en las relaciones roca-agua y por tanto en la composición química de las aguas subterráneas.

- En **Fuerteventura** la caracterización hidrogeológica detallada mediante técnicas hidrodinámicas, hidrogeoquímicas-isotópicas y mediante la elaboración de un modelo de flujo del Macizo de Betancuria se recoge en Herrera y Custodio (2014). En este trabajo se definen dos unidades de baja y muy baja permeabilidad, en las que la salinidad del agua subterránea se debe a efectos climáticos en la unidad superior o a la existencia de aguas marinas relictas con influencia geotérmica, mezcladas con la escasa recarga que llega en la unidad inferior.
- En la **Gomera**, Izquierdo et al., (2011) e Izquierdo (2014) analizan en detalle el funcionamiento hidrogeológico de La Gomera, resaltando el papel de los diques en la compartimentación del acuífero y desarrollando un modelo conceptual basado en la misma. Así, diferencian cuatro diferentes situaciones respecto a la recarga y descarga atribuidas a la heterogeneidad de la geología de la isla.
- En **La Palma** (Veeger, 1991) y **La Gomera** (Custodio y Manzano, 1992; Skupien, 1998), utilizando métodos hidroquímicos e isotópicos se ha evaluado el origen y evolución de las aguas subterráneas en ausencia de fenómenos contaminantes. Estos trabajos confirmaron la existencia de recarga en las zonas de cumbres y medianías de las islas y de descarga por manantiales en los barrancos cuando el nivel corta la superficie topográfica y al mar.

El conocimiento en otras islas volcánicas también ha ido evolucionado en función de la demanda de agua producida por el aumento de población. Por lo general en estas islas el agua superficial está limitada en el espacio y en el tiempo y el agua subterránea es una alternativa para esta demanda de agua,

pero requiere un conocimiento de estos complejos acuíferos. Una de las islas volcánicas geológicamente e hidrogeológicamente mejor estudiadas es el **Archipiélago de Hawaii**, que se caracterizan por una alta conductividad hidráulica (Oki et al, 1998; Gingerich y Voss, 2005) propia de una actividad volcánica subaérea reciente, con rocas volcánicas relativamente jóvenes. Estas características han dado lugar al denominado “modelo hidrogeológico hawaiano” de las islas volcánicas, desarrollado por Peterson (1972) y mejorado por MacDonald et al. (1983).

Este modelo contempla la existencia de un lentejón de agua dulce que se sitúa encima de una zona de transición de agua salobre encima de agua de mar y está condicionado por la alta permeabilidad de los materiales volcánicos de las islas, en las que el nivel piezométrico se ve elevado en el interior de las mismas por los sistemas de diques existentes en los rifts, según se ilustra en la figura 1.2 (Gingerich y Oki, 2000).

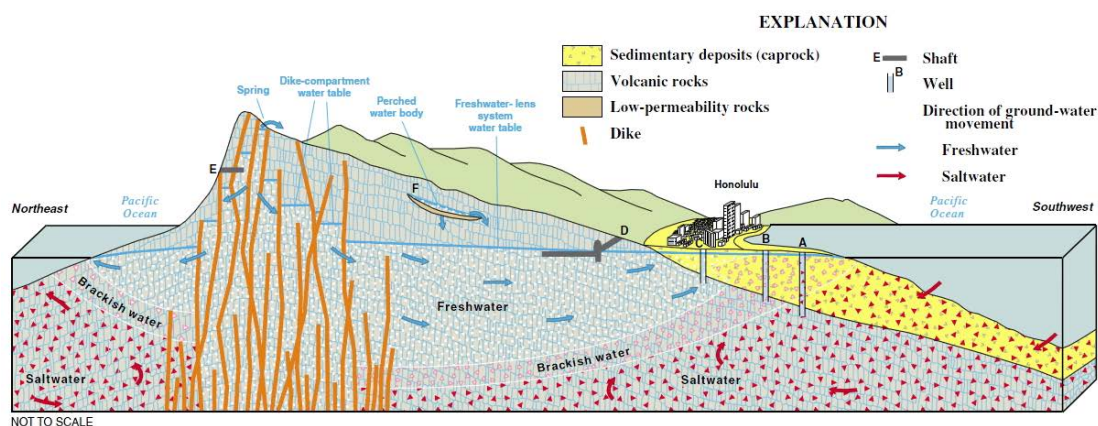


Figura 1.2. Esquema simplificado del modelo hidrogeológico de las islas Hawaii (Gingerich y Oki, 2000).

Izuka y Gingerich (2003) describen la existencia de lentejones de agua dulce de mayor potencia en el sur de la isla de Kauai debido a una amplia zona de baja permeabilidad, que da lugar a altos gradientes hidráulicos y descargas de agua a los cauces cuando el nivel corta la superficie del terreno, contradiciendo el modelo tradicional hawaiano. En realidad el modelo canario y hawaiano son muy similares y sólo difieren en el énfasis puesto en determinadas situaciones costeras en el modelo hawaiano y en cómo se describe la heterogeneidad, más insularmente en el modelo canario y más en detalle en cuanto a la existencia de diques en el modelo hawaiano. A este respecto los modelos propuestos para el Macizo de Enchiede de La Gomera y para El Hierro por C. Sóler retoman el modelo hawaiano, pero modificando el énfasis se pueden asimilar en el modelo canario

Las **Islas Galápagos**, pertenecientes a Ecuador, han sido objeto del proyecto multidisciplinar GIIWS entre 2010 y 2013 con el objeto de cuantificar los recursos hidráulicos y su impacto en los ecosistemas naturales de las mismas. Combinando la interpretación de métodos geofísicos utilizando helicópteros (SkyTEM) con la geología-geomorfología, inventarios de puntos de agua y métodos hidroquímicos (d'Ozouville et al, 2008; Warriar et al., 2012), se ha establecido un modelo hidrogeológico conceptual para las islas de San Cristóbal y Santa Cruz (Violette et al., 2014). Se concluye que el modelo de funcionamiento para San Cristóbal es similar al definido en Hawaii, pero que Santa Cruz presenta un comportamiento hidrogeológico que tiende hacia el modelo definido en Canarias debido a la mayor edad de sus materiales. Violette et al., 2014 hacen especial mención de que en realidad no se trata de dos modelos contrapuestos sino que el “modelo canario” es aplicable a islas más antiguas, donde la alteración de las rocas y el paso del tiempo ha dado lugar a un núcleo de menor permeabilidad que impide que el agua de mar se encuentre debajo del agua dulce en toda la isla. Pryet, 1012, caracteriza la hidrogeología del archipiélago, cuantifica el aporte de la lluvia horizontal y propone modelos hidrogeológicos conceptuales para las islas de Santa Cruz y San Cristóbal.

En **Azores** (Portugal), el Plano Regional da Água (P.R.A.) DROTRH/INAG (2001) ha hecho un diagnóstico actualizado de la situación de los recursos hídricos en las Azores, como primer enfoque integrado de la hidrogeología de las islas en el que se realiza, entre otras cosas, la delimitación de 54 sistemas acuíferos, su caracterización hidrodinámica e hidrogeoquímica, la evaluación de las reservas y los recursos acuíferos y también propone programas y acciones que deben tomarse para la recuperación de los recursos hídricos y de los ecosistemas asociados, optimizando los procedimientos operacionales y de planificación (Cruz y Brito, 2002). Las islas responden a un contexto geológico ligado a la existencia de fallas transformantes por lo que la tectónica juega un importante papel. El modelo hidrogeológico adoptado ha sido el hawaiano, definiéndose dos sistemas acuíferos diferentes, uno basal que flota sobre agua salada y otro constituido por acuíferos colgados con gradientes hidráulicos muy pequeños (Cruz y Silva, 2001; Cruz et al., 2010). Los estudios llevados a cabo en las islas han estado dirigidos fundamentalmente a la caracterización hidrogeoquímica y del hidrotermalismo presente en las mismas (Cruz et al., 1999; Cruz y França, 2006; Cruz et al., 2010). El mismo modelo ha sido adoptado en Madeira, Portugal (Prada et al., 2005), donde se han distinguido tres dominios hidrogeológicos: acuífero basal, acuífero condicionado por la existencia de diques y acuíferos colgados, siguiendo también el modelo hawaiano. En esta isla, varios trabajos están dedicados a la cuantificación de la recarga procedente de la niebla interceptada en los bosques naturales, a la que se da bastante importancia dentro del balance hídrico de la isla (Prada y



Oliveira, 2001; Prada et al., 2009, 2014), aunque este extremo ha sido discutido por otros autores (Regalado y Ritter, 2013) y no coincide bien con la experiencia existente en Tenerife (Braojos, 2011).

En las islas de San Antonio, San Nicolás y Fogo del **Archipiélago de Cabo Verde** se han llevado a cabo estudios hidrogeológicos mediante técnicas isotópicas y análisis de gases nobles, que apuntan a una recarga en las zonas altas de las islas y tiempos de residencia cortos (Heilweil et al, 2009). En la isla de Fogo, además se ha elaborado un modelo de flujo con transferencia de calor que concluye que existe una recarga importante en el norte de la isla, lo que da lugar a recursos subterráneos aprovechables (Heilweil et al., 2012).

En una cuenca con agricultura intensiva situada en la isla de Guadalupe (**Antillas Francesas**) se estudiaron las relaciones hidrogeológicas entre dos acuíferos superpuestos: el superior en una formación de lapilli superficial y el inferior en lavas y flujos piroclásticos en un ambiente andesítico (Charlier et al., 2008; Charlier et al., 2011), evidenciándose la existencia de contaminación del suelo y el agua subterránea por el plaguicida cadusafos (Charlier et al., 2009). La isla de Martinica, situada en el mismo contexto, ha sido caracterizada compartimentando diferentes acuíferos en base a la geología de los mismos, evidenciándose propiedades muy diferentes entre unos y otros (Vittecoq, 2007). En esta isla se ha prestado especial atención a la contaminación por plaguicidas presentes en diferentes zonas de la misma (Gourcy et al., 2009).

Diversos estudios llevados a cabo en la **Isla de Reunión**, perteneciente a los territorios de ultramar franceses, discutieron el modelo hidrogeológico de la isla, utilizando diferentes métodos de estudio (hidrogeoquímicos, geofísicos, etc.) (Violette et al., 1997; Courteaud et al., 1997), hasta que la modelación numérica llevada a cabo por Join et al. (2005) concluyó como más probable la existencia de un cuerpo continuo de agua condicionado por la existencia de materiales poco permeables en el núcleo, equivalente al modelo propuesto para Canarias. La isla de Mayotte, situada en el **Archipiélago Las Comoras** y también perteneciente a los territorios franceses de ultramar, ha sido caracterizada por Vittecoq et al., 2014. Mediante el acople de las observaciones geológicas e hidrogeológicas con datos geofísicos SkyTEM, definieron un modelo hidrogeológico de isla volcánica con acuíferos compartimentados que no identificaron con el modelo hawaiano ni el modelo canario. Este modelo fue validado posteriormente mediante la perforación de ocho pozos (Vittecoq et al., 2015); sin embargo se trata de una visión de detalle, sin considerar el conjunto.

La hidrogeología de la **Isla de Pascua** ha sido caracterizada por Herrera y Custodio (2008) a partir de datos geológicos, hidrodinámicos e hidrogeoquímicos. Los datos de que se disponía no permitieron determinar la altura a que se encuentra el núcleo impermeable supuesto, aunque los estudios

realizados permitieron recomendar el aprovechamiento de las aguas subterráneas mediante sondeos perforados tierra adentro o pozos excavados de poca profundidad con galerías en el fondo.

La **Isla Jeju** (Corea) fue caracterizada hidrogeológicamente por Eckstein (1969) mediante la definición de un lentejón de agua dulce atendiendo al modelo hawaiano. Sin embargo, posteriormente se identificó la existencia de un basamento sedimentario impermeable (Hahn et al., 1997) y se propuso un funcionamiento hidrogeológico a partir de técnicas hidrodinámicas e hidrogeoquímicas que apunta a una recarga preferente en las partes altas de la isla, con descargas intermedias dependiendo de las permeabilidades de los materiales y una descarga principal en manantiales costeros de una mezcla de aguas recargadas en altura con otras costeras con altos contenidos en nitratos (Koh et al., 2012). El cálculo de la recarga mediante diferentes métodos dio como resultado la existencia de zonas diferenciadas en la isla dependiendo de su orientación y la mayor fiabilidad de la fluctuación de los niveles freáticos para la estimación de la misma frente a los otros métodos utilizados (Hagedorn et al., 2011).

En general, las necesidades de conocimiento y los avances en hidrología e hidrogeología referentes a los recursos de agua en las islas volcánicas se pueden encuadrar en tres grandes grupos (Custodio, 2010a):

1) Aspectos técnicos con base científica: avance apreciable

- Evaluación la esorrentía superficial
- Caracterización hidrogeológica conceptual y cuantitativa
- Evaluación de parámetros hidráulicos de flujo (incipientes en cuanto al transporte de masa)
- Caracterización hidrogeoquímica e isotópica ambiental
- Procesos de desalinización de aguas marinas y salobres
- Tratamiento de aguas residuales para reutilización, desde el origen a la aplicación

2) Aspectos de gestión con base racional: avance incipiente

- Aspectos de manejo, administración y regulación a nivel insular, combinando la visión pública con los intereses sociales y con los privados
- Consideración conjunta de la cantidad y de la calidad del agua, tanto en origen, como en el uso, como para la reutilización

- Evaluación de los parámetros hidroeconómicos, referentes, entre otros, a uso, costes y beneficios directos e indirectos, recuperación de costes, huella hídrica y agua virtual

### 3) Aspectos sociales: avance aún escaso

- Conciliación de intereses públicos y privados
- Transparencia de las ventas y mercados de agua
- Participación y corresponsabilidad de los usuarios en la gestión pública
- Implicación de la Sociedad Civil en la gestión a medio y largo plazo
- Ética de la explotación y uso del agua en el contexto insular limitado
- Publicidad de datos e informaciones como base de una mejor gestión
- Apoyo decidido y suficiente a la investigación y estudio como soporte al desarrollo y al logro de la sustentabilidad.

Además de los aspectos hidrológicos e hidrogeológicos de Gran Canaria y Tenerife, los aspectos económicos, administrativos, legales, sociales y éticos se comentan en el texto de la publicación sobre la Minería del Agua Subterránea en España (MASE), recientemente concluido como una actividad del Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña con el apoyo financiero de AQUALOGY (Custodio 2015 a y b).

## **1.4 Metodología**

Para conseguir los objetivos propuestos se ha tenido que usar metodologías que se explican pormenorizadamente en sus apartados correspondientes pero que se podrían dividir en tres ámbitos diferentes: gabinete, campo y laboratorio.

Dentro del trabajo de gabinete está la recopilación bibliográfica de la información geológica e hidrogeológica y la obtención de datos para la elaboración de una base de datos. Estos datos se han obtenido de las fichas de estudios anteriores realizados en la isla, de consultas del archivo del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, del archivo de la Heredad de Aguas de Arucas y Firgas y de los datos tomados en las campañas de campo realizadas para esta tesis.

En octubre de 2008 se iniciaron las campañas de campo destinadas a la toma de muestras mensuales acumuladas de agua de lluvia de cinco estaciones pluviométricas situadas a diferentes cotas en la zona de estudio. Estas campañas de recogida de agua de lluvia se han llevado a cabo durante cuatro

años. De diciembre del 2008 a junio del 2009 se realizó el inventario de puntos de agua en el que se visitaron 94 puntos de agua. Las tareas realizadas en los puntos de agua han sido: situación, medición del nivel freático y obtención de información constructiva y de la explotación, así como toma de muestras de agua para análisis químicos e isotópicos; in situ se ha medido la conductividad eléctrica, pH, alcalinidad y temperatura del agua.

En el laboratorio se han realizado las determinaciones analíticas de las muestras tomadas en el campo. Se trata de análisis químicos completos de solutos mayoritarios e isotópicos del agua ( $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ ) de las muestras de agua de lluvia y de las aguas de las captaciones visitadas. Todos los análisis químicos se han realizaron en el Laboratorio de la Granja Agrícola Experimental del Cabildo de Gran Canaria y las determinaciones isotópicas en el Servicio General de Isótopos Estables de la Universidad de Salamanca, todos ellos según métodos estándar.

## **2. *Área de estudio***



## 2. Área de estudio

### 2.1. Gran Canaria

Las islas Canarias se localizan al NO de la costa de África, entre las latitudes 27°37' -29°25' N y las longitudes 13°20'-18°10' O (Fig. 2.1). Forman parte de un conjunto de archipiélagos conocido como Macaronesia situados en el Atlántico centro-oriental, del que forman parte conjuntamente con Azores, Madeira, Islas Salvajes y Cabo Verde.

El archipiélago canario, con una extensión superficial de 7450 km<sup>2</sup>, está constituido por siete islas mayores (Fig. 2.1). Gran Canaria ocupa una posición central dentro del archipiélago y tiene una superficie aproximada de 1532 km<sup>2</sup>, siendo la tercera isla en extensión (Fig. 2.1). Presenta una morfología circular en planta de aproximadamente 45 km de diámetro y un perfil transversal cónico coronado por su altitud máxima de 1949 m en el Pico de las Nieves. La isla se encuentra profundamente disectada por una red de barrancos que partiendo desde la cumbre se dirigen radialmente hacia los sectores costeros, con importantes encajamientos y desniveles. Esto configura en su conjunto una orografía muy abrupta que condiciona de forma fundamental los usos del suelo y el asentamiento de población. El litoral es bastante irregular, con acantilados de gran verticalidad en la costa occidental que contrasta con las suaves plataformas y amplias playas situadas en los sectores costeros oriental y meridional.

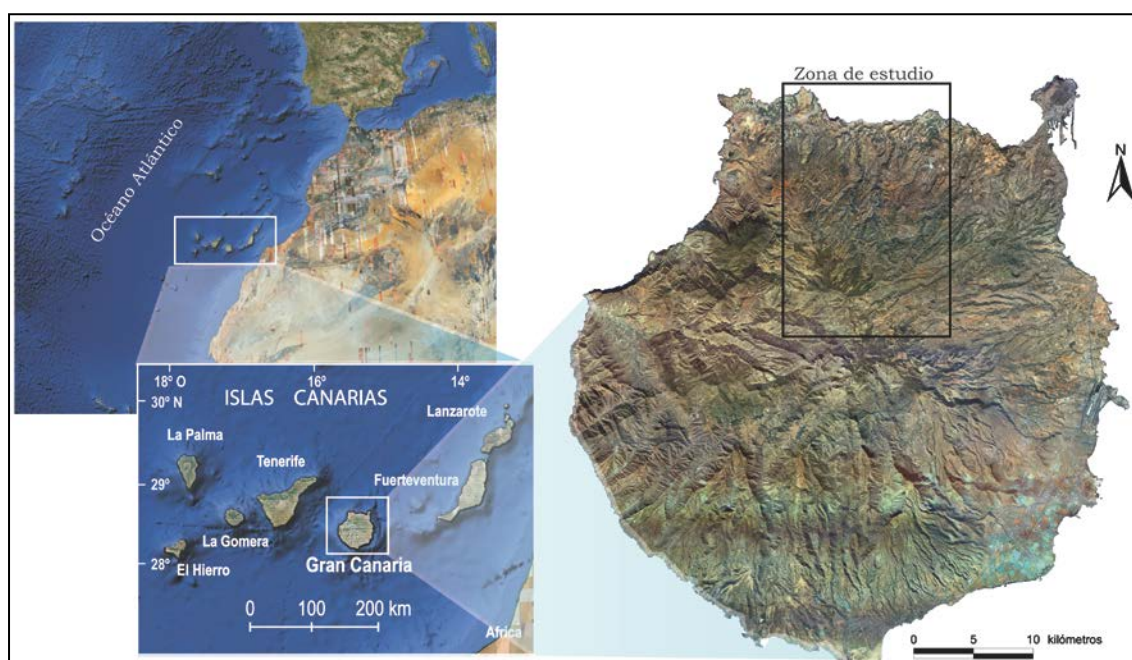


Figura 2.1. Encuadre geográfico de la zona de estudio (fuente Google Earth y ortofoto Grafcan 1998)

Las cumbres existentes en la zona central de la isla determinan un marcado contraste climatológico entre sus vertientes. La vertiente sur es más seca y cálida y la norte es más húmeda y fresca. Ello es debido fundamentalmente a la influencia de los vientos alisios. Los vientos alisios, de componente nor-noreste, chocan con la fachada norte de la isla y ascienden; eso crea una capa de aire húmeda que origina un mar de nubes que aporta una elevada humedad relativa al aire, impide la insolación directa de la superficie y reduce la evaporación. La mitad sur queda afectada por la mayor sequedad de los vientos que descienden desde la cumbre, con mayor insolación y evaporación. La pluviometría se ve afectada por esta división, de manera que las lluvias aumentan con la altitud de forma más lenta y son menos abundantes en la vertiente sur que en la norte. La distribución territorial de la precipitación anual se observa en la figura 2.2.

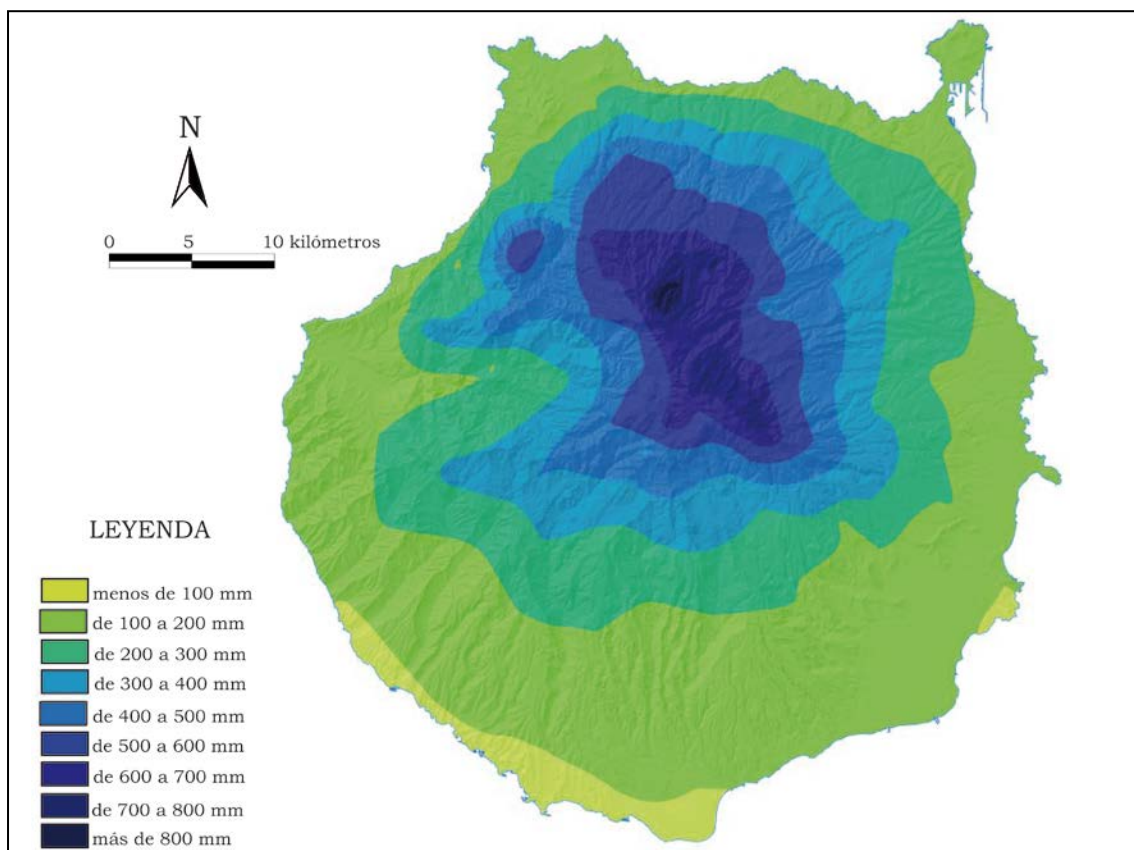


Figura 2.2. Precipitación media anual en Gran Canaria periodo 1949/50 a 2005/06) (PHGC 2010)

La media insular para la precipitación es de 338 mm/año. La zona más lluviosa es la correspondiente a Medianías Norte (media ladera de la vertiente norte), con un valor medio anual de 501 mm y un valor máximo de 1097 mm (PHGC 2010).

El régimen natural de escorrentía en los barrancos es fundamentalmente de tipo torrencial, con una rápida recesión que no suele durar más de una semana.



La hidrogeología de la isla está caracterizada macroscópicamente por la existencia de un acuífero único a nivel insular, con una superficie piezométrica en forma de domo que alcanza sus valores máximos en el centro de la isla donde se produce la mayor parte de la recarga. El acuífero presenta un flujo radial desde el centro a la costa, con gradientes medios de 7% al 21% y menores de 6% en las zonas costeras (SPA-15, 1975). Por encima de este nivel de saturación regional pueden existir niveles acuíferos colgados que o bien se descargan mediante manantiales y rezumes (nacientes) aprovechando niveles poco permeables como almagres o sills, o bien se drenan a niveles más profundos. Así, a pequeña escala se puede hablar de acuíferos diferentes pero relacionados lateralmente, y a una mayor escala de observación debe hablarse de un sólo acuífero multicapa heterogéneo y anisótropo (Cabrera y Custodio, 2008). Como consecuencia de las extracciones del agua del acuífero se ha producido un descenso progresivo del nivel piezométrico en la isla, que oscila entre algunas decenas y algunos cientos de metros (Custodio y Cabrera 2002).

En el proyecto SPA-15 (1975) se determinaron los parámetros hidráulicos de las diferentes formaciones geológicas que configuran la isla, a partir de unos cien ensayos de bombeo y recuperación, y de estudios que relacionaban los caudales específicos con las transmisividades. Estos datos se reflejan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores de los parámetros hidráulicos determinados para diferentes formaciones (SPA-15, 1975)

Formación	Transmisividad (m <sup>2</sup> /d)	Permeabilidad (m/d)	Coefficiente de almacenamiento
Basaltos Miocenos	5-20	0,05-0,5	0,005-0,01
Fonolitas, Complejo Traqui-sienítico e Ignimbritas	5-10	0,1-0,5	0,0001-0,001
Fonolitas (zonas excepcionales)	10-25		0,001-0,005
Roque Nublo (aglomerados)	25-50	0,3-0,75	0,015-0,035
Roque Nublo (niveles basálticos y sedimentos)	50-200		
Basaltos Cuaternarios (contacto con fonolitas, basaltos Miocenos)	10	0,2-1	0,01-0,02
Basaltos Cuaternarios (condiciones variables)	40-200		
Depósitos aluviales	200-800	5-25	0,03-0,1
Formación detrítica de las Palmas		1,5-8	

A lo largo de la historia de Gran Canaria, el agua de los barrancos, nacientes y acuíferos ha condicionado la vida de sus habitantes y ecosistemas. Ya en el siglo XIX comenzó la privatización de las aguas en nacientes, alumbradas y barrancos; en 1866 con la promulgación de la primera Ley de Aguas española, las Heredades instituyeron organismos propios para su administración

mediante sus Estatutos. En 1956, debido al apremio de la demanda de agua para la agricultura de exportación, se institucionalizó la privatización del agua con la promulgación de una Ley Especial para Canarias sobre Heredamientos y Comunidades de Aguas, con el objetivo de reconocer personalidad jurídica a las comunidades existentes, así como habilitar su posterior concesión a las que se constituyeren en el futuro (Quirantes, 1981).

La competencia por los recursos hídricos ha llevado a una alta densidad de captaciones. Ya se conoce la existencia de pozos en Canarias para uso agrario a mediados del siglo XIX, pero la problemática de la elevación de sus aguas por falta de elementos mecánicos que lo facilitasen hizo imposible su beneficio (Suárez Moreno, 2009). Con el inicio del siglo XX se dispuso de nuevas tecnologías y en Gran Canaria en 1930 aparecen registrados 300 pozos. En la actualidad existen 2590 captaciones inventariadas de las que 1139 no se encuentran en funcionamiento, por descensos en el nivel del acuífero, baja rentabilidad en su explotación o merma en la calidad del agua. Otros 122 existen pero su estado de funcionamiento se desconoce. Un total de 1329 pozos están en régimen de explotación (PHGC, 2010).

## **2.2. Delimitación del área de estudio**

La zona de estudio se encuentra en el norte de la isla y abarca las cuencas de los Barrancos de Moya y Azuaje y la intercuenca entre ambas, con un total de 67,25 km<sup>2</sup> (Fig. 2.3). Se ha incluido además un borde de dos kilómetros en toda la periferia para mejor definición de las características en los contornos. La extensión total estudiada es de 184 km<sup>2</sup> aproximadamente (Tabla 2.2). Incluye buena parte de los municipios de Moya, Valleseco y Firgas y una parte menor de los municipios de Teror, Arucas, San Mateo, Tejeda, Artenara, Galdar y Guía (Fig. 2.3).

El cauce principal de los barrancos tiene una orientación preferente Sur-Norte. En la Cuenca de Azuaje se encuentran los siguientes barrancos principales: Bco. de la Retamilla que ocupa la cabecera, continua el Bco. del Anden y Bco. de la Virgen, para luego terminar con el Bco. de Azuaje. La cuenca de Moya está constituida, desde la cabecera al mar, por los siguientes barrancos principales: Bco. del Pinar, Bco. de los Propios y Bco. de Moya. En la intercuenca se sitúan los Barrancos del Pagador y del Salado (Fig. 2.3).



## 2.3. Características de área de estudio

### 2.3.1 Relieve, clima, suelo y vegetación

La zona estudiada presenta un relieve irregular formado por barrancos, lomos y edificios volcánicos. Los Barrancos principales de la zona tienen sección en “V” cerrada en sus tramos altos, con acusado encajamiento y formados por cauces profundos y amplios, y en “V” más abierta en los cauces medios y bajos, rellenos con sedimentos y/o coladas más recientes que discurren a fondo de barranco que suavizan sus perfiles transversales (Fig. 2.4).

El área de estudio se encuentra en la vertiente norte de la isla, donde el anticiclón subtropical de las Azores origina altas presiones casi todo el año y muy particularmente en verano; en invierno dicho anticiclón se desplaza al norte, llegando incluso a desaparecer, dejando paso a las borrascas y perturbaciones de las zonas templadas. Por otro lado la zona presenta una orografía muy accidentada, que combinada con la altitud, el predominio de los vientos alisios y la existencia de una corriente oceánica fría bañando la costa, conforman una marcada zonificación climática, pudiéndose diferenciar tres zonas: a) la costa con un clima templado y húmedo, influido por las brisas, b) las medianías, con un clima fresco y húmedo con veranos cálidos y, por último, c) las cumbres, con aire fresco y seco (PRUG Doramas, 2004).

Dorta Antequera (1994) indica que un rasgo climático característico de la zona es la estructura vertical que tiene la troposfera, con frecuentes inversiones térmicas que dan lugar a unas condiciones atmosféricas en las que es mucho más importante la circulación horizontal del aire que la vertical, impidiendo el ascenso del aire por fenómenos convectivos. Este hecho, emparejado con el efecto pantalla del relieve, produce una capa de estratocúmulos entre los 500 y 1500 m de altitud en invierno, cuyo techo desciende hasta los 1200 m en verano, lo que produce precipitación horizontal y una humedad ambiental que llega al 80% en los puntos más elevados; además reduce la insolación y pérdidas de evaporación. Por encima de esta capa, separada por la inversión térmica, se encuentra otra capa de aire más seco y cálido que dificulta el paso ascendente de las masas de aire y produce el característico “mar de nubes” (Dorta Antequera, 1994). Este gradiente térmico vertical se rompe de forma ocasional en la estación invernal y comienzos de primavera con perturbaciones atlánticas que interrumpen la circulación atmosférica de la zona templada favoreciendo la invasión de aire polar lo que unido al relieve produce chubascos intensos en la zona.

Otra situación climática que afecta a la zona es el llamado “tiempo del sur”. Afecta a las áreas entre 500 y 1000 m, en las que se produce una invasión de



aire sahariano procedente del continente africano, lo que favorece las olas de calor y un descenso de la humedad relativa. Estos eventos pueden tener lugar varias veces durante todo el año, con una duración de 3 a 15 días (Dorta Antequera, 1994).

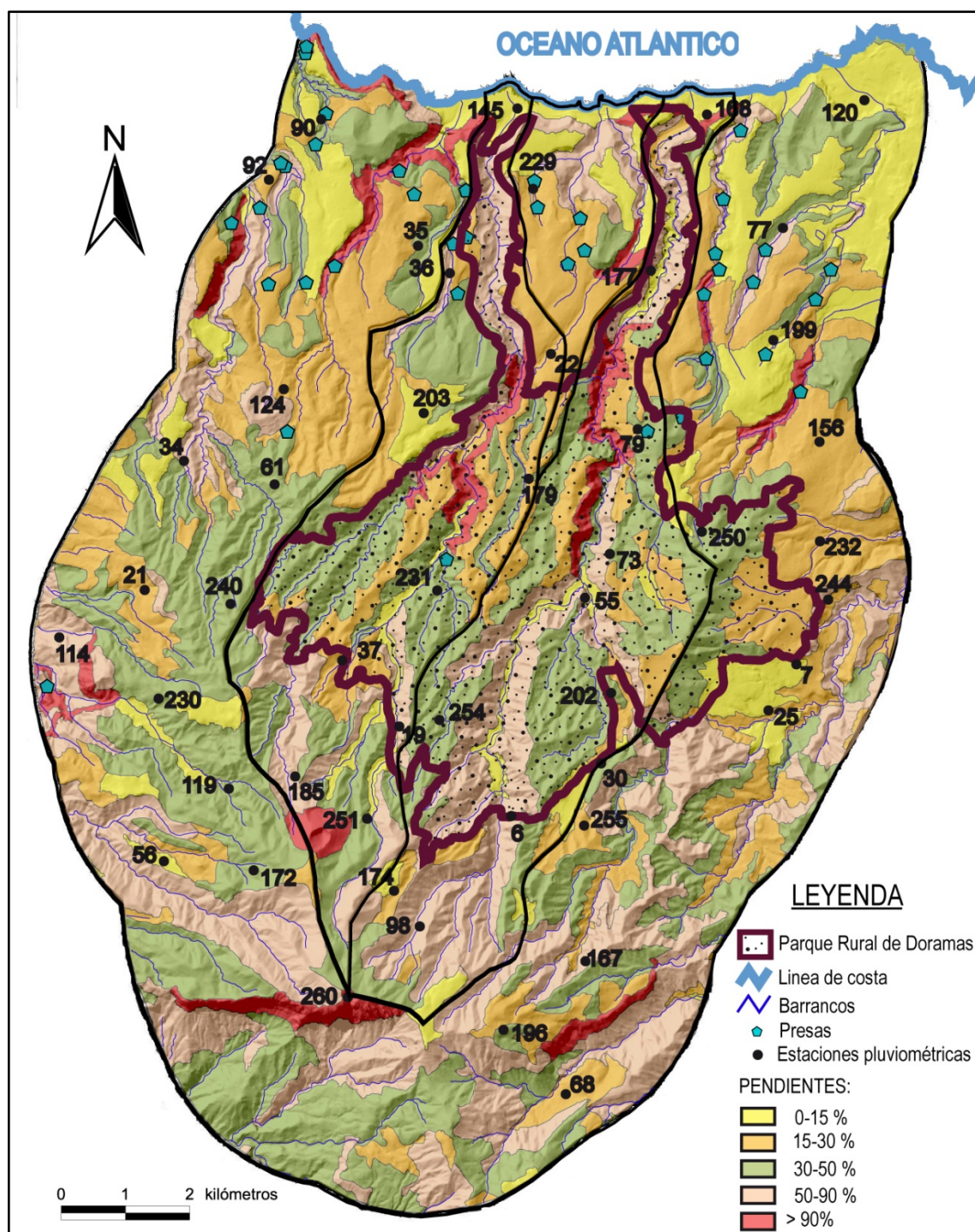


Figura 2.4. Mapa de pendientes de la zona en que se indica la situación de las presas y estaciones pluviométricas presentes en la zona de estudio y zona de ocupación del Parque Rural de Doramas (Sánchez Díaz, 1995).

La superficie de estudio cuenta con 49 estaciones pluviométricas de la red del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (Fig. 2.4, Tabla 2.3), con registros de más de 50 años. La pluviometría de la zona estudiada se caracteriza por su irregularidad, tanto anual como mensual, con años muy lluviosos que se intercalan con otros más secos. Ello queda patente en la estación de la Retamilla (98) en la que se registraron 1114 mm en el año 1965 y 405 mm al año siguiente. En la gráfica de la figura 2.5 se representan las precipitaciones acumuladas anuales respecto a las medias en la zona de estudio para la estación 6 (cota 875) en el periodo 1935-2012 y para la estación 98 (cota 1370) en el periodo 1950-2012. Se observa que ambas estaciones siguen el mismo patrón: se inicia con un periodo poco lluvioso, 1935-1948, en el que las precipitaciones anuales se encuentran por debajo de la media; luego continua otro periodo, 1949-1962, muy lluvioso con respecto a la media; posteriormente, entre los años 1962-1996, se ve como se intercalan años con registros lluviosos superiores a la media con otros más secos, por debajo de la media estimada y por último se inicia en periodo, 1997-2012, en el que se aprecia años con descensos y otros estables en las precipitaciones anuales con respecto a la media, siendo más acentuado en la estación 98.

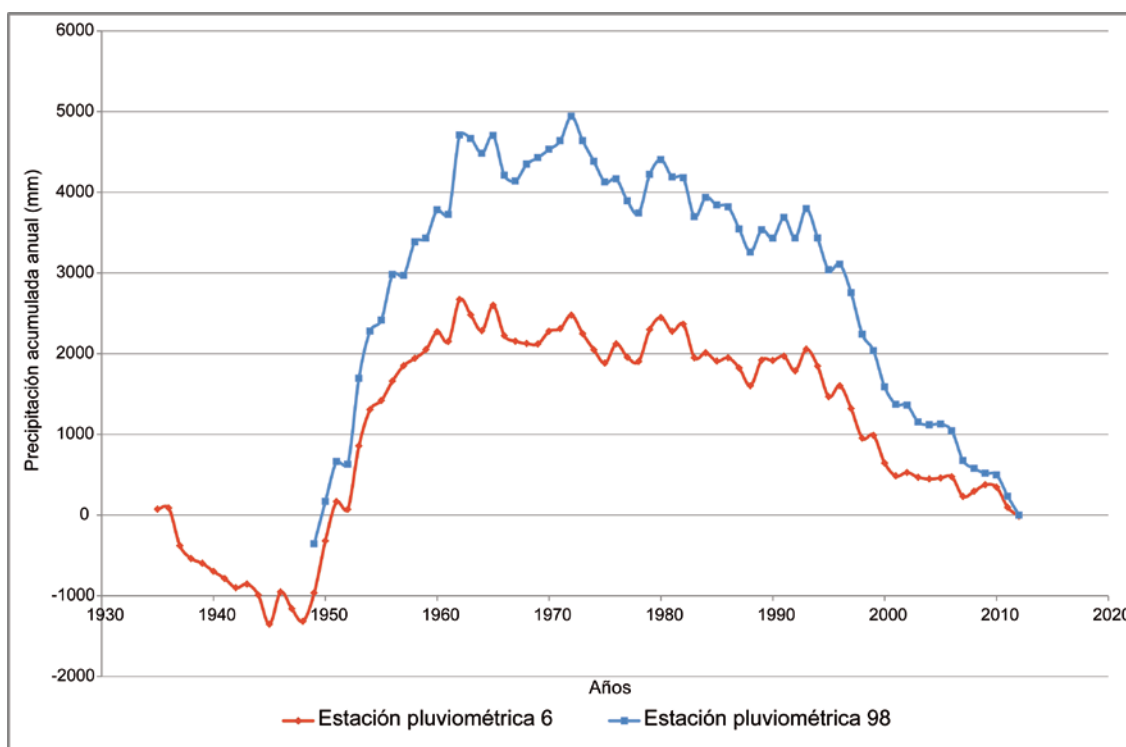


Figura 2.5. Desviación acumulada de la precipitación anual sobre la media de las estaciones 6 y 98 para los periodos de que se dispone de datos.

Tabla 2.3. Estaciones pluviométricas situadas en la zona de estudio (CIAGC, 2011). Se resalta en color azul las estaciones que han sido muestreadas en la presente tesis.

Estación	Cota (m)	Año inicial	Media anual (mm)	Máxima mensual (mm)	Máx. diaria (mm)
06-Valsendero	875	1935	733	593	270
07-Terror - Dominicas	650	1935	536	316	200
19-Fontanales - Cisterna	975	1943	679	584	186
21-Caidero San José	885	1943	493	366	218
22-Moya - Heredad	485	1943	390	352	152
25-Terror - Casco	600	1951	502	335	196
30-Valleseco	960	1945	718	561	350
34-Saucillo	750	1951	362	358	139
35-Tres Palmas	405	1948	260	311	150
36-Mondragones	375	1948	286	313	150
37-Lomo Majadilla	990	1949	634	506	154
55-Las Madres	557	1949	604	429	252
56-Juncalillo	1155	1949	535	818	260
61-Piedra Molino	715	1949	562	423	200
68-Lagunetas	1110	1949	609	779	217
73-Fuente Firgas	475	1963	511	323	178
77-Los Dolores	235	1951	229	227	147
79-Casas de Matos	480	1949	416	380	194
90-Santa María de Guía	205	1951	190	140	99
92-Jiménez - Presa	245	1949	266	280	200
98-Retamilla	1370	1949	859	804	429
114-Berrazales	340	1949	354	362	130
119-Galeotes	1100	1949	646	638	263
120-Bañaderos	15	1949	168	174	135
124-Verdejo	615	1949	474	289	200
145-San Felipe	16	1951	145	184	142
156-Portales Altos	490	1951	395	296	194
167-Cuevecillas	1160	1961	611	683	194
168-San Andrés	15	1951	158	159	119
172-Hoya de Morón	1305	1967	534	814	180
174-Montañón	1456	1977	622	696	178
177-Lomo Blanco	325	1951	258	284	147
179-San Fernando	650	1951	534	319	172
185-Cortijo Pavón	1165	1963	532	632	133
196-Radio Atlántico	1595	1977	649	653	142
199-Lomo San Pedro	432	1952	370	312	192
202-Caserón	850	1952	591	422	190
203-Santa Cristina	645	1952	489	367	151
229-Cabo Verde	250	1967	239	164	132
230-Fagagesto	1028	1967	568	461	125
231-Barranco Laurel	695	1967	478	411	163
232-Palmar - D <sup>a</sup> . Pino	545	1967	474	275	91
240-Cortijo La Solapilla	950	1969	526	416	113
244-Guanchía	610	1972	482	289	95
250-El Barreto	685	1969	511	264	200
251-Horcajadas - Pozo	1195	1974	612	632	182
254-Fontanales - Lomo Marco	1000	1969	627	523	136
255-Lanzarote	1020	1975	625	559	172
260-Moriscos	1770	1981	474	602	185

Según el PHGC las medias pluviométricas anuales en las zonas de costa son de 207 mm y en zonas altas y de medianías de 501 mm (serie 1949/50-2005/06, PHGC 2010), existiendo una variabilidad espacial de las precipitaciones debida principalmente al gradiente de altura. En la figura 2.6 se ha representado la cota de cada estación frente a la precipitación media anual en la zona de estudio. En él se puede observar que en las zonas de medianías las precipitaciones en la cuenca de Azuaje son mayores que en la cuenca de Moya, siendo similares en las zonas bajas. También se observa que en dos estaciones próximas de la cuenca de Azuaje, el Montañón (174) (cota 1435 m; precipitación media anual, 680 mm) y la Retamilla (98) (cota 1375 m; precipitación media anual, 930 mm), existe una gran diferencia en la cantidad media de precipitación, siendo mayores las precipitaciones en la estación de la Retamilla (98) que se sitúa a cota inferior; esto podría ser debido a que entre ellas se sitúa el límite del denominado mar de nubes.

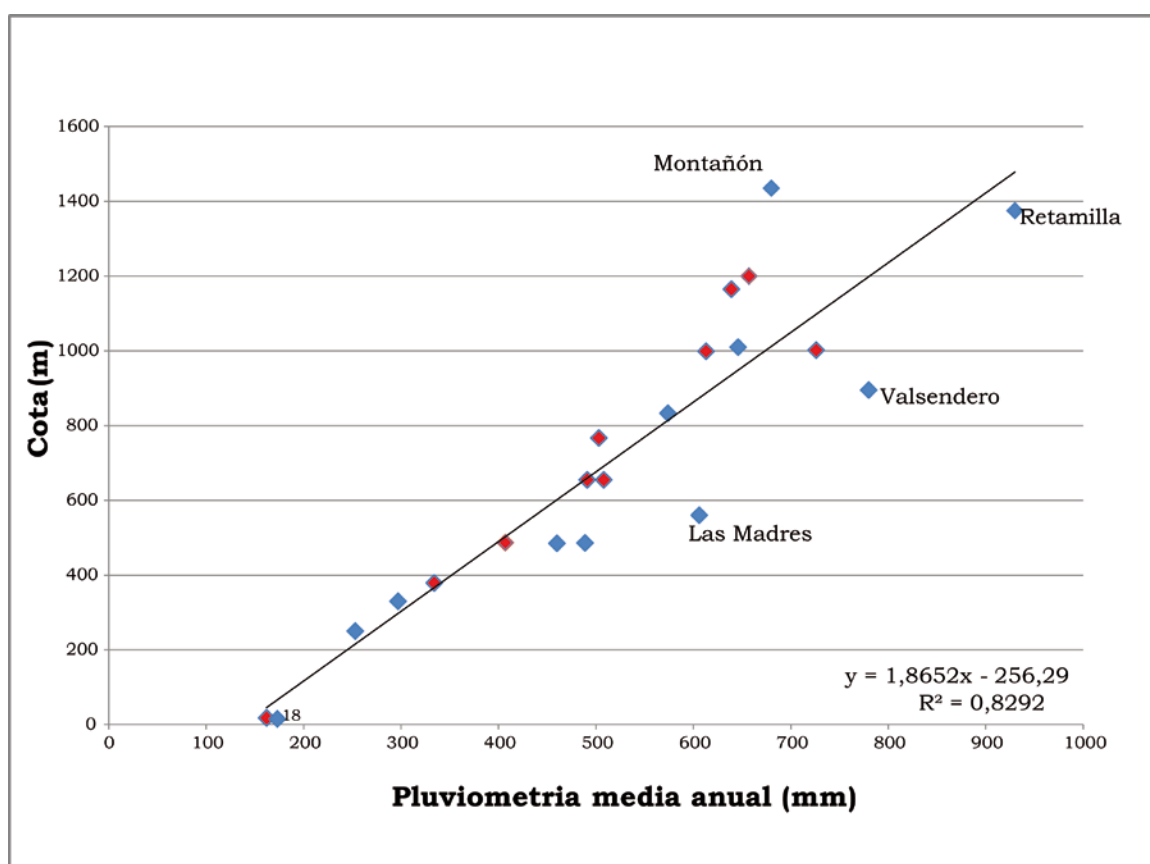


Figura 2.6. Representación gráfica de la pluviometría media anual frente a la cota. Los puntos rojos se corresponden con los datos de las estaciones de la cuenca de Moya y los azules con las estaciones situadas en la cuenca de Azuaje y la intercuenca entre ambas.

Los suelos naturales en la zona están generalmente poco evolucionados y presentan poco espesor. En la zona costera los suelos son de tipo Aridisol, Entisol, Vertisol y, ocasionalmente, Alfisol. Dominan los Aridisoles que ocupan una superficie aproximada del 40% y presentan poco contenido en materia



orgánica, acumulación de carbonatos y generalmente poca fertilidad. En las medianías el predominio de un sustrato piroclástico fácilmente alterable y la elevada humedad ambiental propician la abundancia de suelos como los Alfisoles e Inceptisoles. Los Alfisoles son suelos profundos, de color rojo fuerte, textura arcillosa, con moderado contenido en materia orgánica, alta capacidad de retención de agua y nutrientes y con fertilidad natural alta. Los Inceptisoles se corresponden con suelos pardos, desaturados en base, pedregosos, de espesor variable y con alto contenido en materia orgánica. En las zonas de cumbre los suelos dominantes son los Inceptisoles, Entisoles y en menor representación Andisoles (Sánchez Díaz, 1995).

En toda la zona se encuentran suelos transportados, conocidos en la isla como “de sorriba”. Esta práctica consiste en la adecuación de terrenos poco favorables para la agricultura debido a las grandes pendientes o a la falta de suelo natural mediante la construcción de terrazas rellenas con suelos de otras zonas de la isla o el vertido de estos suelos donde los malpaíses no permiten el cultivo.

Las comunidades vegetales naturales existentes en la zona pueden ser clasificadas en función de sus características bioclimáticas, definidas principalmente por la clase agrológica de suelo, la pendiente y tres parámetros climatológicos: pluviometría, evapotranspiración y temperatura. Teniendo en cuenta estas características, se distinguen en la zona de estudio los siguientes tipos (P.R.U.G. del Parque Rural de Doramas, 2004):

- Comunidades del piso Basal, desde los 20 a 300 m de altitud. Comunidad de tolda (*Euphorbia aphylla*), Comunidad de tabaiba dulce (*Euphorbia balsamifera*), Comunidad hidrofítica, Comunidad de matorrales mixtos xerófilos, pastizales áridos (cerrillares) y cultivos intensivos (plataneras, donde aún persisten).
- Comunidades termófilas. Ocupan fundamentalmente las superficies llanas situadas en la parte superior entre los Bcos. de Azuaje y Moya. Las unidades de vegetación características son los bosquetes de almácigos y los matorrales de granadillo.
- Comunidades del Piso montano subhúmedo, que se encuentran en las áreas ocupadas por el antiguo “monte-verde”. Las comunidades presentes en este piso son: relictos de Laurisilva, fragmentos de fayal-brezal, saucedas, escobonales, codesares, retamares, matorrales mesófilos, pastizales eutróficos, helechales, eucaliptales, bosquetes de castaños, pinares de repoblación, repoblaciones de Laurisilva y cultivos de medianías.

- Comunidad del Piso montano seco que aparece en las zonas altas y se encuentra dominado por el pino canario y el fayal-brezal.

Dentro de la zona de estudio se sitúa el Parque Rural de Doramas (Fig. 2.4), declarado por la Ley 12/1987, de 19 de junio, de Declaración de Espacios Naturales de Canarias como parque natural de Doramas y reclasificado por la Ley 12/1994, de diciembre, de Espacios Naturales de Canarias como parque rural. La vegetación potencial del espacio corresponde al Monte-verde macaronésico. La actividad antrópica ha modificado esta vegetación, que en el pasado se extendía por el norte y noreste de Gran Canaria, relegando la presencia de este bosque a unos pocos relictos en el área así como laderas y escarpes de difícil accesibilidad, pero en los últimos años se ha producido cierta recuperación natural. El parque cuenta con 30 endemismos de la isla de Gran Canaria, 126 endemismos del Archipiélago Canario y 30 endemismos de la región de la Macaronesia.

### **2.3.2 Características hidrogeológicas**

La complejidad geológica de la zona de estudio dificulta el conocimiento del funcionamiento del sistema acuífero. Los depósitos volcánicos engloban materiales de naturaleza lávica y piroclástica, cuyo comportamiento hidrogeológico está condicionado por los procesos evolutivos que sufren a lo largo del tiempo. Esto da lugar a materiales con altas heterogeneidad y anisotropía y determina el comportamiento hidráulico. Todas estas circunstancias hacen que las variaciones de sus propiedades hidrogeológicas sean muy grandes en cortas distancias y según la orientación.

Según los estudios previos a nivel insular (SPA-15, 1975), la recarga se produce principalmente en las zonas altas y medias de las cuencas estudiadas, que se consideran las zonas de mayor recarga de la isla. La red de drenaje está formada por numerosos barrancos que a principios del siglo pasado fluían durante meses; esto no ocurre en la actualidad debido a la desaparición de muchos de los manantiales (“nacientes”) existentes antaño, como se verá más adelante en el apartado 4.2.1 Nacientes.

En el proyecto SPA-15 se estimó el coeficiente de escorrentía por cuencas para los años hidrológicos 1970-1973 a partir de datos de lluvia diaria. Los datos obtenidos para las cuencas estudiadas se recogen en la tabla 2.4.

El aprovechamiento de las aguas superficiales se realiza mediante embalses o presas de propiedad privada, que además de aprovechar la escorrentía sirven de depósitos reguladores de agua para los cultivos, cuya situación se muestra en la figura 2.4. La tabla 2.5 recoge los datos de capacidad de embalse de las presas o embalses más grandes presentes en la zona de estudio.

Tabla 2.4. Valores medios del coeficiente de escorrentía para las cuencas estudiadas (SPA-15, 1975)

Cuenca o intercuenca	Superficie km <sup>2</sup>	Precipitación		Aportaciones		Coeficiente de escorrentía
		mm/a	hm <sup>3</sup> /a	mm/a	hm <sup>3</sup> /a	
Moya	27,91	698	19,6	71	2,0	0,10
Intercuenca Moya-Azuaje	8,44	688	5,9	68	0,6	0,10
Azuaje	30,90	806	24,9	68	2,1	0,08

Tabla 2.5. Presas y estanques de la zona de estudio. (PHGC, 2010)

Cuenca o intercuenca	Nombre	Capacidad de los embalses (hm <sup>3</sup> )	Estanques (>= 5000 m <sup>3</sup> )	
			m <sup>3</sup>	Nº
Moya	Los Mondragones	0,475	2,60	14
	Los Mondragones II	nd		
	Los Verdugos	nd		
	La Jurada	0,028		
Intercuenca Moya-Azuaje	Cabo Verde	0,0406	0,61	35
	Los Caiderillos	0,0371		
	La Cañada	nd		
	Trujillo	nd		
	El Moreto	nd		
Azuaje	Don Chano	nd	0,07	4

nd = no disponible

El aprovechamiento del agua subterránea se lleva a cabo mediante pozos, galerías, sondeos y nacientes, cuya situación espacial se muestra en la figura 2.7. El número de captaciones que aparecen inventariadas en la base de datos del CIAGC en el área de estudio es de 599. En 1997-80 el CIAGC realizó un inventario de puntos de agua, visitando todas las captaciones de la zona; de los 599 expedientes administrativos que aparecen en la base de datos del CIAGC como autorizados, 226 se encuentran como obras inexistentes allí donde están situadas, ya que muchas de las inventariadas anteriormente o no se ejecutaron o varios expedientes administrativos pertenecen a una misma captación. De las 373 obras restantes, 72 aparecen en dicho inventario como abandonadas y 20 como selladas. El Anexo A.2.1. Situación de puntos de agua, incluye mapas de situación de las 373 captaciones presentes en el área de estudio, así como una tabla con los datos de localización e identificación de los puntos de agua. La tabla contiene los siguientes campos: Nº de expediente, tipo de obra, topónimo, coordenadas y observaciones (estado actual de la captación).

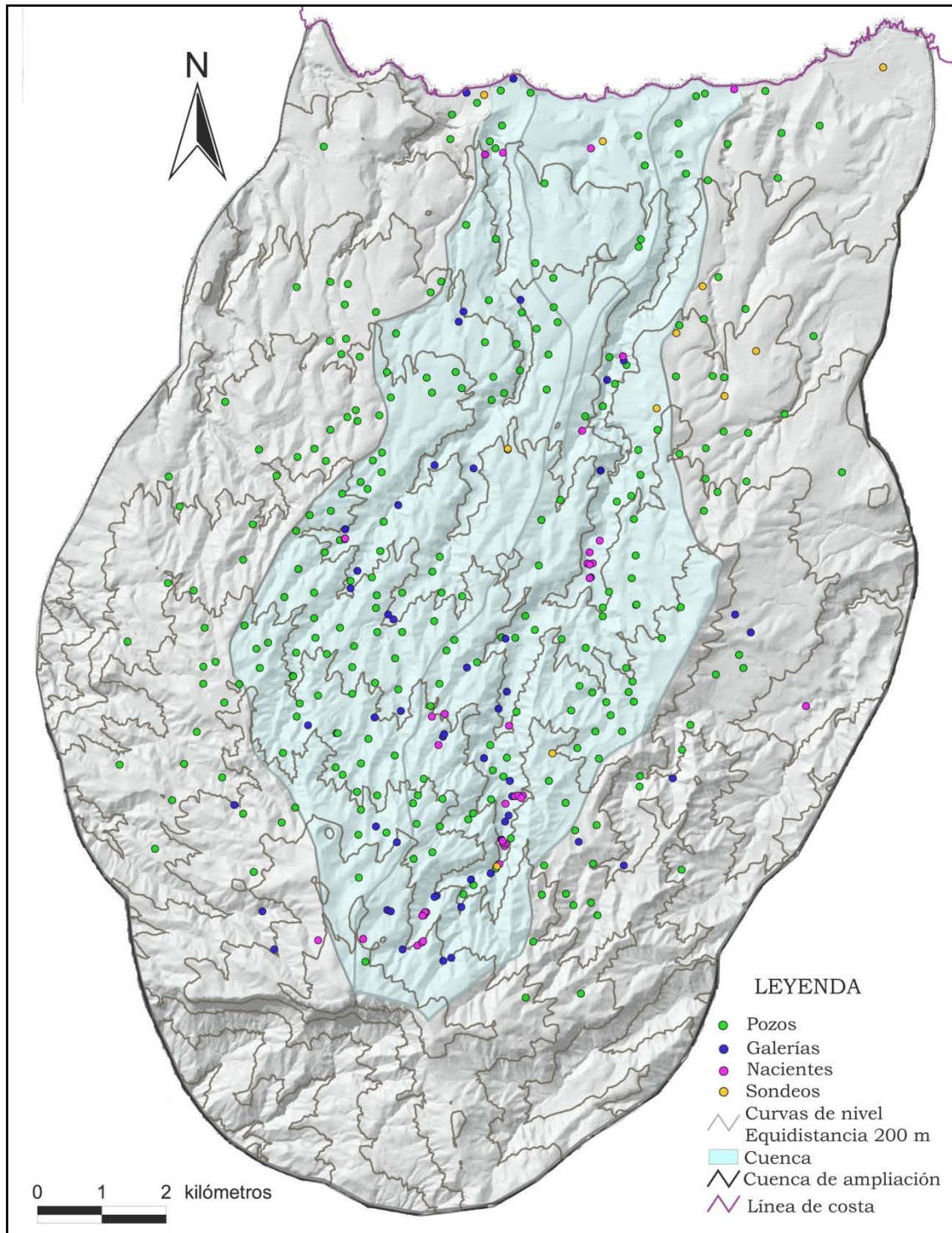


Figura 2.7. Situación de las captaciones existentes en el área de estudio.

A partir de la década de 1930 las extracciones han provocado la desaparición de la mayoría de los nacientes con la necesidad de reprofundizar las galerías y los pozos, y en las últimas décadas la práctica de perforar sondeos en el fondo de los pozos para extender su profundidad de captación.

## 2.4. Socio-economía

Los núcleos de población situados en la zona de estudio surgen por razones de necesidad de asentamiento agrícola y por los repartos de tierras y aguas efectuados tras la incorporación de Gran Canaria a la Corona de Castilla en 1492. La orografía condicionó el asentamiento poblacional, formándose núcleos dispersos por encima de los 600 m de altitud y agrupados por debajo de esa cota.

La población actual de la zona de estudio se encuentra aún diseminada entre cuatro términos municipales: Valleseco, Moya, Firgas y Guía (Tabla 2.6). La aportación poblacional de los municipios de Firgas y Guía es insignificante, siendo Valleseco y Moya los municipios que aportan casi íntegramente toda la población presente en la zona de estudio. Todos estos municipios se encuentran por debajo de los 568 hab/km<sup>2</sup> de densidad media de población de la isla de Gran Canaria (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Datos de población y densidad de población de los municipios que forman parte de la zona de estudio (INE, 2013).

	Valleseco	Moya	Firgas	Guía
<b>Población (hab)</b>	3904	7977	7628	13811
<b>Densidad (hab/km<sup>2</sup>)</b>	170	251	478	326

La evolución demográfica en la actualidad presenta dos aspectos relevantes: a) el despoblamiento progresivo de los núcleos con mayores dificultades de comunicación y con menores perspectivas económicas, por las dificultades tradicionales de la actividad agrícola y por la atracción ejercida por los grandes núcleos urbanos de la isla, y b) el crecimiento localizado de determinados núcleos caracterizados por la existencia de una residencia secundaria o estacional.

La economía ha ido evolucionando con el paso del tiempo. Entre finales del siglo XV y principios del siglo XVI se instalaron cultivos de azúcar y de subsistencia; en el siglo XVII, tras el declive del azúcar, se intensificaron los cultivos de la vid, cereales y hortalizas, y se introdujo el millo (maíz), que se convirtió en el cultivo predominante. Ya en el siglo XVIII la economía se basó en la agricultura, de forma que a finales de este siglo la superficie cultivada se estima en unas 5000 fanegadas, siendo 1 fanegada = 5553 m<sup>2</sup> ([www.villademoya.es](http://www.villademoya.es)). También se desarrollaron algunas actividades artesanales, como alfarería, cestería, manufactura textil y labores de ebanistería. La ganadería se redujo a los animales de transporte, cría de ovejas y cabras para el consumo local y ganado mayor para las labores agrícolas. A

finales del siglo XIX se introdujo el cultivo del plátano en las zonas bajas, manteniéndose el mismo hasta la actualidad, aunque su superficie se ha reducido mucho con respecto a la existente en la década de 1960.

La distribución de los usos del suelo se muestra en la figura 2.8. En las zonas altas abundan espacios naturales que abarcan los bosques y espacios repoblados, el pastizal y el matorral. En la zona de medianías predominan los cultivos de secano, como papas, cereales, leguminosas y frutales, así como prácticamente todas las verduras. La actividad pastoril se combina con la agricultura, destinándose a pastos las zonas menos productivas agrícolamente. En la zona baja, más alterada por la actividad humana, se sitúa el cultivo del plátano destinado a la exportación, localizándose casi su totalidad en las proximidades de las desembocaduras de los barrancos y con los cultivos propiamente tropicales o subtropicales, como mango y aguacate. En esta zona también predominan los tabaibales y cardonales. En la leyenda de la figura 2.8 se muestra el porcentaje de superficie del área de estudio que se destina a cada ocupación del suelo o formación vegetal presente.

En la actualidad el ganado es variado y numeroso, concentrándose en las zonas de medianías, siendo el sistema de explotación preferentemente en estabulación (Tabla 2.7). Una parte de la explotación lechera se destina al consumo fresco y otra para la elaboración de quesos y derivados de la leche en las instalaciones existentes en los municipios de Firgas y Valleseco, y dentro de las mismas explotaciones es tradicional la elaboración de quesos artesanales. En el ganado existe un aprovechamiento cárnico, tanto de engorde como de limpia, y de producción de estiércol. La producción de huevos y pollos de engorde se concentra en Moya. La explotación apícola también se encuentra presente en la zona.

Tabla 2.7. Censo ganadero de los municipios que forman parte de la zona de estudio (Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación del Gobierno de Canarias, 2013).

Municipio	Tipo de ganado (nº de cabezas)			
	Bovino	Caprino	Ovino	Porcino
<b>Firgas</b>	134	238	245	916
<b>Moya</b>	483	813	756	85
<b>Guía</b>	550	899	1207	30
<b>Valleseco</b>	449	504	976	177



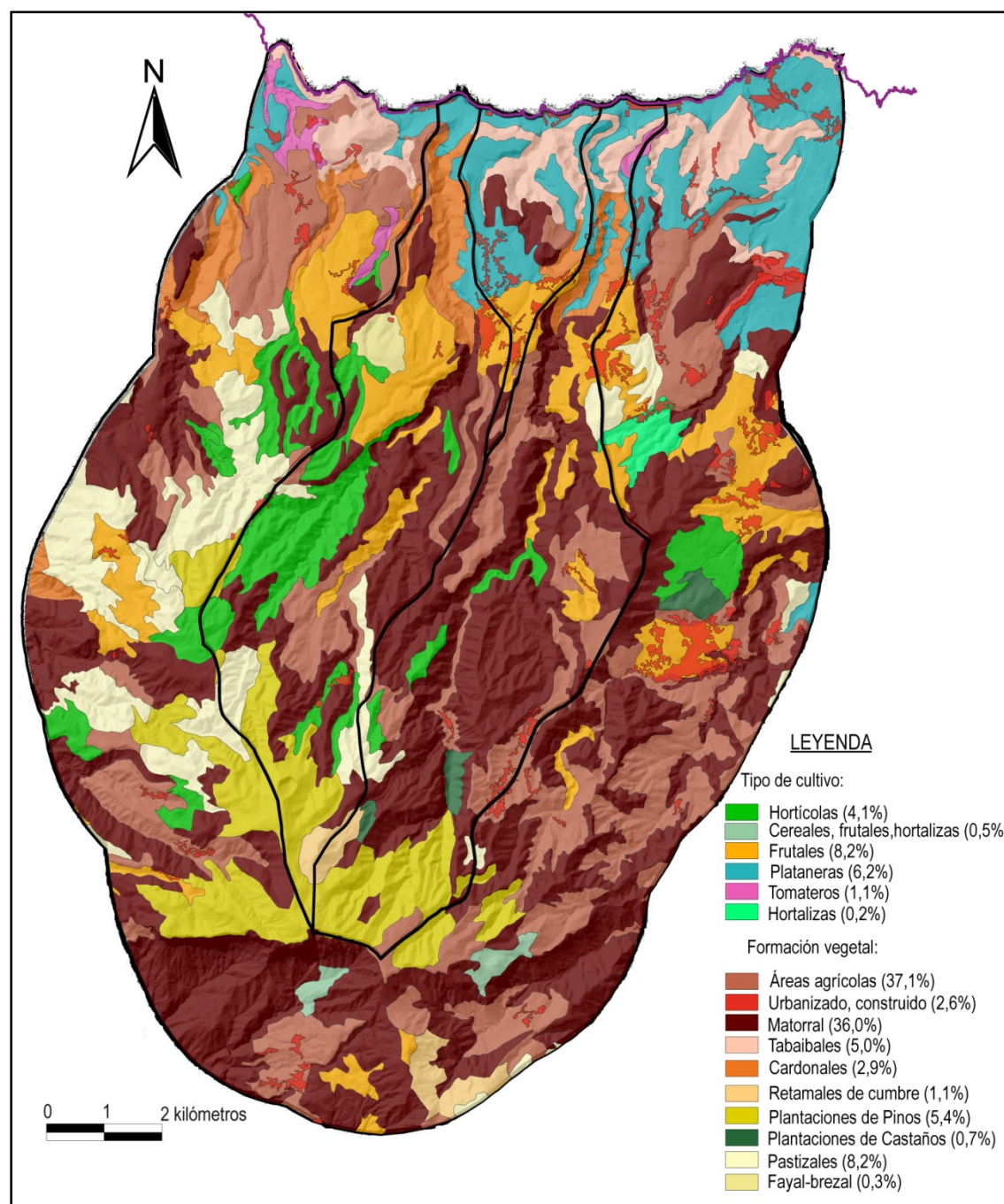


Figura 2.8. Mapa formación vegetal y tipos de cultivos de la zona de estudio (Sánchez Díaz, 1995). Se detalla el porcentaje de superficie que ocupa cada ocupación de suelo.

El fenómeno de minifundio existente en la agricultura y ganadería hace que las extensiones de tierra estén muy disgregadas, lo que lleva a una menor rentabilidad. En los últimos años se ha registrado un descenso de la población dedicada a la actividad agrícola, siendo cada vez más los agricultores que abandonan sus tierras para optar por otros puestos de trabajo, mayormente la hostelería, la restauración y el comercio. El Turismo Rural ha experimentado en los últimos años un gran auge en la zona.





### **3. *Marco geológico***



### 3. Marco geológico

#### 3.1. Marco geológico del Archipiélago Canario

Las islas Canarias se sitúan en la placa litosférica africana, constituyendo un archipiélago volcánico intraplaca. Se han propuesto diversas hipótesis para explicar el origen de las islas, pero la mayoría de la comunidad científica, con el apoyo de datos radiométricos, sísmicos, geoquímicos, cambios morfológicos y estructurales, confirman la existencia de un punto caliente actuando bajo una placa de movimiento lento que provoca una formación secuencial de episodios volcánicos que ha dado origen a las islas (Carracedo et al., 2008). Las edades están de acuerdo con este modelo, de forma que la isla de Fuerteventura, que emergió hace aproximadamente entre 21 y 20 Ma, sería la isla más antigua y la isla del Hierro (1,2 Ma) la más joven.

La formación de los diferentes edificios insulares sigue las pautas o etapas generales de cualquier isla volcánica de punto caliente:

- Una primera etapa constructiva de crecimiento submarino que comprende el 90% del volumen total de las islas; incluye el desarrollo de estructuras intrusivas denominadas Complejos Basales, que comprenden sedimentos, lavas almohadilladas, hialoclastitas, una densa red de diques y rocas plutónicas. Estos materiales pueden ponerse al descubierto posteriormente debido a procesos volcanotectónicos y/o erosivos, como ocurre en las islas de La Palma, La Gomera y Fuerteventura, y se ha encontrado muy recientemente en la base del macizo de Anaga, en Tenerife. Estos complejos basales constituyen el basamento de todas las islas, si bien son tan independientes entre sí, espacial y temporalmente, como lo son los propios edificios insulares.
- Una segunda etapa de crecimiento subaéreo caracterizada por una primera fase de formación de un edificio en escudo, con fases tardías de diferenciación magmática, seguido por un periodo de inactividad volcánica en el que la erosión va desmantelando los edificios insulares y se producen grandes deslizamientos de ladera. Por último se reanuda el vulcanismo, comenzando una etapa de rejuvenecimiento con un vulcanismo volumétricamente mucho menos importante.

En cuanto a la naturaleza del substrato en torno al archipiélago, se trata de una corteza oceánica entre las más antiguas, frías y gruesas del planeta, siendo extremadamente rígida y capaz de sustentar el peso de los edificios

insulares sin signos evidentes de subsidencia (Carracedo et al, 2008), lo que no sucede en el archipiélago de Hawai. No obstante, aún existen algunos autores que plantean la duda sobre si la corteza que se encuentra bajo Lanzarote y Fuerteventura puede ser de tipo transicional al continental (Araña y Ortiz, 1991; Schmincke, 1993; Perez-Torrado, 2000; Carracedo et al, 2002).

### **3.2. Marco geológico de Gran Canaria**

La división cronoestratigráfica de Gran Canaria ha sido objeto de numerosas revisiones, algunas contradictorias entre sí. Sin embargo, a grandes rasgos, su evolución geológica sigue las pautas generales de cualquier isla volcánica de punto caliente, que puede dividirse en tres etapas:

- Etapa de crecimiento submarino
- Etapa juvenil (incluyendo escudo, caldera y post-caldera)
- Etapa de rejuvenecimiento o post-erosiva

Estas dos últimas etapas están separadas entre sí por un amplio periodo ( $\approx 3$  Ma) de escasa a nula actividad volcánica (Carracedo et al., 2002; Pérez-Torrado, 2008). La figura 3.1 muestra la cartografía geológica simplificada de la isla, con indicación de las edades en millones de años (Ma), mientras que la figura 3.2 recoge la división cronoestratigráfica de la misma según las últimas revisiones (Pérez-Torrado, 2008).

#### **3.2.1. Etapa de crecimiento submarino**

En Gran Canaria, al no existir afloramientos de estos materiales, los únicos datos con que se cuenta para esta etapa proceden de campañas oceanográficas, fundamentalmente la desarrollada en 1994 dentro del programa ODP (leg 157). En los sondeos realizados en estas campañas sólo se penetraron 300 m de materiales que pueden asignarse a esta etapa, constituidos básicamente por tobas de hailoclastitas y depósitos de debris flow (Schmincke, 2010).

Los perfiles sísmicos y batimétricos indican que esta etapa supone más del 90% del volumen total de la isla (Schmincke y Sumita, 1998). En este proceso constructivo se registran las mayores velocidades de aporte de materiales a las faldas sumergidas de la isla. Aunque no se tienen datos geocronológicos precisos para la etapa submarina, Schmincke y Sumita (1998) estiman que no se extendió más allá de los 16 Ma.

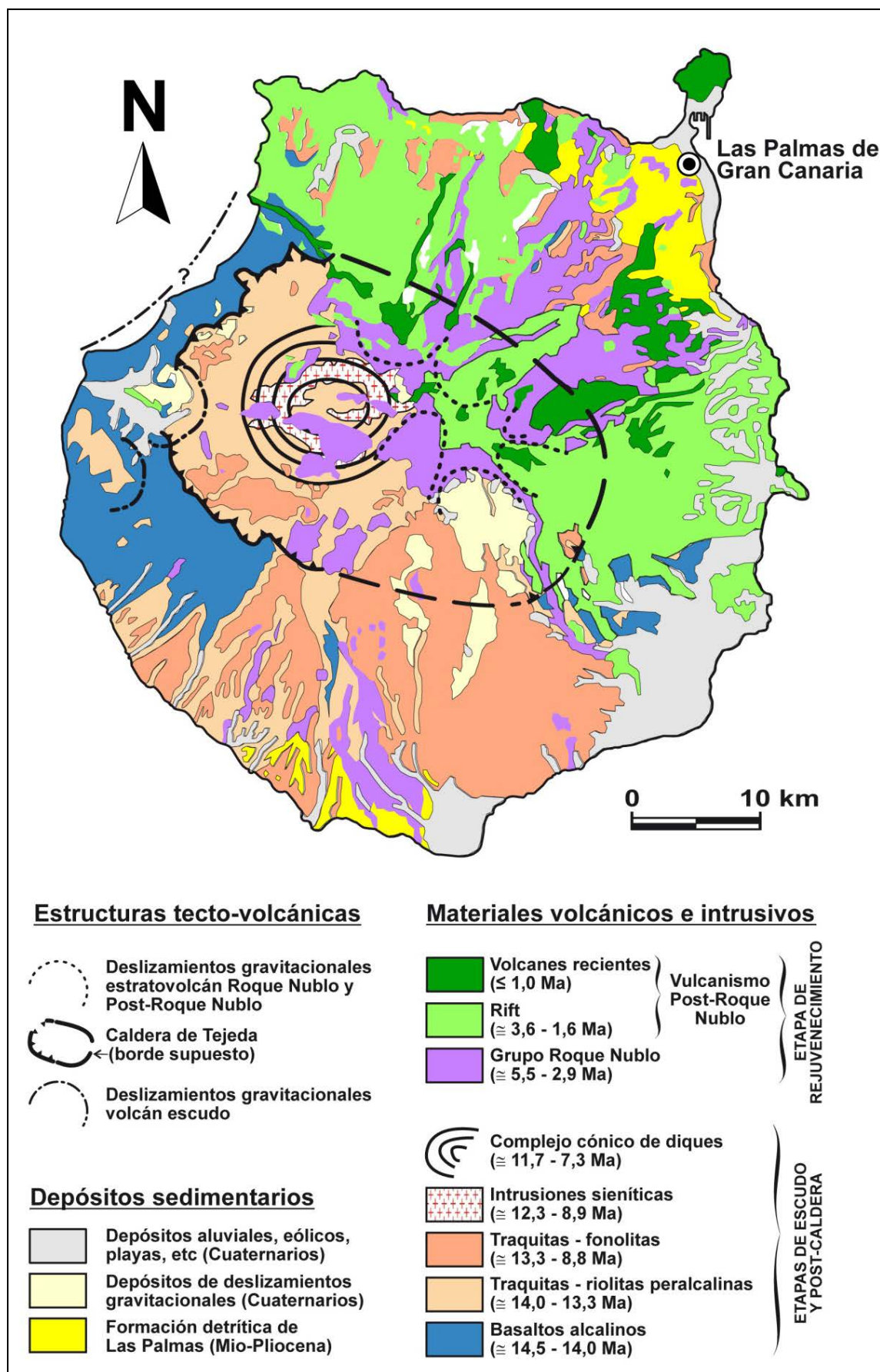


Figura 3.1. Mapa geológico simplificado de Gran Canaria (Pérez-Torrado, 2008).

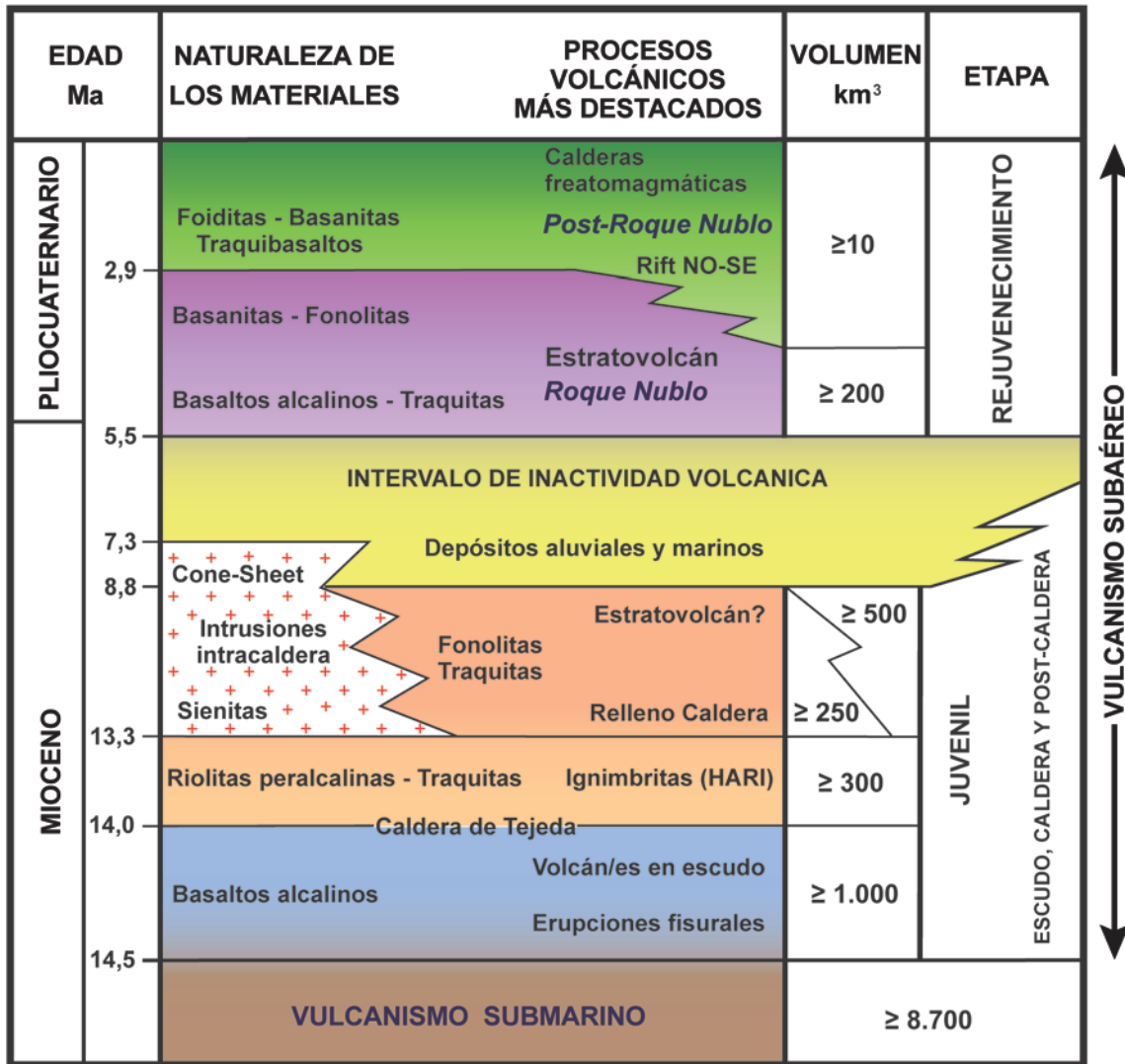


Figura 3.2. Cuadro resumen de la división cronoestratigráfica de Gran Canaria (modificado de Pérez-Torrado, 2008).

### 3.2.2. Etapa juvenil

Es el estadio de mayor duración en el crecimiento subaéreo de la isla, prolongándose desde los 14,5 hasta los 8,8 Ma. Comprende tres etapas bien diferenciadas que se corresponden con el crecimiento de un volcán en escudo (shield stage en la terminología anglosajona), el desarrollo de una caldera de colapso y la posterior reactivación volcánica (fase post-caldera).

#### 3.2.2.1. Edificio en escudo

Se corresponde con la emisión de más de 1000 km<sup>3</sup> de lavas por encima del nivel del mar, que conformaron un complejo edificio volcánico en escudo, con alturas máximas de 2000 m y diámetro semejante al de la isla actual, pudiéndose extender algunos kilómetros más hacia el Oeste (Schmincke, 1976,

1993; Balcells et al., 1990). En la actualidad estos materiales afloran fundamentalmente en los acantilados costeros del O y SO de la isla, donde pueden alcanzar potencias de hasta 1000 m. El mecanismo de emisión fue de tipo hawaiano, con emisión continua de lavas (basaltos alcalinos a traquibasaltos) y escasas intercalaciones piroclásticas, alimentado a través de una red de diques (Caracedo et al, 2002). Las edades obtenidas para esta etapa indican un breve periodo de tiempo de emisión entre hace 14,5 y 14,0 Ma. (McDougall y Schmincke, 1976; Bogaard et al., 1988; Bogaard y Schmincke, 1998) (Fig.3.3)

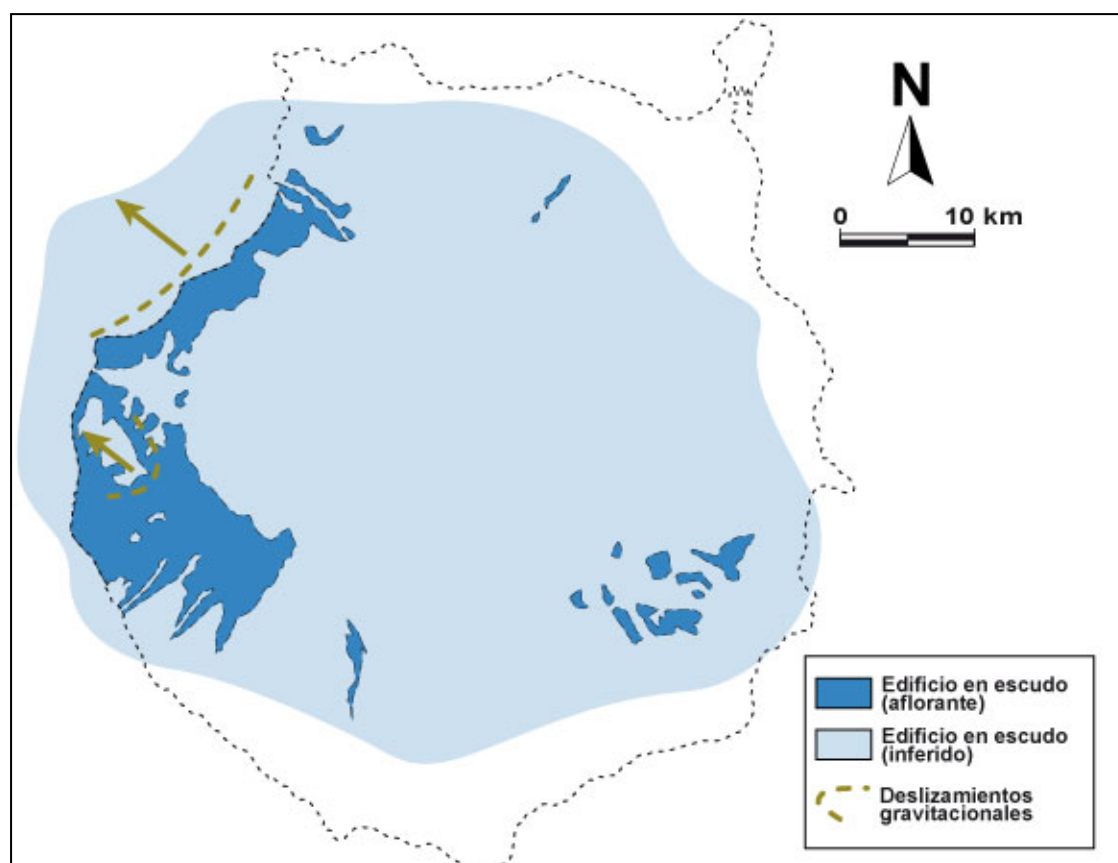


Figura 3.3. Distribución de los materiales volcánicos correspondientes a la etapa inicial del edificio en escudo y deslizamientos ocurridos en esa etapa entre 14,5 a 14,0 Ma (modificado de Socorro et al., 2005).

### 3.2.2.2. Caldera de colapso

En los momentos finales de la formación del volcán en escudo de la etapa anterior parece generarse una cámara magmática riolítica, emplazada a escasa profundidad ( $\approx 4-5$  km) y alimentada periódicamente por un reservorio basáltico más profundo (a unos 14 km), sublitosférico (Freundt y Schmincke, 1992). Ese magma riolítico provocó las primeras erupciones altamente explosivas en la isla y la subsiguiente formación de ignimbritas. La rapidez en la emisión de las lavas



del volcanismo en escudo, unido al brusco vaciado de la cámara magmática riolítica en estas erupciones ignimbríticas, fueron posiblemente la causa del colapso de la zona de cumbre del edificio insular y la formación de la denominada Caldera de Tejada (Schmincke, 1967; Hernán, 1976). Esta caldera, con una morfología elíptica en planta (eje mayor de 35 km, eje menor de 20 km y salto interno de colapso estimado de 1000m) constituye el rasgo tectono-volcánico más importante de la isla (Fig.3.4).

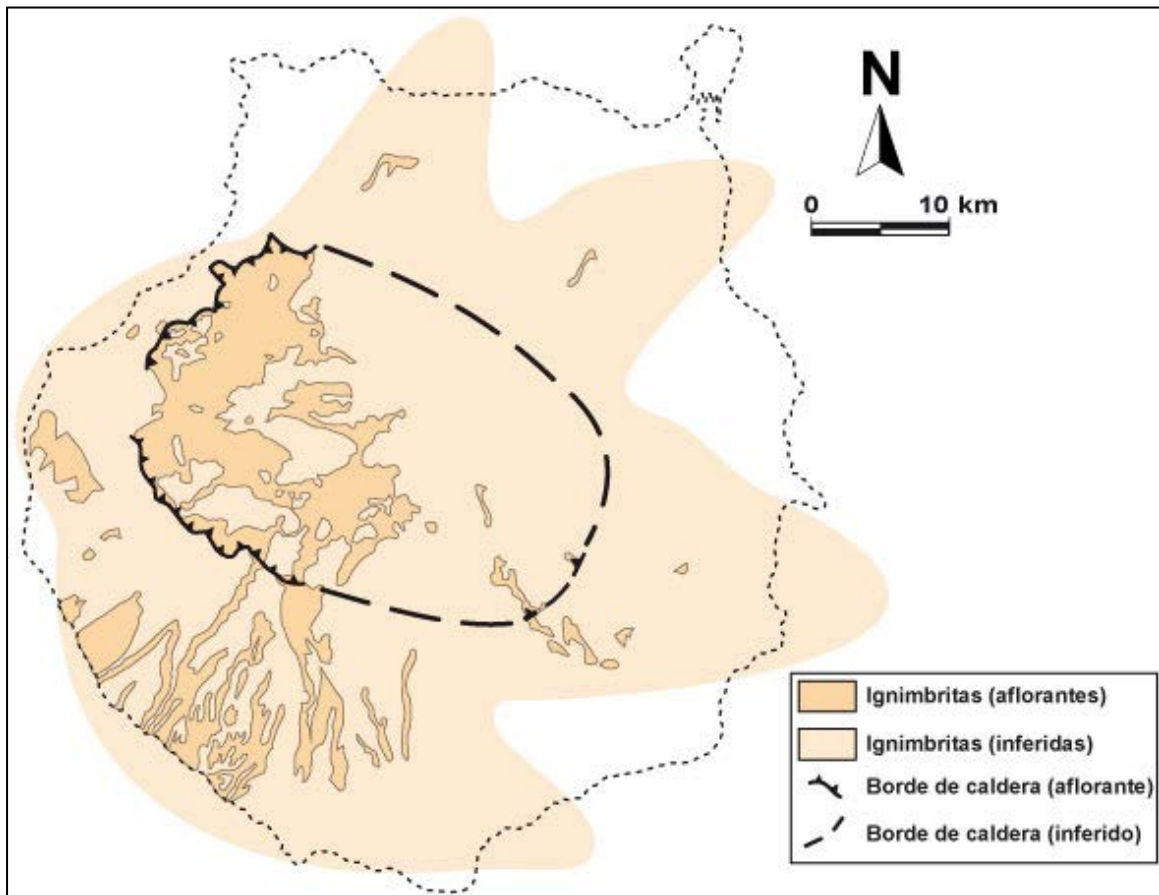


Figura 3.4. Distribución de depósitos traquíticos-riolíticos (ignimbritas) emitidos en la primera fase de resurgencia caldérica y delimitación de la Caldera de Tejada (14,0 a 13,3 Ma) (modificado de Socorro et al., 2005).

### 3.2.2.3. Estadio post-caldera

Este estadio post-caldera se caracteriza por la emisión de grandes volúmenes de materiales sálicos ( $\approx 1000 \text{ km}^3$ ) por las fracturas circulares de los bordes de la caldera (ring fractures). Una gran parte de estos materiales son depósitos ignimbríticos con textura en flamas, incluso con pliegues reomórficos, lo que pone de manifiesto temperaturas de emplazamiento elevadas ( $>650^\circ$ ) y mecanismos eruptivos tipo colapso instantáneo de la columna piroclástica (boiling over). Pueden distinguirse dos fases en este estadio, la primera



dominada por materiales de composición riolítica peralcalina-traquítica (14,0 a 13,3 Ma, volumen emitido  $\geq 300 \text{ km}^3$ ) y la segunda por traquitas-fonolitas (13,3 a 8,8 Ma, volumen emitido  $\geq 500 \text{ km}^3$ ). En ambas fases, los magmas proceden de cámaras magmáticas someras periódicamente realimentadas por material basáltico más profundo sometido a diferenciación magmática, fundamentalmente cristalización fraccionada (Schmincke, 1976, 1993)(Fig.3.5).

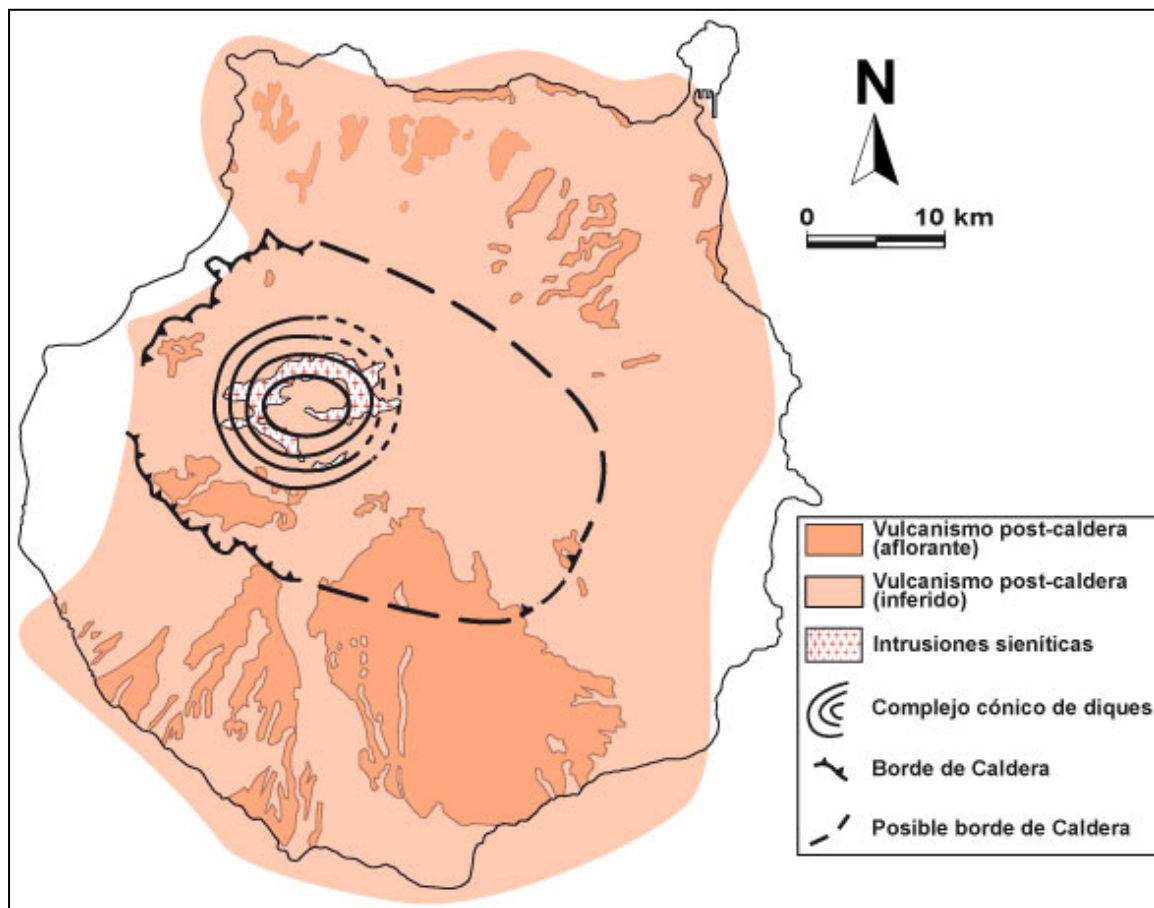


Figura 3.5. Distribución de materiales traquítico-fonolíticos en los dominios intra y extracaldérico y magmatismo intrusivo (14,0 a 7,3 Ma) (modificado de Socorro et al., 2005).

### 3.2.3. Etapa de inactividad volcánica

Al final de la etapa juvenil la isla entra en un largo periodo de inactividad volcánica que se prolonga durante unos 3 Ma. No obstante, en sus sectores N pudieron existir eventos eruptivos residuales de naturaleza fonolítica (Pérez Torrado et al., 2000; Schneider et al., 2004).

El rasgo más característico de este periodo es el desarrollo de un relieve erosivo asociado a una red radial de barrancos, los que excavaron los materiales sálicos hasta alcanzar el substrato basáltico del edificio en escudo. Esta red de barrancos (paleo-barrancos) condiciona en gran medida la distribución de los

depósitos volcánicos posteriores y, a grandes rasgos, mantiene sus pautas de distribución hasta la actualidad.

Los materiales procedentes de esta actividad erosiva se acumularon principalmente en las zonas litorales del NE, E y S, constituyendo el denominado Miembro Inferior de la Formación Detrítica de las Palmas (FDLP) (Gabaldón et al., 1989; Balcells et al., 1992)

### **3.2.4. Etapa de rejuvenecimiento**

Se trata de un estadio post-erosivo bastante más complejo que los existentes en otras islas de punto caliente, con formación incluso de un gran edificio central, pero manifestando la típica dispersión espacio-temporal característica de este estadio al final de la evolución. Por otro lado, con este estadio evolutivo coincide el hecho de una drástica disminución en el volumen de material emitido y el progresivo aumento en la alcalinidad de los magmas. Esta etapa abarca desde los 5,5 Ma hasta la actualidad y comprende varias fases de actividad volcánica, que pueden agruparse en dos, Roque Nublo y Post-Roque Nublo.

#### **3.2.4.1. Roque Nublo**

Entre los 5,5 y los 2,9 Ma en los sectores centrales de la isla se genera un complejo edificio volcánico, el estratovolcán Roque Nublo (Pérez-Torrado, 2000). Sus primeras erupciones, de carácter efusivo, emiten lavas de basanitas-basaltos alcalinos, que son canalizadas a través de la red de paleo-barrancos. La composición del magma va evolucionando hacia términos traquítico-fonolíticos a medida que la actividad efusiva del volcán prosigue, con el desarrollo de mecanismos eruptivos más explosivos. Comienza la emisión de potentes depósitos ignimbríticos que se asocian a erupciones de carácter vulcaniano-freatomagmático (Pérez-Torrado et al., 1997). Al final de la evolución, este edificio sufre una serie de colapsos gravitacionales que generan una serie de depósitos de avalancha volcánica que pueden seguirse durante más de 25 km a lo largo de la isla (García Cacho et al, 1994; Mehl y Schmincke, 1999) y que han sido también reconocidos en los sondeos submarinos del proyecto ODP (Schmincke y Sumita, 1998) (Fig.3.6).

#### **3.2.4.2. Post-Roque Nublo**

Esta fase abarca desde los 3,5 Ma hasta la actualidad. Por tanto, en zonas de cumbres y medianías de la isla, su inicio se solapa temporalmente y espacialmente con las últimas manifestaciones del estratovolcán Roque Nublo (Guillou et al., 2004; Pérez-Torrado, 2008). En esta fase la actividad volcánica se

caracteriza por erupciones estrombolianas asociadas a una estructura tipo rift, con orientación NO-SE, que se forma principalmente entre los 2,9 a 1,7 Ma.

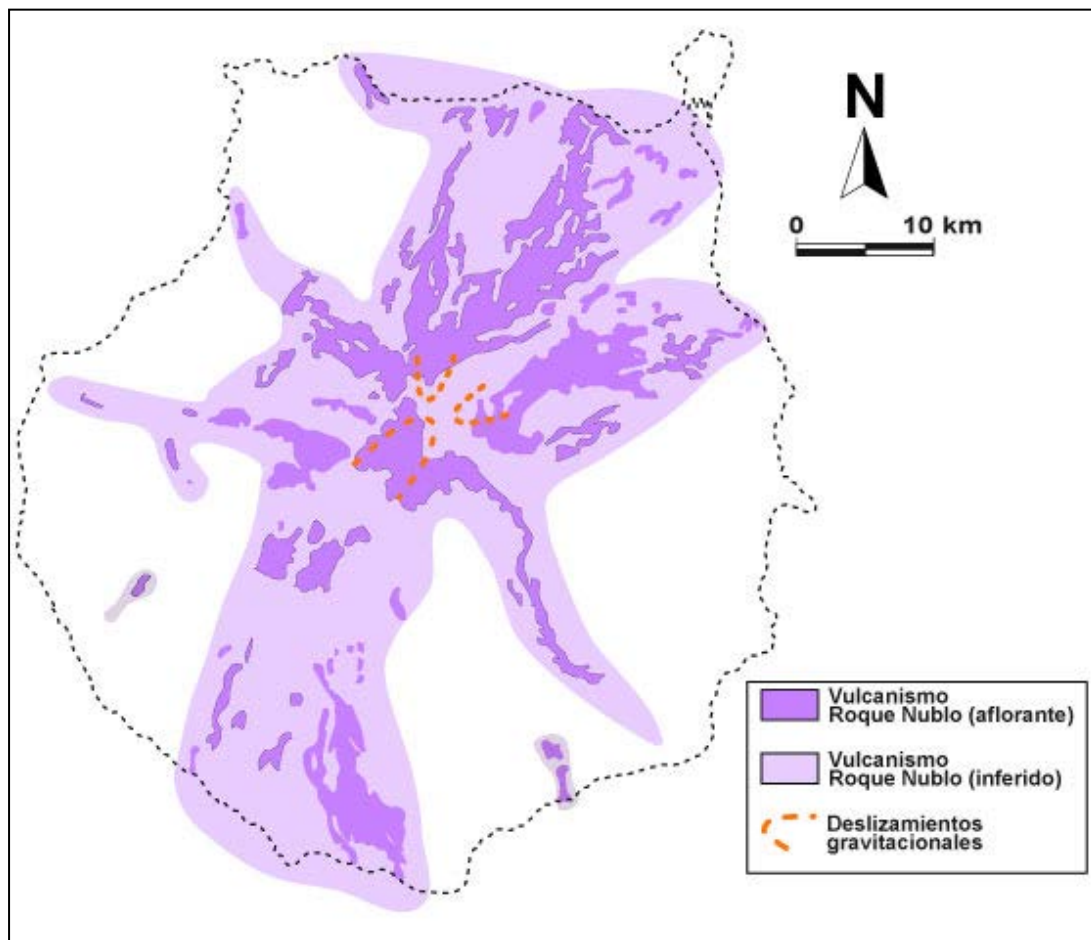


Figura 3.6. Distribución de los materiales del Grupo Roque Nublo. Se indican los deslizamientos gravitacionales que produjeron el Volcán Roque Nublo (modificado de Socorro et al., 2005).

Esta estructura tipo rift sufrirá con posterioridad una serie de colapsos laterales, con producción de depósitos de avalancha volcánica, condicionando la distribución del vulcanismo posterior, que quedará anidado en las cuencas de deslizamiento y con una mayor dispersión espacial de sus centros (Hansen, 2009).

El conjunto de los materiales Post-Roque Nublo cubren a los de estadios anteriores en amplias superficies de la mitad septentrional de la isla, alcanzando potencias locales de hasta 500 m, lo que supone un volumen de emisión de  $>30 \text{ km}^3$  (Hansen, 2009) (Fig.3.7).

Las últimas manifestaciones del vulcanismo Post-Roque Nublo son de edad holocena y se corresponden con la formación de pequeños conos estrombolianos y calderas freatomagmáticas muy bien conservados, así como por campos de lavas siempre ubicados a fondo de barranco, sin apenas incisión aluvial (Rodríguez-González, 2009; Rodríguez-González et al., 2009).

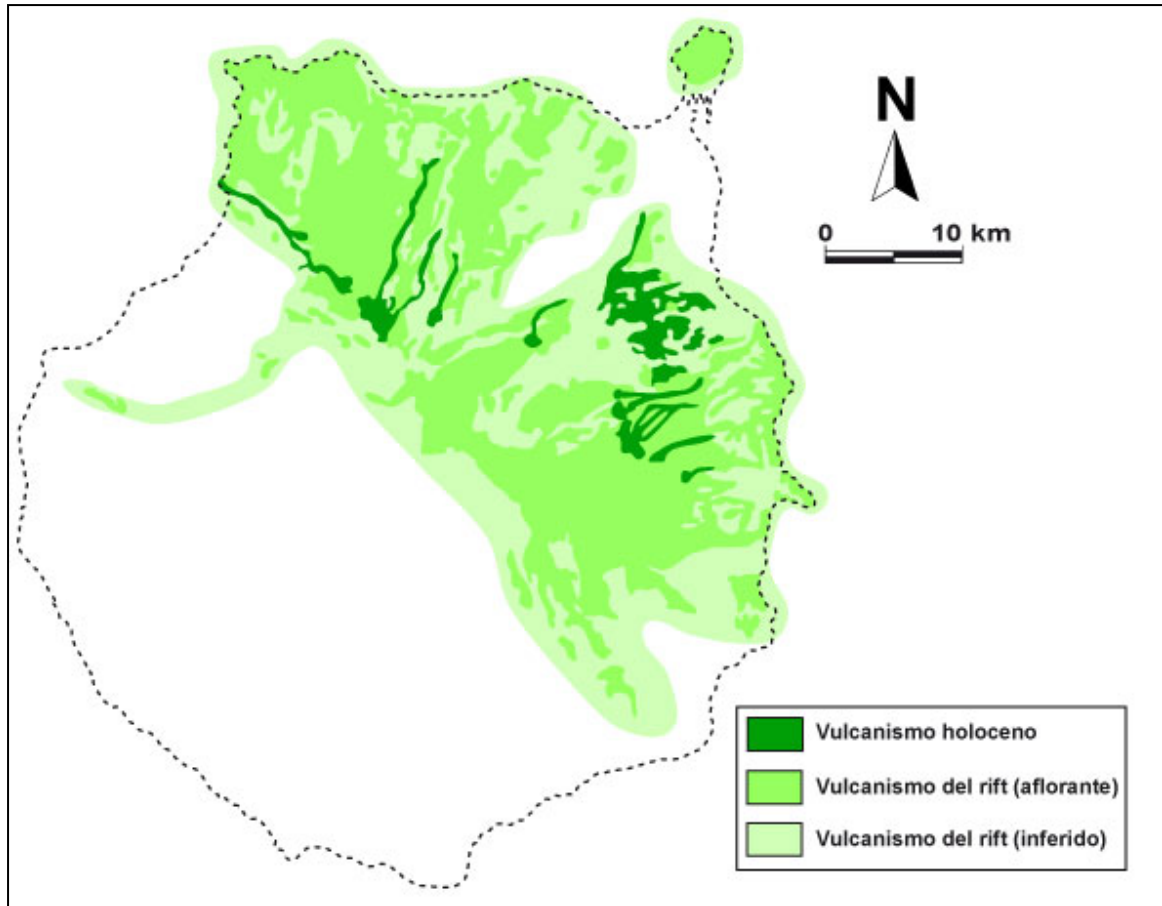


Figura 3.7. Distribución del vulcanismo Post-Roque Nublo (3,6 Ma a la actualidad) (modificado de Socorro et al., 2005).

A lo largo del vulcanismo Post-Roque Nublo los magmas van presentando mayor alcalinidad y subsaturación, de forma que el vulcanismo holoceno presenta mayoritariamente composiciones basaníticas y foidíticas.

En la actualidad, únicamente los agentes geológicos externos actúan sobre la isla, modelando un relieve que en sus grandes rasgos parece que viene ya impuesto desde épocas miocenas. La actuación de los agentes erosivos, principalmente movimientos de ladera, aguas de arrollada y acción del mar y viento, han originado una serie de depósitos sedimentarios que se acumulan preferencialmente en las zonas costeras y a lo largo de los cauces de la red radial de barrancos. Por otro lado, en el litoral existen varios niveles marinos fósiles a distintas cotas que reflejan algunas de las oscilaciones eustáticas de finales del Cuaternario (Carracedo et al., 2002).

### 3.3. Geología del área de estudio

En el área de estudio afloran fundamentalmente materiales pertenecientes a la fase de rejuvenecimiento, aunque en profundidad se encuentran materiales

pertenecientes a la fase tardía del estadio juvenil (materiales sálicos). La geología superficial se ha simplificado a partir de la cartografía geológica realizada por el Instituto Geológico y Minero de España (Balcells et al., 1990) y de estudios recientes dedicados a la caracterización del vulcanismo Post-Roque Nublo (Hansen, 2009; Rodríguez-González, 2009). La geología subterránea se ha reconstruido a partir de la interpretación de columnas litológicas de pozos recopiladas en estudios anteriores (SPA-15, 1975; MAC-21, 1983; PHGC, 1990).

### 3.3.1. Geología superficial

Los materiales que afloran en el área de estudio (Fig. 3.8) pertenecen principalmente a la etapa de rejuvenecimiento de la isla: Grupo Roque Nublo y Grupo Post Roque Nublo. También en cotas bajas se observan afloramientos de materiales de la Formación Fonolítica (13 a 8 Ma), que constituye el substrato visible principal sobre el que se apoyan las formaciones volcánicas más recientes.

#### 3.3.1.1. Formación Fonolítica

Esta formación se encuentra representada al norte de la zona de estudio, cerca de la costa, con afloramientos de gran entidad, formando parte principalmente de relieves localmente elevados. En la costa, la erosión marina y las variaciones eustáticas del nivel del mar han originado en ellos una rasa marina levantada que se extiende a lo largo de toda la franja costera.

Los materiales que integran esta formación son mayoritariamente coladas lávicas, con intercalaciones medianamente extensas pero continuas de ignimbritas, y en menor cantidad de otros tipos de coladas piroclásticas, algunas de tipo coladas de cenizas (ash flow).

- **Coladas.** Se trata de potentes coladas fonolíticas masivas que frecuentemente aparecen asociadas al resto de los tipos litológicos que forman esta unidad volcanológica. En la costa adquieren mayor extensión lateral, debido a que la erosión marina las ha dejado al descubierto. Forman una rasa marina levantada, prácticamente continua, interrumpida por los depósitos aluviales de las desembocaduras de los barrancos. Las coladas integrantes de esta formación tienen potencias métricas, que en ocasiones alcanzan los 10 m, llegando a superar los apilamientos de coladas los 200 m de potencia. En este caso se pueden observar al menos ocho coladas separadas por almogres y en ocasiones también se observan intercalaciones de ignimbritas, con una extraordinaria disyunción columnar vertical y escaso desarrollo escoriáceo en la base y en el techo.



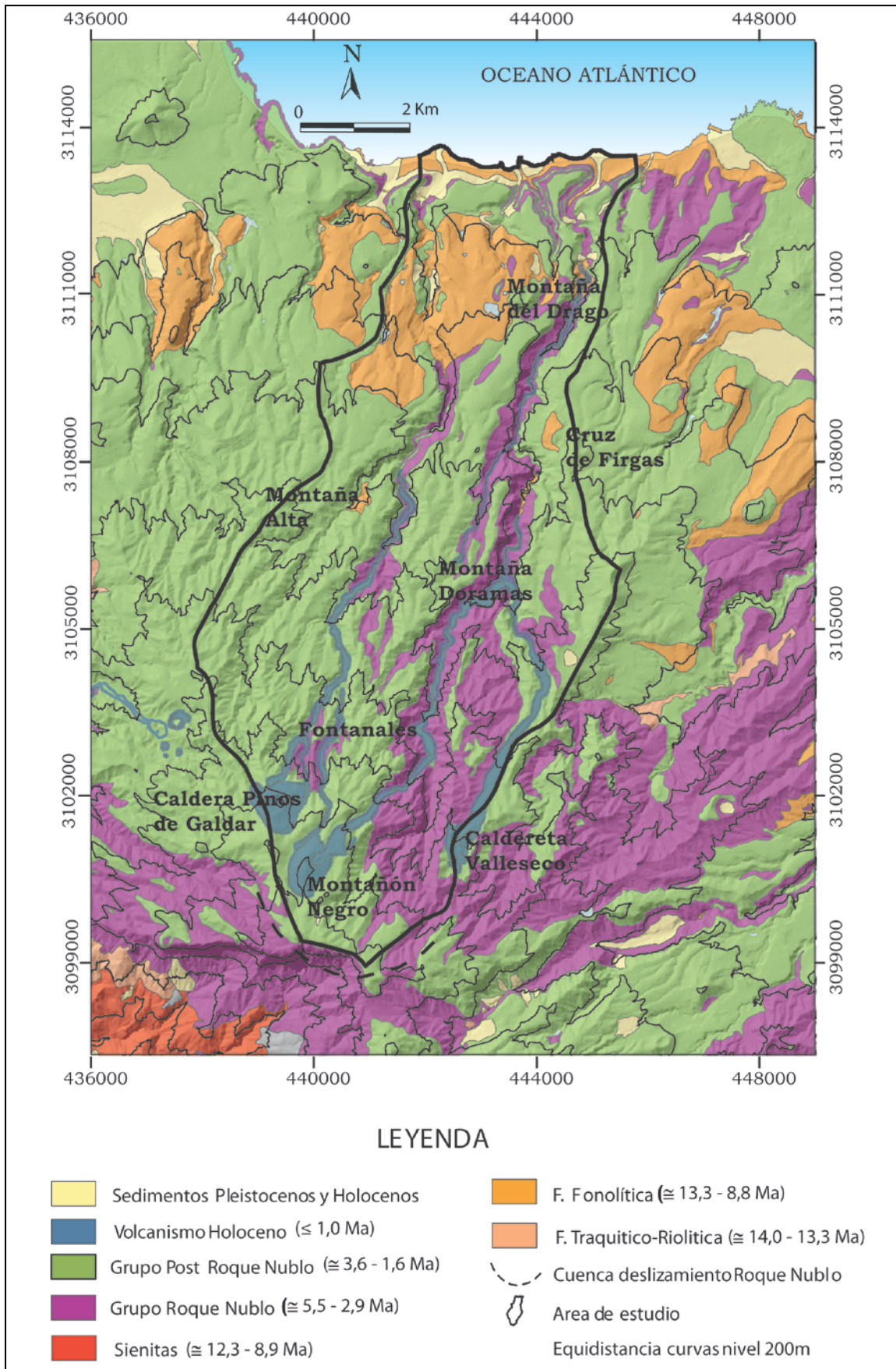


Figura 3.8. Mapa geológico de la zona de estudio (modificado de Balcells et al., 1990 y Rodríguez González, 2009).

- **Ignimbritas y otras coladas piroclásticas.** La potencia observada de los paquetes ignimbríticos varía entre 10 y 60 m (Balcells et al., 1990), con disyunción columnar grosera y un color que fluctúa entre tonos verdosos a beige o pardos. Los fragmentos de pómez suelen estar alargados en horizontal, encontrándose también algunos dispuestos ortogonalmente a aquellos. Los líticos son angulosos y subredondeados, con tamaños que oscilan entre unos pocos milímetros y 10 ó 15 cm, no presentando selección (Balcells et al., 1990). Asimismo, el grado de flameado y soldadura en estas rocas es muy variable, estando prácticamente ausente en algunos afloramientos.

### 3.3.1.2. Grupo Roque Nublo

Presenta una gran diversidad en la génesis de sus materiales. En una secuencia estratigráfica típica del Roque Nublo, un corte transversal pone de manifiesto que durante su formación se produjeron diferentes tipos de materiales como respuesta a determinadas características físicas del magma, mecanismos eruptivos y procesos de transporte diversos. Así, las zonas basales están constituidas por coladas de lava de composición basanítica, basáltica y tefrítica, que constituyen importantes apilamientos, posteriormente cubiertos por enormes volúmenes de brechas volcánicas, también de composiciones similares. Al mismo tiempo que se producían los fenómenos explosivos que originaron las brechas, continuaban las emisiones lávicas, intercalándose numerosas coladas en los mantos brechoides. En los estadios intermedios y finales, además de la actividad puramente volcánica, tienen lugar procesos mixtos que originaron depósitos epiclásticos, frecuentemente de tipo flujo de lodos (mud-flow), que quedaron interestratificados en la secuencia general. Se distinguen los siguientes materiales:

- **Lavas basálticas, basaníticas y tefríticas.** Afloran principalmente en las laderas de los barrancos de Moya y Azuaje, en los que las coladas alternan con depósitos sedimentarios intercalados de tipo conglomerático y de arenas, formando un conjunto unitario con espesores visibles de 80 a 100 m (Balcells et al., 1990). Las coladas son de composición básica, en las que texturalmente predominan las rocas muy masivas o poco vesiculares. En general la matriz es muy afanítica y destacan en ella fenocristales de olivino verdoso-amarillento y piroxenos.
- **Brecha volcánica Roque Nublo.** Estos depósitos piroclásticos están representados por extensos mantos brechoides que se distribuyen radialmente en todas las direcciones a partir de la zona central de la isla, canalizándose por los barrancos y rellenándolos; suelen alcanzar potencias individuales considerables, de 8 a 20 m. Dadas sus

características estructurales, la erosión origina en ellos fuertes escarpes verticales, con alturas de centenares de metros (200 m en el Bco. de Moya y 120 m el Bco. de Azuaje); en los casos en los que el material es menos compacto, la erosión origina cavidades y morfologías cavernosas. La brecha está compuesta por una proporción elevada de fragmentos de roca que constituyen su esqueleto. En general representan el 30-50% de la misma, aunque a veces puede alcanzar el 70%, y están empastados en una matriz fuertemente consolidada de carácter vitroclástica con cristales individuales y fragmentos de pómez.

### **3.3.1.3. Grupo Post-Roque Nublo**

Las coladas del Grupo Post-Roque Nublo se encuentran ampliamente extendidas por toda la superficie de la zona de estudio. Están representadas por materiales lávicos y piroclásticos originados en erupciones fundamentalmente estrombolianas que siguen un régimen de emisión fisural paralelo, principalmente según direcciones NO-SE.

Las coladas en general son de tipo a'a', con bases y techos escoriáceos y zonas centrales masivas y compactas, con potencias variables que oscilan entre 2-3 m hasta 5-6 m, e incluso pueden aparecer coladas muy potentes de hasta 15 m (Balcells et al., 1990). Sus bases escoriáceas y brechoides son frecuentemente bastante potentes. Su composición es fundamentalmente básica, con tendencia basanítica y nefelinitica. El apilamiento de coladas presenta potencias muy considerables, con paquetes de hasta 100 y 150 m, con las coladas individuales separadas por almagres o niveles piroclásticos.

Las condiciones climáticas húmedas de la zona han favorecido la alteración de las coladas y piroclastos, originando un suelo rojizo, de textura granulosa y fácilmente disgregable, con espesores a veces considerables, que habitualmente son aprovechados como terreno de cultivo.

En los materiales del Grupo Post Roque Nublo se encuentran diques muy dispersos, especialmente en áreas cercanas a centros de emisión ya muy desmantelados o enterrados por coladas posteriores. Los diques están formados por rocas afaníticas, en ocasiones con bordes enfriados, y su potencia media oscila entre 1 y 2 m, aunque se pueden encontrar diques de hasta 4 m (Balcells et al., 1990). Al estar los diques más consolidados que los piroclastos encajantes, la erosión diferencial entre ambos materiales origina en ellos resaltes morfológicos muy característicos, a menudo de considerable altura.

Aparecen numerosos centros de emisión que originaron extensos campos de volcanes cuyas emisiones cubrieron grandes superficies de terreno. En el área



de estudio se encuentran los siguientes centros de emisión de edades comprendidas entre 1,7 Ma y 3,6 Ma (localizados en la figura 3.8):

- En el área comprendida entre el Bco. de los Tiles y el Bco. de la Virgen se encuentra el **edificio Montaña Doramas**, a cota 750 m, de planta casi circular, de aproximadamente 550 m x 500 m y perfil cónico, con la escotadura del cráter abierta hacia el norte. Está formado por depósitos tobáceos muy compactos y coloración rojiza, constituidos por lapillis (picones), escorias y bloques muy vesiculares, así como bombas de reducido tamaño. También se encuentra el edificio del Bco. de los Tiles, situado en el fondo del barranco sobre la brecha Roque Nublo, y que está prácticamente enterrado por coladas.
- **Edificio Cruz de Fargas**, compuesto por piroclastos de caída, de planta ameboide, presentando un cierto alargamiento en dirección norte, con la escotadura del cráter abierta hacia el NE. Está formado por acumulación de lapillis de 8 a 20 mm y escorias bastantes soldadas, siendo frecuente encontrar bombas intercaladas con tamaños superiores a 1 m.
- **Edificio Montaña del Drago**, de  $2,91 \pm 0.04$  Ma (Hansen, 2009). Es un cono piroclástico de pequeña entidad, de planta circular y ligeramente alargado. Está constituido por lapillis muy homogéneos y algunas bombas de reducida dimensión.
- **Edificio Montaña Alta**, con cráter abierto hacia el NE, constituido por lapillis finos de 10-20 mm, bastante homogéneos y en menor proporción por escorias basálticas gruesas.
- En los alrededores de Fontanales (localizado en la figura 3.8) se encuentra localizado otro grupo de volcanes compuesto por tres edificios de pequeña entidad y muy mal conservados, los cuales emitieron coladas basanítico-nefeliniticas; sus componentes piroclásticos se encuentran muy oxidados y son bastante compactos.

#### 3.3.1.4. Volcanismo Holoceno

El vulcanismo Holoceno se concentra geográficamente en el norte de Gran Canaria, habiéndose identificado y cartografiado 34 centros de emisión de edades comprendidas entre 1900 y 10600 años (Rodríguez-González, 2009). Este vulcanismo comprende pequeños conos estrombolianos monogenéticos, en su mayoría con cráteres abiertos en herradura, presentando un manto de piroclastos de dispersión horizontal que se extiende en el sentido de los vientos dominantes. Las coladas basálticas de tipo a'a' son las más frecuentes; estas discurren a favor de la pendiente topográfica, pudiendo alcanzar longitudes desde 100 m hasta 10 km y espesores medios desde 1 a 20 m, con anchos medios desde 50 a 400 m (Rodríguez González, 2009).

Los centros de emisión situados en el área de estudio, localizados en la figura 3.8, son:

- **Edificio Caldereta de Valleseco.** No se tiene el dato de la edad, pero es anterior al Edificio Montañón Negro (Rodríguez González. 2009). Está constituido por dos conos. El principal está compuesto por niveles de diversa granulometría, desde escorias a aglutinados, formando estratos soldados. El otro cono está adosado al principal y presenta una estructura escoriácea y aglutinados bien cementados. La emisión de lava se produjo desde los dos conos.
- **Edificio Montañón Negro,** de  $2970 \pm 70$  años (Rodríguez González. 2009). El cono presenta una estructura escoriácea, con derrames lávicos y emplastes intercalados entre los estratos de piroclastos, los que se acumulan en torno a la boca eruptiva. Las emisiones de lavas se producen tanto desde el interior del cráter como desde la base del flanco Oeste del cono. La colada de mayor recorrido emerge desde el interior del cráter, con una morfología muy escoriácea, morfologías a'a' y presencia de bloques erráticos. La colada que emerge en el flanco Oeste presenta morfología escoriácea tipo a'a' de poco espesor.
- **Edificio Caldera de Pinos de Galdar,** de  $2830 \pm 60$  años (Rodríguez González. 2009). Se trata de una caldera de colapso con morfología elíptica en planta, en cuyas paredes se localizan depósitos freatomagmáticos interestratificados con otros de escorias de diversa granulometría y emplastes lávicos.
- **Erupción de Doramas,** de  $2420 \pm 40$  años (Rodríguez González. 2009). Se localiza en la ladera E de la montaña Doramas. Esta erupción no desarrolló ningún cono volcánico y la lava emerge directamente a partir de una fractura o fisura. En el salidero de lava se forman y apilan varias lenguas muy delgadas entre aglutinados y escorias, hasta canalizarse por el Bco. de Azuaje.

### 3.3.2. Geología del subsuelo

#### 3.3.2.1. Origen de los datos

La geología profunda se elabora a partir de la recopilación de información de varios proyectos. En dichos proyectos los datos se obtienen en unas ocasiones, levantando la columna litológica de los pozos de gran diámetro a partir del descenso a los mismos y en otras, a partir de la información que se puede derivar de la escombrera (terrera). También se cuenta con los cortes geológicos elaborados para la reconstrucción paleotopográfica Pre-Roque-Nublo (Pérez-Torrado, 1992).

Los datos utilizados en la reconstrucción geológica proceden de:

- Inventario de puntos de agua del proyecto MAC-21 (1979-1980). De este inventario se cuenta con la información de 27 pozos en los que se describe la geología en algunos puntos a partir de los materiales existentes en la terrera, junto con las descripciones de los maquinistas y/o propietarios de los pozos. La fiabilidad de los datos obtenidos en este proyecto tiene un valor moderado; por ello se ha tomado sólo la información de los contactos de las formaciones geológicas que atraviesan. Se dispone de información de los siguientes pozos: 0713TP, 0751TP, 0770TP, 1073TP, 1083TP, 1251TP, 1277TP, 1364TP, 1485TP, 1607TP, 1829TP, 1863TP, 1898TP, 2172TP, 2496TP, 2659TP, 3078TP, 3098TP, 3193TP, 3228TP, 3232TP, 3310TP, 3346TP, 3813TP, 4351TP, 4392TP y 5503TP.
- Proyectos de inscripción en el registro Insular de Aguas de Gran Canaria, en los que en algunos casos se incluye la columna litológica del pozo. De dicho registro se tiene datos del pozo 1158 TP.
- Inventario realizado para la redacción del proyecto “Actualización del conocimiento hidrogeológico de Gran Canaria” (PHGC, 1991). En él se visitaron 14 puntos de la zona de estudio en los que se levantó la columna litoestratigráfica mediante la bajada al interior de los pozos, por lo que los datos geológicos e hidrogeológicos tienen mayor detalle y precisión. Los pozos visitados en este proyecto en el área de estudio son: 0010TP, 0586TP, 0688TP, 0755TP, 1254TP, 1918TP, 1986TP, 2235TP, 2411TP, 3033BTP, 3968TP, 5323TP, 5327TP y 5417TP.

En aquellas columnas en las que existen datos de diferentes fuentes se toma como descripción preferente las llevadas a cabo en el proyecto del PHGC ya que son datos tomados directamente.

El Anexo A.3.1. Columnas geológicas, incluye un mapa de la situación de las columnas litológicas con las que se cuenta, la descripción de dichas columnas y cinco cortes geológicos realizados con la citada información. En las descripciones de las columnas litológicas de los pozos se señalan los siguientes datos: número de expediente de la captación, nombre, fecha de realización de la columna, coordenadas UTM (datum WGS84, huso 28), cota del fondo, diámetro del pozo, profundidad, fuente de la descripción y descripción de la columna de muro a techo.

### **3.3.2.2. Descripción y geometría de los materiales**

Los materiales presentes en profundidad pertenecen a las siguientes formaciones (Fig. 3.8):

- **Formación Fonolítica.** Es la formación más antigua que aparece en las columnas de los pozos, estando presente en 12 de ellos situados en las zonas bajas del área de estudio y en la cuenca del barranco de Moya principalmente. Según las observaciones realizadas en las visitas, los materiales encontrados serían: alternancias de coladas fonolíticas escoriáceas y masivas, aglomerados y brechas volcánicas e ignimbritas soldadas
- **Grupo Roque Nublo.** Se encuentra presente en profundidad en prácticamente toda la zona de estudio, aflorando en los fondos de los barrancos. Presenta potencias que van aumentando progresivamente desde las zonas costeras a las zonas de cumbre, donde pueden alcanzar 750 m aproximadamente. Los materiales observados son: brechas volcánicas, coladas basálticas que intercalan almagres, conglomerados e ignimbritas.
- **Grupo Post-Roque Nublo y volcanismo Holoceno.** Se trata de los basaltos que cubren la mayor parte de la superficie de la zona de estudio, quedando ausentes en los fondos de los barrancos principales y alcanzando potencias de 300 m en la zona alta de la cuenca del barranco de Moya y de 100 m en la cuenca del barranco de Azuaje. Los materiales descritos en las columnas litológicas que se disponen de los pozos de la zona son: alternancia de coladas masivas y escoriáceas, brechas volcánicas, piroclastos y conglomerados. El volcanismo Holoceno se encaja por algunos barrancos y su representatividad en profundidad es muy exigua.

Para observar la situación espacial de las formaciones que se encuentran en el subsuelo se han elaborado mapas topográficos con las cotas de contacto de dichas formaciones, deducidas a partir de los datos de las columnas litológicas de pozos y de 10 cortes geológicos longitudinales y transversales distribuidos de forma sistemática cada 2,5 km, realizados por Pérez-Torrado (1992).

Con estos datos se ha creado una malla sobre un rectángulo de 13 km x 19,5 km que representa la zona de estudio, situando el vértice superior izquierdo en las coordenadas UTM (datum WGS84, huso 28)  $x = 435345$  e  $y = 3115619$  y el vértice inferior derecho en  $x = 447844$  e  $y = 3096619$ . Esta malla contempla un intervalo entre puntos de 500 m, obteniéndose para cada capa un total de 1014 puntos.

Una vez realizada la malla, a cada punto se le ha asignado un valor que representa la cota de contacto de las formaciones geológicas. A cada punto de la malla se le han asignado tres valores de cota:

- **Cota de muro de la Formación Fonolítica,** tomados de la malla elaborada por Pérez-Torrado (Pérez-Torrado, 1992).

- **Cota de muro del Grupo Roque Nublo**, tomados teniendo en cuenta los perfiles litológicos de pozos y los cortes geológicos.
- **Cota de superficie y muro del Grupo Post-Roque Nublo**, tomados del MDT modelo digital del terreno (MDT).

Para la realización de los mapas se aplica el método de interpolación espacial por krigeado ordinario. La modelización de los techos y muros de las unidades geológicas se ha llevado a cabo mediante el software ArcMap (Fig. 3.9).

A partir de los datos obtenidos en la interpolación se ha elaborado un mapa 3D para tener una visión que refleje la geometría de las diferentes formaciones en el subsuelo. Para ello se han utilizado los software Surfer.8 y ArcMap (Fig.3.10).

De la reconstrucción de la geología del subsuelo se puede deducir la disposición de los paleo-barrancos de la Fm. Fonolítica que han condicionado la distribución de los depósitos volcánicos del Grupo Roque Nublo. La Fm. Fonolítica presenta un paleorrelieve que aflora al NO (hacia la costa) y constituye el sustrato de la zona, sin que hayan aparecido materiales pertenecientes a los Basaltos Miocenos de la etapa de crecimiento en escudo de la isla en ninguna columna descrita en los pozos. Por tanto se desconoce a qué profundidad se encuentran estos materiales, aún cuando éstos constituyen el sustrato profundo en toda la isla.

Los basaltos de los Grupos Roque Nublo, Post-Roque Nublo y Holocenos cubren los materiales anteriores. Los materiales Post-Roque Nublo y Holocenos están más representados al Oeste de la zona (Bco. de Moya) que al Este de la misma (Bco. de Azuaje). Así, en este último aflora el Grupo Roque Nublo en el fondo de los Barrancos.

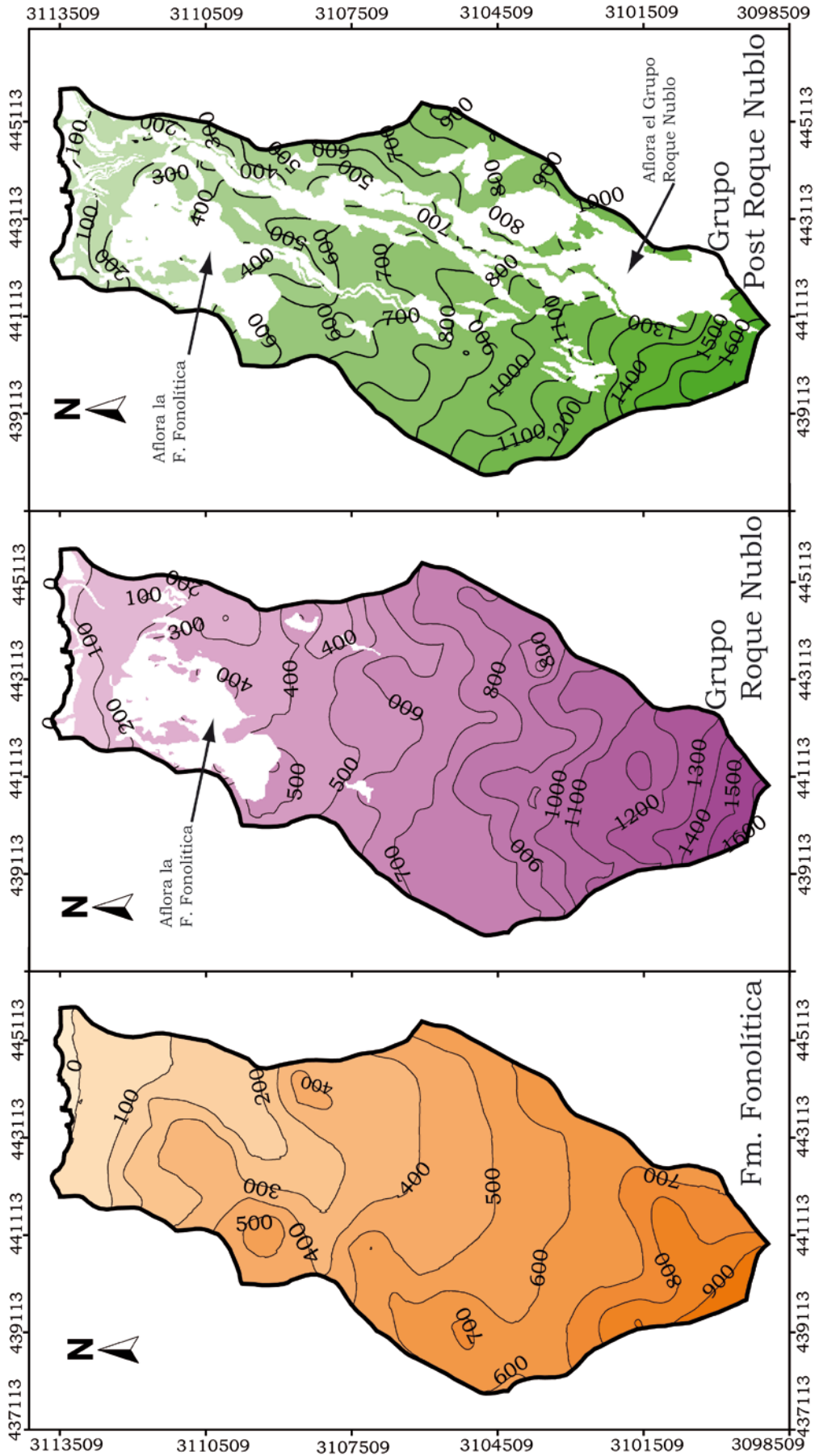


Figura 3.9. Mapas topográficos de los techos de las formaciones geológicas que se encuentran en el subsuelo en la zona de estudio

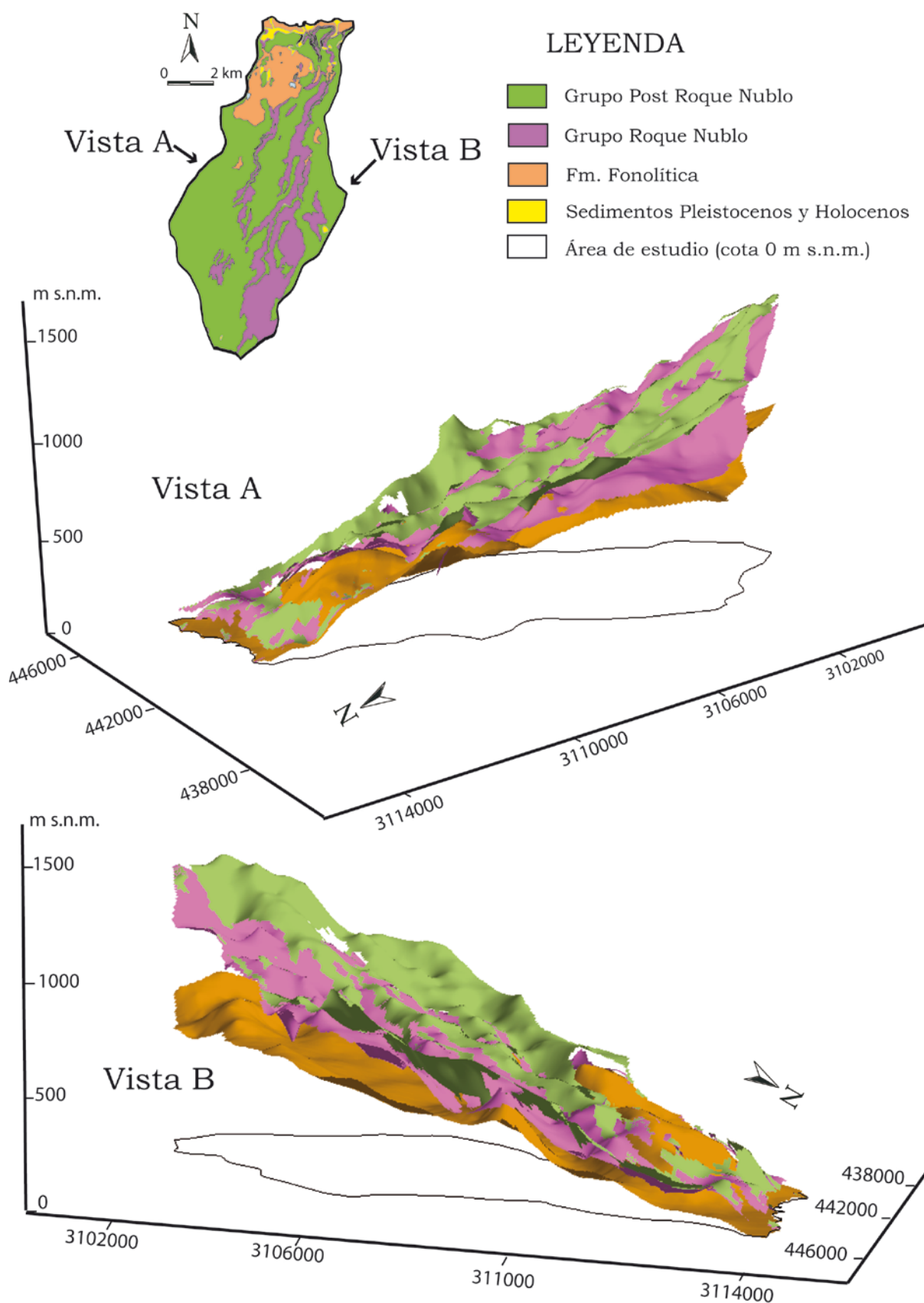


Figura 3.10. Geometría de las formaciones presentes en el subsuelo del área de estudio. Los planos representados son los techos de las formaciones presentes en el área de estudio.





#### **4. *Características hidrogeológicas***



## **4 Características hidrogeológicas**

### **4.1 Características hidrogeológicas de los materiales volcánicos**

La estructura general de las formaciones volcánicas consiste en un apilamiento de materiales que van desde los muy compactos hasta los de una porosidad que supera el 50%, desde los que tienen las cavidades totalmente conectadas hasta aquellos que, aún pudiendo ser muy porosos, tienen sus poros desconectados, desde los que presentan grietas hasta aquellos que poseen un elevado índice de cavidades debidas a la fisuración (Custodio 1978). Estas variaciones se dan en cortas distancias y según la orientación, dando lugar a un conjunto que a escala decamétrica es sumamente heterogéneo y anisótropo y que varía en profundidad hacia una mayor compacidad.

Las características hidráulicas se ven afectadas por la edad, siendo generalmente las formaciones más jóvenes las que presentan mayor permeabilidad y porosidad. Con el tiempo se producen una serie de transformaciones que normalmente hacen disminuir la permeabilidad y la porosidad conectada. Las causas principales son la compactación por el peso de los de materiales apilados y las reacciones químicas, las que provocan la compactación, el cierre de las fisuras por compresión y el relleno de cavidades con minerales de generación secundaria (arcillas, zeolitas y calcita, principalmente), convirtiéndose en una masa cada vez más compacta e hidráulicamente homogénea (Custodio 1978), en especial en ambientes de temperatura elevada y/o con abundancia de CO<sub>2</sub> endógeno.

El grado de heterogeneidad de una formación volcánica varía con el tamaño de la muestra, disminuyendo al aumentar el volumen considerado. Así, cuando las dimensiones lineales del volumen superan a las de las heterogeneidades, la descripción de la unidad tiende a la homogeneidad. A escala más localizada, el mismo terreno puede presentar heterogeneidades muy marcadas.

La anisotropía es variable según el tipo de formación que se considere. Generalmente la presencia de diques, grietas y fisuras verticales en materiales jóvenes pueden introducir una marcada anisotropía. Un apilamiento de coladas jóvenes forma un conjunto con una marcada anisotropía ya que el centro de la colada es mucho menos permeable que las zonas de techo y muro (más escoriáceas), de modo que la permeabilidad horizontal resulta mucho mayor que la vertical. En formaciones antiguas esta situación puede cambiar debido a los cuerpos intrusivos y a la fisuración secundaria.

La porosidad total es mayor que la porosidad efectiva, como en otros materiales, pero en los materiales volcánicos se puede acentuar por la existencia de huecos aislados. La porosidad total en las rocas volcánicas no alteradas suele ser elevada, llegando al 80% en escorias recientes, y en general se conserva por encima del 1% en las más compactas. La porosidad efectiva está comprendida normalmente entre 3% y 6%, con un máximo del 10% al 20% en brechas, piroclastos y materiales escoriáceos inter-coladas, siendo del 1% en basaltos antiguos, lavas masivas, tobas y piroclastos muy soldados (Custodio, 1978; Custodio 1986). Las porosidades drenables son menores, dependiendo del tamaño de poro. En todo caso, los materiales volcánicos que conforman la isla son permeables por fisuración y/o porosidad (Custodio, 2007).

La permeabilidad en terrenos volcánicos puede variar hasta en 6 órdenes de magnitud, desde 1000 m/d en las tipologías escoriáceas recientes, hasta menos de 0,001 m/d en formaciones masivas, piroclastos alterados, etc. (Custodio, 1978; Custodio, 1986).

La permeabilidad y el resto de los parámetros hidráulicos de los materiales volcánicos dependen de los procesos de emisión, de su composición petroquímica y su historia geológica, que cubre desde la alteración y litificación hasta la existencia de fracturas y compactaciones posteriores (Custodio, 1986).

## **4.2 Caracterización hidrogeológica de las cuencas de los Barracos de Moya y Azuaje**

Como ya se ha comentado en el capítulo de introducción, el funcionamiento hidrogeológico insular se caracteriza por la existencia de un único acuífero en el que la recarga tiene lugar preferentemente en las cumbres y la circulación hacia la costa, con salidas intermedias en nacientes (hoy muchos de ellos secos y sustituidas estas salidas por las extracciones de pozos y galerías) y al mar, y descarga artificial por pozos y galerías (Cabrera y Custodio, 2008). Las cuencas de los Bcos. de Moya y Azuaje siguen este modelo y se caracterizan por ser la zona donde se produce la mayor tasa de recarga de la isla.

Para el estudio del funcionamiento hidrogeológico de la zona de estudio que conduce al modelo conceptual se parte de datos históricos recopilados en el archivo de la Heredad de Arucas-Firgas, de datos procedentes de estudios previos realizados en la isla (SPA-15, MAC-21, PHGC), datos adquiridos en el archivo del CIAGC en los registros de inscripción y los obtenidos en las campañas de campo realizadas para la presente tesis.

### 4.2.1 Nacientes

Según los datos recogidos en el Proyecto Canarias SPA-15 (1975), en 1933 existían en Gran Canaria 285 manantiales (nacientes en la designación local), con un caudal medio de 3,7 L/s y una producción total de 33 hm<sup>3</sup>/año, muchos de ellos con caudales superiores a 10 L/s. En 1975 apenas quedaban 100 nacientes, con una producción total de 3 hm<sup>3</sup>/año, y de ellos sólo 20 con caudales superiores a 1 L/s.

Existen o han existido numerosos nacientes en la zona, cuyo funcionamiento ha sido variable con el tiempo (Fig. 4.1). Así, las cuencas de estudio y principalmente, la cuenca del Bco. de Azuaje se considera como el área con más densidad de nacientes de la isla. Parte de sus caudales, además de ser captados para usar sus aguas, se utilizaron en tiempos pasados para accionar molinos de grano. En Valleseco existían 4 molinos de agua movidos por las aguas de la Heredad de Aguas de Arucas y Firgas, cuyas aguas procedían del Barranco de la Virgen, de Valsendero, de nacientes en ambos márgenes del barranco, que constituían una sola gruesa (volumen principal de agua de cada heredad que discurre por la acequia y que se reparte por turnos). En la cuenca de Moya también existían 9 molinos de agua accionados con las aguas del Heredamiento del Palmital de Guía de Gran Canaria, otros con las aguas del Cortijo de Pajaritos y con las aguas propias de la Heredad de Moya situados en los dos grandes afluentes que en Los Tilos forman al unirse el Barranco de Moya, como las del Barranco del Laurel-Los Tilos por la derecha y las del Pinar-Los Propios por la izquierda, y uno movido por el agua procedente del Heredamiento Naciente Alto de La Cisterna que en sus buenas épocas llegó a tener un caudal de 16 L/s (Díaz Rodríguez, 1988).

Para el estudio de la evolución de los nacientes en el Bco. de Azuaje se cuenta con datos de aforos que se han obtenido en el archivo de la Heredad de Aguas de Arucas y Firgas, que en algunos casos abarcan desde 1909 hasta 1968, además de los datos obtenidos de las fuentes indicadas en el apartado anterior. En el anexo A.4.1 Fichas e hidrogramas de los nacientes, se recoge una tabla-ficha por naciente, con los datos de que se dispone. Incluye un encabezado con el nombre del naciente, expediente y localización, seguido de una tabla con los siguientes campos: Año, n° de datos, mes de Q<sub>max</sub>, caudales (Q<sub>max</sub>, Q<sub>75</sub>, mediana, Q<sub>25</sub>, Q<sub>min</sub>), mes de Q<sub>min</sub>, origen de dato y observaciones sobre los datos. Aquí se considera preliminarmente los datos históricos de los nacientes de la zona y su correspondiente interpretación hidrogeológica.

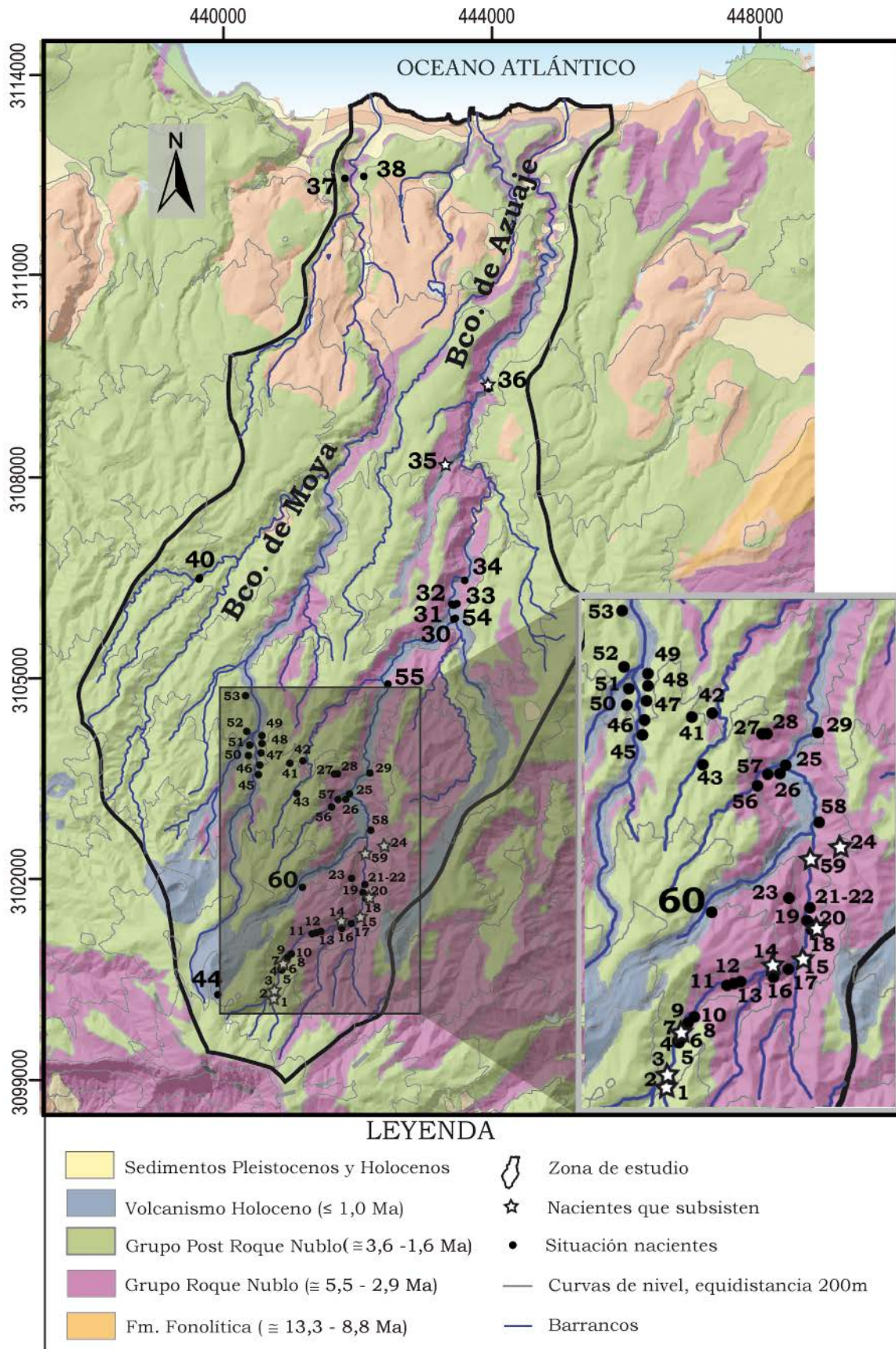


Figura 4.1. Situación de los nacientes de los que se tiene referencia en la zona de estudio según diversas fuentes documentales. Se marcan aquellos de los que se tiene constancia que siguen manando agua en la actualidad y se indica la geología de la zona.

La situación de los nacientes en el Bco. de Moya se ha deducido de forma aproximada de documentación antigua, recogida en un trabajo de Martín Santiago publicado en la revista digital InfoNorte (<http://www.infonortedigital.com/publicaciones/docs/106.pdf>, 2015). En este trabajo se recogió un legajo de 1802 que se encuentra en el Archivo Histórico Provincial de las Palmas “Joaquín Blanco”. Se trata de documentación relativa a un pleito de aguas que tuvo lugar en esa época entre la Heredad de Moya y D. Cristóbal Vicente Mújica. La documentación incluye una ilustración de la época donde se indica la situación de los nacientes existentes entonces, aunque no hay datos de los caudales.

#### **4.2.1.1 Localización espacial de los nacientes**

Según la información recopilada, a principios del siglo XX existían en la zona aproximadamente 77 nacientes, muchos de ellos permanentes, que se han ido secando a partir de 1940–1950. De muchos de ellos se han sabido de su existencia por escritos históricos, por lo que todos no han podido ser situados.

La figura 4.1 muestra la localización de 60 nacientes. La situación de 29 de ellos se ha obtenido del inventario de puntos de agua del CIAGC (1997), 2 se localizaron en la campaña de campo realizada para la presente tesis (2008-09), 20 se han situado tras referenciar el mapa incluido en un estudio realizado en el año 1955 en la cuenca de Azuaje (Macau Vilar y Hernández del Toro, 1955) y por último 9 proceden de la ilustración de 1802 incluida en el trabajo de Martín Santiago.

#### **4.2.1.2 Características de los nacientes**

El anexo A.4.1 Fichas e hidrogramas de los nacientes, recoge los datos recopilados para el Barranco de Azuaje en la Heredad de Aguas de Arucas-Firgas, así como los hidrogramas elaborados para cada naciente. Uno de ellos se ha representado en escala lineal junto con la pluviometría y otro en escala logarítmica. En ellos se puede observar las fluctuaciones de caudal con la pluviometría y la merma o agotamiento generalizado que comienza en la década de 1940.

La Tabla 4.1 recoge un resumen de sus características, con indicación del caudal base ( $Q_b$ ) (valor que representa el caudal continuo si se desprecia los picos producidos en el histograma por eventos lluviosos) y la relación  $Q_{max}/Q_b$ , siendo  $Q_{max}$  el caudal máximo. También se indica la última observación con dato y el año de la misma.

Tabla 4.1. Tabla resumen de los nacientes de la zona. La numeración coincide con la de la figura 4.1. Se han sombreado los que siguen manando. La columna de numeración/expediente muestra el color correspondiente a la formación geológica de la que manan según la misma clave de colores del mapa (verde: Grupo Post-Roque Nublo; malva: Grupo Roque Nublo y azul: Volcanismo Holoceno)

Nº/Expediente	Nombre	Periodos con datos (años)	Q <sub>b</sub> (L/s)	Q <sub>max</sub> /Q <sub>b</sub>	Agotado/año
1/0522-0523 NA	La Higuera 1-2-3	1962-68; 2009	0,006	5,17	no/2009
2	Cho Juan Guerra	1954-56; 1962-68	0,05	25	no/2002
3/0515 NA	Canal	1953-56; 1962-68; 1980	0,17	12,74	si/1980
4/0516 NA	Macho	1954-56; 1962-68; 2002	0,1	20,57	si/2002
5	Mina del Caidero	1955-56; 1962-68	0,04	25	si/1968
6/0517 NA	Umbria	1952-57; 1962-68; 1980	1,84	2,57	?
7/0518 NA	Solana	1952-57; 1962-1968; 1980	0,09	18,51	si/1980
8/0516 NA	Caidero Navarro	1947-49; 2002; 2009	3,8	3	no/2009
9	Arroyo	1954-56; 1962-68	0	1,25	si/1963
10	Desague				
11	Chorro	1909-24	1,01	31,84	?
12	Peral				
13	Las Ñameras	1954-55; 1963	0,006	5,17	?
14	Escurrideros del Risco				no/2002
15/0529 NA	Los Árboles	1913-21; 1943-57; 1962-68 ; 1980; 2002	3	6,13	no/2002
16	Caidero de Limosna	1954-56; 1962-68	0,01	71,4	si/?
17/0525 NA	Chorro del Conde	1913-21; 1943-49; 1954-56; 1962-68; 1980	1	8,75	si/1967
18/0526 NA	Zanja Nueva	1913-21; 1943-57; 1962-68; 1980	1,07	13,12	no/2009
19	Del Laderón N°1	1954-56; 1962-68	0,016	32,62	si/1968
20/0527 NA	Chorro de Don Pedro	1952-57; 1962-68; 1980	0,01	50	si/1967
21	Laderón N°2				
22	Laderón N°3				
23	La Helechera	1954-56; 1962-68	0	1,67	si /?
24/1-2-3-4-S/E NA	Sauco N°1-2-3-4	1913-21; 1943-56; 1962-68; 1990-91; 1998	0,93	11,48	no/2009
25	los Nietos	1954-57; 1962-68; 2002	0,06	9,8	si/2002
26	Los Hijos	1954-57; 1962-68; 2002	0,58	2,86	si/2002
27	Risco Quio Alto	1946; 1954-57; 1962-68	0,9	4,5	si/1966
28	Risco Quio bajo	1946; 1954-57; 1962-68; 2002	1,7	1,58	si/2002
29/0512 NA	El Molino	1943-58; 1962-68	15	5,31	si/1964
30/0514 NA	Las Madres	1909-25; 1934-68; 1980	40	4	si/1980
31/0507 NA	Mayorazgo	1909-24; 1943-57; 1962-68; 1980	7,15	5,25	si/1980
32/0506 NA	San Juan	1909-24; 1943-57; 1962-69; 1980	2	13,93	si/1980
33/0505 NA	Ariñez	1943-57; 1962-68	4	3,43	si/1965
34/0005 NA	Fuente de Fargas	1971	1,25		si/1977
35/0005 XX	Doramas	2008	0,65		no/2008
36/0003 NA	Fuente Santa	1993; 1994; 1972; 2009	0.502		no/2009
37/0503 NA	San Felipe	1980	0,25		?
38/0504 NA	San Felipe	1980	0,62		?
39/0502 NA	Quebradillas	1964; 1975; 1980	0,14		si/1980



Nº/Expediente	Nombre	Periodos con datos (años)	Q <sub>b</sub> (L/s)	Q <sub>max</sub> /Q <sub>b</sub>	Agotado/año
40/0501 NA	Madre del Junco	1964; 1975; 1980	0,074		si/1980
41/0510 NA	El Chorrillo	1981	0,5		?
42/0511 NA	Fuente del Convento	1981	0,15		?
43/0509 NA	Tosca Encarnada	1981	0,25		?
44/0231 RA	Chorro Bocado Negro	1993	0.004		?
45	De Escalona				
46	De Matías Frenández				
47	Fuente del Laurel				
48	Chorro Bermejo				
49	Yedresilla				
50	De la Yedra				
51	Arroyo de la Cisterna				
52	Agua del Laurel				
53	Del Cavadero				
54/0123 CP	Rapador	1909-24; 1943-45; 1951-68	2	53,61	si/1964
55/3579 TP	Palmito	1954-56; 1962-67	0.004	178,5	?
56	Cuevas Lanas	1954-56; 1962-68	0.02	25	si/1968
57	Pajaritos				
58/4788 TP	Valsendero	1909-24; 1943-49	17	5,68	?
59/0002 XX	Agujero	1953-69; 1990-91; 1998; 2009	5	2,31	<b>no/2009</b>
60/5272 TP	Laurel	1954-56; 1962-68	0.02	5	si/1967

Agrupados por áreas y por la formación geológica de la que manan se pueden diferenciar tres zonas (Fig. 4.1 y Tabla 4.1):

- Nacientes localizados en la zona media de la cuenca del Bco. de Azuaje y alta del Bco. de Moya, que nacen en la formación más reciente de la isla, el Volcanismo Holoceno. Nacientes 26, 29 al 36, 44 al 55, 58 y 60.
- Nacientes localizados en la parte alta de la cuenca de Azuaje, que manan a partir de materiales del Grupo Roque Nublo. Nacientes 9 al 25, 27, 28, 56, 57 y 59.
- Resto de los nacientes, situados en el grupo Post-Roque Nublo. Nacientes 1 a 7 y 37 a 43.

Atendiendo a su estacionalidad, se encuentran nacientes con un caudal de base más o menos permanente y que fluctuaba dependiendo de la estación del año y de la precipitación, ya que dependen de las relaciones entre la recarga y la descarga. Otros nacientes tienen un caudal pequeño y se extinguen en periodos sin lluvia de cierta duración. Existen además nacientes ocasionales que se originan tras los eventos de lluvia y están secos el resto del tiempo.

Según Macau y Hernández (1955), dependiendo de la forma en que fluyen, pueden existir nacientes que se originan por la acumulación del agua que se

infiltra en las capas superficiales permeables y que forman un cuerpo de agua saturado temporal (acuífero colgado) sobre una base de baja permeabilidad formada por aglomerados (nacientes 4, 5, 6, 11, 12, 13, 17, 24, 27, 28 y 29) o capas de almagre -suelo rubefactado o capas rojas- (nacientes 2, 3, 7, 16, 19, 20, 21 y 22), dando lugar en la mayoría de los casos a una serie de pequeños afloramientos lineales por los que mana el agua (escurrideros). También puede haber nacientes formados por coladas lávicas y tubos volcánicos recientes ubicados en el fondo de los barrancos, que actúan como colectores de las aguas aportadas por el barranco y de las que se descargan lateralmente en el mismo (nacientes 9, 10 y 30).

Actualmente, de los 77 nacientes que se conocen en la zona de estudio, 24 se encuentran secos y 9 continúan manando agua, aunque sus caudales han disminuido considerablemente. De los 44 restantes no se han obtenido datos actuales dado que son inaccesibles por estar en fincas privadas o no han sido localizados, ya que la información que se tiene de ellos es de textos o mapas históricos (Archivo de la Heredad de Aguas de Arucas y Firgas; Archivo de la Audiencia, 1802). La desaparición de los nacientes comenzó en la década de 1960, aunque la merma de caudal había comenzado ya en la década de 1940, cuando se perforaron numerosos pozos y galerías para cubrir el notable incremento de la demanda de agua para uso agrícola que se produjo en esa época.

#### **4.2.2 Captaciones de aguas subterráneas. Pozos, galerías y sondeos.**

El aprovechamiento de las aguas subterráneas en el área de estudio se lleva a cabo principalmente por pozos (de gran diámetro), sondeos (de diámetro medio) y galerías (minas de agua), siendo en la mayor parte combinaciones de ellos, con frecuencia de gran complejidad. Las combinaciones más frecuentes que se pueden encontrar son: pozo + galería, pozo + catas (sondeos horizontales de pequeño diámetro en el interior de otras obras), pozo + catas + galerías, y sondeos que prolongan verticalmente los pozos que se han quedado secos (Fig. 4.2). Las características constructivas de las captaciones que se encuentran en la zona de estudio se relacionan en la tabla A.4.2.1 (anexo A.4.2. Propiedades Constructivas).

Los pozos canarios clásicos son excavaciones verticales de 3 m de diámetro y cuya profundidad depende del nivel freático del momento más la extensión hasta interceptar el primer tramo saturado permeable. En la zona de estudio hay 269 pozos, el más profundo de ellos de 482 m.

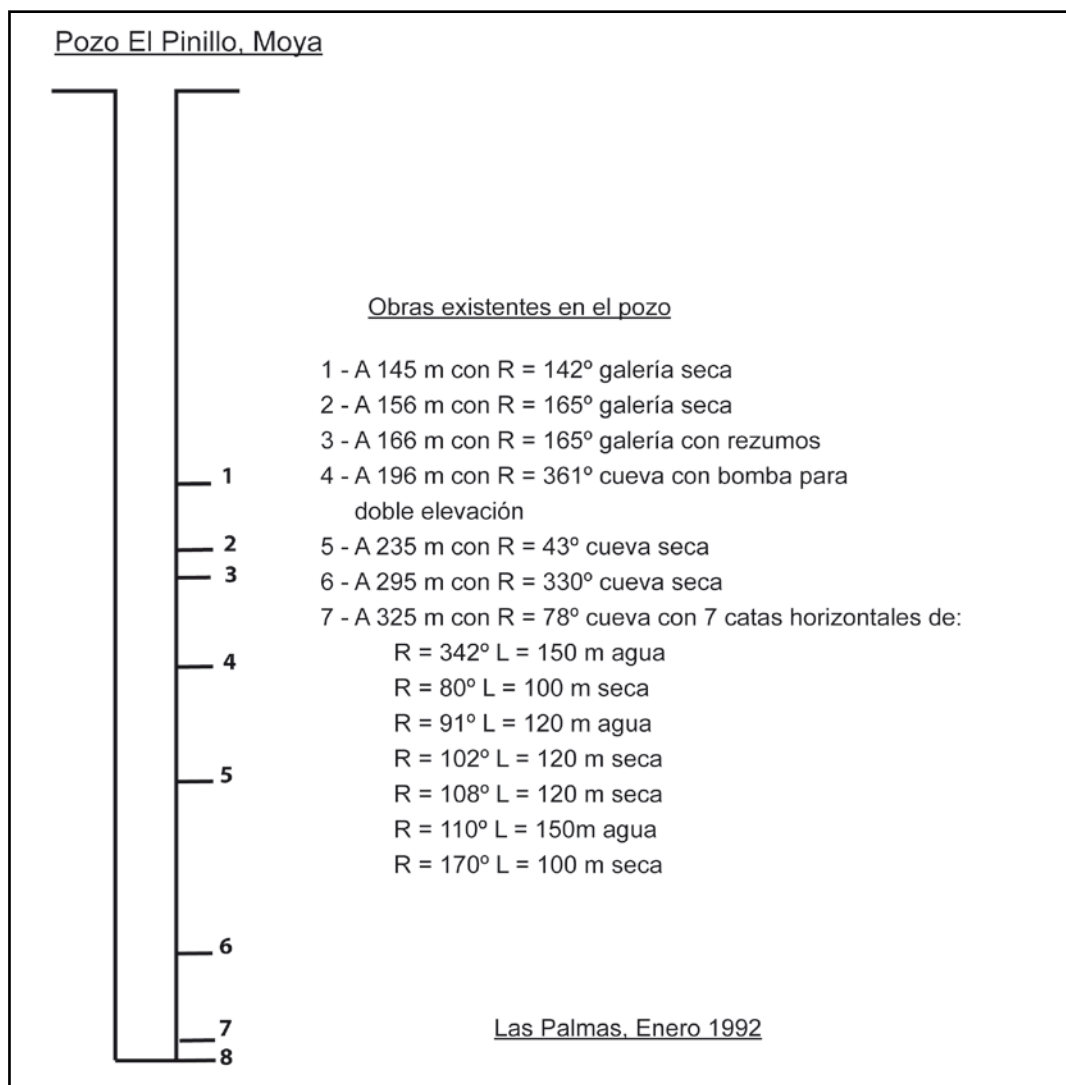


Figura 4.2. Esquema constructivo de un pozo típico tradicional de la zona de estudio al que se le adosan otras obras (Informe para la inscripción en el Registro Insular de Aguas del CIAGC, 1992).

Actualmente la ejecución de nuevos pozos tradicionales está en desuso dado los altos costes iniciales, además de la dificultad para obtener los permisos pertinentes. Si se requiere una profundización, actualmente se procede a hacerlo mecánicamente desde la superficie, o bien por el interior del pozo canario existente o bien perforando un sondeo a corta distancia, con el riesgo de resultados distintos a los ya conocidos a causa del menor volumen asociado por el pequeño diámetro y de las notables heterogeneidades a escala de detalle. Los pozos suelen explotarse con bombeo automático, mediante un sistema de doble boya. Este tipo de bombeo dificulta el cálculo de la extracción ya que es muy complicado conocer cuánto tiempo real está funcionando la bomba, además que con frecuencia el rendimiento de funcionamiento puede diferir notablemente del de diseño. El uso del agua es fundamentalmente para riego agrícola, aunque parte puede utilizarse para abastecimiento, en proporción cada vez mayor. Cuando domina el uso agrícola, las extracciones suelen disminuir en épocas de

lluvia, pudiendo haber años con varios meses de inactividad o de uso mínimo. Los caudales de bombeo de los pozos oscilan entre 35 y 0,23 L/s, con un valor medio de 8,27 L/s.

Las galerías son excavaciones horizontales de aproximadamente 1,8 m de altura y 1.8 m de ancho, con una ligera pendiente de ~2‰. Suelen constar de una rama principal de la que en ocasiones parten ramales secundarios, los que en algunos casos pueden dividirse sucesivamente. En la zona se contabilizan 53 galerías, la más larga de una longitud de 800m (Fig. 4.3). En algunos pozos de la zona construidos a cota más elevada que la de los barrancos próximos es habitual que existan galerías intermedias de desagüe para evitar bombeos a alturas excesivas. Al igual que los pozos, el agua se usa tanto para riego como para abastecimiento. El caudal varía entre 8 y 0,05 L/s, con una media de 2,83 L/s.



Figura 4.3. Galería el Caidero, Valleseco.

Las nuevas obras que se realizan en la actualidad son sondeos perforados a rotoperusión, que en mucho de los casos se localizan junto a viejos pozos que se han secado o han quedado inutilizados, aprovechando la misma concesión administrativa. En la zona hay 13 sondeos, el más profundo de 524 m (Fig. 4.4). El régimen de funcionamiento es automático y el agua se usa principalmente

para abastecimiento. Los caudales oscilan entre 9,7 y 0,12 L/s, con una media de 3,85 L/s.



Figura 4.4. Sondeo Montaña del Calvario, Firgas.

#### 4.2.3 Piezometría

Para la elaboración de las piezometrías se ha llevado a cabo la recopilación de los datos de los siguientes proyectos y trabajos realizados en la isla:

- SPA-15 para la elaboración de la piezometria del periodo 1970-72. Se han obtenido 99 datos de niveles piezométricos de las captaciones del área de estudio.
- MAC-21 para la piezometria de los años 1980-81. De este proyecto se dispone de 127 datos de niveles piezométricos de captaciones situadas en al área de estudio.
- Datos del inventario del CIAGC, realizado por AT-Hidrotecnia, para la realización de la piezometria del año 1997; se dispone de 171 datos de niveles piezométricos.
- Datos adquiridos en la campaña de campo de la presente tesis para obtención de la piezometria del periodo 2008-09; se dispone de 92 datos de niveles piezométricos.

En el anexo A.4.5. Datos piezométricos, se presenta una tabla con todos estos datos, en la que se incluye: expediente, fecha, cota de la captación (m), profundidad (m), cota fondo (m), profundidad del nivel del agua (m), cota nivel del agua (m), estado de bombeo, tiempo de bombeo, tiempo en que el pozo está parado y estado sobre la cualificación del nivel del agua. El nivel del agua se ha

clasificado en función del estado del pozo o sondeo en el momento de realizar la medida como dinámico, estático o en recuperación. Se ha considerado como niveles estáticos las mediciones realizadas en pozos que hayan estado sin funcionar más de 24 horas, en recuperación los que hayan estado parados menos de 24 horas, y los que estaban en funcionamiento se han considerado dinámicos (Tabla 4.2). Aún cuando 24 horas de parada no son suficientes para que los niveles sean realmente estáticos, se ha considerado que la recuperación ha sido suficiente para que el bombeo no tenga una influencia mayor que el rango de error de la medición a la escala considerada. Además, la clasificación de estos estados como de niveles dinámicos y estáticos es relativa ya que debido a la alta densidad de captaciones el nivel de un pozo puede ser afectado por el régimen de explotación de los otros, no permitiendo determinar con fiabilidad su estado real. En la tabla A.4.3.1 (anexo A.4.5. Datos piezométricos) se puede observar que en algunas captaciones existen variaciones en las profundidades de los pozos. Estas variaciones se deben a que se haya reprofundizado el pozo o a que se hayan producido desprendimientos o limpieza de escombros en el fondo.

Tabla 4.2. Resumen del número de datos disponibles para la elaboración de las piezometrías, clasificados por clase de nivel.

DATOS PIEZOMÉTRICOS				
PERIODO	1970-72	1980-81	1997	2008-09
DINÁMICOS	23	69	32	29
ESTÁTICOS	9	12	24	30
RECUPERACIÓN	9	16	31	18
NO SE SABE	58	30	84	15
Nº DATOS	99	127	171	92

Con los datos obtenidos se han elaborado cuatro mapas piezométricos que corresponden a los periodos de campo de cada proyecto. En los casos en los que existen varias medidas de niveles piezométricos se ha considerado un valor por número de expediente, con el siguiente orden de preferencia: valores estáticos, luego en recuperación y por último dinámico. Si no se tienen medidas de profundidad de nivel del agua, pero sí dato del valor de la columna de agua estática, se ha calculado la cota de nivel piezométrico, considerándola como nivel estático del agua.

A la hora de trazar el mapa de isopiezas hay que tener en cuenta que existen ciertas limitaciones derivadas de las características del acuífero, del régimen de bombeo y de la densidad de captaciones:



- La heterogeneidad del acuífero da lugar a que puedan estar midiéndose niveles diferentes en pozos con profundidades similares situados a poca distancia unos de otros, en función de la formación o parte de la formación que aporta el agua subterránea.
- El régimen de funcionamiento de las captaciones a lo largo del año y entre años es muy irregular, ya que depende de la demanda de agua. Así en épocas de sequía predominan mediciones dinámicas al estar los pozos en explotación y en épocas lluviosas muchas captaciones se encuentran paradas y las mediciones se pueden considerar estáticas.
- La densidad de captaciones no es homogénea en toda la zona de estudio, siendo abundantes en la zona alta y media y escasa en la zona media-baja, por lo que existen áreas sin datos piezométricos.

Las figuras 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 muestran las piezometrías obtenidas para los periodos 1970-72, 1980-01, 1997 y 2008-09 respectivamente. En todos los casos, las isopiezas presentan una distribución de tendencia paralela a la costa y adaptadas sensiblemente a las curvas de nivel. Presentan formas lobuladas en los barrancos, pero depende del número de mediciones disponibles para cada periodo. La forma general implica el flujo del agua subterránea de cumbre a costa. Se observan numerosas mediciones en la zona media y alta con niveles tanto estáticos como dinámicos, lo que hace que en mucho de los casos el trazado de las isopiezas sea complejo. Sin embargo, en la zona baja existe poca información, siendo muy complicado en algunos casos trazar curvas isopiezas, como en la piezometría de 1970-72 (Fig. 4.5), en la que se indican tentativamente algunas isopiezas.

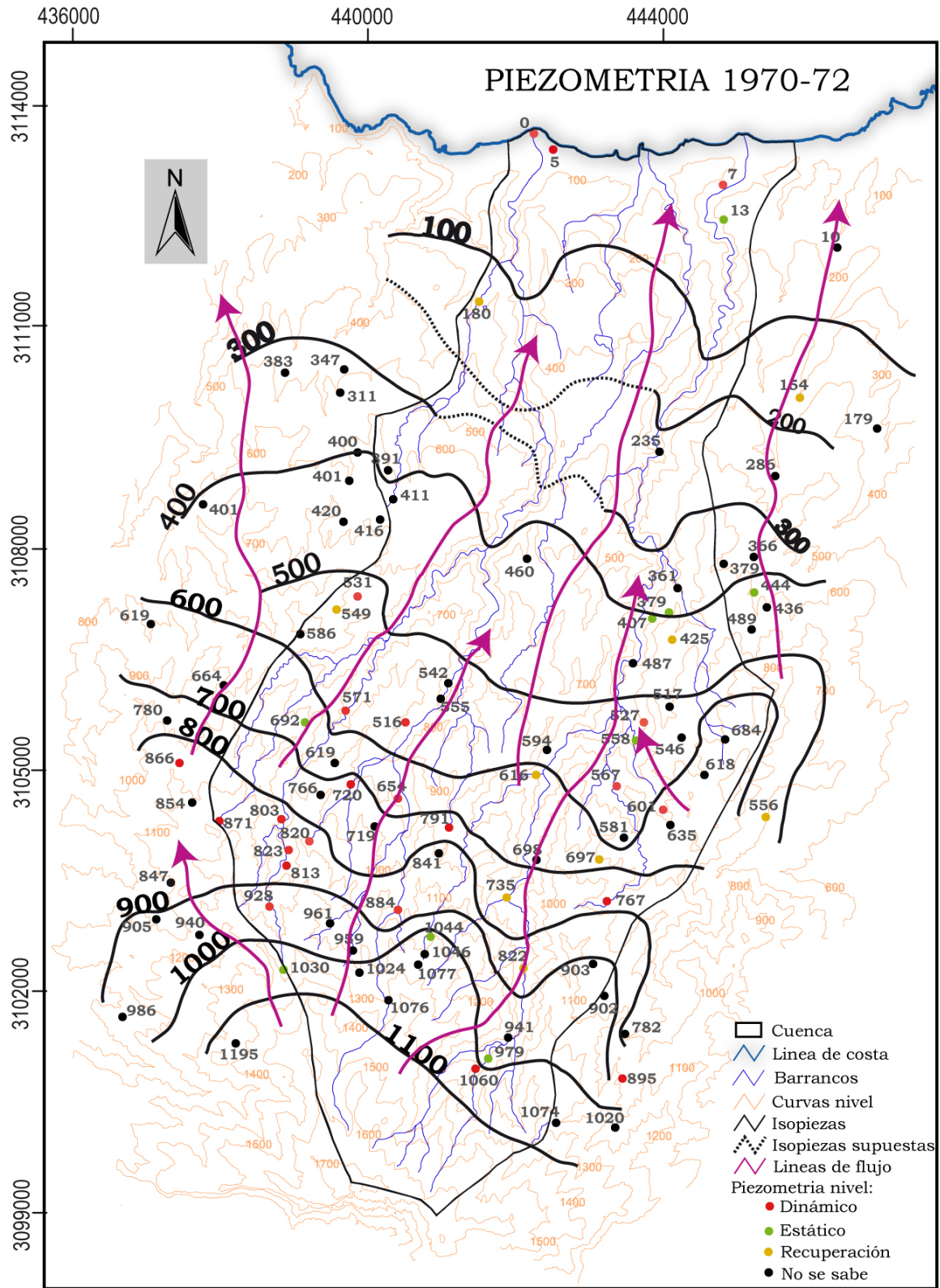


Figura 4.5. Piezometría del periodo 1970-72. Valores en metros.



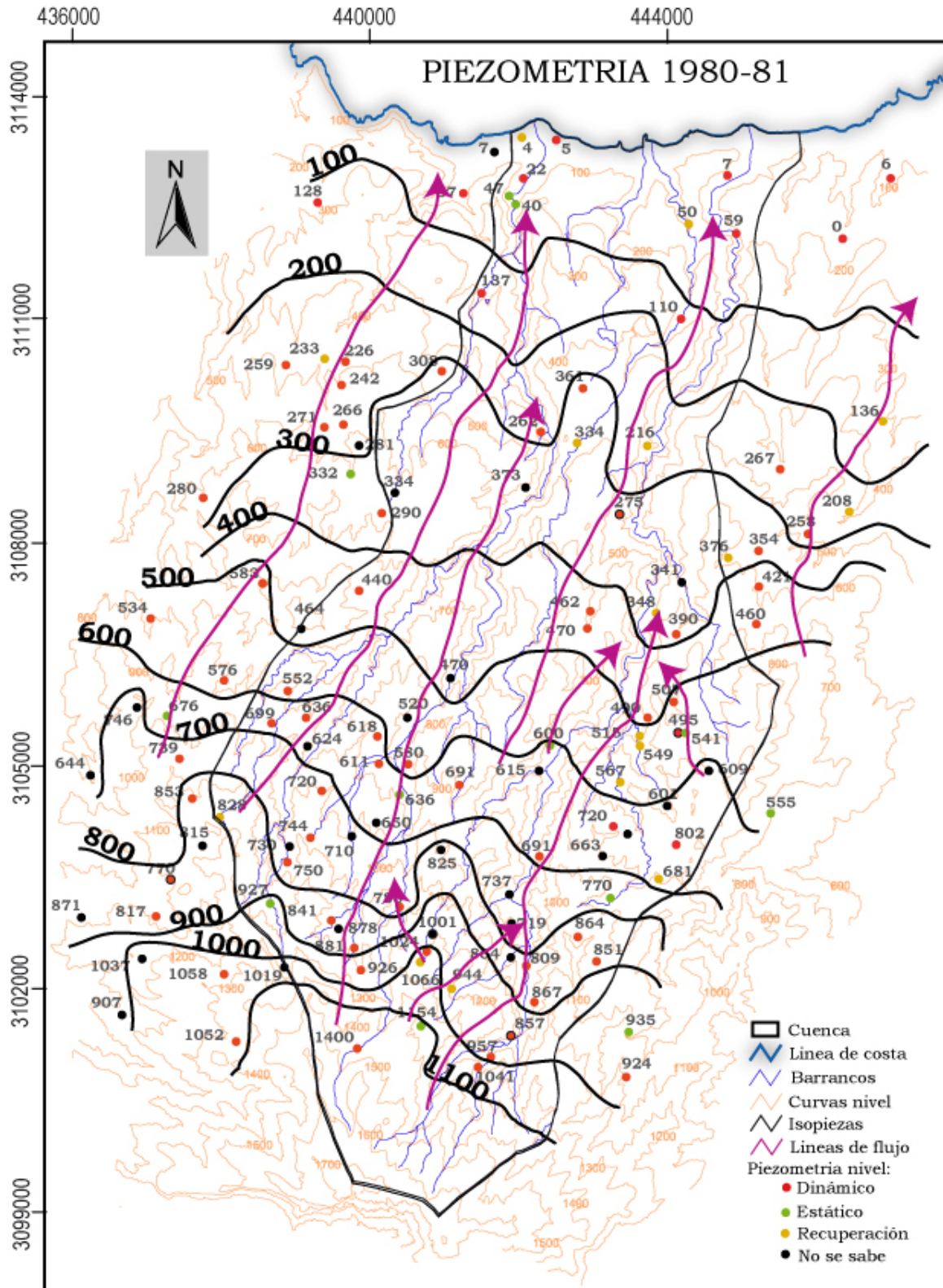


Figura 4.6. Piezometría del periodo 1980-81. Valores en metros.

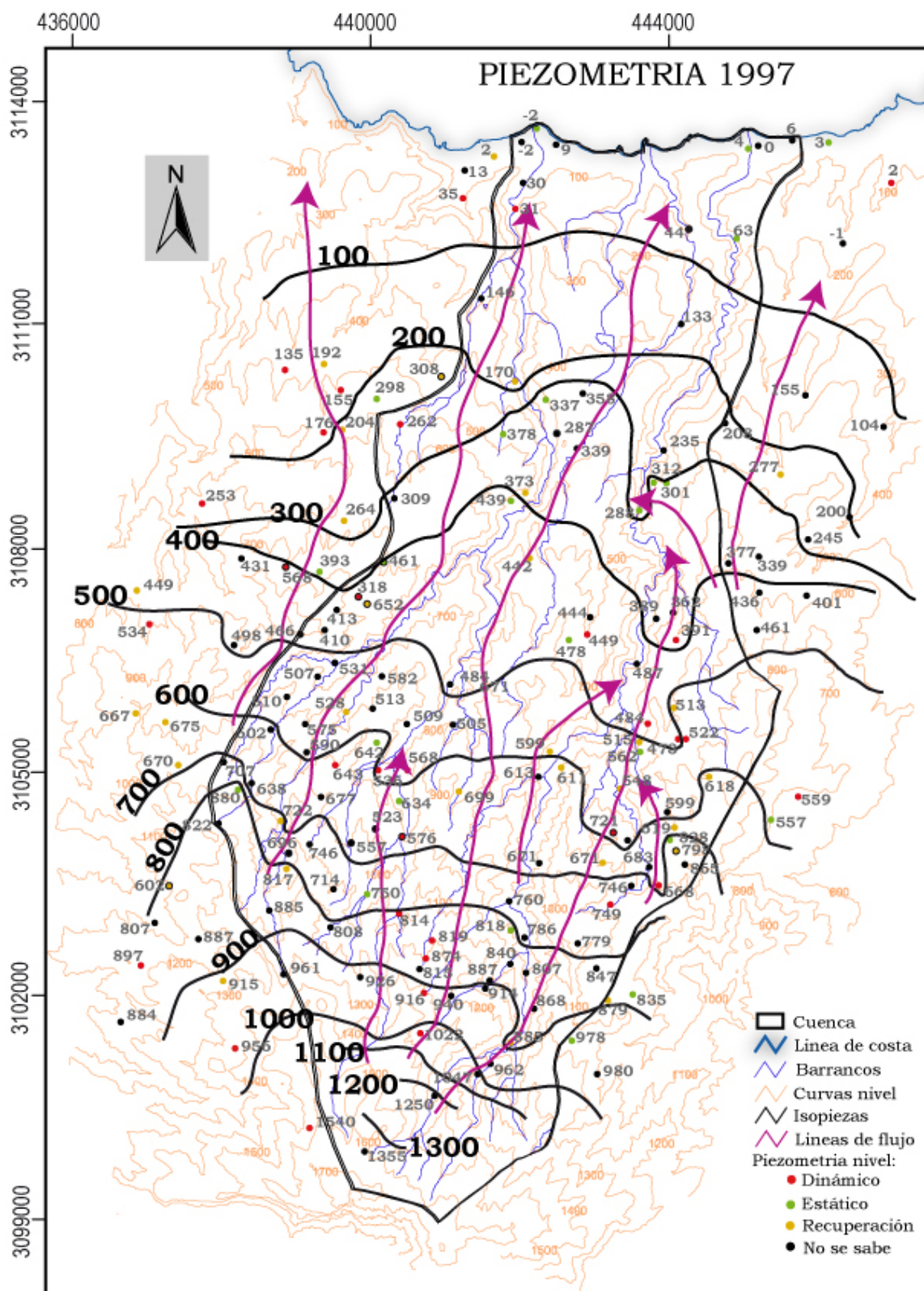


Figura 4.7. Piezometría para el año 1997. Valores en metros.



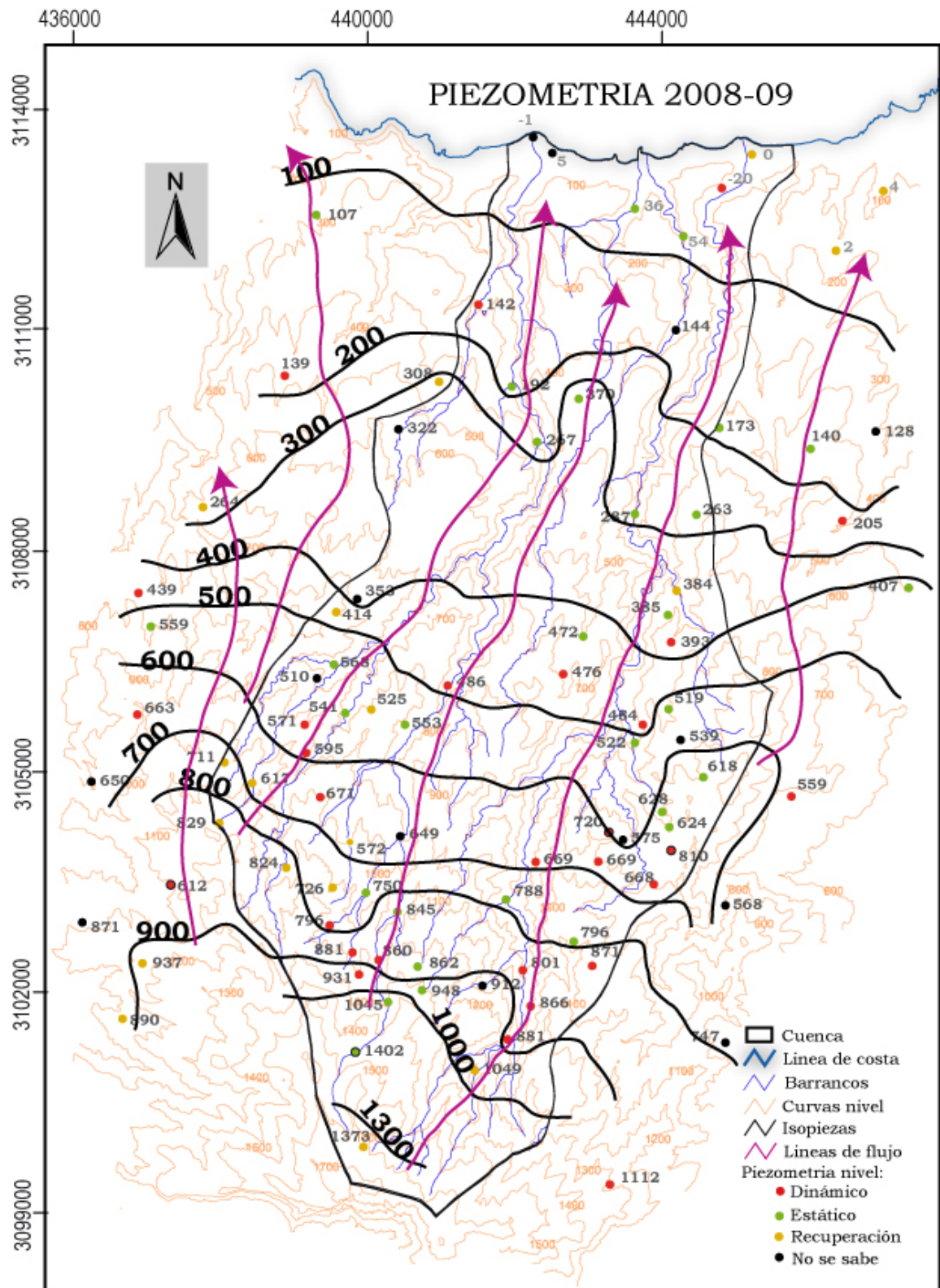


Figura 4.8. Piezometría para el periodo 2008-09. Valores en metros.

La figura 4.9 muestra la evolución temporal de los niveles estáticos en algunos pozos seleccionados de la zona, distribuidos por cotas. En general se observa un descenso de los niveles piezométricos hasta los años 1995-2000 y una recuperación o estabilización de los niveles en los últimos años en la mayoría de los casos (Fig. 4.9).

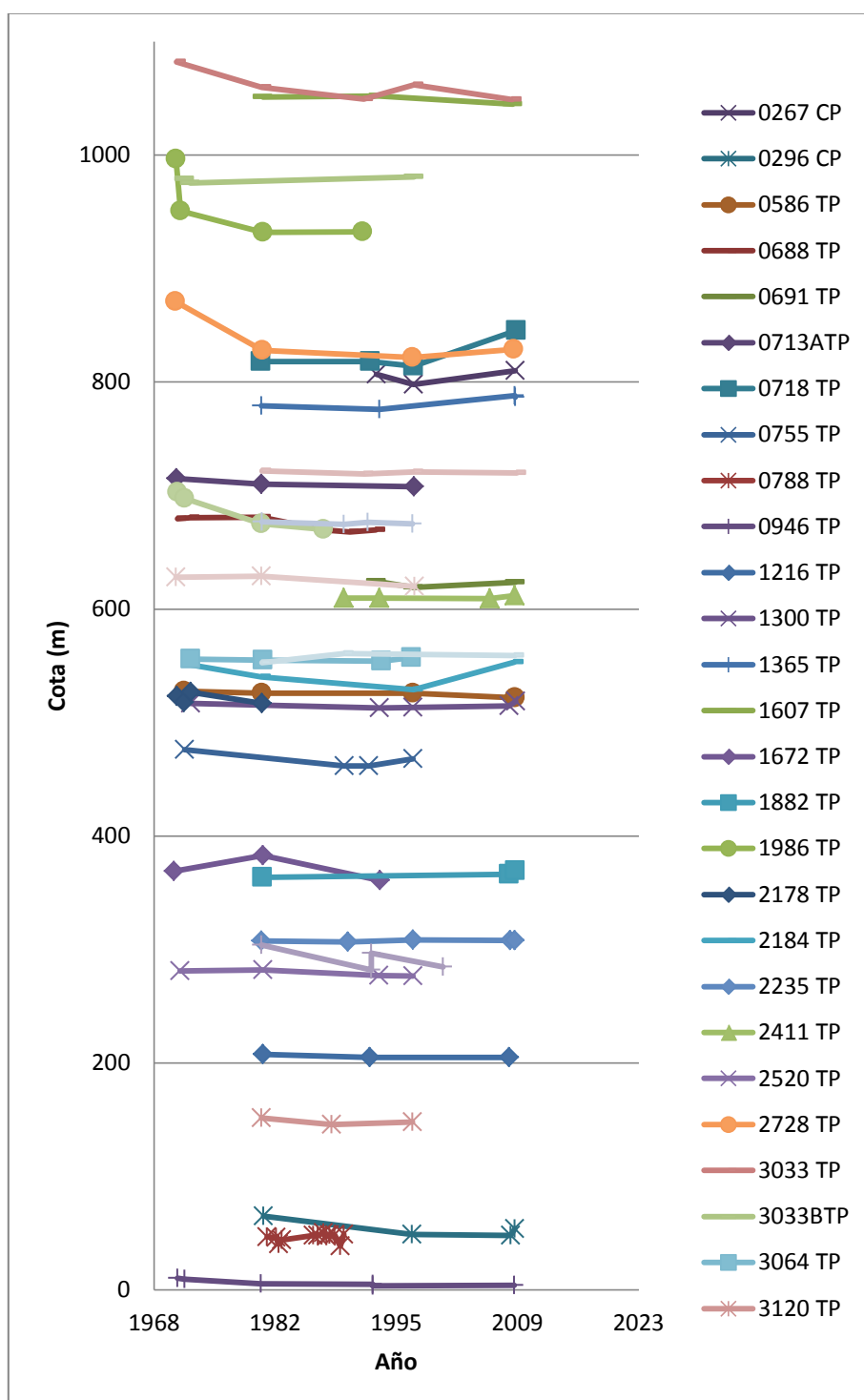


Figura 4.9. Evolución de los niveles piezométricos en el periodo 1970-2010.

## 4.2.4 Parámetros hidráulicos

### 4.2.4.1 Introducción

El área presenta complejas características hidráulicas del terreno ya que está formado por la superposición de materiales heterogéneos, con diferentes características hidrológicas y compleja geometría.

La distribución de la permeabilidad de los materiales volcánicos condiciona que el flujo del agua subterránea se produzca de dos maneras (Custodio, 1978):

- 1) el agua circula sólo por fisuras, con la roca prácticamente impermeable
- 2) el agua circula tanto por fisuras como a través de la masa rocosa; si la permeabilidad intersticial es pequeña domina la circulación por las fisuras, pero si es grande el comportamiento puede ser similar al de un medio granular

En el área de estudio se explotan todos los materiales presentes en superficie: en la zona alta preferentemente el Grupo Roque Nublo; en la zona media el Grupo Roque Nublo y la Formación Fonolítica en la cuenca de Moya y las mismas más el Grupo Post-Roque Nublo en la cuenca del Bco. de Azuaje; en la zona baja todas las formaciones.

La caracterización hidráulica se ha hecho por formaciones, de forma que un pozo que explote más de una formación presentará características intermedias entre las mismas dependiendo de la aportación de cada una.

### 4.2.4.2 Ensayos de bombeo

Ante la imposibilidad de realizar ensayos de bombeo ex profeso para esta tesis, se han interpretado los datos procedentes de los proyectos requeridos por el CIAGC para la inscripción de los pozos en el Registro Insular de Aguas. Se ha tomado información de cuatro ensayos de bombeo realizados en el año 1992 (1158 TP, 3033BTP y 3228 TP) y 1993 (0688 TP) (Fig. 4.10).

Se han realizado los cálculos de las transmisividades empleando el método de Jacob, tanto para los ensayos de bombeo como los de recuperación. La transmisividad se calcula según la fórmula:  $T = 0,183 Q/\Delta s$ , donde:  $T$  = transmisividad ( $m^2/d$ );  $Q$  = caudal medio de bombeo ( $m^3/d$ ) y  $\Delta s$  = descenso del nivel en un ciclo logarítmico (m).

Con dichos datos se ha obtenido la transmisividad para la Fm. Fonolítica y el Grupo Roque Nublo. No así para la formación Post-Roque Nublo ya que muchos de los ensayos de bombeo que se encontraban en los informes de inscripción

mencionados anteriormente no eran adecuados para el análisis; se trata de ensayos con un periodo de tiempo muy corto o estos informes carecían de ellos.

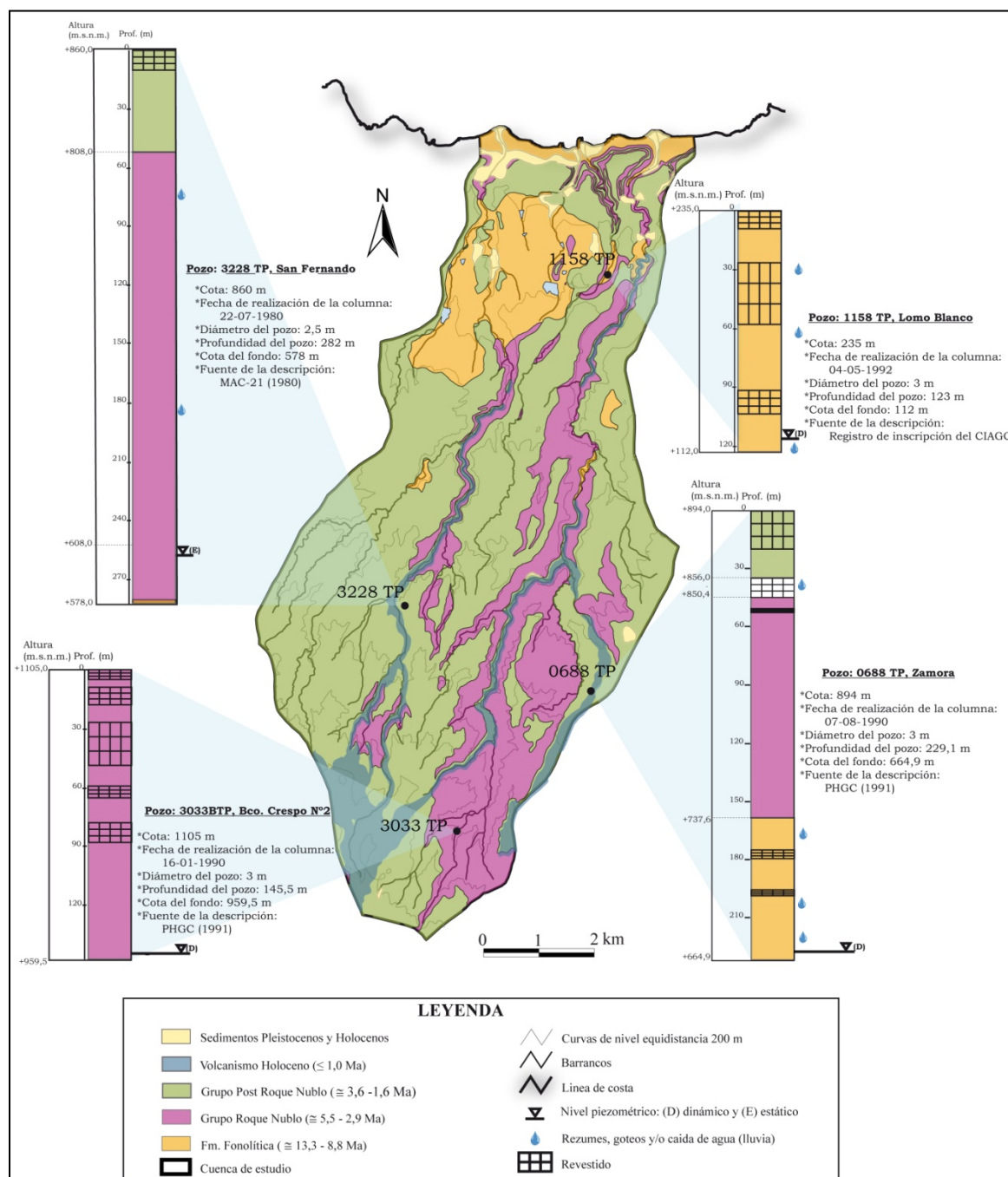


Figura 4.10. Situación de los pozos donde se tomaron datos de ensayos de bombeo y recuperación. Se indica la geología de los mismos y sus características principales.

### Formación Fonolítica

Según el PHGC (1991), el pozo 0688 TP está emboquillado en la cota 894 m y tiene perforados 229,1 m. Desde su brocal al metro 38 se encuentra en el Grupo Post-Roque Nublo, pasando a estar después forrado en 5,6 m; desde los 43,6 m hasta los 156,4 m atraviesa el Grupo Roque Nublo y desde los 156,4 m hasta su

fondo se encuentra en la Formación Fonolítica (Fig. 4.10). El agua surge principalmente en los metros finales del pozo. Se dispone de datos de bombeo y recuperación realizados el 15/07/1993 (Tabla A.4.6.1, anexo A.4.6. Datos de ensayos de bombeo). Los resultados del ensayo de bombeo y recuperación se muestran respectivamente en las figuras 4.11 y 4.12.

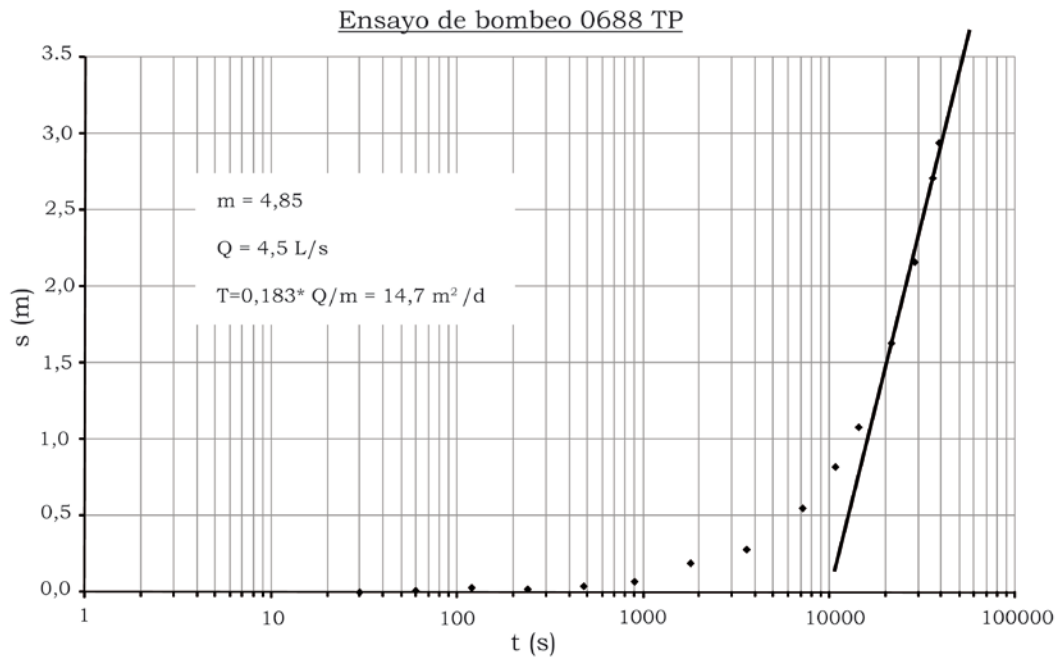


Figura 4.11. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de bombeo realizado en el pozo 0688 TP (año 1993). Se observa el gran efecto de capacidad, ya que se trata de un pozo típico canario de tres metros de diámetro.

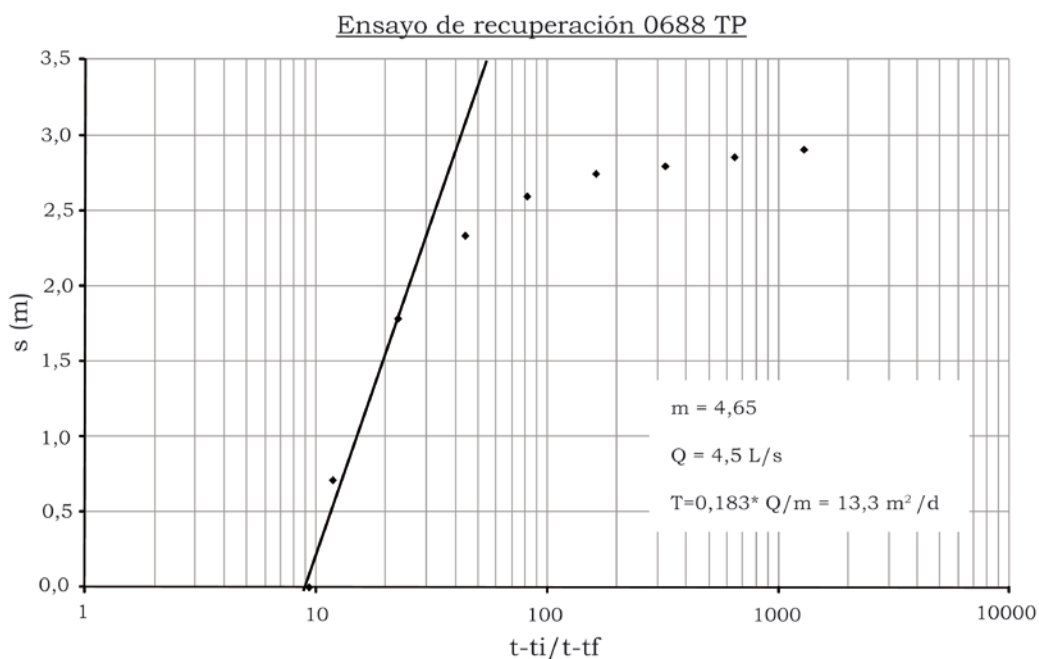


Figura 4.12. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de recuperación realizado en el pozo 0688 TP (año 1993).

Según el informe de inscripción el pozo 1158 TP, se encuentra ubicado en la cota 235 m y tiene excavados 123 m. La obra está revestida entre los metros 0-9, 26.5-58 y 91.5-103.5, o sea unos 52.50 m, lo que supone un 42.68% de la profundidad total. A 26 m presenta una cueva de 8 m de largo y a los 58 m otra de 12 m, con escurrideros en ambas. A los 116 m cuenta con una galería de 101 m de longitud que aporta el 80% del agua. Desde su brocal hasta los 58 m de profundidad atraviesa lavas fonolíticas nefelíticas pertenecientes a la Formación Fonolítica, desde 58 a 63 m corta conglomerados (callaos de barranco en la nomenclatura popular), de 63 a 103.5 m lavas limpias fonolíticas y hasta el fondo tosca de grano fino (Fig. 4.10). Se dispone de datos del ensayo de bombeo realizado el 04/05/1992 (Tabla A.4.6.2, anexo A.4.6. Datos de ensayos de bombeo). Los resultados del ensayo de bombeo se muestran en la figura 4.13.

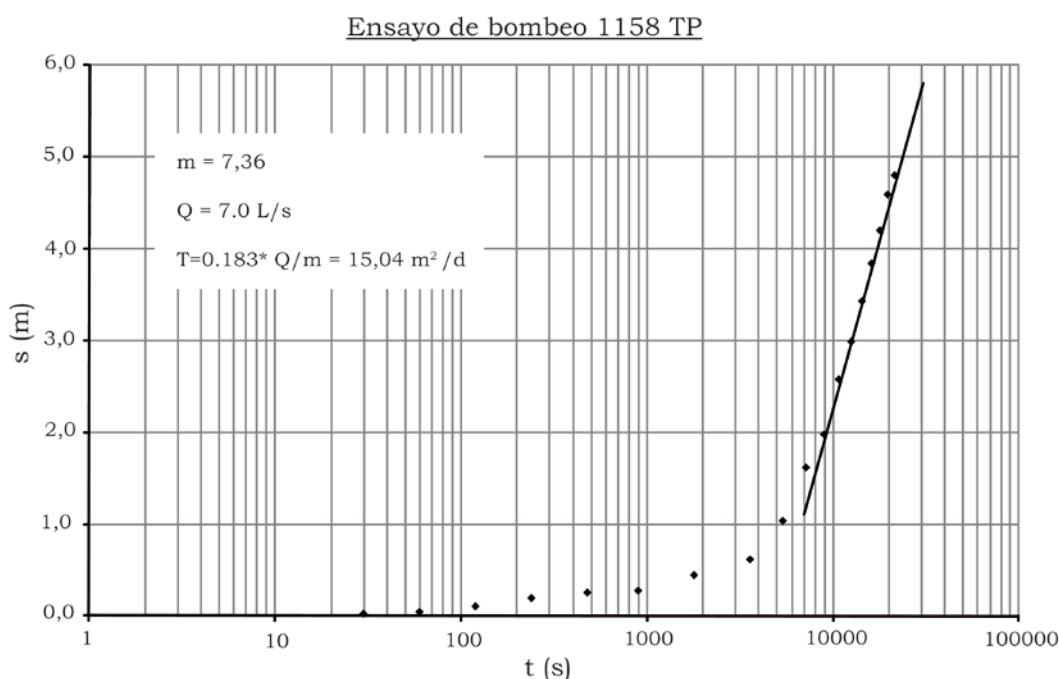


Figura 4.13. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de bombeo realizado en el pozo 1158 TP (año 1992).

### **Grupo Roque Nublo**

Según el PHGC (1991) el pozo 3033BTP se encuentra en la cota 1105 m y tiene una profundidad de 145,5 m. Atraviesa en su totalidad lavas masivas y escoriáceas del Grupo Roque Nublo. Los datos del ensayo de bombeo y recuperación disponible fueron realizados el 21/02/1992 (tabla A.4.6.3, anexo A.4.6. Datos de ensayos de bombeo). Los gráficos obtenidos a partir de dichos datos se muestran en las figuras 4.14 y 4.15.



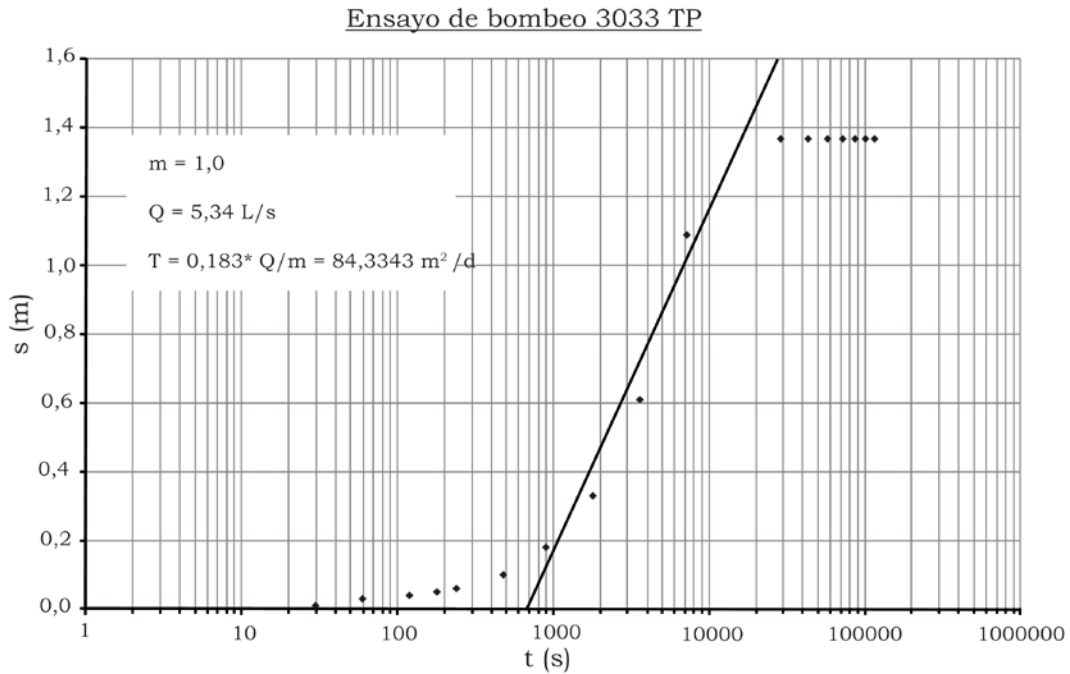


Figura 4.14. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de bombeo realizado en el pozo 3033 TP (año 1992).

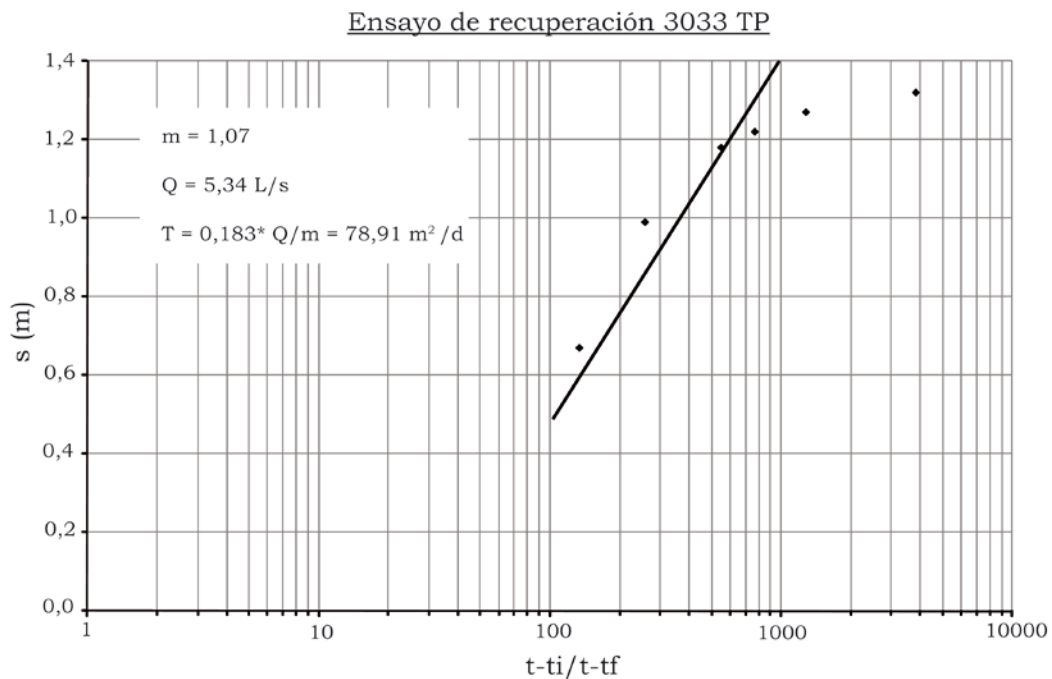


Figura 4.15. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de recuperación realizado en el pozo 3033 TP (año 1992).

Según el informe del pozo 3228 TP, la obra se encuentra a cota 860 y su profundidad es de 282 m. Los primeros 10 m están revestidos y hasta los 52 m de profundidad atraviesa el Grupo Post-Roque Nublo, desde los 52 hasta el fondo atraviesa Grupo Roque Nublo, llegando al contacto entre el Grupo Roque Nublo con la Formación Fonolítica (Fig. 4.10). Se dispone de datos del ensayo de

bombeo (Tabla A.4.6.4, anexo A.4.6. Datos de ensayos de bombeo) realizados el 10/07/1992. El resultado se muestra en la figura 4.16.

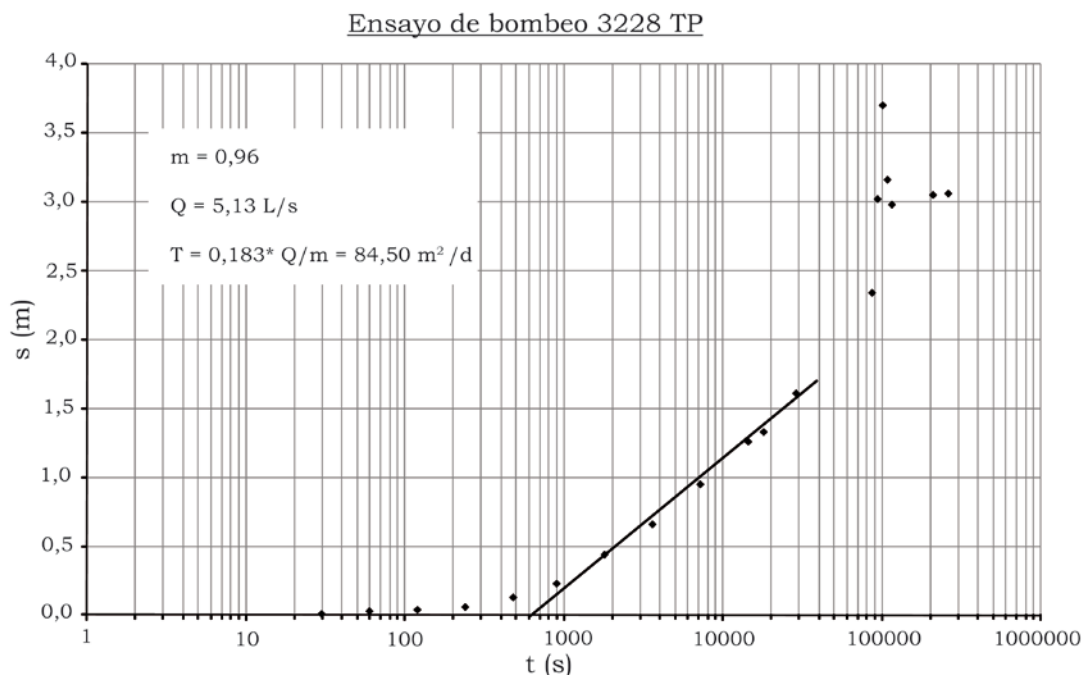


Figura 4.16. Curva de descensos vs. tiempo para el ensayo de bombeo realizado en el pozo 3228 TP (año 1992).

Tanto en el ensayo de bombeo del pozo 3033TP como en el pozo 3228TP se observa que llega un momento en que el nivel se estabiliza. Aunque se puede pensar en el efecto de una posible barrera positiva, lo más probable es que al realizar los ensayos de bombeo, al final se disminuya el caudal de forma artificial mediante estrangulación de la válvula ya que la finalidad de estos ensayos es determinar el caudal de agua que se puede extraer de la obra para su inscripción en el registro insular y por tanto, la adquisición de los derechos de extracción de dicho caudal.

Los resultados se resumen en la tabla 4.3. Hay una buena coincidencia entre los valores obtenidos y los que se encontraron en el estudio SPA-15.

Tabla 4.3. Resumen de las transmisividades obtenidas en los ensayos de bombeo y las obtenidas en el SPA-15 (1971)

Formación	Pozo	Ensayo	Transmisividad (m <sup>2</sup> /día)	Transmisividad SPA-15 (m <sup>2</sup> /d)
Fm. Sálica (fonolitas)	0688TP	Bombeo	14,7	5-10
		Recuperación	15,3	
	1158TP	Bombeo	1,0	
Grupo Roque Nublo	3033TP	Bombeo	84,4	25-200
		Recuperación	78,9	
	3228TP	Bombeo	84,5	

#### 4.2.5 Explotación

En general, en el área de estudio los bombeos de las captaciones son discontinuos, con valores que dependen de la productividad de las mismas y de las necesidades de la demanda de agua de cada momento del año. Al homogenizar los datos de productividad hay que tener en cuenta que los bombeos de las captaciones se producen solamente durante algunas horas al día y que estas pueden variar a lo largo de la semana o a lo largo del año. Para promediar un caudal medio continuo diario que sea equivalente a la cantidad de agua sacada de forma discontinua se ha calculado el Caudal Medio Continuo Equivalente (QMCE) mediante un promedio anual de los datos de explotación a partir de los datos suministrados por los propietarios (Anexo A.4.3. Datos de explotación). Hay que tener en cuenta que los propietarios pueden omitir u ocultar datos o, como ocurre en mucho de los casos, proporcionar información errónea. La tabla 4.4 presenta un resumen de la explotación anual obtenida para los inventarios de que se dispone en distintos periodos de tiempo en la zona de estudio. Es de destacar la notable disminución de la explotación en el tiempo estudiado.

Tabla 4.4. Tabla resumen de explotación anual para distintos periodos.

Periodo	Número de datos	Explotación hm <sup>3</sup> /año
1970-72	62	8,93
1980-81	104	10,02
1997	118	6,72
2008-09	64	5,41



**5. Aspectos hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales**



## **5. Aspectos hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales**

### **5.1 Introducción**

El estudio de la distribución de las sustancias disueltas en el agua permite conocer, bajo ciertas circunstancias, el movimiento del agua subterránea. Ayuda a establecer hipótesis verosímiles de trabajo que pueden confirmar o rechazar las que ya se tienen y que se reflejan en el modelo conceptual de que se dispone. En ocasiones permite estudiar ciertas características de los sistemas acuíferos no asequibles por otros métodos (Custodio, 1978).

En este capítulo se trata de dar una visión de las características hidroquímicas del área de estudio para poder comprender los procesos que tienen lugar en el acuífero. Para ello se estudia la distribución y composición físico-química e isotópica del agua subterránea y de la recarga, sus solutos y la interacción agua roca.

#### **5.1.1 Consideraciones generales relativas a terrenos volcánicos**

Las características químicas de las aguas subterráneas de los terrenos volcánicos, al igual que en otras formaciones geológicas, no depende sólo de la composición química de la litología que atraviesa, sino también de la velocidad de alteración, la cual es función, además del tipo de textura, grado de fragmentación y porosidad del material, de la composición del agua de recarga, de las condiciones climáticas, del tiempo de contacto con la roca, de la temperatura ambiental de la roca, de la longitud de recorrido, de la agresividad del agua, de la presión, etc. (Custodio, 1986).

La mayoría de los minerales presentes en las rocas volcánicas, formadas casi totalmente por silicatos, son muy poco solubles, pero son fácilmente alterables (hidrolizables) si existen hidrogeniones presentes. Estos hidrogeniones se derivan de la presencia de  $\text{CO}_2$  disuelto, que substituye y libera a la fracción catiónica al tiempo que aumenta el pH y la concentración en  $\text{HCO}_3$ . Según la naturaleza de la roca se libera parte del Si como  $\text{SiO}_4\text{H}_4$  no ionizado y el Al queda en el resto sólido de la disolución incongruente como minerales de la arcilla. Así la composición catiónica del agua subterránea está en íntima relación con la composición de la roca en que se ha generado la disolución. Al pasar el agua subterránea de una formación rocosa a otra se pueden producir fenómenos de intercambio catiónico mediante los cuales el agua tiende a asemejarse al agua en equilibrio con el nuevo ambiente en tanto no se equilibren las posiciones de cambio con la nueva composición catiónica.

Normalmente es la composición catiónica, al ser menos conservadora, la más característica del medio en que se encuentra el agua subterránea; por otro lado, lo más usual es que el terreno aporte cationes y los aniones procedan del CO<sub>2</sub> del suelo no saturado, de la lluvia, de emanaciones endógenas o del gas ocluido en los poros cerrados de las rocas (Custodio, 1978, 1986).

En climas húmedos o semi-húmedos con alta recarga, el anión dominante es el HCO<sub>3</sub> (o el CO<sub>3</sub> si el pH llega a ser suficientemente alto) procedente del CO<sub>2</sub> atmosférico disuelto en el agua de lluvia y sobre todo del suelo, mientras que en climas áridos y semiáridos, con menor recarga, los aniones dominantes suelen ser Cl y/o SO<sub>4</sub> de procedencia atmosférica (Custodio, 1978, 1986). La mineralización resultante del agua subterránea muestra un gran efecto climático, variando desde menos de 200 mg/L en zonas húmedas con abundante recarga, hasta más de 10000 mg/L en zonas de notable aridez. También, si existe un relieve muy acentuado, la pluviometría en las zonas altas puede ser mucho mayor que en las áreas bajas y las condiciones de recarga pueden ser más favorables, lo que se traduce en una mayor recarga con aguas poco mineralizadas (Custodio, 2010b). Hay que tener presente las variaciones de detalle de la pluviometría y el efecto de los valles y las crestas, y que la escorrentía superficial directa o de manantiales puede infiltrarse en los cauces aguas abajo.

No es fácil establecer unos valores concretos para las concentraciones iónicas que pueden aportar los diferentes tipos de rocas ya que, como se ha dicho, influyen muchos factores, pero generalmente en el agua relacionada con terrenos basálticos la mayoría del Na, Ca y Mg de la fracción alterada de la roca pasan al agua mientras que una parte del K es retenido en la parte insoluble y el Fe precipita en forma de óxidos si el medio es oxidante. Los aportes litológicos de Cl y SO<sub>4</sub> son escasos a menos que existan sulfuros que por oxidación aporten este último. En general las relaciones rNa/rCa y rMg/rCa son similares a las de las rocas, con valores alrededor de 3 para la primera y 1 para la segunda relación, aunque pueden existir desviaciones muy importantes y en ocasiones la relación rMg/rCa puede ser notablemente mayor que 1 en aguas algo salinas. El pH tiende a ser alto por la facilidad de alteración de estas rocas, en especial del olivino.

### **5.1.2 Características generales de Gran Canaria**

El primer y más importante estudio hidrogeoquímico a nivel insular fue el realizado como parte del proyecto SPA-15 (1975), enfocado principalmente hacia el conocimiento de la circulación del agua subterránea, identificando los diferentes tipos de agua subterránea existentes y su movimiento a través de las formaciones geológicas, así como su calidad y adecuación para la agricultura y el consumo humano. Se realizaron 4 perfiles o secciones hidroquímicas radiales



(Fig 5.1) en los que se representó la evolución de diferentes parámetros fisico-químicos. Las conclusiones generales obtenidas son las siguientes (SPA-15, 1975):

- La temperatura crece de cumbre a costa a lo largo de las secciones, con algunas irregularidades asociadas a concentraciones elevadas de  $\text{CO}_2$  disuelto y disminución del pH, produciéndose simultáneamente un incremento de sílice disuelta, aunque más suave. También crecen de cumbre a costa la conductividad eléctrica, la dureza, el contenido en Cl y  $\text{SO}_4$  y las relaciones  $r\text{Na}/r\text{K}$  y  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ , salvo en las zonas próximas a la periferia.
- La relación  $r(\text{Ca}+\text{Mg})/r(\text{Na}+\text{K})$  muestra un claro efecto litológico. La relación  $r(\text{Na}+\text{K})/r\text{Cl}$  presenta grandes variaciones sin una tendencia definida ni una clara relación litológica aparente, aunque existe una tendencia a que los valores mayores se asocien con fonolitas y los menores con basaltos.
- Los tramos con un elevado contenido en  $\text{CO}_2$  disuelto se corresponden con zonas donde existe una tendencia al incremento en la mineralización.

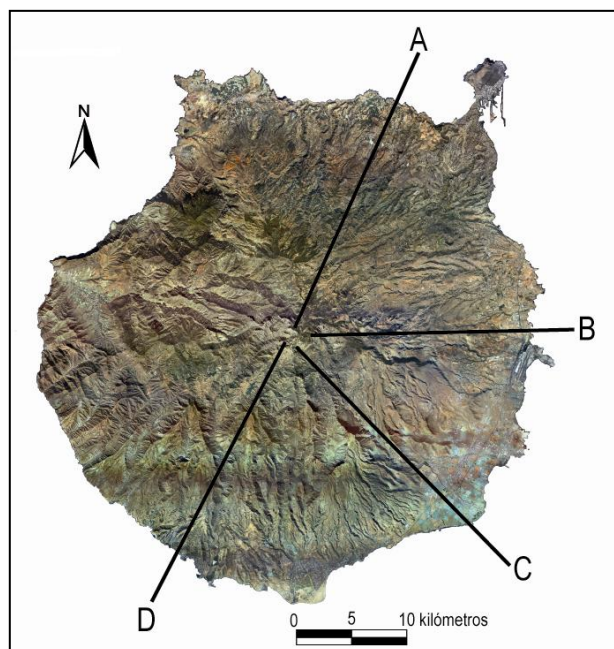


Figura 5.1. Secciones químicas realizadas en el proyecto SPA-15 (1975).

Existe una correlación entre la composición catiónica porcentual del agua subterránea y algunas relaciones características de las formaciones de Gran Canaria (Tabla 5.1). La relación más significativa es la  $r(\text{Mg}+\text{Ca})/r(\text{Na}+\text{K})$ , que varía entre más de 1,0 para las rocas de tipo basalto-basanitas (Basaltos Miocenos, Grupo Roque Nublo y Basaltos Post-Roque Nublo) y menos de 0,1 para las de carácter ácido (fonolitas e ignimbritas). La relación  $r\text{Na}/r\text{K}$  tiende a disminuir con la acidez de la roca y la  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$  señala que en los basaltos es

$rMg > rCa$ , mientras que en las demás rocas  $rMg < rCa$ , exceptuando las traquitas (Custodio, 1978, Fernandopullé, 1974).

Tabla 5.1. Composiciones porcentuales y relaciones iónicas características de las rocas de Gran Canaria (modificado de Custodio, 1978). Con  $r$ , valor en meq/L; sin  $r$ , valor ponderal. Los valores entre paréntesis son las medias.

	Basaltos antiguos	Basaltos modernos	Formaciones PRN y RN y tefritas	Fonolitas e ignimbritas	Traquisienitas y traquitas
% Na <sub>2</sub> O	1,5 a 4,0 (2,8)	2,5 a 6,0 (3,8)	3,4 a 5,9 (4,5)	5,3 a 10,0 (7,2)	5,2 a 6,9 (6,1)
% K <sub>2</sub> O	0,9 a 1,8 (1,0)	0,6 a 5,1 (1,8)	1,1 a 4,5 (2,4)	4,9 a 6,3 (5,6)	4,3 a 5,8 (5,5)
% MgO	4,3 a 13,7 (9,3)	5,1 a 16,0 (10,3)	3,9 a 7,4 (5,1)	0,0 a 1,0 (0,5)	0,1 a 3,0 (0,6)
% CaO	8,0 a 13,0 (10,5)	9,0 a 13,0 (11,5)	6,4 a 11,5 (9,5)	0,5 a 2,0 (1,3)	0,5 a 1,8 (0,8)
$\frac{\%Na_2O}{\%K_2O}$	1,8 a 4,0 (2,8)	1,5 a 4,8 (2,1)	1,0 a 3,2 (1,9)	1,0 a 1,8 (1,3)	1,0 a 1,8 (1,3)
$\frac{\%(Mg + Ca)}{\%(Na + K)}$	2,1 a 8,3 (5,1)	1,9 a 7,7 (4,0)	1,2 a 4,0 (2,1)	0,06 a 0,25 (0,15)	0,06 a 0,5 (0,13)
$\frac{rNa}{rK}$	2,7 a 6,0 (4,2)	2,3 a 7,0 (3,2)	1,5 a 5,0 (2,9)	1,5 a 2,7 (2,0)	1,5 a 2,7 (2,0)
$\frac{rMg}{rCa}$	0,8 a 2,4 (1,3)	0,6 a 1,8 (1,3)	0,4 a 1,0 (0,7)	0,0 a 0,2 (0,6)	0,3 a 2,2 (1,6)
$\frac{r(Mg + Ca)}{r(Na + K)}$	3,5 a 15,0 (7,6)	3,0 a 12,0 (5,4)	2,0 a 7,0 (3,0)	0,1 a 0,4 (0,2)	0,1 a 0,8 (0,2)
% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,3 a 1,1 (0,6)	0,6 a 1,7 (1,0)	0,5 a 1,0 (0,9)	0,0 a 0,12 (0,05)	0,05 a 0,2 (0,1)

## 5.2 Metodología

### 5.2.1 Procedencia de los datos

Para el estudio hidroquímico del área de estudio se ha contado con datos recopilados de campañas previas de otros proyectos y de los obtenidos en las campañas de campo realizadas para el presente estudio. Con esta información se ha construido una base de datos que cuenta con las siguientes tablas de datos: datos químicos de campo y laboratorio del agua subterránea, datos químicos de laboratorio del agua de lluvia y análisis isotópicos de muestras de agua de lluvia y subterránea.

Se dispone de 903 análisis químicos de laboratorio de agua subterránea, de 228 captaciones de agua de la zona de estudio entre 1931 y 2009 (Tabla 5.2) (Anexo, A.5.1. Datos químicos de laboratorio) y 714 datos de determinaciones físico-químicas de campo de un total de 231 captaciones (Anexo, A.5.2. Datos químicos de campo).

Tabla 5.2. Resumen de los datos de química de laboratorio incluidos en la base de datos.

QUIMICA DE LABORATORIO		
PERIODO	PROCEDENCIA	Nº DE ANÁLISIS
1931-1946	Instituto Provincial de Sanidad	2
1970-1972	Proyecto SPA-15	67
1980-1981	Proyecto MAC-21	111
1980-2009	IGME	144
1981-1997	Evolución acuíferos costeros (CIAGC)	14
1981-2007	CIAGC	265
1987	Control del acuífero de GC (CIAGC)	22
1997-2001	Inventario puntos de agua (CIAGC)	157
1998	Archivo Heredad Arucas-Firgas	9
1998	Infraestructura y Ecología S.L.	23
2006	Trabajo CIHS-Pilar Hdez-Quesada	13
2007-2008	Comunidad de Fontanales	6
2008-2009	Campaña de esta tesis	70
		TOTAL 903

En el Anexo A.5.1. Datos químicos de laboratorio, se presentan los datos de laboratorio en dos tablas:

- **Tabla I:** Expediente, fecha de muestreo, Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub>, en meq/L, suma de cationes y de aniones, error del balance de iones y fuente de procedencia
- **Tabla II:** Expediente, fecha de muestreo, conductividad eléctrica (μS/cm), pH, TA y TAC (mg/L de CaCO<sub>3</sub>), dureza total y dureza permanente (mg/L de CaCO<sub>3</sub>) y laboratorio donde se realizó el análisis.

En el Anexo A.5.2. Datos químicos de campo, se muestran los datos fisico-químicos de campo en una tabla que contiene los siguientes valores: expediente, fecha, localización de la muestra, clave de bombeo, T<sup>a</sup> del aire (°C), T<sup>a</sup> del agua (°C), conductividad eléctrica (μS/cm), pH y alcalinidad (mg/L de CaCO<sub>3</sub>).

También se cuenta con 138 análisis isotópicos de <sup>18</sup>O y <sup>2</sup>H de 101 captaciones de agua subterránea (Tabla 5.3) (Anexo, A.5.3. Datos isotópicos).

Tabla 5.3. Resumen de los datos de análisis isotópicos incluidos en la base de datos.

ANÁLISIS ISOTÓPICOS		
PERIODO	PROCEDENCIA	Nº DE ANÁLISIS
1971-1972	Proyecto SPA-15	15
1992	IGME	17
2006	Trabajo CIHS-Pilar Hdez-Quesada	16
2008-2009	IGME	23
2008-2009	Campaña de esta tesis	67
		TOTAL 138

Se dispone de 220 análisis químicos e isotópicos del agua de lluvia de las cinco estaciones pluviométricas que forman parte de la red de control realizada en el periodo 2008-13 (Anexo, A.5.4. Datos químicos de laboratorio del agua de lluvia y Anexo, A.5.3. Datos isotópicos).

El Anexo A.5.4 Datos químicos de laboratorio del agua de lluvia, presenta los análisis químicos de laboratorio del agua de lluvia, con los siguientes valores: estación, fecha de recogida de muestra, pH, conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ),  $\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ , Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ , Na, K, Ca, Mg,  $\text{NH}_4$ , P, B, Cu, Fe, Mn, Zn,  $\text{SiO}_2$ , TSD y dureza, en mg/L.

El Anexo A.5.3. Datos isotópicos, presenta las tablas con las determinaciones isotópicas del agua subterránea y de precipitación con los siguientes campos: expediente, fecha de muestreo,  $^{18}\text{O}$  (fecha de análisis,  $\delta^{18}\text{O}$  ‰SMOW,  $\pm 1\sigma$ , n),  $^2\text{H}$  (fecha análisis,  $\delta^2\text{H}_{\text{SMOW}}$ , ‰,  $\pm 1\sigma$ , n) y laboratorio.

## 5.2.2 Muestreos realizados

### 5.2.2.1 Agua subterránea

En las campañas de campo realizadas para la presente tesis se tomaron un total de 70 muestras en distintos puntos distribuidos en la zona de estudio. Las muestras se tomaron directamente de las captaciones mediante bombeo. En cada punto se tomaron dos tipos de muestras, una en botella de polietileno de 500 mL de capacidad para la realización del análisis químico general y otra en viales de vidrio opaco de 5 mL de capacidad para los análisis de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ .

Para el estudio de la relación isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  se tomaron muestras de 10 captaciones en botellas de vidrio opacas de 250 mL, acidificadas con 4 mL de  $\text{HNO}_3$  al 5% en el momento de la toma de muestra.

Además se tomaron cuatro muestras de agua subterránea para determinar  $\delta^{13}\text{C}$  (TDIC). El volumen de muestra tomada y la cantidad de reactivo añadido se calculó en función de la cantidad de bicarbonatos analizados anteriormente en los distintos puntos a muestrear. Las muestras en el momento de la toma fueron tratadas con NaOH al 15% para elevar el pH a 9 para que todas las especies del carbono se encontraran como  $\text{CO}_3$  y entonces se añadió  $\text{SrCl}_2$  para que precipitaran los carbonatos como  $\text{SrCO}_3$ . Finalmente se filtró para obtener la muestra del precipitado.

En todos los casos se tuvo en cuenta que el cierre de la botella fuera hermético y se cuidaron las condiciones de conservación de las muestras hasta su análisis en el laboratorio con el fin de evitar posibles alteraciones.

### 5.2.2.2 Agua de lluvia

El muestreo de agua de lluvia específico para esta tesis se realizó durante un periodo de cuatro años, desde octubre de 2008 a septiembre de 2012, en cinco estaciones pluviométricas situadas a diferentes cotas pertenecientes a la red pluviométrica del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, para poder obtener el dato de cantidad de lluvia de dicho organismo. En estas estaciones se tomaron muestras de lluvia acumulada mensual para realizar posteriormente análisis químico general e isotópico. Los tomamuestras se colocaron junto a los pluviómetros. Consistían en depósitos de plástico, cubiertos con una malla para impedir la entrada de elementos ajenos; se protegió la muestra de la evaporación con una capa de aceite de parafina con un espesor aproximado de 0,5 cm (Fig. 5.2). El muestreo se continuó posteriormente por el equipo de trabajo GEOVOL, los datos obtenidos se han considerado para extender las series para el cálculo de la recarga, aunque no de las características químicas ya que su consideración no modifica significativamente los resultados conseguidos.

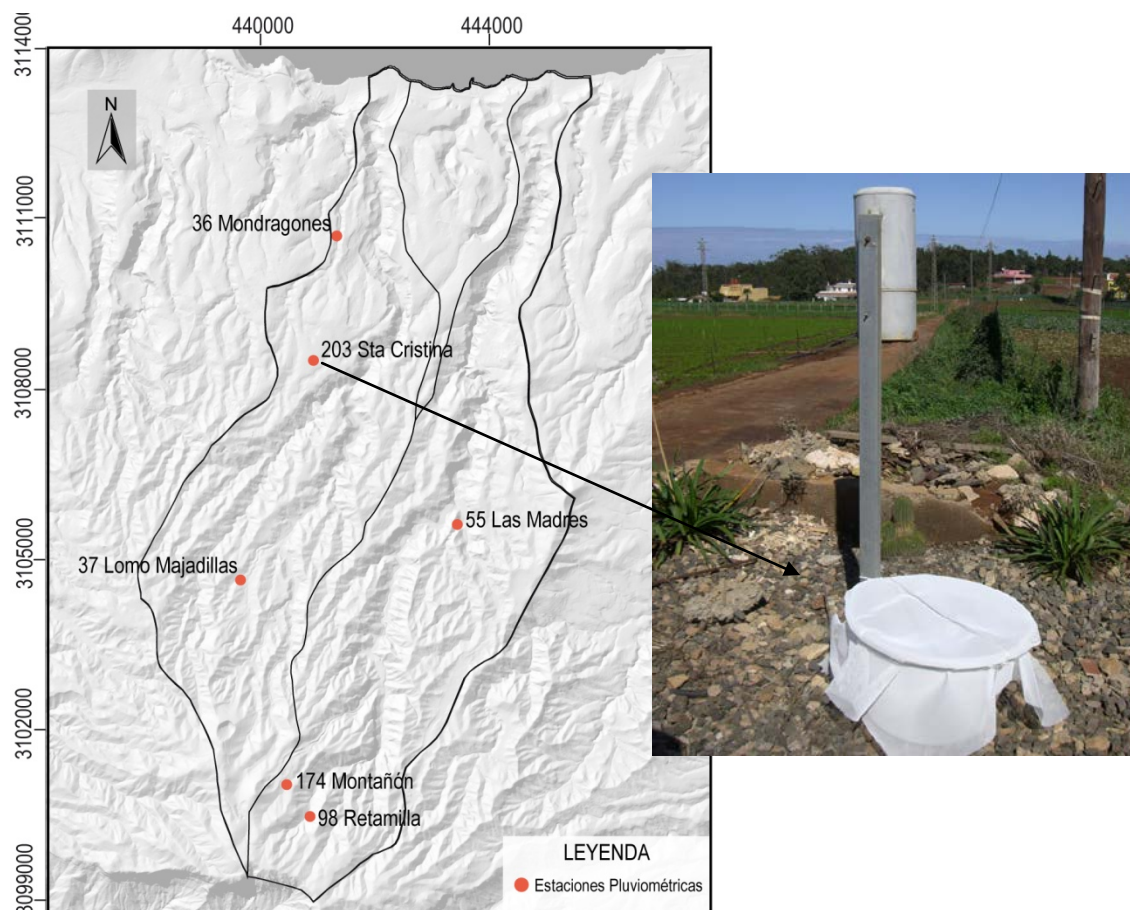


Figura 5.2. Situación de la estaciones pluviométricas muestreadas. Tomamuestras de agua de lluvia situado junto a la estación pluviométrica 203 Sta. Cristina.

### 5.2.3 Determinaciones de campo

Simultáneamente a la obtención de las muestras de agua subterránea se realizaron medidas físico-químicas in situ, tomándose para cada punto, medidas de:

- Temperatura de agua y aire (°C), con termómetro de mercurio y precisión  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
- pH, con un pH-metro portátil modelo Crison pH 25, con reproductibilidad de  $\pm 0,01$  unidades de pH
- Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), con un conductivímetro portátil Crison modelo CM 35, con reproductibilidad de  $\pm 0,2\%$ , con compensación automática de temperatura a una TR (temperatura de referencia) de  $25^{\circ}\text{C}$ .
- Alcalinidad, TA y TAC (mmol/L de  $\text{CaCO}_3$ ), mediante valoración volumétrica ácido/base, con el “kit” de reactivos de Visocolor HE Alcalinidad de carbonato C 20.

Cada electrodo fue calibrado diariamente en el laboratorio antes de salir de campo, con los estándares recomendados por su fabricante.

### 5.2.4 Determinaciones de laboratorio

Durante el periodo comprendido entre el muestreo y el análisis en el laboratorio, las muestras de agua fueron conservadas en refrigeradores a temperatura de  $4^{\circ}\text{C}$  y protegidas de la luz.

Las muestras tomadas para la determinación de la química general, las de agua subterránea de la campaña de campo del 2008-2009 y las acumuladas mensuales de agua de lluvia fueron analizadas en el laboratorio de la Granja del Cabildo de Gran Canaria. La tabla 5.4 muestra las técnicas utilizadas en dicho laboratorio para la determinación de los parámetros analizados. Se han utilizado métodos estándar con una precisión mejor del 10%.

Tabla 5.4. Técnicas de laboratorio empleadas por el laboratorio de la Granja del cabildo de GC.

Método	Parámetros analizados
Electrometría	pH y conductividad eléctrica
Val. potenciométrica	Carbonatos y bicarbonatos
Cromatografía iónica	Cloruros, sulfatos y nitratos
ICP-OES	Sodio, potasio, calcio, magnesio, fosforo, boro, cobre, hierro, manganeso, cinc y silice
Nessler	Amonio

Las muestras tomadas para el análisis isotópico del  $^2\text{H}$  (deuterio) y  $^{18}\text{O}$ , tanto de agua subterránea como de agua de lluvia, fueron analizadas en el laboratorio del Servicio General de Análisis de Isótopos Estables de la Facultad de Ciencias de Salamanca. Las técnicas utilizadas fueron: para el gas de alimentación al

espectrómetro el método de equilibrio con CO<sub>2</sub> para la determinación de relaciones isotópicas de <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O, y el método de reducción con Cr para la obtención de H<sub>2</sub> para la determinación de la relación isotópica <sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H, La determinación de las relaciones isotópicas se realizó por espectrometría de masas de fuente gaseosa en flujo discontinuo. La precisión de las medidas de σ<sup>18</sup>O es de 0.4±0.1 y la del σ<sup>2</sup>H es de 0.6±0.3.

Los análisis isotópicos del estroncio se realizaron en el laboratorio de Geocronología y Geoquímica Isotópica (IBERCRON) de la Universidad del País Vasco, mediante un espectrómetro de masas Finnigan MAT-262 con 8 cajas de Faraday y un fotomultiplicador de electrones secundarios. Los datos analíticos se han corregido mediante la ley lineal de fraccionamiento de masas tomando como constante la relación <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr = 0.1194 (Steiger y Jager, 1977). Los datos obtenidos para el patrón NBS-987 son: media de 0,710284 y desviación estándar de 0,000010.

Las determinaciones de <sup>13</sup>C se realizaron en el laboratorio del Servicio General de Análisis de Isótopos Estables de la Facultad de Ciencias de Salamanca. La determinación se realizó por espectrometría de masas de fuente gaseosa en modo de doble entrada, usando un espectrómetro SIRA Series II sobre muestras de SrCO<sub>3</sub> precipitadas en campo.

### 5.2.5 Tratamiento de los datos analíticos

Para los trabajos de la presente tesis se han eliminado aquellos análisis que pudieran presentar errores analíticos y de referenciación. Las comprobaciones realizadas para detectar errores analíticos han sido:

- **Balance de cationes y aniones:** se ha calculado para todos los análisis. El error se ha calculado como:

$$e(\%) = 200 \frac{\sum \text{cationes}(\text{meq/L}) - \sum \text{aniones}(\text{meq/L})}{\sum \text{cationes}(\text{meq/L}) + \sum \text{aniones}(\text{meq/L})}$$

El error admisible depende de la conductividad eléctrica del agua (Tabla 5.5)

Tabla 5.5. Error admisible en el balance de cationes y aniones dependiendo de la conductividad eléctrica (CE) de la muestra (Custodio y Llamas, 1976)

CE (μS/cm)	50	200	500	2000	>2000
Error admisible (%)	30	10	8	4	4

La base de datos de agua subterránea elaborada cuenta con un total de 1139 muestras, de las cuales 90 presentan un error analítico no aceptable. De los 1049 análisis que no presentan error analítico han sido desechados 146, bien porque son muestras tomadas el

mismo día, bien porque siendo de diferentes tiempos durante la realización de ensayos de bombeo son iguales o muy similares. Quedan finalmente 903 análisis de muestras de agua subterránea para el estudio hidroquímico.

La base de datos de agua de lluvia acumulada mensual dispone de un total de 182 muestras analizadas, de las cuales sólo 67 disponen de todos los datos de concentración de los iones principales ya que en la mayoría de los casos tienen algún componente con concentración por debajo del límite de cuantificación. Para no desechar todos estos análisis, en el caso de faltar un componente, éste se ha estimado, para lo que se calcula la mediana del error de todos los análisis que tienen datos de concentración de todos los iones principales y partiendo de este dato se determina la concentración del valor que falta en los análisis incompletos. Una vez hechos las estimaciones se comprueba que los valores no superaran el límite de cuantificación. Finalmente se han desechado 56 de los 182 iniciales.

- **Comprobación de las conductividades eléctricas:** la conductividad eléctrica del agua es proporcional al contenido de iones disueltos que contiene, existiendo una relación lineal aproximada que viene dada por la ecuación siguiente (Custodio y Llamas, 1976):

$$C(\mu S/cm) = A * M(meq/L)$$

donde:

A = pendiente de la línea de regresión. Valor admisible entre 85-90

M = semisuma en meq/L de los iones mayoritarios

aunque hay desviaciones según la distribución iónica.

Una vez eliminados los análisis con error no admisible según el balance de cationes y aniones se ha comprobado el resto de los análisis por las conductividades eléctricas. La conductividad eléctrica frente a la semisuma de los iones mayoritarios se muestra en la figura 5.3. La recta de regresión obtenida para los análisis de agua subterránea es:  $y = 88,3 x + 14,2$ , cuya pendiente está dentro del rango de los valores admisibles.



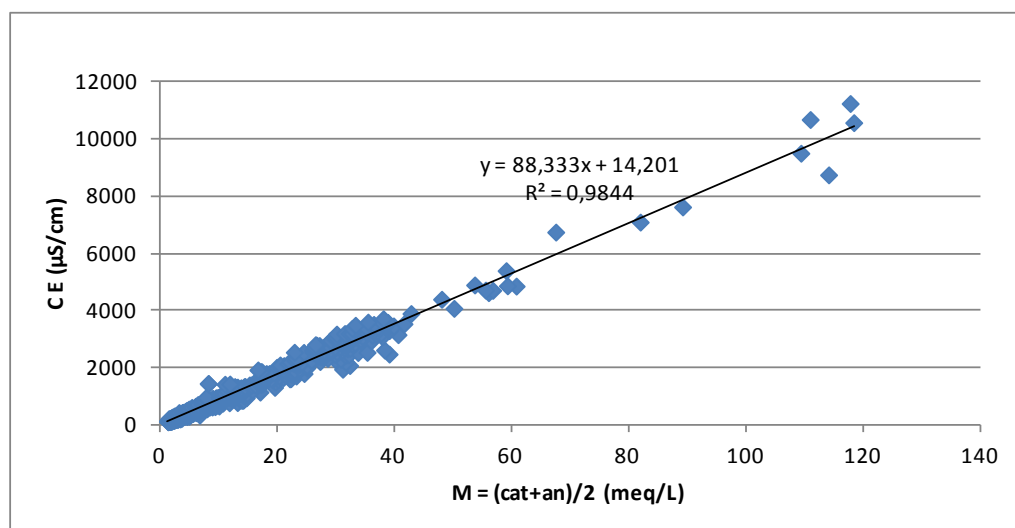


Figura 5.3. Representación gráfica de la conductividad eléctrica frente a la semisuma de los iones mayoritarios para los análisis con error aceptable del balance de cationes y aniones.

### 5.3 Caracterización del agua de lluvia

El agua de lluvia en la zona de estudio ha sido caracterizada a partir de 126 análisis de muestras acumuladas mensuales, tomadas junto a estaciones pluviométricas entre octubre de 2008 y septiembre de 2012. Se trata de 5 estaciones, aunque una de ellas, la estación 174, Montañón Negro, tuvo que ser sustituida por la 098, La Retamilla, en un lugar próximo, por razones operativas. La figura 5.2 muestra la situación de las estaciones muestreadas y la tabla 5.6 recoge además periodos de observación, precipitación acumulada, días con lluvia en dichos periodos y conductividad eléctrica medida en los mismos.

#### 5.3.1 Caracterización química del agua de lluvia

Para caracterizar el agua de lluvia, por estación pluviométrica se han representado los análisis químicos en diagramas logarítmicos verticales (de Schoeller-Berkaloff). Junto a ellos se presenta una tabla-resumen con datos estadísticos de los resultados obtenidos en los análisis, datos de ubicación y observaciones (Figs. 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8).

Tabla 5.6. Localización de las estaciones pluviométricas y periodo de muestreo de las muestras de agua de lluvia completas disponibles. Precipitación acumulada y días con lluvia por periodo muestreado.

Estación	UTM-X (m)	UTM-Y (m)	Altitud (m)	Distancia al mar (km)	Periodo de observación	Precipitación en el periodo (mm)	Nº de días: totales/con lluvia	CE (µS/cm)
036 Mondragones	441340	3110700	375	2,3	06/11/08 - 28/11/08	26,2	23/3	75
					28/11/08 - 09/01/09	56,3	42/6	68
					09/01/09 - 30/01/09	29,0	21/4	72
					30/01/09 - 26/02/09	35,8	27/5	59
					30/03/09 - 30/04/09	22,4	31/5	174
					30/04/09 - 01/06/09	0,9	32/1	492
					01/06/09 - 01/07/09	0,5	30/1	1109
					02/09/09 - 05/10/09	14,5	33/3	365
					05/10/09 - 02/11/09	5,1	28/2	217
					02/11/09 - 02/12/09	74,5	30/11	122
					04/03/10 - 05/04/10	4,3	33/2	246
					03/05/10 - 02/06/10	6,2	30/2	112
					02/06/10 - 01/07/10	1,5	29/1	269
					01/07/10 - 31/08/10	13,9	61/2	192
					31/08/10 - 06/10/10	3,1	36/3	302
					02/12/10 - 12/01/11	5,3	41/	135
					12/01/11 - 01/02/11	123,3	20/5	28
					01/02/11 - 11/03/11	49,1	38/4	67
					11/03/11 - 08/04/11	28,3	28/3	79
					08/04/11 - 04/05/11	19,1	26/3	105
					04/05/11 - 19/08/11	30,8	107/7	263
					19/08/11 - 03/11/11	12,7	76/3	583
					03/11/11 - 13/12/11	14,4	40/5	137
					13/12/11 - 02/02/12	10,1	51/3	164
02/02/12 - 09/05/12	7,3	97/5	249					
09/05/12 - 03/07/12	4,8	55/1	301					
03/07/12 - 02/10/12	13,2	91/5	226					
055 Las Madres	443450	3105605	577	7,5	30/10/08 - 28/11/08	88,1	29/9	54
					28/11/08 - 09/01/09	164,7	42/8	41
					30/01/09 - 26/02/09	109,2	27/9	45
					30/04/09 - 01/06/09	11,2	32/4	245
					01/06/09 - 01/07/09	3,3	30/2	196
					01/07/09 - 02/09/09	6,4	64/2	367
					04/03/10 - 05/04/10	30,0	33/4	131
					05/04/10 - 03/05/10	9,0	28/3	160
					03/05/10 - 02/06/10	27,8	30/2	161
					02/06/10 - 01/07/10	19,9	29/5	133
					01/07/10 - 31/08/10	28,2	61/2	94
					31/08/10 - 06/10/10	17,8	36/5	118
					02/12/10 - 12/01/11	39,3	41/8	48
					01/02/11 - 11/03/11	36,5	38/8	90
					11/03/11 - 08/04/11	54,6	28/2	37
					08/04/11 - 04/05/11	144,4	26/3	43
					04/05/11 - 19/08/11	85,6	107/5	204
					19/08/11 - 13/12/11	119,2	116/17	60
					13/12/11 - 03/01/12	24,0	21/3	57
					03/01/12 - 02/02/12	32,1	30/6	120
02/02/12 - 02/04/12	12,0	60/9	443					
09/05/12 - 03/07/12	31,8	55/4	161					

Estación	UTM-X (m)	UTM-Y (m)	Altitud (m)	Distancia al mar (km)	Periodo de observación	Precipitación en el periodo (mm)	N° de días: totales/con lluvia	CE (μS/cm)
					03/07/12 - 04/10/12	49,0	93/4	82
203 Sta Cristina	400930	3108500	645	4,8	31/10/08 - 28/11/08	56,6	29/8	113
					28/11/08 - 09/01/09	141,7	42/16	116
					09/01/09 - 30/01/09	95,5	21/11	57
					30/01/09 - 26/02/09	62,9	27/10	90
					30/03/09 - 30/04/09	64,0	31/16	195
					30/04/09 - 01/06/09	5,6	32/2	594
					01/06/09 - 01/07/09	3	30/1	713
					02/09/09 - 05/10/09	19,8	33/3	594
					05/10/09 - 02/11/09	10,9	28/3	354
					04/03/10 - 05/04/10	19,1	33/5	148
					05/04/10 - 03/05/10	7,8	28/2	175
					03/05/10 - 02/06/10	29,9	30/4	83
					02/06/10 - 01/07/10	9,5	29/5	211
					01/07/10 - 31/08/10	23,2	61/2	124
					31/08/10 - 06/10/10	6,6	36/5	126
					02/12/10 - 12/01/11	25,5	41/6	56
					01/02/11 - 11/03/11	52,0	38/4	62
					11/03/11 - 08/04/11	47,5	28/5	50
					08/04/11 - 04/05/11	73,1	26/9	56
					04/05/11 - 19/08/11	64,2	107/12	181
					19/08/11 - 03/11/11	20,3	76/3	209
					03/11/11 - 13/12/11	44,1	40/9	89
					13/12/11 - 03/01/12	14,8	21/2	110
03/01/12 - 02/02/12	23,7	30/6	117					
16/04/12 - 09/05/12	20,8	23/3	284					
09/05/12 - 03/07/12	19,6	55/8	267					
03/07/12 - 02/10/12	23,7	91/5	237					
37 Lomo Majadillas	439655	3104625	990	8,8	28/11/08 - 09/01/09	159,6	42/18	35
					09/01/09 - 30/01/09	96,0	21/12	31
					30/01/09 - 26/02/09	117,8	27/10	41
					30/04/09 - 01/06/09	4,5	32/1	390
					01/06/09 - 01/07/09	2,0	30/1	361
					02/09/09 - 05/10/09	34,8	33/5	112
					05/10/09 - 02/11/09	8,2	28/2	91
					04/03/10 - 05/04/10	17,0	33/1	159
					03/05/10 - 02/06/10	20,5	30/3	140
					02/06/10 - 01/07/10	16,5	29/3	117
					31/08/10 - 06/10/10	20,4	36/3	95
					02/12/10 - 12/01/11	72,7	41/9	35
					12/01/11 - 01/02/11	144,5	19/8	22
					01/02/11 - 11/03/11	41,0	39/7	81
					11/03/11 - 08/04/11	109,5	27/5	76
					08/04/11 - 04/05/11	106,5	27/7	42
					04/05/11 - 19/08/11	37,2	107/4	161
					19/08/11 - 03/11/11	26,4	76/3	113
					03/11/11 - 13/12/11	60,9	40/9	75
					13/12/11 - 03/01/12	16,2	21/2	53
					03/01/12 - 02/02/12	24,2	30/5	49
					02/02/12 - 01/03/12	13,1	29/9	310
					16/04/12 - 09/05/12	20,1	23/4	93
09/05/12 - 03/07/12	6,4	55/4	131					
03/07/12 - 02/10/12	30,7	91/4	109					

Estación	UTM-X (m)	UTM-Y (m)	Altitud (m)	Distancia al mar (km)	Periodo de observación	Precipitación en el periodo (mm)	Nº de días: totales/con lluvia	CE (µS/cm)
174 Montañón	439840	3101176	1436	12,2	31/10/08 - 28/11/08	84,7	28/16	38
					09/01/08 - 30/01/09	115,9	21/13	30
					30/01/09 - 26/02/09	120,7	27/12	40
					30/04/09 - 01/06/09	3,2	32/3	443
					01/06/09 - 01/07/09	1,8	30/2	387
					02/09/09 - 05/10/09	42,9	33/7	50
					05/10/09 - 02/11/09	5,5	28/4	141
					03/05/10 - 02/06/10	18,4	30/7	163
098 Retamilla	440870	3100450	1370	12,5	02/06/10 - 01/07/10	18,5	29/8	93
					01/07/10 - 31/08/10	3,3	62/2	140
					31/08/10 - 06/10/10	18,9	36/4	68
					06/10/10 - 03/11/10	74,6	28/9	68
					21/12/10 - 01/02/11	221,3	43/16	27
					01/02/11 - 11/03/11	56,7	38/13	71
					11/03/11 - 08/04/11	91,1	28/9	25
					08/04/11 - 04/05/11	97,0	26/11	34
					04/05/11 - 19/08/11	29,3	107/11	243
					19/08/11 - 03/11/11	28,5	76/9	84
					03/11/11 - 23/11/11	79	20/10	43
					23/11/11 - 13/12/11	16,7	20/2	58
					13/12/11 - 03/01/12	23,5	21/2	42
					03/01/12 - 02/02/12	3,3	30/8	52
02/02/12 - 01/03/12	20,8	28/10	158					
03/07/12 - 02/10/12	57,3	91/7	98					

**Estación 036 Mondragones**

**DIAGRAMA DE SCHOELLER-BERKALOFF**

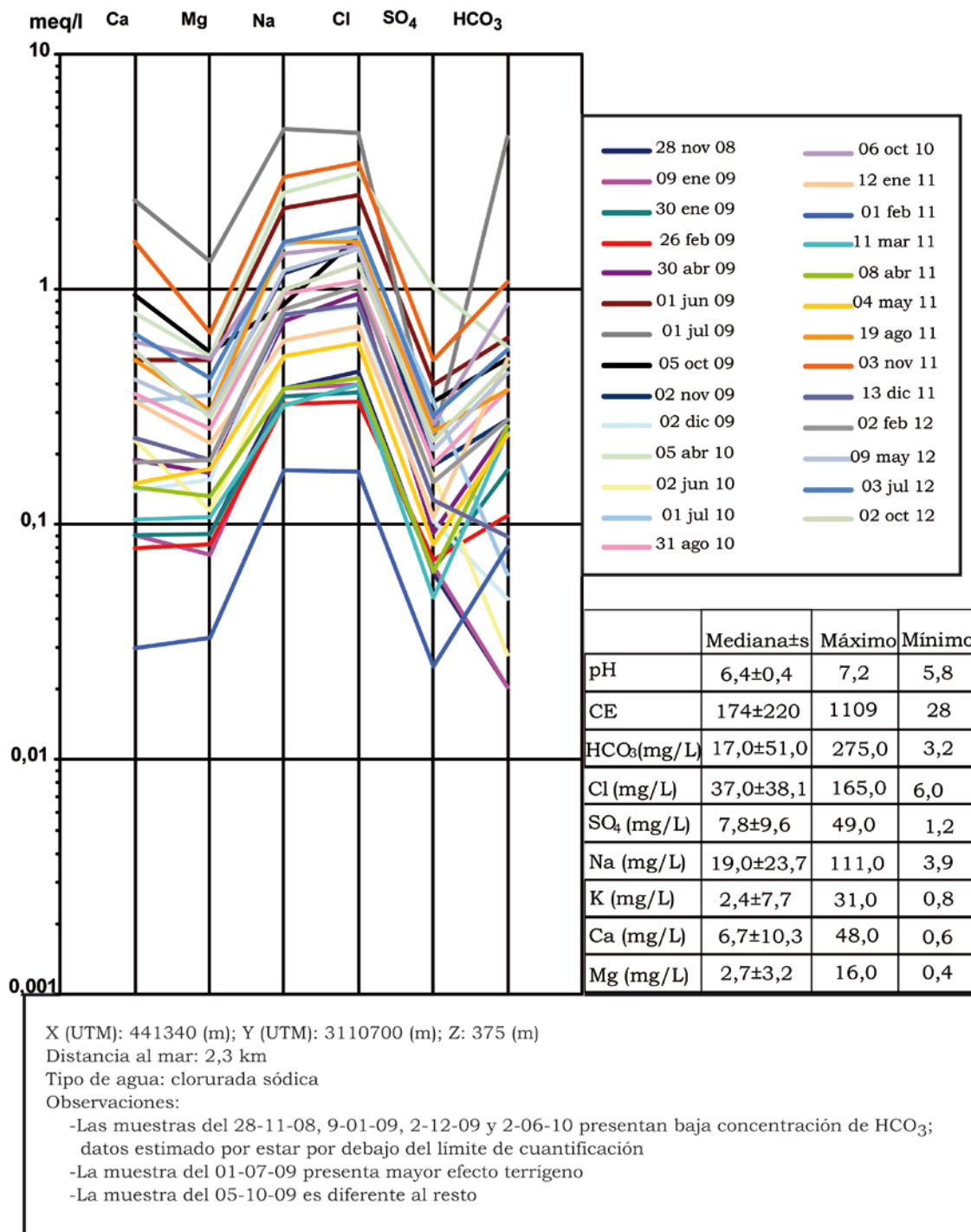


Figura 5.4. Diagrama de escalas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de la estación 036, Mondragones, tabla de resumen estadístico de la conductividad eléctrica, pH e iones principales, datos de ubicación y observaciones.

**Estación 055 Las Madres**

**DIAGRAMA DE SCHOELLER-BERKALOFF**

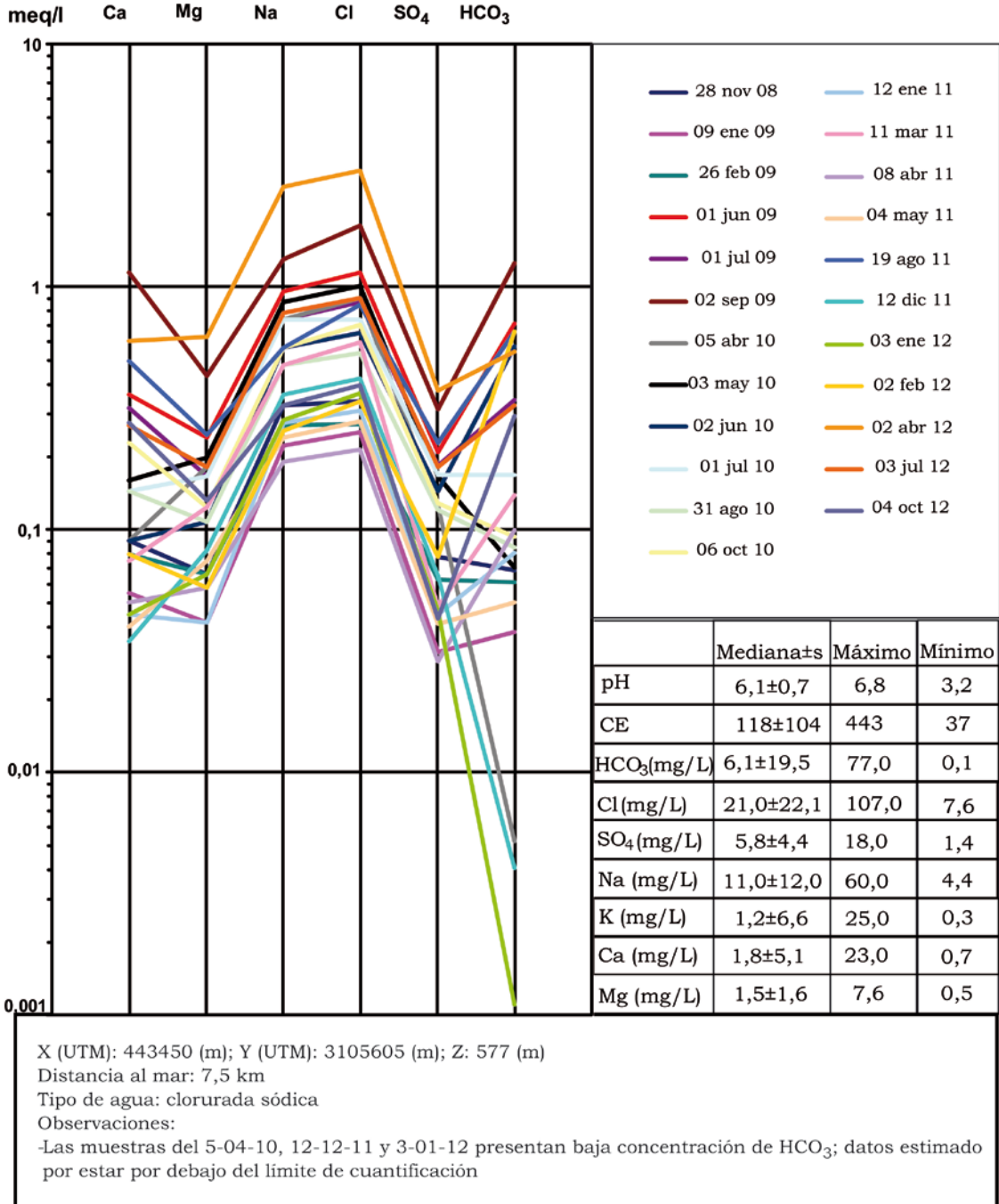


Figura 5.5. Diagrama de escalas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de la estación 055, Las Madres y tabla de resumen estadístico de la conductividad eléctrica, pH e iones principales, datos de ubicación y observaciones.

## Estación 203 Sta. Cristina

## DIAGRAMA DE SCHOELLER-BERKALOFF

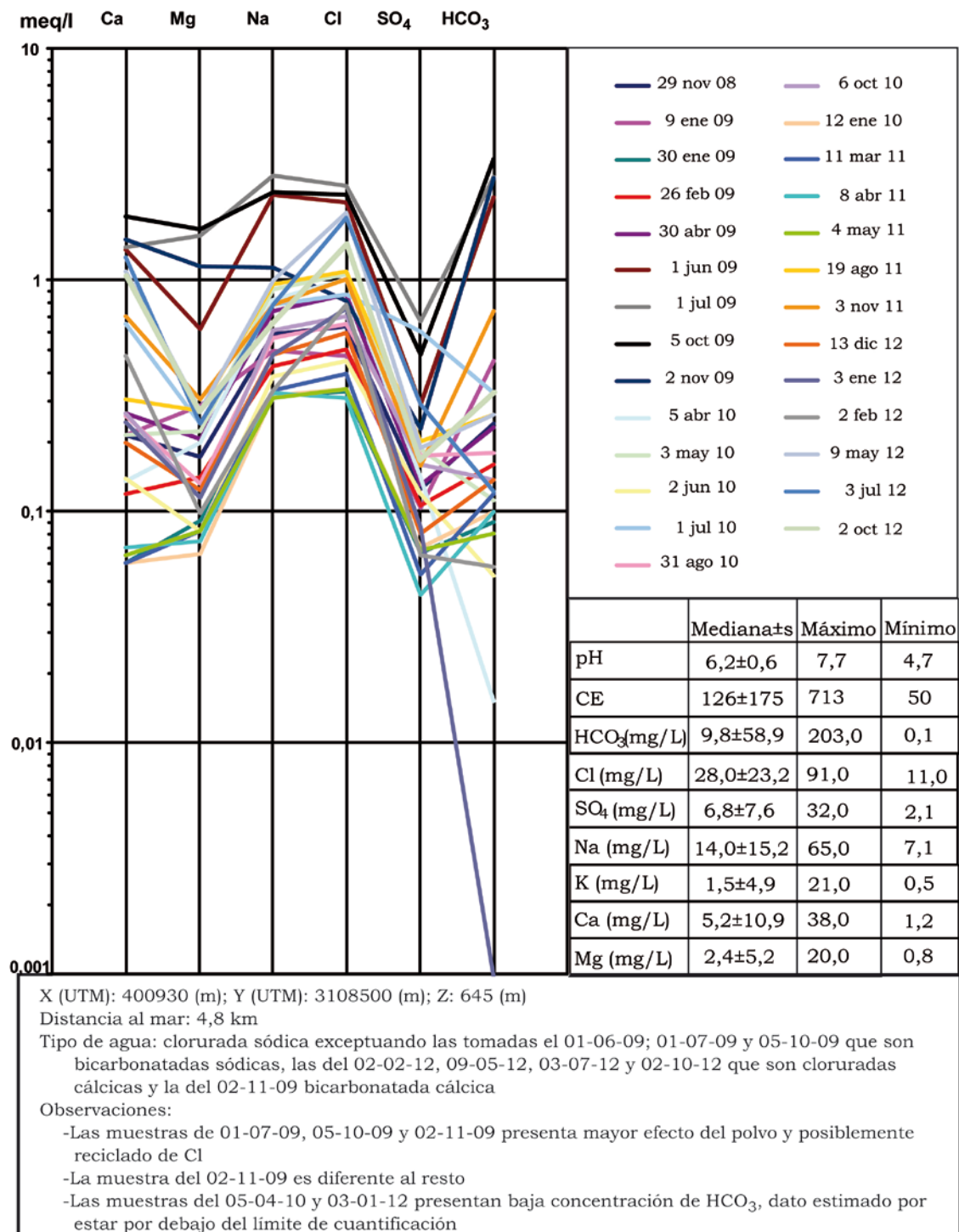


Figura 5.6. Diagrama de escalas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de la estación 203, Sta Cristina y tabla de resumen estadístico de la conductividad eléctrica, pH e iones principales, datos de ubicación y observaciones.

**Estación 037 Lomo Majadillas**

**DIAGRAMA DE SCHOELLER-BERKALOFF**

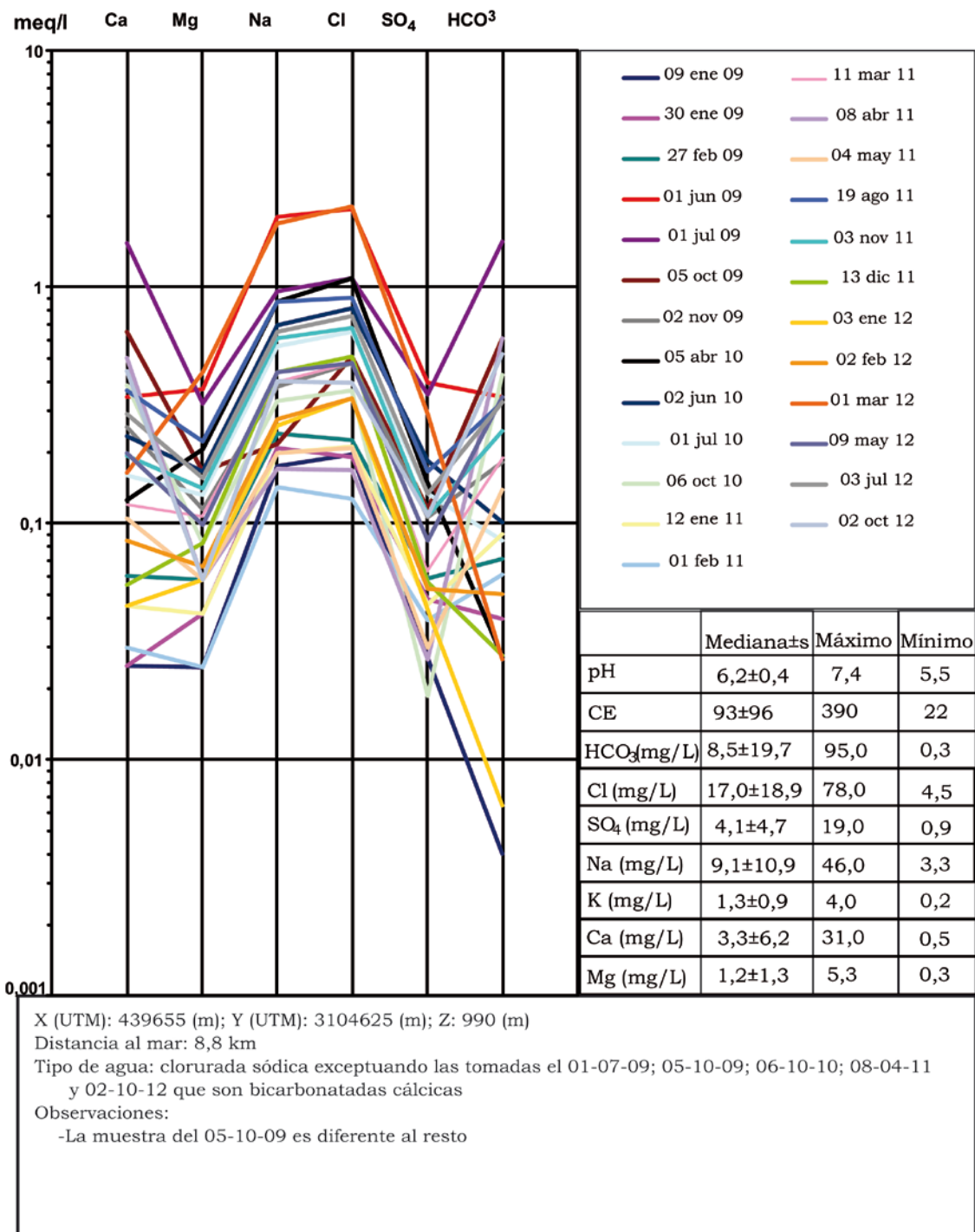


Figura 5.7. Diagrama de escalas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de la estación 037, Lomo Majadillas y tabla de resumen estadístico de la conductividad eléctrica, pH e iones principales, datos de ubicación y observaciones.



## Estaciones 098 - 174 Retamilla - Montañón

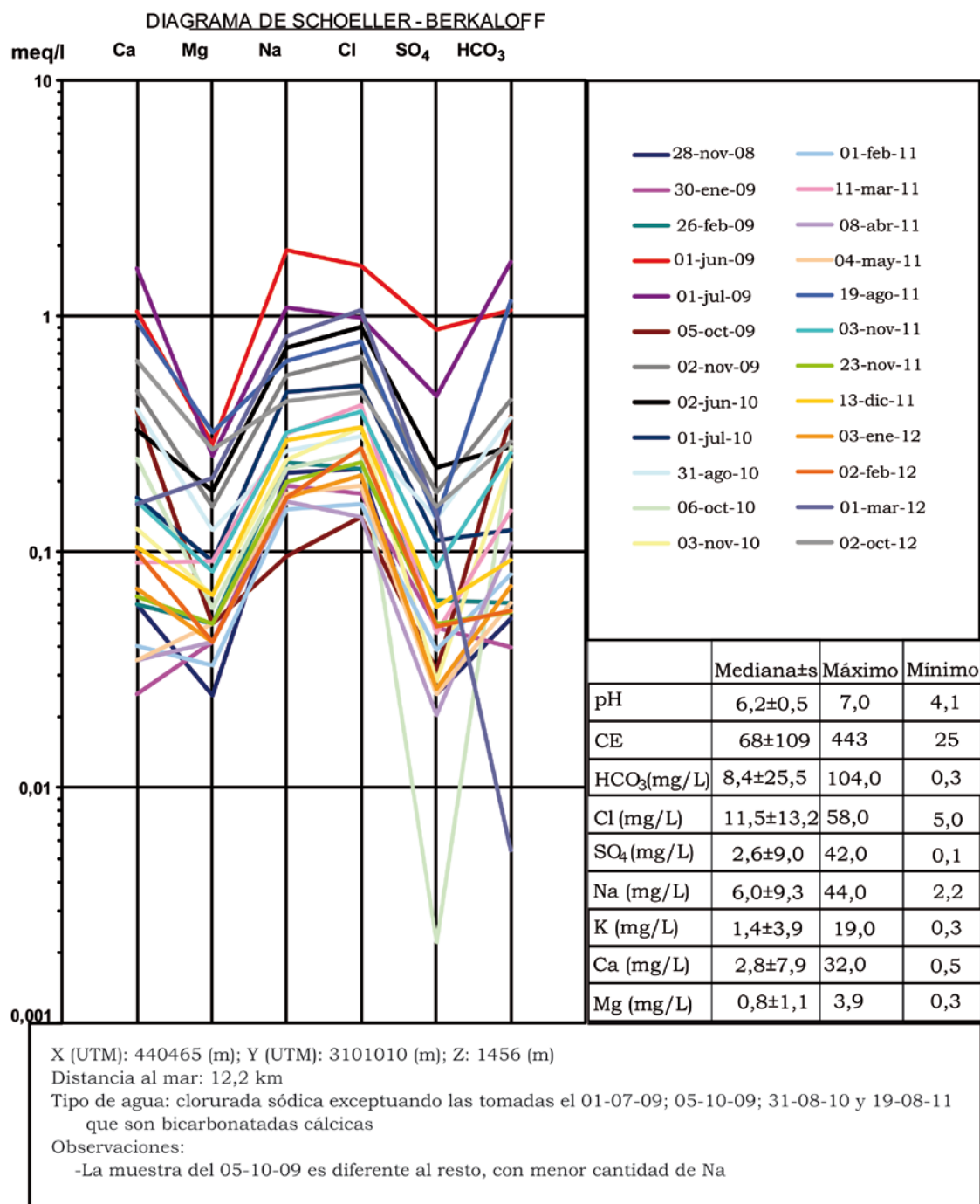


Figura 5.8. Diagrama de escalas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de la estación 098-174, Retamilla-Montañón y tabla de resumen estadístico de la conductividad eléctrica, pH e iones principales, datos de ubicación y observaciones.

Para estudiar la evolución temporal del agua de lluvia se ha elaborado la gráfica recogida en la figura 5.9 en la que se representa la conductividad eléctrica de las muestras de agua de lluvia de las cinco estaciones, la mediana de la precipitación acumulada por periodo de muestreo de todas las estaciones conjuntas y la de la estación con mayor y menor aporte pluviométrico por periodo de muestreo, las 174 y 036 respectivamente. También se representan los valores de PM10 (masa de partículas que atraviesa un cabezal de tamaño selectivo para un diámetro aerodinámico de 10  $\mu\text{m}$  con una eficiencia de corte del 50%) acumulados para dichos periodos de muestreo a partir del año 2010 en la estación ICG-Polideportivo Antonio Afonso situado en Arucas, obtenidas de la web del Gobierno de Canarias (disponible a partir del año 2010).

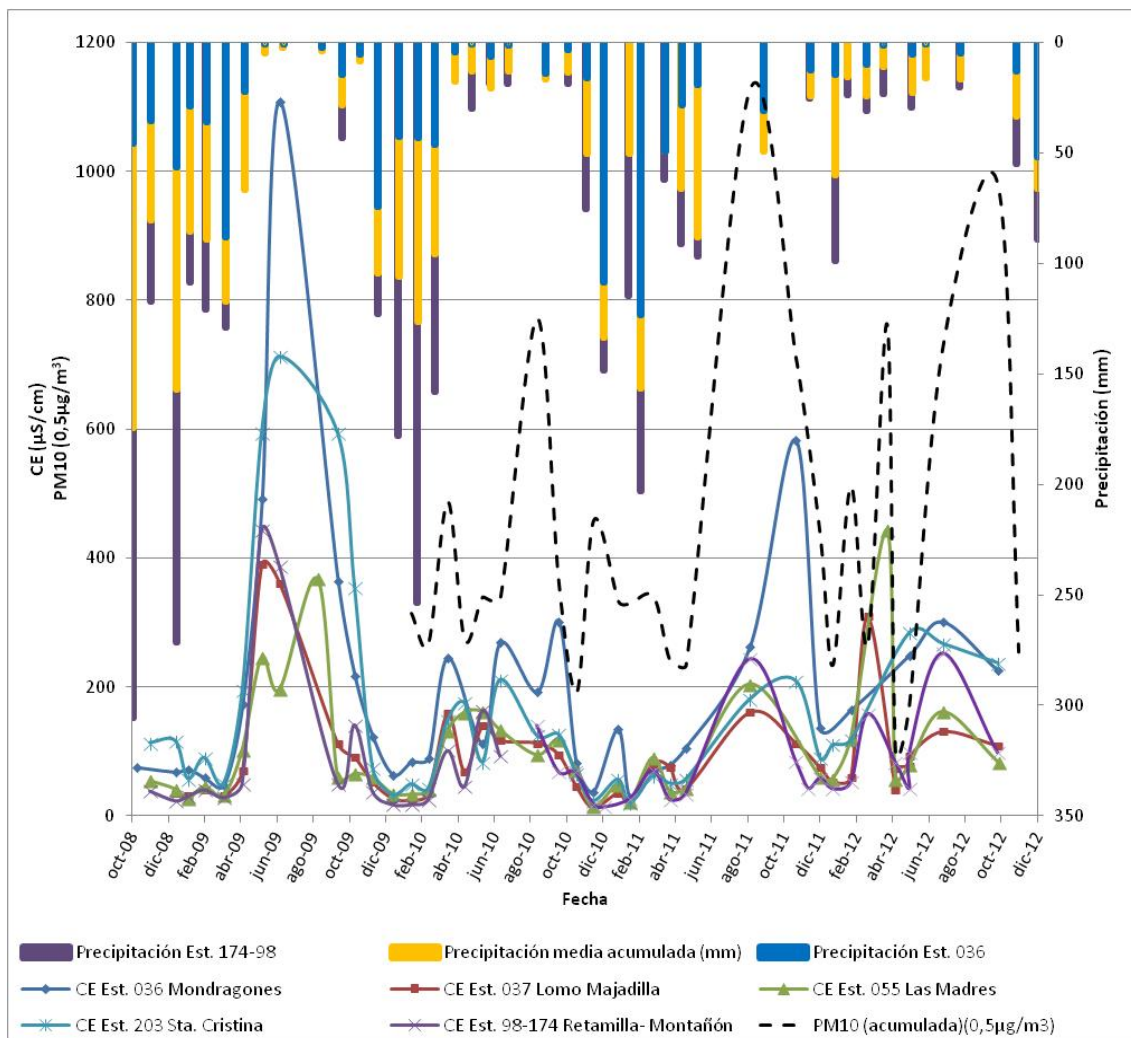


Figura 5.9. Representación gráfica temporal de la conductividad eléctrica del agua de lluvia por estación y PM10 acumulada en el periodo de muestreo en la estación situada en el ICG-Polideportivo Antonio Afonso (Arucas) en el eje vertical izquierdo, y representación de la precipitación, de la mediana acumulada en los periodos de muestreo de todas las estaciones y de las estaciones 036 y 174 en el eje vertical derecho.

Las lluvias son más abundantes en los meses que van de octubre a abril, en el que las aguas son menos mineralizadas. De mayo a septiembre las lluvias son escasas o inexistentes y aumenta la mineralización del agua de lluvia. En cuanto al material particulado (PM10 acumulado por periodo de muestreo), se observa que las estaciones que se encuentran a mayor cota, la 174 y 037, representan mayor correlación con la conductividad eléctrica (Fig. 5.9).

En la variación espacial de la mineralización del agua de lluvia intervienen varios factores, como la distancia al mar, la altitud y exposición orográfica a los vientos portadores de aerosol marino y partículas en suspensión. La Tabla 5.7 muestra datos de cota, distancia al mar, mediana de conductividad eléctrica y tipo de agua que se ha muestreado por estación estudiada. Se observa que la conductividad eléctrica del agua de lluvia va disminuyendo con la distancia al mar y el aumento de cota, que en las zonas de menor cota se encuentran siempre aguas cloruradas sódicas y que en las cotas altas generalmente también son cloruradas sódicas, aunque a veces son bicarbonatadas cálcicas.

Tabla 5.7. Tabla con datos de cota, distancia al mar, mediana y desviación estándar de la conductividad eléctrica y tipo de agua de lluvia muestreada por estación pluviométrica del área de estudio.

Estación	Cota (m)	Distancia al mar (km)	Medianas de CE± s (µS/cm)	Tipo de agua
36	375	2,3	174 ± 220	Cl-Na
55	577	7,5	118 ± 104	Cl-Na
203	645	4,8	113 ± 54	Cl-Na
			594 ± 69	HCO <sub>3</sub> -Na
			252 ± 75	Cl-Ca
			354	HCO <sub>3</sub> -Ca
37	990	8,8	86 ± 94	Cl-Na
			109 ± 118	HCO <sub>3</sub> -Ca
98-174	1400	12,2	191 ± 144	Cl-Na
			63 ± 93	HCO <sub>3</sub> -Ca

### 5.3.2 Contribución del aerosol marino y polvo atmosférico a la precipitación

Los aportes mayoritarios de material particulado al agua de lluvia en la zona de estudio son el aerosol marino y el polvo local. Los aportes del aerosol marino son relativamente homogéneos a lo largo del año mientras que el polvo local sigue un patrón estacional con máxima probabilidad de ocurrencia en febrero-marzo, junio-agosto y noviembre-diciembre (Viana et al., 2002).

Según Viana (2003), los componentes mayoritarios de PM10 en muestras de material particulado recogidas en una estación situada en Las Palmas de Gran Canaria son materia orgánica y carbono elemental (OM+EC=8,0 µg/m<sup>3</sup>) y aerosol marino (Na=3,9 µg/m<sup>3</sup>, Cl=6,6 µg/m<sup>3</sup>). Destaca también los niveles de SiO<sub>2</sub> (4,1 µg/m<sup>3</sup>), CO<sub>3</sub> (3,3 µg/m<sup>3</sup>) y nmSO<sub>4</sub> (sulfato no marino) (2,5 µg/m<sup>3</sup>). Los restantes elementos corticales (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K, Mg, Ca) oscilan dentro del rango de 0,4-1,4 µg/m<sup>3</sup>. La suma de elementos corticales es de 11,6 µg/m<sup>3</sup> y el aerosol marino representa como media anual 11,5 µg/m<sup>3</sup>.

Para cuantificar la aportación marina a la precipitación se parte de que el ión cloruro es conservativo y se considera que todo el cloruro procede del mar. No siempre todo el cloruro es de origen marino pero sí lo es gran mayoría. A partir de este supuesto se ha calculado la concentración de los iones fundamentales que provienen del mar para cada muestra, excepto para el HCO<sub>3</sub>, con la siguiente fórmula:

$$[X]_{lluvia} = \frac{[X]_{mar} * [Cl]_{lluvia}}{[Cl]_{mar}}$$

donde:

[X]<sub>lluvia</sub>: concentración en la precipitación del ion X procedente del mar

[X]<sub>mar</sub>: concentración en agua marina del ion X

[Cl]<sub>lluvia</sub>: concentración de Cl en la precipitación, equivalente a la concentración aportada por el mar

[Cl]<sub>mar</sub>: concentración de Cl en el agua de mar

La Tabla 5.8 muestra para cada una de las muestras la concentración de rNa, rK, rCa, rMg y rSO<sub>4</sub> teórica calculada de procedencia marina, así como el porcentaje del total de cada ion en el agua de lluvia que puede tener origen marino. De ella se deduce que:

- Las concentraciones de Na y Mg en el agua de lluvia proviene principalmente del aerosol marino, siendo la mediana de porcentaje de aportación del total de las muestras de un 98,01% para el Na y 100,08% para el Mg.
- La aportación del aerosol marino al agua de lluvia del resto de los iones determinados es mucho menor, siendo el porcentaje aportado de 27,00% para el K, 12,76% para el Ca y 19,89% para el SO<sub>4</sub>.
- Existen casos en que el Na y Mg están próximos e incluso superan el 100% de los aportes (resaltados en casilla amarilla en la tabla 5.8). Podría ser debido a un error en el cálculo, pero algunos casos superan el 120%. En el estudio realizado por Viana (2003) al estudiar la relación Cl/Na en el material particulado se observa un elevado número de muestras que

presentan un exceso de Cl que podría indicar la existencia de una fuente adicional de Cl que podría estar relacionada con la volatilización del Cl y algunos casos con un déficit de Cl. También podría tratarse de un aporte de Na y Mg proveniente de la alteración de silicatos en las partículas de suelo

- No todo el Cl es de origen marino, pero si la mayoría. Hay Cl en el polvo que se origina en el arrastre de sales del suelo y también se encuentra como componente volátil de la atmósfera.

La figura 5.10 representa las relaciones iónicas  $rNa/rK$ ,  $rCl/rNa$ ,  $rMg/rCa$  y  $rCl/rSO_4$  para las muestras de agua de lluvia mensual acumulada por estación de muestreo, para el mar y también para el PM10 anual (2001) de la estación situada en Las Palmas de Gran Canaria.

Todas las relaciones iónicas determinadas se aproximan a la recta que representa la relación iónica correspondiente determinada para el PM10. Además la relación  $rCl/rNa$  también se acerca a la recta del agua de mar, lo que indica la influencia del aerosol marino en la aportación de Cl y Na. Todas ellas fluctúan sobre la recta correspondiente al PM10 excepto en la relación iónica  $rCl/rSO_4$ ; los valores obtenidos se encuentran en la mayoría de los casos por encima de la recta que representa la relación iónica del PM10. Las relaciones  $rNa/rK$  y  $rMg/rCa$  presentan una cierta estacionalidad, siendo los periodos de ambas iguales ya que los aportes de Na y Mg provienen principalmente del aerosol marino y los del K y Ca es cortical. Dichas relaciones disminuyen en el periodo comprendido entre mayo y diciembre ya que es un periodo de menor precipitación y ambiente más seco, probablemente asociado al mayor porcentaje de acumulación de polvo.

Tabla 5.8. Concentración de los iones mayoritarios en agua de lluvia, aportes del aerosol marino determinado por balance conservativo de cloruros y porcentaje de la aportación marina a la concentración de los iones mayoritarios. Composición química promedio del mar según Goldberg (1963).

N° estación	Fecha	Na (meq/L)	K (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Cl (meq/L)	SO <sub>4</sub> (meq/L)	rNa marino	rK marino	rCa marino	rMg marino	rSO <sub>4</sub> marino	%Na marino	%K marino	%Ca marino	%Mg marino	%SO <sub>4</sub> marino
36	28/11/2008	0,38	0,02	0,09	0,09	0,45	0,06	0,38	0,01	0,02	0,09	0,02	101,68	40,01	18,71	103,39	24,85
36	09/01/2009	0,38	0,02	0,09	0,07	0,40	0,07	0,34	0,01	0,01	0,08	0,01	89,60	35,25	16,49	111,36	20,53
36	30/01/2009	0,35	0,03	0,09	0,09	0,37	0,06	0,31	0,01	0,01	0,08	0,01	88,73	21,67	15,20	84,00	19,54
36	26/02/2009	0,33	0,03	0,08	0,08	0,34	0,07	0,29	0,01	0,01	0,07	0,01	87,72	23,80	15,66	84,59	16,31
36	30/04/2009	0,74	0,06	0,19	0,16	0,96	0,10	0,82	0,02	0,04	0,20	0,03	110,57	28,34	18,84	120,84	32,85
36	01/06/2009	2,22	0,33	0,50	0,50	2,54	0,40	2,16	0,05	0,09	0,53	0,09	97,57	13,85	18,95	104,87	22,07
36	01/07/2009	4,83	0,64	2,40	1,32	4,65	0,23	3,97	0,08	0,17	0,96	0,16	82,18	13,20	7,24	73,30	69,88
36	05/10/2009	0,87	0,16	0,95	0,54	1,69	0,33	1,44	0,03	0,06	0,35	0,06	165,86	19,67	6,65	64,62	17,47
36	02/11/2009	1,17	0,06	0,50	0,30	1,49	0,18	1,27	0,03	0,06	0,31	0,05	108,53	44,17	11,16	101,82	28,71
36	02/12/2009	0,78	0,05	0,14	0,16	0,85	0,10	0,72	0,02	0,03	0,18	0,03	92,15	31,58	22,56	112,23	27,95
36	05/04/2010	2,61	0,79	0,80	0,52	3,16	1,02	2,69	0,06	0,12	0,65	0,11	103,20	7,23	14,74	126,37	10,65
36	02/06/2010	0,52	0,03	0,23	0,12	0,59	0,16	0,51	0,01	0,02	0,12	0,02	96,75	38,19	9,61	106,62	12,54
36	01/07/2010	1,57	0,06	0,33	0,35	1,69	0,33	1,44	0,03	0,06	0,35	0,06	92,15	50,01	18,85	99,18	17,47
36	31/08/2010	0,96	0,05	0,36	0,26	1,10	0,18	0,94	0,02	0,04	0,23	0,04	98,01	41,06	11,40	89,42	20,88
36	06/10/2010	1,44	0,09	0,60	0,51	1,55	0,27	1,32	0,03	0,06	0,32	0,05	92,15	29,73	9,65	63,06	19,71
36	12/01/2011	0,61	0,05	0,33	0,22	0,70	0,11	0,60	0,01	0,03	0,15	0,02	98,73	26,32	7,86	65,82	22,40
36	01/02/2011	0,17	0,04	0,03	0,03	0,17	0,02	0,14	0,00	0,01	0,04	0,01	85,06	8,57	21,05	106,63	23,29
36	11/03/2011	0,32	0,06	0,10	0,11	0,39	0,05	0,34	0,01	0,01	0,08	0,01	104,60	11,67	14,04	76,56	27,74
36	08/04/2011	0,38	0,04	0,14	0,13	0,42	0,06	0,36	0,01	0,02	0,09	0,01	95,32	17,65	10,89	66,64	22,94
36	04/05/2011	0,52	0,05	0,15	0,17	0,59	0,08	0,51	0,01	0,02	0,12	0,02	96,75	21,00	14,74	71,09	24,57
36	19/08/2011	1,61	0,16	0,50	0,30	1,61	0,25	1,37	0,03	0,06	0,33	0,06	85,17	18,69	12,00	109,51	22,13
36	03/11/2011	3,04	0,48	1,59	0,66	3,49	0,49	2,98	0,06	0,13	0,73	0,12	97,94	13,05	8,16	110,19	24,07
36	13/12/2011	0,78	0,09	0,23	0,19	0,87	0,13	0,75	0,02	0,03	0,18	0,03	95,22	17,72	13,89	95,81	23,68
36	02/02/2012	0,83	0,14	0,18	0,19	1,04	0,15	0,89	0,02	0,04	0,22	0,04	107,66	12,98	21,05	114,36	23,61
36	09/05/2012	1,22	0,23	0,41	0,29	1,49	0,21	1,27	0,03	0,06	0,31	0,05	104,65	11,52	13,44	104,66	24,69
36	03/07/2012	1,61	0,25	0,65	0,42	1,83	0,29	1,56	0,03	0,07	0,38	0,06	97,13	13,00	10,53	90,60	21,63
36	02/10/2012	1,00	0,07	0,55	0,29	1,29	0,23	1,11	0,02	0,05	0,27	0,04	110,57	35,39	8,80	93,43	19,48
37	09/01/2009	0,17	0,01	0,02	0,02	0,20	0,03	0,17	0,00	0,01	0,04	0,01	96,75	35,00	29,47	165,86	25,09
37	30/01/2009	0,21	0,01	0,02	0,04	0,19	0,05	0,16	0,00	0,01	0,04	0,01	78,32	45,34	28,63	96,67	13,77
37	26/02/2009	0,24	0,01	0,06	0,06	0,23	0,06	0,19	0,00	0,01	0,05	0,01	80,42	80,25	14,04	81,24	13,31

Tabla 5.8. Concentración de los iones mayoritarios en agua de lluvia, aportes del aerosol marino determinado por balance conservativo de cloruros y porcentaje de la aportación marina a la concentración de los iones mayoritarios. Composición química promedio del mar según Goldberg (1963).

Nº estación	Fecha	Na (meq/L)	K (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Cl (meq/L)	SO <sub>4</sub> (meq/L)	rNa marino	rK marino	rCa marino	rMg marino	rSO <sub>4</sub> marino	%Na marino	%K marino	%Ca marino	%Mg marino	%SO <sub>4</sub> marino
37	01/06/2009	2,00	0,10	0,34	0,37	2,14	0,40	1,83	0,04	0,08	0,44	0,07	91,34	38,01	23,19	120,05	18,64
37	01/07/2009	0,96	0,09	1,55	0,32	1,10	0,35	0,94	0,02	0,04	0,23	0,04	98,01	22,29	2,65	71,08	10,69
37	05/10/2009	0,22	0,05	0,65	0,16	0,51	0,11	0,43	0,01	0,02	0,11	0,02	199,03	20,00	2,91	63,97	15,25
37	02/11/2009	0,38	0,03	0,25	0,12	0,48	0,11	0,41	0,01	0,02	0,10	0,02	106,81	26,16	7,02	86,31	15,53
37	05/04/2010	0,87	0,05	0,12	0,21	1,10	0,15	0,94	0,02	0,04	0,23	0,04	107,81	41,06	32,84	110,89	25,59
37	02/06/2010	0,70	0,03	0,23	0,16	0,82	0,18	0,70	0,01	0,03	0,17	0,03	100,21	44,62	12,99	103,07	15,35
37	01/07/2010	0,57	0,03	0,16	0,13	0,65	0,13	0,55	0,01	0,02	0,13	0,02	97,82	38,34	15,13	102,18	16,74
37	06/10/2010	0,33	0,03	0,38	0,08	0,37	0,01	0,31	0,01	0,01	0,08	0,01	94,57	20,00	3,55	92,40	97,15
37	12/01/2011	0,20	0,05	0,04	0,04	0,21	0,04	0,18	0,00	0,01	0,04	0,01	90,14	7,22	17,54	106,63	15,99
37	01/02/2011	0,14	0,02	0,03	0,02	0,13	0,04	0,11	0,00	0,00	0,03	0,00	75,89	9,56	15,89	107,34	11,22
37	11/03/2011	0,39	0,018	0,12	0,11	0,48	0,06	0,41	0,01	0,02	0,10	0,02	103,28	48,58	14,91	92,96	26,17
37	08/04/2011	0,17	0,06	0,49	0,06	0,17	0,03	0,14	0,00	0,01	0,04	0,01	85,06	5,32	1,26	60,93	21,92
37	04/05/2011	0,20	0,01	0,10	0,06	0,21	0,03	0,18	0,00	0,01	0,04	0,01	88,94	74,01	7,42	75,15	24,06
37	19/08/2011	0,87	0,04	0,36	0,22	0,90	0,17	0,77	0,02	0,03	0,19	0,03	88,46	37,65	9,23	84,25	18,64
37	03/11/2011	0,61	0,05	0,19	0,14	0,68	0,11	0,58	0,01	0,03	0,14	0,02	94,78	22,86	12,96	100,36	21,50
37	13/12/2011	0,43	0,03	0,05	0,08	0,51	0,06	0,43	0,01	0,02	0,11	0,02	99,52	27,70	34,45	127,96	31,06
37	03/01/2012	0,26	0,02	0,04	0,06	0,34	0,04	0,29	0,01	0,01	0,07	0,01	110,57	30,00	28,07	121,86	27,01
37	02/02/2012	0,28	0,02	0,08	0,06	0,34	0,05	0,29	0,01	0,01	0,07	0,01	103,66	26,67	14,86	106,63	21,92
37	01/03/2012	1,87	0,05	0,16	0,43	2,20	0,29	1,88	0,04	0,08	0,46	0,08	100,29	78,01	49,76	104,62	25,96
37	09/05/2012	0,43	0,02	0,20	0,10	0,48	0,08	0,41	0,01	0,02	0,10	0,02	93,99	37,78	8,95	100,71	19,50
37	03/07/2012	0,65	0,05	0,29	0,16	0,76	0,13	0,65	0,01	0,03	0,16	0,03	99,52	27,00	9,80	101,02	19,65
37	02/10/2012	0,40	0,05	0,44	0,06	0,39	0,11	0,34	0,01	0,01	0,08	0,01	84,13	15,56	3,31	142,17	12,54
55	28/11/2008	0,33	0,01	0,09	0,07	0,34	0,08	0,29	0,01	0,01	0,07	0,01	88,46	48,01	14,04	106,62	15,11
55	09/01/2009	0,22	0,01	0,05	0,04	0,25	0,03	0,22	0,00	0,01	0,05	0,01	97,57	36,00	17,22	127,95	27,95
55	26/02/2009	0,27	0,01	0,08	0,07	0,27	0,06	0,23	0,00	0,01	0,06	0,01	86,50	97,30	12,76	86,19	15,06
55	01/06/2009	0,96	0,13	0,36	0,24	1,16	0,21	0,99	0,02	0,04	0,24	0,04	103,04	16,08	11,99	100,49	19,10
55	01/07/2009	0,74	0,15	0,32	0,16	0,87	0,18	0,75	0,02	0,03	0,18	0,03	100,82	10,33	10,20	110,18	16,41
55	02/09/2009	1,30	0,64	1,15	0,43	1,81	0,31	1,54	0,03	0,07	0,37	0,06	117,95	5,12	5,86	87,48	19,88
55	05/04/2010	0,74	0,04	0,09	0,18	0,90	0,12	0,77	0,02	0,03	0,19	0,03	104,07	45,72	37,43	103,39	24,85
55	03/05/2010	0,87	0,05	0,16	0,20	1,02	0,17	0,87	0,02	0,04	0,21	0,03	99,52	34,29	23,68	106,62	20,97

Tabla 5.8. Concentración de los iones mayoritarios en agua de lluvia, aportes del aerosol marino determinado por balance conservativo de cloruros y porcentaje de la aportación marina a la concentración de los iones mayoritarios. Composición química promedio del mar según Goldberg (1963).

Nº estación	Fecha	Na (meq/L)	K (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Cl (meq/L)	SO <sub>4</sub> (meq/L)	rNa marino	rK marino	rCa marino	rMg marino	rSO <sub>4</sub> marino	%Na marino	%K marino	%Ca marino	%Mg marino	%SO <sub>4</sub> marino
55	01/07/2010	0,74	0,05	0,14	0,16	0,73	0,17	0,63	0,01	0,03	0,15	0,03	84,56	28,89	18,87	92,40	14,95
55	31/08/2010	0,48	0,03	0,14	0,11	0,54	0,12	0,46	0,01	0,02	0,11	0,02	95,50	34,55	13,79	103,89	15,26
55	06/10/2010	0,57	0,03	0,23	0,12	0,71	0,13	0,60	0,01	0,03	0,15	0,02	106,32	41,67	11,44	118,47	18,79
55	12/01/2011	0,28	0,03	0,04	0,04	0,31	0,05	0,26	0,01	0,01	0,06	0,01	95,03	22,00	25,73	156,39	23,66
55	11/03/2011	0,48	0,03	0,07	0,12	0,59	0,05	0,51	0,01	0,02	0,12	0,02	105,55	42,01	29,47	99,52	42,24
55	08/04/2011	0,19	0,01	0,05	0,06	0,21	0,03	0,18	0,00	0,01	0,04	0,01	95,50	50,67	16,00	77,18	25,60
55	04/05/2011	0,24	0,01	0,04	0,07	0,28	0,04	0,24	0,01	0,01	0,06	0,01	100,52	40,01	26,32	78,99	23,75
55	19/08/2011	0,57	0,59	0,49	0,25	0,85	0,23	0,72	0,02	0,03	0,18	0,03	127,59	2,61	6,38	71,09	12,71
55	13/12/2011	0,36	0,03	0,03	0,08	0,42	0,07	0,36	0,01	0,02	0,09	0,01	99,92	30,00	45,11	106,63	22,33
55	03/01/2012	0,28	0,03	0,04	0,07	0,37	0,05	0,31	0,01	0,01	0,08	0,01	110,57	23,64	30,41	115,52	27,16
55	02/02/2012	0,26	0,05	0,08	0,06	0,34	0,08	0,29	0,01	0,01	0,07	0,01	112,45	13,34	15,79	121,86	15,11
55	02/04/2012	2,61	0,09	0,60	0,63	3,02	0,37	2,57	0,05	0,11	0,63	0,10	98,60	59,45	18,77	100,08	27,69
55	03/07/2012	0,78	0,06	0,27	0,18	0,90	0,18	0,77	0,02	0,03	0,19	0,03	98,29	25,60	12,48	103,40	17,14
55	04/10/2012	0,33	0,02	0,27	0,13	0,39	0,04	0,34	0,01	0,01	0,08	0,01	103,20	40,01	5,36	62,20	31,40
98	31/08/2010	0,27	0,04	0,40	0,12	0,31	0,14	0,26	0,01	0,01	0,06	0,01	98,09	13,75	2,86	52,13	7,65
98	06/10/2010	0,23	0,03	0,25	0,06	0,27	0,04	0,23	0,00	0,01	0,06	0,01	101,01	19,00	4,00	96,48	21,10
98	03/11/2010	0,25	0,13	0,12	0,07	0,34	0,03	0,29	0,01	0,01	0,07	0,01	116,39	4,71	10,11	106,63	41,10
98	01/02/2011	0,15	0,02	0,04	0,03	0,16	0,04	0,14	0,00	0,01	0,03	0,01	90,04	12,67	15,00	101,30	14,35
98	11/03/2011	0,32	0,06	0,09	0,09	0,42	0,05	0,36	0,01	0,02	0,09	0,01	113,60	12,00	17,54	96,94	31,92
98	08/04/2011	0,17	0,01	0,03	0,04	0,14	0,02	0,12	0,00	0,01	0,03	0,00	72,46	19,92	14,98	70,80	23,63
98	04/05/2011	0,18	0,02	0,03	0,05	0,19	0,02	0,16	0,00	0,01	0,04	0,01	91,70	22,67	20,45	80,57	26,56
98	19/08/2011	0,65	0,49	0,95	0,32	0,79	0,14	0,67	0,01	0,03	0,16	0,03	103,20	2,95	3,10	51,04	19,47
98	03/11/2011	0,32	0,19	0,16	0,08	0,39	0,09	0,34	0,01	0,01	0,08	0,01	104,60	3,73	8,93	99,52	15,75
98	23/11/2011	0,20	0,04	0,06	0,05	0,24	0,05	0,20	0,00	0,01	0,05	0,01	102,16	11,33	13,77	100,71	16,64
98	13/12/2011	0,30	0,03	0,10	0,07	0,34	0,06	0,29	0,01	0,01	0,07	0,01	96,15	20,00	12,03	106,63	19,90
98	03/01/2012	0,17	0,04	0,07	0,04	0,21	0,03	0,18	0,00	0,01	0,04	0,01	106,32	10,72	11,28	106,63	27,73
98	02/02/2012	0,17	0,08	0,10	0,04	0,28	0,05	0,24	0,01	0,01	0,06	0,01	138,93	6,32	10,32	139,33	19,68
98	01/03/2012	0,83	0,05	0,16	0,21	1,07	0,15	0,91	0,02	0,04	0,22	0,04	110,57	40,01	25,00	108,05	25,29
98	02/10/2012	0,43	0,10	0,65	0,27	0,48	0,16	0,41	0,01	0,02	0,10	0,02	93,99	8,29	2,75	36,62	10,56
174	28/11/2008	0,22	0,01	0,06	0,02	0,23	0,02	0,19	0,00	0,01	0,05	0,01	88,46	53,34	14,04	189,55	31,06



Tabla 5.8. Concentración de los iones mayoritarios en agua de lluvia, aportes del aerosol marino determinado por balance conservativo de cloruros y porcentaje de la aportación marina a la concentración de los iones mayoritarios. Composición química promedio del mar según Goldberg (1963).

Nº estación	Fecha	Na (meq/L)	K (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Cl (meq/L)	SO <sub>4</sub> (meq/L)	rNa marino	rK marino	rCa marino	rMg marino	rSO <sub>4</sub> marino	%Na marino	%K marino	%Ca marino	%Mg marino	%SO <sub>4</sub> marino
174	30/01/2009	0,19	0,01	0,02	0,04	0,18	0,05	0,15	0,00	0,01	0,04	0,01	79,16	25,20	26,53	89,56	12,76
174	26/02/2009	0,24	0,01	0,06	0,05	0,23	0,06	0,19	0,00	0,01	0,05	0,01	80,42	80,25	14,04	94,77	12,42
174	01/06/2009	1,91	0,13	1,05	0,29	1,64	0,87	1,39	0,03	0,06	0,34	0,06	72,88	23,68	5,81	117,79	6,43
174	01/07/2009	1,09	0,15	1,60	0,26	0,99	0,46	0,84	0,02	0,04	0,20	0,03	77,40	12,28	2,30	80,25	7,41
174	05/10/2009	0,10	0,02	0,40	0,05	0,14	0,03	0,12	0,00	0,01	0,03	0,00	125,65	14,29	1,32	59,23	17,60
174	02/11/2009	0,57	0,06	0,48	0,16	0,68	0,18	0,58	0,01	0,03	0,14	0,02	102,07	21,82	5,21	89,79	13,00
174	02/06/2010	0,74	0,03	0,33	0,18	0,90	0,23	0,77	0,02	0,03	0,19	0,03	104,07	49,24	10,21	103,39	13,55
174	01/07/2010	0,48	0,02	0,17	0,09	0,51	0,11	0,43	0,01	0,02	0,11	0,02	90,47	40,01	11,15	116,31	15,53
203	28/11/2008	0,59	0,03	0,21	0,17	0,63	0,12	0,54	0,01	0,02	0,13	0,02	92,15	40,91	11,02	76,16	17,47
203	09/01/2009	0,50	0,02	0,21	0,29	0,47	0,10	0,40	0,01	0,02	0,10	0,02	81,48	37,34	8,23	34,12	15,65
203	30/01/2009	0,32	0,02	0,06	0,09	0,33	0,07	0,28	0,01	0,01	0,07	0,01	89,37	39,34	20,70	76,25	17,18
203	26/02/2009	0,43	0,03	0,12	0,14	0,50	0,11	0,43	0,01	0,02	0,10	0,02	100,42	32,37	15,61	74,43	16,26
203	30/04/2009	0,74	0,06	0,26	0,21	0,87	0,13	0,75	0,02	0,03	0,18	0,03	100,82	28,19	12,31	88,14	22,92
203	01/06/2009	2,35	0,54	1,35	0,62	2,17	0,26	1,85	0,04	0,08	0,45	0,07	78,84	7,33	6,00	72,98	29,08
203	01/07/2009	2,83	0,36	1,40	1,56	2,57	0,67	2,19	0,05	0,10	0,53	0,09	77,40	13,00	6,84	34,04	13,25
203	05/10/2009	2,39	0,31	1,90	1,65	2,34	0,48	2,00	0,04	0,09	0,49	0,08	83,43	13,84	4,60	29,50	16,81
203	02/11/2009	1,13	0,19	1,50	1,15	0,82	0,23	0,70	0,01	0,03	0,17	0,03	61,67	7,63	2,04	14,72	12,28
203	05/04/2010	0,83	0,04	0,13	0,20	1,02	0,14	0,87	0,02	0,04	0,21	0,03	104,76	45,01	28,07	106,62	24,66
203	03/05/2010	0,91	0,05	0,21	0,22	1,07	0,19	0,91	0,02	0,04	0,22	0,04	100,04	38,01	18,60	100,04	19,89
203	02/06/2010	0,39	0,03	0,14	0,08	0,45	0,12	0,38	0,01	0,02	0,09	0,02	99,39	29,09	12,03	113,73	13,08
203	01/07/2010	0,78	0,06	0,65	0,24	0,87	0,60	0,75	0,02	0,03	0,18	0,03	95,22	26,96	5,02	75,98	4,98
203	31/08/2010	0,57	0,07	0,26	0,13	0,65	0,17	0,55	0,01	0,02	0,13	0,02	97,82	17,04	9,31	102,18	12,76
203	06/10/2010	0,61	0,04	0,26	0,12	0,71	0,16	0,60	0,01	0,03	0,15	0,02	98,73	33,34	9,93	126,93	15,13
203	12/01/2011	0,32	0,02	0,06	0,07	0,34	0,07	0,29	0,01	0,01	0,07	0,01	90,88	40,01	21,05	106,63	16,73
203	11/03/2011	0,33	0,02	0,06	0,08	0,39	0,05	0,34	0,01	0,01	0,08	0,01	100,52	46,67	24,56	99,52	25,29
203	08/04/2011	0,33	0,01	0,07	0,07	0,31	0,04	0,26	0,01	0,01	0,06	0,01	81,09	44,01	16,54	86,88	24,30
203	04/05/2011	0,31	0,01	0,06	0,08	0,34	0,07	0,29	0,01	0,01	0,07	0,01	93,44	48,01	19,43	85,30	16,99
203	19/08/2011	0,96	0,13	0,30	0,27	1,10	0,20	0,94	0,02	0,04	0,23	0,04	98,01	15,60	13,46	84,01	18,73
203	03/11/2011	0,78	0,17	0,70	0,30	1,02	0,16	0,87	0,02	0,04	0,21	0,03	110,57	10,91	5,41	69,17	22,07
203	13/12/2011	0,48	0,03	0,20	0,12	0,59	0,08	0,51	0,01	0,02	0,12	0,02	105,55	38,19	11,05	99,52	25,35

Tabla 5.8. Concentración de los iones mayoritarios en agua de lluvia, aportes del aerosol marino determinado por balance conservativo de cloruros y porcentaje de la aportación marina a la concentración de los iones mayoritarios. Composición química promedio del mar según Goldberg (1963).

N° estación	Fecha	Na (meq/L)	K (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Cl (meq/L)	SO <sub>4</sub> (meq/L)	rNa marino	rK marino	rCa marino	rMg marino	rSO <sub>4</sub> marino	%Na marino	%K marino	%Ca marino	%Mg marino	%SO <sub>4</sub> marino	
203	03/01/2012	0,48	0,03	0,24	0,12	0,76	0,09	0,65	0,01	0,03	0,16	0,03	135,71	49,10	11,60	137,10	30,46	
203	02/02/2012	0,33	0,03	0,47	0,10	0,79	0,06	0,67	0,01	0,03	0,16	0,03	201,05	46,67	6,27	165,87	42,08	
203	09/05/2012	1,00	0,03	1,10	0,27	1,97	0,19	1,68	0,04	0,07	0,41	0,07	168,27	107,71	6,70	150,79	35,84	
203	03/07/2012	0,78	0,06	1,25	0,24	1,86	0,29	1,59	0,03	0,07	0,39	0,06	202,72	57,40	5,56	161,78	21,96	
203	02/10/2012	0,65	0,04	1,05	0,27	1,44	0,17	1,23	0,03	0,05	0,30	0,05	187,98	60,01	5,11	109,86	29,70	
	Mediana	0,48	0,04	0,20	0,13	0,59	0,11	0,51	0,01	0,02	0,12	0,02	98,01	27,00	12,76	100,08	19,89	
	Agua de mar	456,92	9,72	19,96	111,1	535,92	18,43											

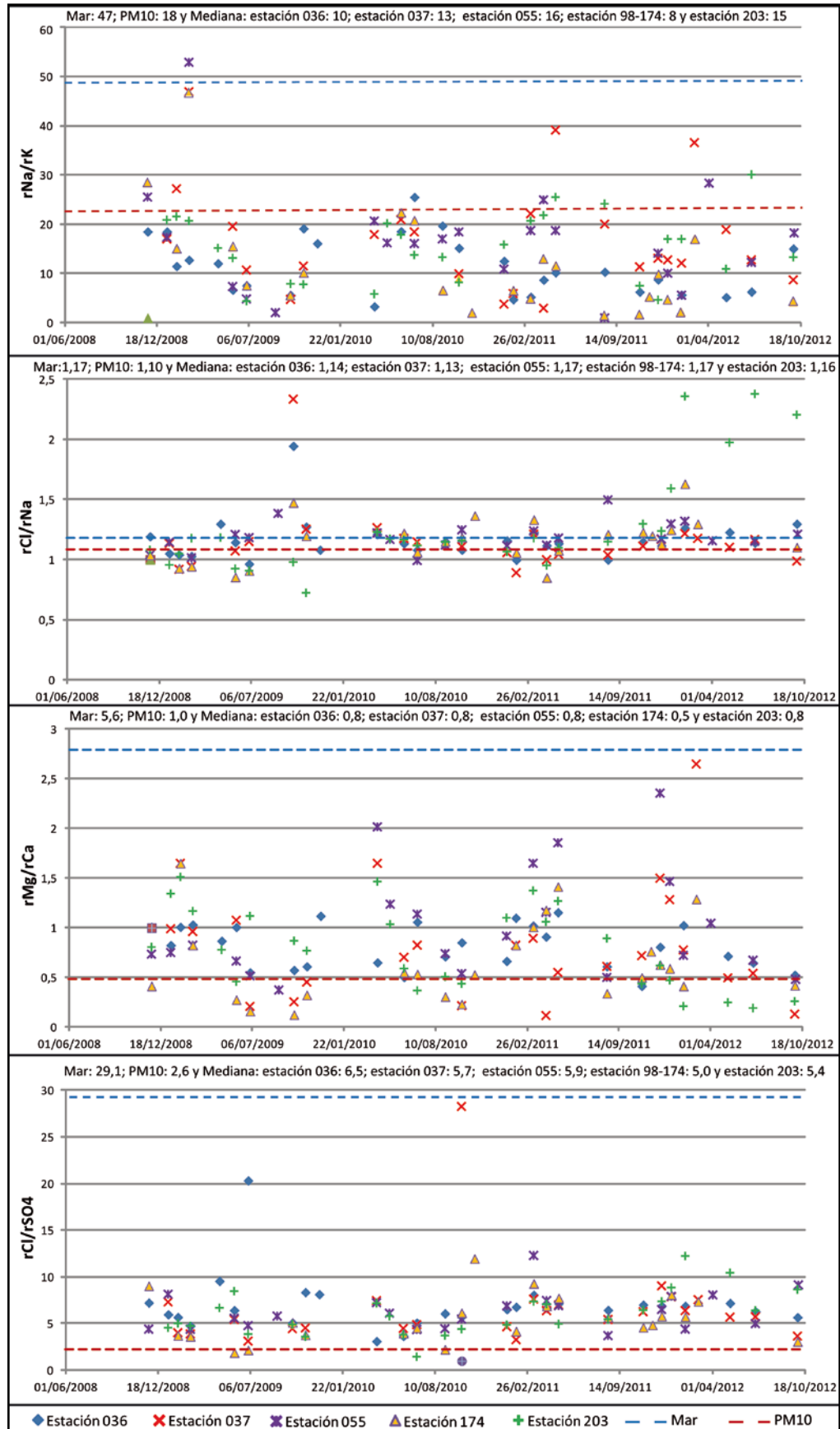


Figura 5.10. Correlación de las relaciones iónicas del agua de lluvia con agua de mar y PM 10, estos últimos de Viana (2003).

## 5.4 Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas

### 5.4.1 Datos de partida

Dado que se cuenta con numerosos análisis de cada punto de agua, correspondientes a muestras tomadas en diferentes fechas, se ha llevado a cabo una reducción del número de análisis a considerar.

Para ello, se han dibujado los diagramas de Schoeller-Berkaloff (de columnas verticales logarítmicas) para cada captación con los datos de todos los análisis químicos válidos (Anexo, A.5.5. Diagramas Schoeller-Berkaloff). En la mayoría de los casos no se aprecia evolución temporal que deba tenerse en cuenta, por lo que para hacer el estudio hidroquímico de la zona se ha seleccionado un análisis representativo de cada una de las captaciones que disponen de más de un análisis. Para la selección se ha tenido en cuenta que se trate de análisis completos, con determinaciones de sílice, teniendo en cuenta los cloruros y nitratos, optándose en caso de igualdad de condiciones por los más recientes.

En los casos en los que se han observado variaciones temporales en los análisis químicos se ha constatado siempre están relacionados con pozos que han sido reprofundizados. En estos casos se han tomado varios análisis representativos de las sucesivas profundidades de la captación.

Teniendo en cuenta todas estas premisas de selección, se ha elaborado una tabla resumen con las 228 captaciones de la zona de estudio con análisis químico, en la que aparecen los siguientes campos: expediente, cota a la que se encuentra la captación, fecha de muestreo del análisis seleccionado, número de análisis disponibles, profundidad de la captación, concentraciones de sílice, cloruros y nitratos del análisis seleccionado, rangos de cloruros y su tendencia observada en el tiempo (N=no tiene, O=oscila, C=creciente y D=decreciente ) y la coherencia que existe entre los análisis disponibles de una misma captación (B=buena, R=regular y P=poca) (Anexo A.5.6. Selección de análisis por captación).

Una vez realizada la selección, se han discriminado todas aquellas captaciones situadas en la zona media y alta de estudio que presentan concentraciones de nitratos superiores a 50 mg/L en todos sus análisis y se ha prescindido de ellos para el estudio hidroquímico para así eliminar efectos de aportes de retornos agrícolas y de aguas usadas (Tabla 5.9).

Tabla 5.9. Captaciones que se han descartado para el estudio químico de las aguas por su alto contenido en nitratos.

Expediente	NO <sub>3</sub> (mg/L)	Posible causa del alto contenido de nitratos
2223ATP	72	zona de cultivo
0045 CP	161	zona de cultivo
1365 TP	116	núcleo de población
3813 TP	81	núcleo de población
0267 CP	164	núcleo de población
1377 TP	52	núcleo de población
1882 TP	112	núcleo de población
1521 TP	77	núcleo de población

#### 5.4.2 Distribución de las familias hidroquímicas en el área de estudio

El estudio de la distribución de las familias hidroquímicas del área de estudio se ha realizado por separado para los nacientes y para el resto de captaciones, dado que presentan características diferenciadas.

##### 5.4.2.1 Nacientes

La figura 5.11 muestra la caracterización química de las muestras de los nueve nacientes situados en la zona de estudio con análisis químico disponible, mediante los diagramas de Stiff modificados y los diagramas de Schoeller-Berkaloff.

En la zona alta, los nacientes 0521-0523 NA y 0516 NA manan agua de tipo bicarbonatada clorurada magnésica y los nacientes 0002 XX, 0526 NA y 1-2-3-4-S/E NA se caracterizan por manar aguas de baja mineralización de tipo bicarbonatada clorurada sódica, aunque con contenidos notables de Ca y Mg. En la zona media, los nacientes 0003 NA y 0005 NA manan agua del tipo bicarbonatada sódica, siendo el nacimiento 0005 NA una transición entre ambas zonas, posiblemente una mezcla en que dominan las aguas altas. Las aguas de los nacientes 0504 NA y 0503 NA son de tipo clorurada sódica y más salinas, con contenidos notables de SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub> (Fig. 5.11).

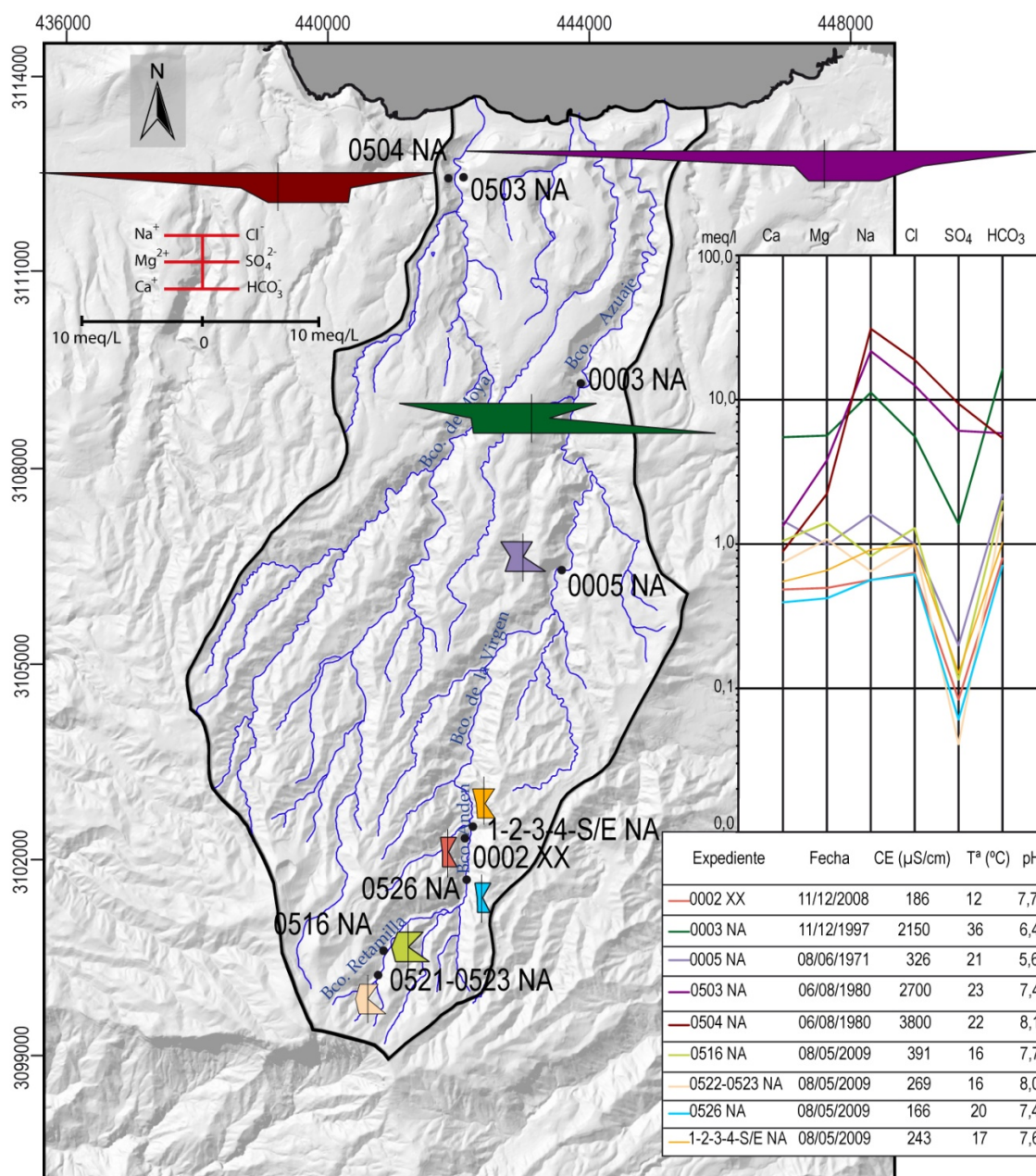


Figura 5.11. Mapa de diagramas de Stiff modificados, diagrama de Schoeller-Berkaloff y tabla de datos de campo: fecha, CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Tª ( $^{\circ}\text{C}$ ) y pH.

#### 5.4.2.2 Resto de captaciones

La figura 5.12 recoge el mapa con los diagramas de Stiff modificados para pozos y galerías de la zona, excluyendo los nacientes que han sido descritos en el apartado anterior. De esta figura se desprende la distribución espacial de las familias de agua en el área de estudio.



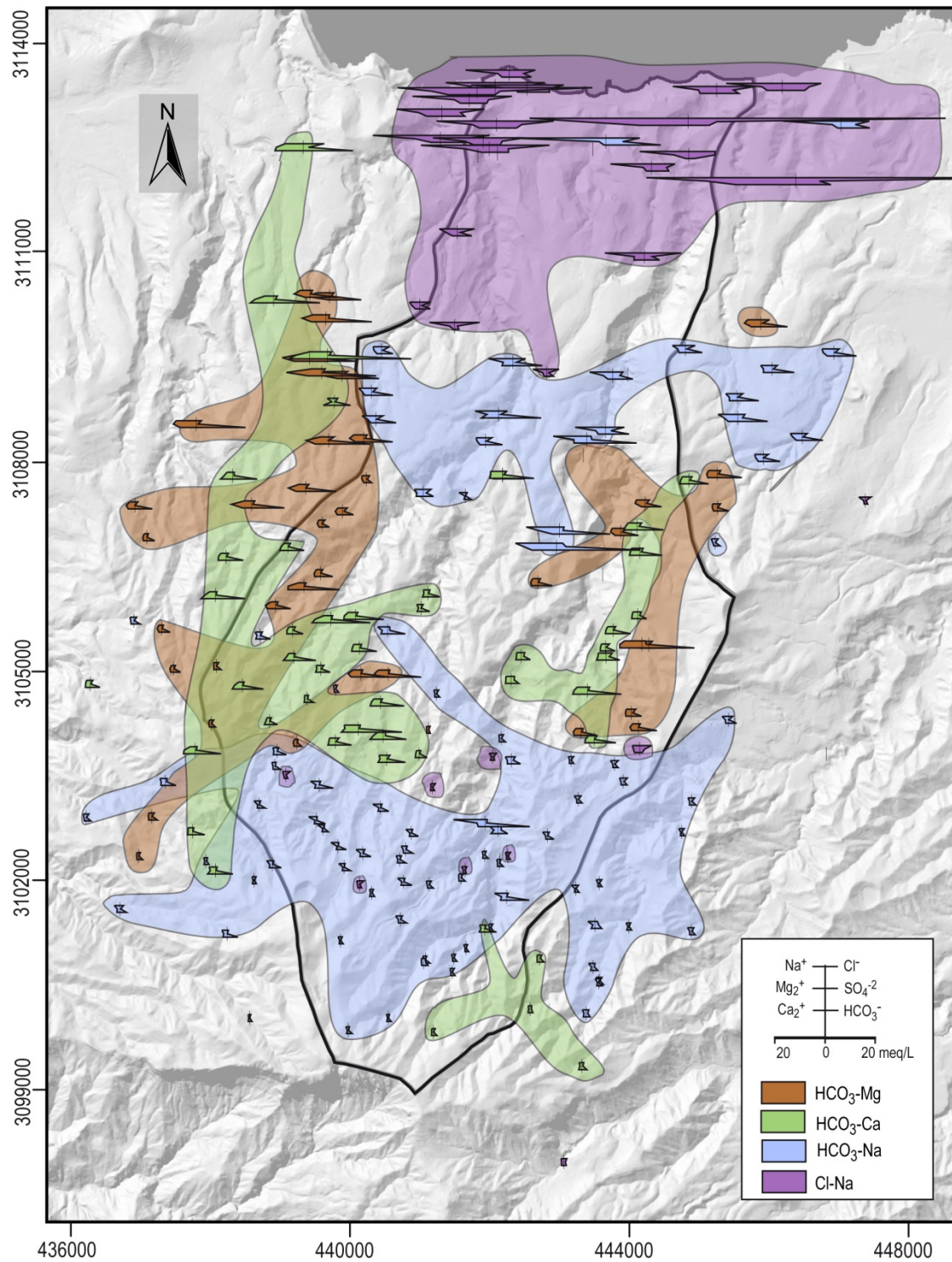


Figura 5.12 Mapa hidrogeoquímico con los diagramas de Stiff modificados de los muestreos seleccionados de las captaciones del área de estudio.

Existen cuatro familias hidroquímicas, siendo generalmente aguas bicarbonatadas (sódicas, cálcicas o magnésicas), excepto en la zona costera donde predominan las aguas cloruradas sódicas. También se observa que la mineralización va aumentando de cumbre a costa.

En la tabla 5.10 se resumen distintas características por familia hidroquímica: el % del total de aguas analizadas, su distribución preferente y el rango de pH que presentan. Se observa que sólo se encuentran aguas bicarbonatadas magnésicas y cálcicas con pH bajo, mientras que las aguas sódicas, tanto bicarbonatadas como cloruradas, presentan una amplia variedad de pH. Las más abundantes, con el 42% del total, son bicarbonatadas sódicas.

Tabla 5.10. Resumen de distribución espacial preferente de las familias hidroquímicas del área de estudio

Familias hidroquímicas	%	Distribución preferente	Rango de pH de campo
HCO <sub>3</sub> -Mg	19,5	Zona media	5,3-6,8
HCO <sub>3</sub> -Ca	23,4	Zona media alta	5,0-6,2
HCO <sub>3</sub> -Na	42,0	Zona alta y zona media baja	4,9-7,9
Cl-Na	15,1	Zona alta baja y zona baja	5,3-8,1

En aquellos pozos que han sufrido una reprofundización se ha llevado a cabo un estudio de la evolución hidroquímica de las aguas (Fig.5.13 y Tabla 5.11). Se observa en general un aumento de la mineralización de sus aguas, excepto en el pozo 2558 TP, en el que disminuye. De los 48 casos estudiados, 33 siguen teniendo el mismo tipo de agua y se observa la secuencia HCO<sub>3</sub>-Na → HCO<sub>3</sub>-Ca → HCO<sub>3</sub>-Mg, excepto en tres pozos (1803 TP, 5792 TP y 4769 TP) que pasan de HCO<sub>3</sub>-Mg a HCO<sub>3</sub>-Ca. El pH de campo tiende a disminuir en la mayoría de los casos, exceptuando los pozos 1803 TP y 2619 TP.





Tabla 5.11. Captaciones que han sido reprofundizadas. Representación de los diagramas de Stiff modificados, profundidad (Prof (m)), pH de campo (pH cp) y pH de laboratorio (pH labor) antes y después de la reprofundización.

Expediente	Fecha	Prof (m)	pH cp	pH labor	Stiff	Fecha	Prof (m)	pH cp	pH labor	Stiff
0316 CP	29-ene-71	179	4,5	7,45		18-ago-00	285	-	6,12	
0713ATP	30-Nov-71	80	7,8	7,85		11-dic-08	250	6,6	6,70	
0718 TP	02-dic-70	170	8,5	8,70		08-Oct-97	280	-	8,32	
0751 TP	24-Jul-72	140	-	7,35		18-Feb-09	200	6,0	6,50	
0946 TP	09-Feb-71	84	7,0	8,20		03-Mar-09	140	6,8	7,00	
1284 TP	03-dic-70	174	8,0	7,20		10-Oct-97	350	-	8,19	
1285 TP	03-dic-70	180	8,5	6,70		05-Feb-09	433	7,4	7,70	
1312 TP	02-dic-70	230	7,2	8,10		10-Oct-97	350	-	7,83	
1313 TP	03-dic-70	210	8,5	7,65		19-Jun-08	325	-	8,00	
1315 TP	30-Sep-80	167	6,9	7,60		25-Mar-92	426	6,9	6,68	
1425 TP	08-Feb-01	176	-	7,66		31-Mar-09	298	7,6	7,80	
1430 TP	24-Jul-80	190	7,5	7,05		07-ago-97	336	-	7,49	
1440 TP	23-Sep-80	213	6,1	7,90		10-Sep-97	332	-	7,85	
1485 TP	04-Sep-87	160	-	6,12		26-Jun-08	307	5,4	6,18	
1487 TP	27-May-71	170	6,6	8,50		26-Sep-97	274	-	8,13	
1803 TP	27-May-71	220	6,0	8,40		28-Mar-80	276	6,4	6,60	
1829 TP	03-Sep-80	274	5,9	8,20		17-Sep-97	370	-	7,34	
1918 TP	16-Nov-71	328	6,2	7,45		21-abr-09	203	5,7	6,20	

Tabla 5.1.1. Captaciones que han sido reprofundizadas. Representación de los diagramas de Stiff modificados, profundidad (Prof (m)), pH de campo (pH cp) y pH de laboratorio (pH labor) antes y después de la reprofundización.

Expediente	Fecha	Prof (m)	pH cp	pH labor	Stiff	Fecha	Prof (m)	pH cp	pH labor	Stiff
1986 TP	03-dic-70	290	-	8,10		05-Feb-09	390	7,4	7,90	
2411 TP	10-Jul-72	255	-	6,75		13-Mar-09	470	6,8	6,90	
2558 TP	22-ago-80	326	6,8	6,80		10-Jun-09	452	5,3	6,50	
2619 TP	15-Jul-80	120	7,9	7,05		04-Sep-08	290	7,7	7,80	
2671 TP	15-Jul-80	240	7,5	7,10		03-abr-09	280	-	7,90	
2728 TP	11-Nov-70	289	-	8,80		11-Feb-09	330	6,2	7,80	
2852 TP	29-Jul-80	140	6,5	7,50		11-Mar-09	170	6,6	6,80	
3051 TP	25-ago-80	287	7,7	7,35		10-Jun-09	358	5,8	6,90	
3193 TP	22-Oct-71	257	-	8,00		20-Nov-89	482	7,1	7,61	
3232 TP	01-ago-80	315	6,5	6,70		02-abr-09	400	6,8	7,10	
3290 TP	26-Nov-70	144	7,4	8,30		23-Jul-87	380	-	7,14	
3310 TP	22-ago-80	330	6,5	6,65		02-dic-97	378	-	8,38	
3346 TP	19-ago-80	250	7,4	7,30		20-ago-97	345	-	8,06	
3394 TP	03-Nov-70	260	7,4	8,65		21-dic-99	312	-	8,25	
3428 TP	21-abr-72	160	-	6,85		20-Sep-97	392	-	7,55	
3515 TP	28-ago-80	315	7,1	8,10		04-Sep-97	380	-	8,20	
3703 TP	21-Jun-71	250	7,6	7,70		25-May-09	336	6,5	7,00	
3905 TP	28-ene-71	250	7,2	7,90		11-May-06	445	6,5	6,90	

Tabla 5.11. Captaciones que han sido reprofundizadas. Representación de los diagramas de Stiff modificados, profundidad (Prof (m)), pH de campo (pH cp) y pH de laboratorio (pH labor) antes y después de la reprofundización.

Expediente	Fecha	Prof (m)	pH cp	pH labor	Stiff	Fecha	Prof (m)	pH cp	pH labor	Stiff
4201 TP	09-May-88	212	-	7,80		11-Feb-09	344	7,5	7,80	
4351 TP	02-Oct-80	196	7,4	7,60		09-Oct-97	329	-	8,15	
4367 TP	17-May-92	447	-	6,98		11-Feb-09	650	5,6	6,80	
4476 TP	02-Sep-80	374	5,5	8,25		06-Mar-01	444	-	6,10	
4769 TP	18-Sep-80	187	6,2	6,25		13-Jun-06	318	6,2	6,81	
5192 TP	07-Nov-70	288	6,8	7,05		19-May-06	425	6,6	8,26	
5327 TP	09-Feb-71	185	6,0	6,45		18-Sep-97	206	-	7,92	
5503 TP	23-Jul-80	250	6,5	7,05		06-Oct-97	321	-	7,90	
5600 TP	09-Nov-70	230	6,8	6,70		07-abr-01	440	-	6,08	
5620 TP	04-ago-80	180	7,9	7,50		01-ago-01	338	-	5,15	
5660 TP	06-Sep-91	263	-	7,63		18-Feb-09	298	7,3	8,00	
5749 TP	08-ago-80	210	6,7	8,05		10-Sep-97	296	-	8,13	

### 5.4.3 Distribución espacial de las determinaciones fisico-químicas

En este apartado se estudia la distribución espacial de las principales determinaciones fisico-químicas de interés en el área de estudio, partiendo de los análisis seleccionados para cada punto de agua. Para dar una visión espacial se han elaborado mapas de isolíneas con las concentraciones de los distintos iones y relaciones considerados.

La figura 5.14 muestra la relación entre el **pH** medido en el campo y el medido en el laboratorio. En general el pH de laboratorio tiende a ser mayor que el de campo. Se debe a que estas aguas con pH bajo tienen altos contenidos de  $\text{CO}_2$  disuelto y al tomar las muestras cambian las condiciones de equilibrio produciéndose reacciones que provocan un aumento de pH y la precipitación de carbonatos.

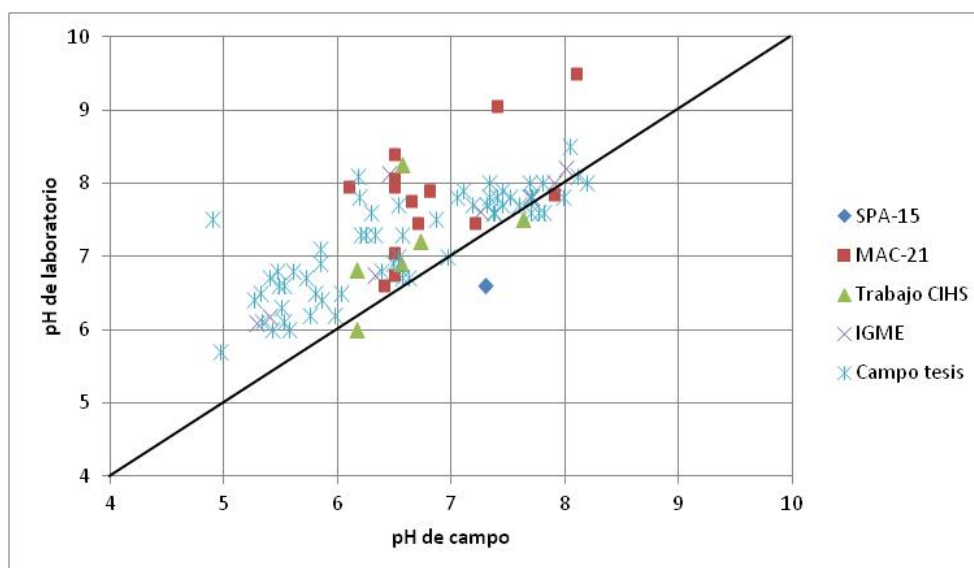


Figura 5.14. Representación gráfica de pH medido en el campo frente pH medido en el laboratorio

Los pH medidos en el campo oscilan entre 4,9 a 8,2. En el histograma se observa una distribución aproximadamente normal, aunque algo sesgada hacia los valores altos, con un valor mediano de 6,6. En cuanto a su distribución espacial se observan los valores de pH más altos en las zonas baja y alta, y los valores más bajos en la zona media de las cuencas estudiadas (Fig. 5.15).



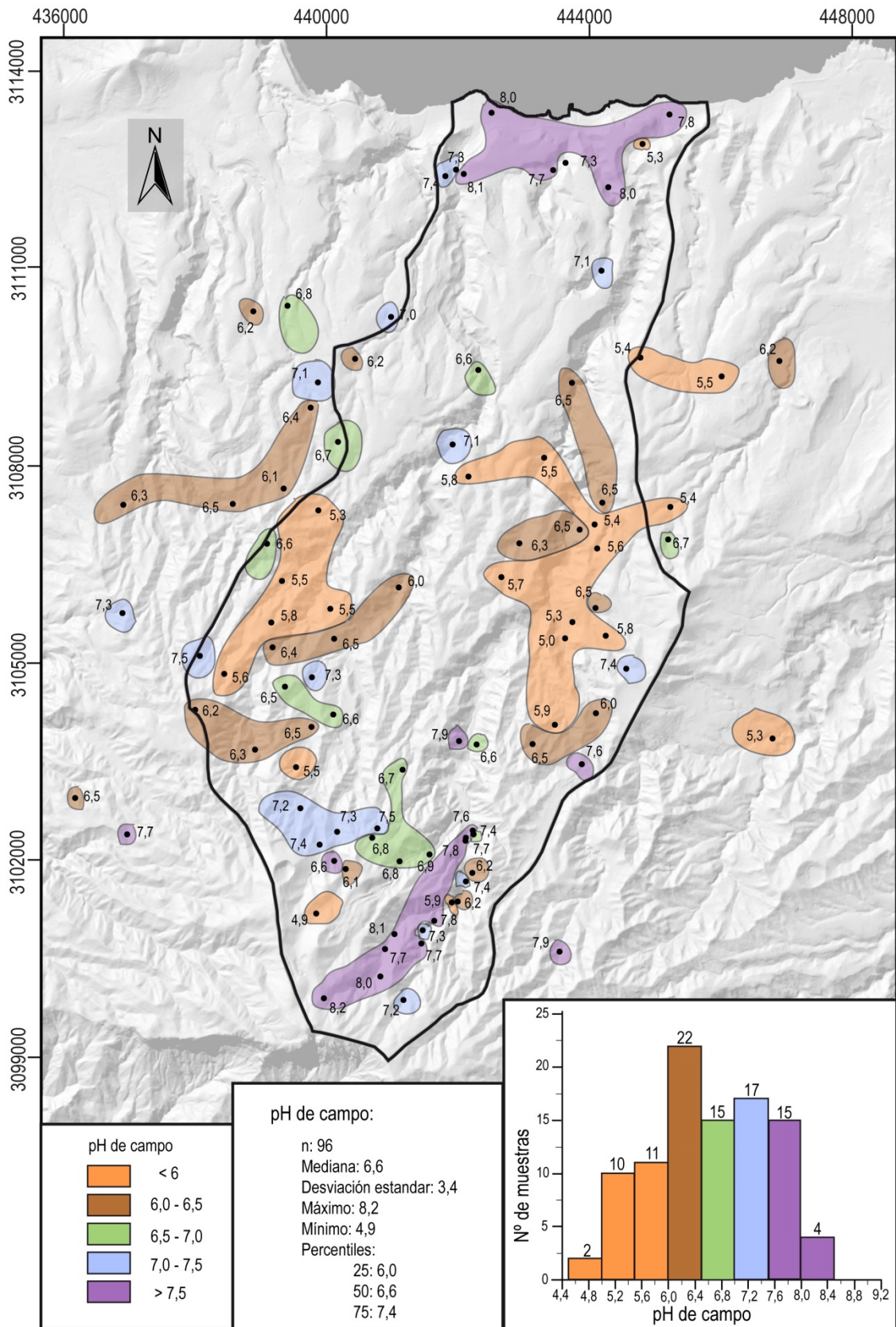


Figura 5.15. Representación espacial, histograma y descriptiva del pH de campo.

En general la **temperatura** del agua subterránea se corresponde con la temperatura media atmosférica, encontrándose las temperaturas más bajas en las zonas altas, aumentando al acercarse a la costa, con algunas anomalías en la zona media.

La figura 5.16 muestra la correlación que existe entre la temperatura atmosférica y la del agua. No se observa una buena correlación. Se podría deber a que no se ha tenido en cuenta la diferencia de profundidad de las captaciones y las variaciones anuales y diarias de temperatura atmosférica.

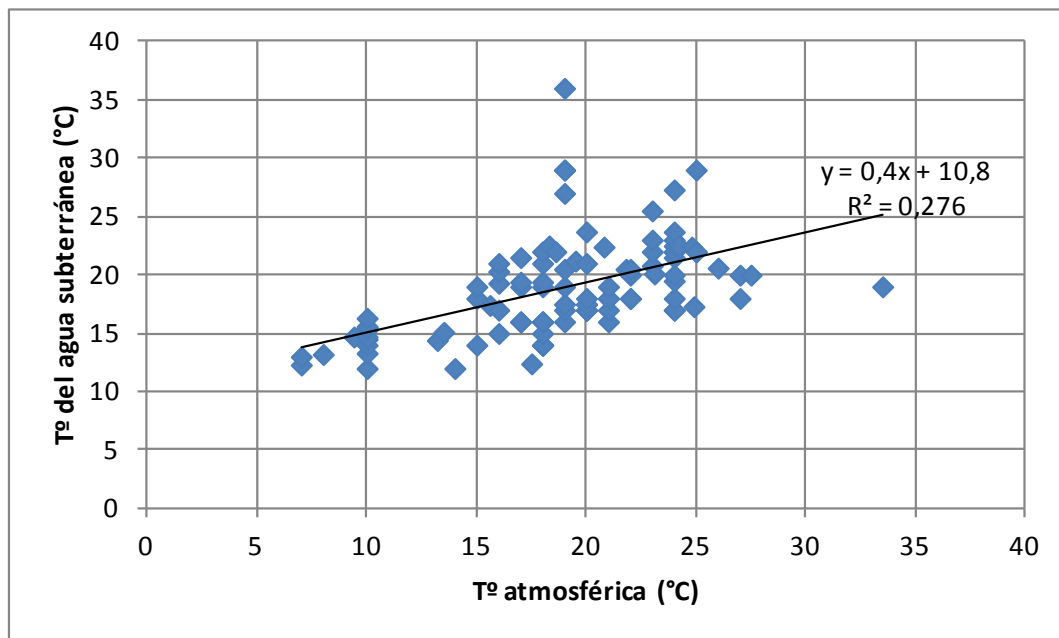


Figura 5.16. Representación gráfica de la temperatura atmosférica frente a la temperatura del agua.

Sólo los pozos 4769 TP y 1829 TP presentan valores de temperatura del agua subterránea que siempre superan los 27°C, entre 27,0-29,4°C y 27,5-29,0°C respectivamente. Se trata de pozos con gas. La mayor temperatura, 36°C se corresponde con el nacimiento 0003 NA, cuyos registros varían entre 23,0-36,0 °C (Fig. 5.16) y también presenta CO<sub>2</sub> disuelto (Fig. 5.17). En el histograma (Fig. 5.17) se observa que los valores siguen una distribución normal, con valores que oscilan entre 11°C y 36°C, con un valor mediano de 19°C y una desviación estándar de 3,9°C.

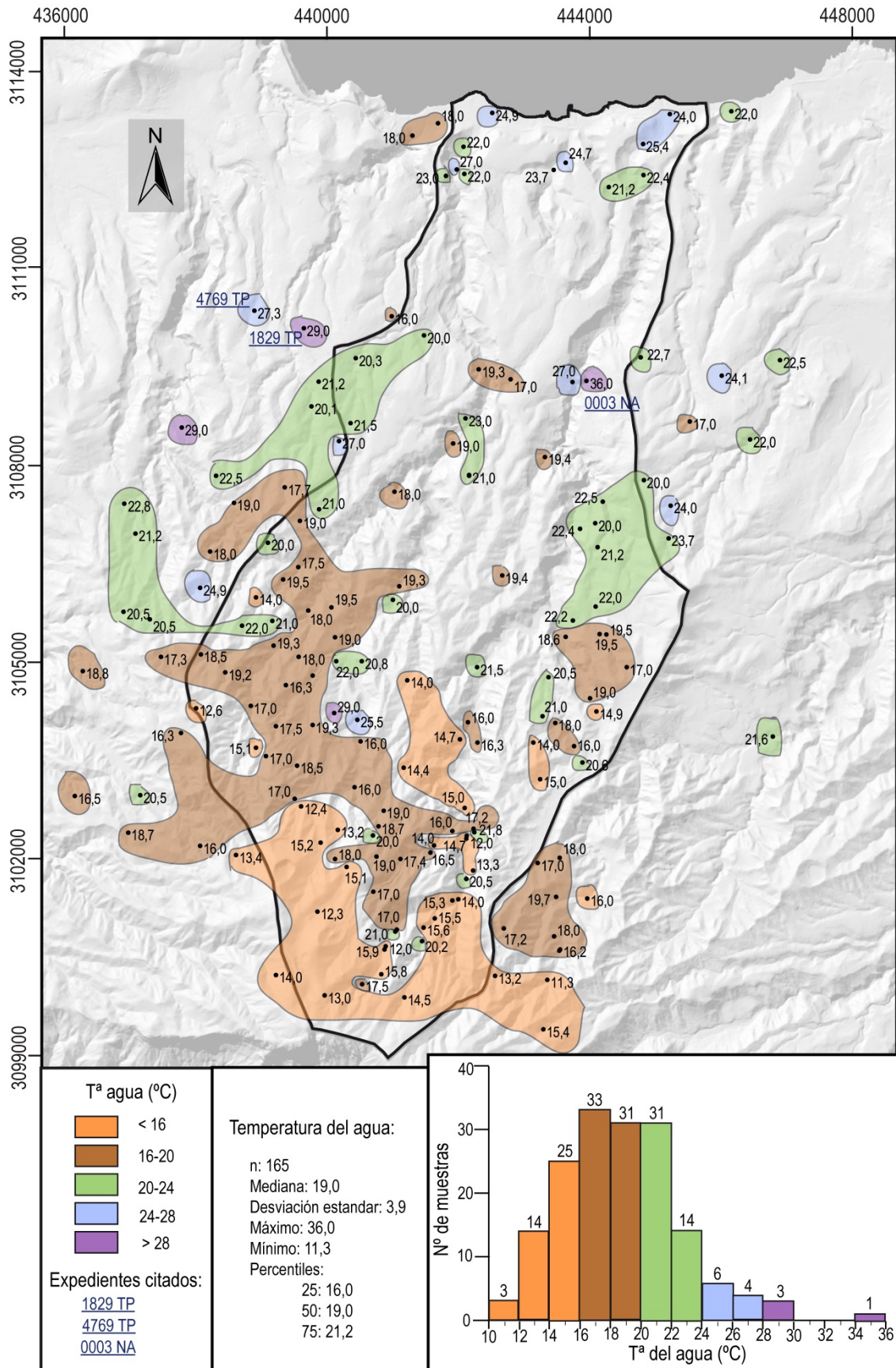


Figura 5.17. Representación de la distribución espacial, histograma y descriptiva de la temperatura del agua subterránea.



La **conductividad eléctrica**, al igual que el pH, ha sido medida en el campo y en el laboratorio. De la figura 5.18 se desprende que existe una buena correlación entre ambas medidas. Las desviaciones observadas podrían ser debidas al producto de la precipitación de ciertas sustancias por cambios de condiciones de pH, temperatura, presión, etc. durante el transporte y almacenamiento de las muestras.

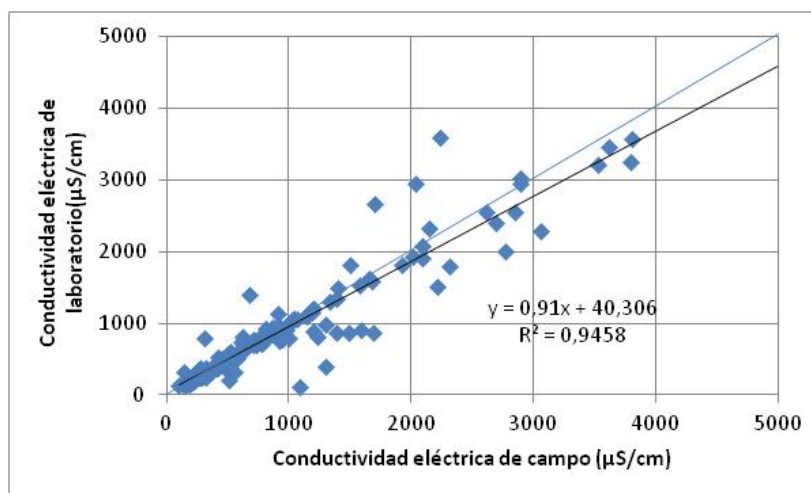


Figura 5.18. Representación gráfica de la conductividad eléctrica de campo frente a la conductividad eléctrica de laboratorio ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Línea negra relación lineal obtenida para los datos de conductividad de campo y laboratorio de la zona de estudio y línea azul relación lineal para el supuesto de conductividad de campo igual a conductividad de laboratorio.

Como los valores de conductividad eléctrica medidos en el campo y en el laboratorio son similares y existe un mayor número de datos de laboratorio, se han tomado estos para representar la distribución espacial mediante isolíneas (Fig. 5.19). Los valores estadísticos son: valor mínimo  $114 \mu\text{S}/\text{cm}$ , valor máximo  $10580 \mu\text{S}/\text{cm}$ , mediana  $549 \mu\text{S}/\text{cm}$  y desviación estándar  $1200 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

En la figura 5.19 se observa que la mineralización del agua subterránea aumenta de cumbre a costa, influenciada por el relieve, con un vacío de datos entre las isolíneas de  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$  y  $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Hay puntos con mayor conductividad que la que le corresponde, se trata de los pozos 0739 TP, 1018 TP, 1430 TP, 3032 TP, 3098 TP, 3905 TP, 4476 TP, 5327 TP y 5417 TP, que podrían estar relacionados con la presencia de  $\text{CO}_2$  disuelto, ya que también se corresponden con concentraciones más elevadas de bicarbonatos que las observadas en los pozos colindantes. En la zona media también se observan valores menores a los esperados; en algunos casos se trata de pozos con menor profundidad que los situados en la misma zona (1940 TP, 0750 TP y 2221 TP) o de una galería (0280 CP) y un nacimiento (0005 NA) seco en la actualidad. En el histograma de la figura 5.19 se representa  $\log \text{CE}$  y se observa que los datos siguen una distribución bimodal, con anomalías debidas quizás a la ausencia de datos, al relieve y a la presencia de  $\text{CO}_2$ .

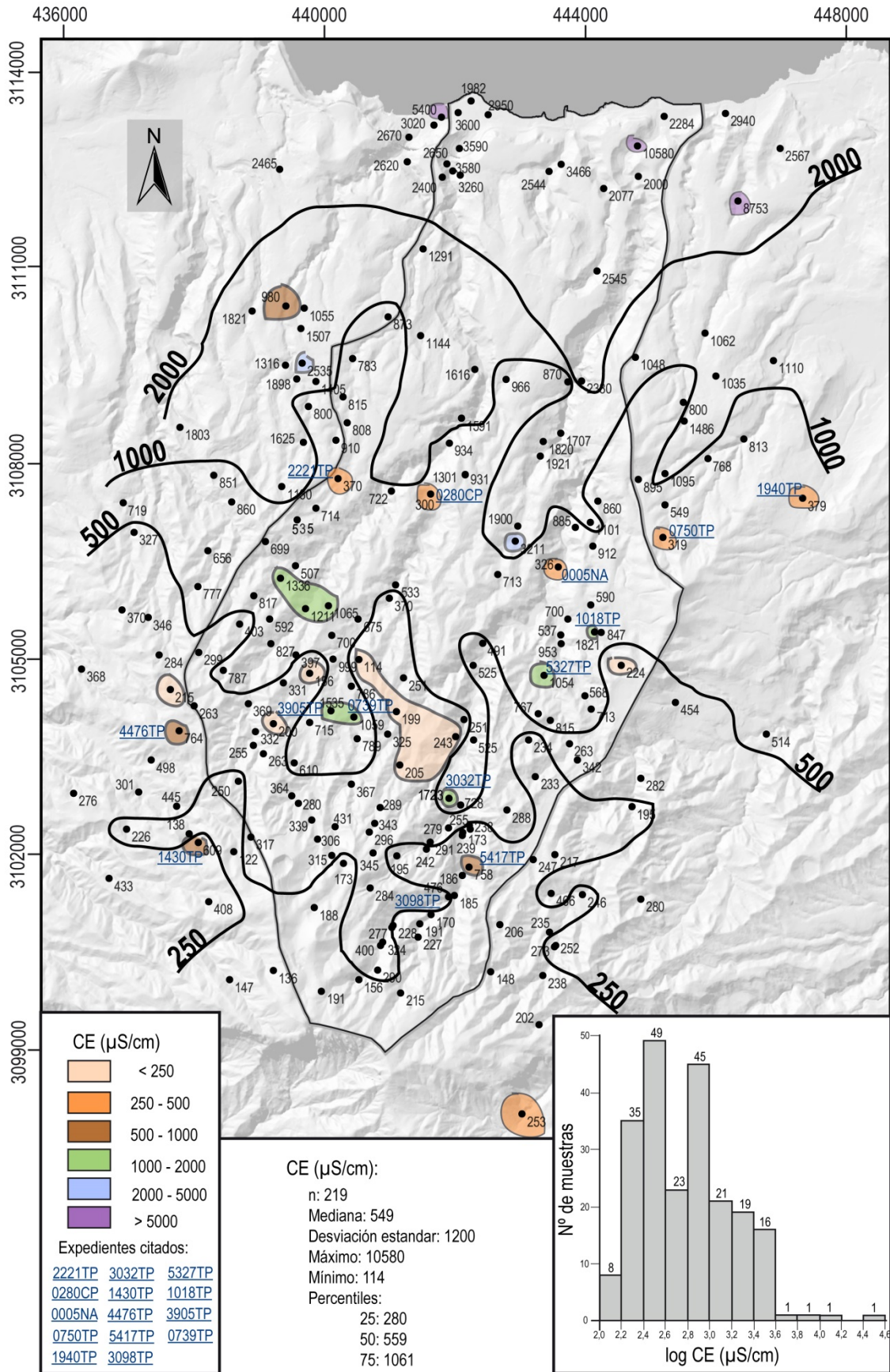
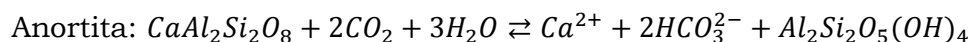
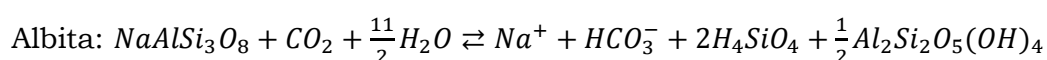


Figura 5.19. Representación espacial, histograma y descriptiva de la conductividad eléctrica del agua subterránea.

En las aguas subterráneas de los terrenos volcánicos los valores más frecuentes de **sílice disuelta** están entre 10 y 40 ppm en SiO<sub>2</sub>, dependiendo de las condiciones de salinidad del agua, pH y temperatura (Custodio, 1978). En aguas con un elevado contenido en CO<sub>2</sub> disuelto pueden alcanzar e incluso rebasar 100 ppm debido a que cuando se transfiere el CO<sub>2</sub>(gas) al agua el pH disminuye, provocando una elevada agresividad al agua hasta que alcanza el equilibrio; entonces el pH tiende a aumentar, llegando a ser notablemente básico. Si el agua ha tenido suficiente contacto con la roca, el contenido en sílice parece que no depende de la mayor acidez de la roca, sino principalmente de la temperatura; si el tiempo de contacto es pequeño puede tener un contenido de SiO<sub>2</sub> menor de lo esperado (Custodio, 1978).

También depende del tipo de silicato que sufre hidrólisis, produciéndose más sílice por unidad de masa alterada en el caso de la albita que en de la anortita:



En las figuras 5.20, 5.21 y 5.22 se relaciona la sílice con el pH, temperatura y TDIC respectivamente.

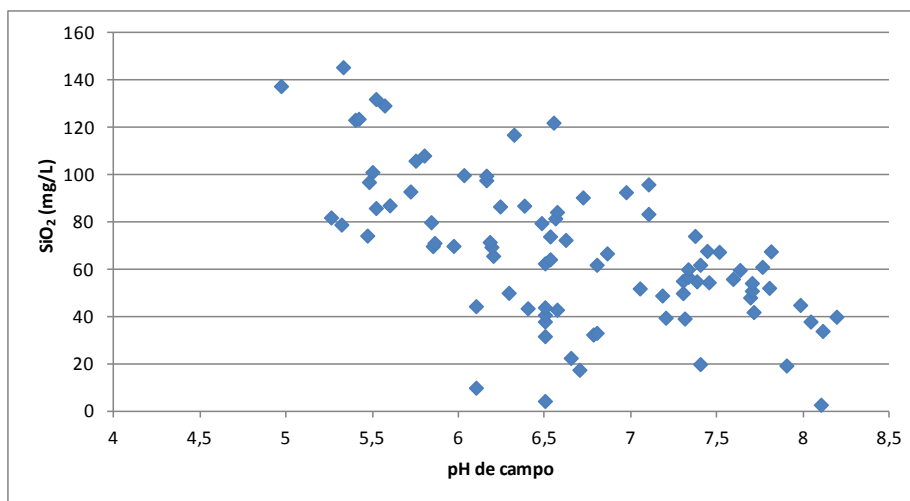


Figura 5.20. Representación gráfica de la sílice frente a pH de campo.

A partir de la figura 5.20 puede deducirse que existe una relación inversa entre pH y el contenido en SiO<sub>2</sub> debido a la mayor agresividad del agua cuando el pH disminuye, sufriendo la roca una mayor alteración.

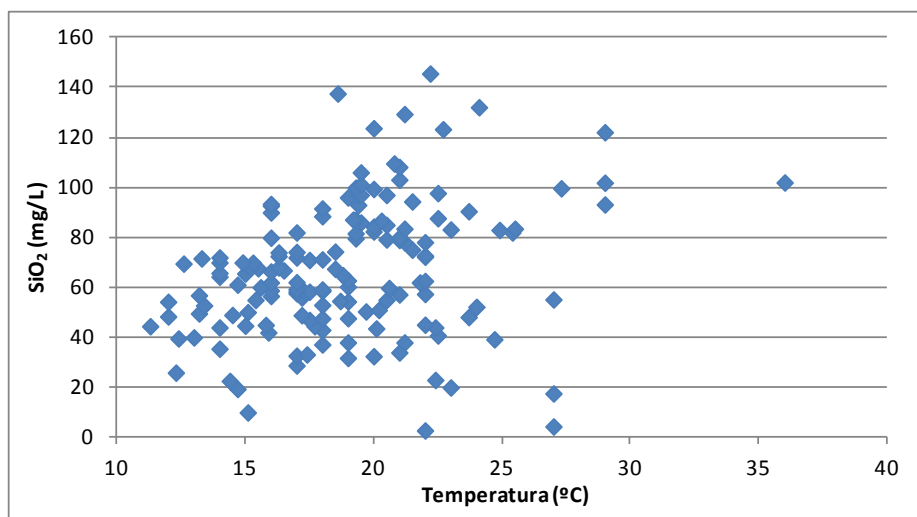


Figura 5.21. Representación gráfica de la sílice frente a la temperatura.

La figura 5.21 indica que no existe correlación entre los contenidos en  $\text{SiO}_2$  y temperatura del agua subterránea, aunque los pozos con alto contenidos en  $\text{SiO}_2$  tienen temperaturas superiores a los  $20^\circ\text{C}$ .

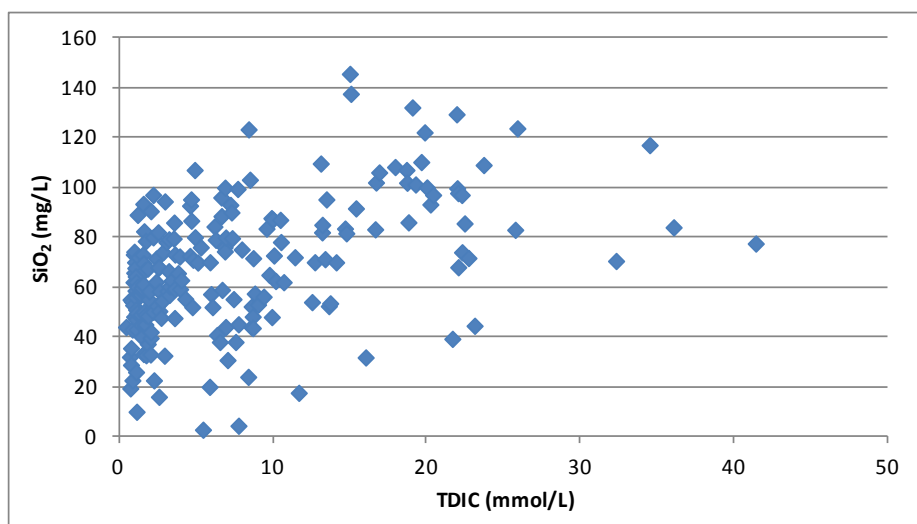


Figura 5.22. Representación gráfica de la sílice frente a TDIC.

En la figura 5.22 se observa que las aguas con TDIC más altos presentan mayor contenido en sílice.

La figura 5.23 muestra la distribución espacial del contenido en sílice del área de estudio. En el histograma los valores siguen una distribución normal, con valores mínimos de  $2,8 \text{ mg/L}$  y máximos de  $145 \text{ mg/L}$ , con una mediana de  $67 \text{ mg/L}$  y desviación estándar de  $26 \text{ mg/L}$ . Se observa que las concentraciones generalmente son mayores a  $40 \text{ mg/L}$  (sólo en 27 casos no lo son) y que se superan en algunos casos los  $100 \text{ mg/L}$  (19 casos). Las aguas que presentan una mayor concentración en sílice ( $>90 \text{ mg/L}$ ) se sitúan en la zona media y es más frecuente encontrar las de menor contenido ( $<40 \text{ mg/L}$ ) en la zona baja y alta, aunque también aparecen casos aislados en la zona media.



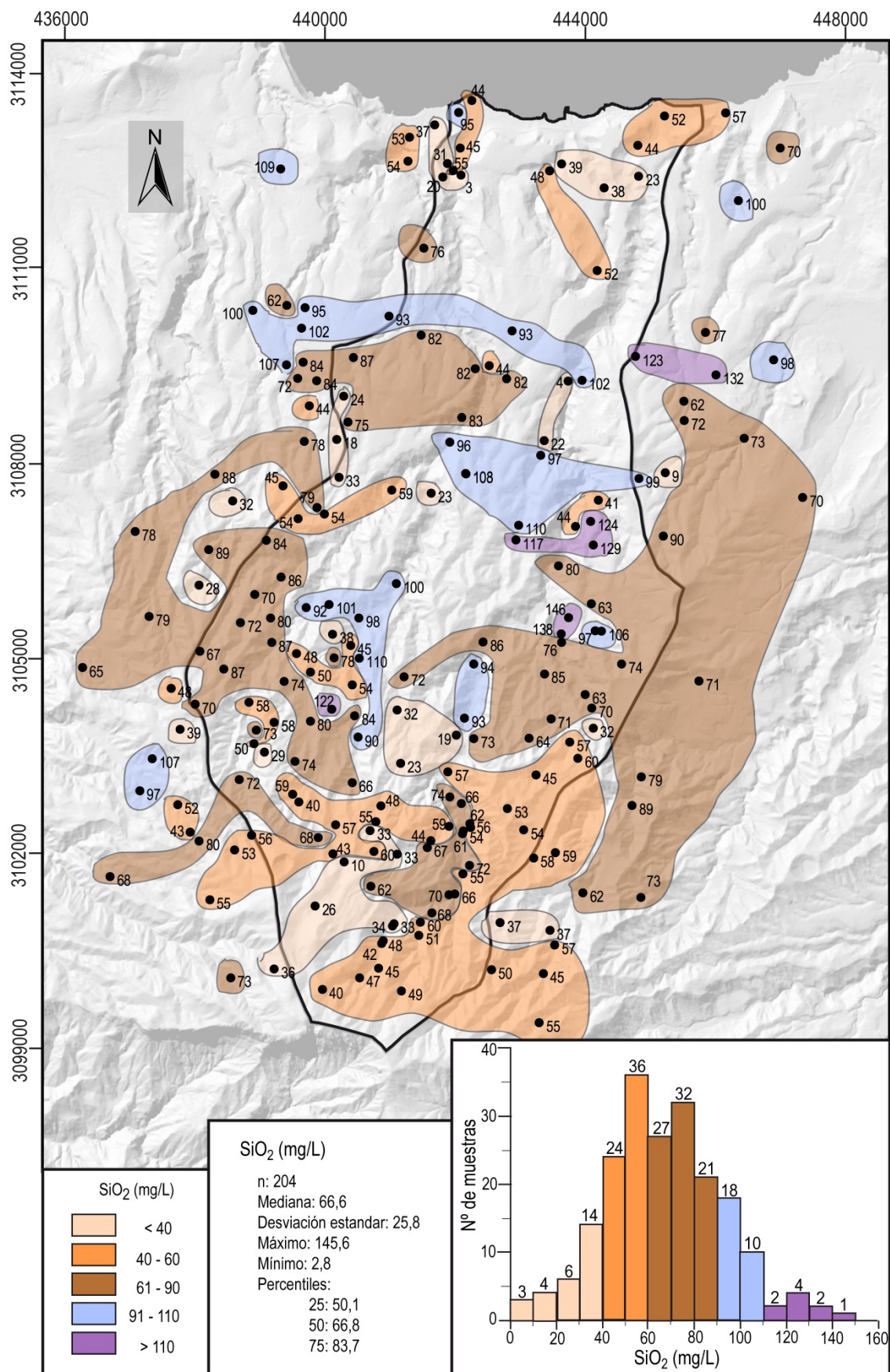
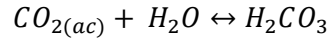


Figura 5.23. Representación espacial, histograma y descriptiva de la concentración de sílice en el agua subterránea.

El **carbono inorgánico disuelto total (TDIC)** se ha calculado preliminarmente a partir del pH y del contenido en bicarbonato a partir de la ecuación de Tillmans (en Custodio y Llamas, 1976):

$$\log CO_2 = 6 - pH - \log[1,589 \cdot HCO_3]$$



$$\log H_2CO_3 = 6 - pH - \log[1,589 \cdot HCO_3]$$

$$H_2CO_3 = 10^{6-pH} \cdot 1,589 \cdot HCO_3$$

$$TDIC(mmól/L) = \frac{10^{6-pH} \cdot 1,589 \cdot HCO_3}{62} + \frac{HCO_3}{61} = \left[ \frac{1,589}{62} 10^{6-pH} + \frac{1}{61} \right] HCO_3$$

$$TDIC = \left[ \frac{61}{62} \cdot 1,589 \cdot 10^{6-pH} + 1 \right] rHCO_3$$

$$TDIC(mmól/L) = [1,563 \cdot 10^{6-pH} + 1] rCO_2H$$

Este método es aceptable para aguas con baja fuerza iónica, pero las desviaciones pueden ser significativas para salinidades altas o temperaturas altas.

El histograma de log TDIC hallado para las aguas subterráneas de la zona de estudio sigue una distribución binormal. Se observan mínimos de 0,4 mmol/L y máximos de 41 mmol/L, con una mediana de 4,8 mmol/L y desviación estándar de 8 mmol/L (Fig. 5.24). Los valores menores de 2,5 mmol/L se observan preferentemente en la zona alta, aunque también se observan en la zona media, pero de forma puntual. Las concentraciones van aumentando hasta llegar a la zona media donde aparecen los valores más altos, mayores de 30 mmol/L. En la zona baja los valores están entre 6 y 24 mmol/L aproximadamente (Fig. 5.24).

Existe una íntima relación química entre  $CO_2$  (gas),  $CO_2$  disuelto,  $HCO_3$ ,  $CO_3$  y pH. La alcalinidad del agua es la suma de  $HCO_3$  y  $CO_3$  (en meq/L), aunque pueden influir la sílice disuelta, fosfatos, boratos, quizás fluoruros y a veces arseniatos, aluminatos, hidróxidos de hierro y ciertos compuestos orgánicos, pero poco en el caso de aguas naturales (Custodio y Llamas, 1976).

La concentración de cada especie carbónica está relacionada con el pH, siendo el  $CO_3$  relativamente muy pequeño respecto al  $HCO_3$  si el pH es menor que 8,3. Los pH observados en el campo en la zona de estudio están entre 4,9 y 8,2, aumentando en algunos casos el pH medido en laboratorio y apareciendo pequeñas concentraciones de carbonato en 28 muestras, pero siendo dominante el bicarbonato dentro de las especies carbónicas.

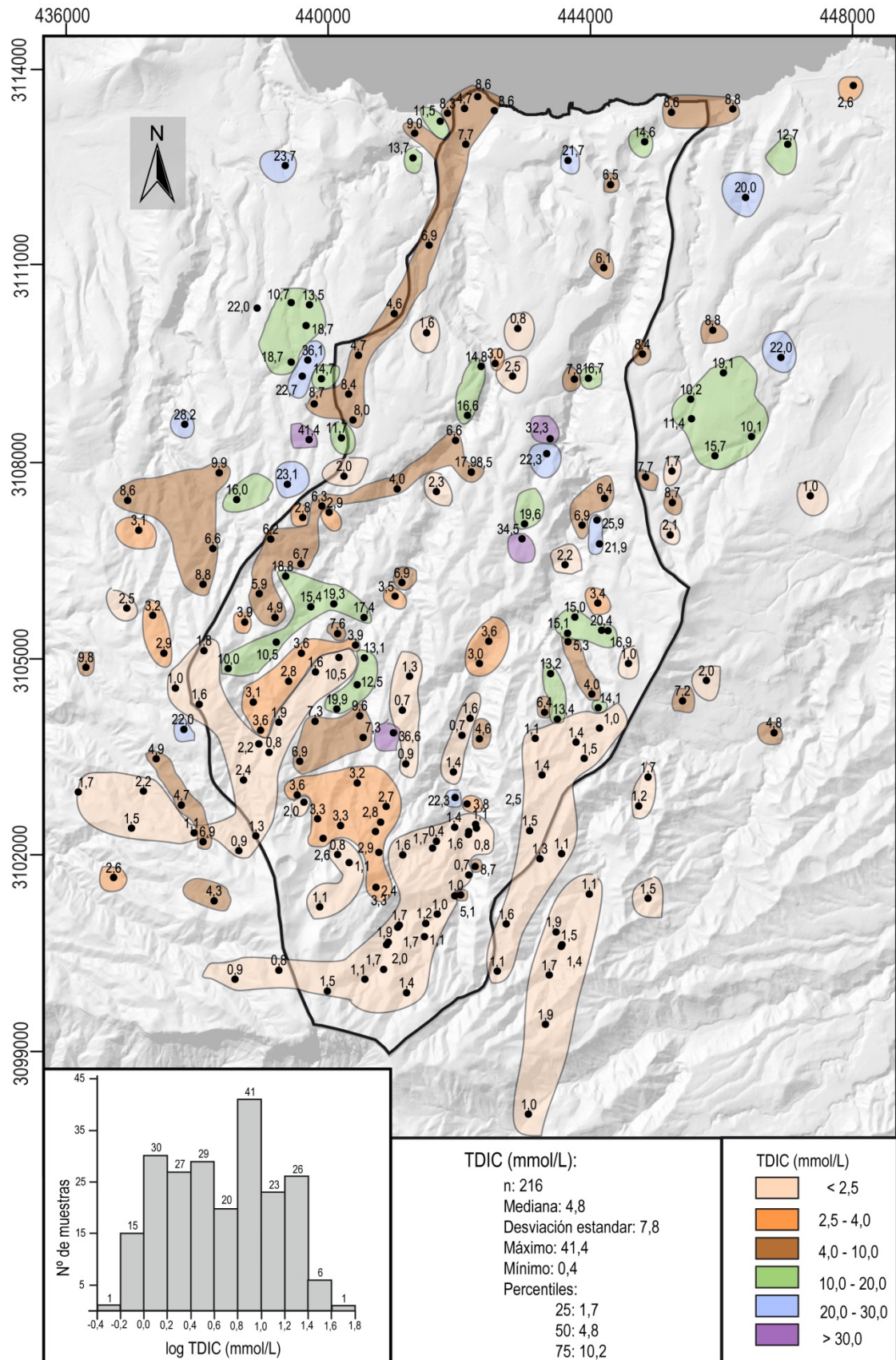


Figura 5.24. Representación espacial, histograma y descriptiva del TDIC de las aguas subterráneas calculado a partir de la ecuación de Tillmans.



La concentración de **bicarbonatos** ( $\text{HCO}_3$ ) en las aguas subterráneas de la zona de estudio varía entre 27 y 1952 mg/L, con una mediana de 243 mg/L y desviación estándar de 335 mg/L (Fig. 5.25). El histograma del log  $\text{HCO}_3$  sigue una distribución normal. En la (Fig. 5.25) se representa la distribución espacial de la concentración de bicarbonatos en la zona de estudio. Se observa una alta concentración de bicarbonatos en la zona media. Uno de los factores más importantes que controla el contenido iónico de las especies carbonatadas es la agresividad aportada por la disolución de  $\text{CO}_2$  endógeno en el acuífero (Marrero et al, 2008; Marrero, 2010).

El cloro disuelto en las aguas subterráneas se encuentra en forma de cloruro. Las concentraciones de **cloruros** (Cl) encontradas normalmente en aguas dulces están entre 10 y 250 mg/L y en agua de mar entre 18000 y 21000 mg/L. Procede del agua de lluvia (deposición húmeda), deposición seca atmosférica, lavado del terreno, mezcla con agua marina en regiones costeras, vertidos urbanos e industriales y excedentes agrícolas. Raramente procede de gases y líquidos asociados a emanaciones volcánicas salvo en las proximidades de las emanaciones o de depósitos asociados a las mismas. Por sus características conservativas, los cloruros se utilizan como trazador natural del acuífero, para determinar líneas de flujo preferenciales (Custodio, 1978, 1988) o para estimar la recarga con el método del balance de cloruros atmosférico (Eriksson y Khunakasem, 1969; Custodio, 1997; Iglesias *et al*, 1997; Alcalá, 2005, Alcalá y Custodio 2012).

El histograma elaborado con los valores de log Cl en la zona de estudio muestra dos distribuciones normales positivas. Las concentraciones observadas oscilan con valores mínimos de 10 mg/L y máximos de 3450 mg/L, con una mediana de 30 mg/L y una desviación estándar de 354 mg/L (Fig. 5.26).

Espacialmente las isolíneas de cloruros muestran un aumento de los mismos desde la cumbre hacia la costa (Fig. 5.26). Esto responde a la disminución de la influencia marina en la recarga que se produce por el alejamiento y la variación altitudinal que existe entre la zona costera y la de cumbre, además de la mayor precipitación que se origina en las zonas altas (menor evapotranspiración). En la zona alta hay captaciones con concentraciones más altas de cloruros respecto a los valores obtenidos en captaciones adyacentes. Se trata de dos nacientes situados en la zona alta, el 0522-0523 NA y 0516 NA con 35 mg/L y 46 mg/L de cloruros respectivamente; de tres galerías, las 1274 TP, 1441 TP y 1177 TP con 54 mg/L, 52 mg/L y 51 mg/L de cloruros respectivamente y el pozo 0269 CP con 63 mg/L, situado en la zona media, no explotado actualmente y poco profundo (49 m) en comparación con los pozos de la misma zona (100-200 m) (Fig. 5.26).



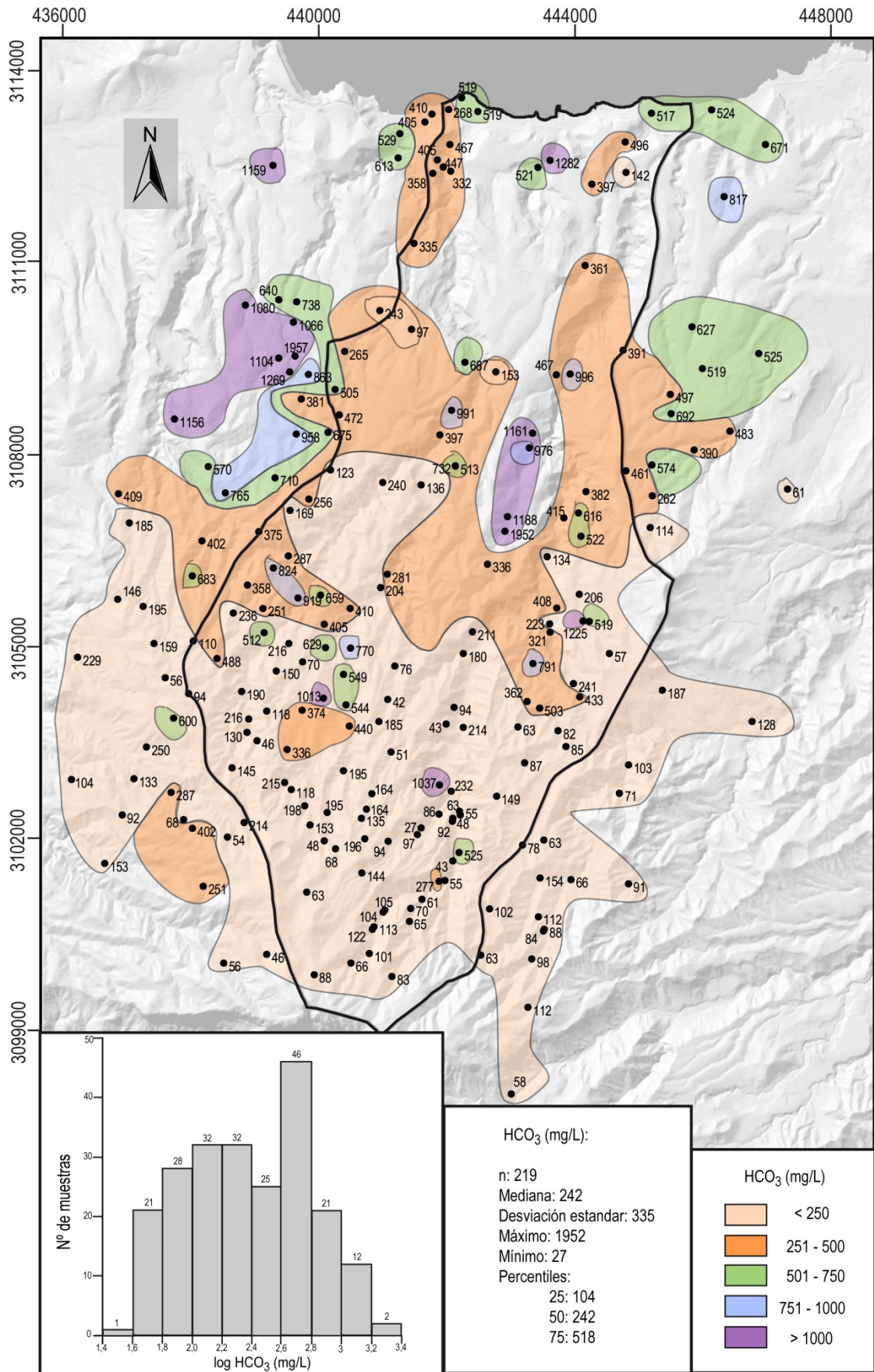


Figura 5.25. Representación espacial, histograma y descriptiva del ión bicarbonato (mg/L) en las aguas subterráneas.

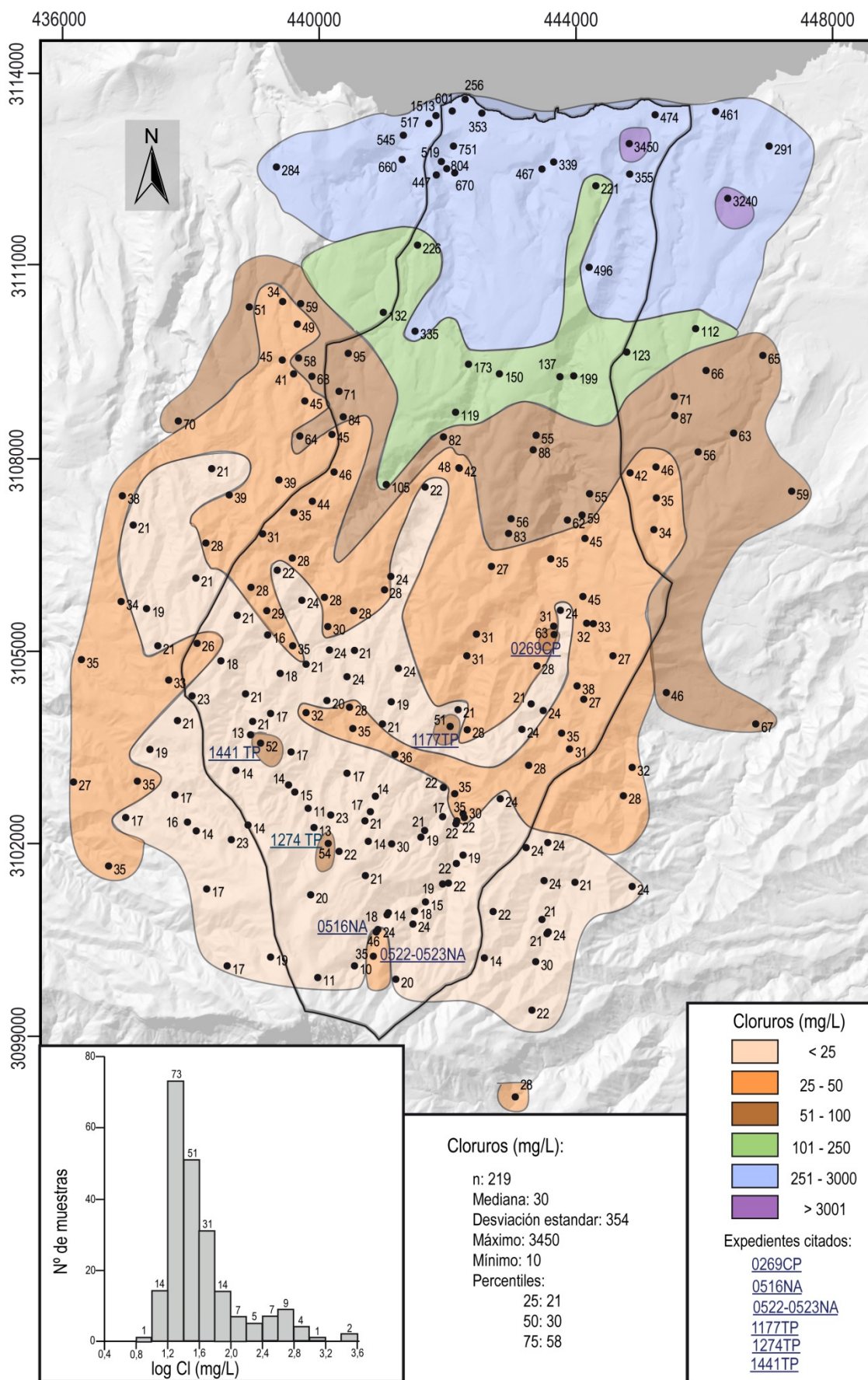


Figura 5.26. Representación espacial, histograma y descriptiva de los cloruros.

Las concentraciones normales de **sulfatos** ( $\text{SO}_4$ ) en aguas dulces oscilan entre 2 y 150 mg/L y en el agua de mar alrededor de 3000 mg/L. Procede del lavado de terrenos en condiciones de gran aridez o ambiente marino, oxidación de sulfuros de rocas, concentración en el suelo del agua de lluvia, actividades urbanas, industriales y agrícolas, principalmente como componente de los fertilizantes.

En la figura 5.27 se representan los contenidos de sulfatos de las aguas subterráneas observados en el área de estudio. El histograma sigue una distribución normal, observándose valores máximos de 564 mg/L que se sitúan en la zona costera del área de estudio y mínimos de 5 mg/L (límite analítico) en la zona alta, con una mediana de 14 mg/L y una desviación estándar de 113 mg/L.

La distribución espacial de la concentración de sulfatos del agua subterránea en la zona de estudio refleja un aumento progresivo hacia la costa, con algunas anomalías en la zona intermedia y un gran aumento en la zona costera que estaría relacionado con el ambiente marino y la aridez del área.

En la zona alta y media hay pozos con concentraciones de sulfatos elevados puntualmente, que no aparecen en todos los análisis disponibles para esas captaciones: se trata de los pozos 1450 TP, 4615 TP, 5383 TP, de las galerías 0297 CP (con un sólo análisis disponible) y 0269 CP, (la anomalía es puntual, con concentraciones de sulfatos menores en otros análisis) - ambas galerías presentan aguas con cloruros altos -, el sondeo 1598 TP del que sólo se dispone de un análisis y los pozos 1073 TP, 1898 TP, 3188 TP, 1018 TP y 0770 TP y el nacimiento 0005 XX con sulfatos altos en todos los análisis y con presencia de gas en sus aguas.

Los niveles naturales de **nitrito** ( $\text{NO}_2$ ) en las aguas subterráneas son generalmente muy bajos, normalmente menores de 10 mg/L. Las concentraciones elevadas suelen estar relacionadas con retornos de aguas residuales urbanas, retornos de riegos que arrastran consigo abonos agrícolas y lixiviados de cultivos en secano. En la zona de estudio las concentraciones altas se sitúan cerca de la costa y algunos casos puntuales están relacionados con algunos pequeños núcleos urbanos que no disponen de red de alcantarillado (Fig. 5.28) y puntualmente con zonas agrícolas (tabla 5.9).



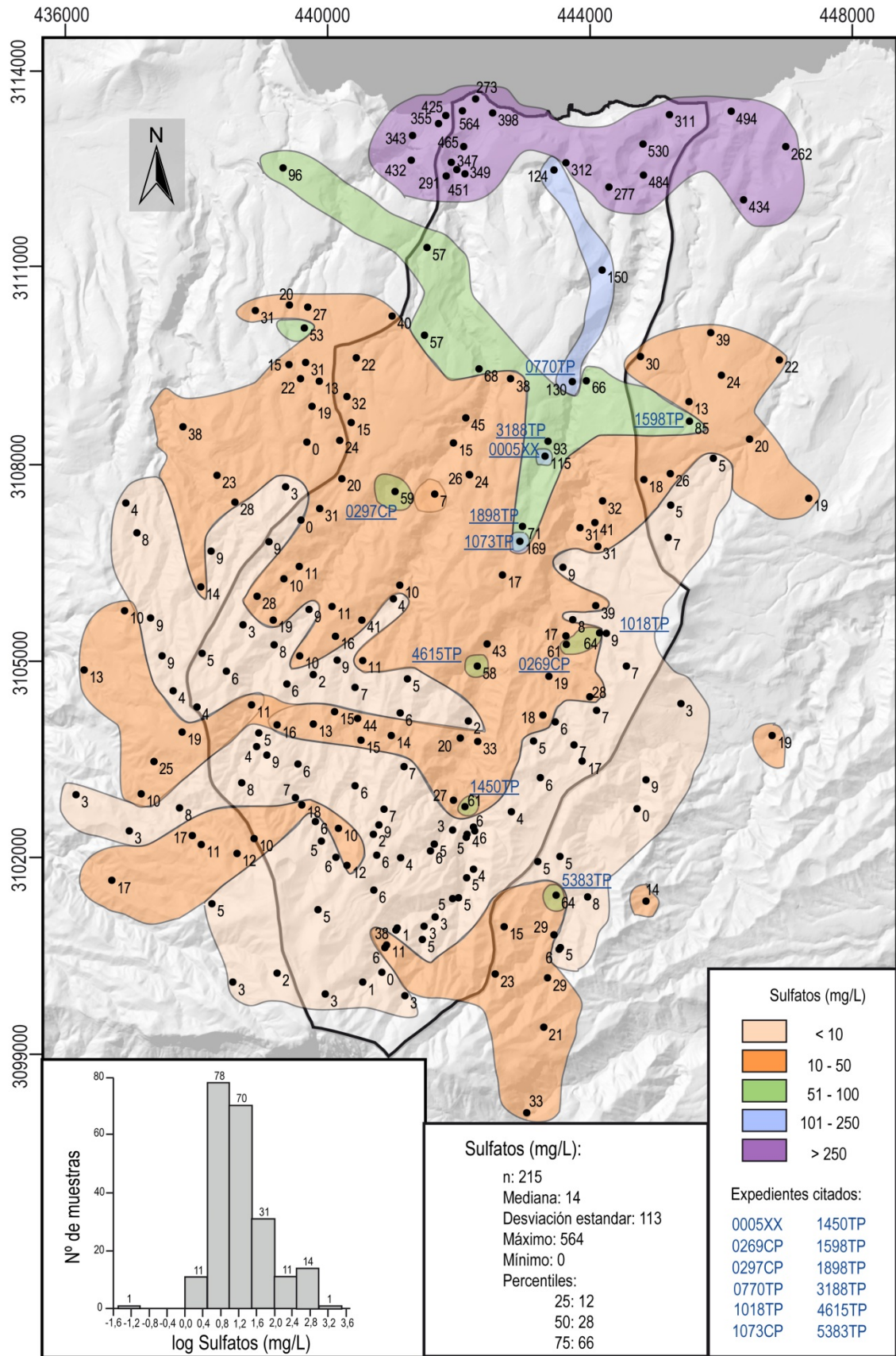


Figura 5.27. Representación espacial, histograma y descriptiva de los sulfatos (mg/L) en aguas subterráneas.

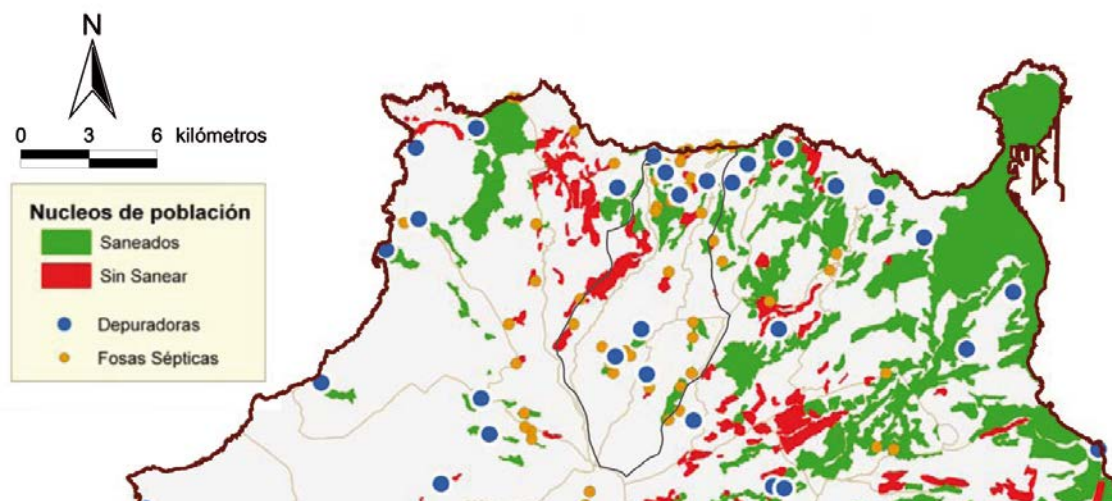


Figura 5.28. Estado de saneamiento de los núcleos de población en el norte de Gran Canaria (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, PHGC, 2010)

En la figura 5.29 se representa la distribución espacial del contenido en nitratos de las aguas subterráneas. En ella se ha incluido las captaciones de la zona media de estudio que han sido descartadas para el estudio químico de las aguas subterráneas por tener concentraciones superiores a los 50 mg/L (tabla 5.9). En general la concentración de nitratos no supera los 20 mg/L, exceptuando la costa donde alcanza valores superiores a los 100 mg/L. El histograma de  $\log \text{NO}_3$  sigue una distribución normal. Los valores observados oscilan entre 1 mg/L (límite analítico) y 248 mg/L, con media de 8 mg/L y con una desviación estándar de 34 mg/L.

### **Relaciones iónicas:**

La relación  $r(\text{Ca}+\text{Mg})/r(\text{Na}+\text{K})$  en el agua subterránea está muy influida por la roca local (Tabla 5.1), las aguas que tienen otra composición catiónica tienden a evolucionar para asemejarse a la roca que las contiene. Generalmente en las aguas que se encuentran en las rocas alcalinas dominan los cationes alcalinos, mientras que para las basálticas dominan los alcalino-térreos, salvo que las condiciones de aridez impongan un aporte inicial de  $\text{ClNa}$  que resulte dominante; en algunos casos, cuando la salinidad es elevada, el Ca está limitado y el Mg entra en disolución con mayor dificultad que el Na. Cuando existe aporte de  $\text{CO}_2$ , la relación puede aumentar al desaparecer las condiciones que impedían la disolución del Ca y también del Mg (Custodio, 1978).

En la figura 5.30 se representa la distribución espacial en el área de estudio de la relación  $r(\text{Ca}+\text{Mg})/r(\text{Na}+\text{K})$  para los análisis de agua subterránea considerados.



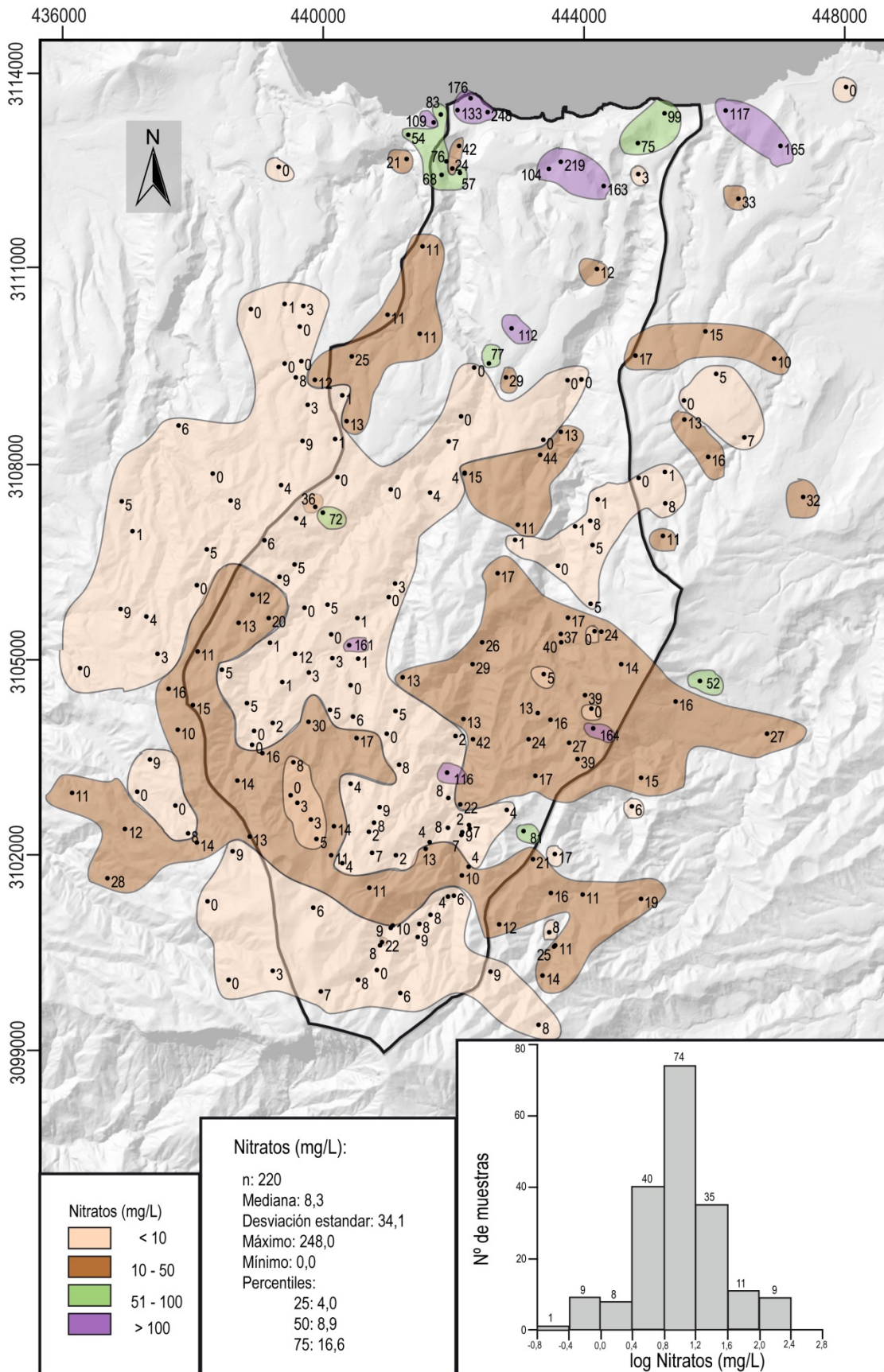


Figura 5.29. Representación espacial, histograma y descriptiva de los nitratos (mg/L) en aguas subterráneas.

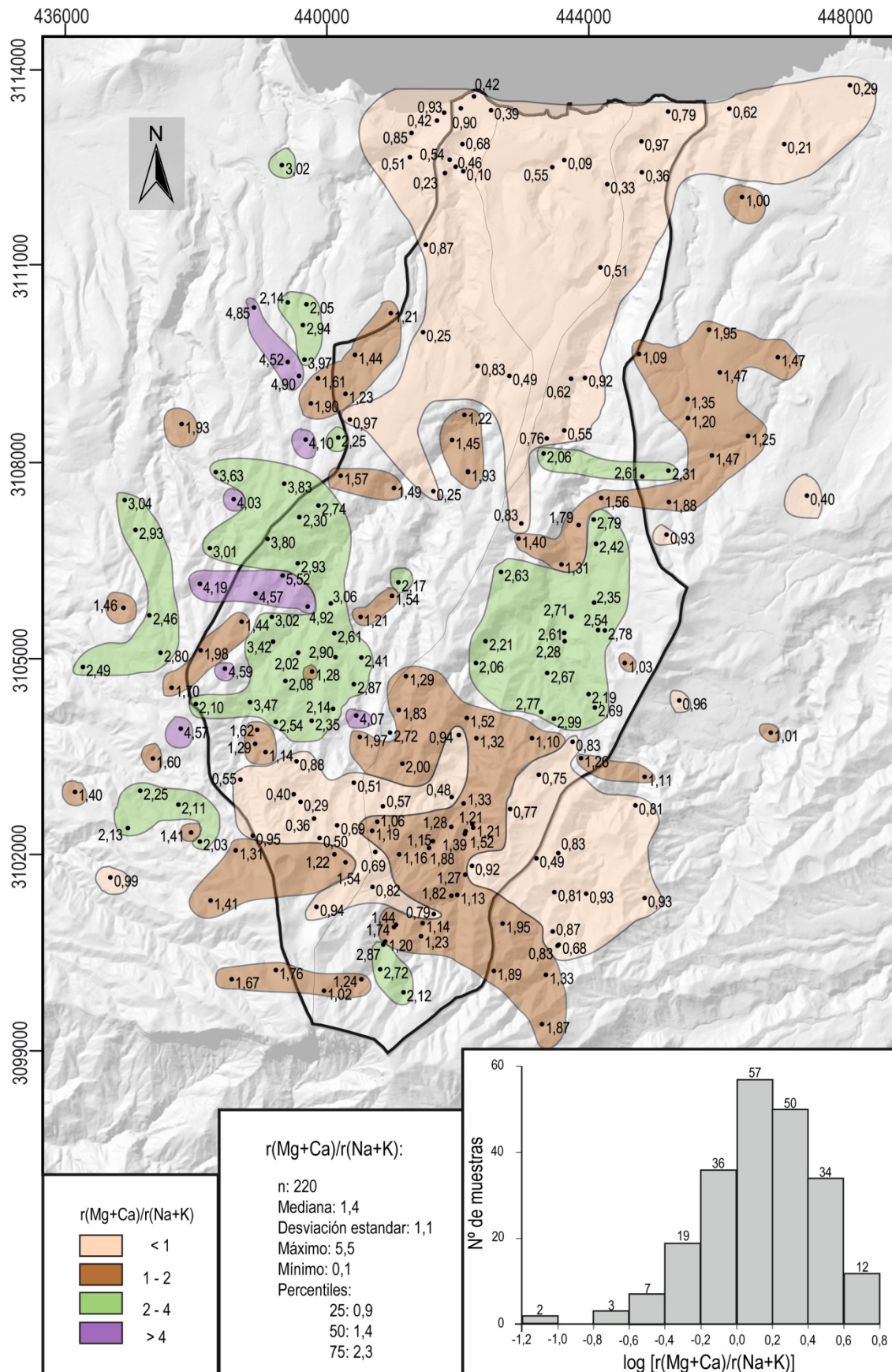


Figura 5.30. Representación espacial, histograma y descriptiva de la relación iónica  $\log [r(\text{Mg}+\text{Ca})/r(\text{Na}+\text{K})]$  en aguas subterráneas.

Los valores obtenidos para  $\log [r(\text{Ca}+\text{Mg})/r(\text{Na}+\text{K})]$  siguen una distribución normal y están comprendidos entre 0,1 y 5,5 con una mediana de 1,4. En la zona intermedia del área de estudio se sitúan valores superiores a 2, mientras que en la cumbre y en la zona costera son inferiores a 1. Según estudios anteriores en Gran Canaria (Fernandopulle, 1974; Custodio, 1978), las aguas ligadas a basaltos y basanitas presentan valores que oscilan entre 2,0 y 7,0 mientras que las rocas intermedias, como fonolitas e ignimbritas fonolíticas, dan valores entre 0,1 y 0,4. Así, la zona intermedia corresponde a aguas ligadas a los basaltos y basanitas de las Formaciones Roque Nublo y Post-Roque Nublo, mientras que hacia la costa el agua tiende a corresponder a Fonolitas Miocenas. La existencia de aguas poco evolucionadas en la zona alta se atribuye a que se trata de una zona de mayor recarga y por lo tanto con más rápida renovación.

La relación **rNa/rK** depende tanto de la composición de la roca, disminuyendo con la acidez de esta, como de la fijación relativa del K en las arcillas producto de la alteración de los silicatos y de la composición inicial del agua de infiltración según el grado de aridez. En general es tanto menor cuanto menos salina es el agua (Custodio, 1978). En ausencia de contaminación agrícola por exceso de abono con sales potásicas, su valor es siempre mayor que 1 y con frecuencia mayor que 10.

Los valores de  $\log (r\text{Na}/r\text{K})$  del agua subterránea en la zona de estudio siguen una distribución normal, con valores que están entre 2 y 245, con una mediana de 9 (Fig. 5.31). Los valores de esta relación iónica van aumentando de cumbre a costa.



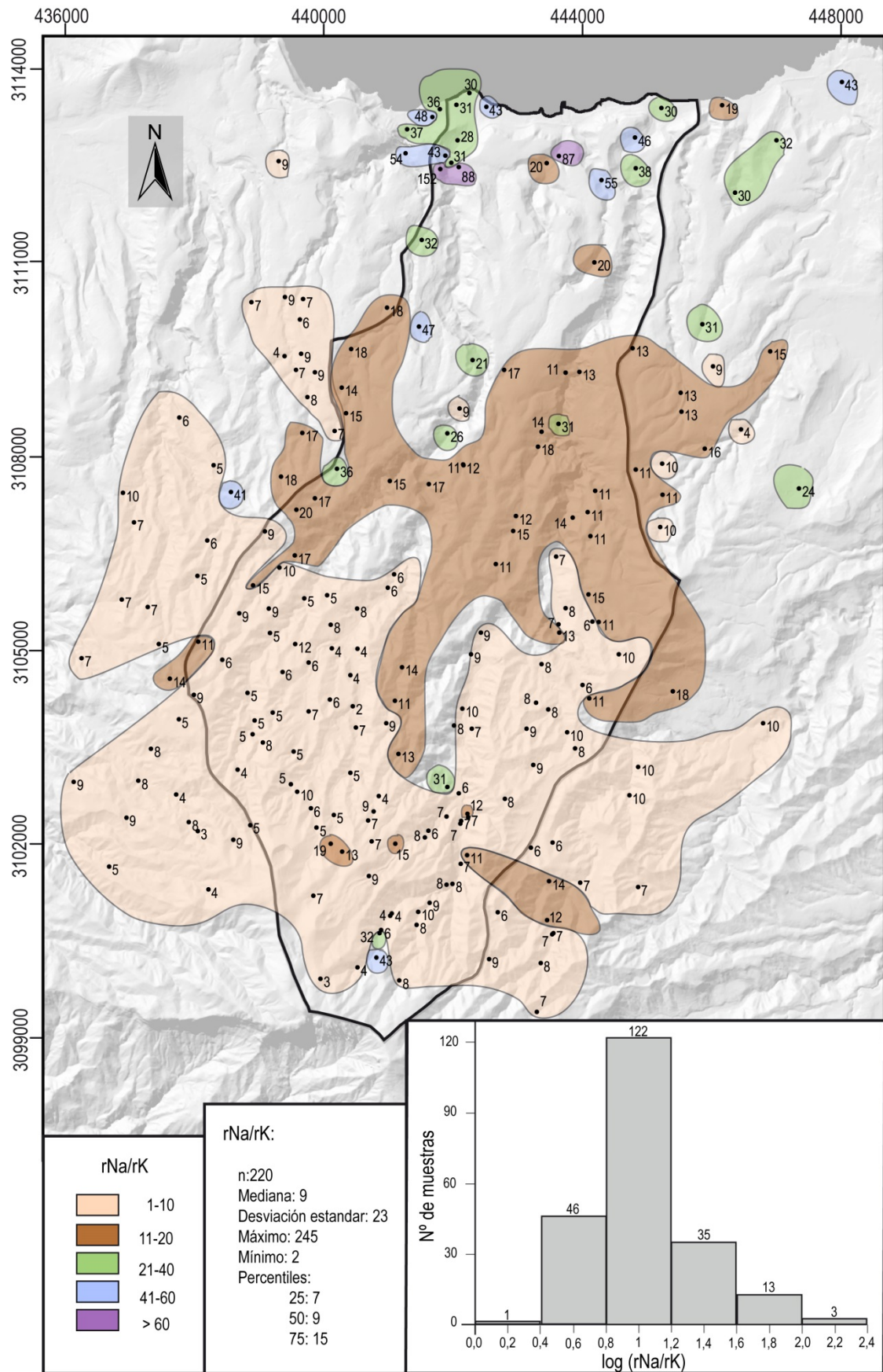


Figura 5.31. Representación espacial, histograma y descriptiva de la relación iónica  $\log(rNa/rK)$  en aguas subterráneas.

#### 5.4.4 Análisis multivariante

El objetivo principal del análisis multivariante es simplificar una gran cantidad de observaciones en un número menor de variables e identificar grupos homogéneos en función de las diferentes determinaciones químicas realizadas en los puntos de agua.

En la zona de estudio se ha realizado un análisis clúster. Partiendo de una tabla de casos-variables, este método trata de reunir los casos en grupos homogéneos no conocidos de antemano pero sugeridos por la propia esencia de los datos, de manera que individuos que puedan ser considerados similares sean asignados a un mismo clúster (grupo o enjambre), mientras que individuos diferentes se localizan en clústers distintos (Pérez López, 2004).

El programa informático que se ha utilizado para el análisis multivariante es el SPSS Statistics 20. Se han tomado 186 análisis de los 220 seleccionados para el estudio químico, ya que era necesario que todos aportaran datos sobre las 12 variables seleccionadas para el estudio: cota de fondo de la captación, conductividad eléctrica (CE) de laboratorio, pH de laboratorio (pHl), SiO<sub>2</sub>, Ca, Mg, Na, K, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Cl y NO<sub>3</sub>. Se ha tomado la CE y pH de laboratorio para tener un mayor número de análisis ya que tomando los de campo habría muchos análisis incompletos, se reduciría el número de casos y las variaciones observadas en el análisis multivariante no serían tan significativas.

En el análisis clúster existe una variedad de formas de medir distancias entre casos y algoritmos de clasificación para asignar los individuos a distintos grupos. En este caso se ha realizado el estudio utilizando el análisis de clúster jerárquico, agrupando por casos o puntos de muestreo. El método de conglomeración utilizado es el de Ward y la medida de distancia o similitud empleada es la Euclídea.

##### 5.4.4.1 Matriz de correlación y análisis clúster

En la tabla 5.12 se muestra la matriz con los Coeficientes de Correlación de Pearson obtenidos para las 12 determinaciones fisico-químicas medidas en 186 muestras de agua subterránea y la cota de situación de la captación.

El análisis multivariante de la matriz de correlación muestra un grupo de variables que presentan una muy alta correlación lineal positiva entre sí (CE, Mg, Na, K, SO<sub>4</sub> y Cl) y simplemente alta entre SO<sub>4</sub>, Mg y Cl. El Ca se correlaciona menos con el resto de variables, lo que está relacionado con la precipitación/disolución de calcita, que influye en el HCO<sub>3</sub>, pH y CE. Asimismo se observan una serie de variables que no se relacionan linealmente con ninguna otra variable considerada en el estudio, como pH, sílice y bicarbonato, que estarían más relacionadas con la interacción agua-roca-gas, y los nitratos

que dependen de aportes externos. La menor correlación del SO<sub>4</sub> también debe tener un origen natural y un posible origen antrópico, con contribuciones variables.

Tabla 5.12. Coeficiente de correlación de Pearson de las concentraciones iónicas y la cota de captación (de fondo de pozo). Los valores marcados de amarillo indican correlación significativa.

	Cota de captación	pH lab	CE	SiO <sub>2</sub>	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>
Cota de captación	1,000											
pH lab	0,241	1,000										
CE	-0,391	-0,107	1,000									
SiO <sub>2</sub>	-0,097	-0,289	-0,057	1,000								
Ca	-0,506	-0,299	0,739	0,175	1,000							
Mg	-0,380	-0,164	0,979	-0,009	0,790	1,000						
Na	-0,257	-0,046	0,967	-0,112	0,579	0,935	1,000					
K	-0,297	-0,081	0,951	-0,047	0,659	0,941	0,966	1,000				
HCO <sub>3</sub>	-0,548	-0,307	0,190	0,267	0,586	0,249	0,043	0,185	1,000			
SO <sub>4</sub>	-0,435	-0,001	0,931	-0,151	0,618	0,870	0,904	0,860	0,096	1,000		
Cl	-0,217	-0,061	0,963	-0,100	0,599	0,945	0,992	0,959	-0,007	0,879	1,000	
NO <sub>3</sub>	-0,405	0,098	0,182	-0,074	0,117	0,075	0,104	0,049	0,113	0,370	0,046	1,000

### **Análisis Clúster 1**

El dendograma de la figura 5.32 muestra el resultado obtenido en el análisis clúster tomando como variables: pH lab, CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), SiO<sub>2</sub> (mg/L), Ca (meq/L), Mg (meq/L), Na (meq/L), HCO<sub>3</sub> (meq/L), SO<sub>4</sub> (meq/L), Cl (meq/L), y NO<sub>3</sub> (meq/L). Para la distancia marcada por la línea roja se observan dos grandes grupos con diferente distancia de asociación, el 1.A + 1.B, formados por 142 puntos de agua y los 44 restantes que no quedan incluidos en ningún grupo a la distancia elegida.

En el grupo 1.A se incluyen 103 puntos muestreados situados en la zona media y alta del área de estudio, que presenta aguas con menor conductividad eléctrica que el grupo 1.B, que está formado por 39 puntos de agua y se sitúa en la zona media y baja de estudio (Tabla 5.13) y (Fig. 5.32).

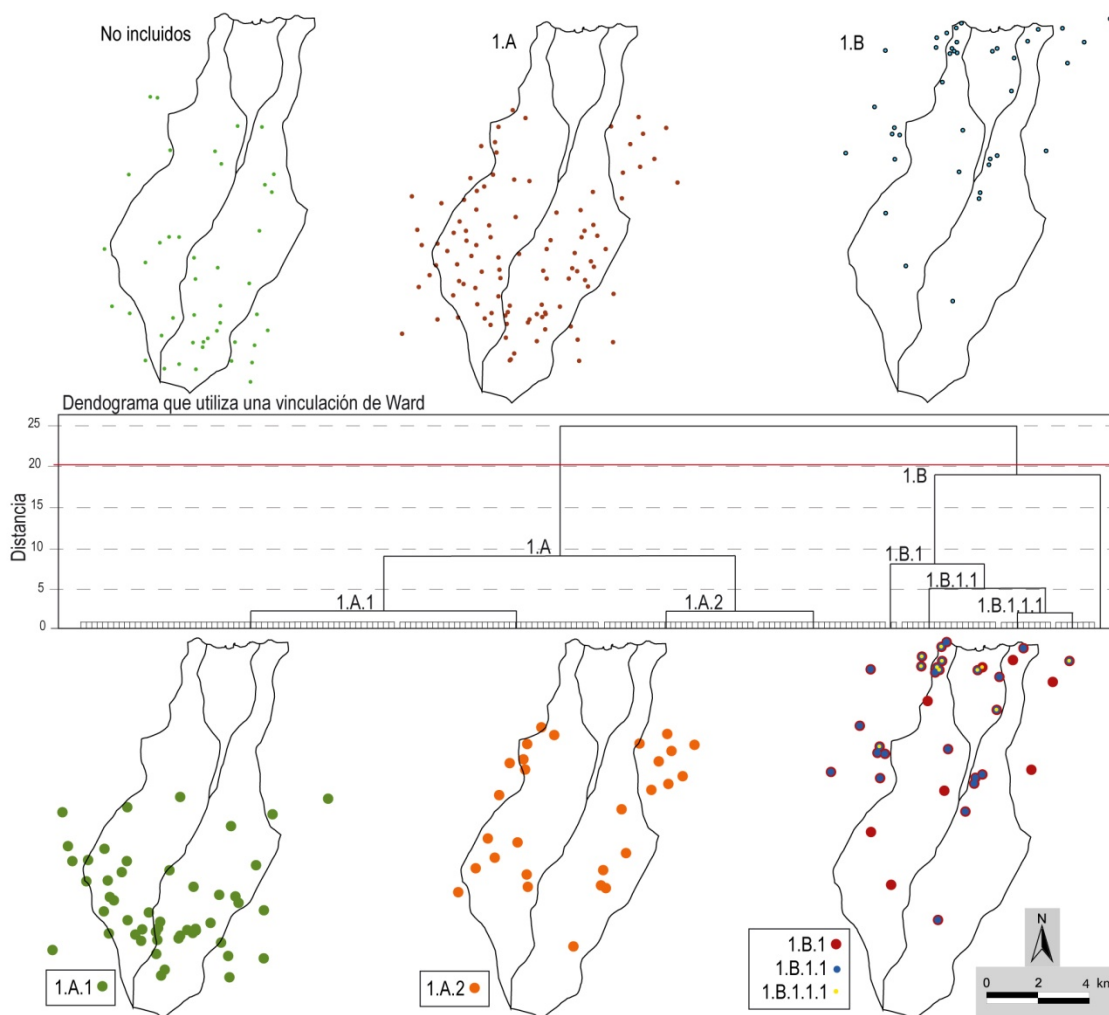


Figura 5.32. Dendrograma según el análisis Clúster jerárquico por el método de Ward, empleando como medida de distancia la euclídea. Situación de los grupos resultantes del análisis considerando las variables: pH lab, CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ),  $\text{SiO}_2$  (mg/L), Ca (meq/L), Mg (meq/L), Na (meq/L),  $\text{HCO}_3$  (meq/L),  $\text{SO}_4$  (meq/L), Cl (meq/L), y  $\text{NO}_3$  (meq/L).

La tabla 5.13 recoge los valores de la mediana y desviación estándar de los parámetros analizados, clasificados según el análisis clúster descrito en la figura 5.32:

- El grupo 1.A engloba dos grupos independientes y con la misma distancia de asociación, el 1.A.1 y 1.A.2 (Fig. 5.32). El primero de ellos está formado por 49 puntos de agua situados en la zona alta; se caracteriza por una baja CE (valor medio 291  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y valor medio del pH=8. El grupo 1.A.2 está compuesto de 28 puntos de agua, situados en la zona media, formado por aguas más agresivas, con pH medio de 6,8, CE media de 822  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un aumento considerable de Ca,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{HCO}_3$ .
- El grupo 1.B se subdivide en tres grupos con diferente distancia de asociación y relacionados en cascada, el 1.B.1, 1.B.1.1 y 1.B.1.1.1

(Fig. 5.32). Los grupos 1.B.1 y 1.B.1.1 se sitúan en la zona baja y media y el grupo 1.B.1.1.1 en la zona baja; están representados por 34, 26 y 11 puntos de muestreo respectivamente. Las variaciones que se observan en los tres grupos son un aumento de pH, Mg, Na, SO<sub>4</sub>, Cl y NO<sub>3</sub> y una disminución del Ca, SiO<sub>2</sub> y HCO<sub>3</sub> según aumenta la conductividad eléctrica. En el grupo 1.B.1.1.1 el aumento de Na, Cl y NO<sub>3</sub> es más notable.

El grupo 1.A incluye dos aguas diferentes, una situada en la zona alta y relacionada con el agua de recarga y otra más evolucionada e influenciada por aportes de CO<sub>2</sub>, que le confiere agresividad. El grupo 1.B está compuesto por un agua más evolucionada cuya conductividad eléctrica va aumentando con su proximidad a la costa y con influencia marina y antropogénica.

Tabla 5.13. Mediana y desviación estándar de los grupos formados en el dendograma de la figura 5.32.

Grupo	1.A	1.A.1	1.A.2	1.B	1.B.1	1.B.1.1	1.B.1.1.1
n	103	49	28	39	34	26	11
pH lab	7,8 ± 0,8	8,0 ± 0,5	6,8 ± 0,8	7,4 ± 0,8	7,3 ± 0,7	7,4 ± 3,1	7,6 ± 0,4
CE (μS/cm)	476±273	291±56	822±141	2400±5433	2030±1891	2181±1369	2650±469
SiO <sub>2</sub> (mg/L)	70,0±41,1	60,3±14,9	78,8±25,1	71,7±28,3	73,0±25,0	70,3±26,4	53,0±18,2
Ca (meq/L)	1,7 ± 3,5	0,7 ± 2,5	3,3 ± 4,0	4,8 ± 2,0	4,4 ± 2,2	4,0 ± 1,8	3,5 ± 1,3
Mg (meq/L)	1,5 ± 3,2	0,7 ± 2,6	3,4 ± 4,1	6,9 ± 2,9	6,9 ± 3,4	7,4 ± 3,4	8,8 ± 3,3
Na (meq/L)	1,7 ± 3,5	1,2 ± 4,2	3,0 ± 3,7	14,7 ± 6,1	11,9 ± 5,9	13,2 ± 6,0	18,7 ± 7,1
K (meq/L)	0,2 ± 0,4	0,2 ± 0,5	0,3 ± 0,4	0,5 ± 0,2	0,5 ± 0,3	0,5 ± 0,2	0,7 ± 0,3
HCO <sub>3</sub> (meq/L)	3,5 ± 7,3	1,9 ± 6,7	8,3 ± 10,1	11,0 ± 4,6	11,3 ± 5,6	10,5 ± 4,8	8,5 ± 3,2
SO <sub>4</sub> (meq/L)	0,2 ± 0,4	0,1 ± 0,5	0,4 ± 0,5	3,1 ± 1,3	2,2 ± 1,1	2,5 ± 1,1	7,1 ± 2,7
Cl (meq/L)	0,8 ± 1,7	0,6 ± 2,1	1,3 ± 1,5	7,2 ± 3,0	6,7 ± 3,3	7,1 ± 3,3	14,6 ± 5,5
NO <sub>3</sub> (meq/L)	0,2 ± 0,3	0,2 ± 0,6	0,1 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,9 ± 0,3

## **Análisis clúster 2**

Se ha realizado otro análisis clúster sin tener en cuenta la conductividad eléctrica para eliminar la fuerte influencia que ejerce este parámetro sobre el resto en la clasificación resultante del análisis. Para formar los grupos iniciales se ha tenido en cuenta la sílice y pH y se han seguido formando los grupos a partir de esta primera división.

La figura 5.33 muestra el dendograma obtenido del análisis cluster realizado con las siguientes 9 variables: pH lab, SiO<sub>2</sub> (mg/L), Ca (meq/L), Mg (meq/L), Na (meq/L), HCO<sub>3</sub> (meq/L), SO<sub>4</sub> (meq/L), Cl (meq/L), y NO<sub>3</sub> (meq/L) de los 186 puntos de agua analizados. Se observan dos grandes grupos (2.A y 2.B) que

están formados por 91 y 82 puntos de agua respectivamente; los restantes 13 puntos no quedan incluidos en ningún grupo a la distancia elegida y marcada por la línea roja de la figura 5.33.

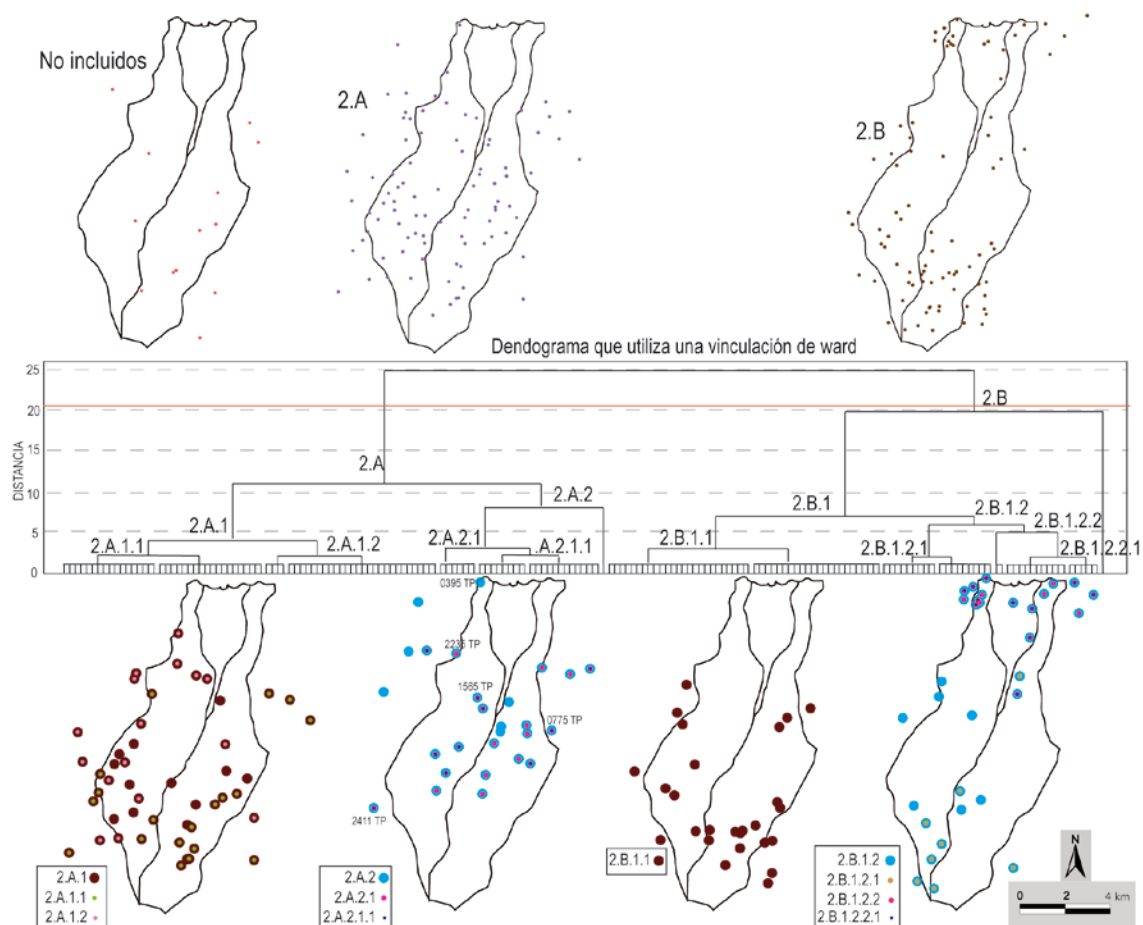


Figura 5.33. Dendrograma según el análisis Clúster jerárquico por el método de Ward, empleando como medida de distancia la euclídea. Situación de los grupos resultantes del análisis considerando las variables: pH, SiO<sub>2</sub> (mg/L), Ca (meq/L), Mg (meq/L), Na (meq/L), HCO<sub>3</sub> (meq/L), SO<sub>4</sub> (meq/L), Cl (meq/L), y NO<sub>3</sub> (meq/L).

El grupo 2.A se encuentra distribuido por toda la zona de estudio excepto la zona baja y se caracteriza por tener mayor contenido en SiO<sub>2</sub>, Ca, Mg y HCO<sub>3</sub> que el grupo 2.B, que se sitúa en la zona alta y baja, siendo muy disperso o ausente en la zona media (Tabla 5.14).

La tabla 5.14 presenta los valores de la mediana y desviación estándar de estos dos grupos constituidos en el análisis clúster. Se observa que:

- El grupo 2.A está formado por dos grupos independientes y con diferente distancia de asociación, el 2.A.1 (n=48) y 2.A.2 (n=29,) que a su vez están formados por dos grupos cada uno. Es de destacar el grupo 2.A.2, que se encuentra situado principalmente en la zona media de estudio; presenta valores medios de pH menores (6,9) y mayor contenido en sílice (103,1 mg/L), bicarbonatos (8,5 meq/L),



calcio (3,2 meq/L) y magnesio (3,8 meq/L) que el grupo 2.A.1 situado en la zona alta de estudio y en una pequeña franja en la zona media-baja. Este grupo 2.A.1 tiene valores menores, con una mediana de pH de 7,7, sílice 72,4 mg/L; bicarbonatos, 3,8 meq/L; calcio, 1,7 meq/L y magnesio, 1,6 meq/L.

- El grupo 2.B está formado por el grupo 2.B.1 (n=79), que a su vez está formado por dos grupos independientes y con distinta distancia de asociación, el 2.B.1.1 (n=26), situado en la zona alta y media de estudio y 2.B.1.2 (n=32), situado en la zona alta y baja principalmente. Ambos tienen el mismo valor de la mediana de pH (7,9) pero se diferencian en que el grupo 2.B.1.1 presenta una mayor concentración de sílice y menor contenido en el resto de los iones analizados. Se observa también que el grupo 2.B.1.2 se divide a su vez en dos grupos con diferente distancia de asociación, el 2.B.1.2.1 (situado en la zona alta) y 2.B.1.2.2 (situado en la zona baja), siendo ambos muy distintos en las medias de las concentraciones iónicas pero quizás asociados por la similitud de la concentración de sílice y pH.

Tabla 5.14. Mediana y desviación estándar de los grupos formados en el dendograma de la figura 5.33.

Grupo	n	pH lab	SiO <sub>2</sub> (mg/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Na (meq/L)	K (meq/L)	HCO <sub>3</sub> (meq/L)	SO <sub>4</sub> (meq/L)	Cl (meq/L)	NO <sub>3</sub> (meq/L)
2.A	91	7,3±0,8	81,6±39,3	2,3±2,4	2,7 ± 2,9	2,1±3,2	0,3±0,2	6,1±6,3	0,3±1,3	0,9±2,2	0,2±0,3
2.A.1	48	7,7±0,7	72,4±5,5	1,7±2,3	1,6 ± 2,5	1,8±2,8	0,2±0,2	3,8±6,0	0,2±0,5	0,8±1,7	0,2±0,2
2.A.1.1	19	7,8±0,7	68,0±2,9	0,9±1,3	1,0 ± 1,5	1,8±1,7	0,3±0,2	2,5±3,6	0,1±0,4	0,7±0,6	0,2±0,1
2.A.1.2	16	7,4±0,8	79,8±3,4	1,9 ± 3,4	2,0 ± 3,7	1,8±2,9	0,2±0,2	4,2±8,2	0,3±0,4	1,0±2,6	0,2±0,2
2.A.2	29	6,9±0,7	103,1±59,8	3,2 ± 2,7	3,8 ± 3,1	3,2±4,0	0,3±0,3	8,5±6,9	0,5±2,2	1,3±3,2	0,1±0,4
2.A.2.1	21	6,7±0,8	103,1±15,6	2,5 ± 1,6	3,2 ± 1,8	3,0±1,2	0,3±0,2	8,4±3,9	0,5±0,3	1,0±0,9	0,1±0,1
2.A.2.1.1	11	6,9±0,7	101,2±6,1	2,5 ± 1,5	3,8 ± 2,2	3,0±1,1	0,3±0,2	8,5±3,6	0,3±0,2	1,0±0,6	0,1±0,1
2.B	82	7,9±0,6	47,9±15,7	0,8 ± 4,1	0,8±13,8	1,4±52,4	0,2±1,2	2,2±3,9	0,3±5,9	0,8±64,1	0,1±0,7
2.B.1	79	7,9±0,6	48,2±14,9	0,8 ± 3,4	0,8±6,1	1,4±10,9	0,2±0,3	2,1±3,5	0,2±2,9	0,8±15,4	0,1±0,6
2.B.1.1	26	7,9±0,5	55,5±6,6	0,9 ± 1,1	0,8±1,5	1,3±0,8	0,2±0,1	2,2±2,9	0,2±0,2	0,7±0,3	0,1±0,2
2.B.1.2	32	7,9±0,8	38,8±15,6	2,6 ± 1,6	3,7±1,8	12,8±1,2	0,4±0,2	7,0±3,9	2,6±0,3	6,6±0,9	0,2±0,1
2.B.1.2.1	8	8,0±0,6	33,8±13,7	0,6 ± 0,5	0,5±1,1	0,8±2,6	0,1±0,2	1,3±2,3	0,2±0,9	0,6±1,2	0,1±0,0
2.B.1.2.2	17	7,8±0,7	53,0±18,3	3,5 ± 5,9	6,8±10,6	20,4±13,3	0,5±0,4	8,5±1,9	7,1±2,6	14,0±27,3	1,2±0,9
2.B.1.2.2.1	11	7,8±0,6	52,0±14,1	3,3 ± 1,5	4,3±2,0	16,9±3,4	0,5±0,3	8,5±1,6	5,8±2,4	13,0±3,5	1,7±0,9

Destaca el grupo 2.A.2, en el que se incluye 29 captaciones con alto contenido en sílice y bajo pH, de las que 24 tienen gas (presencia de CO<sub>2</sub> endógeno) en sus aguas. Las cinco captaciones que no presentan gas son: 0775 TP, 2411 TP, 1565 TP, 2235 TP y 0395 TP (Fig. 5.33). La 1565 TP es una galería y el resto son pozos. El 2235 TP es un pozo con 130 m de profundidad y los que



presentan gas en la misma zona y en este grupo superan los 300 m de profundidad. El pozo 0775 TP tiene 170 m de profundidad y los del mismo grupo que se encuentran próximos superan los 200 m. El pozo 2411 TP es profundo (470m) pero se encuentra a mayor cota y el pozo 0395 TP se localiza en la costa.

### **Análisis clúster 3**

Por último se ha realizado un análisis clúster tomando como variables la cota de profundidad de la captación, pH lab, sílice (mg/L), bicarbonatos (meq/L) y las relaciones iónicas  $r(\text{Mg}+\text{Ca})/r(\text{Na}+\text{K})$ ,  $r\text{Na}/r\text{K}$ ,  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ ,  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  y  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ . En este caso también se crean dos grupos, el 3.A y 3.B formados por 63 y 76 puntos de agua respectivamente a la distancia señalada por la línea roja del dendograma de la figura 5.34, quedando 47 casos fuera de dicha distancia.

En este análisis los grupos se han formado en función de la cota de profundidad. El grupo 3.A se divide en dos grupos en cascada con diferente distancia de asociación, el 3.A.1 y 3.A.1.1 que se sitúan en la zona alta de estudio y el 3.B que integra dos grupos con la misma distancia de asociación, el 3.B.1 y el 3.B.2, situados en la zona media baja (Fig. 5.34).

La tabla 5.15 muestra la mediana y desviación estándar de los grupos formados en el análisis cluster del dendograma de la figura 5.34. Se observa que el grupo 3.A presenta una mediana de pH más alta, valores iguales en la relación  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ , y en el resto de relaciones iónicas,  $r(\text{Mg}+\text{Ca})/r(\text{Na}+\text{K})$ ,  $r\text{Na}/r\text{K}$ ,  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ ,  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  las medianas son menores que en el grupo 3.B. La constancia de la relación  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$  señala un mismo origen del agua donde no existe aporte significativo de aguas excedentes de riego.

*Tabla 5.15. Mediana y desviación estándar de los grupos formados en el dendograma de la figura 5.34.*

Grupo	n	cota captación	pHl	SiO <sub>2</sub> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> (me/L)	$r(\text{Mg}+\text{Ca})/r(\text{Na}+\text{K})$	$r\text{Na}/r\text{K}$	$r\text{Mg}/r\text{Ca}$	$r\text{Na}/r\text{Cl}$	$r\text{SO}_4/r\text{Cl}$
3.A	63	826±167	7,9±0,6	57,2±16,3	1,7±2,5	1,2±0,8	7,4±4,1	0,9±0,3	1,7±2,4	0,3±0,4
3.A.1	36	902±140	7,9±0,6	57,7±19,5	1,6±1,5	1,2±0,7	7,5±2,8	0,8±0,3	1,6±1,3	0,3±0,3
3.A.1.1	15	913±34	7,9±0,5	55,0±15,6	1,6±1,6	1,2±0,5	7,0±2,9	0,8±0,3	1,9±1,4	0,3±0,3
3.B	76	312±176	7,3±0,9	79,5±30,5	8,0±6,4	1,6±1,3	13,2±21,7	1,4±2,7	2,0±1,4	0,3±0,3
3.B.1	23	177±129	7,1±0,7	81,6±29,9	10,3±6,9	1,2±1,0	17,4±18,5	1,5±0,9	1,8±1,5	0,3±0,3
3.B.2	32	440±80	7,8±1,0	76,6±32,1	6,0±3,9	2,3±1,2	11,2±8,9	1, ±0,7	1,9±1,3	0,3±0,2

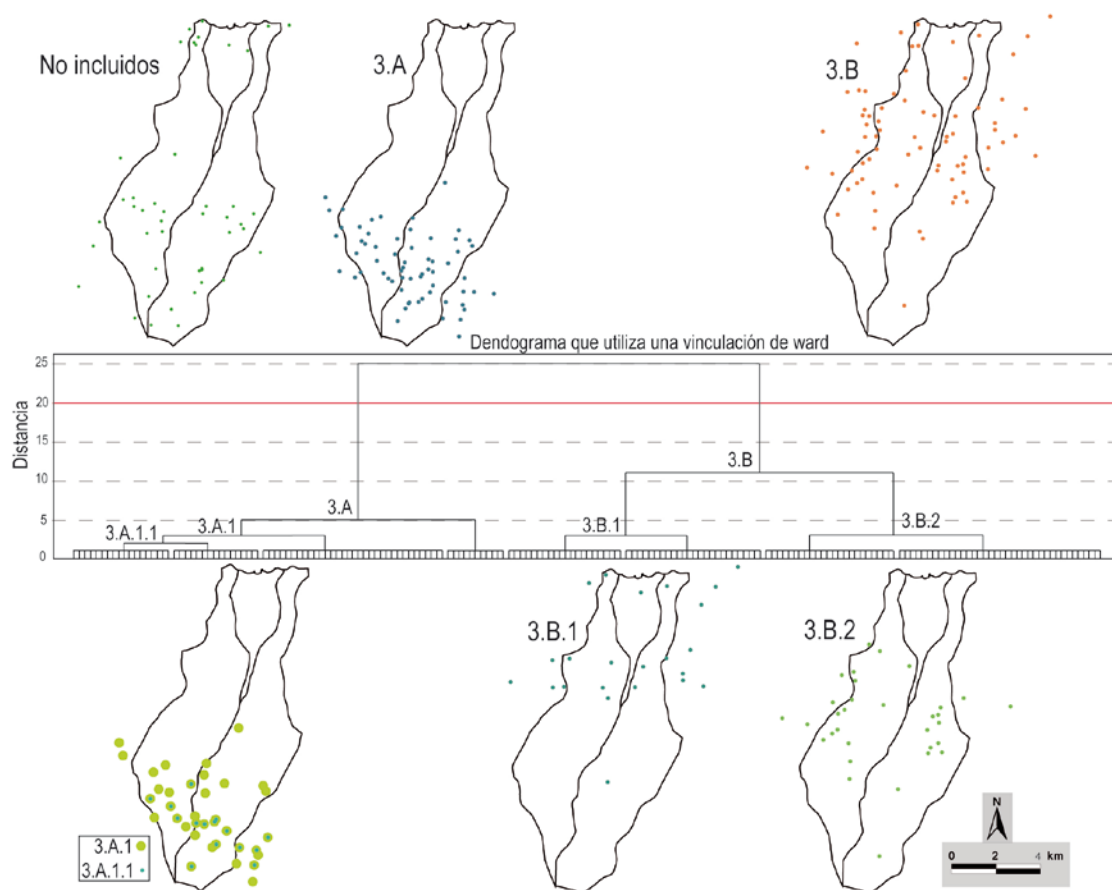


Figura 5.34. Dendrograma según el análisis Clúster jerárquico por el método de Ward, empleando como medida de distancia la euclídea. Situación de los grupos resultantes del análisis considerando las variables: pH lab, sílice (mg/L), bicarbonatos (meq/L) y las relaciones iónicas  $r(\text{Mg}+\text{Ca})/r(\text{Na}+\text{K})$ ,  $r\text{Na}/r\text{K}$ ,  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ ,  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  y  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ .

## 5.5 Isótopos Ambientales

### 5.5.1 Isótopos estables de oxígeno e hidrógeno: $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^2\text{H}$

El estudio de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de las aguas naturales aportan información que complementa a la obtenida en el estudio físico-químico. Es necesaria para poder caracterizar a los acuíferos (Custodio et al., 1987; Scholl et al., 1996; Federico et al., 2002; D'Alessandro et al., 2004; Hildenbrand et al., 2005; Paternoster et al., 2008; Marrero, 2010).

Los contenidos isotópicos se establecen como una desviación isotópica de la abundancia relativa del agua a estudiar respecto al patrón estándar, que en el caso del  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  es el SMOW, Standard Mean Ocean Water:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰} - \text{SMOW}) = \left[ \frac{O_{\text{muestra}} - O_{\text{SMOW}}}{O_{\text{SMOW}}} \right] \cdot 1000$$

$$\delta^2\text{H}(\text{‰} - \text{SMOW}) = \left[ \frac{D_{\text{muestra}} - D_{\text{SMOW}}}{D_{\text{SMOW}}} \right] \cdot 1000$$

Los procesos que llevan al fraccionamiento isotópico natural del hidrógeno y del oxígeno del agua de lluvia se producen fundamentalmente en los procesos de evaporación y condensación, aunque también influyen, pero en menor intensidad, otros fenómenos, como la difusión térmica, transformaciones biológicas, etc. En el contenido en  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$  influyen por tanto: distancia al mar, temperatura, altitud de recarga e intercambio isotópico durante la precipitación (Custodio y Llamas, 1983)

### 5.5.1.1 Isótopos estables de oxígeno e hidrógeno en el agua de lluvia del área de estudio: $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^2\text{H}$

En la zona de estudio se dispone de datos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de 99 muestras de agua de lluvia acumulada mensual de las cinco estaciones pluviométricas situadas en el área de estudio (Anexo A.5.3. Datos isotópicos) (Fig. 5.2), a partir de las que se ha establecido la Recta Meteórica Local.

#### Exceso de deuterio ( $d$ )

Si se considera que la evaporación y condensación del agua en la naturaleza tiene lugar en equilibrio isotópico, la relación entre  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  se determina a partir de los fraccionamientos isotópicos de equilibrio. Craig (1961) y Dansgaard (1964) encontraron una relación entre  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de la precipitación para diferentes partes del mundo de  $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$ , conocida como LAMM (Línea de Agua Meteórica Mundial).

La relación general de LAM (Línea de Agua Meteórica) es  $\delta^2\text{H} = s \cdot \delta^{18}\text{O} + d$ , donde la pendiente  $s=8$  representa el cociente entre los fraccionamientos isotópicos en el equilibrio del hidrógeno y oxígeno para los procesos de lluvia de condensación y  $d$ , conocida como exceso de deuterio, es el corte con el eje de  $\delta^2\text{H}$ , que a nivel mundial toma el valor de  $10\text{‰}$ . Sin embargo, el exceso de deuterio varía localmente ya que depende de las condiciones de humedad y temperatura de la región de evaporación (Mook, 2002) y es característico del lugar de formación (Custodio, 2012) según los siguientes valores:

- $d \rightarrow 0\text{‰}$ , en ambientes tropicales cálidos donde se produce una rápida evaporación seguida de fuertes lluvias
- $d = 10\text{‰}$ , en el océano cuando la humedad del aire es superior al 80%
- $d > 10\text{‰}$ , en ambientes marinos de ambiente seco, llegando a alcanzar el  $22\text{‰}$  en el este del mar Mediterráneo

En Canarias las precipitaciones no evaporadas presentan valores de exceso de deuterio entre el  $13\text{‰}$  y el  $22\text{‰}$ , con una media de  $16\text{‰}$  (Custodio y Naranjo, 2013).

En la figura 5.35 se representa un gráfico  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  de todas las muestras por estación pluviométrica, tres LAM de pendiente 8 en las que varía  $d$  ( $d=10\text{‰}$ ;  $d=15\text{‰}$  y  $d=20\text{‰}$ ).

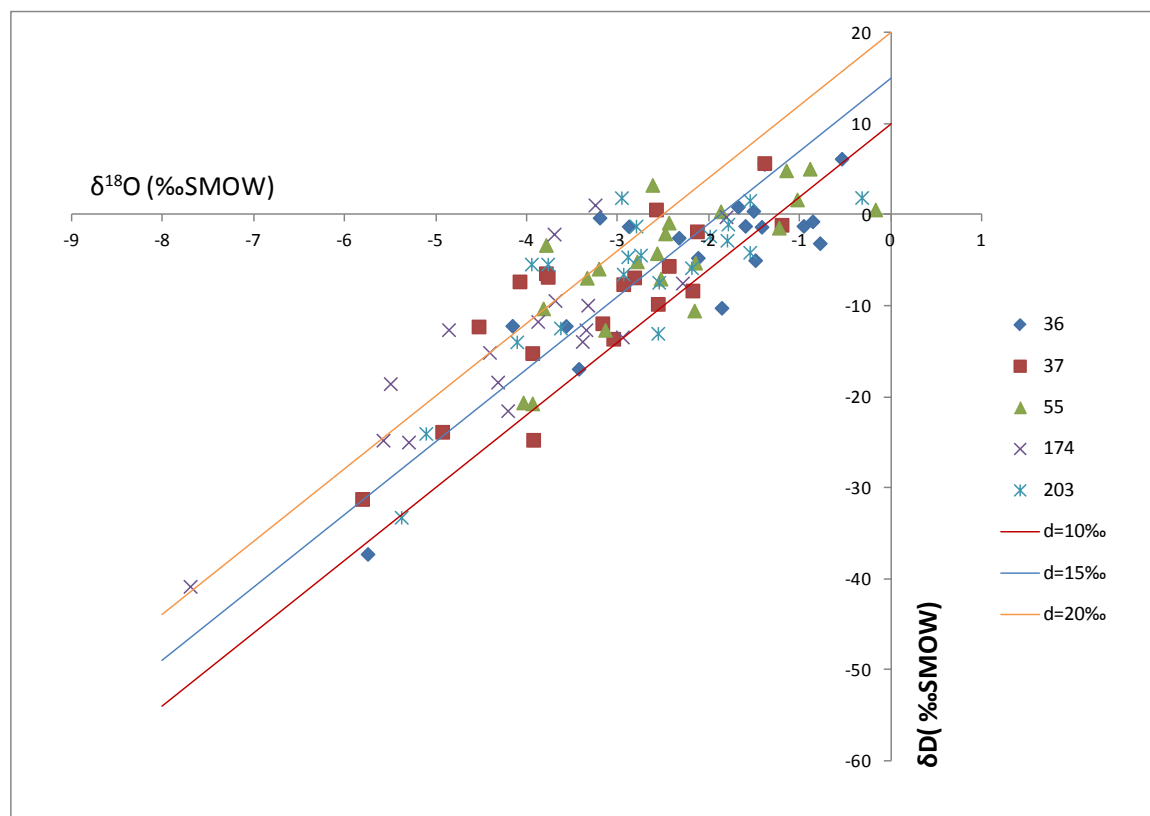


Figura 5.35. Representación gráfica de la relación isotópica de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  (‰ SMOW) en el agua de lluvia de las cinco estaciones situadas en el área de estudio y de diferentes LAM con pendiente 8 y  $d=10$ ,  $d=15$  y  $d=20$ .

En la gráfica de la figura 5.35 se observa como la mayor parte del agua de lluvia presenta un exceso de deuterio superior a 10‰ e incluso muchas de ellas superan el 20‰, obteniéndose un valor promedio de  $d=15,3\text{‰}$ . Existen algunas muestras con un  $d < 10\text{‰}$ , lo que indica la posibilidad de haberse producido procesos de evaporación. Dentro de los colectores de lluvias (muestreadores) las muestras estaban protegidas con una capa gruesa de parafina líquida por lo que la evaporación podría haberse producido durante la caída en lluvias pequeñas en ambientes secos, debido a la diferencia de composición isotópica entre las gotas de lluvia y la humedad ambiental, en las que el déficit de humedad atmosférica se compensa con la evaporación de las gotas de lluvia. Al ser un proceso no equilibrado, este no tiene lugar a lo largo de la LAM sino formando una línea de evaporación con pendiente menor a 8 (Veeger, 1991). Este proceso de evaporación se ha observado ya en Gran Canaria (Gasparini et al., 1990) y en otras islas del Archipiélago Canario como en La Palma (Veeger, 1991), Fuerteventura (Herrera, 2001) y Tenerife (Marrero, 2010). Este proceso suele estar relacionado con el efecto cantidad de lluvia, ya que en lluvias de

poca intensidad el gradiente existente con la humedad ambiente es capaz de producir evaporación significativa (Custodio y Llamas, 1976, 1983).

Para minimizar los efectos causados por la intensidad de lluvia y posibles evaporaciones, se ha calculado el promedio ponderado en función de la pluviometría acumulada durante todo el periodo de muestreo de la composición isotópica del agua de lluvia en cada estación pluviométrica (Yurtsever y Gat, 1981), según:

$$\delta H_p = \frac{\sum^n i [P_i \cdot \delta_i]}{\sum^n i [P_i]}$$

donde  $\delta H_p$  es la media ponderada,  $P_i$  la precipitación en el periodo de muestreo y  $\delta_i$  es desviación isotópica ( $\delta^2H$  o  $\delta^{18}O$ ) de la muestra de agua acumulada de precipitación en los periodos de muestreo.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.16.

Tabla 5.16. Datos de promedio ponderado de  $\delta^2H$  y  $\delta^{18}O$  (‰ SMOW) de agua de lluvia acumulada para los periodos de muestreo en la zona de estudio.

Estación	$\delta^{18}O$	$\delta^2H$	Exceso deuterio (d)
036	-2,9	-8,2	15,5
037	-3,6	-12,7	16,2
055	-3,0	-7,6	16,4
174	-4,6	-18,5	18,1
203	-3,3	-9,1	17,4
Promedio			16,7

También se ha deducido la línea de agua meteórica local con el promedio calculado del exceso de deuterio de la ponderación de las muestras (16,7‰) y con pendiente 8 (Fig. 5.36).

### Gradiente altitudinal

La composición isotópica del agua de lluvia cambia con la altitud a la que se produce la recarga, de forma que ésta se va empobreciendo en  $^{18}O$  y  $^2H$  con la altura. Esta relación es utilizada en hidrología para identificar la cota de recarga y las posibles líneas de flujo del agua subterránea (Gofiantini, 1973; Veeger, 1991; Herrera, 2001; Marrero, 2010).

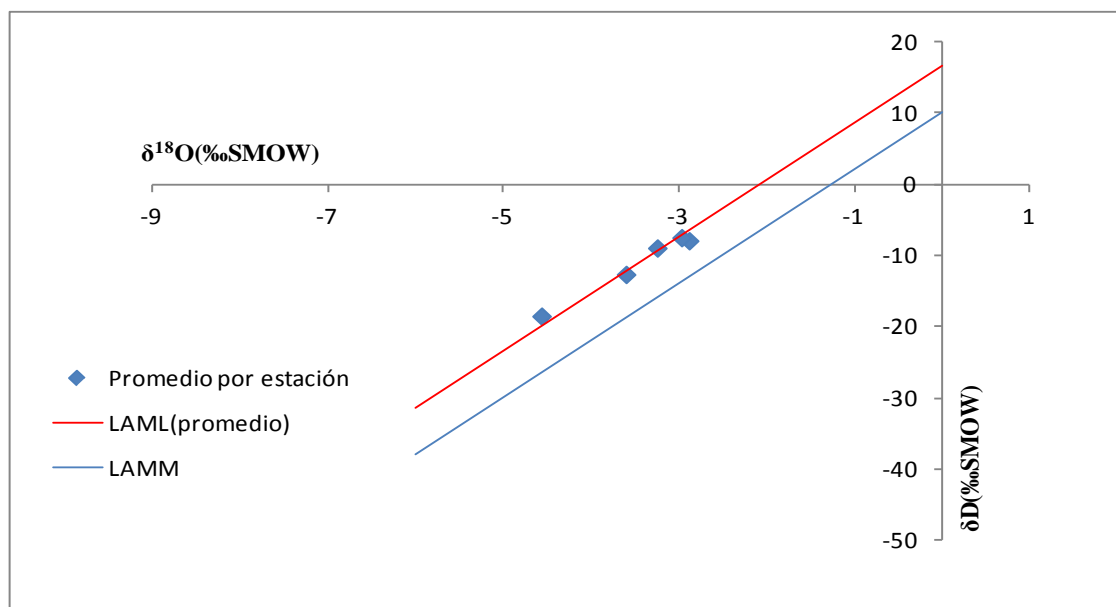


Figura 5.36. Relación de la composición isotópica promedio ponderada de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  (‰ SMOW) del agua de lluvia por estación pluviométrica. La línea azul es la línea de agua meteórica mundial (LAMM =  $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$ ) y la roja la línea de agua meteórica local (LAML(promedio)) =  $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 16,7\text{‰}$ .

En las figuras 5.37 y 5.38 se representa la cota a que está colocado cada punto de muestreo del agua de lluvia, frente a los datos ponderados de la composición isotópica del  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  del agua de lluvia por punto durante el periodo de observación. Se observa un gradiente altitudinal de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de  $-0,17\text{‰}$  y  $-1,2\text{‰}$  respectivamente para un incremento de 100 m de altitud. Gasparini (1989) obtuvo un gradiente altitudinal de  $\delta^{18}\text{O}$  de  $-0,18\text{‰}$  para la vertiente norte de la isla de Gran Canaria, similar al obtenido en el presente estudio.

#### 5.5.1.2 Isótopos estables de oxígeno e hidrógeno en el agua subterránea: $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^2\text{H}$

Los valores de las relaciones isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de la molécula de agua son utilizados como trazadores del origen de las aguas subterráneas ya que estas relaciones se mantienen constantes una vez que el agua ha entrado en el acuífero (Custodio, 1978, 1986). Son usadas para identificar el origen del agua de recarga, determinar la altitud de la zona de recarga y las mezclas de agua, así como deducir fenómenos de evaporación, etc.

Se dispone de 112 análisis isotópicos de 100 puntos de agua del área de estudio de diversa procedencia para realizar el estudio isotópico del  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  del agua subterránea (tabla 5.17) (Anexo A.5.3. Datos isotópicos).

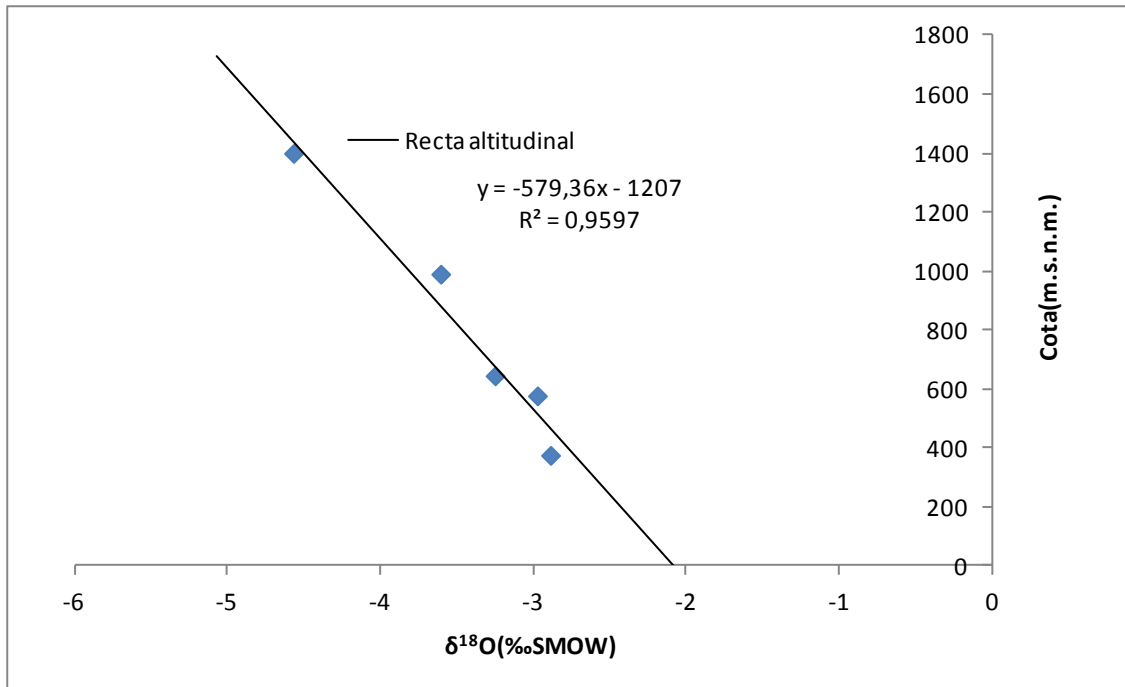


Figura 5.37. Gradiente altitudinal obtenido a partir de la composición isotópica promedio ponderada del  $\delta^{18}O$  del agua de lluvia muestreada ( $\delta^{18}O = -0,0017h - 2,08$ ; gradiente altitudinal:  $-0,17\text{‰}/100\text{m}$ ).

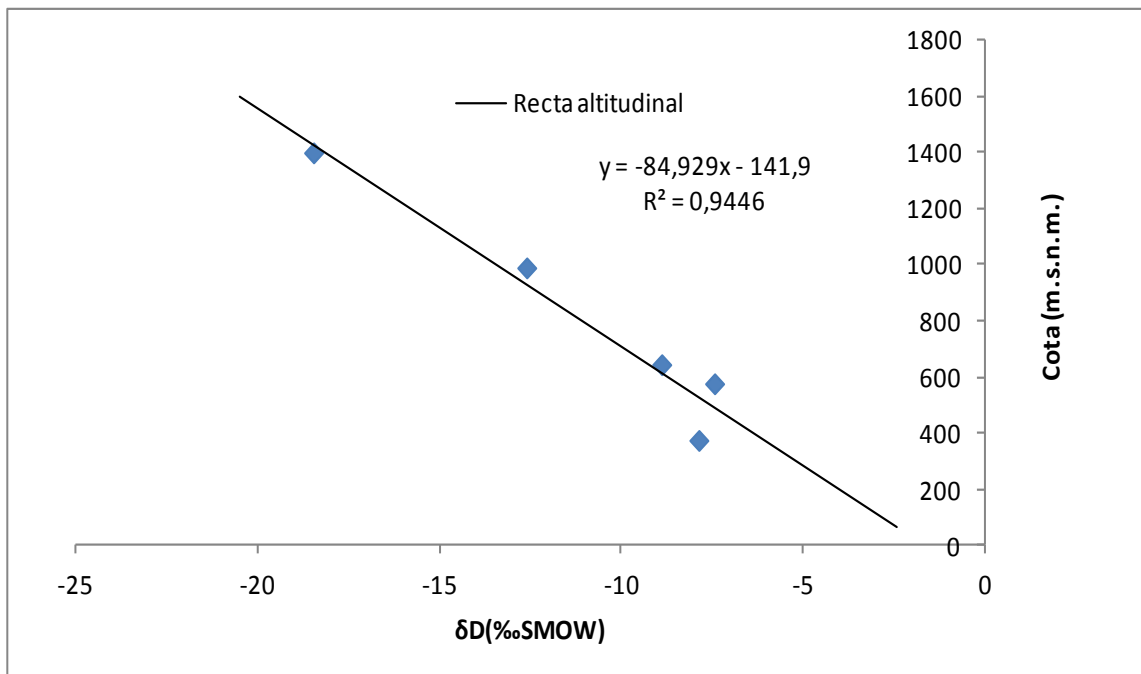


Figura 5.38. Gradiente altitudinal obtenido a partir de la composición isotópica promedio ponderada del  $\delta^2H$  del agua de lluvia muestreada ( $\delta^2H = -0,012h - 1,67$ ; gradiente altitudinal:  $-1,2\text{‰}/100\text{m}$ ).



Tabla 5.17. Resumen de cantidad, procedencia y años de los análisis isotópicos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de agua subterránea disponibles.

Nº de análisis	Años de análisis	Procedencia
4	1972-1973	SPA-15
27	1992	IGME
3	2006	CHIS
78	2008-2009	Campaña de campo

Las variaciones isotópicas obtenidas para el  $\delta^{18}\text{O}$  oscilan entre  $-1,1\text{‰}$  y  $-5,7\text{‰}$  y para el  $\delta^2\text{H}$  entre  $-7,2\text{‰}$  y  $-23,2\text{‰}$ . En la figura 5.39 se representa un gráfico  $\delta^{18}\text{O}$ -  $\delta^2\text{H}$  de las muestras de agua subterránea así como la LAMM y LAML.

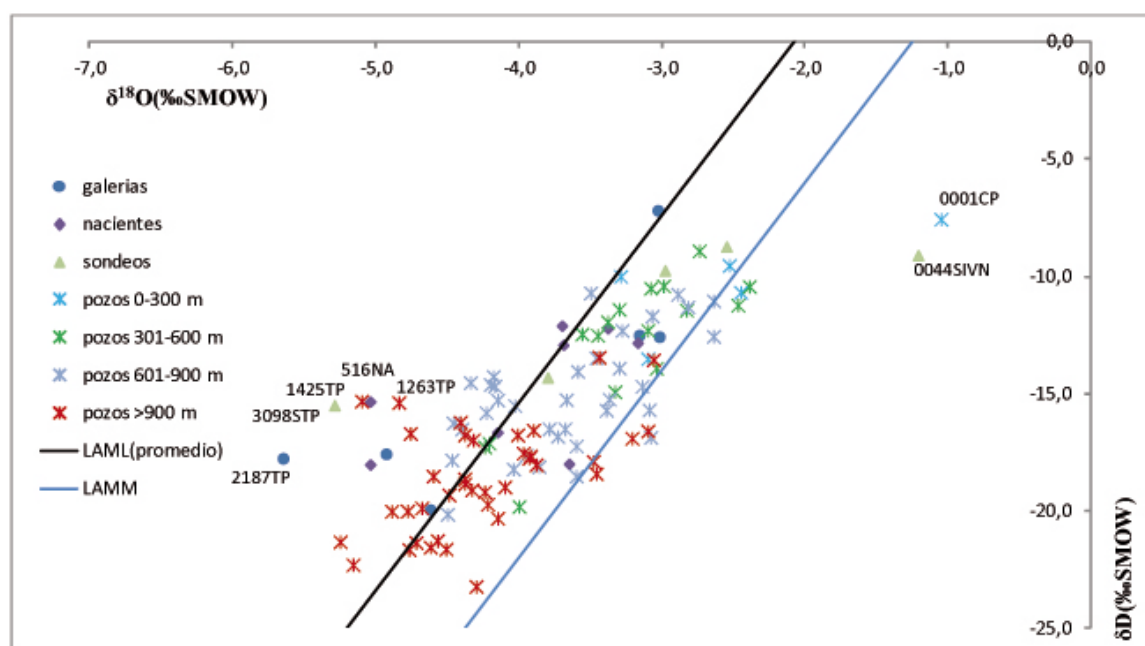


Figura 5.39. Representación gráfica de la relación isotópica de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  (‰SMOW) en el agua subterránea del área de estudio, de LAMM y LAML.

De la gráfica se desprende que la mayor parte de los puntos se encuentran entre la LAMM y la LAML. El pozo 0001 CP y el sondeo 0044SINV, situados cerca de la costa, presentan influencia clara de agua de mar y los que se alejan por la izquierda de la LAML podrían estar relacionados con la hidrólisis de silicatos o con aportes de  $\text{CO}_2$  endógeno.

### Altitud de la zona de recarga

Para estudiar la altitud de la zona de recarga se representan  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  frente a la altitud de los puntos de muestreo y las rectas altitudinales locales obtenida para el  $\delta^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  (Fig. 5.40 y Fig. 5.41).

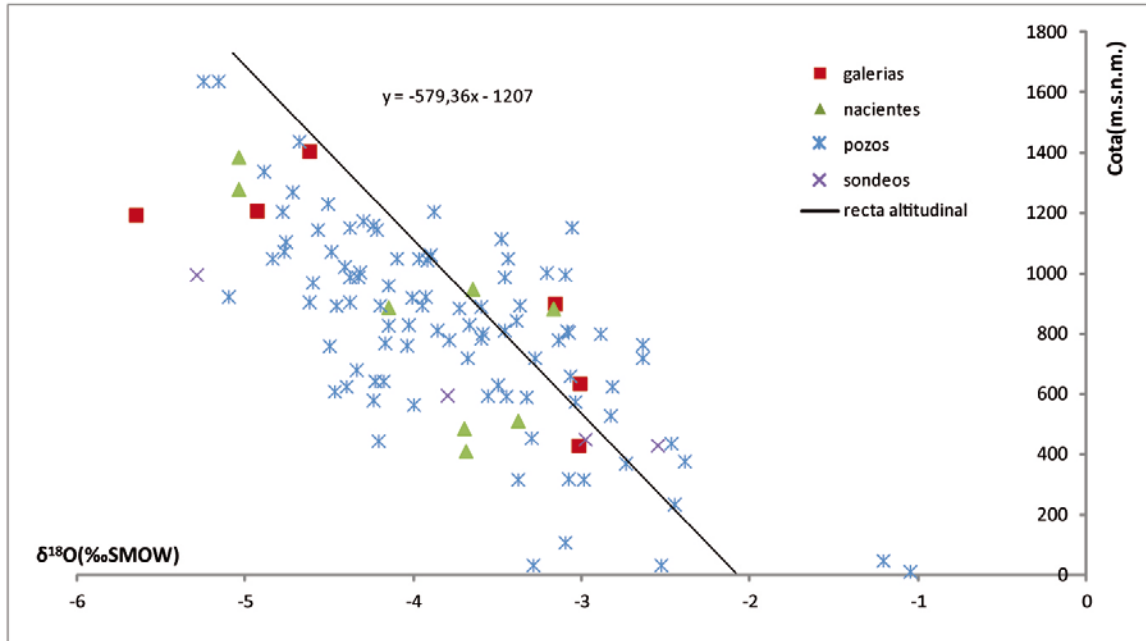


Figura 5.40. Relación para el  $\delta^{18}\text{O}$  (‰SMOW) entre las muestras de agua subterránea y la recta altitudinal local.

En la gráfica de la figura 5.40 se observa que generalmente la recarga se produce a cotas superiores entre 100 m y 600 m, pero también se distinguen varias aguas con cotas superiores a la cota de recarga, pudiéndose tratar de un efecto de evaporación. En la figura 5.41 se observa que casi siempre la recarga se produce a cotas próximas o superiores, comprendida entre 50m y 600 m. En esta ocasión son mucho menos los casos que se observa aguas con cota superior a la de recarga.

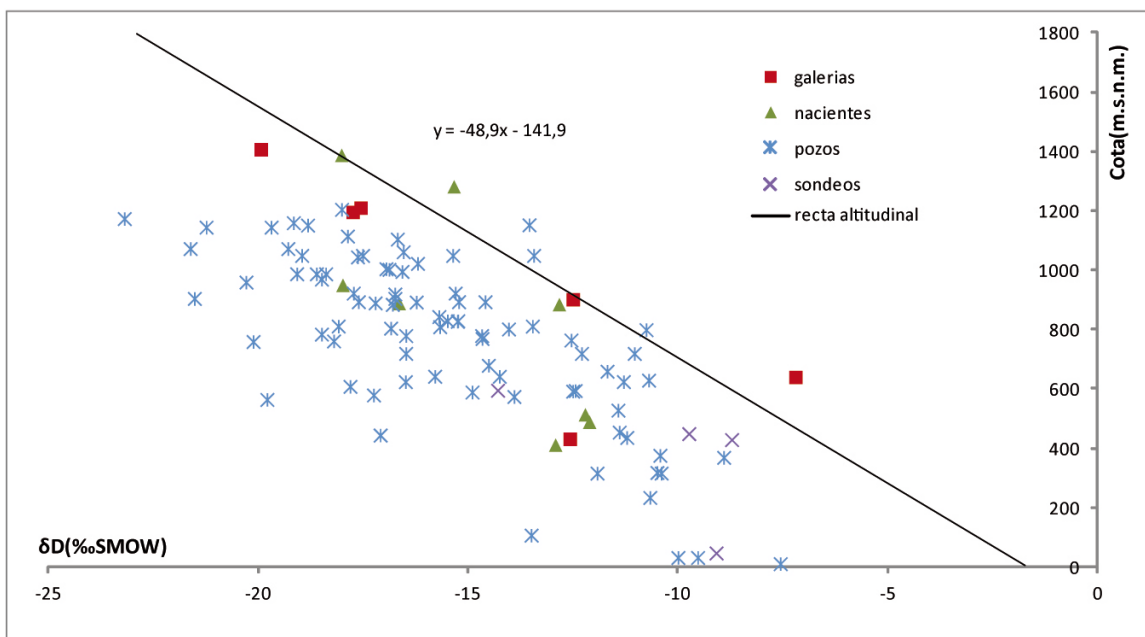


Figura 5.41. Relación para el  $\delta^2\text{H}$  (‰SMOW) entre las muestras de agua subterránea y la recta altitudinal local.

### Relación $\delta^{18}\text{O}$ – Cl en las aguas subterráneas y el agua de lluvia

En la figura 5.42 se representa la variación isotópica del  $\delta^{18}\text{O}$  frente a la concentración de cloruros de las aguas subterráneas, el promedio ponderado de  $\delta^{18}\text{O}$  frente a la mediana de la concentración de cloruros de las estaciones pluviométricas 174 y 036, con cotas 1400 m y 375 m respectivamente, y las líneas de mezcla teóricas entre la composición típica del agua de mar (Cl=536 meq/L y  $\delta^{18}\text{O}=0\text{‰}$ ) y el agua de las estaciones pluviométricas.

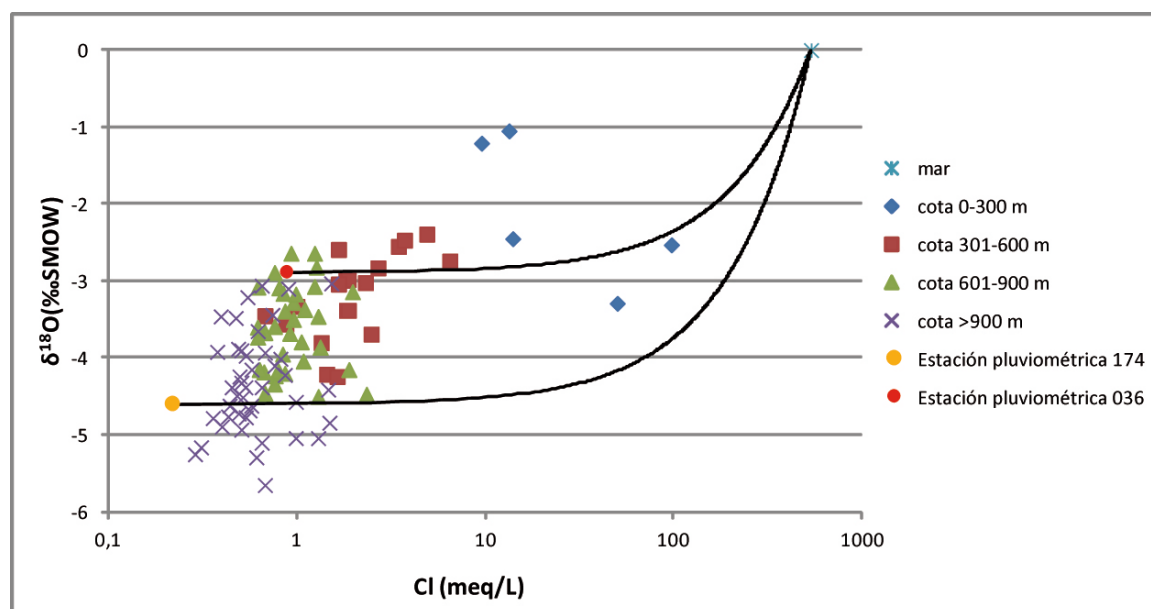


Figura 5.42. Representación gráfica de la concentración de cloruros del agua subterránea, agua de mar y medias de las estaciones pluviométricas 147 y 036, frente a la relación isotópica del  $\delta^{18}\text{O}$  (‰SMOW) respectiva.

De la gráfica se deduce que las aguas subterráneas más ligeras, situada en las zonas altas, son menos salinas y hay un aumento progresivo de la concentración de cloruros y enriquecimiento de  $\delta^{18}\text{O}$  con la disminución de la cota.

#### 5.5.2 Isótopos estables del carbono inorgánico disuelto total (TDIC) en el agua subterránea: $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$

El carbono tiene dos isótopos estables, el  $^{12}\text{C}$  y el  $^{13}\text{C}$ , con abundancia de 98,9% y 1,1% respectivamente (Nier, 1950). La relación  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  se expresa mediante los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) con respecto al estándar internacional PDB (Pee Dee Belemnite), que es el carbonato procedente de un belemnite marino que se encontró en la formación cretácica norteamericana Pee Dee.

$$\delta^{13}\text{C} = \left( \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{muestra}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{estándar}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{estándar}}} \right) \cdot 1000$$

siendo  $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{estándar}} = 1/90$  (Mook, 2002).

El carbono inorgánico disuelto total (TDIC) es la suma de diferentes especies carbonatadas ( $\text{TDIC} = m\text{H}_2\text{CO}_3 + m\text{HCO}_3 + m\text{CO}_3$ , siendo  $m = \text{moles/L}$ ) cuya distribución responden a las siguientes reacciones de equilibrio:

- (1)  $\text{CO}_{2g} \leftrightarrow \text{CO}_{2d} K_{\text{CO}_2} = P_{\text{CO}_{2g}}/a_{\text{CO}_{2d}}$
- (2)  $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^- K_e = a_{\text{OH}^-} \cdot a_{\text{H}^+}$
- (3)  $\text{CO}_{2d} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 K_0 = a_{\text{H}_2\text{CO}_3}/a_{\text{CO}_{2d}}$
- (4)  $\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ K_1 = a_{\text{HCO}_3^-} \cdot a_{\text{H}^+}/a_{\text{H}_2\text{CO}_3}$
- (5)  $\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ K_2 = a_{\text{CO}_3^{2-}} \cdot a_{\text{H}^+}/a_{\text{HCO}_3^-}$
- (6)  $\text{MeCO}_3 \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{Me}^{2+} K_3 = a_{\text{CO}_3^{2-}} \cdot a_{\text{Me}^{2+}}$

siendo  $g = \text{gas}$ ;  $d = \text{disuelto}$ ;  $a = \text{actividad}$

La distribución de las especies carbonatadas depende del sistema geoquímico respecto al reservorio de  $\text{CO}_2$  que existe. En un sistema cerrado, donde no se produce desgasificación, precipitación ni disolución, el TDIC permanece constante a cualquier pH ya que las reacciones de redistribución de las especies carbonatadas no afectan al  $\delta^{13}\text{C}$  de las aguas porque se conserva la masa de carbono. Si el sistema es abierto y el aporte de  $\text{CO}_2$  es ilimitado, el  $\delta^{13}\text{C}$  de las aguas subterráneas puede cambiar debido a que la masa de carbono no es constante (Veeger, 1991).

El valor del  $\delta^{13}\text{C}$  en el agua subterránea depende de los equilibrios definidos previamente y básicamente de la composición isotópica del  $\text{CO}_2$  de la fuente. En terrenos volcánicos las fuentes de  $\text{CO}_2$  que pueden interaccionar con las aguas subterráneas son:

- Atmósfera. El valor promedio mundial  $\delta^{13}\text{C}$  en la atmósfera en la actualidad es de aproximadamente  $-7\text{‰}$  (Mook, 2002), oscilando en las Islas Canarias entre  $-6,4\text{‰}$  y  $-8,0\text{‰}$  (Gasparini, 1989; Gasparini et al., 1990).
- $\text{CO}_2$  endógeno. El  $\delta^{13}\text{C}$  del  $\text{CO}_2$  volcánico que escapa a la atmósfera oscila entre  $-5\text{‰}$  y  $-8\text{‰}$ , aunque en ciertas determinaciones realizadas en galerías de Tenerife se puede alcanzar valores incluso entre  $-3\text{‰}$  y  $-4\text{‰}$  (Albert et al., 1990).
- $\text{CO}_2$  en equilibrio del suelo edáfico, que depende principalmente del tipo de cubierta vegetal. En Canarias en general el valor oscila entre  $-15\text{‰}$  y  $-25\text{‰}$  (Gasparini, 1989).
- $\text{CaCO}_3$  de relleno de poros, vacuolas y fisuras.

En las aguas subterráneas de terrenos volcánicos se estudia la relación isotópica  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$  para explicar procesos físico-químicos relacionados con fluidos ricos en  $\text{CO}_2$  y definir el origen de dicho gas (Custodio et al., 1987; Veeger, 1991; Cabrera, 1995; Caliro et al., 1997; Allard et al., 1997; Caliro et al., 2005; Inguaggiato et al., 2005; Grassa et al., 2006; Marrero, 2010).

### Características de las muestras

Se dispone de datos de  $\delta^{13}\text{C}$  de 4 muestras tomadas en julio de 2012 en cuatro pozos del área de estudio. Los puntos fueron elegidos en función de la concentración de bicarbonatos de análisis anteriores y la presencia de gas, tomando tres de ellos con alta concentración de bicarbonatos y con gas (2250 TP; 3179 TP; y 1918 TP) y uno con baja concentración de bicarbonatos y sin gas (3215 TP).

### Resultados

Los resultados obtenidos de los cuatro puntos muestreados se muestran en la tabla 5.18, que incluye datos de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ , bicarbonatos y pH.

Tabla 5.18. Datos de contenido de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ , concentración  $\text{HCO}_3$  (meq/L) y pH.

Expediente	Fecha	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}\text{‰}$	$\text{HCO}_3$ meq/L	pH
1918 TP	11/07/12	-2,98	9,1	6,3
2250 TP	11/07/12	-2,79	9,9	6,0
3179 TP	13/07/12	-1,97	9,8	6,2
3215 TP	13/07/12	-17,52	1,5	8,1

Los pozos 2250 TP; 3179 TP; y 1918 TP tienen pH entre 6,0 y 6,3, elevado contenido en bicarbonatos y valores de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$  entre -1,97 ‰ y -2,98 ‰ de acuerdo con el aporte de  $\text{CO}_2$  endógeno. El pozo 3215 TP con pH 8,1, tiene bajo contenido de bicarbonatos y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$  de -17,52 ‰, que apunta a equilibrio con el  $\text{CO}_2$  del suelo a pH no ácido.

## 5.6 Interacción agua-roca-gas

La composición físico-química resultante de las aguas subterráneas está íntimamente ligada a su interacción con las rocas por las que circula. Es el resultado de numerosas reacciones físicas y químicas controladas cinética o termodinámicamente.

En este apartado se analiza la presión de  $\text{CO}_2$  parámetro que afecta a las reacciones que ocurren en la interacción agua-roca y la relación isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  del agua subterránea y de las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio.

### 5.6.1 Presión parcial de CO<sub>2</sub>

La presión parcial de CO<sub>2</sub> en el agua subterránea ha sido calculada con la ecuación de Henderson-Hasselbalch a partir de los análisis de aguas subterráneas considerados. Esta ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Log}p\text{CO}_2 = 3 - \text{pH} + \text{LogHCO}_3^-$$

En la figura 5.43 se representan los valores obtenidos.

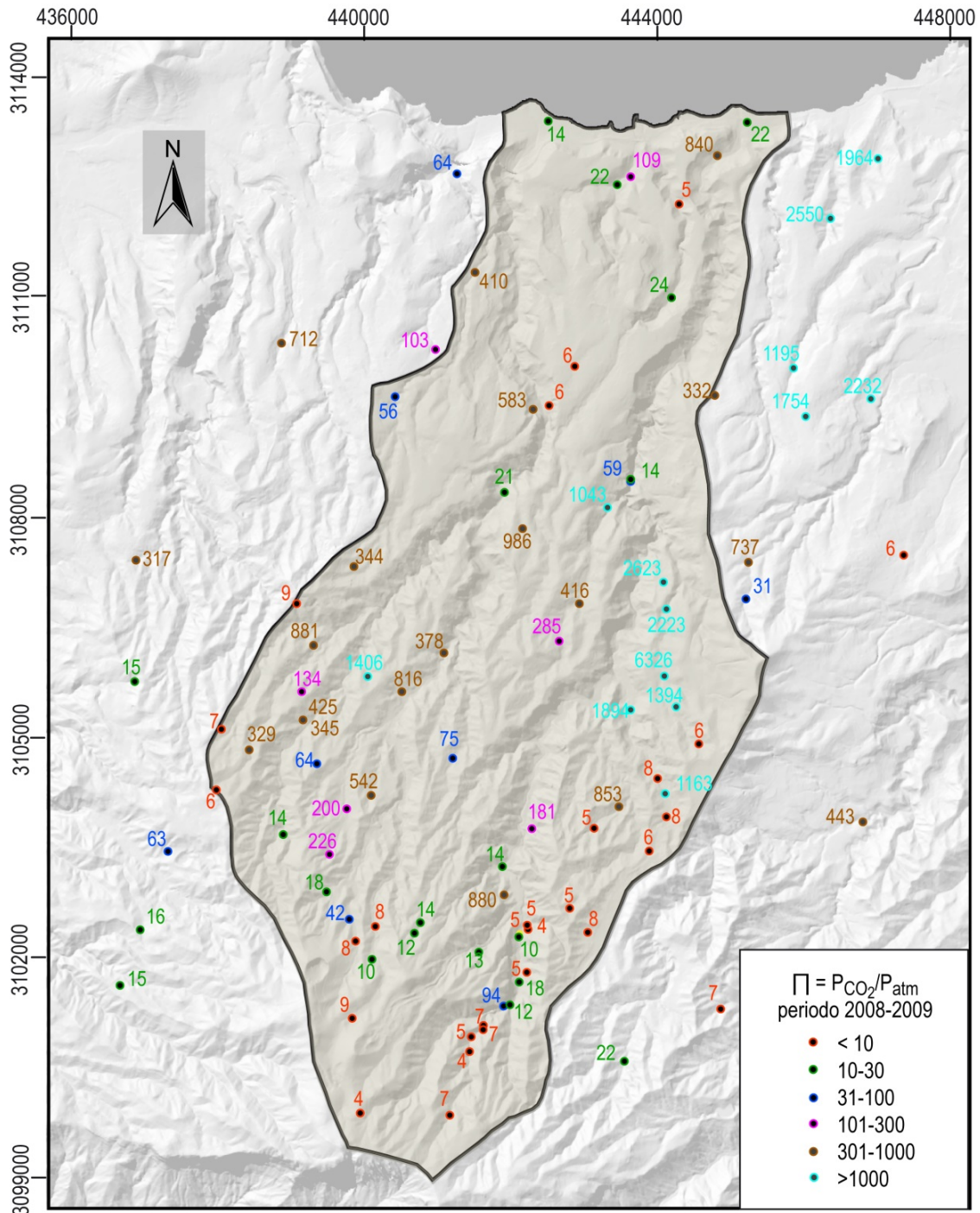


Figura 5.43. Presión parcial de CO<sub>2</sub> calculada para los análisis de agua subterránea considerados, normalizada con la presión atmosférica.

La presencia de del CO<sub>2</sub> en está relacionado con la actividad volcánica reciente, con gas atrapado en las formaciones geológicas o en otros casos aportaciones de CO<sub>2</sub> profundo que escapa a través de zonas de fracturas, caso más probable ya que en la mayoría de los casos no se observan anomalías térmicas. Por ello, se considera que los altos valores que se observan en la zona media y baja están relacionados con aportes de CO<sub>2</sub> endógeno.

### 5.6.2 Isótopos de estroncio (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)

El estroncio es un componente minoritario del agua subterránea que sustituye a los iones de calcio en los minerales que lo contienen (Mook, 2002). La relación isotópica (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr) es específica de cada unidad estratigráfica particular por lo que es utilizado como un trazador de agua subterránea, ya que no sufre fraccionamiento práctico en los diferentes procesos naturales. La relación roca-agua se puede deducir al comparar los valores de la relación entre los minerales principales de la roca huésped con los constituyentes disueltos en el agua subterránea (Mook, 2002).

Para determinar el rango de valores de la relación isotópica <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr en las distintas formaciones geológicas de la isla de Gran Canaria se han recopilado datos de muestras de rocas de distintas formaciones geológicas de la isla contenidos en diferentes proyectos (Tabla 5.19).

Tabla 5.19. Resumen del origen y cantidad de datos disponibles de la relación isotópica <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr en las rocas de Gran Canaria presentes en la zona de estudio.

Formación geológica	Nº de muestras	Autor
Post-Roque Nublo	14	Hoernle, K. et al., (1991)
	36	Aulinas Juncà, M. (2008)
Roque Nublo	29	Hoernle, K. et al., (1991)
	6	Pérez-Torrado, F.J. (1992)
	8	Aulinas Juncà, M. (2008)
Mioceno	3	Cousens, B.L. et al., (1989)
	3	Hoernle, K. et al., (1991)

Se han tomado las medianas correspondientes para cada formación como valor representativo de la relación isotópica <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio (Fig. 5.44).

Se ha analizado la relación isotópica <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr del agua subterránea de 10 captaciones distribuidas en el área de estudio. La situación de las captaciones y los resultados obtenidos de la relación isotópica <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr en el agua subterránea se muestran en la figura 5.44.



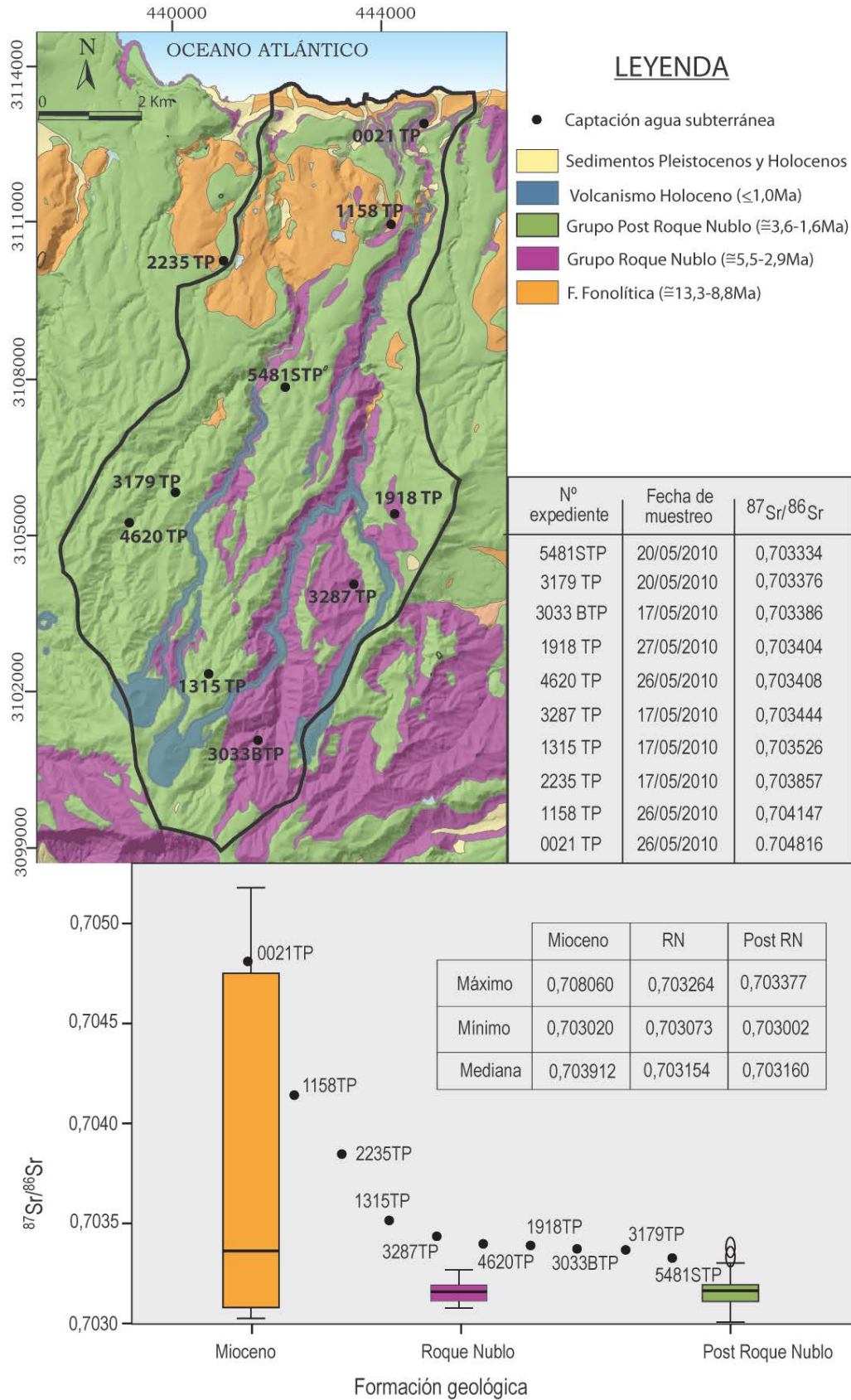


Figura 5.44. Mapa geológico, situación y resultados obtenidos para la relación isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en 10 muestras de agua subterránea de la zona de estudio. Representación gráfica en forma de cajas y estadística descriptiva de la relación isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de las muestras de roca por formación geológica.

## **6. *Evaluación de la recarga***



## **6. Evaluación de la recarga**

### **6.1. Introducción**

La recarga del acuífero es la entrada de agua proveniente de la infiltración de aguas superficiales (precipitaciones, retornos de riego, fugas de sistemas de tuberías y canales,...) o de las transferencias de otros acuíferos. La recarga difusa es la que se produce como consecuencia de la infiltración en la superficie del territorio de la lluvia y bajo la cubierta nival, y en su caso puede incluir los retornos de riego si estos se producen sobre un territorio extenso.

Existen varios métodos para estimar la recarga difusa del acuífero: métodos ambientales químicos, isotópicos y de trazadores, mediante el cierre del balance hidrológico, mediciones directas en piezómetros, trazadores en parcelas experimentales o con fórmulas empíricas. Todos ellos presentan cierto grado de incertidumbre que depende de la cantidad y calidad de las variables empleadas, de la variabilidad espacial y temporal en cada caso y de la naturaleza empírica o semiempírica de las fórmulas utilizadas

El cálculo de la recarga media a largo plazo en la zona de estudio se ha llevado a cabo utilizando el método del Balance de Cloruros de origen atmosférico, ya que la zona se incluye en el área Norte de Gran Canaria que ha sido objeto de estudio dentro del proyecto de investigación REDESAC. Este es un método sencillo, ya utilizado con éxito en Canarias (Herrera, 2001; Alcalá, 2005; Muñoz, 2005; Custodio, 2010b; Marrero, 2010), que permite estimar la recarga media difusa por la lluvia en condiciones ambientales estables y de tránsito por la zona no saturada. Es fiable si se conoce la deposición atmosférica, el contenido en cloruros del agua subterránea recargada y la descarga por la escorrentía superficial directa (Custodio, 2010b). Este método de estimación de la recarga presenta una serie de incertidumbres ligadas a la representatividad de los datos de partida. La más relevante en la zona de estudio se refiere a la estimación de la concentración de cloruros en el agua de recarga, ya que esta puede estar notablemente diferida respecto al evento que la produjo y además puede sufrir alteración por difusión en relación con el agua del acuífero cuando la tasa de recarga es pequeña. En el caso de recarga a lo largo de una ladera, en el agua subterránea se produce el efecto de mezcla a lo largo del flujo, de modo que el agua muestreada en un nacimiento, galería o por bombeo en un pozo se produce la mezcla de agua subterránea que confluye al punto de muestreo que en muchos de los casos es una mezcla de las sucesivas

aguas de recarga a lo largo del recorrido, desde cotas más elevadas (Custodio, 2010b).

Además, dentro del mismo proyecto se ha llevado a cabo una tentativa de cálculo de la recarga mediante el balance diario de agua en el suelo (Naranjo et al., 2015).

## 6.2. Cálculo de la recarga mediante el balance del ión cloruro

### 6.2.1. Metodología

El ión cloruro es un trazador ideal porque no sufre intercambios significativos con el medio ambiente, es químicamente estable y altamente soluble, tiene origen conocido en la mayoría de los casos y puede ser fácilmente muestreado y medido con precisión (Custodio et al, 1997). Tanto la deposición húmeda como la seca aportan ión cloruro que se incorpora al agua de recarga, constituyendo la **deposición atmosférica total de cloruros**. El balance de masa del ión cloruro en el agua en estado estacionario para valores medios multianuales viene dado por (Custodio, 1997):

$$P \cdot C_P = R \cdot C_R + ES \cdot C_{ES} - IES \cdot C_{IES} + F$$

donde  $P$  es la precipitación media (mm/año);  $R$  es la recarga total media (mm/año);  $ES$  y  $IES$  son la escorrentía saliente y entrante que se infiltran en el área de estudio (mm/año) respectivamente;  $C_P$ ,  $C_R$ ,  $C_{ES}$  y  $C_{IES}$  son las concentraciones medias ponderadas de cloruros (mg/L) en la precipitación, recarga y escorrentía saliente y entrante respectivamente y  $F$  representa otras fuentes o pérdidas de cloruros. Aquí se supone que la pequeña posible toma y cesión de cloruros por la vegetación es estacionaria y del mismo valor y que el atrapamiento preferente de la deposición seca por las hojas queda suficientemente reflejada en los captadores abiertos de agua de lluvia instalados.

Así, en el balance de cloruros realizado en la zona de estudio,  $F$  se supone nulo ya que se considera que la retención de cloruros por la vegetación se iguala a la liberación de la misma al morir. Tampoco existe escorrentía permanente sino de forma ocasional, cuando se producen intensas precipitaciones, que en todo caso se originan en la zona constituyendo una escorrentía saliente. Tras estas suposiciones la ecuación se simplifica quedando:

$$R \cdot C_R = (P \cdot C_P) - (ES \cdot C_{ES})$$

Para un periodo muestreado dado (i), la aportación viene dada por:

$$D_p = \frac{1}{n} \sum Cl_{pi} \cdot P_i$$

$C_p$  = concentración de cloruros en el periodo muestreado (mg/L)

P = precipitación registrada en el periodo de muestreo (mm/a)

n = número de días del periodo de muestreo

### 6.2.2. Estimación de la recarga del área de estudio por balance de cloruros

Para el cálculo de la deposición atmosférica total de cloruro (A) en la zona se dispone de datos de las 5 estaciones pluviométricas distribuidas a diferentes cotas, en las que se han obtenido muestras de precipitación acumulada mensual de un periodo aproximado de cinco años (Tabla 6.1 y Fig. 5.2). La metodología llevada a cabo para la medida de la cantidad de agua de lluvia, la toma de muestras, los periodos de muestreo y la caracterización del agua de lluvia se han descrito en los apartados 5.2.2.2 y 5.3.

La deposición atmosférica de cloruros se ha calculado como la sumatoria del producto de la concentración de cloruros en la precipitación por la cantidad de precipitación para cada intervalo de muestreo. Los resultados obtenidos para cada punto de muestreo se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Datos obtenidos para la deposición atmosférica de cloruros (A) en la zona de estudio.

Estación	Cota (m)	Nº días	$\sum(C_p \cdot P)$ (mg/m <sup>2</sup> )	A (g/m <sup>2</sup> /año)
36 Mondragones	375	1848	25617	5,06
55 Las Madres	557	1783	42490	8,70
203 Sta Cristina	645	1796	41510	8,44
37 Lomo Majadillas	990	1858	34480	6,77
98-174 Retamilla/Montañón	1370	1795	28584	5,81

En el área de estudio la **escorrentía** se produce de forma esporádica, asociada a la existencia de temporales que producen rápidas crecidas que descargan en el mar. La estimación de la escorrentía media se ha llevado a cabo mediante el método del número de curva, dentro de los trabajos del Proyecto REDESAC, evaluándose en un 10% de la precipitación media (Cruz-Fuentes et al., 2014).

Para la concentración de cloruros del agua de escorrentía se dispone de dos análisis. El representativo de la zona alta está tomado en el Barranco del Andén (Fig. 2.3) a cota 1365 m, con una concentración de cloruros de 27,5 mg/L. La zona media y baja queda representada por una muestra tomada a la cota de 573 m. con un valor de 46,0 mg/L de cloruros. A partir de estos datos, de concentración de cloruros de escorrentía y cota, se calculó la recta de regresión

( $y = -42,8x + 2542,3$ ) que ha permitido determinar la concentración de cloruros de la escorrentía en el entorno de las estaciones muestreadas.

Los datos estimados para el balance de cloruros en la escorrentía por estación se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Datos estimados para el balance de cloruros en la escorrentía en la zona de estudio.

Estación	Cota (m)	Nº días	$C_{ES}$ (mg/L)	$\sum(C_{ES} * ES)$ (mg/m <sup>2</sup> )	$C_{ES} * ES$ (g/m <sup>2</sup> /año)
36 Mondragones	375	1848	50,6	4198	0,84
55 Las Madres	557	1783	46,4	7789	1,59
203 Sta Cristina	645	1796	44,3	4210	0,86
37 Lomo Majadillas	990	1858	36,2	10670	2,10
98-174 Retamilla/Montañón	1370	1795	25,4	8031	1,63

La concentración de cloruros en el **agua de recarga** se ha estimado en función del agua subterránea de la zona a partir del mapa de contenidos en cloruros de la misma (Fig. 5.26). Tal como se expuso en el apartado 5.4.3, la distribución de cloruros del agua subterránea va aumentando de cumbre a costa en franjas paralelas a la costa, con modificaciones en función del relieve. Los valores están comprendidos entre 10-20 mg/L en las zonas altas y llegan a 500 mg/L en zonas costeras (Figura 5.26).

Para determinar la concentración de cloruros del agua de recarga se ha tomado el promedio del contenido de cloruros de los pozos de la zona donde se sitúa cada estación pluviométrica muestreada. Hay que tener en cuenta que el espesor de la zona no saturada en la mayoría de los casos se encuentra en torno a los 200 m y el agua de estos pozos representa una mezcla de agua local con agua de recarga a cotas superiores, por lo tanto, con salinidades menores. Los datos de concentración de cloruros estimados para el agua de recarga en cada zona se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Valores estimados para el cálculo de la recarga en cada colector de precipitación y recarga calculada (en mm/año y en porcentaje respecto a la precipitación).

Estación	Cota (m)	$C_R$ (mg/L)	$R = (A - ES * C_{ES}) / C_R$ (mm/año)	P (mm/año) periodo 1970- 2013	%R/P
36 Mondragones	375	150	28,09	265	10,6
55 Las Madres	557	35	202,96	577	35,2
203 Sta Cristina	645	60	126,34	466	27,1
37 Lomo Majadillas	990	25	187,09	598	31,3
98-174 Retamilla/Montañón	1370	16	261,20	745	35,1



Para la **estimación de la recarga** en todo el área de estudio se ha partido de los datos de recarga calculados en las estaciones pluviométricas (Tabla 6.3) y del mapa de isoyetas realizado con pluviometrías anuales del periodo 1970-2011 (Fig. 6.1). Se ha dividido el área total en siete zonas según las isoyetas y se ha calculado el volumen de la recarga media anual, atendiendo a los resultados obtenidos del balance de cloruros, según se refleja en la figura 6.1.

Estos métodos de cálculo de la recarga llevan asociados un grado de incertidumbre que puede ser alto y que debe ser conocido para la posterior utilización de los resultados en tareas de cuantificación de recursos y planificación hidrológica.

El cálculo de los errores puede llevarse a cabo mediante técnicas estadísticas. Así, para variables  $X_i$  normalmente distribuidas y caracterizadas por su valor medio  $\bar{X}_i$  y su desviación estándar  $S_{X_i}$ , la regla de propagación de errores para una función  $X = f(X_i)$  es

$$S_X^2 = \sum (\partial f(X_i) / \partial X_i)^2 S_{X_i}^2$$

Considerando que la escorrentía superficial sea despreciable,  $\bar{R} = \bar{D} / \bar{C}$  ( $\bar{R}$  = recarga media;  $\bar{D}$  = aportación media de cloruro atmosférico;  $\bar{C}$  = concentración media de cloruros en la recarga local), y midiendo el error por el coeficiente de variación (desviación estándar dividida por la media), se obtiene que  $CV_R^2 = CV_D^2 + CV_C^2$ .

En el área de estudio los valores de la desviación estándar (S) son aún poco conocidos por tratarse de series muy cortas. Comparando con series largas de la Península Ibérica se da una primera aproximación,  $CV_C=0,2$  con  $CV_{CVC}$  (coeficiente de variación de  $CV_C$ )=0,3;  $CV_D=0,20$  con  $CV_{CVD}=0,5$ . Así resulta  $CV_R=0,28$  con una incertidumbre  $CV_{CVR}=0,58$  (Alcalá y Custodio, 2013), aun cuando pueden existir variaciones notables de un lugar a otro que depende de las condiciones locales.

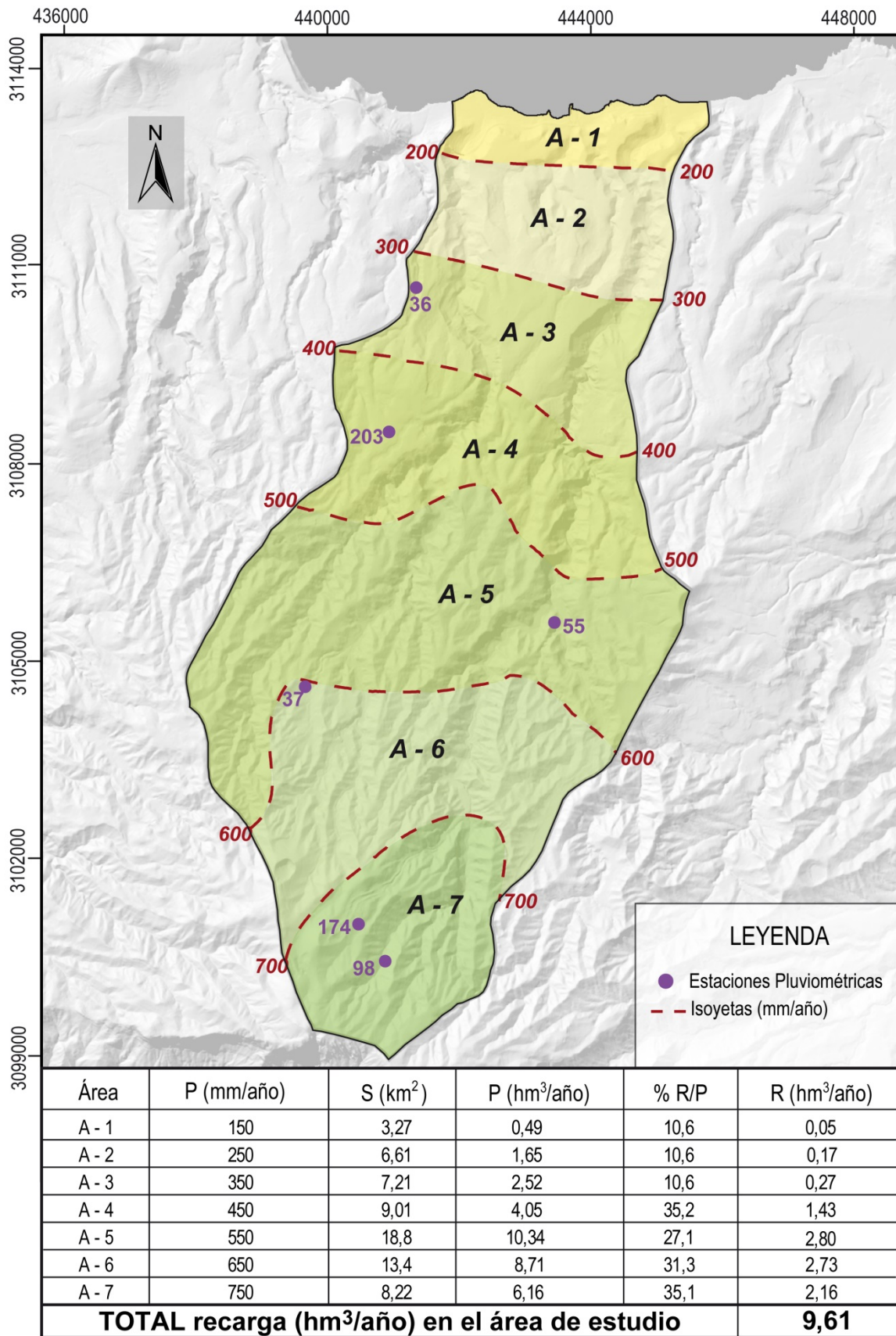


Figura 6.1. Mapa de isoyetas, situación de las áreas de recarga y cálculo de la recarga media para cada área.

### 6.2.3. Resultados

Para la deposición atmosférica de cloruros del periodo muestreado se obtienen valores que varían entre 5 g/m<sup>2</sup>/año y 9 g/m<sup>2</sup>/año (Tabla 6.1), observándose una disminución de la deposición atmosférica de cloruro con la altitud y posición en los interfluvios con respecto a la influencia de los vientos de barlovento.

Los resultados obtenidos para la recarga relativa son muy parecidos para toda el área, excepto para la costera. Así, puede tomarse un valor medio de R/P del 29%, que descendería a 10% en la franja costera (Tabla 6.3)

Los datos estimados para la exportación de cloruros con la escorrentía superficial varían entre 0,8 g/m<sup>2</sup>/año y 2,1 g/m<sup>2</sup>/año.

En el balance de masas de cloruros se obtiene un total de recarga para el área de estudio de 9,61 hm<sup>3</sup>/año, distribuida de forma desigual de cumbre a costa (Fig. 6.1). Estos valores pueden estar sesgados debido a la diferente representatividad del valor del contenido en cloruros del agua subterránea. Los pozos canarios tienen poca penetración y lo compensan con obras de drenaje horizontal en su fondo. Así la muestra obtenida es notablemente más representativa del agua de recarga local que la de los pozos perforados profundos. Así, en los nacientes y galerías cortas de cumbre el agua muestreada representa al agua de recarga local, pero para los nacientes, grandes galerías y pozos de zonas medias y bajas, y en especial para los sondeos profundos, lo que se muestra es el agua recargada en una porción de territorio aguas arriba, en la cabecera de cuenca o en laterales. Actualmente también sucede esto último en pozos que penetran poco bajo el nivel freático, debido a los descensos piezométricos que han tenido lugar. Este efecto no ha sido corregido aún, lo que significa que la estimación de la recarga en las partes medias y bajas puede estar sobrevalorada por este efecto.

### 6.3. Cálculo de la recarga por balance diario del agua en el suelo

Una tentativa de cuantificación de la recarga natural por el balance diario del agua en el suelo en el Norte de Gran Canaria, incluyendo el área de estudio, se recoge y detalla en Naranjo et al., 2015.

El balance se realizó utilizando la hoja de cálculo Easy-Bal 3.0, elaborada por el Curso Internacional de Hidrología Subterránea para el periodo 1980-2013. Este programa simplificado requiere introducir algunos parámetros del suelo como espesor, capacidad de campo y punto de marchitez permanente y, partir de una situación dada de humedad inicial, (aunque este último dato no

es relevante para largos tiempos de cálculo), la pluviometría diaria (mm) y el umbral de escorrentía (mm). Los datos de suelo utilizados proceden de los trabajos de Sánchez, 1975; el umbral de escorrentía se obtuvo a partir del número de curva (Cruz-Fuentes et al., 2014); la pluviometría diaria procede de los datos de las estaciones pluviométricas del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria y la  $ET_0$  diaria (evapotranspiración de referencia utilizada ha sido calculada por la fórmula de Penman-Monteith) y procede de dos estaciones agroclimáticas de la red SIAR, que permitieron corregir y completar los cálculos de la ETP obtenidos por la fórmula de Thornthwaite para las estaciones de la Agencia Española de Meteorología para el periodo 1980-2013.

Los resultados obtenidos para el área de estudio se muestran en la tabla 6.4, obteniendo una recarga total de 4,94 hm<sup>3</sup>/año.

Tabla 6.4. Recarga obtenida mediante el balance diario de agua en el suelo en el periodo 1980-2013 en cada una de las áreas (Naranjo et al., 2015).

Área	S (km <sup>2</sup> )	R(mm/año)	%R/P	R(hm <sup>3</sup> /año)
A-1	3,3	0.2	0.1	0,00
A-2	6,6	11	4	0,07
A-3	7,2	4	2	0,30
A-4	9,1	25	5	0,23
A-5	18,7	85	15	1,59
A-6	13,4	81	14	1,10
A-7	8,2	203	28	1,66
TOTAL recarga (hm <sup>3</sup> /año)				4,94

Los resultados obtenidos para la recarga por este método son inferiores a los obtenidos por el método del balance de masa de cloruros. Esta diferencia podría deberse a la incertidumbre asociada a los cálculos, que en el mismo estudio fue evaluada con una desviación estándar 1,1 hm<sup>3</sup>/año.

## **7. *Discusión***



## **7. Discusión**

El presente capítulo presenta una discusión sobre el funcionamiento hidrogeológico del área de estudio que integra diferentes aspectos ya tratados en capítulos anteriores, mediante la confrontación de los datos y discusiones parciales expuestos.

### **7.1. La estructura geológica como condicionante de la hidrogeología**

Al reconstruir la geología profunda del área de estudio a partir de columnas de pozos no se han encontrado materiales pertenecientes a los Basaltos Miocenos de la etapa de crecimiento en escudo de la isla, desconociéndose a qué profundidad se encuentran estos materiales. Tal y como ya dedujo Pérez-Torrado (2000), se confirma que la disposición de los paleo-barrancos de la Fm. Fonolítica ha condicionado la distribución de los depósitos volcánicos posteriores y a los efectos de esta tesis constituye el sustrato geológico de la zona. El Grupo Roque Nublo, excepto en la zona baja donde aflora la Fm. Fonolítica, se encuentra presente en toda la zona y su potencia va disminuyendo progresivamente de cumbre a costa, pudiendo alcanzar los 750 m. Los basaltos del Grupo Post Roque Nublo también se encuentran presentes en prácticamente toda la zona y alcanzan potencias de 300 m en la zona alta de la cuenca del barranco de Moya y de 100 m en la cuenca del barranco de Azuaje; está ausente en algunos lugares, principalmente en los fondos de los barrancos. La representatividad en profundidad del volcanismo Holoceno es insignificante y mayoritariamente se encuentra encajado en el fondo de algunos barrancos (Figs. 3.8 y 3.9).

El flujo del agua subterránea en el área de estudio sigue el modelo hidrogeológico general de la isla, según el cual la mayor recarga se produce en las zonas de cumbres y el agua fluye hacia el mar con salidas intermedias naturales en forma de nacientes o artificiales como extracciones por los pozos y en algunos casos por galerías. A menor escala el modelo de flujo no es tan sencillo ya que se trata de un terreno volcánico caracterizado por apilamientos de materiales con distinto comportamiento hidrogeológico y compleja geometría. Esto favorece la formación de acuíferos colgados temporales y algunos permanentes, que pueden fluir al exterior formando nacientes o descargar en otro acuífero, al que recargan. Ello complica la determinación de las características hidráulicas. Se han obtenido datos de transmisividad hidráulica aparente para la Fm. Fonolítica y Grupo Roque Nublo a partir de datos de ensayos de bombeo y recuperación procedentes de registros del CIAGC de pozos



del área de estudio. Los resultados coinciden con los obtenidos en el proyecto SPA-15 (Tabla 4.3). Esta complejidad también influye en la posición de las divisorias de las cuencas haciendo que la divisoria superficial no coincida con la subterránea.

## 7.2. Papel y evolución temporal de los nacientes

El área de estudio se caracteriza por ser la zona de mayor recarga de la isla y la de mayor densidad de nacientes, la mayoría permanentes, aunque en la actualidad han desaparecido muchos de ellos (Fig. 4.1). Debido a las extracciones en las últimas décadas se ha producido la desaparición de mucho de los nacientes y un descenso generalizado del nivel piezométrico (Figs.7.1 y 7.2). Los más acusados agotamientos de caudales comenzaron en la década de 1960, aunque la merma de caudal había comenzado ya en la década de 1940.

Haciendo un análisis de los datos de caudal procedentes de nacientes y túneles (pequeñas galerías) en las décadas de 1940 y 1950, se observa que en la zona alta y media de la cuenca del Bco. de Azuaje, existían unos 43 nacientes, que en la década de 1940 aportaban un caudal base aproximado de 4,2 hm<sup>3</sup>/a y en la de 1950 había descendido a unos 2 hm<sup>3</sup>/a. Los nacientes de Las Madres y Sauco constituyen dos ejemplos de dicho agotamiento (Fig. 7.1).

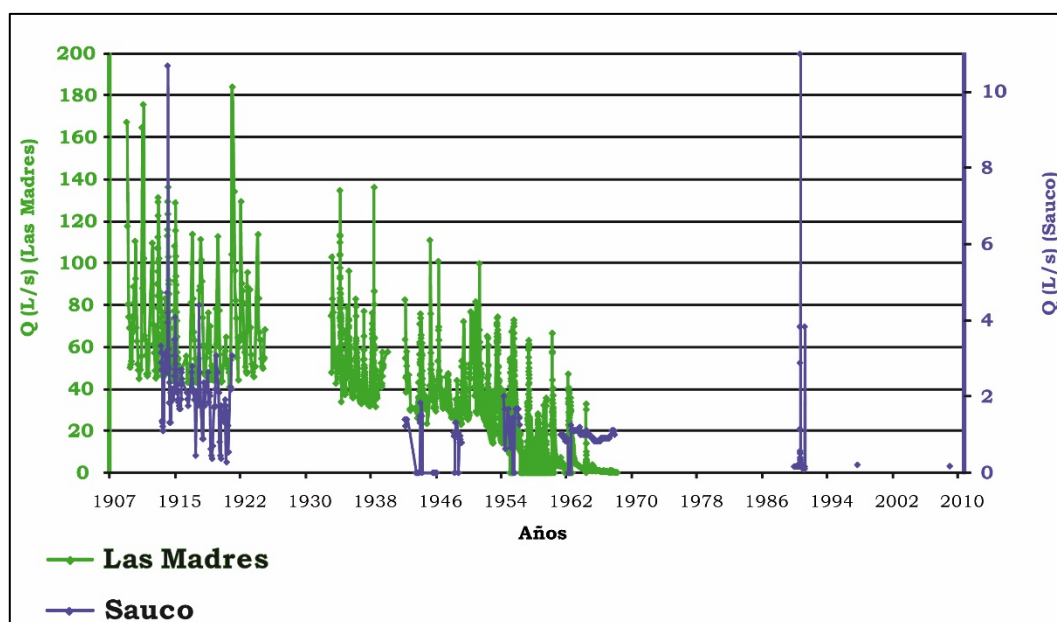


Figura 7.1. Hidrogramas de: a) Naciente de Las Madres, cuyo caudal base a principio del siglo XX era de aproximadamente 40 L/s; a partir de la década de 1940 comienza la disminución de caudal, que es progresivo hasta su total agotamiento en la década de 1960; b) Naciente de Saúco, que sufre un agotamiento progresivo con el tiempo pero sin llegar a secarse del todo. La situación de estos nacientes (Naciente de las Madres, 30 y Naciente de Saúco, 24) se indica en la figura 4.1.

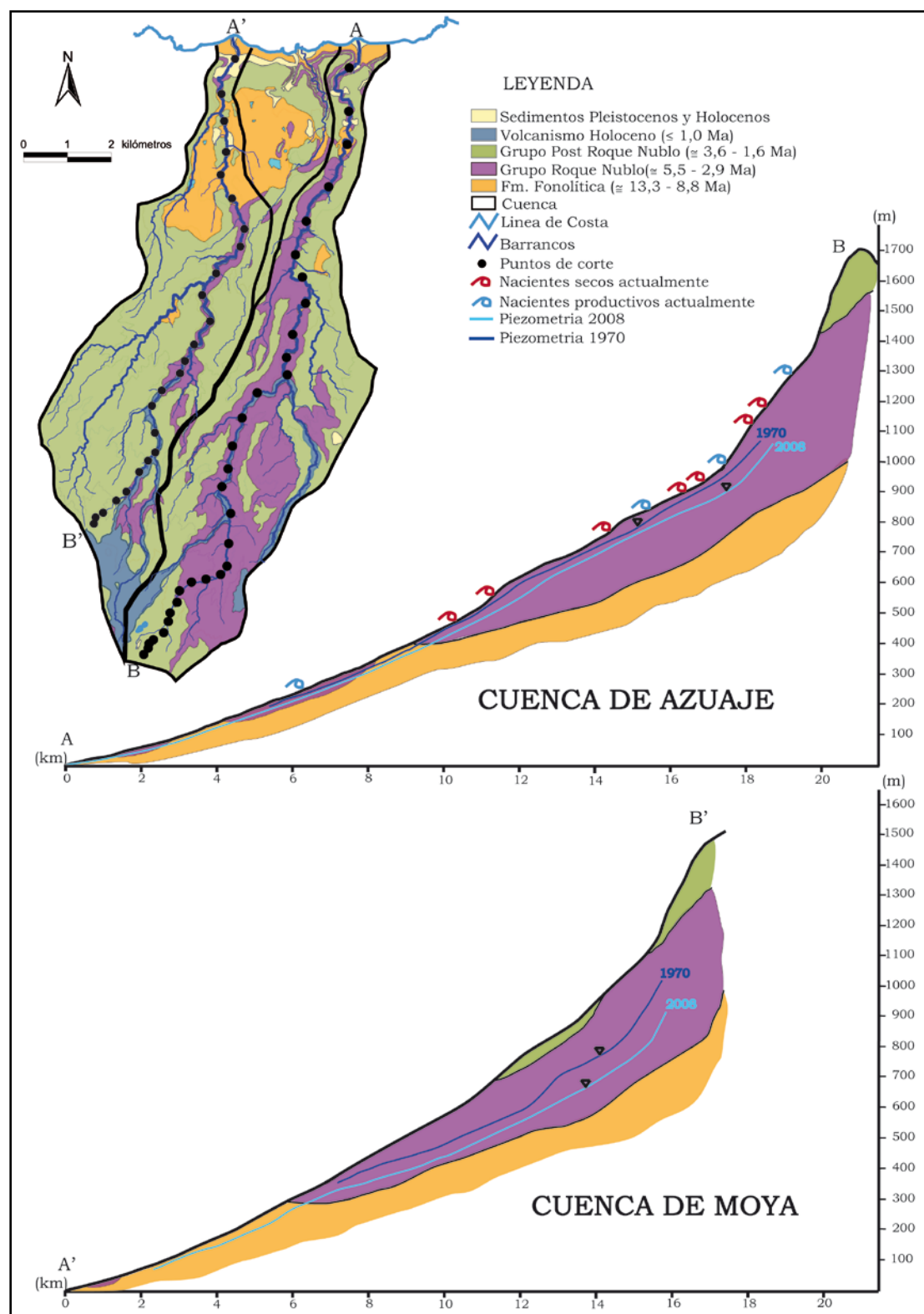


Figura 7.2. Evolución del nivel piezométrico en el periodo comprendido entre 1970 (fuente SPA-15, 1975) y 2008 a lo largo de los fondos de los barrancos principales de las cuencas de los Barrancos de Moya y Azuaje. Se puede observar que el descenso del nivel piezométrico en la cuenca de Moya es mayor que en la cuenca de Azuaje, siendo aproximadamente de 80 m y 50 m respectivamente. También se puede observar los nacientes que existían en el Barranco principal de la cuenca de Azuaje en la década de 1950 y que en la actualidad están secos; muchos de los restantes no tienen régimen permanente.

En la figura 7.2 se muestra los cortes realizados en los fondos de los barrancos principales de las cuencas estudiadas y la evolución temporal de la piezometría en el periodo 1970-2008, así como la situación de nacientes existentes en la década de 1950 y los que en la actualidad se encuentran secos.

Según los datos de la Tabla 4.1 se puede concluir que en la mayoría de los casos se trataba de nacientes con un caudal de base relativamente constante. Se observa también que las mayores fluctuaciones de caudal se produce en los nacientes situados en el Grupo Roque Nublo ( $Q_{\max}/Q_b \approx 70$ ), menores en los situados en el grupo Post-Roque Nublo ( $Q_{\max}/Q_b \approx 25$ ), y las mínimas en los correspondientes a los materiales Holocenos ( $Q_{\max}/Q_b \approx 15$ ). Los caudales de base eran similares en los nacientes situados en el Grupo Roque Nublo y Grupo Post-Roque Nublo y mayores en los situados en los materiales Holocenos. Podría deberse a que las lavas Holocenas discurren por el fondo de los barrancos, donde recogían aportes laterales que fluían desde las pendientes adyacentes. Dada la relativamente alta permeabilidad de las lavas y piroclastos Holocenos respecto a los materiales más antiguos, estos aportes son transportados con facilidad aguas abajo, hasta su descarga en un manantial al adelgazarse o desaparecer la formación volcánica reciente de fondo.

En la actualidad, de los 43 nacientes localizados en la zona media-alta de la Cuenca de Azuaje sólo siguen manando 9 (aunque no se tiene datos de otros 7) y el caudal de base actual aproximado es de  $0,34 \text{ hm}^3/\text{a}$ . Así pues, la disminución de las descargas naturales del acuífero en esta zona puede cifrarse en unos  $3,9 \text{ hm}^3/\text{a}$ .

En cuanto a la mineralización del agua de los nacientes (Fig. 5.11), en la zona alta se trata de lo esperable de la meteorización de suelos derivados de las formaciones locales más un efecto suave de la evapoconcentración del aerosol marino. Así, la química es representativa del agua de recarga en las áreas altas. En la zona media la química evidencia el resultado de la alteración de la roca profunda por aporte de  $\text{CO}_2$  endógeno, además de un mayor efecto del aerosol marino, mostrando un claro efecto de alteración profunda de la roca, que indica un aporte de aguas subterráneas inferiores. Eso explica que haya permanecido a lo largo del tiempo, aunque con caudales actualmente mermados, mientras que los alimentados por aguas de sistemas locales se han secado hace ya tiempo al descender los niveles freáticos, salvo los nacientes discontinuos que son colgados. En las zonas bajas los nacientes tienen un marcado efecto de aporte salino atmosférico y de aridez climática, con efecto litológico que se traduce en un notable exceso de Na y posibles aportes antrópicos por retornos de riego y población, como evidencian los contenidos en nitratos, que oscilan entre 57 y 68 mg/L.

### 7.3. Explotación y evolución piezométrica

En Gran Canaria se abrieron más de 1500 pozos entre 1933 y 1980. Según los datos del inventario del año 1997 del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, en el área de estudio existen 373 captaciones de agua subterránea inventariadas, de las cuales 92 aparecen como abandonadas o secas. Muchas de las que continúan en funcionamiento han tenido que ser reprofundizadas ya que los niveles piezométricos han descendido progresivamente (Fig. 4.9). En la zona de estudio se observan descensos medios acumulados entre 50 m y 80 m. En los últimos años la demanda de agua subterránea ha disminuido, produciendo una menor explotación y una estabilización o incluso posible recuperación de los niveles freáticos, aunque este último extremo necesita de más tiempo de observación en puntos seleccionados para ser confirmado.

Se han elaborado cuatro mapas piezométricos que comprenden el periodo de 1970 a 2009, después de que los nacientes fueran reemplazados por las obras excavadas (pozos fundamentalmente) como fuentes de suministro de agua en la zona (Figuras 4.5 a 4.8). La representatividad de los datos utilizados para su elaboración es variable, según se expuso en el apartado 4.2.3. Así, cada pozo puede recibir agua en varios niveles permeables y por tanto el nivel medido responde un valor intermedio de la piezometría de diferentes acuíferos y pueden tener diferente entidad. Además, el estado de explotación de cada pozo es variable a la hora de la medida, sin que se pueda saber si realmente se trata de niveles estáticos o niveles en recuperación o influenciados por bombeos cercanos.

Las isopiezas presentan una distribución paralela a la costa, adoptando formas lobulares en los barrancos. Como ya se expuso, el flujo del agua subterránea se produce de cumbre a costa, con un cambio gradual del gradiente hidráulico cuyos valores medios van del 16% en zonas altas al 7% en zonas bajas. No se aprecia cambio significativo en la evolución de las piezometrías en el periodo estudiado, pero hay que tener en cuenta que el número de datos que se tiene de cada periodo de muestreo es muy variado así como la representatividad de los mismos respecto del estado del acuífero (Tabla 4.2) y que la escala vertical no muestra en detalle las variaciones posibles. Sin embargo, hay que destacar que si se observan en detalle (Fig. 7.2) sí que se observan descensos generalizados en los niveles.

Estos descensos de niveles también se corroboran con la desaparición de nacientes y la reprofundización de pozos o el abandono de otros por no ser productivos. La evolución temporal de los niveles se ha estudiado en aquellos pozos con un número suficiente de datos (Anexo A.4.4. Evolución temporal de



niveles piezométricos), mediante gráficas de evolución que incluyen los datos de explotación de los mismos. Con dichas gráficas se ha elaborado un mapa resumen de las tendencias de los niveles, caudales y profundidades de las captaciones (Fig. 7.3).

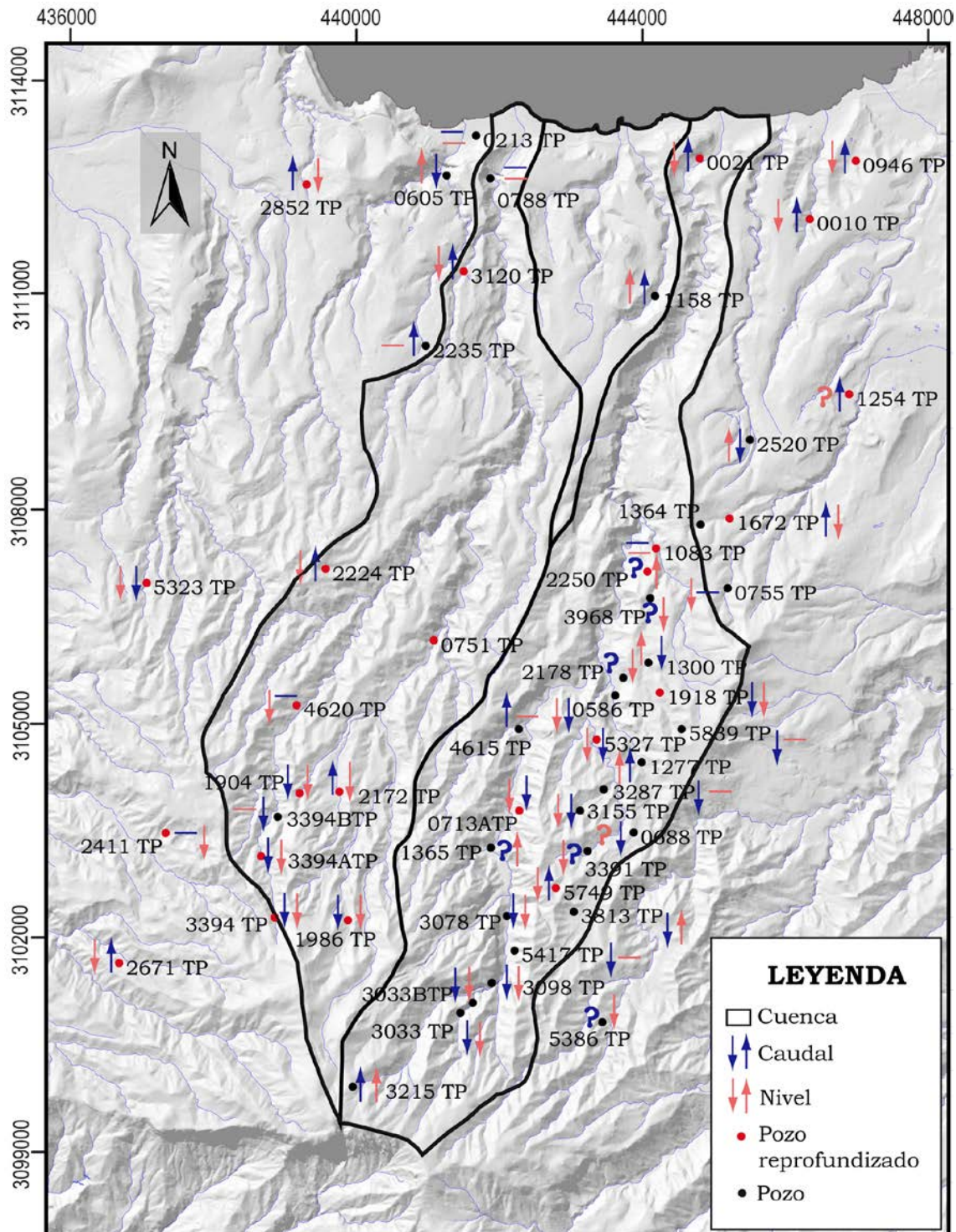


Figura 7.3. Mapa resumen de tendencias en el tiempo de los niveles piezométricos y caudales medios continuos equivalentes.

Se observa: a) mayor frecuencia de pozos reprofundizados en la cuenca de Moya que en la cuenca de Azuaje b) en la zona alta de la cuenca de Azuaje no hay pozos reprofundizados y c) siempre se produce un aumento de caudal en los pozos reprofundizados de la zona baja, no siendo así en las zonas alta y media en las que se observa con bastante frecuencia disminución de caudal con la reprofundización, lo que apuntaría a la explotación de acuíferos superficiales que han sufrido agotamiento sin que se llegue a una zona productiva del acuífero general. Todo ello, como consecuencia de la gran heterogeneidad que presenta la zona.

## **7.4. Hidrogeoquímica**

### **7.4.1. Agua de lluvia**

La pluviometría de la zona se caracteriza por su irregularidad, presentando una amplia variabilidad tanto temporal como espacial, con medias en la zona alta de 700 mm/a y de 200 mm/a en zonas bajas (Figs. 2.5 y 2.6). En general el agua de lluvia es clorurada-sódica, con diferentes grados de mineralización; se encuentra una variación espacial en la concentración de iones causada por la altitud y distancia al mar principalmente y variaciones temporales originadas por las precipitaciones y los periodos de estiaje (Figs. 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8).

La composición química del agua de lluvia en muestreos totales en el área de estudio (que incluyen deposición seca y deposición húmeda) está influenciada por los aportes de sales procedentes del aerosol marino y del polvo atmosférico local. Algunos autores (Soler y Lozano, 1985; Herrera, 2001; Muñoz, 2005) indican que el polvo sahariano puede aportar sales al agua de recarga, pero este aporte es pequeño frente al del aerosol marino, excepto para  $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$  (Custodio, 1974; Fernandopullé, 1974). Los trabajos realizados por Criado y Dorta (2003) sobre el polvo sahariano en Canarias indican que la composición química es predominantemente Silicio (50-60%), Aluminio (~10%) y otros componentes con una abundancia inferior al 6% (Fe, Mn, Mg, Ca, Na,...). Suponiendo que el cloruro es conservativo, la Tabla 5.8 muestra el porcentaje obtenido por balance, de la aportación marina a la concentración de los iones mayoritarios presentes en el agua de lluvia. La mediana de porcentaje total obtenido de concentración es: Na 98,01%; Mg 100,08%; K 27,00%; Ca 12,76% y  $\text{SO}_4$  19,89%, con lo que el K, Ca y  $\text{SO}_4$  son de aporte adicional, los dos primeros del polvo y el tercero atmosférico.

### 7.4.2. Agua subterránea

La química del agua subterránea en la zona de estudio se corresponde con el esquema de funcionamiento del acuífero insular, donde en las zonas de cumbre se encuentran aguas con menor mineralización y esta va aumentando progresivamente hacia la costa. En las cumbres se encuentran aguas bicarbonatadas sódico-cálcicas, en las zonas de medianías tanto aguas bicarbonatadas sódico-cálcicas como bicarbonatadas sódicas-magnésicas o bicarbonatadas cálcicas-magnésicas y en las zonas costeras aguas cloruradas sódicas (Fig. 5.12). También en las zonas de medianías destaca el aporte de gases de origen volcánico residual, fundamentalmente CO<sub>2</sub>, que confiere al agua un carácter inicial ácido, lo que favorece la meteorización de las rocas y da lugar a una mayor mineralización posterior. Se ha estudiado la evolución de los pozos que han sido reprofundizados y generalmente aumenta la mineralización y disminuye del pH de sus aguas (Fig. 5.13 y Tabla 5.11) lo que indica un progresivo mayor aporte de aguas profundas de más lenta renovación con mayor acumulación de carbono inorgánico endógeno.

No se han observado cambios temporales significativos en el agua subterránea por lo que se ha seleccionado un análisis de cada punto de agua para estudiar la distribución espacial de las determinaciones fisico-químicas de interés en el área de estudio. Se observa una distribución espacial gradual que va de cumbre a costa, influenciada en la zona media por la presencia de CO<sub>2</sub> endógeno, que aporta una mayor agresividad al agua, siendo más evidente con la mayor profundidad de las captaciones, y causando una disminución de pH (Fig. 5.15) y un aumento de contenido en sílice (Fig. 5.23), conductividad (Fig. 5.19), bicarbonatos (Fig. 2.25) y TCID (Fig. 5.24).

El estudio de las relaciones iónicas  $r(\text{Ca}+\text{Mg})/r(\text{Na}+\text{K})$  y  $r\text{Na}/r\text{K}$  permite observar que en la zona alta se encuentra agua poco influenciada por la roca, tratándose de un agua de recarga, en la zona media aguas más evolucionadas, con aportes de CO<sub>2</sub> y ligadas a basaltos y basanitas de las Formaciones Roque Nublo y Post Roque Nublo y en la zona baja aguas con influencia marina y retornos de riego y ligada a las Fonolitas Miocenas (Figs. 5.30 y 5.31).

Con los datos fisico-químicos se ha realizado un análisis multivariante. Primero se ha estudiado la correlación entre los parámetros (Tabla 5.12) y partiendo de ella, se han realizado tres análisis clúster en los que se puede observar claramente la formación de grupos caracterizados por aguas poco evolucionadas, aguas con aportes de CO<sub>2</sub> endógeno y aguas evolucionadas. El primer análisis muestra dos grupos diferenciados claramente por la CE (Fig. 5.32 y Tabla 5.13). A su vez, el de menor conductividad se divide en dos grupos,



uno situado en la zona alta caracterizado por aguas poco evolucionadas y de recarga y otro en la zona media con aguas más evolucionadas y agresivas por el aporte de CO<sub>2</sub>. En el segundo análisis no se tiene en cuenta la CE y se toma el resto de los parámetros (Fig. 5.33 y Tabla 5.14); se forman dos grupos, diferenciados principalmente por el pH y SiO<sub>2</sub>, observándose un subgrupo compuesto por 29 captaciones caracterizadas por tener aguas con bajo pH y alto contenido en sílice de las que 24 presentan un efecto de aporte de CO<sub>2</sub>.

## 7.5. Isótopos ambientales

En el estudio isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  del agua de lluvia se observa evaporación en algunas muestras probablemente debido a ambientes secos y la poca precipitación que se origina en verano. Para minimizar estos efectos se ha calculado el promedio ponderado en función de la pluviometría acumulada durante el periodo de muestreo y partiendo del promedio se obtiene un exceso de deuterio para la zona de 16,7‰ (Fig. 5.36). Para un incremento de altitud de 100 m se observa un gradiente altitudinal de la composición isotópica promedio ponderada de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  del agua de lluvia de -0,17‰ y -1,2‰ SMOW respectivamente (Fig. 5.37 y Fig. 5.38).

Con el estudio isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  del agua subterránea se ha determinado la altitud media probable de la zona de recarga. Las zonas de recarga obtenidas se sitúan a cotas entre 50 m y 600 m por encima de los puntos de muestreo (Fig. 5.40 y 5.41). En algunos casos el valor de  $\delta^{18}\text{O}$  de muestras de agua subterránea queda por encima de la recta altitudinal, no siendo este efecto tan notable para el  $\delta^2\text{H}$ . No se ha analizado en detalle, pero en el caso de aguas afectadas notablemente por aportes de CO<sub>2</sub> endógeno cabe considerar la posibilidad de un desplazamiento del  $\delta^{18}\text{O}$  hacia valores más negativos por intercambio isotópico, por lo que la recta altitudinal calculada no respondería al contenido isotópico en  $\delta^{18}\text{O}$  del agua de recarga y, por tanto, las alturas de recarga estarían supervaloradas.

Los resultados de la determinación de  $\delta^{13}\text{C}$  en las cuatro muestras tomadas en cuatro pozos permiten identificar el aporte de CO<sub>2</sub> endógeno en los tres pozos que tienen agua con bajo pH y/o elevado contenido de bicarbonatos; en el pozo de bajo contenido de bicarbonatos y mayor pH se trata de un equilibrio con el CO<sub>2</sub> del suelo.

Para estudiar la relación agua-roca se ha determinado la relación isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en el agua subterránea y se ha comparado con las relaciones obtenidas en las rocas de las distintas formaciones. Se observa que los pozos 2235 TP, 1158 TP y 0021 TP, situados en la zona baja, muestran aguas con

relación similar a la de la Formación Fonolítica (Fig. 5.44). Según los datos obtenidos de la relación, en la zona baja la formación explotada es la Formación Fonolítica mientras que en la zona media y alta se trataría tanto de la Formación Roque Nublo como de la Fm. Post Roque Nublo, que son litológicamente similares, por lo que no pueden ser discriminados mediante esta relación.

## 7.6. Balance preliminar de aguas subterráneas y uso de reservas de agua subterránea

Para evaluar la recarga se ha dividido la zona de estudio en 6 áreas delimitadas por isoyetas y se han calculado los volúmenes de recarga anuales (Fig. 6.1). Las extracciones se han calculado para los años 1980, 1979 y 2009, estimado estas groseramente ante la falta de datos de detalle. El flujo de agua subterránea al mar se ha calculado según la ley de Darcy, estimándola en 1 hm<sup>3</sup>/año, considerado que las salidas se producen fundamentalmente por la Fm. Fonolítica, a la que se le supone una transmisividad de 10 m<sup>2</sup>/día (SPA-15, 1975) y un gradiente hidráulico de 0,075 a partir de la piezometría; no se ha tenido en cuenta la posible presencia local de formaciones costeras más transmisivas, como los rellenos encajados de fondo de barranco dado que se considera que se encuentran por encima de la zona saturada.

Tabla 7.1. Estimación por áreas de los volúmenes anuales medios de recarga y de las extracciones, según datos tomados en los inventarios de puntos de agua llevados a cabo en el Proyecto MAC-21 (1980) y para la presente tesis (2010).

Área (Pluviometría)	Superficie km <sup>2</sup>	Recarga hm <sup>3</sup> /año	Extracción hm <sup>3</sup> /año	
			1980	2010
Cumbre (>700)	8,22	2,16	1,40	1,43
Media-alta (600-700)	13,29	2,73	3,27	0,98
Media (500-600)	18,80	2,80	3,38	1,36
Media-baja (400-500)	9,01	1,43	1,46	0,25
Baja (300-400)	7,21	0,27	0,13	0,02
Costera (<300)	9,88	0,22	0,54	0,32
Área estudio total	66,41	9,61	10,18	4,36

A partir del balance planteado, las entradas al acuífero se estiman en 9,61 hm<sup>3</sup>/año, mientras que las salidas no llegarían a los 6 hm<sup>3</sup>/año para el 2010 (Fig. 7.4). Aun cuando exista cierta sobreestimación de la recarga, se considera

que las extracciones están subestimadas debido a la falta de colaboración de parte de los propietarios, que o no dan datos o dan datos erróneos y normalmente por debajo de la realidad. Asimismo, existe aún cierta cantidad de agua que fluye por los barrancos procedente de algunos nacientes y rezumes que siguen manando. Antes de que se reinfiltren, estas aguas son rápidamente encauzadas y desviadas a fincas particulares, por lo que su censo ofrece notables dificultades.

El hecho de que las divisorias superficiales pueden diferir de las subterráneas, que además pueden variar con las extracciones colindantes, es un nuevo factor de incertidumbre. Otra incertidumbre añadida es la variación del almacenamiento de agua en el acuífero; en décadas anteriores ha ido disminuyendo progresivamente, pero en las últimas décadas puede estar recuperándose, como parece constatarse, lo que podría explicar la diferencia entre recarga y salidas. Por ello, dado que el acuífero se encuentra en un régimen no estacionario tendencial, para su caracterización evolutiva habría que hacer balances anuales, aunque sí puede considerarse que el medio no saturado está en régimen estacionario. En estos balances la variación de almacenamiento de las reservas del acuífero juega un importante papel.

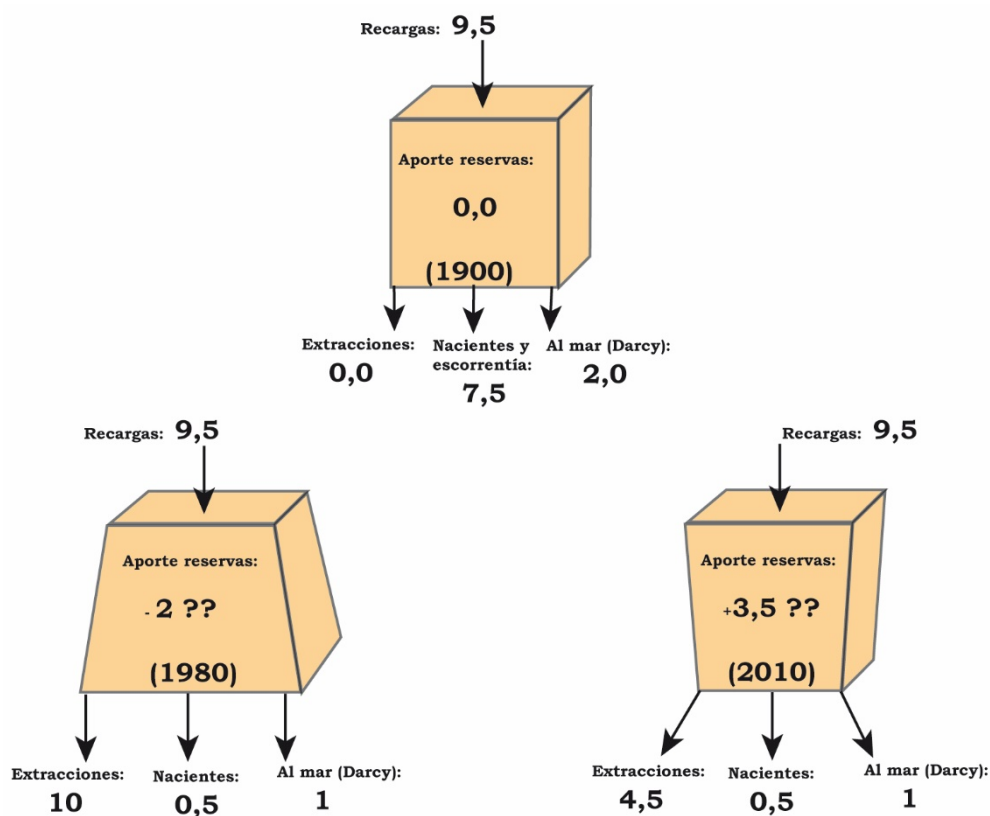


Figura 7.4. Simulación de balance hídrico medio preliminar en  $\text{hm}^3$  en distintas épocas en la zona de estudio. En el año 1900 se observa que las salidas y las entradas al sistema son iguales, por lo que las reservas de agua permanecen estables. En el año 1980 las extracciones superan a la recarga, existe un consumo de reservas. En el año 2010 las extracciones disminuyen y las entradas al sistema son mayores que las salidas, por lo que debe existir un incremento de reservas.



## **8. Conclusiones**



## 8. Conclusiones

El propósito de esta Tesis Doctoral es la caracterización del sistema acuífero de las cuencas de los Barrancos de Moya y Azuaje y establecer e investigar los procesos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos que se producen en ella. Para ello se han recopilado datos del área de estudio, se han realizado varias campañas de campo y de toma de muestras para análisis químico e isotópico, se ha establecido una red de muestreo de la deposición atmosférica de cloruros y se han aplicado distintas metodologías y técnicas hidrogeoquímicas que llevan a las siguientes conclusiones:

- El flujo del agua subterránea sigue el modelo general de la isla, de cumbre a costa.
- Se trata de un sistema acuífero complejo, conformado por una potente serie de formaciones volcánicas de diferentes edades y litologías con una geometría compleja que presentan diferentes parámetros hidráulicos. El comportamiento observado conduce a que se pueda considerar que la Fm. Fonolítica actúa como el sustrato hidrogeológico efectivo, a falta total de información sobre los basaltos antiguos de escudo que cabe esperar a mayor profundidad. La complejidad y comportamiento de las formaciones más jóvenes que se encuentran entre el sustrato y la superficie, con niveles de mayor permeabilidad y porosidad intercalados entre otros menos permeables, da lugar a la formación de acuíferos colgados que pueden descargar en nacientes cuando el relieve, en general notablemente abarrancado, lo favorece, en otros acuíferos interrelacionados o dejando percolar el agua hacia niveles más profundos. Así pues, se trata de un acuífero multicapa, heterogéneo y anisótropo en detalle, aunque a escala insular se pueda considerar como una unidad más simple.
- La gran densidad de captaciones de agua subterránea y el aumento progresivo de la explotación en las décadas de 1950 a 1980 han llevado a un notable descenso de los niveles piezométricos, lo que ha producido la desaparición de nacientes y que se haya tenido que ir reprofundizando los pozos o abandonarlos.
- En el estudio de la deposición atmosférica se observa que los aportes mayoritarios de material particulado (deposición seca) son de aerosol marino y polvo local. La tasa de deposición del aerosol marino es relativamente regular en el tiempo mientras que la del polvo local tiende a ser estacional. Los principales factores que influyen en la mineralización



del agua de lluvia son la distancia al mar, la altitud y la exposición orográfica de los vientos portadores de aerosol marino y partículas en suspensión. Así, la conductividad eléctrica del agua de lluvia disminuye con la distancia al mar y mayor cota, siendo del tipo Cl-Na en zonas de costa y del tipo Cl-Na y HCO<sub>3</sub>-Ca en cotas altas. Hay efectos locales debido al profundo abarrancamiento.

- La relación roca-agua-gas permite estudiar el flujo del agua subterránea. A grandes rasgos se puede dividir el área en tres zonas:
  - Zonas de cumbre, donde se produce la mayor recarga y en las que se encuentran aguas de tipo HCO<sub>3</sub>-Na, poco evolucionadas, de baja mineralización y con relativamente rápida renovación. El exceso de Na sobre Cl es debido a la débil meteorización del suelo y las rocas en proximidad de la superficie.
  - Zonas medias en que el agua va aumentando su mineralización durante su recorrido, con aguas de tipo HCO<sub>3</sub>-Na, HCO<sub>3</sub>-Ca y HCO<sub>3</sub>-Mg, ligadas a basaltos y basanitas de las Formaciones Roque Nublo y Post Roque Nublo. Se presentan anomalías relacionadas con el aporte de CO<sub>2</sub> endógeno en una amplia franja que cruza toda el área de estudio en dirección Noroeste-Sureste, lo que principalmente origina un agua más agresiva, de pH bajo, y produce un aumento de la mineralización, en especial en cuanto al contenido en Sílice disuelta y HCO<sub>3</sub>.
  - Zonas bajas, donde el agua es de tipo Cl-Na, procede de las Fonolitas Miocenas y está ligada a las zonas costeras.
  
- La evolución química y también isotópica del agua subterránea de cumbre a costa es el resultado de los aportes atmosféricos que varían con la distancia al mar y el relieve abarrancado; la importancia de la evapoconcentración en el suelo y parte superior del terreno; la interacción roca-agua en función del aporte de CO<sub>2</sub> edáfico, según el tipo de suelo y vegetación y/o vulcanogénico y la progresiva acumulación de la recarga a lo largo de las líneas de flujo. Hay que tener en cuenta que el agua de recarga está cada vez más evapoconcentrada hacia la costa, donde una menor recarga se compensa con una mayor superficie.
  
- No se observa evolución temporal en la química del agua subterránea si no hay cambio en la profundidad de bombeo, ni fenómenos de intrusión marina, existiendo algún caso puntual con concentración de nitratos altos asociado a captaciones poco profundas. Sin embargo, en la mayoría de las captaciones que se han reprofundizado se observa un aumento de

mineralización. En los casos en que se produce cambio del tipo de agua se observa la secuencia:  $\text{HCO}_3\text{-Na} \rightarrow \text{HCO}_3\text{-Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{-Mg}$  o  $\text{HCO}_3\text{-Na} \rightarrow \text{HCO}_3\text{-Mg} \rightarrow \text{HCO}_3\text{-Ca}$ .

- El agua de lluvia tiene un exceso de deuterio, propio de ambientes atmosféricos secos. Se obtiene para la zona una línea del agua meteórica local (LAML) media:  $\delta\text{D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 16,7\text{‰}$  SMOW, que también se refleja en las aguas subterráneas.
- La recarga media a largo plazo en condiciones estacionarias, estimada mediante el balance de la deposición atmosférica de Cl, se evalúa en unos  $9,6 \text{ hm}^3/\text{año}$ , con un valor medio de R/P de 29% en la zona alta y que va descendiendo hasta un 10% en la zona baja. En 1980 las descargas al mar y por bombeo se aproximaban a  $11,5 \text{ hm}^3/\text{año}$  y en 2010 a  $6 \text{ hm}^3/\text{año}$ , aunque la recarga calculada puede estar sobreestimada y las extracciones subestimadas. En todo caso, se observan tendencias temporales en el balance, de manera que parece que actualmente existe un incremento de reservas de agua subterránea, mientras que en décadas anteriores hubo un consumo continuado de esas reservas.

El análisis de los resultados obtenidos y la clara necesidad de estudios e investigaciones posteriores dada la importancia y valor económico-social del área como fuente de recursos de agua y para la estabilización poblacional, hace que se **recomiende**:

- Establecer, operar y mantener una red de control más amplia que la actual y especialmente diseñada, para obtener periódicamente datos físico-químicos y en su caso de isótopos ambientales del agua subterránea, niveles piezométricos y datos de explotación.
- Realizar los trabajos oportunos para conocer más en detalle las características de cada punto de muestreo, la geología local y parámetros hidrogeológicos mediante ensayos de bombeo, entre otros.
- Calcular balances hídricos anuales, ya que el sistema no es estacionario, observando y midiendo los parámetros que permitan realizar balances de agua en el suelo y conocer la escorrentía superficial, con el detalle espacial adecuado a la gran variedad de altitudes y ambientes y con observaciones piezométricas y de caudales superficiales esporádicos, de modo que sea posible realizar calibraciones.

- Mantener la red de muestreo de la deposición total de cloruro atmosférico y de la composición salina del agua de recarga en nacientes y pozos poco penetrantes o compensando el efecto de ladera en los más penetrantes.
  
- Construir un modelo numérico de simulación que además de permitir contrastar la coherencia de la información obtenida y generada y reducir los sesgos y la incertidumbre, sea un elemento básico para las herramientas de ayuda a la toma de decisiones. Este modelo debe encuadrarse en el general de la isla, del que tiene que tomar parte de las condiciones de contorno.

## ***Bibliografía***



## Bibliografía

- ALBERT-BELTRÁN, J.F., ARAÑA, V., DÍEZ, J.L. y VALENTÍN, A. (1990): *Physical-chemical conditions of the Teide volcanic system (Tenerife, Canary Islands)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 43: 321-332.
- ALCALÁ, F. (2005): *Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidrogeoquímico*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 346 p.
- ALCALÁ, F. y CUSTODIO, E. (2012): *Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain*. Hydrological Processes, Published on line in Wiley Online Library.
- ALLARD, P., JEAN-BAPTISTE, P., D'ALESSANDRO, W., PARELLO, F., PARISI, B., FLECHOC, C. (1997): *Mantle-derived helium and carbon in groundwaters and gases of Mount Etna, Italy*. Earth and Planetary Science Letters, 148: 501-516.
- ANGUITA, F. y HERNÁN, F. (1975): *A propagating fracture model versus a hotspot origin for the Canary Islands*. Earth and Planetary Science Letters, 27: 11-19.
- ARAÑA, V. y ORTIZ, R. (1986): *Marco geodinámico del volcanismo canario*. Anales de Física, Serie B, volumen especial 82: 202-231.
- ARAÑA, V. y ORTIZ, R. (1991): *The Canary Islands: tectonics, magmatism and geodynamic framework*. Magmatism in extensional structural settings (A.B. Kampunzu y R.T. Lubala, eds.). Springer-Verlag, Berlin, 209-249.
- ASCANIO y LEÓN, R. (1926): *Gran Canaria y sus aguas subterráneas: apuntes de geología y hidrografía (con algo sobre Tenerife, como apéndice)*. Imprenta y Librería de Suc. de M. Curbelo, La Laguna:1-130.
- AULINAS JUNCA, M. (2008): *The Plio-Quaternary volcanism (4Ma to Recent) in Gran Canaria (Canary Island, Spain). Mantle sources and magma evolution*. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, 404 p.
- BALCELLS, R., BARRERA, J.L. y RUIZ GARCÍA, M.T. (1990): *Mapa Geológico de España 1:25.000, hoja nº 1101-III-IV; 83-81; 83-82 (Aruca)*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Madrid.
- BALCELLS, R., BARRERA, J.L. y GÓMEZ, J.A. (1990): *Mapa Geológico de España 1:25.000, hoja nº 1109-IV; 83-83 (Teror)*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Madrid.
- BALCELLS, R., BARRERA, J.L. y GÓMEZ, J.A. (1992): *Mapa Geológico de España 1:100.000, hoja nº 21-21/21-22 (Gran Canaria)*. IGME. Madrid.
- BISTRY, T. (1997): *Natural and anthropogenic chemical input into the groundwater of the volcanic island of La Palma (Canary Islands)*. Tesis doctoral. Christian-Albrechts-Universität (Kiel, Germany). Berichte – Reports, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, nr. 85. 172 pp + anejos.
- BOGAARD, P., SCHMINCKE, H.U. y FREUNDT, A. (1988): *Eruption ages and magma supply rates during the Miocene evolution of Gran Canaria*. Naturwissenschaften, 75: 616-617.

BOGAARD, P. y SCHMINCKE, H.U (1998): Proc. ODP, Sci. Results, 157 (P.P.E. Weaver, H.U. Schmincke, J.V. Firth y W. Duffield, Eds.). College Station, TX (Ocean Drilling Program), 127-140.

BRAOJOS, J.J. (2011): *Una metodología para la evaluación de la lluvia horizontal (aplicación en la isla de Tenerife)*. En M.C. Cabrera; J. Jiménez y E. Custodio (eds.): El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15 Homenaje póstumo al Dr. Ingeniero D. José Sáenz de Oiza, Ed. AIH-Grupo Español, 43-51.

CABRERA, M.C. (2011): *El acuífero costero del Este de Gran Canaria: un ejemplo de salinización en un acuífero volcánico complejo*. En M.C. Cabrera, J. Lambán, M. Manzano y M. Valverde (eds.): Cuatro décadas de investigación y formación en aguas subterráneas. Libro homenaje al Profesor Emilio Custodio. Ed. Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español: 229-238.

CABRERA, M.C. Y CUSTODIO, E. (1998). *La contaminación por retornos de riego en la zona de Telde (Gran Canaria)*. Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente. Ed. Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español, 81-88.

CABRERA, M.C. Y CUSTODIO, E. (2004a). *Hidrogeoquímica del acuífero costero de la Ciudad de Telde (Gran Canaria)*. En J. Samper; A. Sahuquillo, J.E. Capilla y J.J. Gómez Hernández (eds.): Simposio sobre el agua y la ciudad sostenible: Hidrogeología Urbana. Ed. Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español, 303-311.

CABRERA, M.C. y CUSTODIO, E. (2004b). *Groundwater flow in a volcanic-sedimentary coastal aquifer: Telde area, Gran Canaria, Canary Islands, Spain*. Hydrogeology Journal 12(3): 1431-2174.

CABRERA, M.C. y CUSTODIO, E. (2008): *Hidrogeología y recursos hídricos en Gran Canaria*. La Cultura del Agua en Gran Canaria. Consejería de Obras Públicas y Transporte, Gobierno de Canarias, 13-24.

CABRERA, M.C. y CUSTODIO, E. (2010): *El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del Proyecto SPA-15*. En M.C. Cabrera, J. Jiménez y E. Custodio (eds.): El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del Proyecto SPA-15. Libro homenaje póstumo al Dr. Ingeniero D. José Sáenz de Oiza. Ed. Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español: 109-116.

CABRERA, M.C., CUSTODIO, E. y ROQUE, F. (eds.) (1997): *Las aguas subterráneas en la planificación hidrológica en las Islas Canarias*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español, 266 p.

CABRERA, M.C.; DE BUSTAMANTE, I.; CASAS, A; CANDELA, L., LILLO, J; PALACIOS, M.P. y TAPIAS, J.C. (2012): *Estudios de reutilización de aguas regeneradas en diversas zonas de España en el marco del Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA*. Geo-Temas, Vol.13. Actas del VIII Congreso Geológico de España, 4 páginas.

CALIRO, S., CHIODINI G., AVINO, R., CARDELLINI, C., FRONDINI, F. (2005): *Volcanic degassing at Somma-Vesuvio (Italy) inferred by chemical and isotopic signatures of groundwater*. Applied Geochemistry, 20, 1060-1076.

CARRACEDO, J.C. (1994): *The Canary Islands: an example of structural control on the growth of large oceanic-island volcanoes*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 60: 225-241.



CARRACEDO, J.C. (1999): *Growths, structure, instability and collapse of Canarian volcanoes and comparisons with Hawaiian volcanoes*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 94: 1-19.

CARRACEDO, J.C., PÉREZ-TORRADO, F.J., ANCOCHEA, E., MECO, J., HERNÁN, F., CUBAS., C.R., CASILLAS, R. y RODRÍGUEZ BADIOLA, E., (2002): *Cenozoic volcanism: II. The Canary Islands*. The Geology of Spain (F.A.W. Gibbons y T. Moreno, eds.). Geological Society of London, 438-472.

CARRACEDO, J.C., PÉREZ TORRADO, F.J. y RODRÍGUEZ BADIOLA, E. (2008): *Canarias: islas volcánicas intraplaca*. Itinerarios Geológicos por las Islas Canarias. Gran Canaria (F.J. Pérez Torrado y M.C. Cabrera, eds.). Sociedad Geológica de España, Geo-Guías, 4, 5 y 6, 11-25.

CEDEX (1988): *Actas del simposio internacional sobre hidrología de terrenos e islas volcánicas (Arrecife de Lanzarote, 1974)*. CEDEX Gobierno de Canarias, Madrid, 2Vols, 1520 p.

CHARLIER J.B., CATTAN, PH., MOUSSA, R. y VOLTZ, M. (2008): *Hydrological behaviour and modelling of a volcanic tropical cultivated catchment*. Hydrological Processes 22: 4355-4370.

CHARLIER J.B., CATTAN, PH., MOUSSA, R. y VOLTZ, M. (2008): *Transport of a Nematicide in Surface and Groundwaters in a Tropical Volcanic Catchment*. Journal of Environmental Quality 38:1031-1041.

CHARLIER, J.B., LACHASSAGNE, P., LADOUCHE, B., CATTAN, PH., MOUSSA, R. y VOLTZ M. (2011): *Structure and hydrogeological functioning of a tropical humid insular andesitic basin: a multi-disciplinary experimental approach*. Journal of Hydrology, 398: 155-170.

COURTEAUD M., RITZ, M., ROBINEAU, B., JOIN, J.L. y COUDRAY J. (1997): *New geological and hydrogeological implications of the resistivity distribution inferred from audiomagnetotellurics over la Foutaise young shield volcano (Reunion Island)*. Journal of Hydrology, 203: 93-100.

CRAIG, H. (1961): *Isotopic variations in meteoric waters*. Science, 133: 1702-1703.

CRIADO, C. y DORTA, P. (2003): *An unusual "blood rain" over the Canary Islands (Spain): the store of January 1999*. Journal of arid Environments, 55: 765-783.

CRUZ, J.V., COUTINHO, R.M., CARVALHO, M.R., OSKARSSON, N. y GISLASONY S. R. (1999): *Chemistry of waters from Furnas volcano, Sao Miguel, Azores: fluxes of volcanic carbon dioxide and leached material*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 92: 151-167.

CRUZ, J.V. y SILVA, M.O. (2001): *Hydrogeologic framework of Pico Island, Azores, Portugal*. Hydrogeology Journal, 9:177-189.

CRUZ, J. V. Y BRITO, A. G. (2002): *Planeamento de recursos hídricos subterrâneos no arquipélago dos Açores (Portugal) eo impacto da Directiva-Quadro da Água*. In Actas do III Congresso Ibérico sobre Gestão y Planificación del Agua "La Directiva marco del Agua: realidades y futuro", Sevilla.

CRUZ, J.V. y FRANÇA, Z. (2006): *Hydrogeochemistry of thermal and mineral water springs of the Azores archipelago (Portugal)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 151: 382-398.

- CRUZ, J.V., FREIRE, P. y COSTA, A. (2010): *Mineral waters characterization in the Azores archipelago (Portugal)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 190: 353–364.
- CRUZ-FUENTES, T., NARANJO, G., CABRERA, M.C. y CUSTODIO, E. (2014): *Estimación de la escorrentía superficial mediante la generación automática del número de curva con un SIG. Aplicación al norte de Gran Canaria (Islas Canarias, España)*. II Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas, Valencia.
- CRUZ-FUENTES, T., HEREDIA, J., CABRERA, M.C. y CUSTODIO, E. (2014a): *Behaviour of a small sedimentary volcanic aquifer receiving irrigation return flows: La Aldea, Gran Canaria (Canary Islands, Spain)*. Hydrogeology Journal, 22:865–882.
- CRUZ-FUENTES, T., CABRERA, M.C., CUSTODIO, E. y HEREDIA, J. (2014b): *Groundwater salinity and hydrochemical processes in the volcano-sedimentary aquifer of La Aldea, Gran Canaria, Canary, Canary Islands, Spain*. Science of the Total Environment, 484: 154–166.
- COUSENS, B.L., SPERA, F.J. y TILTON, G.R. (1989): *Isotopic patterns in silicic ignimbrites and lava flows of the Mogan and lower Fataga Formations, Gran Canaria, Canary Islands: temporal changes in mantle source composition*. Earth and Planetary Science Letters, 96 (1990) 319-335.
- CUSTODIO, E. (1974): *Contribuciones al conocimiento geohidroquímico de la isla de Lanzarote, Isla Canarias, España*. Simposium Internacional de Hidrología en Terrenos Volcánicos. Lanzarote (Islas Canarias), Vol. II, 463-509.
- CUSTODIO, E. (1978): *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Instituto de Hidrología. Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid, 303 p.
- CUSTODIO, E. (1986): *Groundwater characteristics and problems in volcanic rock terrains*. Isotope techniques in the study of hydrology of fractured and fissured rocks. International Atomic Energy. Viena, 87-137.
- CUSTODIO, E. (1988): *Hidrogeochemistry of Tenerife Island*. Revista Española de Hidrogeología. Asociación Española de Hidrogeología Subterránea, 3: 1-19.
- CUSTODIO, E. (1997): *Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos*. La evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la planificación Hidrológica. (Eds. Custodio, E., Llamas, M. R. y Samper, J.). IGME y AIH, Las Palmas de Gran Canaria-Madrid, 83-110.
- CUSTODIO, E. (2002): *Aquifer overexploitation, what does it mean?*. Hydrogeology Journal, 10(2): 254–277.
- CUSTODIO, E. (2007): *Groundwater in volcanic hard rocks. Groundwater in Fractured Rocks*. Selected Papers, no. 9. (Eds. J. Krásný and J.M. Sharp Jr.). Intern. Assoc. Hydrogeologists. Taylor & Francis, London: 95–108.
- CUSTODIO, E. (2010a): *Evolución del conocimiento hidrogeológico e hidrológico de Canarias*. El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15, 5-12.
- CUSTODIO, E. (2010b): *Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride deposition balance in the soil*. Contributions to science, 6 (1), Barcelona, 81-97.

CUSTODIO, E. (2011): *Evolución del conocimiento hidrogeológico e hidrológico de Canarias*. En M.C. Cabrera; J. Jiménez y E. Custodio (eds.): El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15 Homenaje póstumo al Dr. Ingeniero D. José Sáenz de Oiza, Ed. AIH-Grupo Español, 5-11.

CUSTODIO, E. (2012): *Deuterium excess in the Canary islands rainfall and groundwater*. 7º Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Donostia, San Sebastian.

CUSTODIO, E. 2015: *Comentarios sobre el Proyecto MASE en Canarias*. En: M.C. Cabrera, T. Cruz-Fuentes, V. Mendoza y M.P. Palacios (eds.), Actas II Workshop "Estudio, Aprovechamiento y Gestión del Agua en Terrenos e Islas Volcánicas". Las Palmas de Gran Canaria, Instituto Geológico y Minero de España y Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español: 29-36. ISBN: 978-84-938046-4-0.

CUSTODIO, E (2015a): *Minería del agua subterránea en España: aspectos hidrológicos, económicos y sociales*. AQUALOGY-Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. Fondo Documental de Aqualogy: 1-467.

CUSTODIO, E. y LLAMAS, R. (1976, 1983): *Hidrología Subterránea*. 2ª Edición corregida. Volumen 1 y 2. Ed. Omega. Barcelona, 2359 p.

CUSTODIO, E., LÓPEZ-GARCÍA, L. y AMIGÓ, E. (1981): *Planteamiento y ajuste de un modelo matemático de simulación de la isla de Tenerife*. Actas de la IV Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Instituto Geográfico Nacional. Madrid. III: 1369-1391.

CUSTODIO, E., HOPPE, J., HOYOS-LIMÓN, A., JIMÉNEZ, J., PLATA, A. y UDLUFT, P. (1987): *Aportaciones al conocimiento geohidrológico de Tenerife utilizando isótopos ambientales*. *Hidrología y Recursos Hidráulicos*, Madrid, XI, 263-280.

CUSTODIO, E. y MANZANO, M. (1992): *Estudio preliminar hidrogeoquímico e isotópico ambiental de la isla de la Gomera*. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XVI: 61-76.

CUSTODIO, E. y CABRERA, M.C. (2002): *¿Cómo convivir con la escasez de agua? El caso de las Islas Canarias*. *Boletín Geológico Minero*. Vol. 113, 3, 243-258.

Custodio, E. y Naranjo, G. (2013). *Deuterium excess in the Canary Islands rainfall and groundwater*. En: 7 Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Donostia-San Sebastián Donostia: Aranzadi Zientzia Elkarte, 2013: 435-438. ISBN: 978-84-941323-1-5.

D'ALESSANDRO, W., FEDERICO, C., LONGO, M. y PARELLO, F. (2004): *Oxygen isotope composition of natural waters in the Mt. Etna area*. *Journal of Hydrology*, 296: 282-299.

DANSGAARD, W., (1964): *Stable isotopes in precipitation*. *Tellus*, 16: 436-468.

D'OZOUVILLE, N., DEFFONTAINES, B., BENVENISTE, J., WEGMÜLLER, U., VIOLETT, S. y DE MARSILY, G. (2005): *DEM generation using ASAR (ENVISAT) for addressing the lack of freshwater ecosystems management, Santa Cruz Island, Galapagos*. *Remote Sensing of Environment*, 112: 4131-4147.

DROTRH/INAG (2001): *Plano regional da água. Relatório técnico*. Versão para consulta pública. DROTRH - INAG, Ponta Delgada.

DORTA ANTEQUERA, P. (1994): *Las inversiones térmicas en Canarias*. *Investigaciones geográficas*, nº 15: 109-124.

ECKSTEIN, Y. (1969): *Hydrogeology of a volcanic island Che Ju Do, Korea*. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology* XIV, 4:45-60.

ERIKSSON, E., KHUNAKASEM, V. (1969): *Chloride concentrations in groundwater recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain*. Journal of Hydrology, 7(2): 178-197.

ESTÉVEZ, E., PALACIOS, M.P., CRUZ, T., BENAVIDES, A., RODRÍGUEZ-DÍAZ, M.D., FERNÁNDEZ-VERA, J.R., MOLINA-DÍAZ, A., ROBLES-MOLINA, A. y CABRERA, M.C. (2012a): *Evaluación de la afección al acuífero del NE de Gran Canaria por el riego con aguas regeneradas en un campo de golf*. En: las aguas subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI. ed. Alh-grupo español.

ESTÉVEZ, E., CABRERA, M.C., MOLINA-DÍAZ, A., ROBLES-MOLINA, J. y PALACIOS-DÍAZ, P. (2012b): *Screening of emerging contaminants and priority substances (2008/105/eC) in reclaimed water for irrigation and groundwater in a volcanic aquifer (gran Canaria, Canary Islands, Spain)*. Science of the total environment 433: 538-546.

ESTÉVEZ, E., CABRERA, M.C., PALACIOS-DÍAZ, M.P., BENAVIDES, A., CRUZ-FUENTES, T., HERNÁNDEZ-QUESADA, M.P., MENDOZA-GRIMÓN, V., FERNÁNDEZ-VERA, J.R. y HERNÁNDEZ-MORENO, J.M. (2013a): *Los trabajos del programa CONSOLIDER-TRAGUA en Gran Canaria: estudio de la afección al medio por la reutilización de aguas regeneradas en la Cuenca del Barranco de Las Goteras*. En J.C. Santamarta (ed.): Avances en la investigación de los recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Ed. Colegio de Ingenieros de Montes: 179-195.

ESTÉVEZ, E., PALACIOS-DÍAZ, M.P., MOLINA-DÍAZ, A., ROBLES-MOLINA, J. y CABRERA, M.C. (2013b): *Los contaminantes emergentes en las aguas subterráneas: el caso del NE de Gran Canaria*. En N. González; E.E. Druse; M.M. Trovatto y P. Laurencena (eds.): Temas actuales de la Hidrología Subterránea. Ed. Universidad Nacional de La Plata (Argentina): 247-254.

ESTÉVEZ, E., HERNÁNDEZ-MORENO, J.M., FERNÁNDEZ-VERA, J.R. y PALACIOS-DÍAZ, M.P. (2014): *Ibuprofen adsorption in four agricultural volcanic soils*. Science of the Total Environment, 468-469: 406-414.

FALKLAND, A. (ed.); CUSTODIO, E. (1991): *Guide on the hydrology of small islands*. Studies and Reports in Hydrology, 49, UNESCO, Paris: 435 p.

FEDERICO, C., AIUPPA, A., ALLARD, P., BELLOMO, P., JEAN-BAPTISTE, P., PARELLO, F. y VALENZA, M. (2002): *Magma-derived gas influx and water-rock interactions in the volcanic aquifer of Mt. Vesuvius, Italy*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 66: 963-981.

FERNANDOPULLÉ, D. (1974): *Clasificación química del agua subterránea y factores que influyen hidroquímicamente en la isla de Gran Canaria*. Simposium Internacional de Hidrología en Terrenos Volcánicos. Lanzarote (Islas Canarias), 529-559.

FREUNDT, A. y SCHMINCKE, H.U. (1992): *Mixing of rhyolite, trachyte and basalt magma erupted from a vertically and laterally zoned reservoir, composite flow P1, Gran Canaria*. Contribution to Mineralogy and Petrology, 112: 1-19.

GABALDÓN, V., CABRERA, M.C. y CUETO, L.A. (1989): *Formación detrítica de Las Palmas: Sus facies y evolución sedimentológica*. ESF Meeting on Canarian volcanism. Abstracts, 210-215.

GARCÍA CACHO, L., DIEZ-GIL, J.L. y ARAÑA, V. (1994): *A large volcanic debris avalanche in the Pliocene Roque Nublo Stratovolcano, Gran Canaria, Canary Islands*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 63: 217-229.

GASPARINI, A. (1989): *Hydrochimie et géochimie isotopique de circulations souterraines en milieu volcanique sous climat sémi-aride (Gran Canarie, Îles Canaries)*. Tesis doctoral, Univ. Paris XI, 261 p.

- GASPARINI, A., CUSTODIO, E., FONTES, J.C., JIMÉNEZ, J. y NUÑEZ, J.A. (1990): *Exemple d'étude géochimiche et isotopique de circulations aquifers en terrain volcanique sous climat semi-aride (Amurga, Gran Canaria, Iles Canaries)*. Journal of Hidrology, 114: 61-91.
- GINGERICH, S.B. y BOSS, C.I. (2005): *Three-dimensional variable-density flow simulation of a coastal aquifer in southern Oahu, Hawaii, USA*. Hydrogeology Journal, 11: 240-248.
- GINGERICH, S.B. y OKI, E. (2000): *Ground Water in Hawaii*. USGS-Fact Sheet. <http://hi.water.usgs.gov/publications/pubs/fs/fs126-00.pdf>.
- GONFIANTINI, R. (1973): *Isotope study of Canary Island groundwater*. Proyecto SPA-15, 69, 515.
- GOURCY, L., BARAN, N. y VITTECOQ, B. (2009): *Improving the knowledge of pesticide and nitrate transfer processes using age-dating tools (CFC, SF6, 3H) in a volcanic island (Martinique, French West Indies)*. Journal of Contaminant Hydrology 108: 107-117.
- GRASSA, F., CAPASSO, G., FAVARA, R., INGUAGGIATO, S. (2006): *Chemical and isotopic composition of waters and dissolved gases in some thermal springs of Sicily and adjacent volcanic islands, Italy*. Pure and Applied Geophysics, 163: 781-807.
- GUILLOU, H., PÉREZ-TORRADO, F.J., HANSEN-MACHIN, A.R., CARRACEDO, J.C. y GIMENO, D. (2004): *The Plio-Quaternary volcanic evolution of Gran Canaria based on new K-Ar ages and magnetostratigraphy*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 135: 221-246.
- HAGEDORN, B., EL-KADI, A., MAIR, A., WHITTIER, R.B. y KYOOCHUL, H. (2011): *Estimating recharge in fractured aquifers of a temperate humid to semiarid volcanic island (Jeju, Korea) from water table fluctuations, and Cl, CFC-12 and 3H chemistry*. Journal of Hydrology, 409: 650-662.
- HAHN, J., LEE, Y., KIM, N., HAHN, C. y LEE, S. (1997): *The groundwater resources and sustainable yield of Cheju volcanic island, Korea*. Environmental Geology 33 (1), 43-53.
- HANSEN, A. (2009): *Volcanología y Geomorfología de la etapa de rejuvenecimiento Plio-Pleistocena de Gran Canaria (Islas Canarias)*. Tesis doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 384 p.
- HEILWEIL, V.M., SOLOMON, D.K., GINGERICH, S.B. y VERSTRAETEN, I.M. (2009): *Oxygen, hydrogen, and helium isotopes for investigating groundwater systems of the Cape Verde Islands, West Africa*. Hydrogeology Journal, 17: 1157-1174.
- HEILWEIL, V.M., HEALY, R.W. y HARRIS, R.N. (2012): *Noble gases and coupled heat/fluid flow modeling for evaluating hydrogeologic conditions of volcanic island aquifers*. Journal of Hydrology 464-465: 309-327.
- HERNÁN, F. (1976): *Estudio petrológico y estructural del complejo traquítico-sienítico de Gran Canaria*. Estudios Geológicos, 32: 279-324.
- HERNÁNDEZ, J., BOLUDA-BOTELLA, N., CABRERA, M.C. y CUSTODIO, E. (2010): *Temporal evolution of marine intrusion and other salinization processes in the volcanic-sedimentary aquifer of the east of Gran Canaria (Canary Islands, Spain)*. In Condesso de Melo, M.T.; Lebbe, L.; Cruz, J.V. y Coutinho, R.(eds.): SWIM21 Proceedings: 103-104.
- HERNÁNDEZ-QUESADA, P. (2007): *Estudio hidrogeológico del sector noroeste de Gran Canaria (Islas Canarias. España)*. Diploma de Estudios Avanzados (DEA), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas, 162 p.

- HERRERA, C., (2001): *Caracterización hidrogeoquímica del Macizo de Betancuria, Fuerteventura, Archipiélago de Canarias*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 225 p.
- HERRERA, C. y CUSTODIO, E. (2002): *Old marine water in Fuerteventura island deep formations*. 17th Salt Water Intrusion Meeting. Delft, Delft University of Technology, Fac. Civil Eng. and Geosciences: 481–488.
- HERRERA, C. y CUSTODIO, E. (2003). *Hipótesis sobre el origen de la salinidad de las aguas subterráneas en la isla de Fuerteventura*. Archipiélago de Canarias, España. Bol. Geol. Minero. Madrid: 114(4): 433–452.
- HERRERA, C. y CUSTODIO, E. (2008): *Conceptual hydrogeological model of volcanic Easter Island (Chile) after chemical and isotopic surveys*. Hydrogeology Journal, 16: 1329–1348.
- HERRERA, C. y CUSTODIO, E. (2014): *Groundwater flow in a relatively old oceanic volcanic island: The Betancuria area, Fuerteventura Island, Canary Islands, Spain*. Science of the Total Environment, 496: 531–550.
- HILDENBRAND, A., MARLIN, C., CONROY, A., GILLOT, P.Y., FILLY, A. y MASSAULT, M. (2005): *Isotopic approach of rainfall and groundwater circulation in the volcanic structure of Tahiti-Nui (French Polynesia)*. Journal of Hydrology 302: 187–208.
- HOERNLE, K.A, TILTON, G. y SCHMINCKE, H.U (1991): *Sr-Nd-Pb isotopic evolution of Gran Canaria: evidence for shallow enriched mantle beneath the Canary Islands*. Earth and Planetary Science Letters, 106: 44–63.
- HOERNLE, K.A. y SCHMINCKE, H.U (1993b): *The role of partial melting in the 15 Ma geochemical evolution of Gran Canaria: A Blob model for the Canary Hotspot*. Journal of Petrology, 34: 599–626.
- HOPPE, J. (1987): *Zur Hydrogeologie der Insel Teneriffa unter besonderer Berücksichtigung der Isotopenhydrogeologie [The Hydrogeology of the Tenerife Island in Special Consideration on Isotope Hydrology]*. Journal of the Dept. of Hydrogeology and Environment, University of Würzburg (ISSN 09309-3757), vol. 9, 115 pp.
- HOERNLE, K., ZHANG, Y.S. y SCHMINCKE, H.U. (1995): *Seismic and geochemical evidence for large-scale mantle upwelling beneath the eastern Atlantic and western and central Europe*. Nature, 374: 34–39.
- IGLESIAS, M., CUSTODIO, E., GIRALDEZ, J. V., MANZANO, M. y ORDÓÑEZ, R. (1996): *Caracterización química de la lluvia y estimación de la recarga en el área de El Abalario, Doñana, Huelva*. IV Simposio sobre el Agua en Andalucía, 99–121.
- IGME (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA) (1984): *Control piezométrico y de calidad de las aguas subterráneas en los acuíferos costeros de la isla de Gran Canaria. Análisis del periodo 1979-1983*. Ed. IGME, Colección informe, 76 p.
- INGUAGGIATO, S., MARTIN-DEL POZZO, A.L., AGUAYO, A., CAPASSO, G., FAVARA, R. (2005): *Isotopic, chemical and dissolved gas constraints on spring water from Popocatepetl volcano (México): evidence of gas-water interaction between magmatic component and shallow fluids*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 141: 91–108.
- IZQUIERDO, T. (2014): *Conceptual hydrogeological model and aquifer system classification of a small volcanic island (La Gomera; Canary Islands)*. Catena, 114: 119–128.

IZQUIERDO, T., HERRERA, R. y MARQUEZ, A. (2011): *Modelo conceptual del sistema acuífero de Enchereda (La Gomera, Islas Canarias): contribuciones a otras islas volcánicas*. Estudios Geológicos, 67(1): 41-58.

IZUKA, S.K. y GINGERICH, S.B. (2003): *A thick lens of fresh groundwater in the southern Lihue Basin, Kauai, Hawaii, USA*. Hydrogeology Journal, 6: 243-263.

JOIN, J.L., FOLIO J.L., ROBINEAU, B. (2005): *Aquifers and groundwater within active shield volcanoes. Evolution of conceptual models in the Piton de la Fournaise Volcano*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 147: 187-201.

KOH, D.C, HA, H., LEE, K.S., YOON, Y.Y y KO, K.S. (2012): *Flow paths and mixing properties of groundwater using hydrogeochemistry and environmental tracers in the southwestern area of Jeju volcanic island*. Journal of Hydrology, 432-433: 61-74.

KÖNIG, B. (1997): *Determination of solute fluxes and balances in the groundwater of the volcanic island of La Palma (Canary Islands)*. Tesis doctoral. Christian-Albrechts-Universität (Kiel, Germany). Berichte - Reports, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, nr. 84. 201 p + Anejos.

KÖNIG, B.; BISTRY, TH. Y MATTHESS, G. (1998): *Hydrogeologische und hydrochemische Situation der vulkanischen Ozeaninsel La Palma (Kanarische Inseln)*. Geowiss. Mitt. von Thüringen, 6: 99-169.

LACHASSAGNE, P. Y MARÉCHAL, J.C., (2011): *Les ressources en eau souterraine en contexte volcanique insulaire*. Géosciences 14: 42-49.

MACAU VILAR, F. y HERNÁNDEZ DEL TORO, M. (1955): *Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Barranco de la Retamilla, Andén y de la Virgen, hasta el Naciente de las Madres*.

MACAU VILAR, F. (1957): *Estudio hidrológico de Gran Canaria*. Anuario de Estudios Atlánticos, 3.p. 9-46.

MACDONALD, G.A., ABBOT, A.T., PETERSON, F.L. (1983): *Volcanoes in the Sea. The Geology of Hawaii*. Univ. Hawai'i Press, Honolulu: 517 p.

MAC-21 (1980): *Proyecto de Planificación y Explotación de los Recursos de agua en el Archipiélago Canario*. Comisión interministerial Coordinadora de las actuaciones del Estado en Materia de Agua en las Islas Canarias.

MARRERO, R. (2010): *Modelo Hidrogeoquímico del acuífero de Las Cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 501 p.

MARRERO, R., LOPEZ, D., HERNÁNDEZ, P.A., PÉREZ, N.M. (2008): *Carbon dioxide discharged through Las Cañadas' aquifer, Tenerife, Canary Islands*. Pure and Applied Geophysics, Volumen especial: Terrestrial fluids, earthquakes and Volcanoes: The Hiroshi Wakita vol. III, 165: 147-172.

MARRERO, R., PÉREZ, N., MELIÁN, G., PADRÓN, E. y ALCALÁ, F.J. (2010): *Recharge estimation through an atmospheric chloride mass balance at La Cañadas hilly aquifer, northern Tenerife Island*. In Condesso de Melo, M.T.; Lebbe, L.; Cruz, J.V. y Coutinho, R.(eds.): SWIM21 Proceedings: 219-222.

MCDUGALL, I. y SCHMINCKE, H.U. (1976): *Geochronology of Gran Canaria, Canary Islands: Age of shield building volcanism and other magmatic phases*. Bulletin of Volcanology, 40: 1-21.

- MEHL, K.W. y SCHMINCKE, H.U. (1999): *Structure and emplacement of the Roque Nublo debris avalanche deposit, Gran Canaria, Spain*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 94: 105-134.
- MORGAN, W.J. (1971): *Convection plumes in the lower mantle*. Nature, 230: 42-43.
- MOOK, W.G. (2002): *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications*. Volumen I. Ed. IAEA, Viena, 271 p.
- MUÑOZ, J.S., (2005): Caracterización hidrogeológica del acuífero de la Aldea (Gran Canaria). Tesis doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 310 p. <http://acceda.ulpgc.es/handle/10553/1841>
- MUÑOZ-CARPENA, R., CABRERA, M.C., SOCORRO, A.R., GONZÁLEZ, G., PONCELA, R., HERNÁNDEZ-MORENO, J.M. y BELTRÁN, J. (1998): *Contaminación por plaguicidas en acuíferos y suelos en las Islas Canarias. Comparación de métodos de muestreo*. En I. Morell y L. Candela (eds.): Plaguicidas. Aspectos ambientales, analíticos y toxicológicos, Ed. Universidad Jaume I: 75-96.
- NARANJO, G., CRUZ-FUENTES, T., CABRERA, M.C., MARTÍN, L.F. y CUSTODIO, E. (2014): *Avances en la estimación de la recarga natural mediante la aplicación del método del balance de cloruros atmosféricos al acuífero del Norte de Gran Canaria*. En J. Gómez-Hernández y J. Rodrigo-Illari (eds.): CIAS2014, II Congreso Ibérico de las aguas subterráneas: 619-640.
- NARANJO, G.; CABRERA, M.C.; CRUZ-FUENTES, T.; MARTÍN, L.F. y CUSTODIO, E. (2015): *Cuantificación de la recarga natural al acuífero del Norte de Gran Canaria mediante el balance diario de agua en el suelo*. En M.C. Cabrera; T. Cruz-Fuentes; V. Mendoza-Grimón y M.P. Palacios-Díaz (eds.): II Workshop sobre "Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas": 247-254.
- NIER, A.O. (1950): *A redetermination of the relative abundances of the isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, argon and potassium*. Phys. Rev. 77: 789-793.
- OKI, E., SOUZA, W.R., BOLKE, E.L. y BAUER, G.R. (1998): *Numerical analysis of the hydrogeologic controls in a layered coastal aquifer system, Oahu, Hawaii, USA*. Hydrogeology Journal, 6: 243-263.
- PATERNOSTER, M., LIOTTA, M. y FAVAR, R. (2008): *Stable isotope ratios in meteoric recharge an groundwater at Mt. Vultere volcano, southern Italy*. Journal of Hidrology, 348: 87-97.
- PETERSON, F.L. (1972): *Water development on Tropic Volcanic Islands*. Type example: Hawaii. Ground Water Vol. 10, nº 5: 18-23.
- PÉREZ-LÓPEZ, C. (2004): *Técnicas de análisis multivariante de datos: aplicaciones con SPSS*. Ed. Pearson educación, Madrid, 646 p.
- PÉREZ-TORRADO, F.J, (1992): *Volcanoestratigrafía del Grupo Roque Nublo, Gran Canaria*. Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 510 p.
- PÉREZ-TORRADO, F.J, (2000): *Volcanoestratigrafía del Grupo Roque Nublo, Gran Canaria*. Cabildo de Gran Canaria y ULPGC, 459 p.
- PÉREZ TORRADO, F.J. (2008): *Geología de Gran Canaria*. En: Itinerarios Geológicos por las Islas Canarias. Gran Canaria (F.J. Pérez Torrado y M.C. Cabrera, eds.). Sociedad Geológica de España, Geo-Guías, 5: 41-46.



PÉREZ TORRADO, F.J., MARTÍ, J., MANGAS, J. y DAY, S. (1997): *Ignimbrites of the Roque Nublo Group, Gran Canaria, Canary Islands*. Bulletin of Volcanology, 58: 647-654.

PLAN HIDROLÓGICO DE GRAN CANARIA (PHGC) (1991): *Actualización del conocimiento hidrogeológico de Gran Canaria*. Consejo Insular de aguas de Gran Canaria. Informe interno, sin publicar.

PLAN HIDROLÓGICO DE GRAN CANARIA (PHGC) (1992): *Memoria del Plan Hidrológico de Gran Canaria*. Consejo Insular de aguas de Gran Canaria. Informe interno, sin publicar.

PLAN HIDROLÓGICO DE GRAN CANARIA (PHGC) (1998): *Memoria del Plan Hidrológico de Gran Canaria*. Consejo Insular de aguas de Gran Canaria. Informe interno, sin publicar.

PLAN HIDROLÓGICO DE GRAN CANARIA (PHGC) (2010): *Memoria del Plan Hidrológico de Gran Canaria*. Consejo Insular de aguas de Gran Canaria. Informe interno, sin publicar.

PLAN RECTOR DE USO Y GESTIÓN DEL PARQUE RURAL DE DORAMAS (P.R.U.G. Doramas) (2004): Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial del Gobierno de Canarias.

PRADA, S. Y OLIVEIRA DA SILVA, M. (2001): *Fog precipitation on the Island of Madeira (Portugal)*. Environmental Geology, 41: 384-389.

PRADA, S., MENEZES DE SEQUEIRA, M., FIGUEIRA, C. y OLIVEIRA DA SILVA, M. (2005): *Groundwater behaviour in Madeira, volcanic island (Portugal)*. Hydrogeology Journal, 13: 800-812.

PRADA, S., OLIVEIRA DA SILVA, M. Y CRUZ, J.V. (2009): *Groundwater behaviour in Madeira, volcanic island (Portugal)*. Agricultural and Forest Meteorology, 149: 1179-1187.

PRADA, S., MENEZES DE SEQUEIRA, M., FIGUEIRA, C. y VASCONCELOS, R. (2012): *Cloud water interception in the high altitude tree heath forest (Erica arborea L.) of Paul da Serra Massif (Madeira, Portugal)*. Hydrological Processes 26: 202-212.

PRADA, S., FIGUEIRA, C., AGUILAR, N. y CRUZ, J.V. (2014): *Stable isotopes in rain and cloud water in Madeira: contribution for the hydrogeologic framework of a volcanic island*. Environmental Earth Sciences, 73: 2733-2747.

PRYET, A. (2012): *Hydrogeology of volcanic islands: a case-study in the Galapagos Archipelago (Ecuador)*. Tesis doctoral. L'Université Pierre et Marie Curie. 288p.

QUIRANTES, F. (1981): *El regadío en Canarias*. Ed. Interinsular Canaria, 452 p.

REGALADO, C. y RITTER, A. (2013): Comment on Prada et al. 2012. 'Cloud water interception in the high altitude tree heath forest (Erica arborea L.) of Paul da Serra Massif (Madeira, Portugal)'. Hydrological Processes 26: 202-212. Hydrological Processes, 27, 1515-1517.

RODRIGUEZ-GONZALEZ, A. (2009). *El vulcanismo Holoceno de Gran Canaria: aplicación de un sistema de información geográfico*. Tesis doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 424 p.

SÁNCHEZ DIAZ, J. (1995): *Cartografía del potencial del medio natural de Gran Canaria*. Cabildo Insular de Gran Canaria, 165 p.

- SCHMINCKE, H.U. (1967): *Cone-sheet swarn, resurgence of Tejeda Caldera and the early geologic of Gran Canaria*. Bulletin Volcanologique, 31: 153-162.
- SCHMINCKE H. U. (1973): *Magmatic evolution and tectonic regime in the Canary, Madeira and Azores Island groups*. Geological Society of America Bulletin, 84: 633-648.
- SCHMINCKE, H.U. (1976): *Geology of the Canary Islands*. Biogeography and Ecology in the Canary Islands (G. Kunkel, ed.). W. Junk, The Hague, 67-184.
- SCHMINCKE, H.U. (1982): *Volcanic and chemical evolution of Canary Islands*. Geology of the Northwest African Margin (U. von Rad, K. Hinz, M. Sarnthein, E. Seibold, eds.). New York, Springer-Verlag, 273-306.
- SCHMINCKE, H.U (1993): *Geological field guide of Gran Canaria*. 6 edición. Eds. Pluto-Press, Kiel, 227 p.
- SCHMINCKE, H.U. y SUMITA, M. (1998): *Volcanic evolution of Gran Canaria reconstructed from apron sediments: synthesis of VICAP project drilling*. Proc. ODP, Sci. Results, 157 (P.P.E. Weaver, H.U. Schmincke, J.V. Firth y W. Duffield, eds.). College Station, TX (Ocean Drilling Program), 443-469.
- SCHNEIDER, J.L., PÉREZ-TORRADO, F.J., GIMENO, D., WASSMER, CABRERA, M.C. y CARRACEDO, J.C. (2004): *Sedimentary signatures of the entrance of coarse grained volcanoclastic flows into the sea: the example of the breccia units of Las palmas Detritic Formation (Mio-Pliocene, Gran Canaria, Eastern Atlantic, Spain)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 138(3-4): 295-323.
- SCHOLL, M.A., INGEBRITSEN, S.E., JANIK, C.J. y KAUAHIKAUA, J.P. (1996): *Use of precipitation and groundwater isotopes to interpret regional hydrology on a tropical volcanic island: Kilauea volcano area, Hawaii*. Water Resources Research, 32(12): 3525-3537.
- SKUPIEŃ, E. (1998): *Wody podziemne w skałach wulkanicznych wyspy Gomery [Aguas subterráneas en las rocas volcánicas de La Gomera]*. Facultad de Geología, Geofísica y Protección del Ambiente. Cracovia (Polonia). 121 pp.
- SOCORRO, J.S., CARRACEDO J.C., PÉREZ-TORRADO F.J. y HANSEN A. (2005): *Canarias, volcanes en el mar*. Servicio de Publicaciones de la Caja General de Ahorros de Canarias, 39 p.
- SOLER, C. y LOZANO, O. (1985): *El agua en canarias*. Boletín de Informaciones y Estudios del Servicio Geológico, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid, 44, 48 p.
- SPA-15 (1975): *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (SPA/69/515)*. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Obras Hídricas.
- STEIGER, R. y JAGER, E. (1977): *Subcommission on Geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology*. Earth Plan. Sci. Lett., 36: 359-362.
- SUAREZ MORENO, F. (2009): *El agua en Canarias, Historia, estrategias y procedimientos didácticos*. Bienmesabe.org. Infonortedigital.com y Artevirgo.blogia.com, 57p.
- THIRLWALL, M.F., JENKINS, C., VROON, P.Z. y MATTEY, D.P. (1996): *Crustal interaction during construction of ocean islands: Pb-Sr-Nd-O isotope geochemistry of the shield basalts of Gran Canaria, Canary Islands*. Chemical Geology 135 (1997): 233-262.

VEEGER, A.I. (1991): *Geochemical methods for evaluating the origin and evolution of ground water in volcanic rocks*. Tesis doctoral, University of Arizona, 241 p.

VIANA, M. (2003): *Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores norte y este de la Península Ibérica y Canarias*. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, 386 p.

VIANA M., QUEROL X., ALASTUEY A., CUEVAS E. y RODRÍGUEZ S. (2002): *Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network*. *Atmospheric Environment* 36: 5861-5875.

VIOLETTE, S., LEDOUX, E., GOBLET, P. Y CARBONNEL, J.P. (1997): *Hydrologic and thermal modeling of an active volcano: the Piton de la Fournaise, Reunion*. *Journal of Hydrology*, 191: 37-63.

VIOLETTE, S., D'OZOUVILLE, N., PRYET, A., DEFFONTAINES, B., FORTIN, J. y ADELINET, M. (2014): *Hydrogeology of the Galápagos Archipelago: An Integrated and Comparative Approach between Islands*. In K. S. Harpp, E. Mittelstaedt, N. d'Ozouville, and D. W. Graham (eds.): *The Galápagos: A Natural Laboratory for the Earth Sciences*, Ed. American Geophysical Union, *Geophysical Monograph* 204: 167-183.

VITTECOQ, B. (2007): *Elaboration d'un système d'information sur les eaux souterraines de la Martinique: identification et caractérisations quantitatives*. BRGM/RP-55099-FR. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55099-FR.pdf>.

VITTECOQ, B., DEPARIS, J., VIOLETTE, S., JAOUËN, T., LACQUEMENT, F., COULOMB, R. Y PARIZOT, M. (2015): *Validación del modelo hidrogeológico conceptual de la isla de Mayotee mediante la perforación de ocho pozos*. En M.C. Cabrera, T. Cruz-Fuentes M.P.; V. Mendoza-Grimón y Palacios-Díaz, M.P. (Eds.); II Workshop "Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas", 303-310.

VITTECOQ, B., DEPARIS, J., VIOLETTE, S., JAOUËN, T. y LACQUEMENT, F. (2014): *Influence of successive phases of volcanic construction and erosion on Mayotte's Island's hydrogeological functioning as determined from a helicopter-borne resistivity survey correlated with borehole geological and permeability data*. *Journal of Hydrology*, 509: 519-538.

WARRIER, R.B., CASTRO, M.C., HALL, C.M. (2012): *Recharge and source-water insights from the Galápagos Islands using noble gases and stable isotopes*. *Water Resources Research*, 48, W03508, doi: 10.1029/2011WR010954.

YUSTSEVER, Y. y GAT, JR. (1981): *Atmospheric waters. Stable isotope hydrology, deuterium and oxygen-18 in the water cycle*, IAEA. Tech. Rep. Ser. 210: 103-143.

Archivos y Registro de Aguas del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria.

Archivos y Registro de la Heredad de Aguas de Arucas-Firgas.

Archivos y Registro de la Heredad de Aguas de Fontanales.

Wed de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación del Gobierno de Canarias.

Wed del Cabildo Insular de Gran Canaria.

Wed del Instituto Nacional de Estadística

<http://www.infonortedigital.com/publicaciones/docs/106.pdf>. (29/07/2015)