



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

HIDROGEOLOGÍA DEL SISTEMA
ACUÍFERO VOLCÁNICO DE LA
PALMA (ISLAS CANARIAS)

Roberto Poncela Poncela



Tesis

Doctorales

www.eltallerdigital.com

UNIVERSIDAD de ALICANTE



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

**HIDROGEOLOGÍA DEL
SISTEMA ACUÍFERO VOLCÁNICO
DE LA PALMA (ISLAS CANARIAS)**

Universitat d'Alacant

ROBERTO PONCELA PONCELA

TESIS DOCTORAL

ALICANTE, NOVIEMBRE 2015



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

HIDROGEOLOGÍA DEL SISTEMA ACUÍFERO VOLCÁNICO DE LA PALMA (ISLAS CANARIAS)

ROBERTO PONCELA PONCELA

**Memoria presentada para aspirar al grado de
DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE**

**PROGRAMA DE DOCTORADO:
INGENIERÍA DE LOS MATERIALES, AGUA Y TERRENO**

Dirigida por:

Javier García Barba, Dr. por la Universidad de Alicante

y

Juan Carlos Santamarta Cerezal, Dr. por la Universidad Politécnica de Madrid

Alicante, noviembre de 2015

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	ix
CAPÍTULO 1. Introducción	3
CAPÍTULO 2. Descripción del Medio Físico de La Palma	15
CAPÍTULO 3. Hidrogeología de La Palma.....	61
CAPÍTULO 4. Hidroquímica y Calidad de las Aguas.....	107
CAPÍTULO 5. Isótopos Ambientales.....	145
CAPÍTULO 6. Revisión del Modelo Hidrogeológico Insular Conceptual.....	181
CAPÍTULO 7. Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación	195
Referencias Bibliográficas	207

ANEJOS

ANEJO 1. Listado de Parámetros Físico - Químicos	225
--	-----

MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Aspectos generales	4
1.2. Objetivos de la Investigación	6
1.3. Metodología, Hipótesis y Plan de Trabajo	7
1.3.1. Metodología	7
1.3.2. Hipótesis.....	7
1.3.3. Plan de Trabajo	7
1.4. Hidrogeología de islas y terrenos volcánicos. Estado del arte	8
1.4.1. Situación en Canarias.....	9
1.4.2. Situación en La Palma.....	9
1.5. Sistemática empleada	11
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL MARCO FÍSICO DE LA PALMA	15
2.1. Marco Regional.....	16
2.1.1. Situación geográfica.....	16
2.1.2. Marco Geológico.....	17
2.1.3. Marco Hidrogeológico	19
2.2. Climatología y Meteorología	21
2.2.1. Rasgos climáticos de La Palma.....	21
2.2.2. Principales parámetros meteorológicos	23
2.2.2.1. Precipitaciones locales	25
2.2.2.2. Temperaturas locales.....	29
2.2.2.3. Otras variables.....	30
2.2.3. Balances hidrometeorológicos	31
2.2.3.1. Introducción	31
2.2.3.2. Situación en La Palma.....	32
2.2.3.3. Resultados en La Palma	33
2.3. Geología de La Palma	38
2.3.1. Geología general	38
2.3.1.1. Introducción	38
2.3.2. Geología insular	39
2.3.2.1. Edificios volcánicos	39
2.3.2.2. Complejo Basal	42
2.3.2.3. Unidades volcánicas subaéreas	43

2.3.2.3.1. Edificio Taburiente I o Edificio Garafía	43
2.3.2.3.2. Edificio Taburiente II o Edificio Taburiente (Inferior y Superior).....	47
2.3.2.3.3. Edificio Cumbre Nueva	49
2.3.2.3.4. Edificio Bejenado y sedimentos del Time	52
2.3.2.3.5. Edificio Dorsal Sur o Cumbre Vieja	55
2.3.3. Geomorfología y morfoestructura.....	57

CAPÍTULO 3. HIDROGEOLOGÍA DE LA PALMA 61

3.1. Análisis Histórico.....	62
3.2. Evolución de caudales.....	65
3.2.1. Situación actual	70
3.3. Parametrización Hidrogeológica.....	73
3.3.1. Introducción	73
3.3.2. Parámetros hidrogeológicos	74
3.3.2.1. Transmisividad.....	74
3.3.2.2. Permeabilidad.....	77
3.3.2.3. Coeficiente de almacenamiento	77
3.3.2.4. Gradiente hidráulico y piezometría.....	78
3.3.3. Coeficiente de agotamiento a partir de hidrogramas de caudales.....	80
3.3.3.1. Cálculo del coeficiente de agotamiento	81
3.3.3.2. Aplicación al sistema acuífero volcánico de La Palma.....	84
3.3.4. Difusividad hidráulica en acuíferos volcánicos	87
3.3.4.1. Metodología de cálculo de la difusividad hidráulica a partir del coeficiente de agotamiento.....	87
3.3.4.2. Limitaciones del método	88
3.3.4.3. Aplicación al sistema acuífero de La Palma	88
3.3.5. Distancia de influencia y espacio cautelar de protección	89
3.3.5.1. Aproximación de Lembke modificada.....	89
3.3.5.2. Aplicación a la galería Boca Este del Túnel de Tránsito	92
3.3.5.3. Método de Sáenz de Oiza modificado	95
3.3.5.4. Valoración del método	95
3.3.6. Perturbaciones al sistema hidrogeológico.....	97
3.4. Masas de Agua Subterránea	100
3.4.1. Descripción de las masas de agua subterránea en La Palma.....	100
3.4.2. Recursos subterráneos por tipología de captaciones.....	102

CAPÍTULO 4. HIDROQUÍMICA Y CALIDAD DE LAS AGUAS 107

4.1. Análisis Histórico.....	108
4.2. Caracterización Hidroquímica de las Masas de Agua Subterránea	109
4.2.1. Observaciones sobre la hidroquímica de fondo	109
4.2.2. Definiciones para la caracterización del estado químico	110

4.2.3. Caracterización hidroquímica por masas	111
4.2.3.1. Masa LP001: Acuífero Insular - Vertientes	111
4.2.3.2. Masa LP002: Acuífero Costero.....	113
4.2.3.3. Masa LP003: Acuífero Complejo Basal	116
4.2.3.4. Masa LP004: Acuífero Dorsal Sur.....	118
4.2.3.5. Masa LP005: Acuífero Valle de Aridane - Tazacorte.....	121
4.2.4. Caracterización hidroquímica insular	123
4.2.5. Presiones e impactos actuales. Estimación de riesgos	125
4.2.5.1. Presiones e impactos actuales	125
4.2.5.2. Estimación del riesgo	127
4.2.6. Valores umbral y de referencia. Valor paramétrico adoptado (VPA).....	130
4.2.6.1. Precisiones sobre el criterio de intrusión marina	131
4.3. Aguas Minerales, Mineromedicinales y Termales.....	133
4.3.1. Aguas minerales	133
4.3.2. Aguas mineromedicinales y termales	133
4.3.2.1. Hidroquímica y geotermómetros	134
4.3.2.2. Aplicación a la Fuente Santa.....	136
4.4. Mineralización de las Aguas Subterráneas por CO ₂ de Origen Volcánico.....	141
CAPÍTULO 5. ISÓTOPOS AMBIENTALES	145
5.1. Isótopos Estables del Agua	146
5.1.1. Introducción	146
5.1.2. Fraccionamiento isotópico	147
5.1.3. Composición isotópica de las aguas meteóricas	148
5.1.4. Relación entre la composición isotópica de las precipitaciones y de las aguas subterráneas	149
5.1.5. Aplicación a La Palma	150
5.1.5.1. Relación $\delta^{18}\text{O}$ (‰) - δD (‰)	153
5.1.5.2. Relación altitudinal - $\delta^{18}\text{O}$ (‰) y δD (‰).....	157
5.1.5.3. Valoración del método	161
5.2. Tritio.....	162
5.2.1. Introducción	162
5.2.2. Concentración de tritio en las precipitaciones locales	163
5.2.3. Contenido de tritio en las aguas subterráneas	165
5.2.4. Modelo interpretativo del tritio en el sistema acuífero volcánico de La Palma.....	166
5.2.4.1. Función de entrada de tritio	167
5.2.4.2. Modelo de mezcla total o exponencial.....	170
5.2.4.3. Modelo de mezcla simplificado exponencial decreciente.....	171
5.2.4.4. Valoración de los resultados	176

CAPÍTULO 6. REVISIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO INSULAR CONCEPTUAL.....	181
6.1. Antecedentes	182
6.2. Actualización del Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	184
6.3. Funcionamiento Hidrodinámico del Sistema Acuífero Volcánico de La Palma	188
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	195
7.1. Conclusiones	196
7.1.1. Mejora y propuesta metodológica para la parametrización hidrogeológica	196
7.1.2. Aplicación de técnicas isotópicas ambientales	197
7.1.3. Redefinición del modelo hidrogeológico conceptual.....	198
7.2. Resumen Final.....	201
7.3. Futuras Líneas de Investigación.....	203
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	207
ANEJO 1. LISTADO DE PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS.....	225



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Situación geográfica de la zona de estudio. Base cartográfica: GOOGLE® y SITCAN (Consejería de Obras Públicas, Transportes y Política Territorial – GRAFCAN).	16
Figura 2.	Mapa geológico de la isla de La Palma (de la Nuez, et. al., 2008).	18
Figura 3.	Sectores climáticos de La Palma (CLIMCAN-010, 2010).	22
Figura 4.	Situación de los principales estaciones meteorológicas de referencia de la red del AEMET en La Palma. Fuente: AEMET.	26
Figura 5.	Arriba: Mapa de isoyetas medias de La Palma (APHP, 2012 y 2015). Abajo: Distribución mensual ponderada de las precipitaciones (1934-2014).	27
Figura 6.	Precipitación anual de dos estaciones de referencia (C147U y C139E). Fuente: AEMET. Desviación acumulada de las precipitaciones.	28
Figura 7.	Arriba: Zonas térmicas de La Palma (CLIMCAN-010, 2010). Abajo: Distribución mensual ponderada de las temperaturas (1934-2014).	30
Figura 8.	Gradiente termométrico de La Palma. Fuente: AEMET.	31
Figura 9.	Comparación de resultados de ET_0 calculados mediante las formulaciones de Thornthwaite y de Hargreaves en La Palma.	34
Figura 10.	Balances hidrometeorológicos en la Isla de La Palma para diferentes escenarios climáticos (arriba: medio; centro: ciclo seco y abajo: ciclo húmedo). Fuente de datos termoplúviométricos: AEMET. Fuente de datos de radiación: Tablas FAO (2006).	36
Figura 11.	Mapa geológico de la Isla de La Palma (CSIC-IGME, 2001).	40
Figura 12.	División cronoestratigráfica de la Isla de La Palma (Carracedo, 2011).	41
Figura 13.	Diversas litologías y aspecto del Complejo Basal.	44
Figura 14.	Diversas litologías y aspecto del Edificio Taburiente I o Edificio Garafía.	45
Figura 15.	Diversas litologías y aspecto del Edificio Taburiente II (Inferior y Superior) o Edificio Taburiente.	48
Figura 16.	Diversas litologías y aspecto del Edificio Cumbre Nueva (o prolongación del Edificio Taburiente II Superior).	51
Figura 17.	Diversas litologías y aspecto del Edificio Bejenado y sedimentos de El Riachuelo.	53
Figura 18.	Diversas litologías y aspecto de los sedimentos del Time.	54
Figura 19.	Diversas litologías y aspecto del Edificio Dorsal Sur o Cumbre Vieja.	56
Figura 20.	Geomorfología y morfoestructura de La Palma. Izquierda: zonación morfoestructural. Derecha arriba: hipsometría. Derecha abajo: pendientes.	58
Figura 21.	Infraestructura de captación de aguas subterráneas (arriba derecha) y transporte y regulación en alta (arriba derecha) en La Palma. Abajo: evolución temporal del caudal alumbrado en función de la longitud perforada (CIAP, 2009).	63

Figura 22. Distribución histórica de caudales de galerías. Arriba: LP001. Abajo: zona septentrional y nororiental. Fuente: elaboración propia a partir de datos de CIAP y de las Comunidades de Usuario y particulares.	66
Figura 23. Distribución histórica de caudales de galerías. Arriba: zona centro-occidental. Abajo: zona oriental.	67
Figura 24. Distribución estadística de caudales históricos de galerías (periodo de referencia analizado 1972-2013).	68
Figura 25. Distribución estadística de caudales históricos de galerías (periodo de referencia analizado 1972-2013) por zonas: Caldera y zona Norte (arriba), Barlovento-Sauces (centro) y Vertiente oriental (abajo).	69
Figura 26. Distribución de la extracción de aguas subterráneas por municipios en La Palma (revisada de APHP, 2012 y 2015).	72
Figura 27. Interpretación de un ensayo de recuperación a partir del cierre hidráulica de una galería. Aplicación a partir de los datos ponderados en zona de intracaldera (LP001.- Acuífero insular-vertientes.	76
Figura 28. Superficie freática insular (PHP, 2001).	79
Figura 29. Tipología de las curvas de descarga en función de la influencia de la recarga natural. Arriba: tipo I, en el centro: tipo II, abajo: tipo III.	82
Figura 30. Cálculo del coeficiente de agotamiento a partir del ajuste del tramo lineal de la relación LogQ-Tiempo.	84
Figura 31. Drenaje de un frente saturado y transporte mediante canal o tubería en galerías de La Palma. Foto: Roberto Poncela.	85
Figura 32. Tipología de las curvas sintéticas de agotamiento de caudales en galerías de La Palma (adaptado de Poncela, 2009).	85
Figura 33. Distribución espacial de la variación de la difusividad hidráulica (T/S, en m ² /día) en La Palma (actualizada de Poncela, 2009).	90
Figura 34. Galerías Boca Este del Túnel de Traslase e Hidráulica Breña Alta en el Arco de Cumbre (masa de agua subterránea LP001). Cartografía base: IGN.	93
Figura 35. Ábaco para la obtención de los valores α y β en función de la relación entre la longitud saturada de la galería y la anchura de la superficie piezométrica (extraída de Sáenz de Oiza, 2011).	96
Figura 36. Localización de las masas de agua subterránea en La Palma (extraído de Poncela y Skupien, 2013).	102
Figura 37. Diagrama de Piper de la masa de agua subterránea LP001 (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).	113
Figura 38. Diagrama de Piper de la masa de agua subterránea LP002 (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).	114
Figura 39. Diagrama de Piper de la masa de agua subterránea LP003 (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).	118
Figura 40. Diagrama de Piper de la masa de agua subterránea LP004 (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).	119
Figura 41. Diagrama de Piper de la masa de agua subterránea LP005 (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).	123

Figura 42. Facies hidroquímicas de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).....	124
Figura 43. Principales presiones antropogénicas significativas (APHP, 2012 y 2015; Poncela y Skupien, 2013).	126
Figura 44. Evaluación del riesgo en La Palma (APHP, 2012 y 2015; Poncela y Skupien, 2013).	129
Figura 45. Diagramas de Stiff y de Piper de las aguas alumbradas en el macizo volcánico del Edificio Cumbre Vieja (adaptado de Poncela y Skupien, 2009; 2013).....	137
Figura 46. Surgencias del manantial termal costero de la Fuente Santa (arriba y abajo izquierda: zona de poceta D; abajo derecha: zona de poceta E).	138
Figura 47. Distribución del contenido de isótopos estables en las aguas subterráneas de la Isla de La Palma. Arriba: situación promedio. Abajo: en verde (Veeger, 1991, en azul (ITGE, 1993) y en morado (Poncela, periodo 2006-2015).	154
Figura 48. Distribución del contenido de isótopos estables en las aguas subterráneas de la Isla de La Palma. Arriba: situación promedio de galería y manantiales. Abajo: en verde (Veeger, 1991) y en morado (Poncela, periodo 2006-2015).....	155
Figura 49. Representación del nuevo ajuste altitudinal para la altura de recarga (m) en función del contenido isotópico expresado en $\delta^{18}\text{O}$ (‰) y δD (‰).....	159
Figura 50. Relación entre el contenido en isótopos estables y la altitud en La Palma. Arriba: $\delta^{18}\text{O}$ (‰) - Altura (m). Abajo: δD (‰) - Altura (m). Rectas altitudinales: roja (Veeger, 1991), azul (Poncela, 2015).....	160
Figura 51. Concentración de tritio ponderada anual para las precipitaciones locales en las Canarias Occidentales. Aplicación a La Palma.....	167
Figura 52. Tiempo de residencia del agua subterránea en el sistema acuífero volcánico insular de La Palma en función de la concentración de tritio muestreado en captaciones de agua subterránea de la isla. Año de referencia para el cálculo: 2014. Actualizado de Poncela (2006, 2014).....	171
Figura 53. Concentración de tritio ponderada anual para las precipitaciones locales en las Canarias Occidentales. Aplicación a La Palma. En negro, ajuste del tramo de decaimiento natural al coeficiente $\lambda' = 0,15 \text{ años}^{-1}$	172
Figura 54. Representación de la evolución temporal del contenido en tritio en función del tiempo de residencia τ (años) para el año considerado, tomando como referencia de cálculo el pico de 1963. Aplicación a La Palma.	174
Figura 55. Representación de la evolución temporal del contenido en tritio en función del año para diversos tiempos de residencia τ (años), tomando como referencia de cálculo el pico del año 1963. Aplicación a La Palma.	175
Figura 56. Comparación de los modelos interpretativos que relacionan la concentración de tritio en función del tiempo de residencia del agua subterránea en el sistema acuífero volcánico insular de La Palma. Año de referencia para el cálculo: 2014.	176
Figura 57. Cortes hidrogeológicos representativos del sistema acuífero complejo insular de La Palma. Zona Norte. Topografía: SITCAN. Reconstrucción a partir de datos del CIAP, CSIC y del hidrogeólogo Roberto Poncela.	186

Figura 58. Cortes hidrogeológicos representativos del sistema acuífero complejo insular de La Palma. Zona Centro. Topografía: SITCAN. Reconstrucción a partir de datos del CIAP, CSIC y del hidrogeólogo Roberto Poncela.	187
Figura 59. Circulación del flujo subterráneo de la Isla de La Palma (adaptado de Poncela, 2005a).....	189



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones meteorológicas analizadas en La Palma. Fuente: AEMET. (*)Estación virtual por correlación creada específicamente.....	23
Tabla 2. Pluviometría anual media y distribución mensual para diferentes escenarios: medio, ciclo húmedo y ciclo seco. Fuente: AEMET.	28
Tabla 3. Termometría anual media y distribución mensual para valores medios, máximos y mínimos. Fuente: AEMET. (*) En el Roque de Los Muchachos se miden valores negativos en los meses invernales).	29
Tabla 4. Balances hidrometeorológicos en la Isla de La Palma para un año medio. Fuente de datos termopluiométricos: AEMET. Fuente de datos de radiación: Tablas FAO (2006). Periodo 1934-2014. T: Thornthwaite; H: Hargreaves. ETR: evapotranspiración real.	34
Tabla 5. Balance hídrico de superficie (APHP, 2012 y 2015).	35
Tabla 6. Balance hídrico de superficie según el balance hidrometeorológico planteado a partir de la ET_0 Hargreaves, considerando una reserva útil en el suelo $RU = 50$ mm.....	35
Tabla 7. Resumen de los balances hidrometeorológicos en la Isla de La Palma para un año medio, seco y húmedo, considerando una reserva útil en el suelo $RU = 0,50$ mm y una ET_0 calculada por el Método de Hargreaves, sin detracción de la escorrentía superficial de los excedentes. ETR: evapotranspiración real.....	37
Tabla 8. Cronología del volcanismo en La Palma (adaptado de Carracedo, 2011; IGME-OAPN, 2011). De mayor antigüedad hasta la actualidad.	42
Tabla 9. Probabilidad de ocurrencia de alumbramiento de un determinado caudal por zonas en La Palma, a partir de la serie analizada (1972-2013).	65
Tabla 10. Captaciones por municipios en La Palma (2013).	70
Tabla 11. Caudales continuos por municipios y captaciones en La Palma (2013) (Poncela y Skupien, 2013).	71
Tabla 12. Valores de los coeficientes de agotamiento típicos en diversas zonas de La Palma (Poncela, 2009).	86

Tabla 13. Zonación de los valores de la difusividad hidráulica (T/S, en m ² /día) en La Palma (adaptado y actualizado de Poncela, 2009).....	89
Tabla 14. Distancia de influencia en función de la altura piezométrica.	93
Tabla 15. Caudal teórico drenado en función de la altura piezométrica.....	94
Tabla 16. Distancia de influencia corregida en función de la altura piezométrica.	94
Tabla 17. Distancia de influencia corregida en función de la altura piezométrica para un caudal estacionario Q = 75 L/s.....	94
Tabla 18. Resultados comparativos de la distancia de influencia corregida, la altura piezométrica y la recarga, para un caudal estacionario Q = 75 L/s.	97
Tabla 19. Tiempo de amortiguación de una perturbación en el sistema acuífero volcánico insular de La Palma. Dicha perturbación puede estar asociada al cambio climático y/o a una influencia antrópica.	99
Tabla 20. Masas de agua subterránea en La Palma. Situación actual.	101
Tabla 21. Caudales continuos (L/s) por masas de agua subterránea y captaciones en La Palma (2013) (Poncela y Skupien, 2013).....	103
Tabla 22. Distribución de porcentajes de recursos subterráneos extraídos por masa de agua subterránea. Caudales continuos (L/s) (Poncela y Skupien, 2013).....	104
Tabla 23. Intervalo de los valores de los parámetros físico-químicos seleccionados en las aguas subterráneas de las captaciones de la red de control en la masa de agua subterránea LP001 y VPA (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).	112
Tabla 24. Intervalo de los valores de los parámetros físico-químicos seleccionados en las aguas subterráneas de las captaciones de la red de control en la masa de agua subterránea LP002 y VPA (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).	115
Tabla 25. Intervalo de los valores de los parámetros físico-químicos seleccionados en las aguas subterráneas de las captaciones de la red de control en la masa de agua subterránea LP003 y VPA (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).	117
Tabla 26. Intervalo de los valores de los parámetros físico-químicos seleccionados en las aguas subterráneas de las captaciones de la red de control en la masa de agua subterránea LP004 y VPA (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).	120
Tabla 27. Intervalo de los valores de los parámetros físico-químicos seleccionados en las aguas subterráneas de las captaciones de la red de control en la masa de agua subterránea LP005 y VPA (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).	122
Tabla 28. Principales facies hidroquímicas de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica de La Palma, según los iones dominantes a partir del Diagrama de Piper (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).	123
Tabla 29. Presiones evaluadas en el escenario actual (APHP, 2012 y 2015; Poncela y Skupien, 2013).	125
Tabla 30. Evaluación actual del riesgo de las masas de agua subterránea (actualizado de Poncela y Skupien, 2013).....	128
Tabla 31. Evaluación actual del riesgo de las masas de agua subterránea considerando un valor umbral de 600 mg/L Cl ⁻ como indicador de intrusión marina (actualizado de Poncela y Skupien, 2013).....	128
Tabla 32. Tipos de riesgos actuales (horizonte 2015) en las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (actualizado de Poncela y Skupien, 2013).	130
Tabla 33. Criterios aplicables para el control, seguimiento y evaluación del buen estado tanto cuantitativo como químico de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (actualizado de Poncela y Skupien, 2013).	130
Tabla 34. Resultados de la analítica correspondiente a los iones utilizados en los geotermómetros para las aguas subterráneas alumbradas en la Fuente Santa (año 2005).	139
Tabla 35. Resultados de los geotermómetros para las aguas subterráneas alumbradas en la Fuente Santa (año 2005).	139

Tabla 36. Resultados de la analítica correspondiente a los iones utilizados en los geotermómetros para las aguas subterráneas alumbradas en la Fuente Santa (noviembre 2008).....	139
Tabla 37. Resultados de los geotermómetros para las aguas subterráneas alumbradas en la Fuente Santa (año 2005).	140
Tabla 38. Recopilación de los resultados de las analíticas de isótopos estables de las aguas subterráneas de la Isla de La Palma (extraído y adaptado de Veeger, 1991).....	151
Tabla 39. Recopilación de los resultados de las analíticas de isótopos estables de las aguas subterráneas de la Isla de La Palma (extraído y adaptado de ITGE, 1993).	152
Tabla 40. Recopilación de los resultados de las analíticas de isótopos estables de las aguas subterráneas de la Isla de La Palma (adaptado de Poncela para este trabajo - periodo 2006-2015).....	153
Tabla 41. Resumen de los ajustes de las rectas meteóricas a partir de los datos isotópicos (isótopos estables) analizados.	156
Tabla 42. Resumen de los intervalos de variación en el exceso de deuterio a partir de los ajustes de las rectas meteóricas analizadas, por zonas.....	157
Tabla 43. Datos de partida para un nuevo ajuste de las rectas latitudinales en La Palma. Datos de Veeger (1991) y Poncela (periodo 2006-2015).....	158
Tabla 44. Recopilación de los resultados de las analíticas de tritio de las aguas subterráneas de la Isla de La Palma (Veeger, 1991).	164
Tabla 45. Recopilación de los resultados de las analíticas de tritio de las aguas subterráneas de la Isla de La Palma (adaptado de Poncela para este trabajo - periodo 2006-2015)....	165
Tabla 46. Datos de contenido en tritio en las precipitaciones obtenidos de GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation), dentro de los programas auspiciados por la IAEA (International Atomic Energy Agency) y la WMO (World Meteorological Organization). En negrita se presenta la función de entrada de tritio ponderada a partir de las estaciones de referencia (elaborada por Poncela para este trabajo). (*) Extraído de Poncela et al. (1992). (**) Estimado por Poncela a partir de medidas de tritio en agua superficial bajo evento tormentoso.	168
Tabla 47. Valores del coeficiente de decaimiento λ' (años ⁻¹) deducidos de los datos existentes para el hemisferio norte (extraído de Custodio y Custodio, 2013).	173
Tabla 48. Rendimiento de caudal por kilómetro perforado por municipios que disponen de galerías.	192
Tabla 49. Rendimiento de caudal por kilómetro perforado por masas de agua subterránea que disponen de galerías. (*) Ajuste superficies.....	192

A mis Padres, Baltasar y Rosalía, quienes contribuyeron decisivamente en mi educación y formación y cuyo recuerdo perdurará en mi memoria y en mi corazón a lo largo del tiempo.

A mi Esposa, Elżbieta, que con su apoyo, reflexión acertada y cariño incondicional en los momentos más difíciles ha sido motivación suficiente y necesaria para seguir adelante.

A mis Hijos, Carolina y Alexander, cuyo cariño y apoyo ha servido para superarme día a día, con el deseo de transmitirles que el esfuerzo y perseverancia ayudan a lograr la metas propuestas, pero siempre siendo conscientes de nuestras propias limitaciones.

Universidad de Alicante



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Estas páginas iniciales tienen por finalidad proporcionar al lector una aproximación a lo que será el núcleo de la investigación que se presenta en este trabajo: la caracterización del sistema hidrogeológico volcánico de la Isla de La Palma.

Esta introducción muestra el marco físico de referencia que permite desarrollar la organización sistemática de este documento, que se presenta para la obtención del Grado Académico de Doctor.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1.1. ASPECTOS GENERALES

La hidrogeología de terrenos volcánicos es una disciplina que ha experimentado un fuerte desarrollo en las últimas décadas, si bien todavía existen numerosas incertidumbres derivadas de lo característico de las propiedades de los materiales volcánicos, así como de su comportamiento condicionado por la heterogeneidad espacial que presentan las litologías asociadas, en general bastante anisótropas. No obstante, en función de la escala de trabajo, parte de esas dificultades pueden simplificarse definiendo volúmenes elementales representativos, lo que permite asumir ciertas hipótesis de los medios porosos y/u homogéneos, con las debidas restricciones. A pesar de estas limitaciones, en los últimos años se intentan definir funciones matemáticas que permiten una mejor concreción de estos sistemas volcánicos como base para el modelado numérico aprovechando las ventajas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Las Islas Canarias se muestran como un caso singular y único en el mundo, pudiendo ser considerado como un auténtico laboratorio a escala real. La iniciativa privada ha estado perforando las entrañas de los macizos rocosos durante casi 200 años con objeto de captar las aguas subterráneas que contenían. Ello con un notable esfuerzo personal y económico, que se ha traducido en miles de kilómetros de excavaciones y perforaciones, lo que ha llevado a inventariar miles de galerías y de pozos, así como centenares de manantiales (nacientes en terminología local), una parte significativa de los cuales está todavía operativa a día de hoy. Estas circunstancias han contribuido a disponer de un profundo conocimiento geológico de primera mano de las formaciones volcánicas, así como de su disposición y estructura internas.

Este es también el caso de la Isla de La Palma, perforada fundamentalmente por galerías en la zona norte y central de la isla. Los caudales así alumbrados han sido utilizados -y se utilizan en la actualidad- para abastecimiento humano y para uso agropecuario (fundamentalmente agrícola). Para uso industrial es mínimo y para uso recreativo se exige que sea con aguas regeneradas, no alumbradas directamente.

A pesar de la importancia de las aguas subterráneas en la socioeconomía insular, con décadas de drenaje realizado, no parece que haya una situación crítica en cuanto a las presiones por extracción, salvo zonas concretas. Las aguas son de excelente calidad excepto en la zona sur, donde existe un volcanismo residual que aporta CO₂ y mineraliza las aguas subterráneas haciéndolas muy bicarbonatadas e inapropiadas para consumo directo, sin tratamiento específico. Ello lleva a considerar que, salvo alumbramientos muy profundos, el consumo de reservas es todavía mínimo, y la recarga natural del sistema está compensada en el tiempo.

No obstante, son pocos los estudios técnico-científicos en relación a lo que cabría esperar por la importancia del recurso, siendo escasos los trabajos donde se cuantifican los parámetros hidrogeológicos de una manera rigurosa a partir de la información existente, fundamentalmente de aforos de caudales en galerías, nacientes y en pozos, y de calidad química e isotopía ambiental del agua subterránea. Unido a lo anterior, mucha información es incompleta, suele estar dispersa y es difícil de obtener.

En este trabajo se pretende sistematizar la información existente para la obtención de parámetros hidrogeológicos y definir el estado de las masas de agua subterránea, de acuerdo con la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (en adelante DMA), todo ello con el objetivo de profundizar en el conocimiento hidrogeológico del sistema acuífero volcánico de La Palma, y definir un nuevo modelo conceptual de funcionamiento de flujo subterráneo que pueda servir de base para un futuro planteamiento de un modelo matemático de simulación.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los principales objetivos del presente Trabajo de Investigación se pueden agrupar en los siguientes puntos:

- Revisión y actualización de la información hidrogeológica existente: climatología, geología, hidrogeología, hidroquímica e isotopía ambiental y balance hídrico. Revisión del inventario de captaciones.
- Análisis hidrodinámico del sistema. Caracterización de curvas de agotamiento en relación a las captaciones (análisis y selección de los tramos significativos), formaciones litológicas y acuíferos asociados. Parametrización hidrogeológica: transmisividad, coeficiente de almacenamiento, difusividad hidráulica, piezometría, análisis de presiones en compuertas hidráulicas en galerías, ensayos hidráulicos, etc.
- Técnicas especiales: análisis isotópico ambiental (oxígeno-18, deuterio y tritio, principalmente) de las aguas subterráneas para la definición de las zonas de recarga natural, relación recarga-altura y evaluación de los sistemas de flujo y tiempos de residencia. Análisis de la función de entrada de tritio a partir de las precipitaciones locales, así como la integración en un modelo de funcionamiento asociado a la geohidrología insular.
- Hidroquímica: análisis de la calidad de las aguas subterráneas. Caracterización por masas de agua subterránea de acuerdo con la DMA. Análisis de presiones y riesgos. Procesos de contaminación, incluida la intrusión marina. Integración con el modelo hidrogeológico insular. Análisis de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas.
- Mejora del balance hídrico insular a partir de la información revisada y ampliada.
- La integración de los puntos anteriores permitirá revisar y mejorar el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del sistema acuífero volcánico insular de La Palma, permitiendo establecer las bases para una futura modelación numérica de mayor alcance. Asimismo, como consecuencia de la investigación aplicada, se podrán establecer protocolos o criterios para el estudio y análisis de otros territorios de naturaleza volcánica, especialmente en islas oceánicas, todo ello orientado a una mejor y más eficiente (óptima) gestión de los recursos hídricos subterráneos.
- Divulgar las aportaciones y conocimientos adquiridos tanto en eventos científico-académicos y publicaciones en revistas especializadas, así como su uso, respetando los condicionantes de confidencialidad de una parte de los datos (de carácter privado), en plataformas TIC, en su caso.

1.3. METODOLOGÍA, HIPÓTESIS Y PLAN DE TRABAJO

1.3.1. Metodología

Para la consecución de los objetivos planteados se seguirá la siguiente Metodología:

- Disponer de una base de datos lo más actualizada posible: revisión de la información existente y ampliación.
- Analizar los caudales históricos en galerías y manantiales para estudiar su evolución, seleccionando tramos significativos para el estudio de las curvas de agotamiento y, a partir de ese estudio, definir una zonificación en cuanto a la difusividad hidráulica, y parametrizar el sistema acuífero insular, a día de hoy con importante carencia de información.
- Realizar el trabajo de campo necesario para la consecución de objetivos.
- Mejorar la definición de las zonas de recarga a partir del estudio de los isótopos estables de las aguas subterráneas y de los sistemas de flujo y tiempos de residencia a partir del estudio del contenido en tritio de dichas aguas subterráneas. Se definirá un modelo para la interpretación de los datos de tritio en relación al sistema acuífero.
- Contrastar la información hidrogeológica con la hidroquímica e isotópica ambiental para profundizar y definir un nuevo modelo revisado del funcionamiento del sistema acuífero volcánico de La Palma

1.3.2. Hipótesis

El actual modelo geológico es satisfactorio pero existe la necesidad de definir un nuevo modelo hidrogeológico del sistema acuífero volcánico de La Palma, como paradigma de territorios de naturaleza volcánica, basado en el nuevo conocimiento hidrodinámico, hidroquímico e isotópico ambiental de sus aguas subterráneas, que permitirá una gestión óptima de los recursos hídricos insulares.

1.3.3. Plan de Trabajo

El Plan de Trabajo: se centra en tres etapas fundamentales:

- Etapa Preliminar: recopilación, revisión y análisis de la información.
- Etapa de Desarrollo: reconocimiento de campo y realización de visitas específicas a galerías para contrastar datos de aforo y adquirir nueva información relevante, en su caso. Filtrado, análisis e Interpretación de los resultados. Se incluye la parte de divulgación científica y publicaciones que se elaboren como consecuencia de los resultados que se vayan obteniendo.
- Etapa Final: elaboración de las conclusiones finales basadas en la definición de un nuevo modelo de funcionamiento hidrogeológico del sistema acuífero volcánico de La Palma. Edición y encuadernación. Preparación para la lectura y defensa del Proyecto de Tesis Doctoral.

1.4. HIDROGEOLOGÍA DE ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS. ESTADO DEL ARTE

Las rocas ígneas se corresponden con el grupo de litologías más abundantes que se extienden sobre la Tierra. En particular, el subgrupo de rocas efusivas o volcánicas presentan también una amplia distribución, si bien en superficie es más reducida que las intrusivas o plutónicas (por ejemplo, en zona continental: los "Traps" siberianos, la llanura del Deccan en La India, la cuenca del Paraná en Sudamérica, la meseta de Columbia en Estados Unidos, etc.; en islas oceánicas: el archipiélago de las Islas Canarias en España, las Islas Azores en Portugal, Islandia, Islas Hawaii en EE.UU., la Isla de La Reunión en Francia, etc.; intercaladas en formaciones geológicas: Isla de Sicilia en Italia, diferentes áreas de México, América Central y Los Andes, etc.). No obstante, la espectacularidad de las formas asociadas a este tipo de rocas así como las manifestaciones que muchas veces se producen en tiempos históricos, a escala humana, hace que sea una materia científica -la Vulcanología- ampliamente reconocida desde hace varios siglos, existiendo abundante bibliografía al respecto. A pesar de ello, los aspectos y conocimientos hidrogeológicos no han ido acompañados de la misma manera y no es, si no hasta hace pocas décadas, que estudios tanto regionales como específicos han permitido describir y cuantificar los procesos y parámetros hidrogeológicos en el seno de las formaciones volcánicas.

La importancia hidrogeológica de las formaciones volcánicas depende de sus características físico-geológicas así como de su relevancia como fuente de agua dulce para asentamientos humanos en comparación con otro tipo de formaciones, en particular las detríticas y las carbonatadas. En este sentido, los principales tipos acuíferos son también aplicables a las rocas y formaciones volcánicas, con las especificaciones y singularidades correspondientes. Las principales formaciones volcánicas desde el punto de vista hidrogeológico son: lavas de diferente composición (sean vacuolares, brechificadas y/o escoriáceas -frecuentemente las escorias están diferenciadas a techo y muro-), piroclastos (cenizas, lapillis y bombas), ignimbritas en sentido amplio (tanto soldadas como tobáceas) y diques (estructuras bastante lineales, tanto subverticales como subhorizontales), cuya disposición genético-estructural condiciona los sistemas de flujo regional y los gradientes piezométricos, pudiendo actuar como pantallas represando el agua subterránea o facilitando y redirigiendo el flujo subterráneo.

La bibliografía sobre hidrogeología de rocas y terrenos volcánicos es escasa aunque cada vez más frecuente. Como literatura clásica incluida en capítulos específicos se destaca, por orden cronológico: Davis y De Wiest (1966), Williams y Soroos (1973); Freeze y Cherry (1979), Custodio y Llamas (1983), FCIHS (2009), entre otras. Otras publicaciones específicas relevantes por su interés son: SIHTV (1974); Custodio (1978, 1983, 1989b, 2004 y 2007), Takasaki y Mink (1985); Falkland y Custodio (1991); Veeger (1991); Shade (1997); Ginguerich y Oki (2000 y 2011); Lau y Mink (2006), Singhal y Gupta (2010); Cruz (2011) y Santamarta et al. (2014a).

1.4.1. Situación en Canarias

El conocimiento hidrogeológico de las Islas Canarias anterior a 1970 era exiguo, sin embargo existía una extensa infraestructura hidráulica de captación, única en el mundo, que permitía (y permite todavía en la actualidad) la observación del interior de las islas y, por ende, de los principales acuíferos y estructuras asociadas. Es a partir de la finalización del conocido proyecto integral de recursos hídricos SPA-15 (1975) que se profundiza en el conocimiento hidrogeológico de los sistemas insulares de manera que dicha transferencia de información resultaba exportable a otros lugares de naturaleza volcánica. A este proyecto le siguieron otros como el MAC-21 (1980) y CANARIAS-AGUA 2000 (1988).

Este punto de partida permitió que diversos Centros de Investigación se interesasen en la hidrogeología de este tipo de formaciones, contribuyendo a la realización de Tesis Doctorales y otros Proyectos de Investigación de naturaleza aplicada. De entre la bibliografía existente, se destaca como de obligada consulta: Custodio (1985, 2011); Skupien (1988); IGME (1989); Custodio et al. (1991); EUPR (1994); Cabrera (1995); Cabrera et al. (1996 y 1997); Herrera (2001); Santamarta (2001, 2009); Muñoz (2005); Poncela (2005a); Cruz (2008); Custodio y Cabrera (2008); Marrero (2010); Izquierdo (2011); Izquierdo y otros (2011); Santamarta y Rodríguez-Martín (2012); Machado (2013); Santamarta et al. (2014a), entre otros.

1.4.2. Situación en La Palma

La hidrogeología de la Isla de La Palma ha sido tratada de manera específica y relevante en Veeger (1991); APHP (1992, 2012 y 2015); ITGE (1993); PHP (2001); CIAP (2009); Poncela (2009) y Poncela y Skupien (2013). Otros trabajos específicos destacables en el ámbito insular se citan en los capítulos correspondientes a lo largo de la presente disertación.

Téngase en cuenta que el principal tipo de captación es la galería, seguida de los pozos y sondeos y manantiales de elevado caudal. Dichas galerías penetran en general varios kilómetros (más de 6 km tiene la más larga en la zona norte) hasta alcanzar la zona saturada. Su construcción requiere varios años y su realización ha dependido siempre de la iniciativa privada en su lucha por disponer del recurso agua que, aunque abundante en la Isla Bonita, no por ello está exento de dificultad en cuanto a su captación.

A pesar de este esfuerzo, todavía existen muchas incertidumbres en relación a la parametrización hidrogeológica, en especial por los problemas de escala y heterogeneidad espacial tanto horizontal como vertical de las formaciones volcánicas, así como de aplicabilidad de diversas formulaciones clásicas para los medios homogéneos y porosos. Aún así, con las debidas restricciones, y considerando el efecto de escala y de volumen elemental representativo, se pueden realizar aproximaciones bastante válidas.

La interpretación de los ensayos de bombeo es difícil y a la vez escasa, por lo que hay que aprovechar la información histórica que proporciona la evolución de caudales en galerías y

manantiales, pues es la única de que se dispone en muchas ocasiones, y es muy valiosa a la hora de aplicar formulaciones para calcular o estimar parámetros hidrogeológicos.

En este sentido, la utilización de técnicas hidrogeoquímicas e isotópico ambientales para la caracterización de las aguas subterráneas, identificación de zonas de recarga, estimación del tiempo de tránsito, etc., son fundamentales para completar la información hidrodinámica existente. No obstante, todavía se está en fases iniciales para acometer un modelo insular de flujo de aguas subterráneas con suficientes garantías, es decir, que si quiere mantener el conocimiento geológico existente, la falta de datos hidrogeológicos reales para nutrir el modelo podría hacer que las soluciones calculadas se alejasen bastante de la realidad, como ocurre en el caso del modelo de flujo subterráneo de Tenerife (MFS, 2002). Por ello, deberá plantearse la modelización de perfiles hidrogeológicos piloto que puedan poner de manifiesto la realidad hidrogeológica de La Palma, así como descartar situaciones poco realistas.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1.5. SISTEMÁTICA EMPLEADA

El presente Trabajo de Investigación se compone de siete capítulos.

En este Primer Capítulo se han definido los objetivos de la investigación que se ha llevado a cabo, incorporando los motivos que han permitido su desarrollo. Finalmente se describe el estado del arte actual en relación a la hidrogeología de terrenos e islas volcánicas.

En el Segundo Capítulo se hace una revisión general del marco físico regional de La Palma: localización, geología e hidrogeología regional, climatología y meteorología.

En el Tercer Capítulo se hará una revisión de los sistemas de captación de aguas subterráneas de La Palma, así como de la hidrodinámica a partir del análisis de la evolución histórica de los caudales drenados por galerías y nacientes. Se presenta también la caracterización y tipología de hidrogramas de descarga y se desarrolla una metodología contrastada para la parametrización hidrogeológica del sistema acuífero insular. Finalmente se describen las masas de agua subterránea de acuerdo con la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE).

En el Cuarto Capítulo se tratará sobre la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas de La Palma, la cual es indicativa de la influencia de la recarga natural así como de la interacción agua-roca en función del tiempo de residencia y de los procesos físico-químicos que pueden producir alteraciones, identificando el fondo hidroquímico por masas de aguas subterránea y definiendo las principales facies hidroquímicas a partir de las técnicas hidrogeoquímicas de uso común en hidrología subterránea. Finalmente, se realiza una descripción de las aguas minerales, mineromedicinales y termales de La Palma, presentando técnicas geotermométricas para la determinación del hidrotermalismo en la zona sur, activa desde el punto de vista volcánico, y con presencia e influencia de CO₂ en las aguas subterráneas locales.

En el Quinto Capítulo se tratará del uso y aplicación de los isótopos ambientales del agua subterránea como herramienta complementaria a la hidroquímica y la hidrodinámica para la mejora y definición del sistema hidrogeológico. En particular, la descripción se centrará en los isótopos estables del agua subterránea (deuterio y oxígeno-18) para la caracterización de las zonas de recarga natural así como del efecto altitudinal de la misma. También se estudiará el uso del tritio como radioisótopo natural de baja energía para el análisis de los sistemas de circulación de flujo subterráneo, así como para la definición de los tiempos de tránsito a través de la zona no saturada y el sistema acuífero volcánico insular, mediante la aplicación e interpretación hidrogeológica de un modelo matemático de mezcla exponencial decreciente.

En el Sexto Capítulo se realizará la revisión del modelo hidrogeológico conceptual a partir del análisis e interpretación de los datos obtenidos en este trabajo de investigación.

Por último, en el Capítulo Siete, se presentarán las conclusiones principales del trabajo de investigación llevado a cabo, incluyendo futuras líneas de investigación derivadas de los resultados obtenidos.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL MARCO FÍSICO DE LA PALMA

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL MARCO FÍSICO DE LA PALMA

En este capítulo se hace una revisión general del marco físico regional del área de estudio: localización regional e insular, contexto geológico regional e hidrogeología insular para tener una visión global del ámbito de estudio así como de las singularidades del medio físico natural que caracterizan una isla volcánica oceánica.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2.1. MARCO REGIONAL

2.1.1. Situación geográfica

La Isla de La Palma, también conocida como la Isla Bonita, es una de las siete islas principales que componen el Archipiélago de las Islas Canarias (España), situado al noroeste del continente africano, entre las latitudes 27° 37' y 29° 25' Norte (situación subtropical) y las longitudes 13° 20' y 18° 10' al oeste de Greenwich (Figura 1). Dentro de dicho archipiélago, La Palma se localiza en su sector noroccidental.

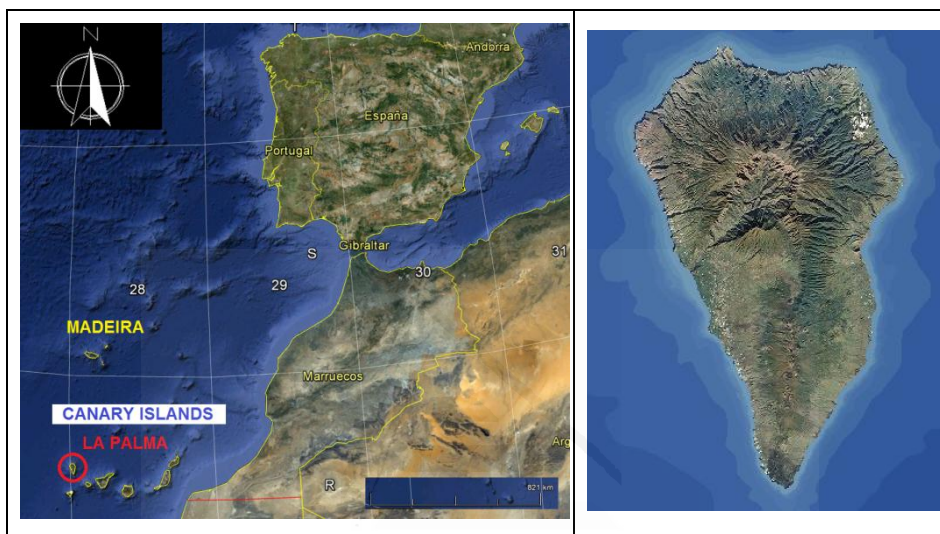


Figura 1. Situación geográfica de la zona de estudio. Base cartográfica: GOOGLE® y SITCAN (Consejería de Obras Públicas, Transportes y Política Territorial – GRAFCAN).

Desde el punto de vistas morfológico, sus dimensiones de 47 km (N-S) por 29 km (E-O), en forma de triángulo isósceles invertido, con presencia de un relieve montañoso preferente N-S (localmente conocido como "dorsal" o "rift" aunque no tenga relación genética directa con las dorsales centro-oceánicas), caracterizan una morfoestructura a modo de "dos aguas" coronada con un cono norte periclinal a dicho relieve.

Tiene una extensión de unos 708 km², con una zona de cumbres en el Parque Nacional de La Caldera de Taburiente superior a los 2.200 msnm, destacando como cima dominante el Roque de Los Muchachos (2.428 msnm), que da nombre al cercano y famoso Observatorio Astronómico del Instituto Astrofísico de Canarias.

De acuerdo con el padrón municipal referido a 2014, la isla tiene 85.115 habitantes de derecho (4,02 % de la población canaria), siendo sus principales recursos económicos la agricultura, especialmente el cultivo de platanera tanto al aire libre como en invernadero, y el sector servicios basado en el turismo (superior a 200.000 turistas/año en periodos recientes). La ganadería y la pesca son minoritarios, así como la industria, que es testimonial.

2.1.2. Marco Geológico

Las islas Canarias se sitúan en el Océano Atlántico próximo al margen continental occidental africano y constituyen la parte emergida de un macizo volcánico emplazado sobre litosfera oceánica de edad Jurásica, en el dominio intraplaca del borde occidental de la placa africana (Carracedo, 2011; IGME-OAPN, 2011).

La génesis del archipiélago se asocia con la dinámica alpina zonal, que tuvo su paroxismo durante el Mioceno (hace unos 20 millones de años) asociada, a su vez, a las tectonofases dinámicas del Atlas africano. El desarrollo del archipiélago es el resultado del desplazamiento en sentido este - oeste de un punto caliente ("hotspot") del manto, actualmente situado en el extremo occidental del archipiélago. Por consiguiente, la edad de las islas decrece hacia occidente, siguiendo el sentido y desplazamiento del citado punto caliente, como han puesto de manifiesto recientes erupciones submarinas en la Isla de El Hierro (2011-2012, si bien todavía hoy persiste la actividad).

El origen y desarrollo de La Palma (Figura 2) obedece al desplazamiento de la actividad magmática (punto caliente) de norte a sur. La principal característica común a estos edificios es la formación de estructuras tipo estratovolcán que, localmente, alcanzaron alturas superiores a 3.000 m (APHP, 1992; de la Nuez et al., 2008).

Un aspecto destacable es la presencia de una estructura erosiva, localmente discontinua, conocida como "estructura COEBRA" (APHP, 1992; Navarro, 1993) en cuyo contacto (depósitos aglomeráticos del antiguo volcán Garafía - lavas de relleno de intracaldera) existen numerosos manantiales, algunos con elevado caudal, siendo el más representativo el conocido como Marcos y Cordero.

La geomorfología de La Palma permite distinguir tres elementos característicos yuxtapuestos (ver Figuras 1 y 2):

- El Edificio Norte o Cono Norte.
- El Arco de Cumbre Nueva.
- La Dorsal de Cumbre Vieja.

Dentro de ellos, se distinguen las siguientes unidades principales:

- Barrancos encajados, tanto estrechos y poco profundos como anchos y profundos, con presencia de costa acantilada, formación de islas bajas y que, por encima de los 1.200 msnm se coronan mediante cumbres en cresta y orografía accidentada.
- Depresión erosiva calderiforme de La Caldera de Taburiente que contiene numerosas cabeceras de barrancos, con red hidrográfica jerarquizada en la que confluye en un importante canal de desagüe hacia el mar de los productos erosionados como consecuencia del desmantelamiento de los edificios Taburiente y Garafía, así como del Complejo Basal.

- Dorsal en estructura en tejado al sur de La Caldera de Taburiente, con presencia de edificios volcánicos recientes.
- Arco de Cumbre Nueva, anfiteatro semicircular que define la solución de continuidad de los elementos septentrionales y meridionales, presentando estructura de tejado en la parte oriental y de depresión en la occidental.
- Desarrollo de zonas costeras, especialmente altas en la zona septentrional y moderadas en el sector meridional. Pendientes elevadas en general, con posibilidad de desarrollo de islas bajas.

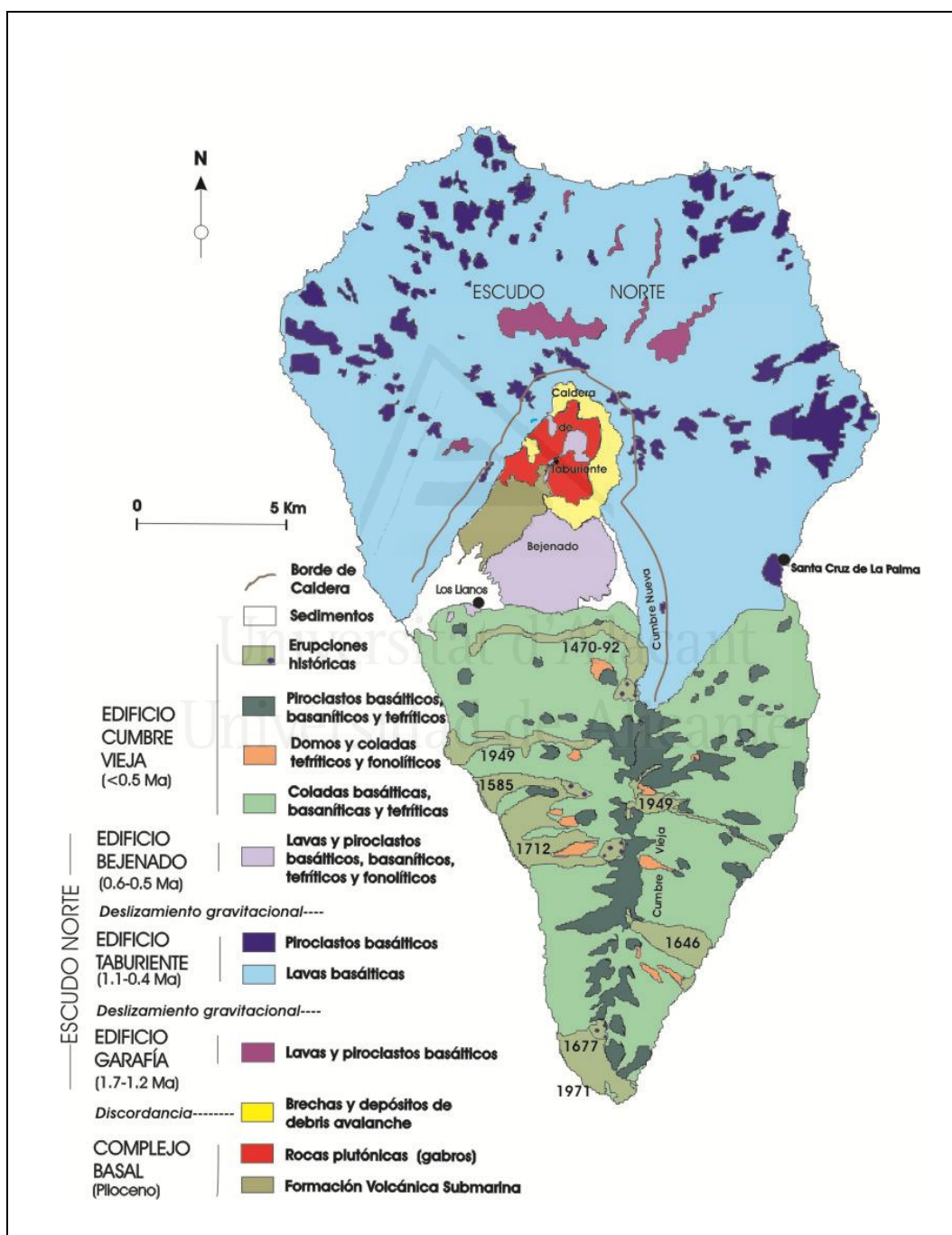


Figura 2. Mapa geológico de la isla de La Palma (de la Nuez, et. al., 2008).

2.1.3. Marco Hidrogeológico

Desde el punto de vista hidrogeológico, la Isla de La Palma está constituida por un sistema acuífero volcánico complejo, constituido predominantemente por apilamiento de lavas basálticas y escorias asociadas, con intercalación de niveles piroclásticos, que se encuentra limitado por la presencia de dorsales atravesadas por numerosos diques que compartimentan el sistema hidrogeológico y condicionan la dirección de flujo subterráneo (normalmente de cumbre a mar) y contribuyen a represar los niveles piezométricos, que presentan elevados gradientes, superiores a lo que cabría esperar en condiciones de "isotropía litológica". A su vez, la existencia de depósitos tipo "debris avalanche" ("mortalón" en terminología local) como consecuencia de importantes deslizamientos gravitacionales condicionan la presencia de niveles semiconfinados o confinados, en su caso.

De acuerdo con la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE), en La Palma se han caracterizado cinco masas de aguas subterráneas (Poncela, 2005a; DGA, 2006; Skupien y Poncela, 2007c; Poncela y Skupien, 2013).

El principal reservorio lo constituye la masa de agua subterránea denominada LP001: Acuífero Insular-Vertientes (Fig. 36), donde se encuentran la mayor parte de las galerías productivas de la isla, englobando el principal sistema acuífero insular, constituido por los materiales volcánicos del Edificio Garafía y Taburiente (Inferior y Superior), así como la estructura COEBRA (APHP, 1992; EGDHLP, 2009; APPHLP, 2012; APHP, 2015).

Dicha masa LP001 comprende toda la zona de cumbres (zona de mayor precipitación insular y de recarga natural del sistema hidrogeológico), desde el cono norte hasta la mitad sur y hasta la franja costera hasta la cota 600 msnm (de ahí hasta el mar, el modelo de gestión insular incluye las captaciones mediante pozos), incluyendo el arco de Cumbre Nueva.

Este sistema acuífero insular está compartimentado en bloques por la presencia de una intrincada red de diques, tanto más densa cuanto más próxima a las zonas de "rift" o ejes estructurales de La Palma, a modo de celdas de estanqueidad variable. Estos diques actúan de barrera hidrogeológica, lo que produce el apantallamiento del flujo subterráneo y hace que los niveles piezométricos estén sobreelevados (elevado gradiente hidráulico como consecuencia de la fuerte anisotropía vertical de las formaciones acuíferas involucradas).

Muchas de las galerías productivas han alumbrado agua después de atravesar un dique o sistema de diques; en otros casos, la permeabilidad de las formaciones saturadas ha sido suficiente para drenar el frente o frentes de saturación, hasta alcanzar un cierto equilibrio en ausencia de influencias externas.

En general, los apilamientos de lavas y escorias del Edificio Taburiente Superior favorecen la infiltración y posterior recarga natural al acuífero principal (Edificio Taburiente Inferior y Edificio Garafía). No obstante, existen notables contrastes de permeabilidad como consecuencia de la heterogeneidad litológica presente, como en las series infrayacentes que constituyen el zócalo, ya

sean aglomerados de tránsito, contacto con la estructura COEBRA o Complejo Basal, que actúan como un nivel de base de baja a muy baja permeabilidad (a efectos prácticos, en general impermeable). La presencia de formaciones tipo "debris avalanche" han formado auténticas cicatrices erosivas modelando geomorfologías tipo "cubeta calderiforme asimétrica" que han sido las precursoras del principal reservorio insular de agua subterránea de la isla.

El flujo subterráneo se dirige desde la zona de cumbres hacia mar, mediante caminos tortuosos dificultados por la presencia de diques (Custodio y Llamas, 1983; APHP, 1992; Poncela, 2005a y 2005b; APHP, 2015), llegando a alcanzar los niveles piezométricos regionales alturas próximas a los 1.800 m en la zonas internas, hasta llegar al nivel del mar en la zona costera.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2.2. CLIMATOLOGÍA Y METEOROLOGÍA

2.2.1. Rasgos climáticos de La Palma

El clima de la zona en la que se sitúa el Archipiélago Canario es el resultado de la interacción de dos conjuntos de factores que actúan a distinta escala: la dinámica atmosférica propia de las latitudes subtropicales y la influencia que proporciona el hecho de ser, en general, islas con un relieve abrupto, bañadas por una corriente oceánica fría y próximas a un continente.

Los rasgos climáticos esenciales son el resultado de la alternancia de anticiclones cálidos subtropicales que dan lugar a un tiempo estable y de borrascas del frente polar, no muy frecuentes, que provocan un tiempo lluvioso e inestable.

Como consecuencia de la localización de estas altas presiones al norte de Canarias, fluyen sobre esta zona los vientos alisios. Son vientos regulares en cuanto a su velocidad, cuyo origen es el anticiclón de las Azores y aunque nacen con una dirección norte, conforme circulan hacia latitudes más bajas, adquieren un rumbo nordeste.

Los alisios poseen una variación estacional muy marcada, que va a influir en el clima del archipiélago. Predominan en verano, alcanzando un porcentaje del 90 al 95 %, mientras que en invierno su frecuencia disminuye hasta el 50 %. El predominio de este régimen de vientos proporciona un tiempo estable, con cielos muy nubosos en los sectores de medianías y costas de las vertientes septentrionales, con nubes del género de los estratocúmulos, y cielos despejados en las situadas a sotavento.

Canarias se encuentra bajo los efectos de una corriente oceánica fría, que al transportar aguas de latitudes más septentrionales unido a la sustitución de las aguas cálidas superficiales por las frías del fondo del océano (fenómeno de “upwelling”) da lugar a que la temperatura de la superficie del mar se mantenga notablemente más baja con respecto a la que le corresponde por su latitud.

La temperatura media de la superficie del océano varía de una estación a otra. En invierno la temperatura media es de 19-21 °C, mientras que en verano es de 21-23 °C. Esto ejerce una influencia sobre la temperatura del aire: En el invierno en los sectores costeros la temperatura media de febrero es del mismo orden que la de enero debido al retraso a febrero de los mínimos termométricos de la superficie del océano por un proceso de enfriamiento y calentamiento más lento que el de la tierra. Esta influencia no queda clara en febrero pero sí en marzo con respecto a diciembre; la temperatura media en marzo es inferior a la de diciembre.

En el verano el máximo térmico de las aguas se retrasa al mes de septiembre y por eso las temperaturas medias de las zonas costeras no descienden bruscamente de agosto a septiembre gracias a los efectos moderadores de la corriente marina.

El papel de la orografía es fundamental en los fenómenos de la dinámica atmosférica y en los valores normales climáticos. Las islas que poseen cimas elevadas constituyen una barrera en cuanto a las trayectorias de las masas de aire, que al chocar con las montañas crean una serie de variantes locales muy marcadas, de las que la más característica es el conocido "mar de nubes".

La proximidad al continente africano repercute claramente en el clima de Canarias. El contraste entre la masa de aire que normalmente afecta al archipiélago y la que se sitúa sobre el desierto del Sahara es muy acusado, sobre todo en verano, cuando en los niveles bajos la diferencia de temperatura entre las dos masas llega a ser del orden de los 15 °C (Font Tullot, 1956).

En estas circunstancias, cuando se produce una situación que favorece la invasión de aire más cálido sobre las islas se produce un tiempo muy característico que es el opuesto al dominante. Se denomina "tiempo sur" porque es el antagónico al tiempo habitual del norte, aunque los vientos lleguen con una componente de sudeste, este o incluso del nordeste.

Para facilitar la caracterización climática, La Palma se puede dividir en los siguientes sectores climáticos: Norte-Noroeste, Nordeste, Este-Sudeste, Oeste-Suroeste (CLIMCAN-010, 2010), cuya representación gráfica se presenta en la Figura 3:

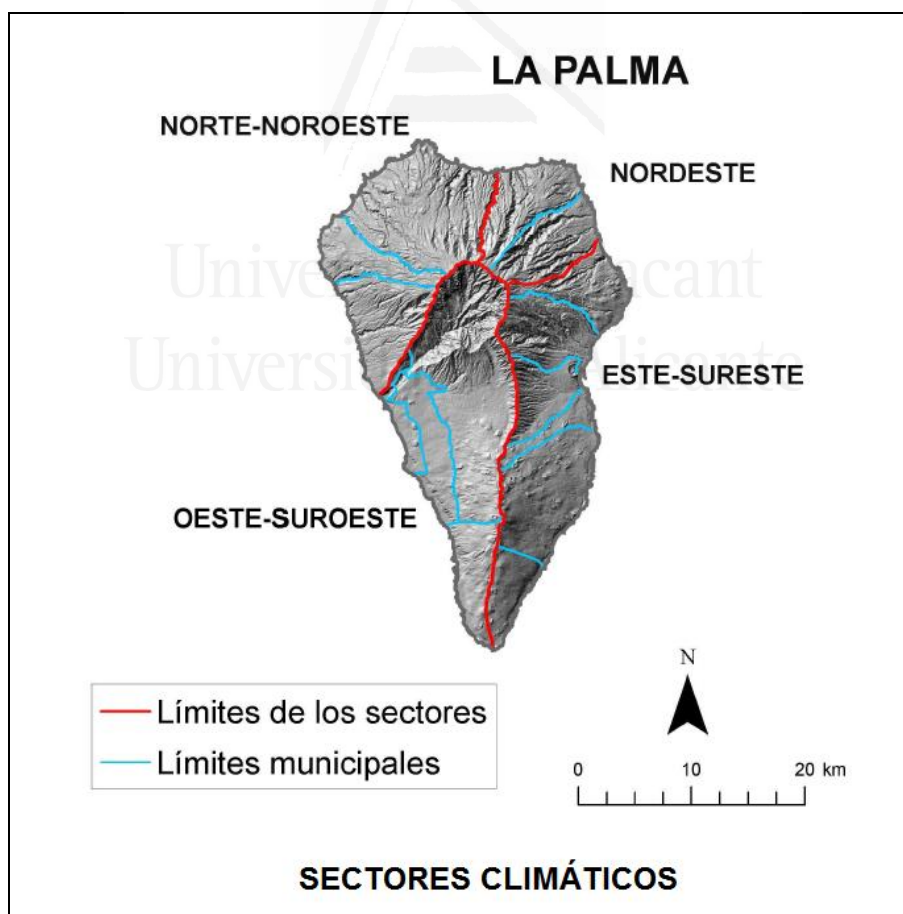


Figura 3. Sectores climáticos de La Palma (CLIMCAN-010, 2010).

2.2.2. Principales parámetros meteorológicos

En La Palma, la Agencia Española de Meteorología (AEMET) es el principal organismo que recoge información meteorológica; no obstante, existen otras instituciones y particulares que también pueden suministrar información complementaria. Para este trabajo se han utilizado los datos suministrados por la AEMET, previa adquisición formalizada y autorizada, y que para la evaluación global insular han consistido en las precipitaciones totales mensuales y las temperaturas mensuales (medias, mínimas y máximas), que se han elaborado convenientemente para la realización de los correspondientes balances hidrometeorológicos, incluida la información del APHP (2012 y 2015). También se ha consultado a De León et al. (1991); MOPT (1992) e INM (2002).

Para disponer del orden de magnitud y variaciones de las precipitaciones locales de los últimos años, así como de las temperaturas, se han utilizado como representativas y más completas las estaciones meteorológicas que se detallan en la Tabla 1 con objeto de sectorizarlas para un balance hídrico más preciso, teniendo en cuenta que existen numerosas lagunas de información, especialmente en la zona de cumbres que es la más interesante desde el punto de vista hidrológico, pues es donde se produce la recarga natural al sistema acuífero insular.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas analizadas en La Palma. Fuente: AEMET. (*)Estación virtual por correlación creada específicamente.

ESTACIONES METEOROLÓGICAS						
Código	Estación meteorológica	Altitud (m)	Longitud W	Latitud N	Periodo	Variable
C104G	CALDERA TABUERIENTE-MIRADOR DE LAS CHOZAS	1.380	17°51'37"	28°41'45"	1984-2007	P
C104K	CALDERA TABUERIENTE-GALERÍA DE ARIDANE	1.300	17°50'59"	28°42'19"	1984-2007	P
C105A	CALDERA TABURIENTE-TENERRA	1.070	17°53'42"	28°42'58"	1957-2007	P
C106U	CALDERA TABURIENTE-TABURIENTE	820	17°52'13"	28°43'45"	1957-2014	P y T
C107A	CALDERA TABURIENTE-HACIENDA DEL CURA	625	17°54'36"	28°41'38"	1971-2007	P
C108U	CALDERA TABURIENTE-HOYA DEL CAMPANARIO	275	17°54'12"	28°41'22"	1986-2007	P
C113C	PUNTAGORDA-REVENTON	1.525	17°55'57"	28°45'03"	1985-2001	P
C115Z	TIJARAFE-TIME	1.220	17°55'17"	28°41'38"	1985-2001	P
C116A	TIJARAFE-RIVEROLES	828	17°57'30"	28°44'30"	1971-1984	P
C116E	TIJARAFE-TINIZARA	980	17°57'59"	28°44'26"	1984-2005	P
C117A	PUNTAGORDA	680	17°59'03"	28°45'34"	1934-2014	P y T
C117U	TIJARAFE	650	17°57'01"	28°42'25"	1946-2013	P
C117W	TIJARAFE-PUNTA	520	17°56'34"	28°40'33"	1985-2007	P
C119C	PUNTAGORDA-PUNTITA	240	17°59'54"	28°45'09"	1986-2004	P
C123E	PASO-GALLO	1.650	17°50'38"	28°36'14"	1985-2007	P
C124T	FUENCALIENTE-MÑA.ALBARDA	1.325	17°50'31"	28°31'34"	1985-2007	P
C125B	PASO-VALENCIA	1.030	17°50'49"	28°40'31"	1978-2007	P
C125C	PASO-ALTOS ERMITA	1.050	17°49'50"	28°39'35"	1978-1986	P
C125D	PASO-LOMO CARBON	1.050	17°49'46"	28°38'27"	1987-2005	P
C125U	FUENCALIENTE-MÑA.FUEGO	1.050	17°49'52"	28°30'58"	1972-2007	P
C126A	PASO, C.F.	847	17°51'05"	28°39'10"	1971-2014	P y T
C126L	FUENCALIENTE-CHARCO A	770	17°51'54"	28°33'09"	1984-2014	P
C126O	FUENCALIENTE-CHARCO	810	17°51'45"	28°31'55"	1971-2014	P y T

ESTACIONES METEOROLÓGICAS						
Código	Estación meteorológica	Altitud (m)	Longitud W	Latitud N	Periodo	Variable
C127A	PASO	630	17°52'45"	28°38'58"	1972-2006	P
C127C	PASO-FATIMA A	735	17°52'10"	28°38'58"	1986-2008	P
C127E	PASO-MANCHAS	620	17°52'43"	28°35'51"	1971-1994	P
C127F	PASO-MANCHAS A	630	17°52'39"	28°35'53"	1985-2014	P
C127H	LLANOS ARIDANE-LOMO CABALLOS	520	17°54'56"	28°40'22"	1987-2007	P
C127R	FUENCALIENTE	690	17°50'38"	28°29'28"	1984-2009	P
C127T	FUENCALIENTE-C.F.	740	17°50'35"	28°29'40"	1984-2001	P y T
C127U	FUENCALIENTE-CALETAS	570	17°49'30"	28°29'58"	1946-2014	P y T
C128A	LLANOS ARIDANE-A	350	17°54'29"	28°39'30"	1946-1998	P y T
C128B	LLANOS ARIDANE-B	350	17°54'33"	28°39'25"	1960-2014	P
C128C	LLANOS ARIDANE-ARGUAL	320	17°55'37"	28°38'52"	1946-1996	P
C128D	LLANOS ARIDANE-HERMOSILLA	425	17°53'53"	28°39'29"	1976-2014	P y T
C128P	FUENCALIENTE-INDIAS	440	17°51'32"	28°30'06"	1946-2014	P
C129A	TAZACORTE	100	17°55'52"	28°38'31"	1948-2014	P y T
C129C	TAZACORTE-MÑA.TODOQUE	200	17°54'50"	28°36'41"	1984-2014	P
C129D	LLANOS ARIDANE-TODOQUE	240	17°54'30"	28°36'39"	1988-2008	P
C129E	TAZACORTE PTO. NAOS HOYAS	30	17°54'58"	28°35'37"	1949-2006	P y T
C129G	LLANOS ARIDANE-CHARCO VERDE	25	17°53'45"	28°34'15"	1988-2008	P
C129I	TAZACORTE - PUERTO	10	17°56'27"	28°39'00"	1993-2008	P y T
C129Q	FUENCALIENTE-SUELAS	25	17°51'52"	28°28'18"	1986-2000	P
C129U	FUENCALIENTE-FARO	15	17°50'27"	28°27'14"	1945-1958	P
C132T	SANTA C.PALMA-PICO NIEVES L	1.850	17°49'17"	28°43'47"	1972-1999	P
C133V	PUNTALLANA-REFUGIO LOMO PALMERA	1.750	17°48'38"	28°44'18"	1984-1999	P
C134B	MAZO-CHAMUSQUINA	1.370	17°48'44"	28°33'55"	1985-2006	P
C134E	MAZO-ROQUE NIQUIAMO	1.350	17°48'52"	28°35'41"	1982-1993	P y T
C134I	CUMBRE NUEVA-LOMO ROSERA	1.400	17°49'22"	28°38'27"	1985-2007	P
C134K	CUMBRE NUEVA-LOMO SARGENTA	1.375	17°49'25"	28°39'16"	1985-1995	P
C134V	PUNTALLANA-CALAVERA	1.475	17°48'15"	28°44'09"	1985-2007	P
C135J	BREÑA BAJA-PARED VIEJA	1.125	17°49'02"	28°37'02"	1986-2007	P
C135S	SANTA C.PALMA-MÑA.TAGOJA	1.096	17°46'56"	28°43'09"	1985-1999	P
C136L	BREÑA ALTA-LOMO MESTRES	825	17°48'40"	28°39'14"	1987-2007	P
C137A	MAZO-TIGALATE	575	17°48'20"	28°32'55"	1971-2014	P
C137F	MAZO-ROSAS	510	17°46'57"	28°37'30"	1946-2014	P
C138D	MAZO-HOYO DE MAZO	325	17°46'13"	28°36'27"	1987-1998	P
C138H	BREÑA ALTA-LEDAS	390	17°46'57"	28°38'35"	1990-2014	P
C138I	BREÑA BAJA-SAN JOSÉ	470	17°46'35"	28°38'27"	1949-2014	P y T
C138J	BREÑA ALTA-SAN ISIDRO	450	17°47'28"	28°38'50"	1984-2007	P
C138L	BREÑA ALTA-COL.NNAL	325	17°47'04"	28°39'38"	1986-2003	P y T
C138N	BREÑA ALTA-BOTAZO	445	17°47'32"	28°39'55"	1987-2014	P
C138O	BUENAVISTA-AEROP.VIEJO	400	17°47'04"	28°40'20"	1947-1998	P y T
C138P	SANTA CRUZ PALMA - VELHOCO	345	17°46'58"	28°41'12"	1949-2014	P y T
C138S	SANTA C.PALMA-DEHESA	300	17°46'35"	28°41'55"	1987-1999	P
C138U	PUNTALLANA	385	17°44'33"	28°44'20"	1946-1993	P
C138W	PUNTALLANA-GRANEL	375	17°45'05"	28°45'23"	1986-2008	P
C138X	PUNTALLANA-GALGA	400	17°45'40"	28°45'55"	1987-2014	P
C139E	MAZO (AEROPUERTO DE LA PALMA)	40	17°45'37"	28°36'48"	1970-2014	P y T
C139I	BREÑA BAJA-FUERTE	15	17°45'30"	28°39'30"	1952-1972	P y T
C139M	SANTA C.PALMA-B	80	17°45'30"	28°41'30"	1945-1963	P
C139O	SANTA C.PALMA	70	17°45'30"	28°40'30"	1915-1977	P y T
C139R	SANTA CRUZ PALMA-MIRCA	215	17°45'48"	28°42'02"	1982-2014	P y T
C140U	GARAFIA-ROQUE MUCHACHOS	2.340	17°52'40"	28°45'34"	1957-2000	P y T
C141G	BARLOVENTO-LOMO CEBOLLA	2.150	17°51'14"	28°45'52"	1987-1999	P
C144A	SAUCES-MARCOS Y CORDERO	1.350	17°49'14"	28°45'36"	1972-2014	P
C144B	SAUCES-CASA MONTE	1.330	17°48'35"	28°46'20"	1985-2014	P
C145J	BARLOVENTO-REFUGIO GALLEGOS	1.200	17°50'17"	28°47'55"	1985-2001	P
C145N	GARAFÍA, C.F.	1.075	17°53'08"	28°47'53"	1971-2014	P y T

ESTACIONES METEOROLÓGICAS						
Código	Estación meteorológica	Altitud (m)	Longitud W	Latitud N	Periodo	Variable
C145U	GARAFIA-MONTE TRICIAS	1.209	17°56'55"	28°46'22"	1985-2001	P
C146C	SAUCES-RABASA	950	17°48'30"	28°47'21"	1985-2014	P
C146H	BARLOVENTO-PASITOS	850	17°49'23"	28°48'25"	1986-2001	P
C146P	GARAFIA-S.ANTONIO DEL MONTE	950	17°55'06"	28°49'02"	1984-1991	P
C147C	SAUCES-ESPIGON ATRAVESADO	749	17°48'06"	28°47'09"	1984-2014	P y T
C147E	BARLOVENTO	590	17°47'53"	28°49'26"	1946-1984	P
C147F	BARLOVENTO-C.F.	580	17°48'17"	28°49'29"	1976-2001	P y T
C147U	GARAFIA-TRICIAS	735	17°57'53"	28°46'48"	1935-2014	P y T
C148A	SAUCES-SAN ANDRÉS	265	17°46'24"	28°48'13"	1946-2002	P
C148B	SAUCES-VERADA LOMADAS	320	17°46'27"	28°47'37"	1984-2014	P
C148C	SAUCES-TILOS PORTADAS	480	17°47'52"	28°47'25"	1984-2014	P y T
C148D	SAUCES-S.ANDRES COL.NNAL.	280	17°46'19"	28°47'59"	1986-2000	P y T
C148H	BARLOVENTO-GALLEGOS	320	17°50'09"	28°49'35"	1987-2014	P y T
C148I	GARAFIA-FRANCESES	450	17°51'04"	28°49'26"	1972-2007	P
C148M	GARAFIA-JUAN ADALID	290	17°54'07"	28°50'28"	1985-2007	P
C148O	GARAFIA	390	17°56'34"	28°49'31"	1946-2007	P y T
C149F	BARLOVENTO-FARO	15	17°46'35"	28°50'15"	1945-1987	P
	ESTACIÓN FICTICIA CUMBRE VIEJA (*)	1.200				P

Las principales estaciones meteorológicas de referencia y su distribución espacial se representan en la Figura 4.

2.2.2.1. Precipitaciones locales

Se han analizado y filtrado datos de casi 100 estaciones meteorológicas. Se destaca la amplia variabilidad espacio-temporal característica de esta variable, máxime cuando está controlada por la distribución de los vientos alisios, la orografía y la orientación de las vertientes, según sean a barlovento o a sotavento.

Dicha pluviometría promediada se muestra en el mapa de isoyetas que tiene en consideración los condicionantes anteriormente citados, así como su distribución mensual (Figura 5).

Más en detalle, se aprecia que la zona de cumbres del sector nororiental y oriental es la que presenta los mayores valores de pluviometría dado que la orientación de sus vertientes a favor de los vientos alisios procedentes del noreste, cargados de humedad, favorecen las precipitaciones, especialmente importantes en la zona nororiental. Sensu contrario, las vertientes opuestas, reciben una menor precipitación como consecuencia de la inferior humedad de las nubes que atraviesan las cumbres (efecto Föhn).

A su vez, queda patente que la distribución mensual presenta una típica forma cóncava, en la que la mayor pluviometría se distribuye durante los meses comprendidos entre enero y marzo (localmente extensibles a abril) y entre octubre y noviembre, mientras que por el contrario, el periodo entre abril y septiembre es un periodo por lo general de escasa pluviometría. Por todo ello, se puede afirmar razonablemente que los periodos de mayor contribución a la recarga local suponen del orden del 80 al 90 % de la precipitación anual.



Figura 4. Situación de los principales estaciones meteorológicas de referencia de la red del AEMET en La Palma. Fuente: AEMET.

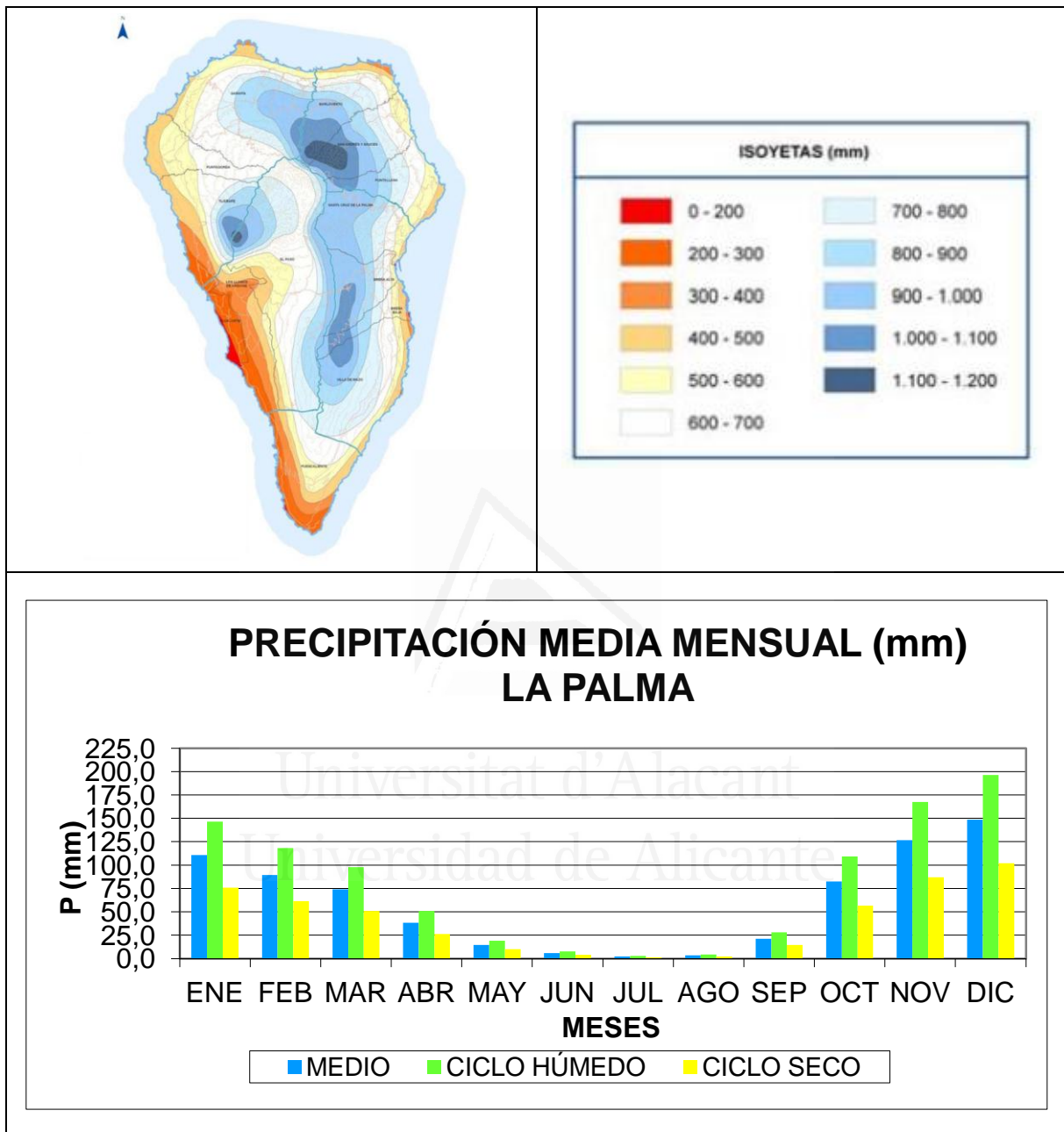


Figura 5. Arriba: Mapa de isoyetas medias de La Palma (APHP, 2012 y 2015). Abajo: Distribución mensual ponderada de las precipitaciones (1934-2014).

Para la caracterización pluviométrica se han establecido tres escenarios posibles: medio, húmedo y seco, estos últimos referidos fundamentalmente a su diferencia con la media en cuanto a su cuantificación. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Pluviometría anual media y distribución mensual para diferentes escenarios: medio, ciclo húmedo y ciclo seco.
Fuente: AEMET.

CICLO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOT
MEDIO	110,6	89,4	74,0	38,4	14,5	5,8	2,2	3,3	21,3	82,5	126,6	148,5	717,0
HÚMEDO	146,4	118,3	97,9	50,8	19,2	7,6	2,9	4,4	28,1	109,1	167,5	196,5	948,7
SECO	76,0	61,4	50,8	26,4	10,0	4,0	1,5	2,3	14,6	56,7	87,0	102,0	492,6

En relación a los ciclos de sequía climática es más útil considerar la desviación acumulada de las precipitaciones (Figura 6), que se define como (Ecuación [1]):

$$D = \sum_{i=1}^N (P_i - P_m) = \sum_{i=1}^N P_i - N \cdot P_m \quad [1]$$

Donde:

- D : Desviación acumulada.
- P_i : Precipitación media del año considerado.
- P_m : Precipitación media de los N años considerados.
- N : Número de años considerados.

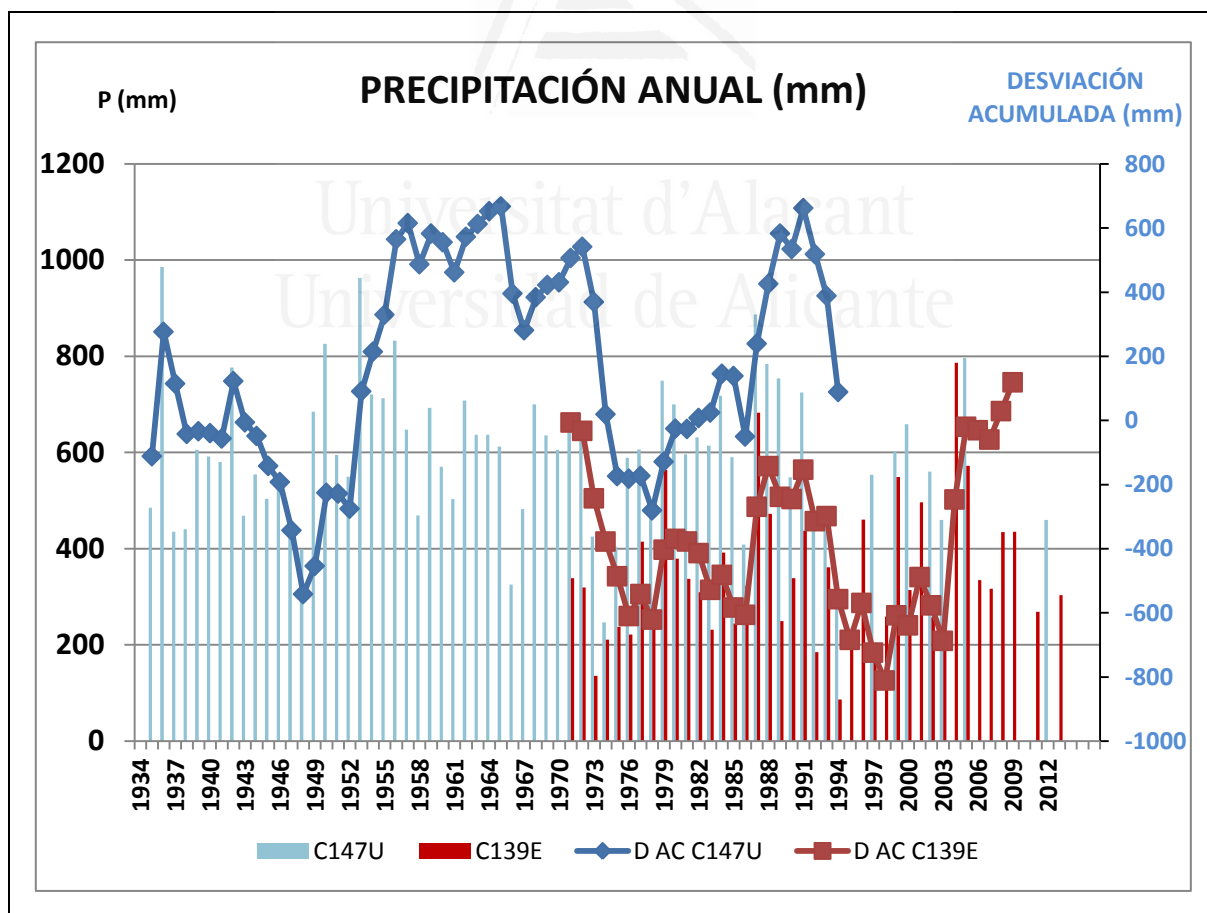


Figura 6. Precipitación anual de dos estaciones de referencia (C147U y C139E). Fuente: AEMET. Desviación acumulada de las precipitaciones.

En dicha figura se muestra la desviación acumulada de la pluviometría en relación a su distribución para dos estaciones meteorológicas seleccionadas por su calidad y menor desviación estándar: C147U (como la serie más larga) y C139E (muy fiable por corresponderse con el aeropuerto). En los periodos de solape se aprecia una tendencia muy similar, más marcada para cotas bajas que para cotas más elevadas (en zona de cumbre prácticamente no existen ciclos importantes de sequía). Se aprecia una cierta recuperación para cotas medias bajas, muy sensibles a la ausencia de pluviometría importante y continuada.

2.2.2.2. Temperaturas locales

Al igual que para las precipitaciones, se han analizado las temperaturas allí de donde se ha dispuesto información (del orden de 30 estaciones termométricas distribuidas por la isla). De ellas, se ha prestado especial atención aquellas que disponían, además de las temperaturas medias, las máximas y las mínimas.

La distribución de los valores mensuales se muestran en la Tabla 3 y Figura 7.

En dicha figura se observa que los meses estivales son los más calurosos (20 a 21 °C), existiendo una diferencia del orden de unos 5 a 6 °C para las temperaturas medias en relación al periodo invernal (14 a 15 °C).

Tabla 3. Termometría anual media y distribución mensual para valores medios, máximos y mínimos. Fuente: AEMET.

(*) En el Roque de Los Muchachos se miden valores negativos en los meses invernales).

TEMP (°C)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO
MEDIA	13,9	14,2	14,9	15,2	16,4	18,1	20,4	21,3	20,4	18,8	16,8	15,0	17,1
MAX ABS	34,6	36,1	35,5	38,7	39,0	38,8	45,0	46,0	41,3	38,0	38,0	33,8	46,0
Med MAX	15,5	15,8	16,6	16,8	17,8	19,4	21,5	22,3	21,5	20,1	18,0	16,3	18,5
MIN ABS*	0,6	0,4	1,2	1,9	1,5	5,5	6,8	7,0	7,0	5,0	0,9	2,2	0,6
Med MIN	9,9	9,9	10,3	10,6	11,5	12,9	14,6	15,4	15,0	14,0	12,4	10,9	12,3

Teniendo en cuenta que la temperatura es una variable climática más estable que la precipitación en cuanto a su distribución y, sobre todo, a su relación con la altura, la Isla de La Palma presenta tres gradientes negativos en altura según cota (Figura 8):

- 0 a 500 msnm: -0,6 °C/100 m.
- 500 a 1.000 msnm: -0,5 °C/100 m.
- > 1.000 msnm: -0,4 °C/100 m.

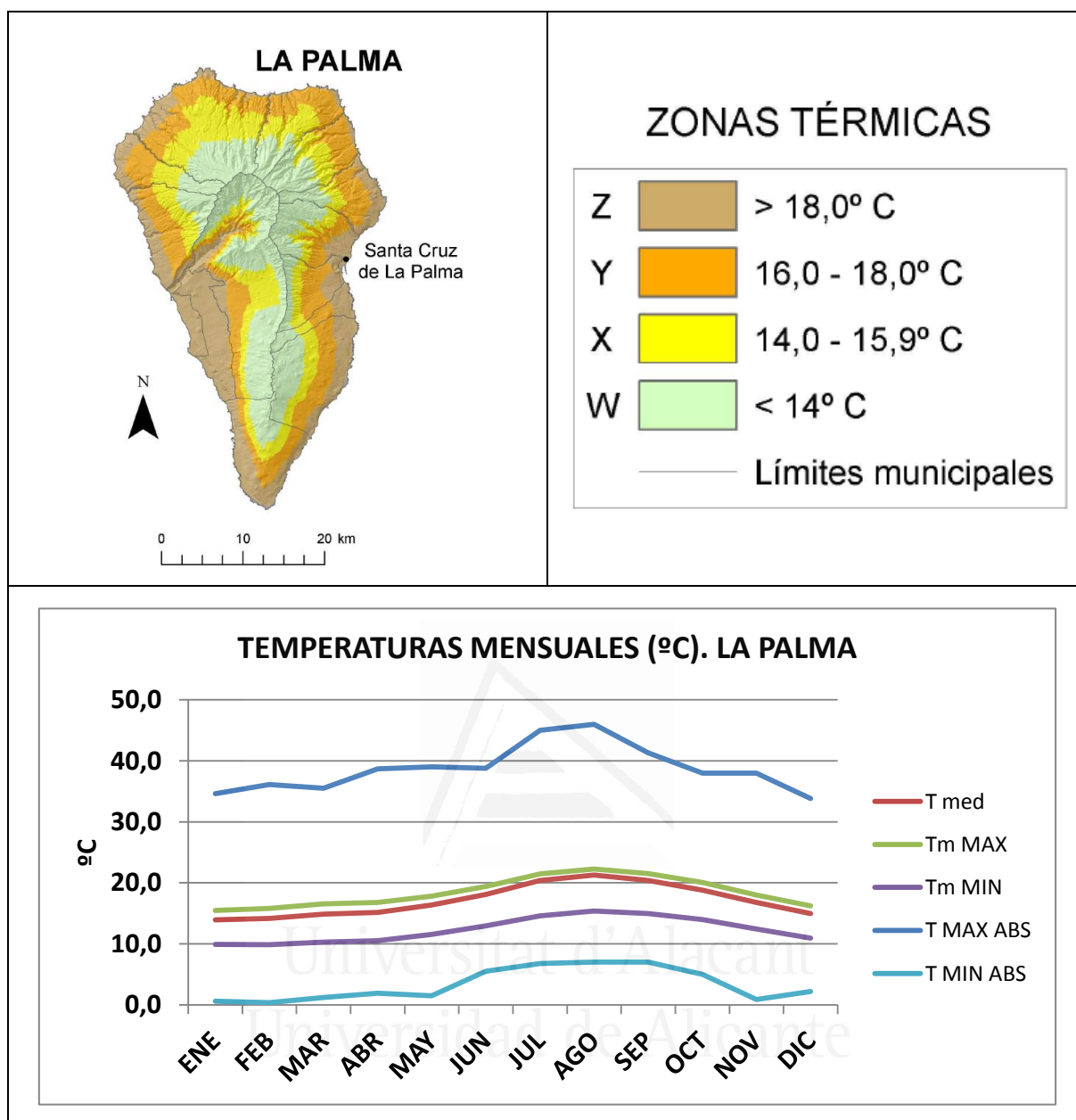


Figura 7. Arriba: Zonas térmicas de La Palma (CLIMCAN-010, 2010). Abajo: Distribución mensual ponderada de las temperaturas (1934-2014).

2.2.2.3. Otras variables

Son escasas las estaciones completas que recogen múltiples parámetros como la velocidad del viento y rachas, humedad, presión barométrica, insolación, etc. La más completa es la que corresponde al actual aeropuerto de Mazo, por lo que no se ha procedido a realizar un análisis más profundo a nivel insular dado la insuficiencia de información.

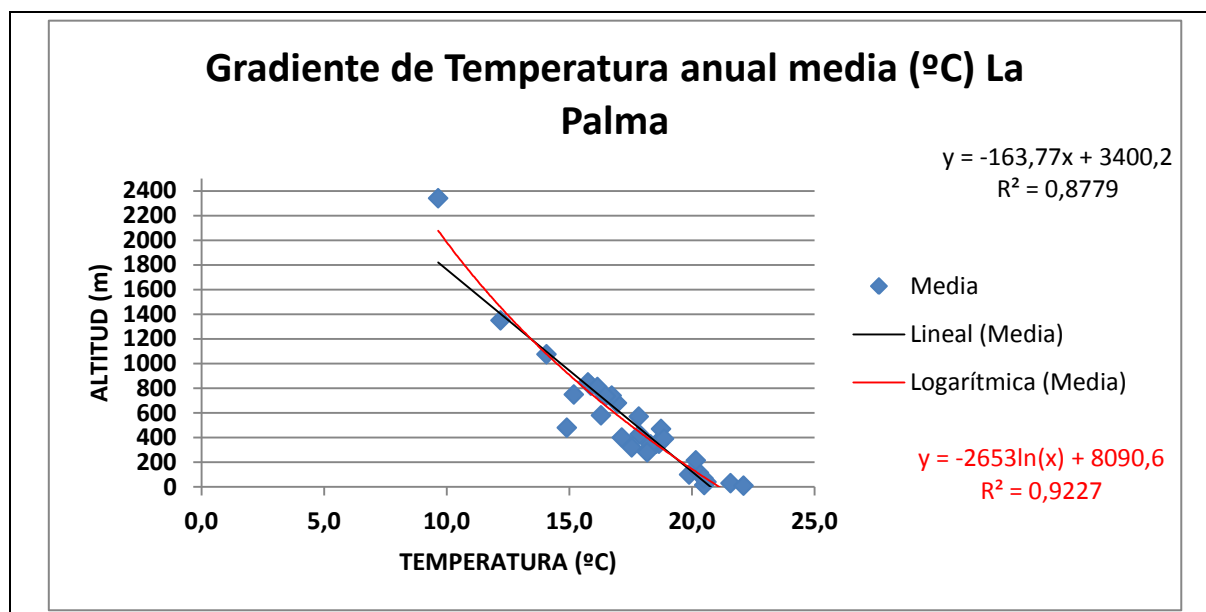


Figura 8. Gradiente termométrico de La Palma. Fuente: AEMET.

Si bien ello tiene una implicación directa como se comenta en el balance hidrometeorológico, la posibilidad de simplificación de variables ha permitido de manera razonable suplir las carencias, de acuerdo con la metodología de la FAO (2006) para el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

2.2.3. Balances hidrometeorológicos

2.2.3.1. Introducción

Uno de los cálculos que suelen presentar mayor incertidumbre en hidrogeología es el relacionado con la estimación del balance hidrometeorológico, en concreto con la asociada a los elementos del balance (Custodio et al., 2015a y b) y, en particular, en lo correspondiente a terrenos volcánicos (Shade, 1977) puesto que los suelos, o su ausencia, constituyen junto con el clima los factores determinantes (Santamarta et al., 2014b).

La transferencia de agua dentro del ciclo hidrológico está condicionada por la presencia de cobertera vegetal y desarrollo variable de suelos en función del grado de meteorización que, en el caso de las Islas Canarias, tiene una mayor singularidad por la presencia de suelos forestales en zonas de recarga natural (Santamarta et al., 2015).

En Canarias suele admitirse que se conoce razonable bien la distribución y cuantificación de la pluviometría, de acuerdo con la información suministrada por la AEMET y las distintas autoridades hidráulicas (ver los Planes Hidrológicos Insulares, actualmente en proceso de revisión). Lo cierto es que desde el punto de vista hidrogeológico se sigue teniendo importantes lagunas sobre la pluviometría en la zona de cumbres. La escorrentía superficial, dada su escasez y dificultad de

medida por la torrencialidad de los episodios tormentosos, suele presentar una incertidumbre importante, si bien queda enmascarada por su baja cuantía. Además, la infiltración se suele estimar como diferencia de la ecuación del balance y es dependiente de la evapotranspiración, parámetro que en las zonas de recarga natural a los acuíferos del archipiélago canario no está evaluado con la suficiente precisión.

Todo ello conduce a que el término correspondiente a la evapotranspiración presente una elevada incertidumbre y haya que recurrir, por lo general a fórmulas empíricas para su cuantificación, siendo recomendable el Método de Penman-Monteith (Monteith, 1965; FAO, 2006) puesto que considera los aspectos de radiación y de velocidad de viento si bien, dada la dificultad para la obtención de algunos de los parámetros de cálculo, su aplicabilidad resulta reducida en el caso de Canarias, y de La Palma en particular. Si a esto se une la dificultad de obtención de datos diarios en las zonas de interés (áreas de recarga natural), se tiene una importante limitación.

En el ámbito de Canarias existen trabajos que han realizado el cálculo para diferentes zonas agro-edafo-climáticas, donde se ha contrastado la validez del método en el marco de la CREP: Comisión Regional para el Plátano (Hernández, 1982), donde se calculó la ET_0 (evapotranspiración de referencia) a partir de datos de radiación, del método de Penman modificado y de tanques evaporimétricos clase A, siguiéndose las recomendaciones de Doorenbos y Pruitt (1977), publicadas por la FAO, y ampliamente difundidas, estudiadas y contrastadas en el mundo.

La principal conclusión que se extrae es que, salvo eventos excepcionales, sólo la pluviometría de los meses comprendidos entre otoño y primavera: octubre a marzo, pudiéndose incluir abril, es la principal responsable de producir infiltración puesto que la cantidad de agua suele superar, en promedio, a la ET_0 . El resto de meses, donde destaca el periodo estival, la ET_0 es mayor que la cantidad de agua disponible, por lo que el suelo debe cubrir las necesidades hídricas de la vegetación con su reserva, comprendida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, si es que esta reserva es suficiente; en caso contrario no existirá agua disponible y se producirá estrés hídrico, a la vez que nula infiltración y recarga.

2.2.3.2. Situación en La Palma

En la actualidad se dispone de pocas series de datos completas y, de ellas, sólo la correspondiente al aeropuerto dispone de los parámetros necesarios; y los datos existentes de la red SIAR (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente del Gobierno de España) son escasos y centrados en las zonas de productividad agrícola, a cotas inferiores a 300 msnm, por lo general.

Es por ello que tradicionalmente se haya evaluado la evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) por su facilidad en la obtención de parámetros meteorológicos, aun cuando se ha reiterado su no utilización puesto que conduce a errores importantes, especialmente en zonas semiáridas puesto que tiende a infravalorar la evapotranspiración y, por consiguiente, sobreestimar la infiltración.

La propia FAO (FAO, 2006) establece los requisitos para la obtención de parámetros ausentes en la formulación de Penman-Monteith y, además, una simplificación en el caso de que sean igualmente dificultosos de obtener. Dicha simplificación queda expresada en la fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1982 y 1985; FAO, 2006) (Ecuación [2]):

$$ET_0 = 0,0023 \cdot (t_{med} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a \quad [2]$$

Donde:

ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm/día).

R_a : Intensidad teórica de radiación incidente sobre una superficie horizontal, suponiendo que no existe atmósfera (mm/día). Tabulada (FAO, 2006).

t_{med} : Temperatura media (°C) del periodo considerado.

T_{max} : Temperatura máxima (°C) del periodo considerado. En el caso de valores mensuales se toma la media de las máximas del mes.

T_{min} : Temperatura mínima (°C) del periodo considerado. En el caso de valores mensuales se toma la media de las mínimas del mes.

Conviene recordar que, en la medida de lo posible, estos resultados deben cotejarse mediante correlación y ajuste de coeficientes empíricos con el método de Penman-Monteith para las zonas de aplicación o zonas contrastadas.

Para el cálculo de la evapotranspiración en zona de cultivo o de bosque ET_C se debe multiplicar dicha ET_0 por el coeficiente de cultivo o de bosque K_C . Para simplificar, se ha supuesto zona de recarga en área boscosa (con abundante presencia de bosque de pinar, fayal brezal y laurisilva) y se ha aplicado un $K_C = 1$.

Los resultados de la ET_0 comparados por métodos se presentan en la Figura 9. En dicha figura se aprecia claramente la diferencia, especialmente fuera de la época invernal, donde suele existir abundante humedad. La principal conclusión es que el método de Hargreaves permite una mejor estimación de la evapotranspiración de referencia puesto que tiene en cuenta el efecto de la radiación, lo que condiciona unos menores valores de infiltración al acuífero y, por lo tanto, de recarga.

2.2.3.3. Resultados en La Palma

De acuerdo con los datos elaborados en el apartado 2.2.2, se ha realizado un balance hidrometeorológico asumiendo la no influencia de mecanismos de recarga directa, como pueden ser la presencia de macroporos, grietas y otras discontinuidades que ciertamente existen, y pueden tener su influencia local por flujo preferencial al acuífero (Samper et al., 1991a y 1991b; Poncela y Skupien, 2014) para caracterizar la recarga al sistema acuífero (Runston y Ward, 1979; Custodio y Llamas, 1983); Custodio, 1987 y 1989b. Asimismo, la presencia del mar de nubes y su posible influencia como "precipitación horizontal", a falta de estudios rigurosos en La Palma, se ha

considerado poco significativa en cuanto su influencia para la recarga natural, si bien su presencia contribuye a mantener bosques en zonas de altura.

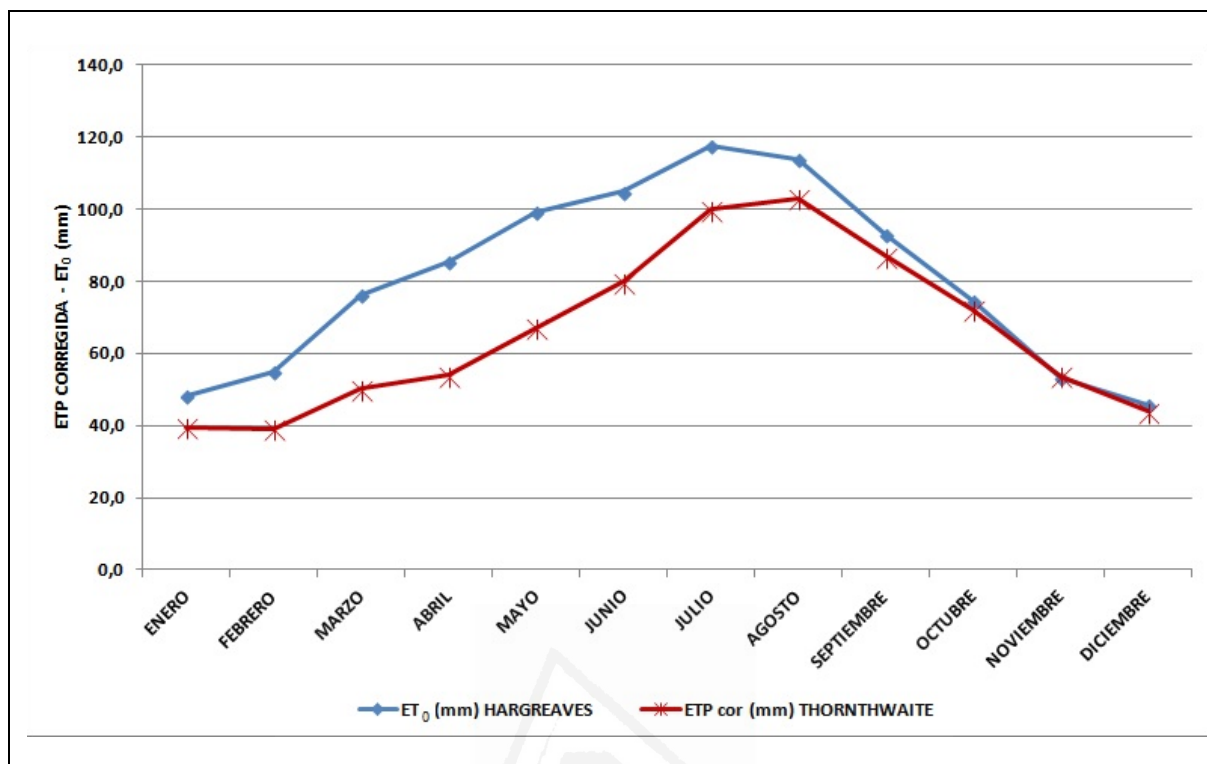


Figura 9. Comparación de resultados de ET₀ calculados mediante las formulaciones de Thornthwaite y de Hargreaves en La Palma.

Los resultados del balance hidrometeorológico promedio anual para diferentes reservas útiles se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Balances hidrometeorológicos en la Isla de La Palma para un año medio. Fuente de datos termopluviométricos: AEMET. Fuente de datos de radiación: Tablas FAO (2006). Periodo 1934-2014. T: Thornthwaite; H: Hargreaves. ETR: evapotranspiración real.

RU (mm)	P anual (mm)		ET ₀ (mm) o ETP cor (mm)		ETR (mm)		Infiltración (mm)	
	H	T	H	T	H	T	H	T
0	717,0	717,0	966,8	789,2	436,4	384,0	280,6	333,0
50	717,0	717,0	966,8	789,2	486,4	434,0	230,6	283,0
100	717,0	717,0	966,8	789,2	536,4	484,0	180,6	233,0
150	717,0	717,0	966,8	789,2	586,4	534,0	130,6	183,0
200	717,0	717,0	966,8	789,2	636,4	584,0	96,9	145,4

De la Tabla 4 se desprende que para una precipitación anual media de 717 mm, se tiene una variación promedio del orden de 50 mm en la estimación de la recarga (si se asimila que toda la infiltración pasa a recarga), lo cual es significativo en relación a los recursos disponibles.

El Avance del Plan Hidrológico de La Palma (APHP, 2012 y 2015) muestra unos valores del balance hídrico de superficie que se resumen en la Tabla 5, donde queda claro que la realización del cálculo de la ETR como consecuencia de aplicar el método de Thornthwaite sobreestima la infiltración en detrimento de la evapotranspiración, lo que se cuestiona y refuta en el presente trabajo.

Tabla 5. Balance hídrico de superficie (APHP, 2012 y 2015).

BALANCE HÍDRICO DE SUPERFICIE				
Ref	Magnitud Hidrológica	mm/año	hm³/año	% s/P
P	Precipitación	737	516	100
ETR	Evapotranspiración real	353	247	48
ES	Escorrentía superficial	23	15 (*)	3
I	Infiltración	361	253	49

(*) Asociado a las cuencas específicas.

La Tabla 6 muestra los valores actualizados para esta Tesis, asumiendo que la Escorrentía superficial se mantiene en el mismo orden de magnitud (23 mm/año). Se hace notar que en La Palma no existen corrientes de agua perennes y tampoco estaciones de aforo debido a la torrencialidad de los eventos, por lo que se asume que hasta la fecha es el mejor valor disponible, de acuerdo con los cálculos hidráulicos realizados para el Plan Hidrológico y otros proyectos de ingeniería hidráulica de presas y embalses.

Tabla 6. Balance hídrico de superficie según el balance hidrometeorológico planteado a partir de la ET_0 Hargreaves, considerando una reserva útil en el suelo $RU = 50$ mm.

BALANCE HÍDRICO DE SUPERFICIE				
Ref	Magnitud Hidrológica	mm/año	hm³/año	% s/P
P	Precipitación	717,0	502	100
ETR	Evapotranspiración real	486,4	340	68
ES	Escorrentía superficial	23,0	15 (*)	3
I	Infiltración (**)	207,6	145	29

(*) Asociado a las cuencas específicas.

(**) La infiltración correspondiente a esa $RU = 50$ es de 230,6 mm (la de balance se presenta detrayendo la ES).

La comparación de ambas tablas pone de manifiesto que, en promedio insular, la acotación de la recarga es del orden de un 20% inferior a lo que se estimaba suponiendo una reserva útil promedio de 50 mm; en el caso de $RU = 0$ mm, este valor pasa a ser un 13% inferior, por lo que puede establecerse que desde el punto de vista de la planificación hidráulica, el valor de la infiltración evaluado para el Plan Hidrológico (APHP, 2012 y 2015) está razonablemente sobrestimado entre un 13 y un 20 % sobre el valor presentado en este trabajo, más ajustado a la realidad insular.

La Figura 10 muestra los balances hidrometeorológicos detallados realizados para distintos escenarios climáticos: normal, ciclo seco y ciclo húmedo.

LAT 28° Norte	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Total
Temperatura	13,9	14,2	14,9	15,2	16,4	18,1	20,4	21,3	20,4	18,8	16,8	15,0	
T máx	15,5	15,8	16,6	16,8	17,8	19,4	21,5	22,3	21,5	20,1	18,0	16,3	
T mín	9,9	9,9	10,3	10,6	11,5	12,9	14,6	15,4	15,0	14,0	12,4	10,9	
nºdías mes	31,0	28,3	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	
Radiación Ra	22,3	26,8	32,2	37,1	40,0	40,9	40,4	38,2	33,9	28,5	23,3	21,0	
Ra (mm/día)	9,1	10,9	13,1	15,1	16,3	16,7	16,5	15,6	13,8	11,6	9,5	8,6	
ETP (Eto) mm	48,6	55,3	76,7	86,0	99,7	105,2	117,6	113,8	93,1	74,8	53,6	46,2	970,4
R = 50 mm													
Precipitación	110,6	89,4	74,0	38,4	14,5	5,8	2,2	3,3	21,3	82,5	126,6	148,5	717,0
ETR	48,6	55,3	76,7	85,7	14,5	5,8	2,2	3,3	21,3	74,8	53,6	46,2	487,9
Déficit	0,0	0,0	0,0	0,3	85,2	99,4	115,4	110,4	71,8	0,0	0,0	0,0	482,5
Reserva	50,0	50,0	47,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	50,0	50,0	
Excedentes	62,0	34,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,7	102,3	229,1

LAT 28° Norte	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Total
Temperatura	13,9	14,2	14,9	15,2	16,4	18,1	20,4	21,3	20,4	18,8	16,8	15,0	
T máx	15,5	15,8	16,6	16,8	17,8	19,4	21,5	22,3	21,5	20,1	18,0	16,3	
T mín	9,9	9,9	10,3	10,6	11,5	12,9	14,6	15,4	15,0	14,0	12,4	10,9	
nºdías mes	31,0	28,3	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	
Radiación Ra	22,3	26,8	32,2	37,1	40,0	40,9	40,4	38,2	33,9	28,5	23,3	21,0	
Ra (mm/día)	9,1	10,9	13,1	15,1	16,3	16,7	16,5	15,6	13,8	11,6	9,5	8,6	
ETP (Eto) mm	48,6	55,3	76,7	86,0	99,7	105,2	117,6	113,8	93,1	74,8	53,6	46,2	970,4
R = 50 mm													
Precipitación	76,0	61,4	50,8	26,4	10,0	4,0	1,5	2,3	14,6	56,7	87,0	102,0	492,6
ETR	48,6	55,3	76,7	50,5	10,0	4,0	1,5	2,3	14,6	56,7	53,6	46,2	419,9
Déficit	0,0	0,0	0,0	35,5	89,7	101,2	116,1	111,5	78,5	18,1	0,0	0,0	550,5
Reserva	50,0	50,0	24,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,4	50,0	
Excedentes	27,4	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,2	72,7

LAT 28° Norte	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Total
Temperatura	13,9	14,2	14,9	15,2	16,4	18,1	20,4	21,3	20,4	18,8	16,8	15,0	
T máx	15,5	15,8	16,6	16,8	17,8	19,4	21,5	22,3	21,5	20,1	18,0	16,3	
T mín	9,9	9,9	10,3	10,6	11,5	12,9	14,6	15,4	15,0	14,0	12,4	10,9	
nºdías mes	31,0	28,3	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	
Radiación Ra	22,3	26,8	32,2	37,1	40,0	40,9	40,4	38,2	33,9	28,5	23,3	21,0	
Ra (mm/día)	9,1	10,9	13,1	15,1	16,3	16,7	16,5	15,6	13,8	11,6	9,5	8,6	
ETP (Eto) mm	48,6	55,3	76,7	86,0	99,7	105,2	117,6	113,8	93,1	74,8	53,6	46,2	970,4
R = 50 mm													
Precipitación	146,4	118,3	97,9	50,8	19,2	7,6	2,9	4,4	28,1	109,1	167,5	196,5	948,7
ETR	48,6	55,3	76,7	86,0	34,0	7,6	2,9	4,4	28,1	74,8	53,6	46,2	518,2
Déficit	0,0	0,0	0,0	0,0	65,7	97,6	114,7	109,4	64,9	0,0	0,0	0,0	452,2
Reserva	50,0	50,0	50,0	14,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	34,4	50,0	50,0	
Excedentes	97,8	63,0	21,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	98,3	150,3	430,5

Figura 10. Balances hidrometeorológicos en la Isla de La Palma para diferentes escenarios climáticos (arriba: medio; centro: ciclo seco y abajo: ciclo húmedo). Fuente de datos termopluviométricos: AEMET. Fuente de datos de radiación: Tablas FAO (2006).

La Tabla 7 muestra el resumen entre los diversos escenarios para una reserva útil $RU = 50$ mm, sin detraer la escorrentía superficial de los excedentes, es decir, se presenta el valor bruto.

Tabla 7. Resumen de los balances hidrometeorológicos en la Isla de La Palma para un año medio, seco y húmedo, considerando una reserva útil en el suelo $RU = 0,50$ mm y una ET_0 calculada por el Método de Hargreaves, sin detracción de la escorrentía superficial de los excedentes. ETR: evapotranspiración real.

Escenario climático	P anual (mm)	ET0 (mm)	ETR (mm)	Infiltración (mm)
Seco	492,0	970,4	419,9	72,7
Medio	717,0	970,4	487,9	229,1 / 230,6
Húmedo	948,7	970,4	518,2	430,5



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2.3. GEOLOGÍA DE LA PALMA

2.3.1. Geología general

2.3.1.1. Introducción

Existe abundante bibliografía temática sobre la Geología insular de La Palma que puede dividirse en tres categorías de trabajos:

- Genéricos: elaborados casi siempre por autores antiguos, que consideran la isla globalmente y especulan sobre el origen de La Caldera de Taburiente (von Buch, 1825; Reiss, 1861; Sapper, 1906; Fúster et al., 1968 y 1989; Carracedo, 1984; etc.).
- Detallados, que a su vez se centran en:
 1. Las características y significado del Complejo Basal que aparece en el fondo de La Caldera (Gastesi et al., 1966; Hernández-Pacheco, 1971 y 1973; Hernández-Pacheco y Afonso, 1974; de la Nuez, 1983; Staudigel y Schmincke, 1984; Staudigel et al., 1986; etc.), y
 2. El volcanismo histórico del sur de la isla (Afonso, 1974; Hernández-Pacheco y Fernández-Santín, 1975; Hernández-Pacheco y Valls, 1982; Carracedo, 2011; etc.).
- Recientes: que suponen una actualización de los conocimientos existentes, tanto sea de carácter insular como parcial:
 1. Coello (1987), que a través de la investigación de las galerías del norte de La Palma hace aportaciones fundamentales al conocimiento de la estratigrafía y estructura del subsuelo; en él se menciona por primera vez la existencia de una enigmática "caldera" enterrada que condiciona decisivamente el flujo del agua subterránea y es responsable de los caudalosos nacientes de Marcos y Cordero.
 2. Navarro (1992, 1993), que realiza una cartografía geológica insular diferenciando las principales unidades volcanológicas existentes, base para la conceptualización del sistema hidrogeológico expuesta en el Avance del Plan Hidrológico Insular de La Palma (APHP, 1992).
 3. Navarro y Coello (1993), que elaboran una cartografía geológica detallada a escala 1:25.000 de la Caldera de Taburiente y zonas anexas.
 4. Carracedo (1994), que aporta nuevos conocimientos sobre la génesis, estructura y evolución de la zona meridional de La Palma.
 5. Carracedo et al. (1997), que elaboran un mapa geológico a escala aproximada 1:33.000 (con detalle mayor en campo) del volcán Cumbre Vieja, con incorporación de dataciones radiométricas.
 6. De la Nuez et al. (2008) presentan un estudio sobre estructura interna y volcanismo reciente en La Palma.

7. CSIC-IGME (2001), donde se presenta un detallado mapa geológico de La Palma, actualizado de los trabajos de Carracedo et al. (2001).
8. Carracedo (2011), que elabora una síntesis muy detallada de la historia geológica del archipiélago canario.
9. IGME-OAPM (2011) que edita la Guía Geológica del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente.

2.3.2. Geología insular

2.3.2.1. Edificios volcánicos

Las unidades estratigráficas de La Palma pueden agruparse en dos grandes bloques diferenciados (APHP, 1992 y 2012; Navarro, 1992 y 1993; Carracedo, 1994 y 2011; PHP, 2001; Poncela, 2009; Barrera y Morate, 2011) (Figuras 11 y 12):

1. Complejo Basal, constituido por un núcleo de edad superior a 3 millones de años (Plioceno), formado esencialmente por materiales volcánicos submarinos y rocas intrusivas, que solo aflora en el fondo de la Caldera de Taburiente pero aparece en el frente de numerosas galerías, por lo que puede inferirse su configuración aproximada en el subsuelo. Esta formación tiene un considerable interés desde el punto de vista hidrogeológico, puesto que condiciona la circulación del agua subterránea al constituir un medio de muy baja permeabilidad, lo que en la práctica se asimila al basamento impermeable general.
2. Un conjunto de Unidades Volcánicas Subaéreas (lavas, piroclastos, diques, etc.) que recubren discordantemente el Complejo Basal y que han sido emitidas durante los últimos 2 millones de años. Su emisión se ha producido de manera discontinua y dispersa espacialmente, siendo el resultado de la imbricación de grandes edificios volcánicos singulares, los cuales se han sucedido en el tiempo coetáneamente al desplazamiento de la actividad volcánica principal de norte a sur. Este conjunto constituye el sistema acuífero insular.

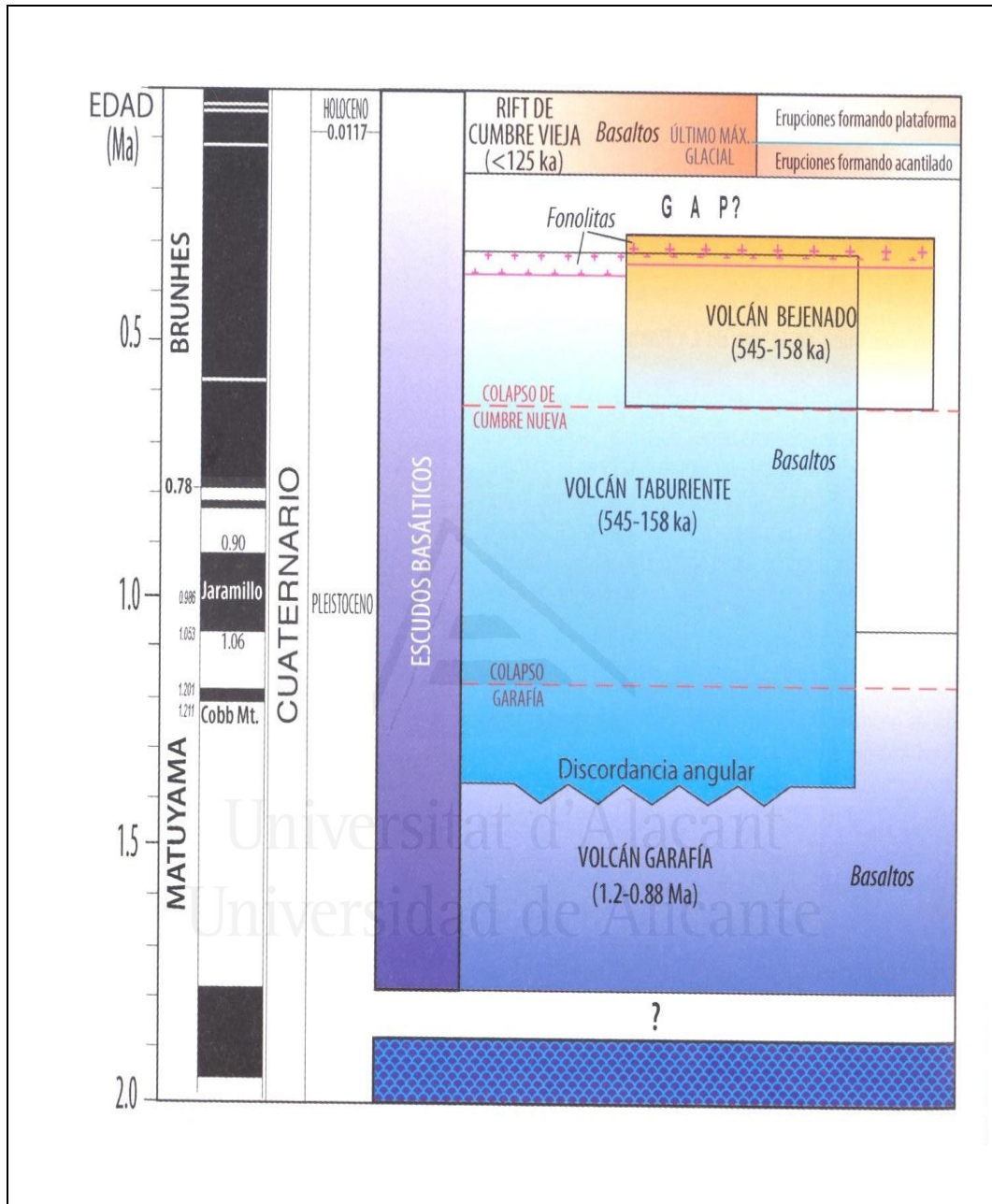


Figura 12. División cronoestratigráfica de la Isla de La Palma (Carracedo, 2011).

La principal cronología de los distintos episodios volcánicos acontecidos en La Palma (Guillou et al., 1998; Carracedo, 2011) se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Cronología del volcanismo en La Palma (adaptado de Carracedo, 2011; IGME-OAPN, 2011). De mayor antigüedad hasta la actualidad.

Edad (Ma)	Evento	Descripción
4 a 3	Emisiones submarinas	Inicio de las emisiones submarinas que originan el basamento del bloque insular.
3 a 2	Levantamiento y erosión	Ascenso de los materiales volcánicos submarinos hasta que emergen por encima del mar. Inicio de erosión y dismantelamiento.
~ 2	Deslizamientos	Son frecuentes las apariciones de bruscos y violentos deslizamientos de los materiales submarinos que originan brechas de avalancha.
1,77 a 1,20	Edificio Garafía o Taburiente I	Aparición de las primeras emisiones subaéreas de la isla. Se agranda el perímetro insular y un gran volumen de lavas recubren el basamento.
1,20 a 0,89	Deslizamiento de Garafía	Deslizamiento gravitacional del flanco meridional del volcán aparecido.
1,1 a 0,80	Edificio Taburiente II (Taburiente Inferior)	Corresponde a las primeras emisiones de un nuevo estratovolcán que cubre completamente el edificio anterior.
0,80 a 0,71	Edificio Taburiente II (Taburiente Superior)	Emisiones finales.
0,77 a 0,56	Edificio Cumbre Nueva (Taburiente II)	Aparece un nuevo centro emisor hacia el sur que emite lavas sincrónicas a las del tramo final del edificio Taburiente II (Superior).
0,56	Deslizamiento del flanco occidental de Cumbre Nueva	Gran deslizamiento gravitacional, con formación de brechas de avalancha.
0,56 a 0,49	Edificio Bejenado y sedimentos de El Time	Surge un nuevo centro en el interior de la isla en su desplazamiento hacia al sur. Coetáneamente se dismantelan los relieves formados y se acumulan grandes abanicos aluviales en la zona de El Time.
0,123	Edificio Cumbre Vieja	Se producen las primeras emisiones de lavas aflorantes en el paleoacantilado y se desplazan los centros de emisión hacia el sur (zona de rift).
0,05	Erupciones subrecientes	Aparece un campo de volcanes estrombolianos entre las lavas que ocupan la rasa o plataforma marina.
Actualidad	Erupciones históricas	Volcanes de Montaña Quemada o Tacande, Tahuya, San Martín, Fuencaliente o San Antonio, El Charco, San Juan o Nambroque y Teneguía

2.3.2.2. Complejo Basal

El Complejo Basal, con afloramientos por encima de la cota 1.500 msnm, debe ser considerado como un edificio volcánico submarino que ha sido levantado hasta su actual posición por el empuje ascendente de intrusiones magmáticas posteriores. La intensa erosión experimentada ha provocado la disección de sus niveles más profundos, de forma que quedan expuestas a la vista las raíces del primitivo edificio submarino (Navarro y Coello, 1993).

Las rocas que lo integran pertenecen a los más diversos tipos: desde materiales emitidos por erupciones submarinas hasta rocas granudas (gabros y sienitas) resultantes de la consolidación lenta del magma en cámaras profundas, pasando por diques de varias generaciones o acumulaciones fragmentarias de origen poco claro, a las que se ha dado el nombre genérico de aglomerados. El grado de alteración suele ser elevado (Figura 13).

Aunque integrado por una gran diversidad de materiales, el Complejo se comporta hidrogeológicamente de una forma muy homogénea, ya que es globalmente impermeable. Pero, a pesar de la estanqueidad global de esta formación, no son infrecuentes en su seno los manantiales de escaso caudal, casi siempre asociados a grandes fracturas secundarias o a diques rotos, lo que condiciona una pequeña permeabilidad secundaria por fisuración.

2.3.2.3. Unidades volcánicas subaéreas

El Complejo Basal y las Unidades Volcánicas Subaéreas están separados por una nítida discordancia que representa un periodo de inactividad volcánica de aproximadamente un millón de años (o más) de duración. Durante este periodo tuvieron lugar dos procesos simultáneos:

- El levantamiento del Complejo Basal, que ha determinado que rocas originalmente submarinas ahora se encuentren a cotas elevadas, y
- La erosión de la parte más superficial del primitivo edificio, de forma que ahora quedan expuestos a la vista materiales pertenecientes a zonas internas del mencionado edificio.

Las Unidades Volcánicas Subaéreas son el resultado de la actividad magmática efusiva insular desarrollada después del levantamiento del Complejo Basal; su edad está comprendida entre unos 2 millones de años y la actualidad. Las litologías más representativas son los basaltos y, en menor medida, rocas más diferenciadas como las fonolitas o traquitas; este hecho simplifica el comportamiento hidrogeológico del conjunto, pero, al mismo tiempo, obstaculiza el trabajo de distinción de unidades litoestratigráficas dentro de la secuencia eruptiva, pues la actividad volcánica no ha sido ni constante ni se ha distribuido según un único esquema.

Se distinguen de más antiguo a más moderno las siguientes unidades (APHP, 1992; PHP, 2001, 2002; Poncela, 2009; Carracedo, 2011; APHP, 2012 y 2015):

2.3.2.3.1. Edificio Taburiente I o Edificio Garafía

El afloramiento principal se encuentra al norte de la Caldera de Taburiente donde la intensa erosión ha actuado en el área en la que el espesor de las lavas posteriores es mínimo. Estos afloramientos, atribuidos anteriormente al Complejo Basal, han permitido interpretar y comprender mejor la historia geológica de la isla y el funcionamiento hidrogeológico insular. Destaca también en el Barranco del Agua, donde surgen los nacientes de Marcos y Cordero (Fig. 14).

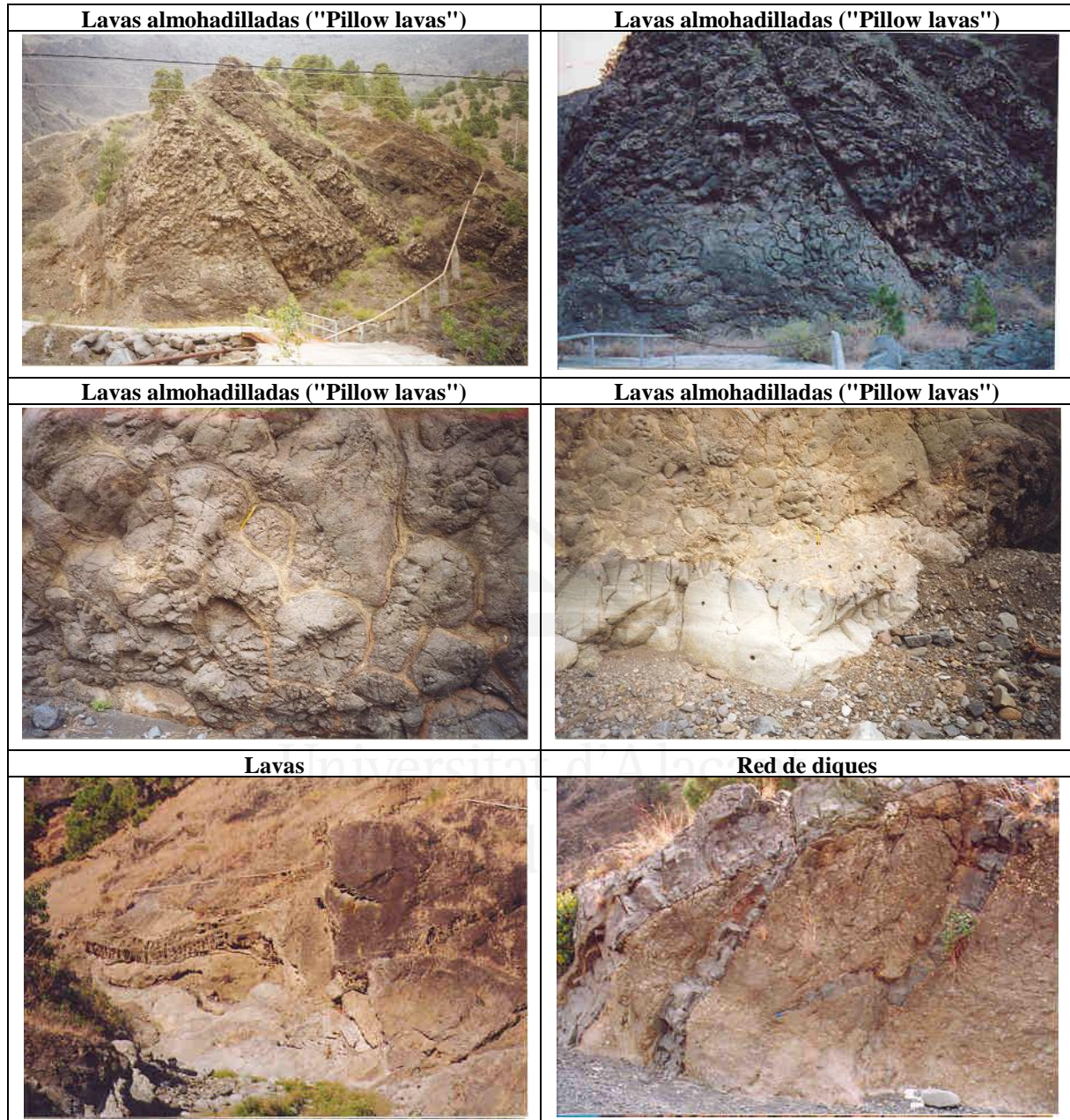


Figura 13. Diversas litologías y aspecto del Complejo Basal.



Figura 14. Diversas litologías y aspecto del Edificio Taburiente I o Edificio Garafía.

Las principales litologías presentes en este edificio: lavas y mantos piroclásticos, conforman un gran estratovolcán cuya cima se encontraba probablemente sobre lo que ahora es la mitad septentrional de la Caldera de Taburiente, a juzgar por la inclinación divergente de las lavas. Con el estratovolcán Taburiente I (APHP, 1992; Navarro, 1992 y 1993) o Garafía (Carracedo et al., 1997; CSIC-IGME, 2001; Carracedo, 2011) se reanuda la actividad después del largo periodo de calma eruptiva en que se levantó y erosionó el Complejo Basal, sobre el que se apoya discordantemente. Las emisiones comenzaron hace algo más de 2 millones de años, según las dataciones radiométricas absolutas disponibles y duró unos centenares de miles de años.

Los materiales constituyentes del estratovolcán presentan composición predominantemente basáltica y actividad centralizada sobre todo en el vértice, con pocos aparatos periféricos:

- Lavas fluidas de tipo “pahoehoe” y “aa” que llegan hasta la cota 0 y sin duda se prolongan bajo el nivel del mar; las primeras son predominantes en los niveles inferiores de la secuencia estratigráfica.
- Niveles piroclásticos en forma de potentes lentejones con granulometría gruesa (conos de cenizas enterrados), o bien como horizontes delgados y extensos con granulometría más fina; ambos son más abundantes cerca de la región de cumbres original, aunque los segundos tienden a alcanzar una dispersión mayor.
- Aglomerados de génesis variada, constituidos por fragmentos líticos dispersos en una matriz limosa o limo-arenosa.

En la parte central del edificio las lavas están intercaladas e imbricadas con aglomerados y niveles piroclásticos, los cuales tienden a acuñarse y a desaparecer, dando paso a una secuencia integrada fundamentalmente por lavas en las proximidades de la franja costera.

La base de la formación ha experimentado procesos de compactación, con muy baja proporción de huecos, especialmente en los piroclastos y aglomerados. Las lavas están menos afectadas y conservan una buena parte de la porosidad primaria, aunque tiende a disminuir gradualmente al descender en la secuencia estratigráfica.

Un rasgo esencial del Edificio Taburiente I, de gran repercusión hidrogeológica, es que la mitad sur ha desaparecido por completo, decapitada por un anfiteatro calderiforme concéntrico con la depresión de Taburiente. Este anfiteatro ha sido bautizado con el nombre de "estructura COEBRA" por ser los geólogos D. Juan Coello y D. Telesforo Bravo los primeros en reconocer su existencia y su influencia en la circulación del agua subterránea, dado que existen numerosos manantiales con elevado caudal. Su formación coincidió con el cese temporal de la actividad volcánica, lo que favoreció la acción de los agentes erosivos externos, en particular del agua, que excavó en la zona de contacto entre el Complejo Basal y Taburiente I (Edificio Garafía) dos barrancos arqueados convergentes en la antigua zona de cumbres. Esta estructura erosiva, denominada COEBRA, está prácticamente oculta en el subsuelo, aflorando en reducidas extensiones en el interior de la Caldera y en el Barranco del Agua, donde surgen los nacientes de Marcos y Cordero (Navarro, 1993).

2.3.2.3.2. *Edificio Taburiente II o Edificio Taburiente (Inferior y Superior)*

El Edificio Taburiente II (APHP, 1992; Navarro, 1992 y 1993) o Edificio Taburiente (Inferior y Superior) (Carracedo et al., 1997; CSIC-IGME, 2001; Carracedo, 2011) es la unidad más extensa de la Isla en superficie ya que ocupa prácticamente toda la mitad norte, y es también la unidad mejor expuesta en sección natural al haber quedado cortada en todo su espesor (casi 1.000 metros) por la pared de La Caldera. Representa la reactivación volcánica con un desplazamiento hacia el sur del foco magmático, más o menos centrado sobre el domo del Complejo Basal infrayacente.

Las litologías de esta unidad configuran un gran estratovolcán cónico que originalmente tenía su cumbre en algún punto de lo que hoy es La Caldera, pero la formación de esta última ha truncado la porción de cumbres. La cima del edificio superaba ampliamente los 3.000 metros de altura deducida del buzamiento de las lavas, pero la altura del perímetro del circo de cumbres disminuye rápidamente por el constante retroceso erosivo de las paredes de La Caldera. En la cabecera del edificio quedan restos de valles de erosión glaciaria decapitados por la pared, lo que significa que durante el Holoceno existía una parte central con extensión y altura suficientes como para acumular gran cantidad de hielo.

La distribución y tipo de productos eruptivos es similar a la del Edificio Taburiente I o Garafía; no obstante, también se han producido erupciones de flanco a través de diques radiales que han formado numerosos conos de cenizas intercalados e imbricados con las lavas que proceden de la porción central más elevada, en toda la periferia del edificio.

La base aglomerática presenta un elevado contraste de permeabilidad en relación a las lavas suprayacentes, y es un nivel esencial para hacer distinciones estratigráficas y para determinar la posición de la estructura COEBRA, que actúa como barrera morfológica e impide la dispersión radial de los aglomerados, de modo que en las secciones radiales los materiales de Taburiente II (Taburiente) se apoyan directamente sobre Taburiente I (Edificio Garafía); por el contrario, donde falta la estructura COEBRA los aglomerados pueden seguir sin obstáculos las pendientes de la isla.

El Edificio Taburiente II se prolonga en el subsuelo bajo los materiales del Edificio Cumbre Nueva, tanto en el sector del Time como bajo el propio arco de la Cumbre Nueva. Falta, en cambio, en el Valle de Aridane, lo cual es un factor importante a considerar sobre el origen del Valle.

La secuencia eruptiva completa de este edificio queda expuesta en el magnífico corte natural de la pared de La Caldera de Taburiente, donde se apoya directa y discordantemente sobre el Complejo Basal. La secuencia comienza con unos 100 metros iniciales constituidos sólo por mantos aglomeráticos que se yuxtaponen e imbrican lateralmente. Sobre los aglomerados hay casi 1.000 metros de lavas y piroclastos, existiendo un tránsito gradual, con alternancia de lavas y aglomerados hasta que estos desaparecen totalmente y se entra en una secuencia predominantemente lávica. Esta secuencia tiene intercalados niveles piroclásticos de dos tipos extremos (Figura 15):

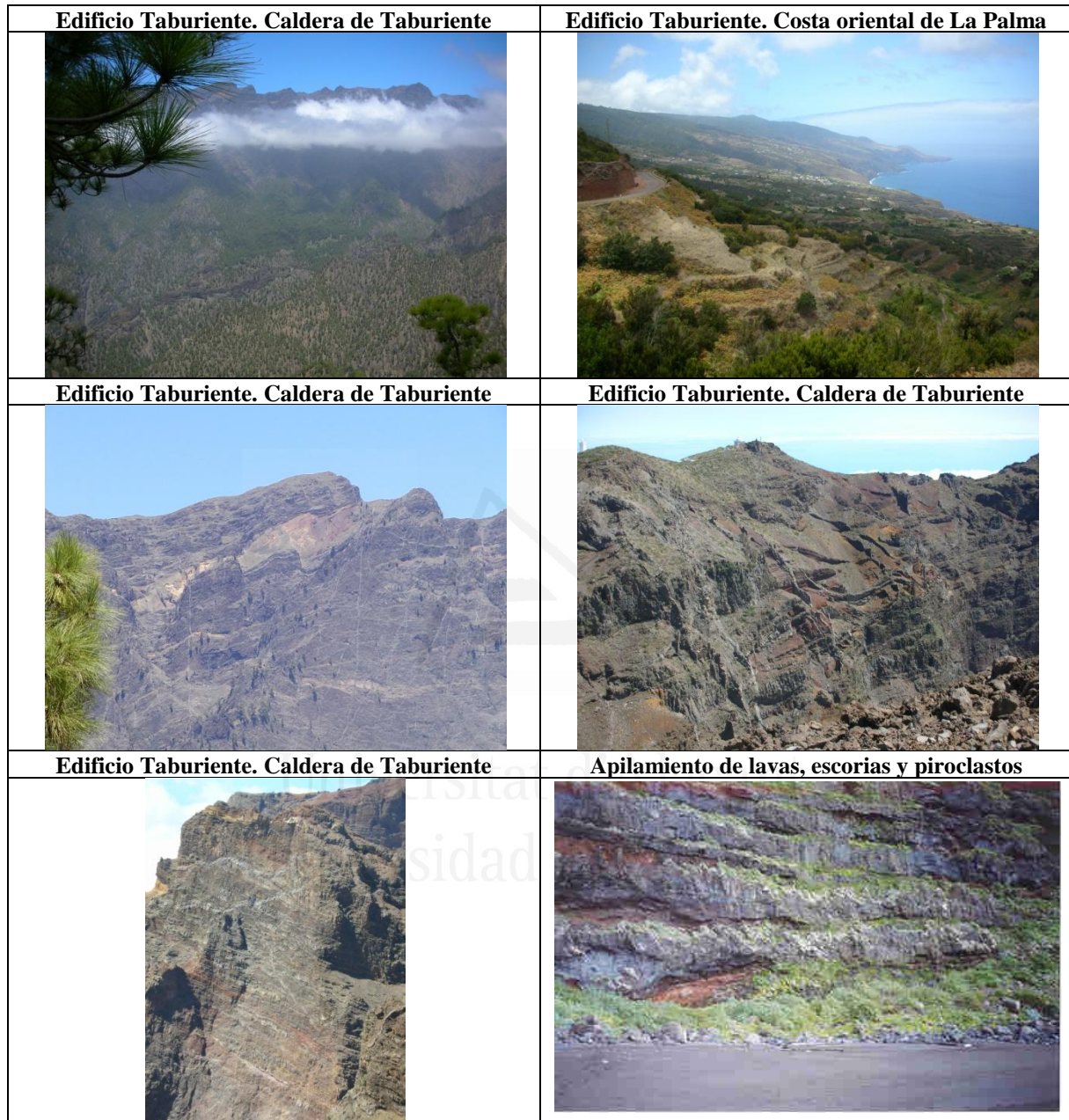


Figura 15. Diversas litologías y aspecto del Edificio Taburiente II (Inferior y Superior) o Edificio Taburiente.

- Grandes masas lenticulares de granulometría gruesa, que corresponden a conos de cenizas enterrados, y
- Horizontes extensos, de granulometría fina y escaso espesor, que son el equivalente distal de los conos. En la pared se aprecia también la red filoniana del edificio, relativamente radial.

En la franja externa, la sucesión estratigráfica se conoce por las numerosas galerías existentes, gran parte de las cuales la atraviesan en su totalidad. Los procesos de alteración y compactación de este moderno edificio han sufrido un escaso desarrollo de forma que, aunque la secuencia alcanza en ciertas zonas un espesor próximo a los mil metros, las rocas conservan gran parte de la porosidad primaria, incluso en los niveles estratigráficos inferiores. Sin embargo, existen notables contrastes de permeabilidad como consecuencia de la heterogeneidad litológica presente.

Fuera de la estructura COEBRA apenas existe contraste de permeabilidad en el contacto entre los edificios Taburiente II Inferior y Taburiente II Superior (Edificio Taburiente), por lo que la transición geológica de una a otra unidad no tiene repercusiones hidrogeológicas.

Por otra parte, como el espesor de Taburiente II Inferior es bastante grande, el agua subterránea sólo se acumula en ella; el papel hidrogeológico de Taburiente II Superior queda reducido a proporcionar un elevado grado de infiltración, que favorece la recarga natural, y a facilitar la circulación vertical a través de la zona no saturada.

En el ámbito de la estructura COEBRA, en cambio, el contraste de permeabilidad es muy marcado.

2.3.2.3.3. Edificio Cumbre Nueva

Es el edificio con menor identidad morfológica, ya que la formación del Valle de Aridane y de La Caldera de Taburiente lo ha suprimido totalmente en una amplia franja norte-sur, dividiéndolo en dos mitades desconectadas (APHP, 1992):

1. El pequeño afloramiento del Time, y
2. El arco de Cumbre Nueva propiamente dicho.

A pesar de la destrucción experimentada, todavía existen rasgos que permiten relacionar las dos mitades y reconstruir la configuración original. Así, ambos afloramientos tienen una morfología similar que contrasta con la del Edificio Taburiente II Inferior, en el que se apoyan:

- Los barrancos están mucho menos encajados, lo que lleva a pensar que la superficie del Taburiente II Inferior ha estado más tiempo expuesta a la acción erosiva, es decir, es más antigua, y
- Mientras que en el Edificio Taburiente II Inferior los barrancos divergen radialmente desde un hipotético vértice situado más o menos sobre el centro de la actual Caldera de Taburiente, los que cortan al Edificio Cumbre Nueva, que también divergen radialmente, lo hacen desde un centro más meridional situado entre el Bejenado y la población de El Paso.

La formación y crecimiento de este edificio tuvo lugar entre los 770.00 y 565.000 años a.C (Carracedo et al., 1997). Sin interrupción aparente en la actividad volcánica se produce un nuevo desplazamiento del foco magmático hacia el sur, responsable del crecimiento del Edificio Cumbre Nueva, en el flanco del Edificio Taburiente II Superior, el cual se corresponde con una configuración de estratovolcán cónico, con las litologías buzando periclinalmente hacia el mar desde el mismo vértice hipotético del que divergen los barrancos, tal como se infiere de la disposición de la red de drenaje.

El Edificio Cumbre Nueva está constituido por una secuencia formada por un apilamiento de lavas basálticas y mantos piroclásticos subordinados, que en la cabecera oriental del Valle de Aridane, puede alcanzar los 400-500 m de potencia. El emplazamiento se realizó en un lapso de tiempo relativamente corto pero con actividad eruptiva muy continua e intensa (Figura 16). Las lavas están representadas por tipos “pahoehoe” y “aa” muy poco alteradas y compactadas. Los horizontes piroclásticos son escasos en la proximidad del mar pero aumentan en frecuencia, espesor y tamaño de grano hacia el interior de la Isla.

Esta unidad se comporta globalmente como un conjunto de elevada permeabilidad. Los únicos elementos que representan un obstáculo para la circulación del agua subterránea son los diques que se pueden agrupar en dos familias:

- Sistema radial asociado al estratovolcán, y
- Sistema norte-sur condicionado por el eje tectónico principal de la isla, sobre el cual se ha emplazado cada uno de los diversos edificios a lo largo de la evolución geológica. El entrecruzamiento de la red de diques y la fuerte anisotropía vertical son los factores que permiten que la superficie piezométrica se eleve considerablemente sobre el zócalo impermeable.

Al final de la etapa constructiva de esta unidad, la acumulación de material tanto del Edificio Cumbre Nueva como del Edificio Taburiente, ejerció una presión litostática creciente sobre el techo inclinado del Complejo Basal, lo que motivó que en la superficie de contacto se desarrollara una fuerte inestabilidad que finalmente se tradujo en un gran colapso en el flanco occidental, el cual provocó un súbito deslizamiento gravitacional en masa, conocido como deslizamiento de Aridane, dejando tras de sí una depresión abierta en forma de herradura (Navarro, 1993). El volumen de material puesto en movimiento se ha estimado entre 180-200 km³ (Carracedo et al., 1997). Los resultados del mismo todavía están presentes y configuran la topografía de la zona central de La Palma.

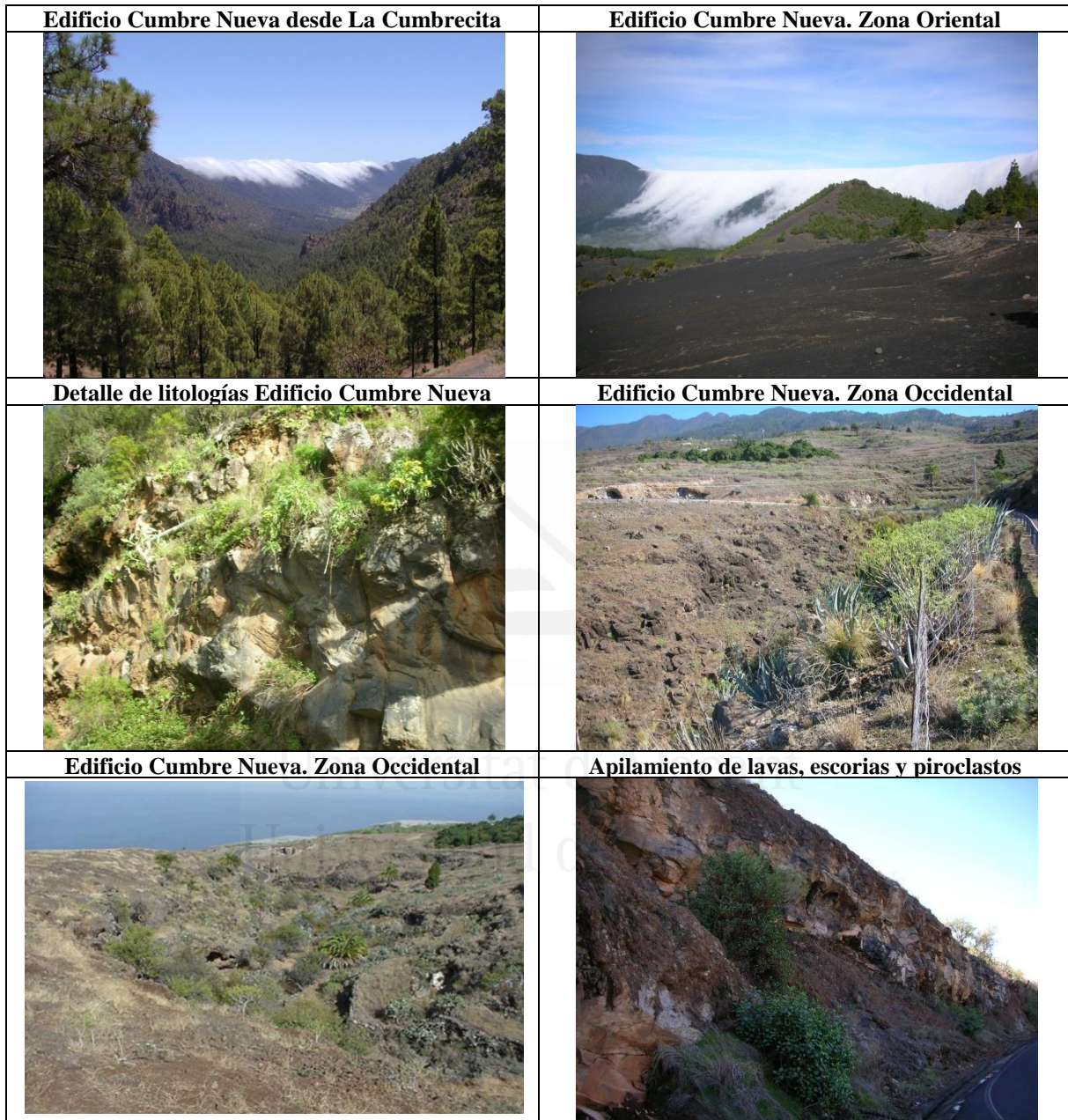


Figura 16. Diversas litologías y aspecto del Edificio Cumbre Nueva (o prolongación del Edificio Taburiente II Superior).

2.3.2.3.4. Edificio Bejenado y sedimentos del Time

El Edificio Bejenado es un estratovolcán de reducidas dimensiones limitado por la zona septentrional del Valle de Aridane y la Caldera de Taburiente, y constituye un pequeño macizo cuya divisoria de aguas separa claramente la mitad norte de la sur (Figura 17).

El deslizamiento de Aridane provocó una brusca descompresión responsable del ascenso del magma en el antiguo anfiteatro lo que motivó la aparición del volcán Bejenado, el cual se eleva directamente sobre el Complejo Basal existiendo, no obstante, una brecha volcánica caótica de potencia variable en el contacto. Esta brecha muestra una matriz limo-arcillosa que engloba de manera dispersa cantos angulosos y subangulosos, y presenta una red de diques menos densa que la correspondiente a los materiales infrayacentes del Complejo Basal.

Las principales litologías del Bejenado se corresponden con lavas tipo “aa” y “pahoehoe” que presentan buzamiento periclinal (que gradualmente pasa a subhorizontal en el sector meridional, lo que sugiere que el anfiteatro original del deslizamiento de Aridane se encontraba próximo al centro de emisión), y con escasos niveles piroclásticos subordinados.

Hacia techo de secuencia afloran lavas de naturaleza traquibasáltica y fonolítica. La mayor potencia, del orden de 500 m, se localiza hacia el Valle de Aridane y se acuña rápidamente.

La red de drenaje que se desarrolla entre el Edificio Bejenado y la cabecera del Edificio Cumbre Nueva desarrollan el Barranco de El Riachuelo, que se colmata con los materiales producto del desmantelamiento de los relieves originados, formando una acumulación decamétrica de sedimentos fluviolacustres, cuya secuencia de proximal a distal se dirige hacia la zona del Barranco de Tenisca, en las proximidades del paraje conocido como Valencia y cercano a la Ermita de la Virgen del Pino

Hacia la desembocadura del Barranco de las Angustias, y probablemente en el subsuelo de El Paso y Los Llanos, las lavas del Bejenado están intercaladas entre los sedimentos del Time.

Coetáneamente con la diferenciación morfológica de la Caldera de Taburiente, los productos resultantes de la intensa erosión del anfiteatro se acumularon en el abanico aluvial del Time, cuyos materiales forman un apilamiento de algunos centenares de metros de espesor y proceden de la destrucción de la citada caldera (Figura 18).

En dichos sedimentos se distinguen dos tipos de niveles, de color y morfología contrastados:

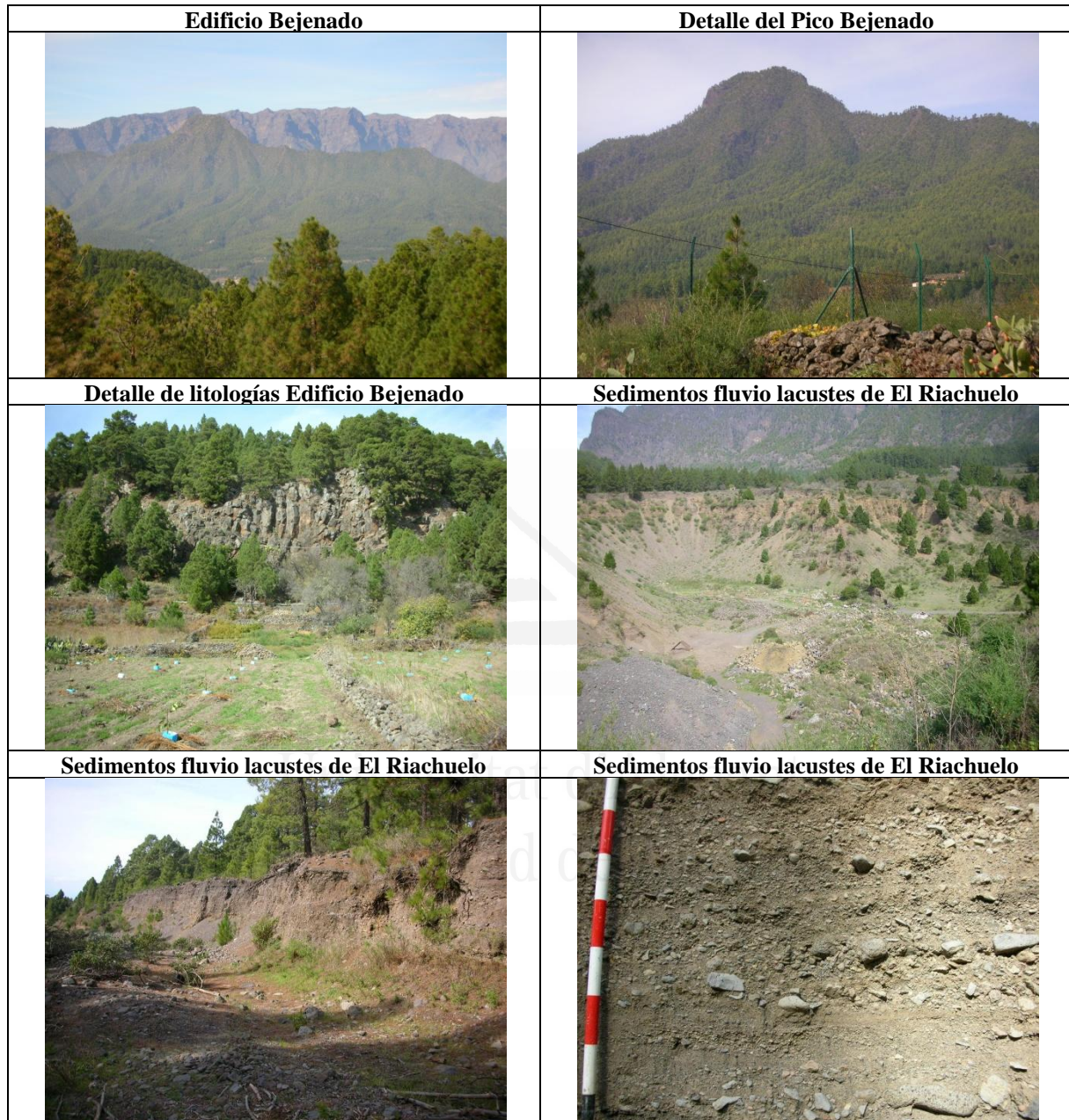


Figura 17. Diversas litologías y aspecto del Edificio Bejenado y sedimentos de El Riachuelo.

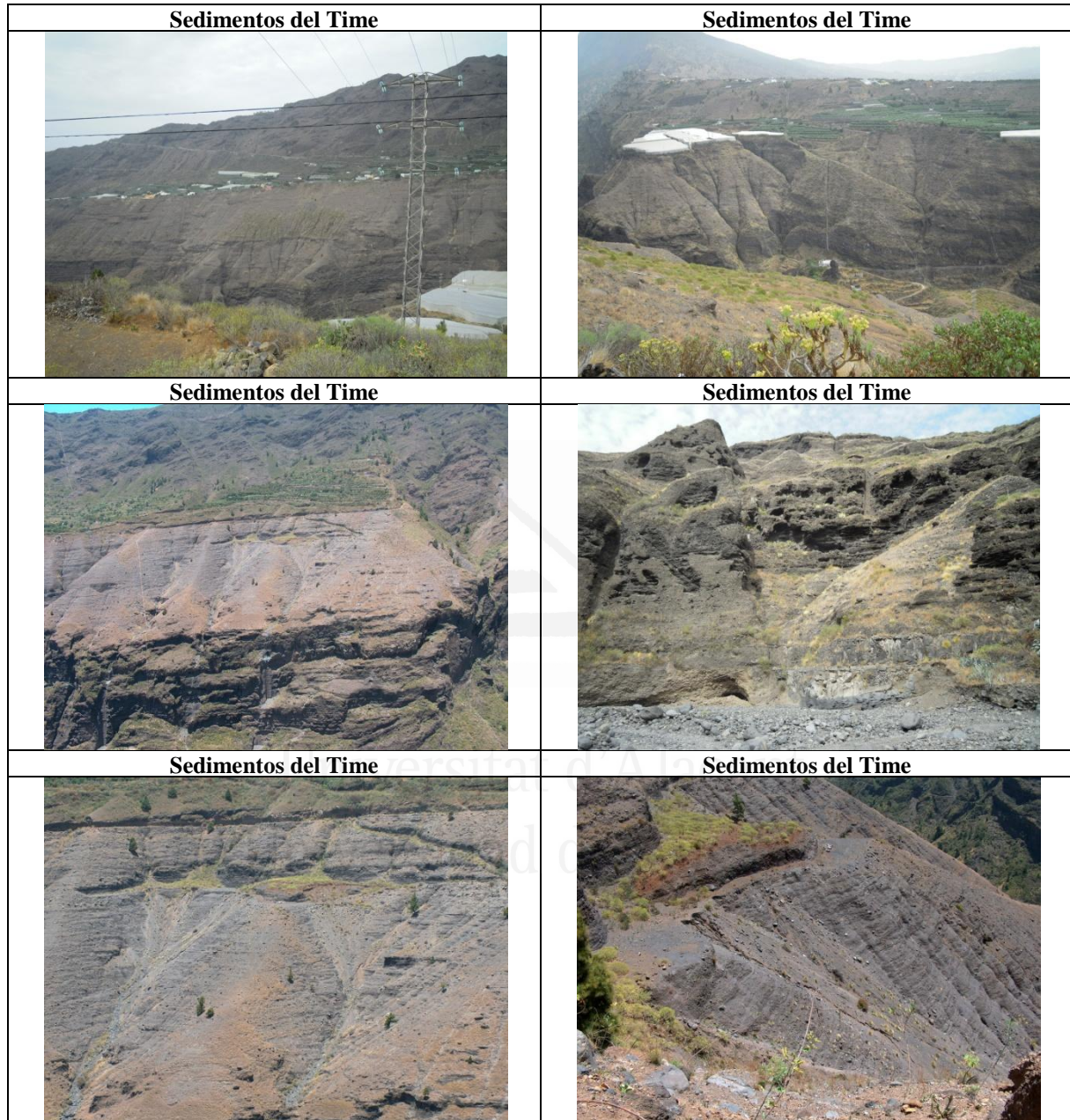


Figura 18. Diversas litologías y aspecto de los sedimentos del Time.

- Una mitad inferior donde predominan capas bien individualizadas de naturaleza brechoide, con cantos angulosos y matriz fina bien consolidada, formada por pequeñas avalanchas en masa y flujos densos, y
- Una mitad superior más claramente conglomerática, donde predominan los grandes cantos rodados con matriz intersticial fina que les resta porosidad. Presentan también características sedimentológicas controladas por flujos densos. Este aumento granulométrico parece definir el carácter fundamentalmente progradante del abanico durante el desmantelamiento.

Las lavas del Bejenado son muy permeables debido a su reducida alteración y compactación, pero su influencia en la circulación del agua subterránea resulta muy limitada en el ámbito del estratovolcán propiamente dicho, pues la recarga no es muy alta y el agua infiltrada no permanece retenida por la moderada densidad en la red de diques. La circulación se limita a una fina lámina de agua que discurre cerca del contacto con el mortalón (depósito de derrubios de avalancha, englobado en una matriz arcillosa, originado por un deslizamiento gravitacional) o con el Complejo Basal, motivo por el cual las galerías perforadas en esa zona han sido muy poco productivas, incluso improductivas, y se encuentran actualmente abandonadas.

Posteriormente, un nuevo desplazamiento del foco emisor hacia el sur deja inactivo al volcán Bejenado, desencadenando una intensa erosión en la zona de Taburiente, proceso que continúa en la actualidad. Dicha erosión y paulatino encajamiento del Bco.de Las Angustias han hecho desaparecer la mitad septentrional del Bejenado, siendo la morfología actual la de un semicono (Navarro, 1992 y 1993).

2.3.2.3.5. Edificio Dorsal Sur o Cumbre Vieja

El edificio Dorsal Sur Volcán Cumbre Vieja es un extenso volcán poligénico, con un área subaérea de 220 km², un volumen subaéreo de 125 km³ y una altura máxima próxima a los 2.000 m, que se localiza sobre el flanco meridional del antiguo Edificio Cumbre Nueva. Los materiales que lo constituyen son fundamentalmente lavas alcalinas (basaltos alcalinos, basanitas, traquibasaltos y tefritas) y depósitos piroclásticos de naturaleza estromboliana, de los cuales una proporción significativa individualiza conos de cenizas concentrados sobre los ejes estructurales principales de la dorsal (Figura 19) . También existen numerosos domos fonolíticos dispersos sobre el edificio.

Los conos de cenizas presentan, en general, un excelente grado de conservación y reflejan claramente su morfología en la topografía y paisaje del área. Este hecho ha motivado la declaración de Espacio Natural Protegido y Área de Sensibilidad Ecológica al Monumento Natural de Los Volcanes de Aridane (P-6), formado por la Montaña de Argual, Montaña de Triana, Montaña de La Laguna y Montaña Todoque, para la preservación geomorfológica de estos conos de picón y de sus cráteres, predominantemente con forma de herradura.

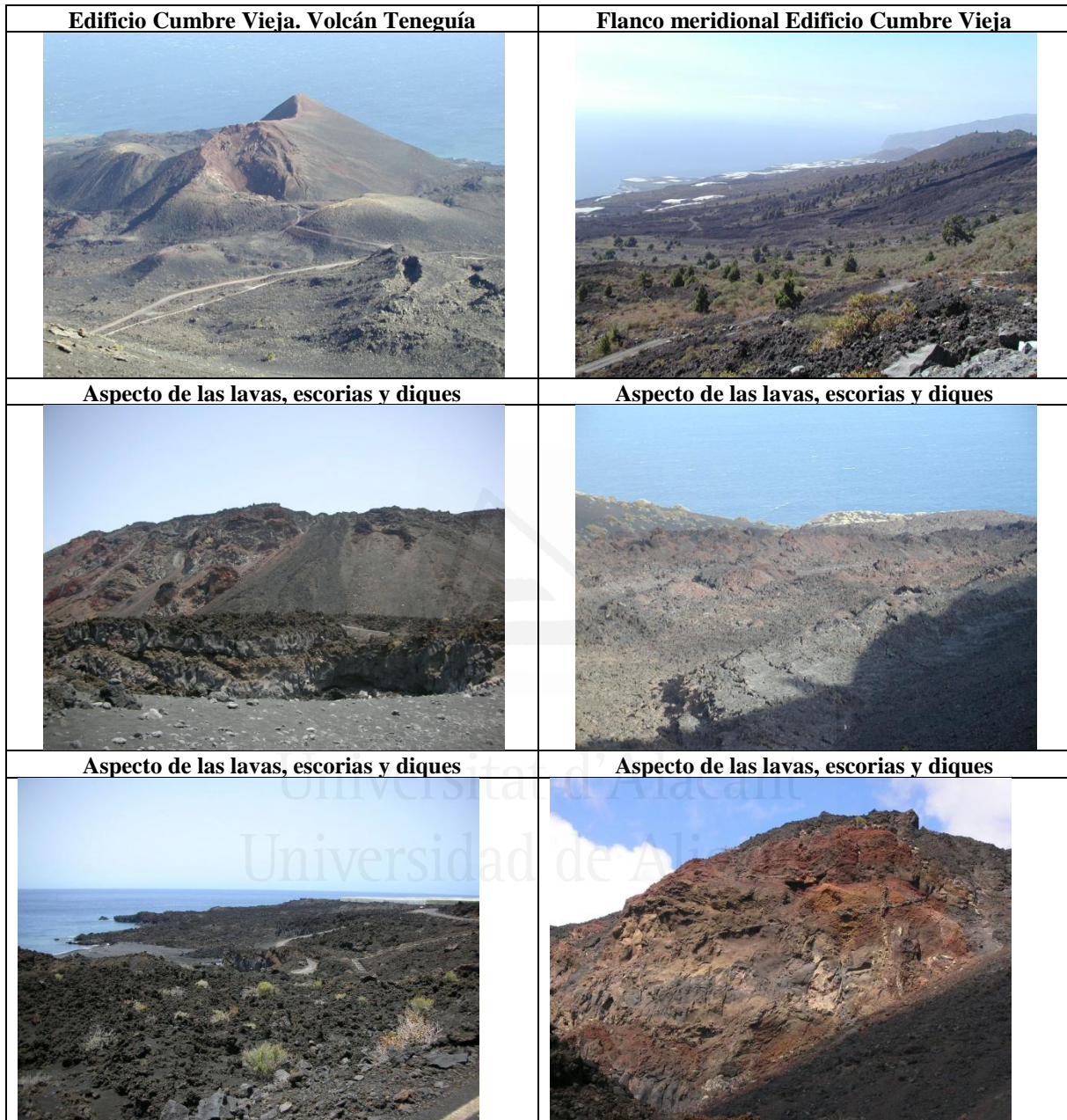


Figura 19. Diversas litologías y aspecto del Edificio Dorsal Sur o Cumbre Vieja.

La cumbre del complejo volcánico está formada por una cresta montañosa alineada norte-sur y formada principalmente por la concentración de fisuras y aberturas o una zona de cresta o dorsal volcánica (“rift zone”) que individualiza dos vertientes: oriental y occidental. Las principales características de estas dorsales son la presencia de una densa red de diques subparalela a la alineación principal (mayor cuanto mayor es la profundidad y la cercanía a los ejes de las dorsales), procesos geotectónicos de extensión, con una conexión directa con una somera cámara magmática infrayacente, etc. Esta zona ha mostrado actividad histórica reciente, especialmente en el sur de la isla, donde cabe citar la erupción que formó el volcán Teneguía en 1971.

La evolución del Edificio Dorsal Sur o Volcán Cumbre Vieja se ha realizado en diversas etapas que, pasando de un sistema coalescente de tres “rifts” o crestas volcánicas a uno solo, ha ido trasladando la actividad hacia el sur, condicionando la geomorfología del entorno.

Los materiales formados son muy jóvenes, prácticamente sin sufrir procesos de alteración, lo que los convierte en extremadamente permeables y transmisivos. No obstante, la zona meridional de la isla muestra contaminación de las aguas subterráneas por CO₂ de origen volcánico como consecuencia de la actividad magmática latente.

De manera discontinua, los procesos erosivos han actuado sobre los distintos edificios y barrancos dando lugar a depósitos cuaternarios de naturaleza detrítica: depósitos de barranco (como en el caso del Barranco de Las Angustias), de ladera, de avalancha y/o canchales y de playas. También se suelen producir alteración a suelos dando lugar a coluviones y suelos eluviales y/o residuales, más o menos desarrollados.

2.3.3. Geomorfología y morfoestructura

La isla de La Palma forma un relieve elongado N-S conformado por dos estratovolcanes poligénicos: el escudo norte con forma cónica (cono norte) y el volcán Cumbre Vieja al sur (desarrollado a partir del rift que surge como consecuencia del desplazamiento meridional de la actividad volcánica), separados por una gran depresión en forma de silla de montar: el Valle de Aridane (Figura 20).

La intensa erosión ha formado barrancos encajados en el escudo norte, que disectan los materiales en forma radial desde las cumbres hacia la costa; en la zona sur, la red de drenaje está pobremente desarrollada. Las pendientes suelen ser pronunciadas en las cabeceras de los barrancos, siendo principalmente estructurales en los flancos del Edificio Cumbre Vieja, y estructurales y erosivas en el escudo norte (CSIC-IGME, 2001).

En la zona de cumbres del edificio norte se manifiestan relictos de características periglaciales. En las del edificio sur aparecen numerosos volcanes tipo estromboliano que marcan la línea de cumbres, atravesados por numerosos enjambres de diques de emisión.

El Valle de Aridane y la Caldera de Taburiente se originaron como consecuencia de deslizamientos gravitacionales (Navarro, 1992 y 1993; Ancochea et. al, 1994; Carracedo, 1994) con importante desarrollo erosivo en esta última. Los acantilados costeros son asimismo frecuentes en el escudo norte, donde la continua caída de bloques por descalces y colapsos favorecen una rápida regresión de la costa. En cambio, en la vertiente sur, los acantilados del Edificio Dorsal Sur son menos pronunciados y verticales, y están frecuentemente suavizados por los flujos de lavas y las plataformas lávicas costeras que los fosilizan, retardando la erosión costera.

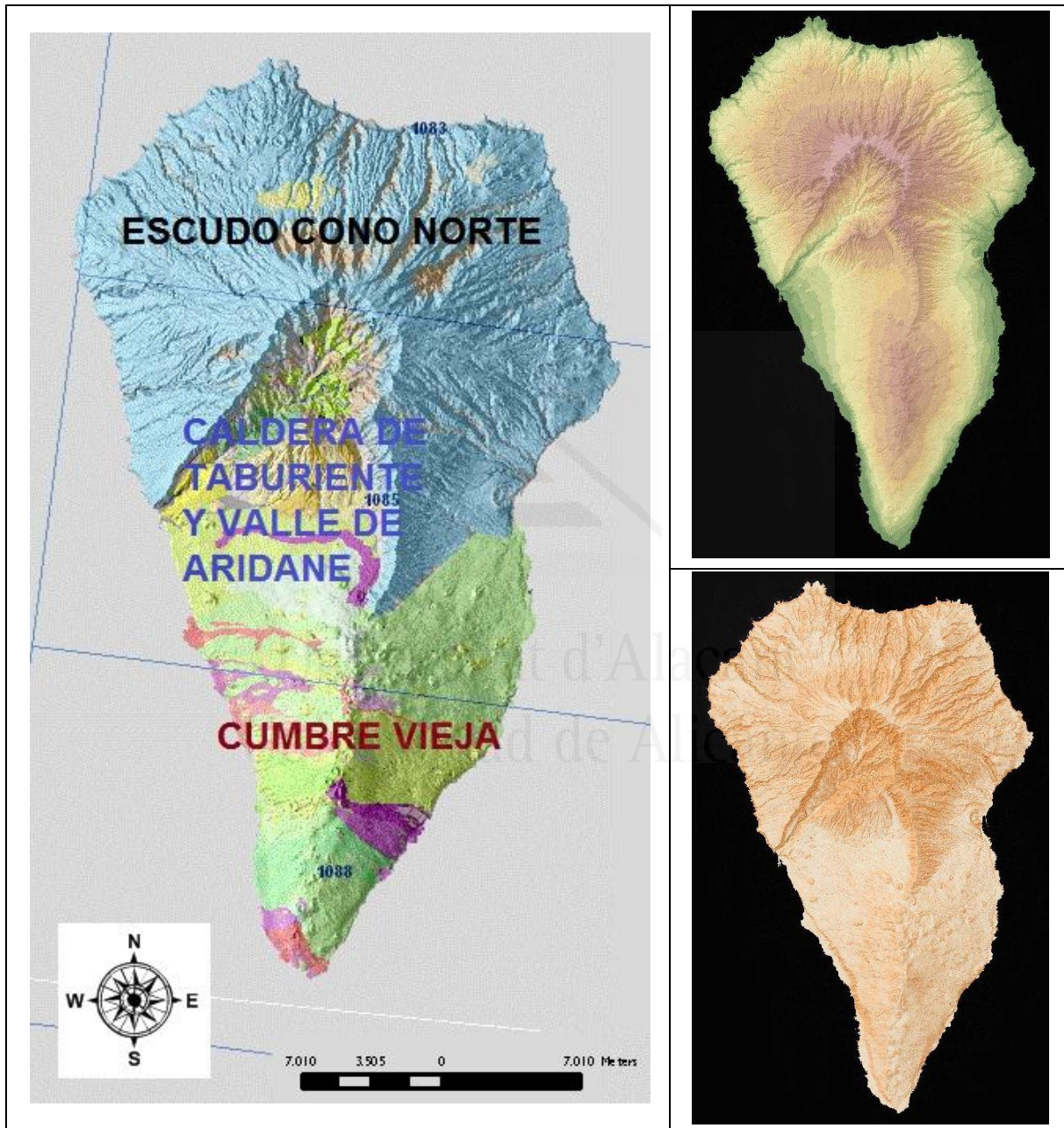


Figura 20. Geomorfología y morfoestructura de La Palma. Izquierda: zonación morfoestructural. Derecha arriba: hipsometría. Derecha abajo: pendientes.



CAPÍTULO 3

Universitat d'Alacant
HIDROGEOLOGÍA DE LA PALMA
Universidad de Alicante

CAPÍTULO 3. HIDROGEOLOGÍA DE LA PALMA

En este capítulo se hace una revisión de los sistemas de captación de aguas subterráneas de La Palma, así como de la hidrodinámica a partir del análisis de la evolución histórica de los caudales drenados por galerías y nacientes. Del estudio de los hidrogramas de descarga de dichas captaciones se desarrolla una metodología contrastada para la parametrización hidrogeológica del sistema acuífero insular, en especial a partir de los coeficientes de agotamiento y su relación con la difusividad hidráulica de dicho sistema. Además, se contrastan varias metodologías relacionadas con la estimación de la distancia de influencia entre galerías.

Finalmente se describen a continuación los principales rasgos geomorfoestructurales, hidrogeológicos y de gestión que han permitido definir las masas de agua subterránea dentro del sistema acuífero de La Palma, de acuerdo con los procedimientos derivados de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.1. ANÁLISIS HISTÓRICO

La Palma es una isla volcánica oceánica que por su naturaleza singular y una demografía no excesivamente presionante, siempre se ha abastecido de recursos hídricos subterráneos propios dada su excelente calidad y abundancia, tanto para agricultura como para abasto, especialmente provenientes de la zona de las vertientes, principal sistema acuífero insular.

La mayoría de recursos han sido captados tradicionalmente por galerías (muchas de varios kilómetros de longitud) y manantiales, lo que ha permitido tener un conocimiento geológico profundo del interior de la isla y, en menor medida, por pozos tradicionales canarios, completado por sondeos localizados.

Al ser una isla de abrupto relieve y nivel piezométrico elevado en su interior, ello ha permitido que las captaciones por gravedad a diferente cota dominen en el panorama extractivo, lo que confiere, además, un criterio de sostenibilidad importante, pues no se depende, en general, del consumo energético asociado (menor huella de carbono).

La captación por manantiales, muchos de ellos en el interior de La Caldera, ya fue objeto de explotación por parte de los "benahoritas" (habitantes indígenas de La Palma) desde antes de la Conquista y, por ende, "a posteriori".

Es en la década de los años 50 del siglo XX cuando la iniciativa privada comienza la excavación de galerías, tendencia que siguió en aumento hasta la década de los 70-80, hasta conseguir una cierta estabilización en la década de los 90 (CIAP, 2009) (Figura 21).

Desde ese periodo hasta la actualidad, la tendencia ha ido decreciendo debido, sobre todo, a los costes de perforación y a las dificultades administrativas y de seguridad requeridas para el uso y manejo de explosivos, lo que se traduce en una ralentización cuando no paralización de actividades. Únicamente pueden ser relevantes labores de mantenimiento por derrumbes, mantenimiento de caudales y, localmente, aumento de caudales y regulación por compuertas hidráulicas.

La presencia de pozos (en general por debajo de la cota 600 msnm) con bomba electrosumergible tuvo su apogeo durante la segunda mitad del siglo pasado y sigue presente hoy día. En particular, es de destacar la tipología de pozo canario, con unos tres metros de diámetro y la posibilidad de presentar galerías de fondo para incrementar el caudal y reducir el descenso (Santamarta, 2009). Los sondeos propiamente dichos son puntuales en La Palma.

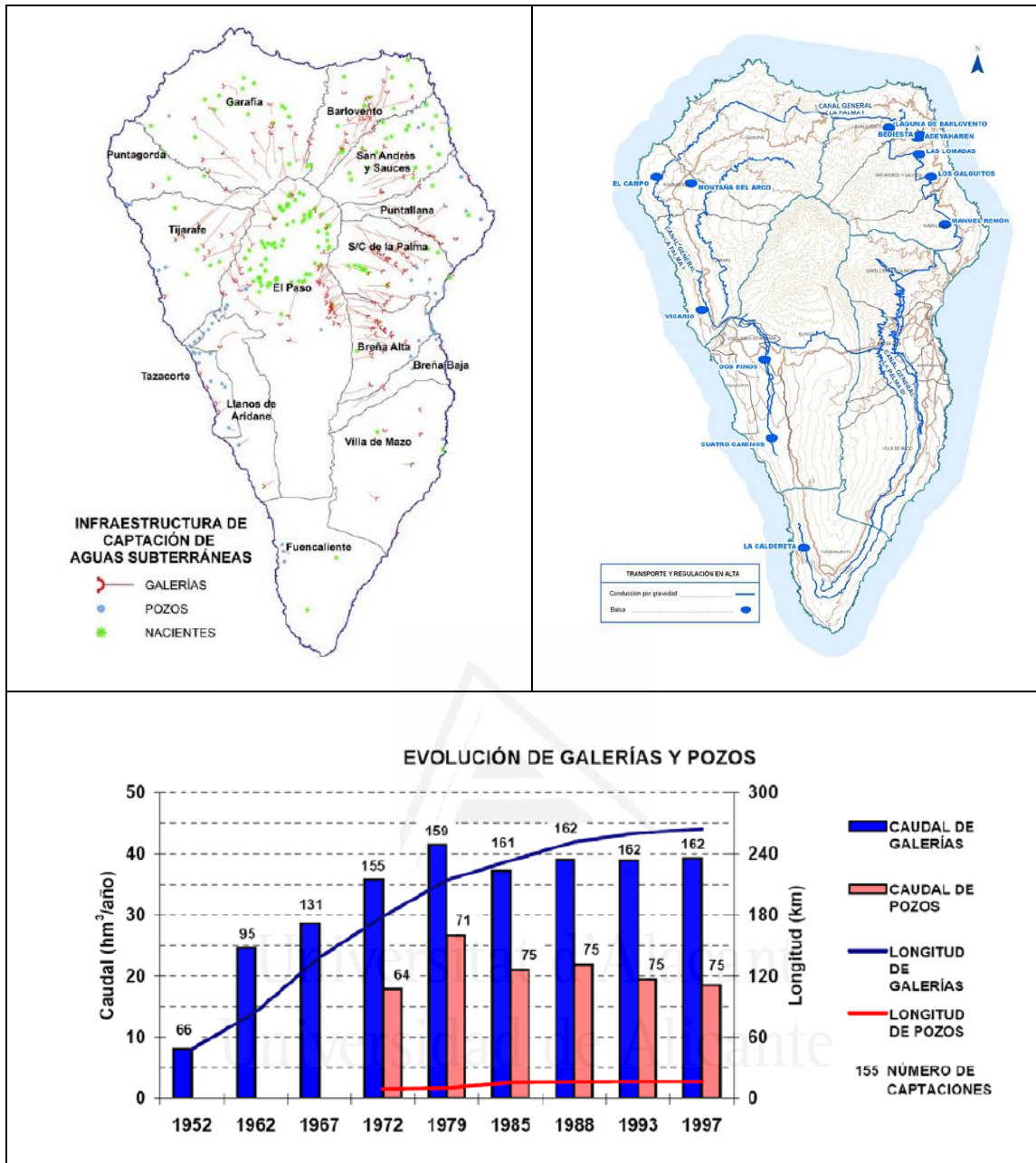


Figura 21. Infraestructura de captación de aguas subterráneas (arriba derecha) y transporte y regulación en alta (arriba derecha) en La Palma. Abajo: evolución temporal del caudal alumbrado en función de la longitud perforada (CIAP, 2009).

Los primeros trabajos de hidrogeología en La Palma datan de entre finales del siglo XIX y primera mitad del XX, ligados principalmente al IGME. A partir de la segunda mitad del siglo XX, destacan las aportaciones realizadas por los geólogos D. Telesforo Bravo y D. Juan Coello, así como del IGME. El punto álgido de partida se logra a partir del estudio conocido como SPA-15 (1975), en su capítulo de La Palma, donde se integran por primera los datos disponibles y se acomete un estudio integral de recursos hídricos, ligado al ciclo hidrológico pero con una clara visión hidrogeológica.

A partir de este punto de inflexión y, consecuentemente con la información aportada, se integra la planificación y la investigación, tanto pública como aplicada para estudios y proyectos, lo que

permite una continua mejora del conocimiento hidrogeológico existente hasta la fecha. Se destaca la siguiente documentación de referencia: APHP (1992, 2012); ITGE (1993); PHP (2001); CIAP (2009); Poncela (2009) y Poncela y Skupien (2013).

No obstante, la caracterización de la hidrogeología de medios volcánicos no ha seguido una trayectoria tan directa, por lo que a pesar del esfuerzo anterior, todavía existen muchas incertidumbres en relación a la parametrización hidrogeológica, en especial por los problemas de escala y heterogeneidad espacial tanto horizontal como vertical de las formaciones volcánicas, así como de aplicabilidad de diversas formulaciones clásicas para los medios homogéneos y porosos. Es frecuente escuchar por parte de las Administraciones y algunos técnicos el concepto de que "en La Palma no es aplicable...", lo que ha hecho (y sigue haciéndose) que muchas veces no se cuantifiquen adecuadamente las cosas.

Por otro lado, la interpretación de los ensayos de bombeo suele resultar compleja, a la vez que es escasa su realización, por lo que hay que aprovechar la información histórica que proporciona la evolución de caudales en galerías y manantiales como única fuente, y muy valiosa, de información. Este problema, a pesar de los requerimientos de la planificación, especialmente la derivada del ámbito europeo, sigue siendo un caballo de batalla, puesto que es difícil cambiar la mentalidad burocrática de las administraciones.

En este sentido, este trabajo pretende dar un salto más allá, profundizando en la parametrización del sistema acuífero volcánico de La Palma, de manera que se permite integrar y analizar la información relevante existente con la elaborada para esta Tesis, todo ello con el objetivo de la racionalización del uso y gestión de los recursos hídricos subterráneos en sistemas volcánicos insulares.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2. EVOLUCIÓN DE CAUDALES

Como la iniciativa privada ha sido el principal motor en la construcción de galerías, y la Ley de Aguas de Canarias (Ley Territorial 12/1990) y posteriores modificaciones mantiene los derechos privativos para explotación del agua subterránea, para el reparto de dulas (distribución temporal de caudales circulantes) se tiene ingente información acerca de los caudales alumbrados, así como de su evolución; no obstante, mucha de esta información está dispersa.

En este sentido, el autor que suscribe, ha participado en las últimas actualizaciones de dichos caudales (Poncela, 2009; APHP, 2012 y 2015), lo que ha permitido generar una base de datos importante, si bien, al ser muchos de ellos privados, se mantiene la debida confidencialidad para otros usos.

Una primera observación de los caudales disponibles muestra una amplia variedad de morfologías de hidrogramas así como de caudales, no solo en el conjunto insular, sino también por zonas (Figuras 22 y 23).

Unido a esa variabilidad, alguna reflejo de cierta estacionalidad, en otros casos reflejo de agotamiento y evolución del almacenamiento subterráneo, un sencillo análisis estadístico revela que los caudales alumbrados suelen ser de varias decenas de litros por segundo, con mayor probabilidad en el entorno de 20 L/s (de 20 a 40 L/s (150 a 300 pipas/hora)).

La distribución estadística de todos los caudales analizados se ajusta razonablemente bien a una distribución normal (Figura 24), si bien, por zonas (Figura 25), aparecen ciertas desviaciones, lógicas por otra parte y producto de las heterogeneidades del sistema acuífero y de la geometría de las zonas de alumbramiento.

En resumen, las probabilidades de ocurrencia de un determinado caudal se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Probabilidad de ocurrencia de alumbramiento de un determinado caudal por zonas en La Palma, a partir de la serie analizada (1972-2013).

PROBABILIDAD VS CAUDAL (L/s)	PROBABILIDAD (%)				
	50	40	30	20	10
ZONA DE LAS CAPTACIONES					
LP001: Ac. Insular-Vertientes	15	25	30	40	50
Caldera y vertiente N y NW (Garafía y Tijarafe)	15	20	25	35	50
Vertiente NE (Barlovento y San Andrés y Sauces)	10	20	30	40	60
Vertiente E (Puntallana, S/C de La Palma y Las Breñas)	10	15	30	40	55

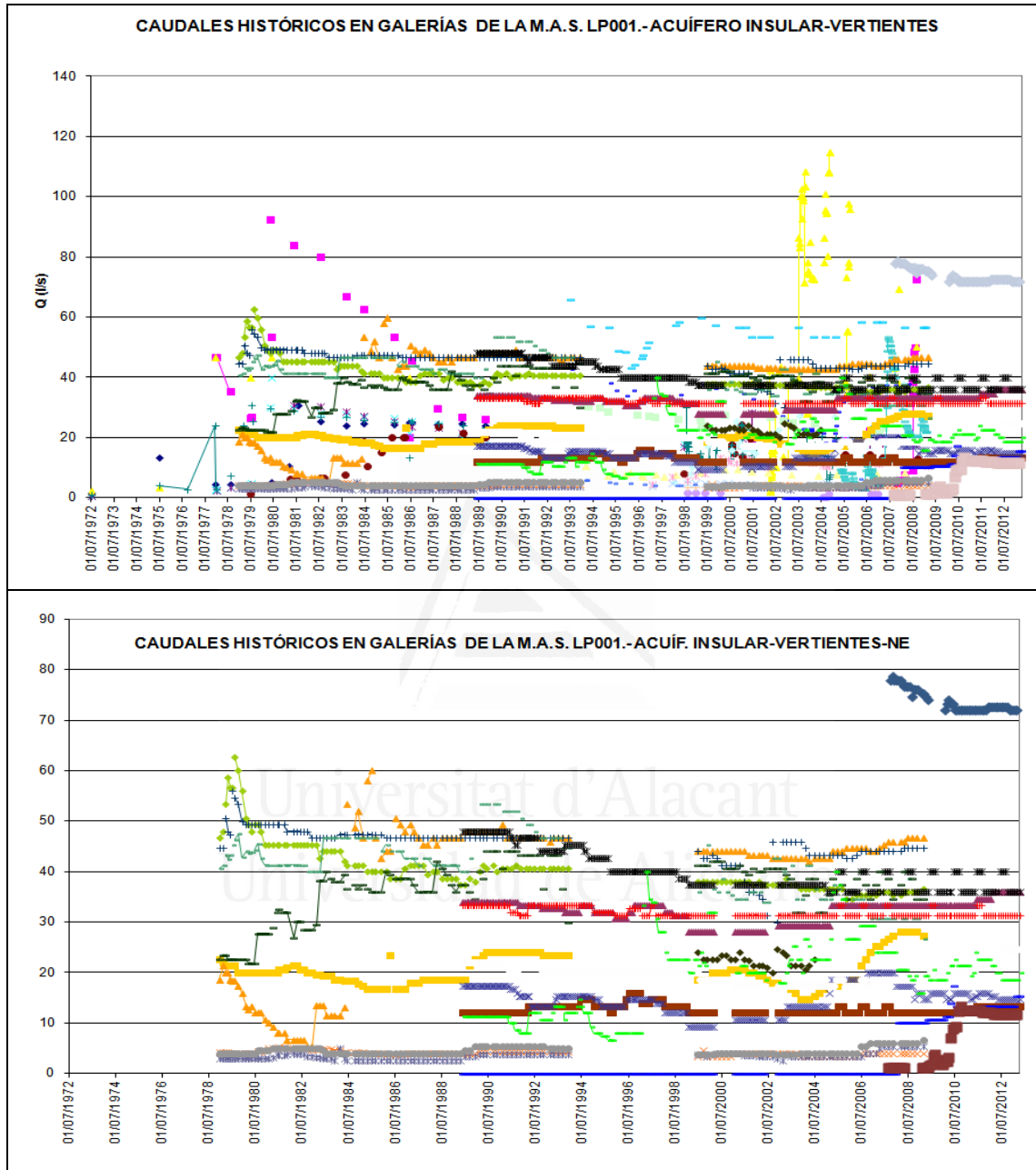


Figura 22. Distribución histórica de caudales de galerías. Arriba: LP001. Abajo: zona septentrional y nororiental. Fuente: elaboración propia a partir de datos de CIAP y de las Comunidades de Usuario y particulares.

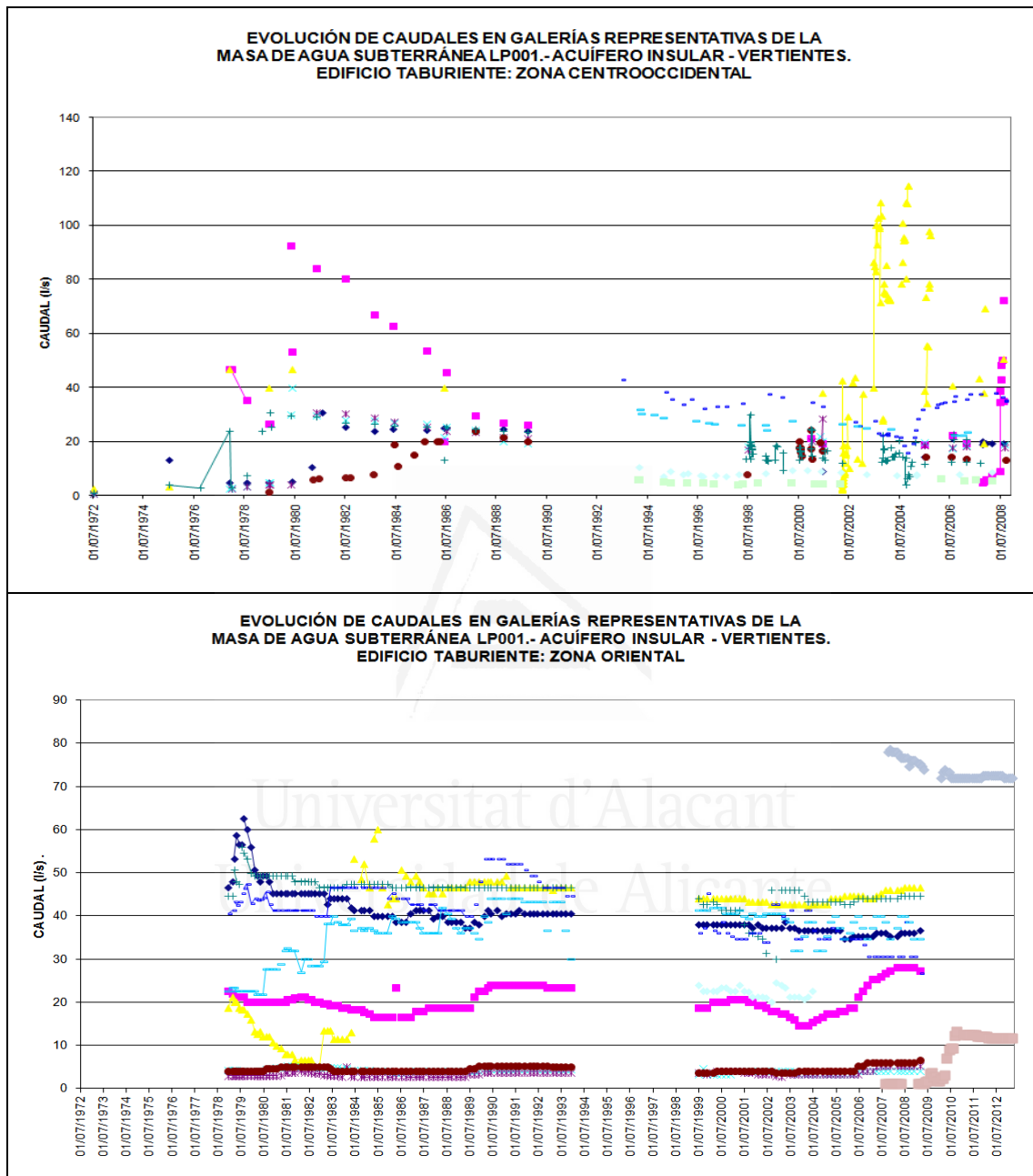


Figura 23. Distribución histórica de caudales de galerías. Arriba: zona centro-occidental. Abajo: zona oriental.

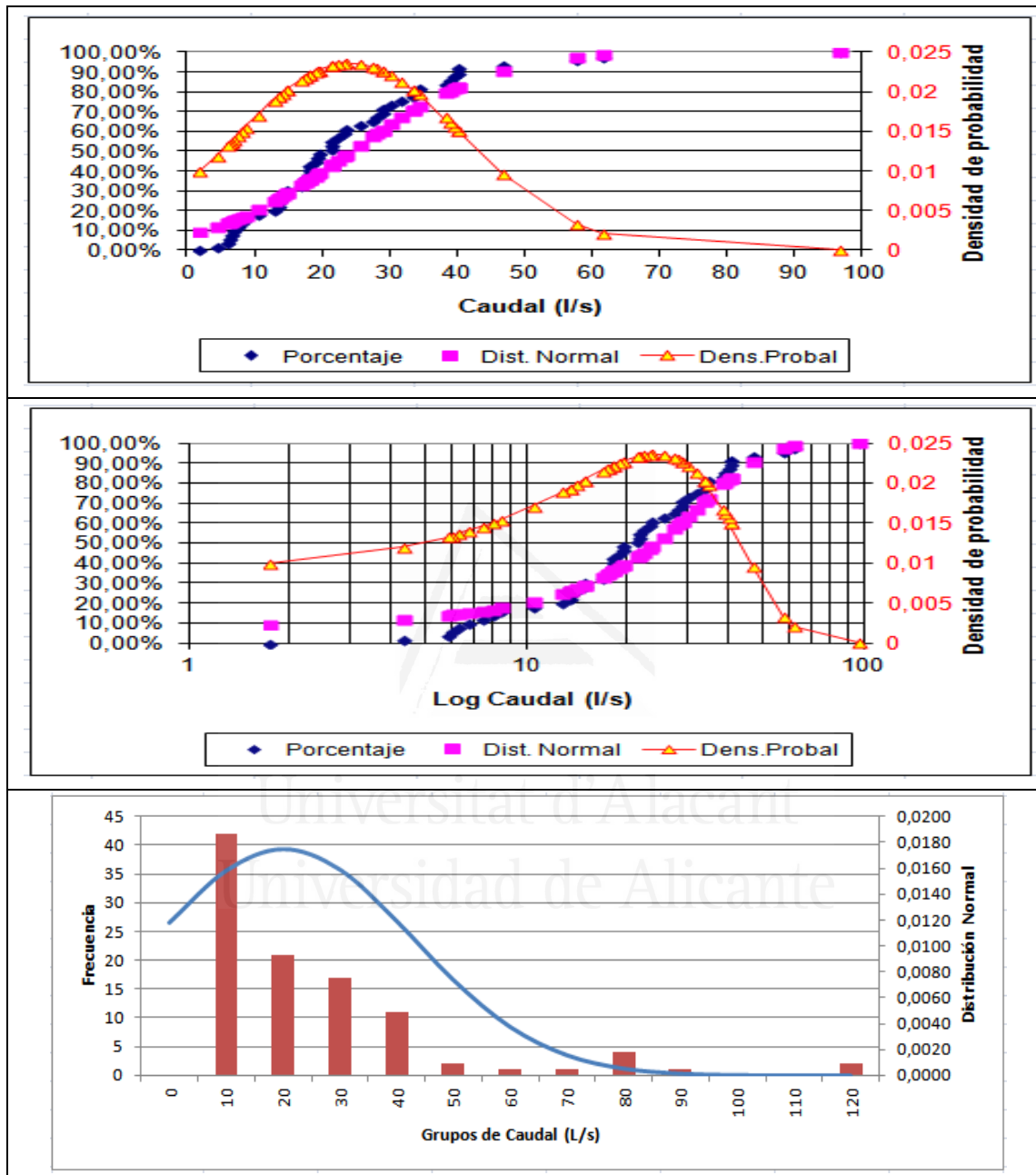


Figura 24. Distribución estadística de caudales históricos de galerías (periodo de referencia analizado 1972-2013).

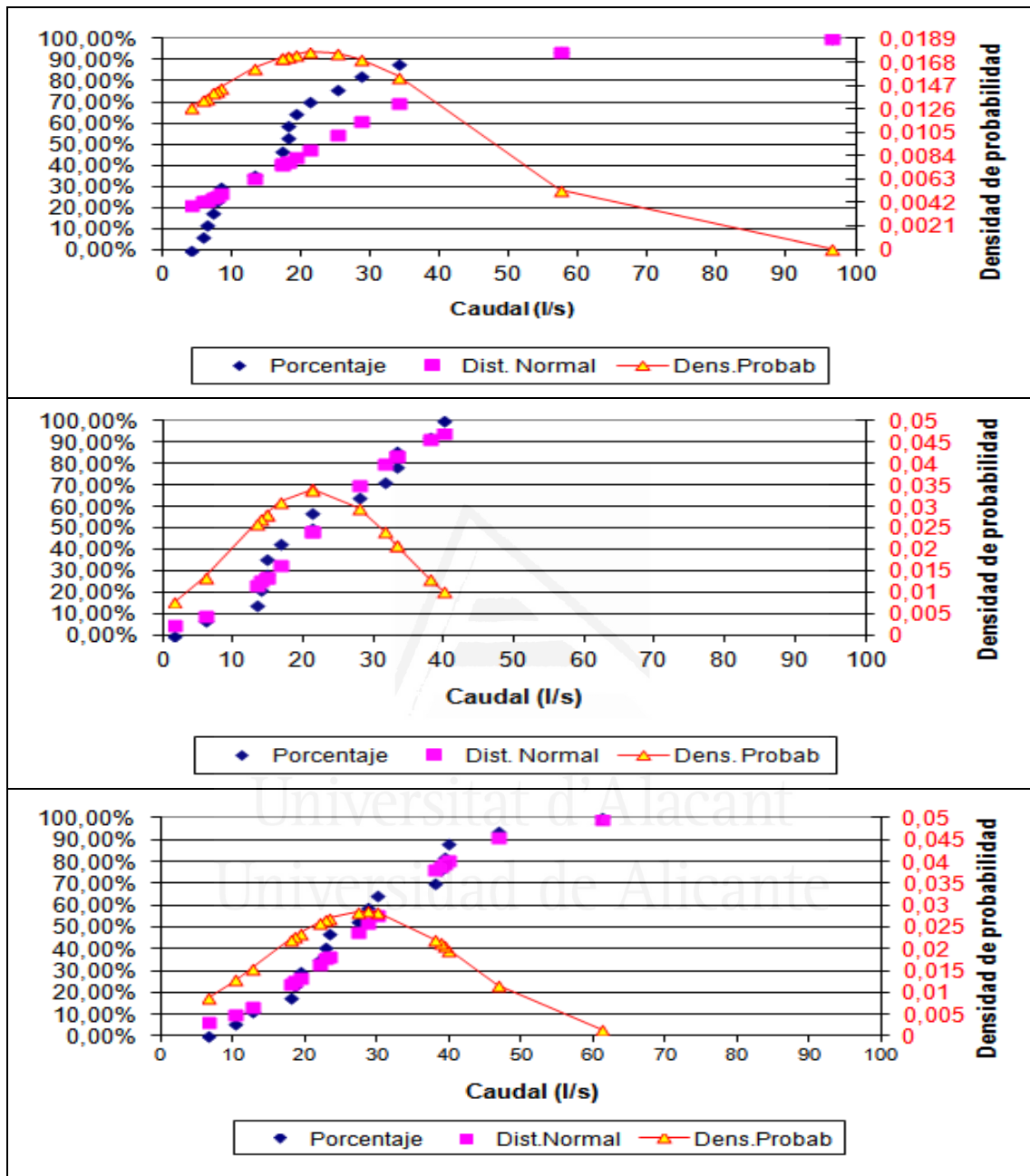


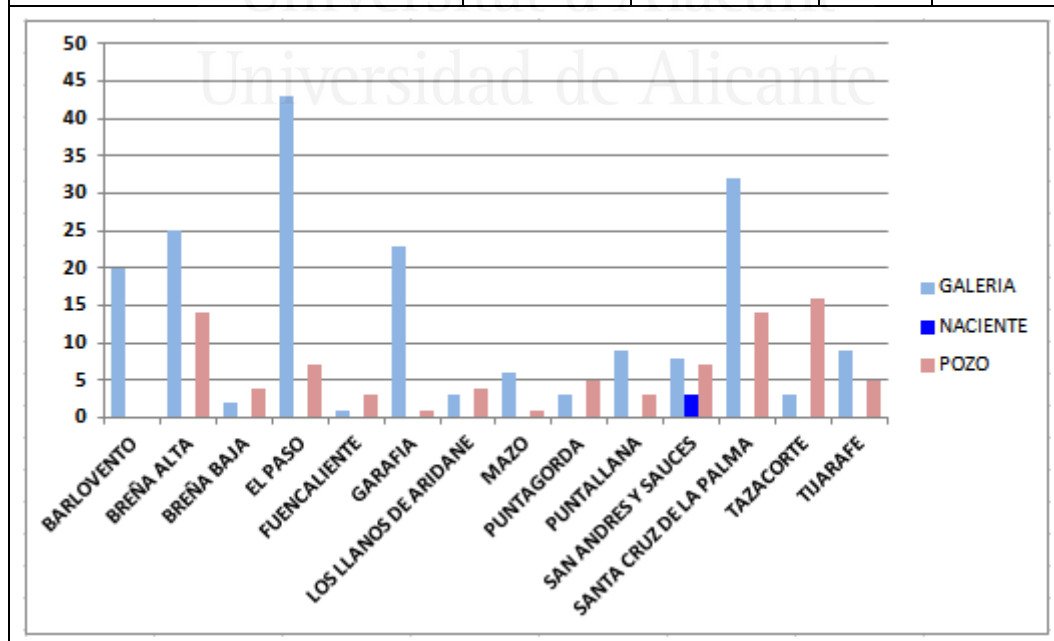
Figura 25. Distribución estadística de caudales históricos de galerías (periodo de referencia analizado 1972-2013) por zonas: Caldera y zona Norte (arriba), Barlovento-Sauces (centro) y Vertiente oriental (abajo).

3.2.1. Situación actual

De la actualización del inventario realizado por el autor que suscribe para la revisión del Plan Hidrológico de La Palma, se tiene que para el año 2013, la distribución de caudales por municipios se puede resumir en la Tabla 10.

Tabla 10. Captaciones por municipios en La Palma (2013).

MUNICIPIO	GALERIA	NACIENTE	POZO	TOTAL
BARLOVENTO	20			20
BREÑA ALTA	25		14	39
BREÑA BAJA	2		4	6
EL PASO	43		7	51
FUENCALIENTE	1		3	4
GARAFIA	23		1	24
LOS LLANOS DE ARIDANE	3		4	7
MAZO	6		1	7
PUNTAGORDA	3		5	8
PUNTALLANA	9		3	12
SAN ANDRES Y SAUCES	8	3	7	18
SANTA CRUZ DE LA PALMA	32		14	46
TAZACORTE	3		16	19
TIJARAFE	9		5	14
TOTAL	187	3	84	275

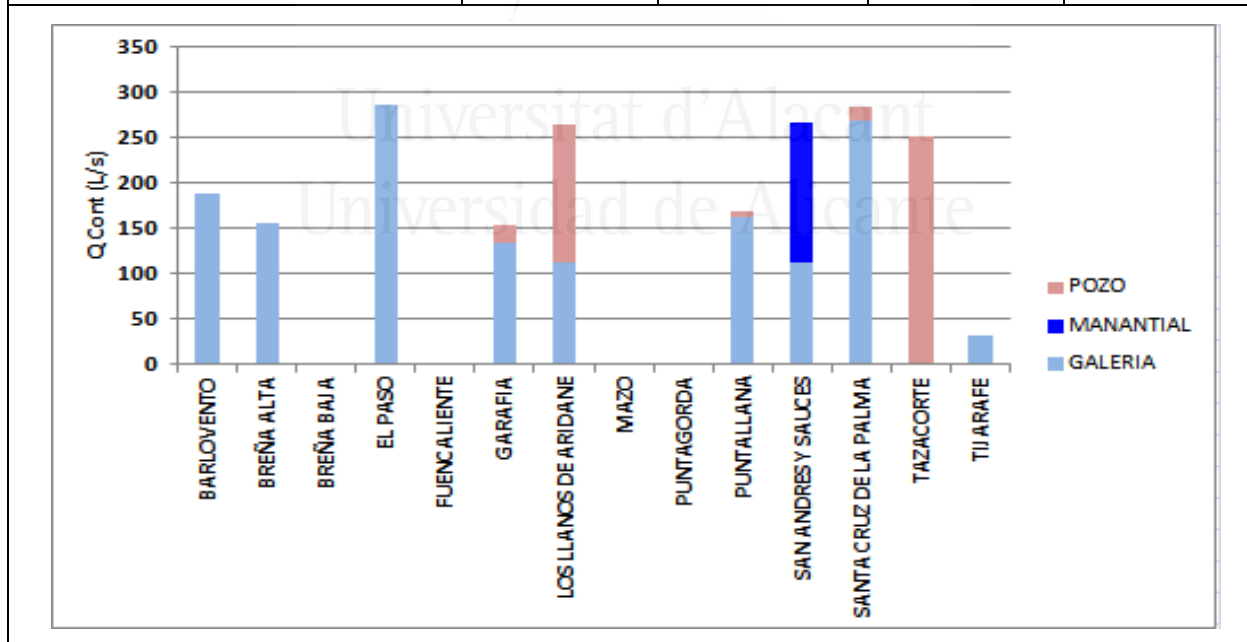


Se puede observar que las galerías son el tipo de captación dominante, seguida de los pozos. Los manantiales principales se han establecido en tres, si bien existen del orden de una centena con caudal variable, algunos efímeros que podrían añadir unos 20 a 30 L/s.

La Tabla 11 muestra los caudales continuos por municipios y captaciones referidos al año 2013.

Tabla 11. Caudales continuos por municipios y captaciones en La Palma (2013) (Poncela y Skupien, 2013).

MUNICIPIOS	CAUDAL CONTINUO Q (L/s)			
	GALERIA	NACIENTES	POZO	TOTAL
BARLOVENTO	189,20		0,00	189,20
BREÑA ALTA	155,86		0,00	155,86
BREÑA BAJA	0,00		0,00	0,00
EL PASO	287,05		0,00	287,05
FUENCALIENTE	0,00		0,00	0,00
GARAFIA	135,23		18,26	153,49
LOS LLANOS DE ARIDANE	113,00		152,85	265,85
MAZO	0,00		0,00	0,00
PUNTAGORDA	0,00		0,00	0,00
PUNTALLANA	162,00		7,67	169,67
SAN ANDRES Y SAUCES	113,01	154,26	0,00	267,27
SANTA CRUZ DE LA PALMA	269,74		13,86	283,60
TAZACORTE	0,78		250,80	251,58
TIJARAFE	32,90		0,00	32,90
TOTAL LA PALMA	1.458,77	154,26	443,44	2.056,47



Se aprecia que el total se puede evaluar en torno a unos 2.056 L/s, que pueden llegar a 2.100 si se consideran otros manantiales. El caudal drenado por las galerías y manantiales principales asociados a la masa de agua subterránea LP001 se puede evaluar en unos 1.600 L/s.

La Figura 26 muestra la distribución de la extracción de aguas subterráneas por municipios.

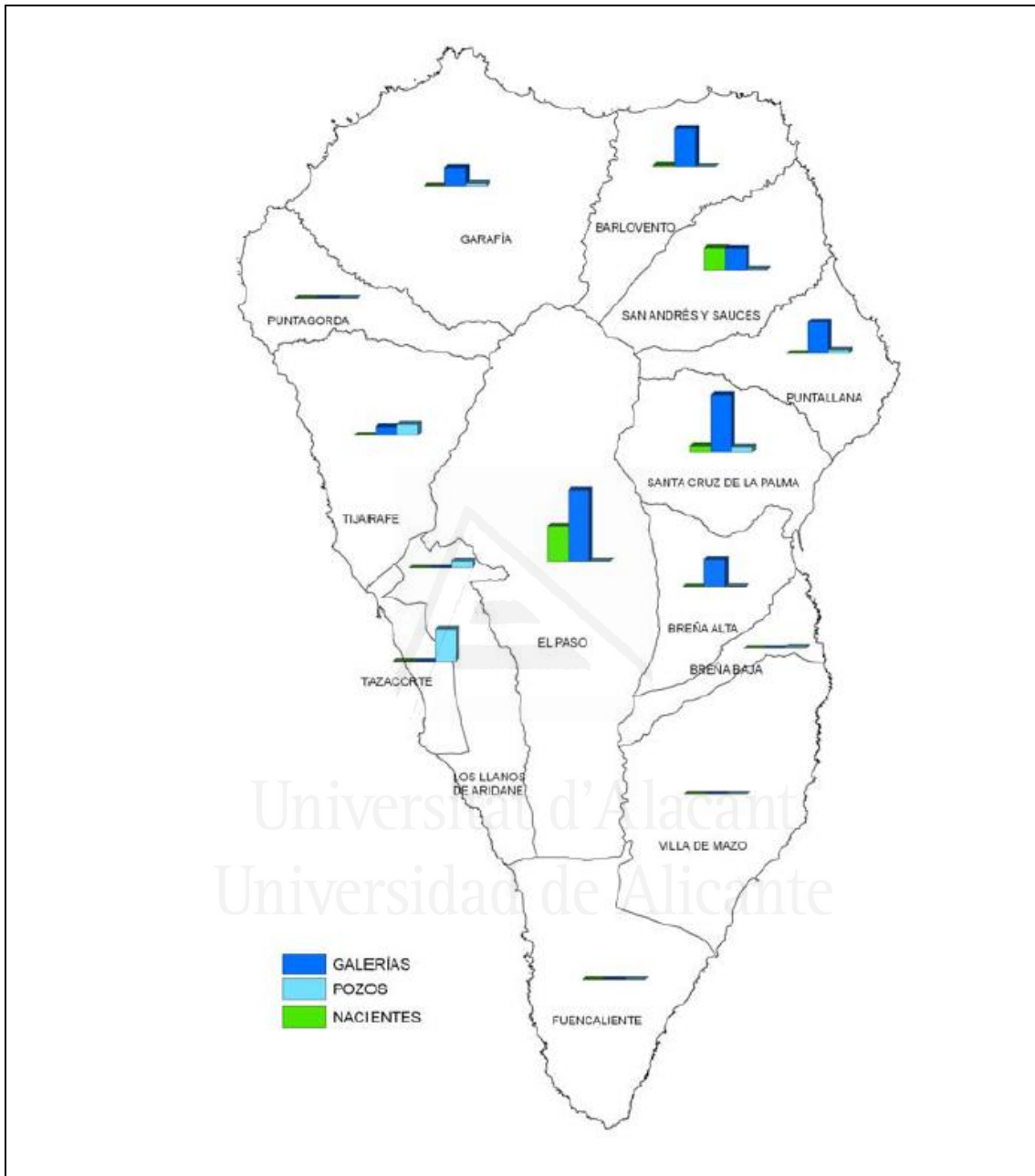


Figura 26. Distribución de la extracción de aguas subterráneas por municipios en La Palma (revisada de APHP, 2012 y 2015).

3.3. PARAMETRIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

3.3.1. Introducción

El estudio de acuíferos, al igual que el de otros sistemas, requiere de la obtención de parámetros característicos y significativos que permitan definir con suficiente rigor la realidad hidrogeológica del sistema en estudio. Desde la primera mitad del siglo XX, se desarrolló un conjunto de formulaciones especialmente aplicables para medios porosos (un buen resumen puede encontrarse en Custodio y Llamas, 1983; FCIHS, 2009), siendo que los medios fracturados y, por ende, los volcánicos, no han sufrido un desarrollo tan importante. Es hacia finales del siglo XX y hasta nuestros días que las formulaciones, especialmente las específicas, han ido tomando cuerpo especialmente con el uso de los modelos de simulación del flujo subterráneo, por el vertiginoso incremento de la potencia de cálculo y la implementación de SIG.

Las técnicas de ensayos (trazadores, pruebas de bombeos, etc.) permiten obtener una interesante información que, en la mayoría de los casos, requiere de una adecuada interpretación por conocimiento del medio geológico y de los procesos asociados.

En este sentido, los principales parámetros hidrogeológicos que se pueden obtener en medios volcánicos son los mismos que para otro tipo de acuíferos con la salvedad que, en la mayoría de los casos, se requiere de infraestructuras para ensayos de costosa ejecución y/o a profundidades considerables. No obstante, la iniciativa privada ha construido a lo largo de las últimas décadas galerías y pozos, así como utilizado los principales manantiales existentes. Este hecho permite disponer de una importante fuente de información que no ha sido suficientemente explotada, a lo que se une la dificultad de interpretación de los escasos ensayos de bombeo realizados en pozos canarios, no siempre con criterio hidrogeológico.

Por ello, en zonas o territorios de difícil orografía, o con incidencia medioambiental significativa (como es el caso de La Palma) y posible influencia sobre poblaciones autóctonas o indígenas (responsabilidad social), situaciones similares tienen una repercusión más directa sobre la sociedad; en este sentido, resulta relevante la utilización de técnicas o métodos que, de manera más o menos sencilla en función de la información disponible, permiten estimar o calcular los principales parámetros hidrogeológicos de interés de un sistema acuífero o, cuando menos, algún tipo de relación entre ellos, para obtener una aproximación de su valor (Poncela et al., 2015).

En la Palma, los primeros intentos serios se realizaron para el Proyecto SPA-15 (1975) y en el marco de labores de control y estudios parte del IGME (1989). En contraposición los primeros planes hidrológicos no hicieron tanto hincapié en estos temas, si bien agruparon una cantidad de información en diversas materias (APHP, 1992 y 2012; PHP, 2001). Estudios específicos han aportado algo de información, pero casi siempre de manera discontinua. Un intento actualizado se puede encontrar en Poncela (2009) donde se ha sectorizado el sistema acuífero insular en función de la información analizada proveniente del estudio de las caudales de las galerías.

Otros trabajos de interés están recogidos en FCCA (2004); Poncela (2005a, 2005b y 2012); Poncela y Skupien (2009) y Skupien y Poncela (2009a, 2009b, 2009c, 2010 y 2011).

3.3.2. Parámetros hidrogeológicos

Los principales parámetros hidrogeológicos analizados son: la transmisividad, la permeabilidad, el coeficiente de almacenamiento y el gradiente hidráulico. Asociados con estos parámetros se describen los coeficientes de agotamiento de descarga de manantiales y galerías y su relación con la difusividad hidráulica, lo que permite caracterizar la hidrogeología de las formaciones volcánicas.

En el caso de estas formaciones volcánicas, la presencia de discontinuidades (diques, diaclasas, disyunción columnar, etc.) constituyen además un factor importante que condiciona estos parámetros.

Si bien se han realizado intentos de interpretación de ensayos de bombeo en Hawaii (Williams y Sorros, 1973) y en galerías de Lanzarote (Custodio, 1978), así como en el archipiélago canario (SPA-15, 1975; MAC-21, 1980; etc.), o la caracterización anisotrópica del Macizo de Anaga (Machado, 2013), la difusión de los resultados ha sido escasa, y muy ligada al ámbito académico.

3.3.2.1. Transmisividad

La transmisividad (producto de la permeabilidad por el espesor saturado) que define la mayor o menor transmisión de agua en una formación acuífera, cobra mayor relevancia en el caso de las formaciones volcánicas de La Palma puesto que en algunos casos no se tiene conocimiento riguroso del espesor saturado, en parte porque falta precisión topográfica de la distribución de los materiales del Complejo Basal, que actúan a modo de zócalo impermeable. También es notorio que no existen datos de permeabilidad representativos (tal vez algún ensayo específico desde el punto de vista geotécnico). Por eso, la única posibilidad real de obtener datos de este parámetro, además de la consulta bibliográfica, de limitada representatividad, es mediante la realización de ensayos de bombeo y recuperación y mediante el estudio de las curvas de agotamiento de las descargas de manantiales y galerías. El uso de trazadores artificiales es prácticamente inexistente en La Palma y su validez sería cuestionable en muchos casos, además de las consideraciones ambientales que podrían limitar su utilización.

De manera general, en la zona norte y centrooriental (SPA-15, 1975; ITGE, 1989; Poncela, 2009) los basaltos de la Serie Antigua (Basaltos Antiguos tanto del Edificio Garafía como zonas del Taburiente Inferior) presentan transmisividades cuyos valores oscilan entre $T = 5$ a $50 \text{ m}^2/\text{día}$.

Poncela (2009) ha realizado interpretaciones de un ensayo relacionadas con la recuperación de presiones hidrostáticas asimilables a un aumento de metros de columna de agua en galerías del interior de la Caldera de Taburiente, reguladas por compuertas hidráulicas (en terminología local, "tranques"). Para dicha interpretación se ha utilizado el método de Theis (en Custodio y Llamas, 1983), la cual relaciona los descensos residuales después de la finalización de un bombeo en un pozo, con flujo radial, asumiéndose como razonable (con un cierto grado de incertidumbre) un

análisis análogo basado en asimilar la respuesta del cese de bombeo en flujo radial a un llenado del vaciado por depresión que se produce en la galería, a saber (Ecuación [3]):

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u')] \quad [3]$$

Siendo:

s' : Descenso residual (m).

Q : Caudal (m³/día).

T : Transmisividad (m²/día).

r : Distancia (m).

S y S' : Los valores del almacenamiento durante el bombeo y la recuperación respectivamente.

$W(u)$: Las funciones de pozo para el bombeo y la recuperación respectivamente.

y

$W(u')$

t y t' : Tiempo transcurrido desde el principio y final del bombeo respectivamente (días).

u y u' : $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$; $u' = \frac{r^2 S'}{4Tt'}$

Utilizando la aproximación para la función de pozo $W(u)$, definida en el método de Cooper-Jacob, la ecuación se convierte en (Ecuación [4]):

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \left(\frac{4Tt}{r^2 S} \right) - \ln \left(\frac{4Tt'}{r^2 S'} \right) \right] \quad [4]$$

Cuando S y S' son constantes e iguales y la transmisividad es constante, o cuando pueden asumirse razonablemente estos supuestos, la ecuación puede expresarse como (Ecuación [5]):

$$s' = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \left(\frac{t}{t'} \right) \quad [5]$$

Para este caso, la expresión se transforma en la conocida fórmula de recuperación de Theis (Ecuación [6]):

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \left(\frac{t' + t}{t'} \right) \right] \quad [6]$$

La representación gráfica de los resultados obtenidos se muestra en la Figura 27.

La interpretación de los resultados ha permitido obtener una transmisividad del acuífero en ese sector de $T = 15$ a 30 m²/día, coherentes con lo expuesto anteriormente. Si bien la recta teóricamente debe pasar por el origen de coordenadas, en este caso, al situarse ligeramente a la derecha, parece inferirse una cierta recarga diferida durante el ensayo.

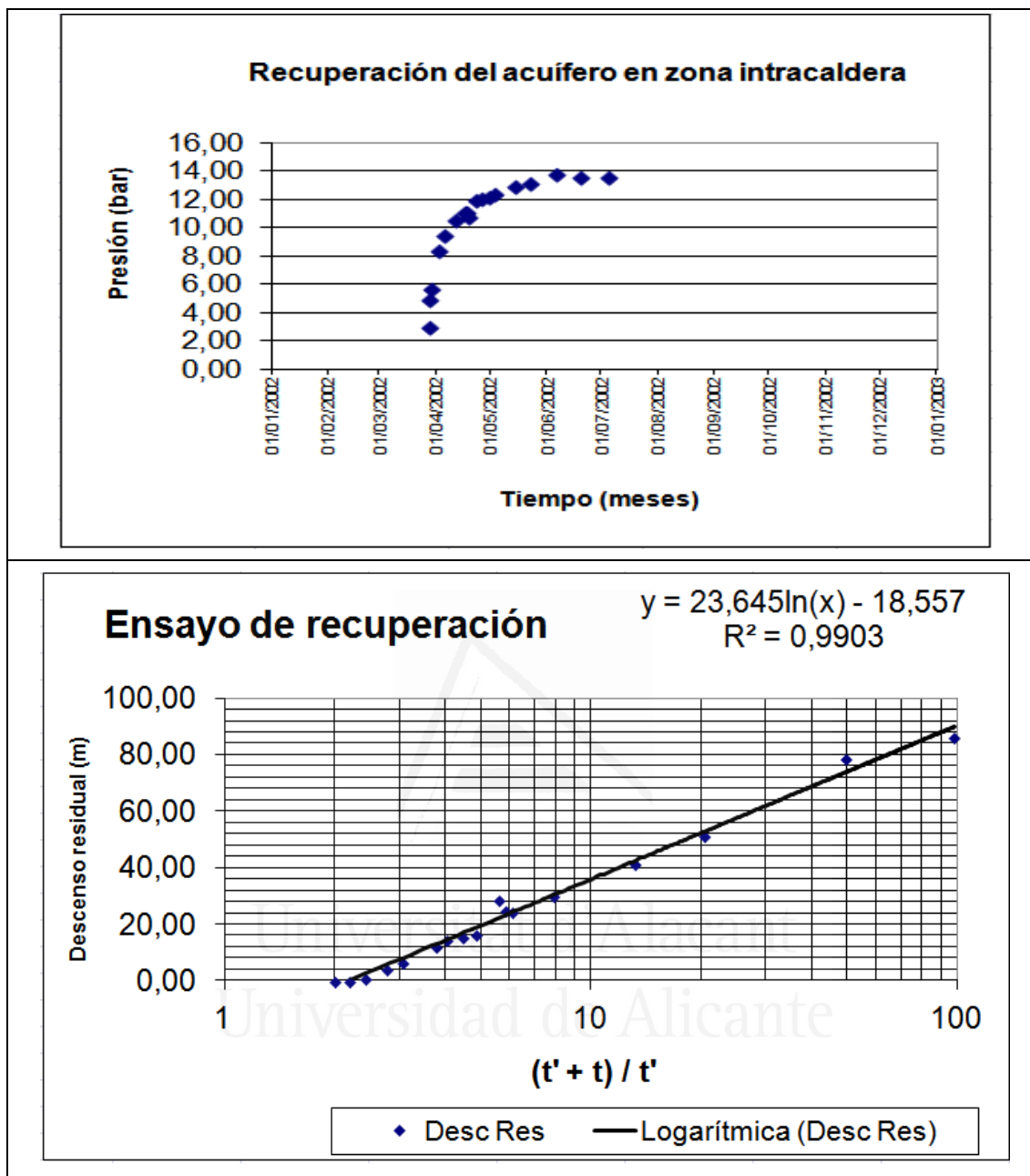


Figura 27. Interpretación de un ensayo de recuperación a partir del cierre hidráulica de una galería. Aplicación a partir de los datos ponderados en zona de intracaldera (LP001.- Acuífero insular-vertientes).

La ventaja de utilizar el tramo de recuperación es que permite una regionalización de los resultados y, por lo tanto, es característica de un entorno amplio e involucra una mayor porción de acuífero volcánico (lavas, escorias y diques, con influencia de borde impermeable).

En zonas costeras, principalmente representadas por materiales del Edificio Taburiente Superior, se pueden encontrar valores de $T = 250$ a $500 \text{ m}^2/\text{día}$.

En puntos de la desembocadura del Barranco de Las Angustias se han llegado a constatar valores de $2.000 \text{ m}^2/\text{día}$ (ITGE, 1989) posiblemente por la influencia de discontinuidades en la zona de captación.

En la zona sur y, en concreto en la franja costera de la Fuente Santa, en el término municipal de Fuencaliente, se han obtenido valores de transmisividad en basaltos recientes del Edificio Dorsal Sur entre $T = 50$ a $225 \text{ m}^2/\text{día}$ (Skupien y Poncela, 2010). El macizo que está afectado por vías preferenciales muestra valores de $T = 500$ a $4.000 \text{ m}^2/\text{día}$.

3.3.2.2. Permeabilidad

Los valores de permeabilidad en terrenos volcánicos son extremadamente variados, pues dependen no solo de la génesis sino de las condiciones de compactación y alteración experimentadas a lo largo de la historia geológica.

Asimismo, los valores que se pueden obtener a partir de ensayos geotécnicos son puntuales y no reflejan la realidad del macizo. No obstante, para el caso de Canarias, se pueden dar a título orientativo los intervalos promedio de variación para diversas formaciones volcánicas, teniendo en cuenta que algunos difieren varios órdenes de magnitud (modificado de SPA-15, 1975; Custodio, 1978; Custodio y Llamas, 1983):

- Basalto vacuolar: 0 a $0,5 \text{ m}/\text{día}$.
- Basaltos compactos o masivos: 1×10^{-5} a $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{día}$.
- Basaltos recientes: 25 a $125 \text{ m}/\text{día}$.
- Basaltos cuaternarios poco alterados: 200 a $3.000 \text{ m}/\text{día}$.
- Basaltos antiguos: 0,01 a $1 \text{ m}/\text{día}$.
- Tobas pumíticas: $1,5 \times 10^{-3}$ a $0,01 \text{ m}/\text{día}$.
- Piroclastos soldados: 0,01 a $0,02 \text{ m}/\text{día}$.
- Piroclastos sueltos: 5 a 150.
- Ignimbritas: 0,001 a $1 \text{ m}/\text{día}$.
- Aluviones de barranco en islas volcánicas: 5 a $250 \text{ m}/\text{día}$.
- Derrubios de ladera: 1 a $5 \text{ m}/\text{día}$.

3.3.2.3. Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento S , que en el caso de acuíferos libres, es asimilable a la porosidad eficaz (m_e), como tradicionalmente se ha identificado a los acuíferos volcánicos de La Palma, se ha evaluado en torno al 5 % (SPA-15, 1975; ITGE, 1989) para los basaltos. Valores que se han "arrastrado" a lo largo del tiempo, de manera que esta porosidad es la misma a corto y a largo plazo. Si bien, para la determinación de valores de porosidad (o coeficiente de almacenamiento) se precisa de puntos de bombeo y de observación próximos, en La Palma y, en general, en islas volcánicas de elevado relieve, suelen existir pocas captaciones con esta disposición, por lo que de un ensayo de bombeo no puede interpretarse al coeficiente de almacenamiento directamente, aunque sí se tiene referencias de un intervalo razonable de valores entre los que puede encontrarse.

Así, dependiendo del grado de discontinuidades y de su conectividad, en basaltos y rocas afines, suelen presentarse valores entre el 1 y el 3 %, localmente hasta el 5 % (SPA-15, 1975; Custodio, 1978).

Si los materiales son piroclásticos, tipo cono de escorias, no son infrecuentes valores que pueden rondar $m_e = 15$ al 20 %. Si son lapillis ("picón") $m_e = 10$ al 12 % (Custodio y Llamas, 1983).

En el caso de apilamientos de lavas, escorias y mantos de lapilli, se tiene un valor intermedio, en general entre el 5 y el 7 % para la realización de cálculos (Poncela, 2009).

Localmente y, asociados a capas impermeables tipo "mortalón" (brecha de deslizamiento gravitacional), se pueden encontrar valores de $S < 1\%$ (del orden de 5×10^{-3} e incluso inferiores), que muestran un efecto de semiconfinamiento en el comportamiento hidráulico del nivel acuífero (Poncela, 2005b, 2009 y 2012).

3.3.2.4. Gradiente hidráulico y piezometría

La manera de determinar el gradiente hidráulico es conociendo la piezometría local y/o regional. En este sentido, en La Palma, los únicos valores de nivel piezométrico directo se obtienen de los pocos pozos existentes, la mayoría ya no funcionales y en desuso, y de los pocos sondeos y puntos de control para determinadas infraestructuras, algunos de la extinta red del IGME.

De manera singular, el punto de frente saturado de las galerías donde alumbran aguas subterráneas puede interpretarse en cota como punto de nivel o isopieza.

Con esta información, se han reconstruido una serie de piezometrías (SPA-15, 1975; MAC-21, 1980; APHP, 1992; PHP, 2001) que no han sufrido actualizaciones rigurosas, motivo por el que se han "arrastrado" los valores de referencia existentes.

No obstante esa limitación, queda clara que las isopiezas se adaptan bastante bien a la topografía, y reflejan las dos zonas de mayor relieve, en especial los correspondientes al entorno de cumbres de La Caldera de Taburiente, favorecidos por la presencia del zócalo impermeable que compone el Complejo Basal y que llega a aflorar entre 1.500 y 1.600 msnm (Figura 28).

Por otro lado, la piezometría está condicionada por una alta heterogeneidad espacial que confiere gran anisotropía vertical, a lo que se une la presencia de diques, especialmente concentrados en la zona de "ritf" y en la periferia de la Caldera de Taburiente, lo que hace que el sistema acuífero está compartimentado y se produzcan, además, efectos de apantallamiento y represamiento por la presencia de diques, tanto perpendiculares como oblicuos a la dirección cumbre-mar.

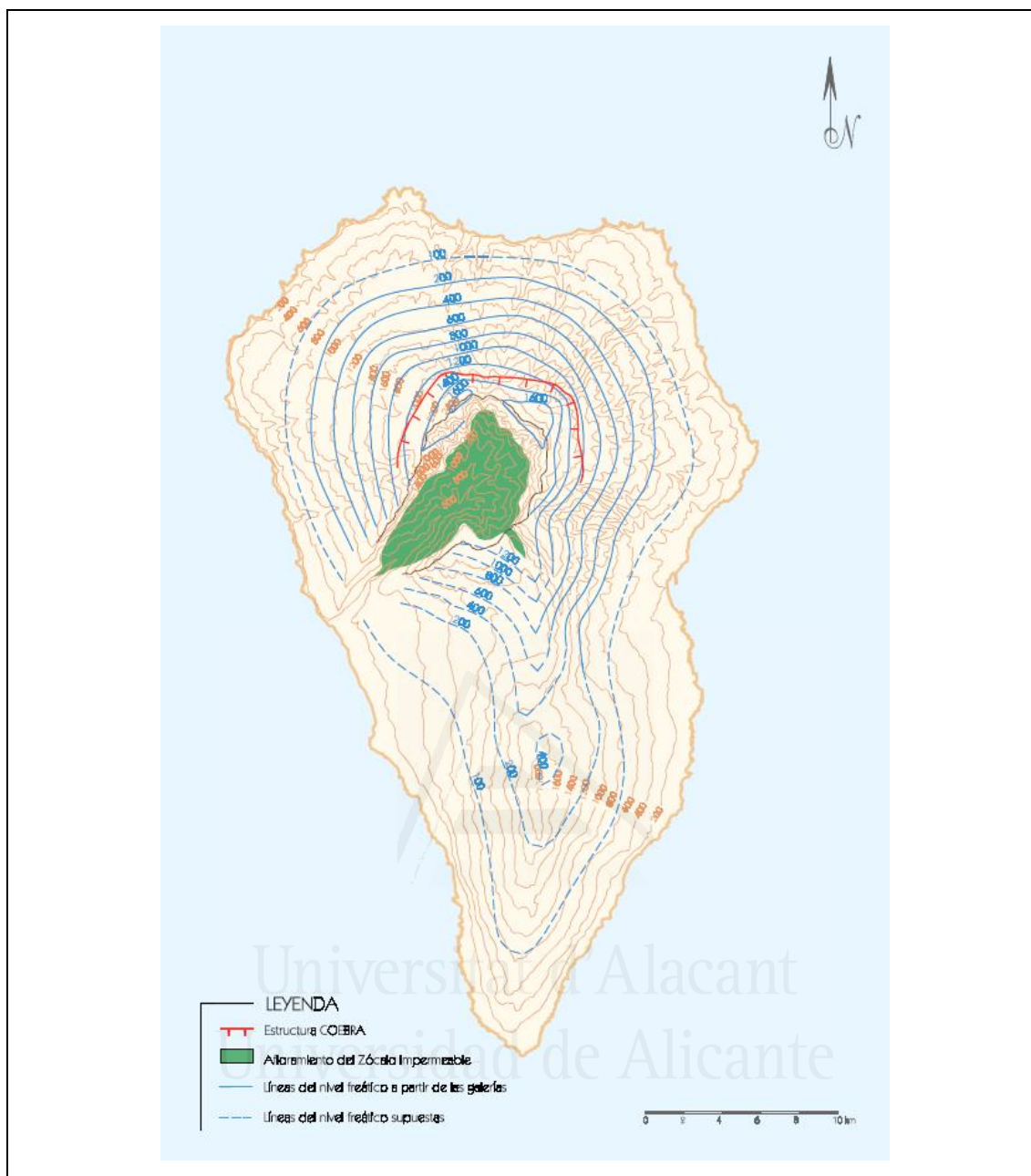


Figura 28. Superficie freática insular (PHP, 2001).

Ello hace que los niveles piezométricos presenten valores superiores a los que les correspondería en circunstancias normales. Así, el esquema general que se infiere es una circulación subterránea de cumbres a mar, que se ve alterada por la presencia de diques que apantallan y represan el nivel piezométrico. Ocasionalmente, la presencia de niveles más impermeables (tipo mortalón) hace que se produzcan sobreelevaciones de nivel (Poncela, 2005a, 2005b y 2009).

Valores promedio en torno a gradientes $i = 15 \%$ (ITGE, 1989) pueden medirse en zonas de la Caldera y Norte, donde se pueden alcanzar valores de nivel piezométrico hasta 1.700-1.800 msnm. En zonas intermedias y de vertientes, se pueden obtener gradientes del orden de $i = 5$ a 10% . En zonas costeras, en general $i < 5\%$.

Los espesores promedio pueden estar entre < 50 y 300 m para las formaciones saturadas y los 250 a 700 para la zona no saturada.

3.3.3. Coeficiente de agotamiento a partir de hidrogramas de caudales

En los sistemas acuíferos volcánicos de Canarias (en particular en Tenerife y La Palma como islas de mayor relieve), los caudales drenados por manantiales y galerías son muy importantes en relación a su territorio (unos 3.500 L/s y 1.600 L/s, respectivamente), puesto que de ellos más del 95% se destina para abasto y regadío.

En este sentido, es imprescindible disponer de metodologías y formulaciones fiables que permitan conocer caudales drenados de galerías y/o manantiales, su evolución en el tiempo y, en casos favorables, la zona de influencia de la galería.

Es relativamente frecuente disponer de la evolución histórica de caudales de galerías y manantiales importantes por lo que se puede deducir la evolución futura y aproximar el volumen explotable, aunque no es factible directamente averiguar su zona de influencia ni la afección a otras galerías próximas, para lo cual se requiere de una serie de hipótesis y, posiblemente, de la elaboración de un modelo de flujo subterráneo.

Se describen dos tipos principales de funcionamiento de drenaje subterráneo a través de galerías (Caloz, 1987) que se han podido identificar también en La Palma (Poncela, 2009; Skupien Poncela, 2009a, 2009b, 2009c); Poncela y Skupien, 2011 y Poncela et al., 2015b:

1. Régimen no influenciado. Se presenta cuando la galería muestra nulos o escasos índices de alteración de sus condiciones hidrodinámicas (los segmentos sucesivos de la curva de agotamiento tienen pendientes que disminuyen con el tiempo de manera homogénea, sin saltos).
2. Régimen influenciado. Se presenta cuando la galería muestra diversos cambios en la pendiente, cuyas variaciones se pueden relacionar con cambios en las condiciones hidrodinámicas (perforación, obstrucción, realimentación, etc.), pudiéndose considerar dos situaciones posibles en las influencias:
 - Que actúen de manera que se favorece un aumento de caudal: por ejemplo, cuando las obras aumentan la permeabilidad y el drenaje o cuando unas precipitaciones importantes frenan el agotamiento dado que han favorecido una mayor infiltración a través de la zona no saturada (caso de galería a cotas elevadas que no disponen de potentes espesores de zona vadosa).
 - Que actúen de manera que se disminuya el caudal (cuando la colmatación disminuye la permeabilidad, o se ha producido una obstrucción, o también cuando se produce una disminución de volumen de reservas (influencia de otra captación próxima)).

El enfoque previo se puede resumir en tres casos (adaptado de Sáenz de Oiza, J., 2011)(Figura 29):

1. Recarga nula (Tipo I): asimilable a lo que se conoce como "galería de dique", en la que se produce el vaciado del depósito del trasdós una vez atravesado el dique que conecta con la zona saturada. En este caso, la evolución del caudal, la presión y las reservas suele seguir la ley: $e^{-\alpha t}$, siendo $1/\alpha$ la edad media de las aguas del depósito. En los momentos iniciales la descarga se ajusta bien a la expresión $(1/Q^2) = \alpha t$.
2. Recarga constante en el tiempo (Tipo II): En este caso la evolución de caudales se adapta a la ley (Ecuación [7]):

$$Q = Q_b + (Q_0 - Q_b)e^{-\alpha t} \quad [7]$$

Siendo:

- Q : Caudal de descarga en un momento t, en unidades homogéneas.
- Q₀ : Caudal inicial, en unidades homogéneas.
- Q_b : Caudal de base correspondiente a la recarga en la zona de influencia de la galería, en unidades homogéneas.
- α^{-1} : Edad media de las aguas del depósito inicial.

3. Recarga periódica (Tipo III): Se corresponde con una evolución en la que tras una fase inicial de vaciado en régimen transitorio, se llega a una evolución también periódica. Es característica de galerías situadas a cotas elevadas o influenciadas por la estacionalidad climatológica.

En las galerías del ejemplo, $1/\alpha$ es del orden de 145 días (entre 4 y 5 meses para Flores del Funche), de 335 días (unos 11 meses para Pinalejo, casi anual) y unos 10.000 días (> 27 años para Los Remolinos), lo cual está en consonancia con las observaciones: al perforar diques se producen rápidos agotamientos mientras que bajo influencia de estacionalidad estos valores son claramente superiores, incluso ligados con los ciclos climáticos.

3.3.3.1. Cálculo del coeficiente de agotamiento

Para el cálculo del coeficiente de agotamiento se ha utilizado, entre otros posibles métodos que se encuentran ampliamente descritos en la literatura científica, el método exponencial decreciente de Boussinesq-Maillet (en Custodio y Llamas, 1983) aplicado a un acuífero (cautivo o libre) de espesor considerable y desagüe a nivel constante, aspecto éste típico de manantiales de montaña y de galerías de drenaje de La Palma, de cota fija.

Se han seleccionado aquellos tramos en los que las curvas de agotamiento se considera que son lo suficientemente representativas (lapsos de tiempo en periodos no influenciados directamente por las lluvias o por la recarga, con decrecimiento mantenido), lo que permite asociar razonablemente, a su vez, unos patrones de agotamiento similares para elementos equivalentes dentro del sistema hidrogeológico en estudio (Poncela, 2009; Poncela y Skupien, 2011; Skupien y Poncela, 2011) y Poncela et al., 2015b.

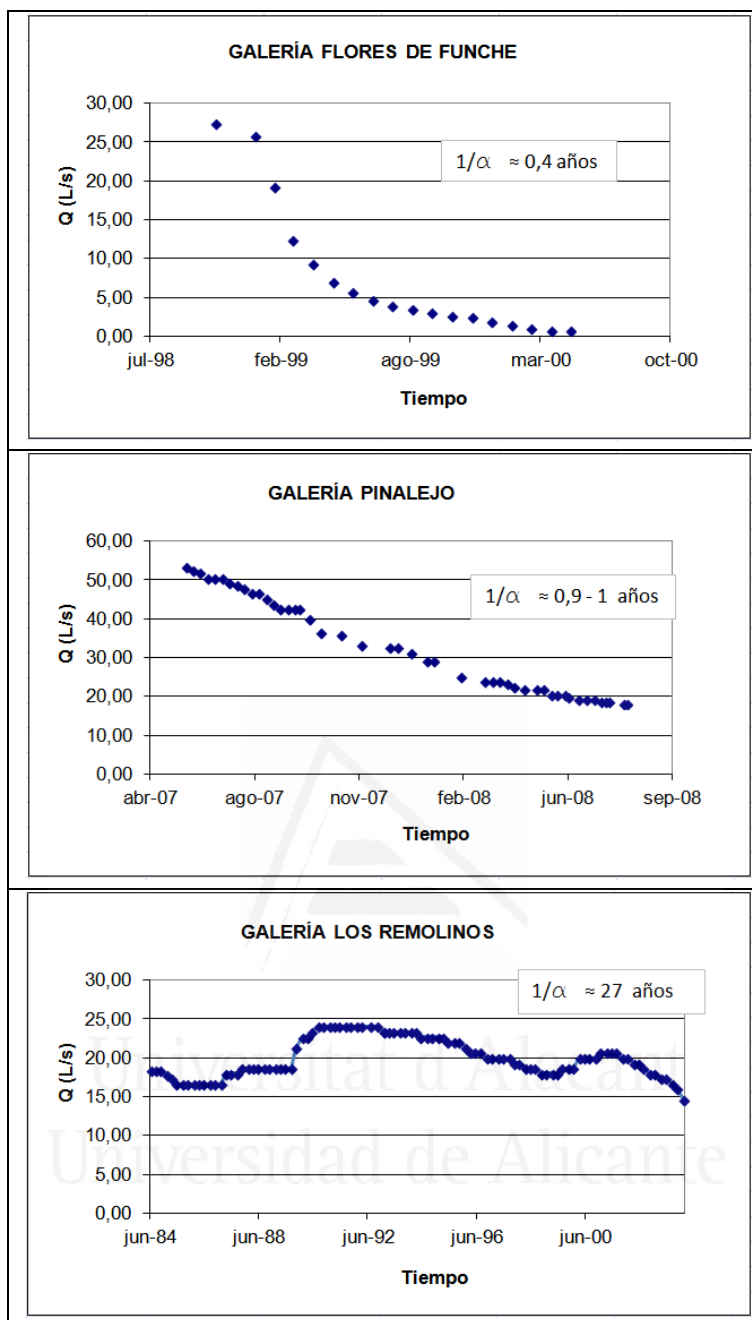


Figura 29. Tipología de las curvas de descarga en función de la influencia de la recarga natural. Arriba: tipo I, en el centro: tipo II, abajo: tipo III.

El procedimiento es simple y requiere representar en papel semilogarítmico los caudales de descarga en función del tiempo (logaritmo de caudales en el eje de ordenadas y tiempo en el eje de abscisas, en unidades homogéneas), analizando si los puntos así representados se alinean siguiendo una recta que puede ajustarse fácilmente, bien manualmente o mediante el uso de una hoja de cálculo o programa informático específico. Si ello es así, se puede afirmar razonablemente que esa descarga sigue una ley exponencial decreciente definida por Boussinesq-Maillet (en Custodio y Llamas, 1983) del tipo (Ecuación [8]):

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t} \quad [8]$$

Siendo:

- Q : Caudal de descarga en un momento t, en unidades homogéneas.
- Q₀ : Caudal de descarga en el momento t correspondiente al pico de descarga, en unidades homogéneas.
- α : Coeficiente de agotamiento que depende de las características geométricas e hidrológicas del embalse subterráneo, dimensional de tiempo [t⁻¹].
- t : Tiempo desde el momento en que el caudal vale Q₀ (en zona equivalente al pico máximo), expresado en unidades homogéneas.

El coeficiente así calculado es característico del sistema acuífero o porción de acuífero involucrado y que, bajo las mismas condiciones físico-químicas y antrópicas (sin procesos influyentes externos), presenta el mismo valor de la pendiente, independientemente del caudal drenado dependiente de la recarga natural, generalmente procedente de la infiltración de aguas de lluvia en eventos tormentosos.

Este coeficiente de agotamiento "alfa" se puede calcular del ajuste lineal como la pendiente de la recta "m", cuyo valor es (Figura 30) (Ecuación [9]):

$$m = \alpha = \frac{\log(Q_1) - \log(Q_2)}{0,4343(t_2 - t_1)} \quad [9]$$

Siendo:

- Q₁ : Caudal de descarga en un momento t₁ posterior al pico de descarga, en unidades homogéneas.
- Q₂ : Caudal de descarga en el momento t₂ correspondiente al pico de descarga, en unidades homogéneas.
- α : Coeficiente de agotamiento que depende de las características geométricas e hidrológicas del embalse subterráneo, dimensional de tiempo [t⁻¹].
- t₁ : Tiempo desde el momento en que el caudal vale Q₀ (en zona equivalente al pico máximo), expresado en unidades homogéneas.
- t₂ : Tiempo en que el caudal vale Q₀ (en zona equivalente al pico máximo), expresado en unidades homogéneas.
- m : Pendiente de la recta ajustada.

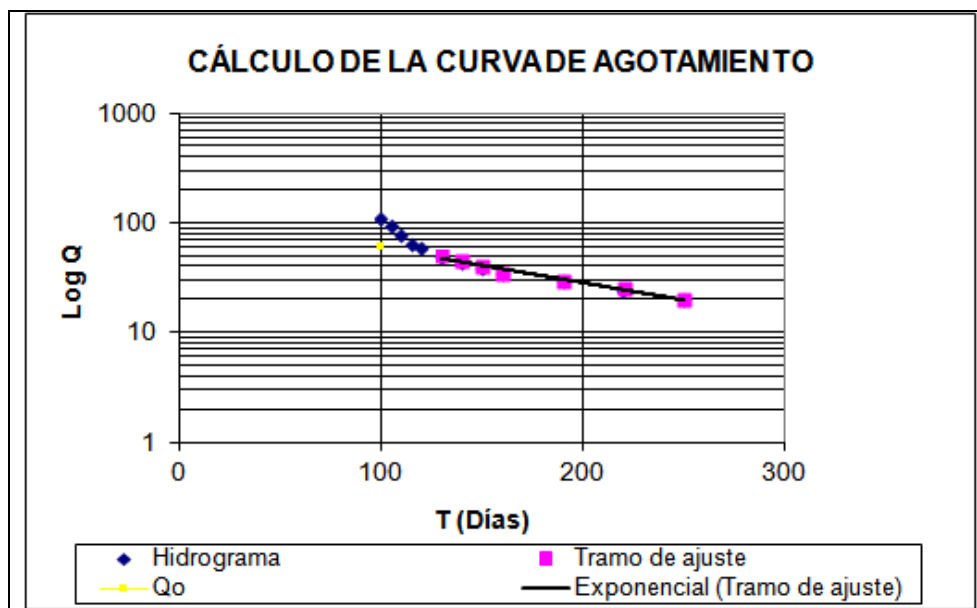


Figura 30. Cálculo del coeficiente de agotamiento a partir del ajuste del tramo lineal de la relación LogQ-Tiempo.

3.3.3.2. Aplicación al sistema acuífero volcánico de La Palma

En el caso Canarias, estudios preliminares realizados a partir del estudio de agotamientos de los caudales de muchas galerías funcionales (Figura 31), previo conocimiento de la geología del subsuelo y seleccionando los tramos más representativos, han permitido definir una serie de curvas tipo, características de distintos mecanismos de descarga en función de los condicionantes geológicos (Takasaki y Mink, 1985; Caloz, 1987; Sáenz de Oiza, 2011).

Específicamente, en la Isla de La Palma, la aplicación de esta metodología ha dado buenos resultados (Poncela, 2009; Poncela y Skupien, 2011; Skupien y Poncela, 2011) y Poncela et al., 2015b.

Los principales valores obtenidos del coeficiente de agotamiento mediante el método exponencial decreciente se muestran en la Figura 32 y Tabla 12.

Estos valores se sitúan entre 0,001 y 0,0001 días⁻¹ (Zona Occidental: 0,0002 a 0,0004; Zonas Septentrional y Oriental: 0,001 a 0,0003 (Poncela, 2009), y son característicos de magníficos reservorios, con gran capacidad de almacenamiento de agua subterránea, en ocasiones superior a varios hm³ de regulación para algunas galerías en los periodos considerados (p.e., entre 12 y 20 hm³ en el área nororiental, próxima a los Nacientes de Marcos y Cordero o en el área de Cumbre Nueva). Este volumen puede calcularse como (Ecuación [10]):

$$V = \frac{Q}{\alpha} \quad [10]$$

Siendo:

- Q : Caudal de descarga en un momento dado. Si $Q = Q_0$ se tiene el volumen de almacenamiento como consecuencia de esa descarga, en unidades homogéneas.
- α : Coeficiente de agotamiento que depende de las características geométricas e hidrológicas del embalse subterráneo, dimensional de tiempo [t^{-1}].



Figura 31. Drenaje de un frente saturado y transporte mediante canal o tubería en galerías de La Palma. Foto: Roberto Poncela.

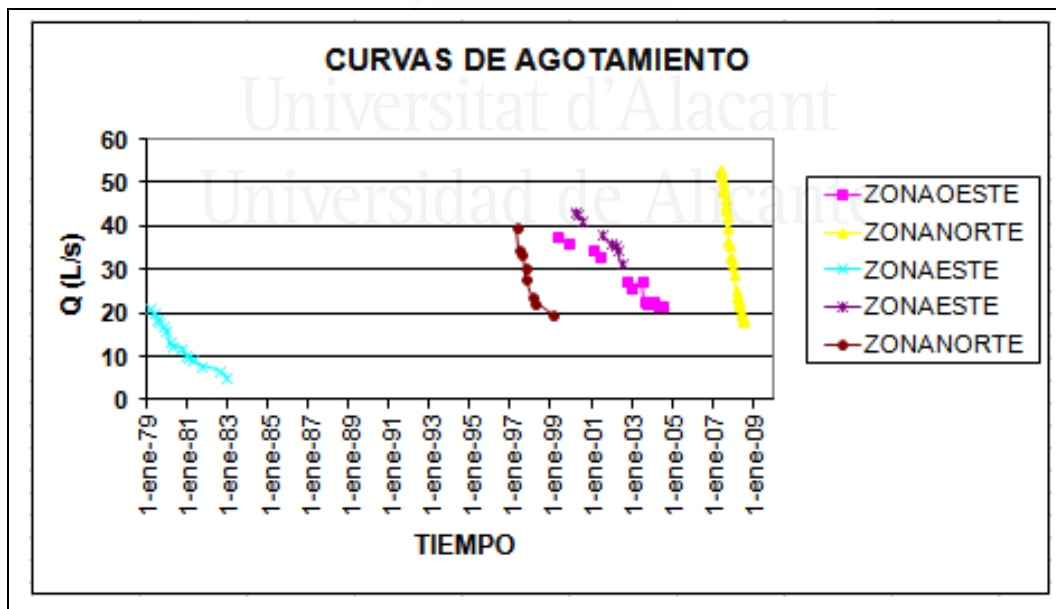


Figura 32. Tipología de las curvas sintéticas de agotamiento de caudales en galerías de La Palma (adaptado de Poncela, 2009).

Tabla 12. Valores de los coeficientes de agotamiento típicos en diversas zonas de La Palma (Poncela, 2009).

Zona	α (días ⁻¹)
Occidental	0,0002 - 0,0004
Septentrional	0,001 - 0,0003
Oriental	0,001 - 0,0003
Naciente Marcos	0,0005
Naciente Cordero	0,0009

En ocasiones, cuando los hidrogramas de caudales presentan diferentes tramos de agotamiento, bien porque el sistema es sensible a la recarga por infiltración en un tiempo relativamente corto, o como consecuencia de una explotación continuada, pero que refleja la influencia de episodios de recarga, a veces significativos, combinados con largos periodos de sequía, se puede evaluar el caudal total como la suma de una contribución de los caudales respectivos de los diferentes tramos, mediante la siguiente expresión (Boussinesq-Maillet, en Custodio y Llamas, 1983; Caloz, 1987) (Ecuación [11]):

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n Q_{0i} e^{(-\alpha_i t)} \quad [11]$$

Siendo:

- Q_T : Caudal total de descarga, en unidades homogéneas.
- Q_i : Caudal de descarga en un tramo i , en unidades homogéneas.
- Q_{0i} : Caudal de descarga en el momento t correspondiente al pico de descarga según la contribución de cada tramo i , en unidades homogéneas.
- α : Coeficiente de agotamiento que depende de las características geométricas e hidrológicas del embalse subterráneo, dimensional de tiempo [t^{-1}].
- t : Tiempo desde el momento en que el caudal vale Q_0 (en zona equivalente al pico máximo), expresado en unidades homogéneas.

Con el estudio de las descargas de galerías y/o manantiales se obtiene el valor del coeficiente de agotamiento que permite evaluar la relación de los parámetros hidrogeológicos y, a partir de ahí, dependiendo de la información complementaria que se tenga, poder estimar o calcular dichos parámetros de manera individual.

Se puede apreciar que la zona septentrional muestra unos patrones típicos de galerías del tipo I, con vaciados importantes del reservorio hasta conseguir una cierta estabilización. Las zonas oriental y occidental presentan características promedio del tipo II. En esta caracterización no se ha tenido en cuenta el caso de galerías influenciadas por la estacionalidad de la recarga (tipo III) que existen en todo el sistema acuífero volcánico, especialmente las situadas a cotas elevadas o con unos mecanismos de recarga directa importantes.

Aunque existe cierta variabilidad, los valores obtenidos son característicos de sistemas hidrogeológicos con gran "memoria", es decir, con importante almacenamiento, capaz de regulación de varios hectómetros cúbicos en los periodos considerados.

3.3.4. Difusividad hidráulica en acuíferos volcánicos

La difusividad hidráulica de una formación acuífera se define como la relación entre la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. El concepto del término tiene que ver con la transferencia de flujo de agua en un cuerpo acuífero; en concreto con la mayor o menor facilidad con la que el "agua puede fluir" en dicho acuífero. En general, cuanto mayor es el valor de difusividad hidráulica, mayor suele ser el valor de transmisividad, reflejando la aptitud para drenar agua subterránea. Un valor reducido suele ir asociado al caso contrario, es decir, a una mayor dificultad en la transferencia de agua; pero a veces, valores altos de difusividad pueden ir asociados a valores bajos de transmisividad si los valores del coeficiente de almacenamiento son bajos.

3.3.4.1. Metodología de cálculo de la difusividad hidráulica a partir del coeficiente de agotamiento

A partir del cálculo del coeficiente de agotamiento, se puede calcular la difusividad hidráulica de un sistema acuífero (o sector del mismo), puesto que ambos parámetros están relacionados entre sí mediante la expresión de Rorabaugh-Singh (en Custodio y Llamas, 1983) (Ecuación [12]):

$$\alpha = \frac{\pi^2 T}{4SL^2} \quad [12]$$

Siendo:

- T : Transmisividad del acuífero en unidades homogéneas [$L^2 \cdot t^{-1}$].
- S : Coeficiente de almacenamiento (adimensional).
- α : Coeficiente de agotamiento que depende de las características geométricas e hidrológicas del embalse subterráneo, dimensional de tiempo [t^{-1}].
- L : Distancia a la divisoria de aguas subterráneas o longitud característica, expresado en unidades homogéneas [L].

De dicha expresión se puede despejar la difusividad hidráulica, transformando la expresión anterior como (Ecuación [13]):

$$\frac{T}{S} = \frac{4\alpha L^2}{\pi^2} \quad [13]$$

La ventaja de utilizar expresiones de este tipo, es que se obtiene una relación paramétrica que conjuga dos de los principales parámetros hidrogeológicos. Por lo tanto, si se puede contrastar cualquiera de ellos por otros métodos (p.e. ensayos de bombeo y recuperación), se puede estimar razonablemente el otro. En este sentido, por asimilación de ensayos de recuperación en cierres de compuertas hidráulicas en galerías se ha podido estimar razonablemente el valor de la porosidad y contrastar el de la transmisividad en la zona norte de la Caldera de Taburiente (Poncela, 2009).

3.3.4.2. Limitaciones del método

El método aplicado tiene unas limitaciones sustanciales en los terrenos volcánicos, especialmente en La Palma (Poncela et al., 2015b), pero se puede aplicar en muchos casos si se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Se precisa continuidad entre el punto de descarga y la divisoria de aguas subterráneas (o al menos asumir que es así por el conocimiento geológico del subsuelo y/o hidrogeológico regional).
2. En el caso de galerías, el tramo evaluado no debe presentar importantes suministros de agua que no provengan del frente saturado o de la zona que se quiere analizar.
3. En el caso de la existencia de diques naturales que se comportan como barreras (efecto de compartimentación y represamiento), estos deberán ser representativos del trasdós del depósito hídrico subterráneo a evaluar.
4. En el caso de la existencia de otras discontinuidades, las evaluaciones para diversos manantiales o galerías deberán realizarse a nivel zonal respecto de esas discontinuidades.
5. Es conveniente comparar los resultados obtenidos con otra información regional u otros métodos o ensayos que se puedan ejecutar.

3.3.4.3. Aplicación al sistema acuífero de La Palma

En la Isla de La Palma, el principal acuífero se localiza en la zona de vertientes y queda definido en la masa de agua subterránea LP001: Acuífero Insular-Vertientes (Poncela, 2005a y 2009), de acuerdo con la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea. Este importante acuífero drena mediante galerías y manantiales en promedio un caudal continuo próximo a los 1.600 L/s, y es estratégico para el agua de abasto que suministra a un promedio de unos 80.000 habitantes, y para riego agrícola, con una importante superficie cultivada, siendo el cultivo estrella el plátano, que precisa de dotaciones próximas entre 10.000 y 12.000 m³/ha/año.

En este sentido, este drenaje que en sí mismo es una auténtica minería del agua (Santamarta, 2009), es perfectamente extrapolable a los drenajes que se ejecutan en la industria de la minería en general; en particular en aquellas zonas asociadas a elevados relieves montañosos, como es el caso de la zona andina y otros sistemas montañosos de otros continentes.

Si bien se evaluaron valores de transmisividad con este método en la década de los 70 (SPA-15, 1975), los estudios realizados por el autor que suscribe han permitido caracterizar diferentes zonas con agrupación de valores similares a partir del estudio de las curvas de drenaje y agotamiento de galerías y manantiales, con valores actualizados provenientes de la evolución histórica de caudales. Las distancias características "L" se han tomado hasta la divisoria de aguas subterráneas, aproximadamente en la perpendicular de la zona de cumbres, y ha sido variable en función de la ubicación de los frentes saturados de las galerías y zonas de descarga natural por manantiales.

Así, por ejemplo, se ha tomado una $L= 1.900$ m para el Naciente Marcos y $L= 2.200$ m para el Naciente Cordero (Skupien y Poncela, 2009a y 2009b). Otros valores han oscilado en promedio entre $L= 300$ a 400 m y $L= 3.000$ a 4.000 m.

Los valores de difusividad hidráulica se presentan en la Tabla 13 y su representación gráfica en la Figura 33.

Dado que los valores de porosidad o coeficiente de almacenamiento, aunque suelen ser desconocidos en muchas ocasiones, presentan unos intervalos de valores definidos en función del tipo de litologías, si se fija esta variación, o se conoce por otra documentación o ensayos, fácilmente se obtiene el valor de la transmisividad del acuífero o zona en estudio.

Tabla 13. Zonación de los valores de la difusividad hidráulica (T/S, en $m^2/día$) en La Palma (adaptado y actualizado de Poncela, 2009).

Zona	T/S ($m^2/día$)
Entorno del Roque de Los Muchachos y Caldera de Taburiente	50–100
Noroeste (Garafía)	400–600
Nororiental (Barlovento, San Andrés y Sauces, y Puntallana)	1.000–2.000
Naciente Marcos (San Andrés y Sauces)	750
Naciente Cordero (San Andrés y Sauces)	1.750
Conjunto Marcos y Cordero	1.100–1.200
Zona Este (Santa Cruz de La Palma)	5.000–6.000
Zona Este (Breña Alta y Cumbre Nueva)	200–600

3.3.5. Distancia de influencia y espacio cautelar de protección

3.3.5.1. Aproximación de Lembke modificada

Otro de los aspectos de difícil evaluación es de la estimación de la distancia de influencia de una galería y, por ende, de la posible interferencia entre captaciones y de la delimitación de los espacios cautelares de protección.

Para abordar el tema se ha escogido la aproximación de Lembke (Lembke, 1886; Custodio y Llamas, 1983; Molinero et al., 2000; Poncela, 2012) dado que de ella existe experiencia en Canarias, y no son precisos demasiados parámetros en su formulación (la mayor parte de ellos pueden obtenerse o estimarse en base a otros datos fiables y reales con cierta garantía y sencillez). Eso sí, se asumen una serie de hipótesis de partida y simplificaciones de la realidad física, bastante razonables, lo que permite evaluar un área de influencia a lado y lado de una captación horizontal. Como ejemplo se ha realizado el análisis para la galería Boca Este del túnel de transvase.

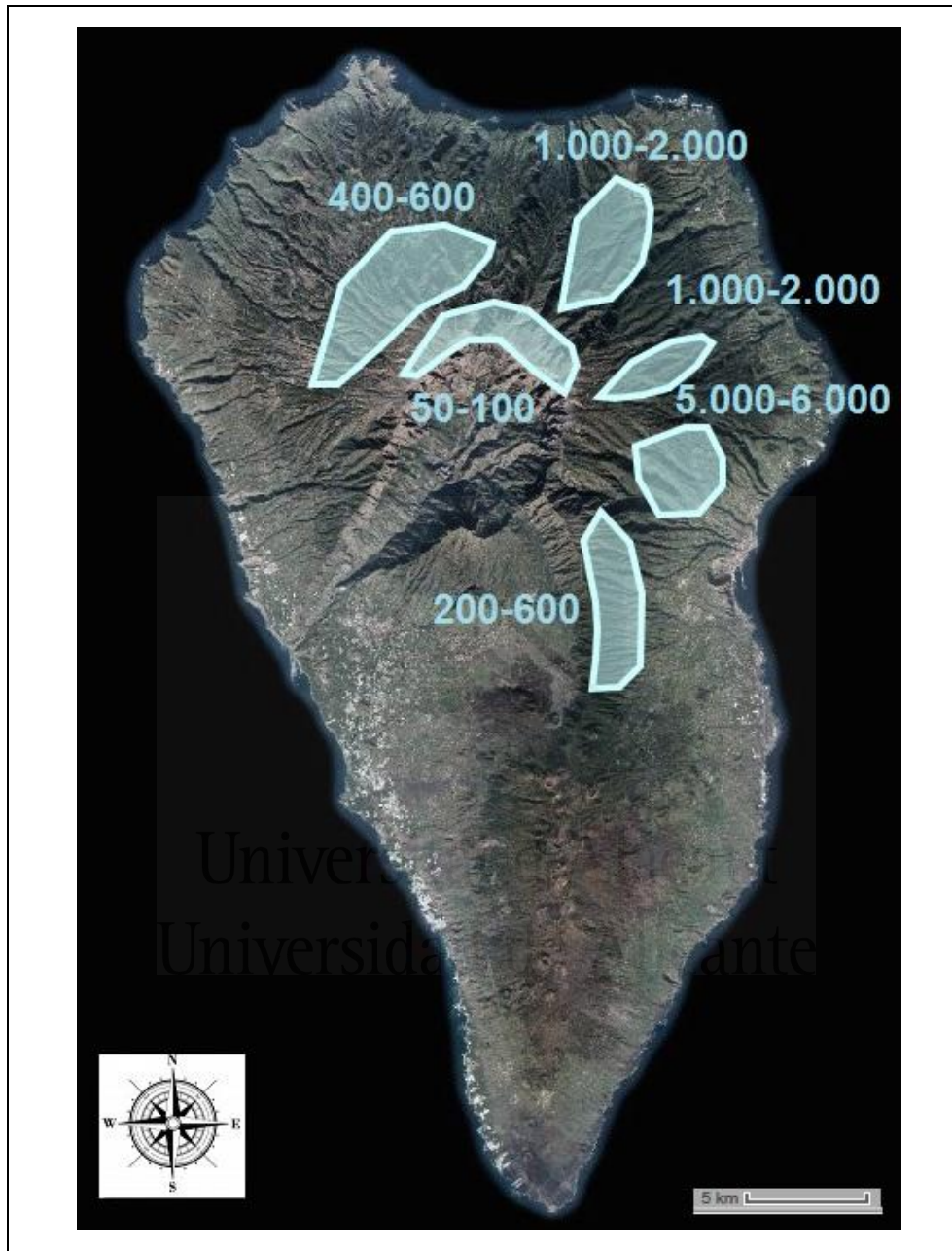


Figura 33. Distribución espacial de la variación de la difusividad hidráulica (T/S , en $m^2/día$) en La Palma (actualizada de Poncela, 2009).

Los principales parámetros que se han considerado han sido:

- Pluviometría: obtenida de la AEMET.
- Recarga: estimada por el autor en base a los resultados de otros informes, en particular, Skupien y Poncela (2007a).
- Permeabilidad equivalente: calculada por el autor como promedio entre caudales alumbrados y longitud de tramos productivos para diversas galerías próximas y/o regionales. Los datos que se han utilizado para este cálculo han sido extraídos del APHP (1992), PHP (2001) y contrastados con valores bibliográficos (SPA-15, 1975; Custodio, 1978, 1989b; Custodio y Llamas, 1983).
- Altura del nivel piezométrico: estimada por el autor en base al dato real de la medición del mismo en el frente de saturación de la galería Boca Este, basado en los valores de presiones manométricas del frente de dicha galería.
- Caudales alumbrados por las galerías Boca Este y HBA (ha permitido el contraste de hipótesis y resultados).
- Otras consideraciones hidrogeológicas: basadas en el conocimiento geológico e hidrogeológico de la Isla.

La aproximación de Lembke (1886) se basa en un método de cambios sucesivos en el estado estacionario que permite estudiar aproximadamente el régimen variable en acuíferos libres cuando la superficie freática altera poco su forma.

El caso más sencillo consiste en considerar el flujo hacia una galería situada sobre la base impermeable de un acuífero libre. En nuestro caso, el acuífero insular puede tratarse como libre a nivel de macroescala; la asunción de la base impermeable es más restrictiva, si bien se ha considerado poco significativa aunque la consideración de que la galería no está sobre una base impermeable conduce a un desarrollo matemático más complejo y a una solución integral que es preciso evaluar; este aspecto no se ha considerado aquí, pues se añaden otros parámetros que a su vez habría que estimar, lo que conduciría a una solución basada en muchas incertidumbres.

Dado que la formulación de Lembke introduce un término de recarga local, éste se ha evaluado en base a las estimaciones y cálculos realizados con anterioridad en otros trabajos, tomando como referencia el desarrollado por Skupien y Poncela (2007a).

Asimismo, dicha formulación ha sido modificada por Poncela (2012), introduciendo un coeficiente de proporcionalidad β , en función de la heterogeneidad espacial del acuífero.

La expresión que permite calcular la distancia de influencia en un acuífero libre, con recarga local y nivel piezométrico por encima de la base de la galería, en función del tiempo, modificada para la heterogeneidad espacial existente es (Ecuación [14]):

$$L(t) = \beta H_0 \sqrt{\frac{k}{2W} \left(1 - e^{\left(-\frac{6W}{H_0}t\right)}\right)} \quad [14]$$

Con $L(0) = 0$ y siendo:

$L(t)$: Distancia de influencia, en m.

H_0 : Altura del nivel piezométrico sobre la galería, en m. Se tiene constancia de variaciones estacionarias entre 70 y 100 m (7,0 y 9,86 atm., respectivamente).

k : Permeabilidad equivalente, en m/día. Se ha tomado $k = 2$ m/día en base a datos de galerías analizados por R. Poncela.

W : Recarga local, en m/día. Tomada del informe Skupien y Poncela (2007a). W entre 375 y 550 mm/año (aprox. 1×10^{-3} a $1,5 \times 10^{-3}$ m/día).

t : Tiempo, en días. En régimen estacionario, el tiempo se asigna infinito.

β Coeficiente de proporcionalidad. Se asigna para el entorno hidrogeológico que nos ocupa un valor de 0,8 (Poncela, 2012).

Para $t = \infty$ se tiene la distancia de influencia en régimen estacionario, con $L(\infty) = \infty$ para $W = 0$ (Ecuación [15]):

$$L(\infty) = \beta H_0 \sqrt{\frac{k}{2W}} \quad [15]$$

Asimismo, el caudal drenado por la galería (dos lados) en función del tiempo $q(t)$ es (Ecuación [16]):

$$q(t) = 2LH_0 \sqrt{\frac{0,5kW}{\left(1 - e^{\left(-\frac{6W}{H_0}t\right)}\right)}} \quad [16]$$

que en régimen estacionario ($t \rightarrow \infty$) para la longitud efectiva de la galería L (dos lados, expresada en metros), es (Ecuación [17]):

$$q = 2L(\infty)H_0 \sqrt{\frac{kW}{2}} \quad [17]$$

3.3.5.2. Aplicación a la galería Boca Este del Túnel de Trasvase

La galería Boca Este del Túnel de Trasvase (420 msnm) tiene una longitud de 2.343 m y presenta un cierre por compuerta hidráulica a los 2.100 m de la bocamina (MMA, 2003; Rivet, 2004) (Figura 34).

El método aplicado en relación a la galería Hidráulica Breña Alta (300 msnm) permite calcular una distancia de influencia comprendida entre 1.400 y 2.500 m (Poncela, 2012) cuyos valores se muestran en la Tabla 14.

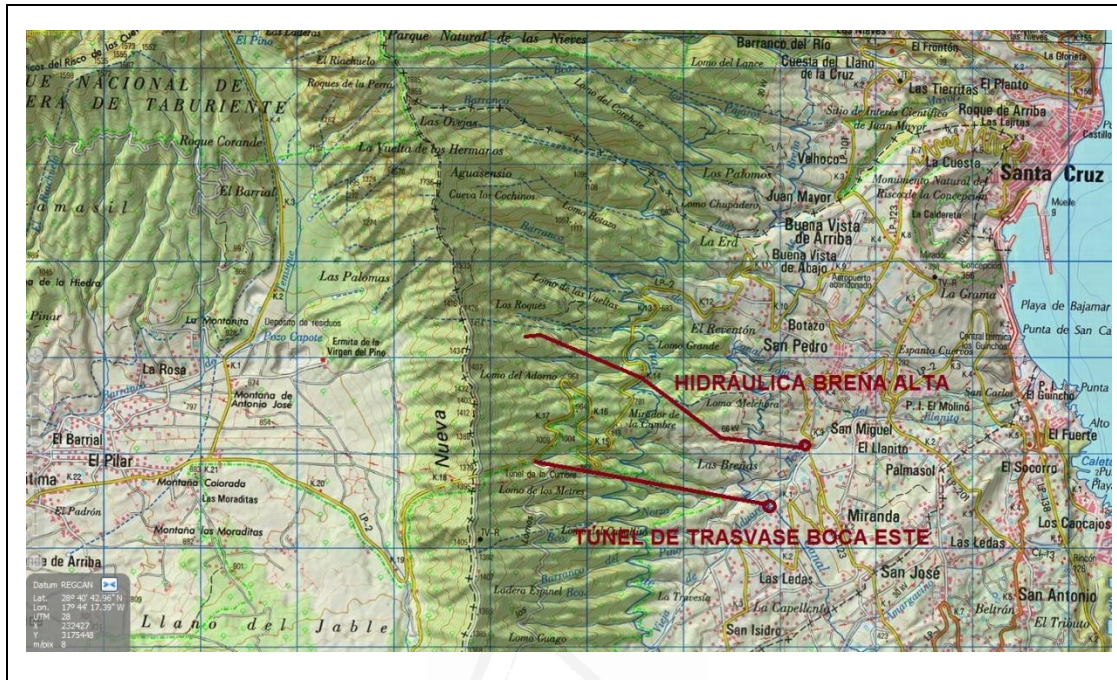


Figura 34. Galerías Boca Este del Túnel de Traslase e Hidráulica Breña Alta en el Arco de Cumbre (masa de agua subterránea LP001). Cartografía base: IGN.

Tabla 14. Distancia de influencia en función de la altura piezométrica.

Altura piezométrica del macizo saturado (m)	Distancia aproximada de influencia (m)	
	L _{MIN}	L _{MAX}
70	1.400	1.800
100	2.000	2.500
Distancia para cálculo (m):	2.000	

El frente de saturación de la galería Hidráulica de Breña Alta dista en planta perpendicularmente al frente de saturación de la Boca Este unos 1.500 m. De acuerdo con los valores planteados, es posible que exista una cierta influencia de la galería Boca Este sobre la galería Hidráulica Breña Alta. No obstante, se ha tomado como valor de cálculo de L = 2000 m.

Con dicha cifra y el intervalo de recarga estimado, se tiene que el caudal teórico que se drenaría sería de (Tabla 15):

Tabla 15. Caudal teórico drenado en función de la altura piezométrica.

Altura piezométrica del macizo saturado (m)	Caudal teórico drenado aproximado (L/s)	
	W = 0,001 m/día	W = 0,0015 m/día
70	100	125
100	145	180

Del análisis de los datos históricos, el valor máximo alcanzado ha sido de 105 a 110 L/s (posiblemente superior a llave abierta; quizá unos 120 L/s).

Si se rehace el cálculo para este caudal drenado, en base a los mismos supuestos, se puede acotar la distancia de influencia anteriormente fijada. Según esto se tiene que (Tabla 16):

Tabla 16. Distancia de influencia corregida en función de la altura piezométrica.

Altura piezométrica del macizo saturado (m)	Distancia teórica de influencia aproximada (m). Explotación en continuo.	
	W = 0,001 m/día	W = 0,0015 m/día
70	2.350	1.900
100	1.650	1.350
Distancia promedio (m):	1.800	

Parece razonable suponer, en principio, que una explotación continuada de la galería Boca Este, lleva a interferir con la explotación de la galería Hidráulica Breña Alta.

No obstante, durante los últimos años se ha procedido a realizar un cierre del tranque en época invernal (desde octubre hasta marzo-abril, en promedio). Ello ha contribuido a que el caudal continuo de explotación haya quedado reducido a casi medio año, oscilando entre 60 y 75 L/s, permitiendo una recuperación de niveles piezométricos por recarga.

Si suponemos $Q = 75$ L/s como estacionario, y repitiendo el cálculo anterior para los mismos parámetros H_0 y W , se tiene entonces que la distancia teórica de influencia queda como (Tabla 17):

Tabla 17. Distancia de influencia corregida en función de la altura piezométrica para un caudal estacionario $Q = 75$ L/s.

Altura piezométrica del macizo saturado (m)	Distancia teórica de influencia aproximada (m). Explotación con cierre de tranque.	
	W = 0,001 m/día	W = 0,0015 m/día
70	1.450	1.200
100	1.050	850
Distancia promedio (m):	1.150 < 1.500 m	

En esas condiciones, queda patente que se está por debajo de la distancia "D" en planta entre captaciones.

El espacio cautelar de protección que establece el vigente Plan Hidrológico Insular es de 1.000 m. Como se puede observar, visto los datos, parece que se queda ligeramente corto. Valores superiores a 1.500 m o incluso tomando como límite el valor de 2.000 m (como llegó a estar vigente antiguamente) parece que responden mejor a la realidad hidrogeológica observada en dicha galería.

3.3.5.3. Método de Sáenz de Oiza modificado

Otra manera de enfocar el problema es mediante el método de Sáenz de Oiza, Director en su día del Proyecto SPA-15. La descripción de dicho método para la estimación de la zona de influencia de un galería puede ampliarse en Sáenz de Oiza (2011).

En síntesis, para una galería con extracción en el frente, situada a una cierta distancia de la divisoria de aguas subterráneas, se define la distancia de influencia de acuerdo con la siguiente expresión (Ecuación [18]):

$$D = 2L \sqrt{\rho(1 - \alpha)\beta} \quad [18]$$

Siendo:

- D : Distancia mínima de influencia, en m, si $\rho < 0,5$.
- L : Distancia entre el frente saturado y la divisoria de aguas subterráneas, en m. Para el caso de la Boca Este, la distancia se toma $L = 1.500$ m.
- ρ : Relación entre de longitud saturada de la galería y la anchura de la superficie piezométrica (de borde a divisoria). Para el caso de la Boca Este, se toma $243 \text{ m} / 1.500 \text{ m} = 0,162$.
- W : Recarga local, en m/día. Tomada del informe Skupien y Poncela (2007a). W entre 375 y 550 mm/año (aprox. 1×10^{-3} a $1,5 \times 10^{-3}$ m/día).
- α y β : Parámetros de cálculo que se obtienen por ábaco.

Para facilitar los cálculos, se presenta un ábaco en la Figura 35. Realizados estos, la distancia mínima de influencia $D_{\text{MIN}} \approx 1.050$ m.

3.3.5.4. Valoración del método

Si bien no existe un método preciso para el cálculo de la distancia de influencia, excluyendo la realización de un modelo numérico, las formulaciones planteadas permiten acotar el problema, máxime cuando se llevan quince años de explotación.

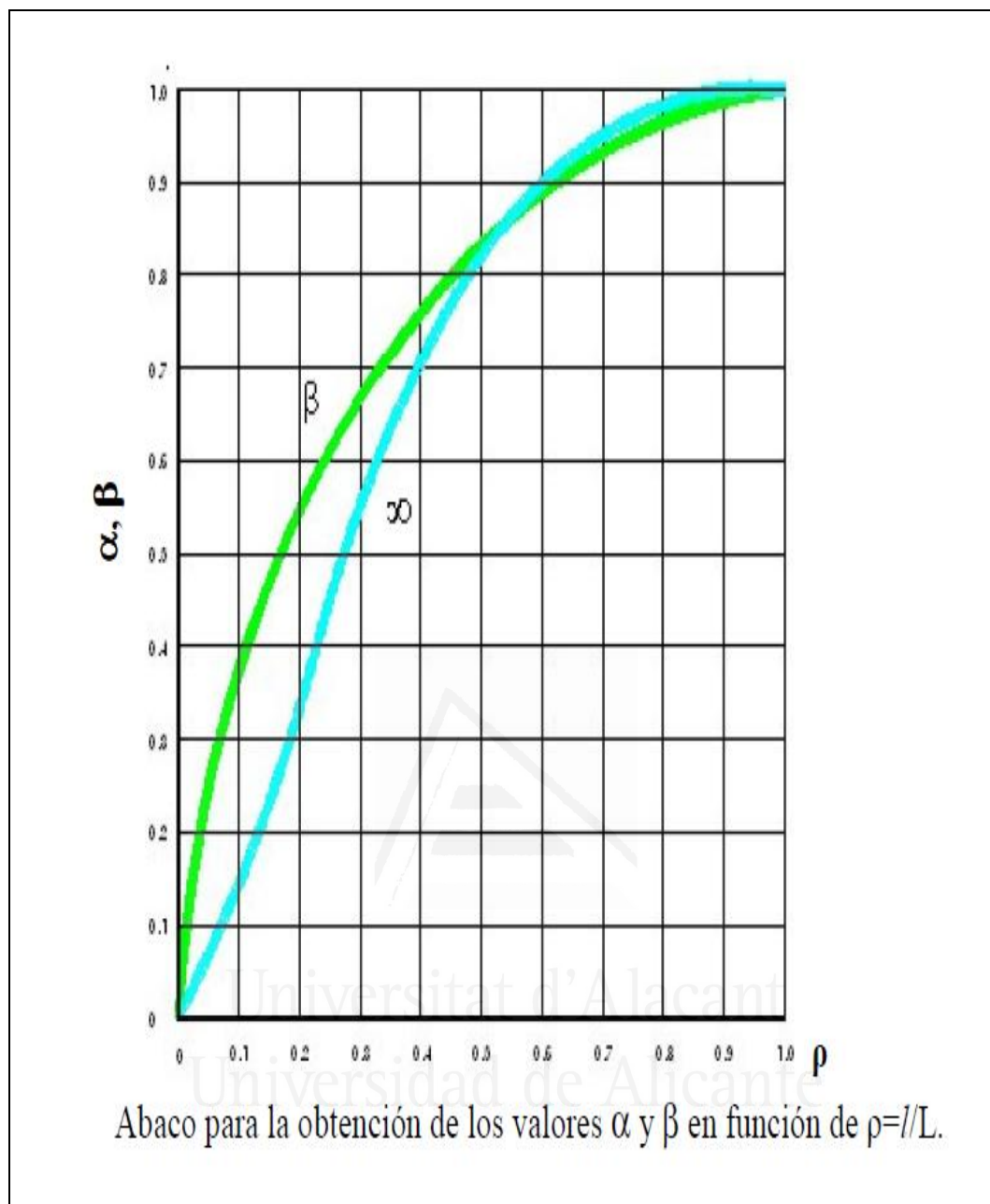


Figura 35. Ábaco para la obtención de los valores α y β en función de la relación entre la longitud saturada de la galería y la anchura de la superficie piezométrica (extraída de Sáenz de Oiza, 2011).

Se parte de la suposición de un sistema estacionario que, en la práctica está muy influenciado por un lado por las variaciones de la pluviometría local y, por ende, de las recarga al acuífero y, por otro lado, por la propia variabilidad de las extracciones.

No obstante lo anterior, se ha considerado el caso de explotación en continuo con una recarga media estacionaria. Los parámetros de cálculo obtenidos del ábaco de la Figura 35 han sido: $\alpha = 0,25$ y $\beta = 0,50$. En esas condiciones, los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 18:

Tabla 18. Resultados comparativos de la distancia de influencia corregida, la altura piezométrica y la recarga, para un caudal estacionario $Q = 75 \text{ L/s}$.

Altura piezométrica del macizo saturado (m)	Distancia teórica de influencia aproximada (m)			
	Explotación en continuo		Explotación con cierre de tranque	
	W = 0,001 m/día	W = 0,0015 m/día	W = 0,001 m/día	W = 0,0015 m/día
70	2.350	1.900	1.450	1.200
100	1.650	1.350	1.050	850
D - Lembke (m):	1.800		1.150 < 1.500	
D Sáenz (m):	~ 750			
D _{MAX} Sáenz (m), $\beta=1$:	1.050			
D promedio (m):	~ 1.500			
D para cálculo (m):	1.500 a 2.000			

Los resultados muestran que la distancia de influencia, en condiciones promedio y cuando menos, se sitúa en el entorno de la distancia en planta entre ambas galerías (1.500 m). Cuando los niveles piezométricos del núcleo del macizo y las recargas son bajas (inviernos anteriores de escasa o nula precipitación), parece claro que la distancia de influencia interfiere con el espacio cautelar de protección de la galería Hidráulica Breña Alta, de acuerdo con la definición del vigente Plan Hidrológico Insular.

También parece inferirse que, bajo inviernos lluviosos que condicionan recargas mayores y, por lo tanto, niveles piezométricos del núcleo del macizo también mayores (observación de las lecturas manométricas del sondeo intramacizo - frente este), esa posible interferencia se minimiza, pudiendo llegar a anularse debido a la disponibilidad de caudales superiores.

3.3.6. Perturbaciones al sistema hidrogeológico

De acuerdo con los cálculos anteriores, se puede estimar el tiempo para que una perturbación se amortigüe en un sistema acuífero con recarga distribuida según la expresión (Custodio, 2005) (Ecuación [19]):

$$\tau = \beta \frac{L^2 S}{T} \quad [19]$$

Siendo:

τ : Tiempo para que el efecto hidrodinámico (cambio de niveles piezométricos / freáticos) de una perturbación se amortigüe. [día].

β : Coeficiente de forma. Varía de 1,5 a 3 en situaciones comunes. Se ha tomado 2.

Nota: este coeficiente no guarda relación directa con el parámetro β de la Figura 35 correspondiente al método de Sáenz de Oiza, aunque se identifique con la misma letra griega.

- T : Transmisividad del medio acuífero (m²/día).
 S : Coeficiente de almacenamiento o porosidad eficaz. Adimensional.
 L : Tamaño del sistema. Distancia característica, expresada en metros. Normalmente a la divisoria de aguas subterráneas o a cualquier otra.

No obstante, la recarga no suele estar distribuida en el tiempo, sino más bien que se suele concentrar en la época más lluviosa, con respuesta de niveles piezométricos (en general no medibles directamente en La Palma, salvo en los escasos pozos y sondeos existentes) entre días y semanas a 2-4 meses, dependiendo de las discontinuidades de la zona no saturada, y de la presencia de niveles intercalados tipo "almagre", "mortalón" o "sill".

En esas circunstancias, Poncela propone una expresión modificada más ajustada a la realidad de acuerdo con el periodo de recarga efectiva y que ha demostrado su efectividad en otros trabajos en terrenos volcánicos (Skupien y Poncela, 2013b) (Ecuación [20]):

$$\tau = \beta \frac{L^2 S}{T} \left(\frac{M}{12} \right) \quad [20]$$

Siendo:

- τ : Tiempo para que el efecto hidrodinámico (cambio de niveles piezométricos / freáticos) de una perturbación se amortigüe. [día].
 β : Coeficiente de forma. Varía de 1,5 a 3 en situaciones comunes. Se ha tomado 2.
 Nota: este coeficiente no guarda relación directa con el parámetro β de la Figura 35 correspondiente al método de Sáenz de Oiza, aunque se identifique con la misma letra griega.
 T : Transmisividad del medio acuífero (m²/día).
 S : Coeficiente de almacenamiento o porosidad eficaz. Adimensional.
 L : Tamaño del sistema. Distancia característica, expresada en metros. Normalmente a la divisoria de aguas subterráneas o a cualquier otra. Para homogeneizar, el cálculo se realizará para distancias comprendidas entre 1 y 2 km (zona de recarga natural efectiva entre las cumbres y medianías altas).
 M : Número de meses en los que se produce recarga efectiva importante. En las Cumbres de La Palma puede variar de 5 a 7 meses. Como cálculo se ha tomado 7.

Sustituyendo los valores para distintas zonas de La Palma (Tabla 19) se tiene que el tiempo para que una perturbación en el sistema hidrogeológico insular se amortigüe, puede estar comprendido entre 2-5 años hasta 10-20 años en general, lo cual indica que el sistema es altamente sensible a las influencias externas, especialmente a la variabilidad estacional y a las influencias antrópicas.

Los datos de varias décadas, incluso siglos, pueden reflejar las singularidades del sistema tales como presencia de niveles semipermeables, o tipo "mortalón", que pueden diferir los pulsos (incluso propiciar resultados absurdos desde el punto de vista hidrogeológico).

Tabla 19. Tiempo de amortiguación de una perturbación en el sistema acuífero volcánico insular de La Palma. Dicha perturbación puede estar asociada al cambio climático y/o a una influencia antrópica.

Zona	T/S (m²/día)	L (km)	τ (años)
Entorno del Roque de Los Muchachos y Caldera de Taburiente (Norte)	50–100	1 a 2	30 - 250
Noroeste (Garafía)	400–600	1 a 2	5 - 30
Nororiental (Barlovento, San Andrés y Sauces, y Puntallana)	1.000–2.000	1 a 2	2 - 15
Naciente Marcos (San Andrés y Sauces)	750	1 a 2	5 - 20
Naciente Cordero (San Andrés y Sauces)	1.750	1 a 2	2 - 10
Conjunto Marcos y Cordero	1.100–1.200	1 a 2	3 - 15
Zona Este (Santa Cruz de La Palma)	5.000–6.000	1 a 2	1 - 3
Zona Este (Breña Alta y Cumbre Nueva)	200–600	1 a 2	5 - 65



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.4. MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Con carácter preliminar, el Consejo Insular de Aguas de La Palma, autoridad hidráulica competente, estableció cinco masas de agua subterránea (actualmente consolidadas) para cumplimentar lo dispuesto en los citados artículos 4 y 5 de la DMA (Poncela, 2005a).

Las cinco masas de agua subterránea están referidas a un punto centroide en coordenadas UTM (sistema de referencia ITRF93, elipsoide WGS84 y Datum REGCAN 95), y se presenta en la Tabla 20 y Figura 36 (Poncela, 2005a; APHP, 2012 y 2015; y Poncela y Skupien, 2013).

3.4.1. Descripción de las masas de agua subterránea en La Palma

Se describen a continuación los principales rasgos geomorfoestructurales, hidrogeológicos y de gestión que han permitido definir 5 masas de agua subterránea en La Palma:

1. **Masa LP001.- Acuífero Insular-Vertientes.** Es la más extensa y cubre toda la zona central del norte de La Palma. La circulación del agua subterránea en este acuífero viene determinada por la existencia del Complejo Basal, de forma que el agua infiltrada directamente sobre el terreno, a través de los Edificios Taburiente y Garafía (allí donde es favorable), discurre de forma radial hacia la costa sobre esta base impermeable. A pequeña escala, este esquema de circulación puede variar debido a la existencia de diques intrusivos y mantos piroclásticos de baja permeabilidad. Los diques inducen una compartimentación que disminuye la permeabilidad horizontal y da lugar a la existencia de celdas con niveles freáticos más elevados de lo que cabría esperar. La denominada estructura COEBRA, en su zona central, separa un nivel de menor permeabilidad, conformando una divisoria subterránea que desagua hacia dos vertientes diferentes. Constituye el principal sistema acuífero insular.
2. **Masa LP002.- Acuífero Costero.** Constituye la prolongación del acuífero Insular-Vertientes por debajo de la cota 600 m, límite de gestión que fija el propio Plan Hidrológico de La Palma, y en donde se localizan la casi totalidad de los pozos funcionales. Se trata de una banda de unos 4 o 5 km de anchura que bordea la isla en su zona norte. Está formado por materiales jóvenes, fundamentalmente lavas basálticas con intercalaciones de piroclastos, por lo que su permeabilidad es alta. Se alimenta con la infiltración directa de las aguas de lluvia que caen sobre él, además de los caudales provenientes del acuífero Insular-Vertientes, y descarga directamente al mar a lo largo de toda la costa. La calidad del agua es muy variable ya que se encuentra en contacto directo con el agua del mar siendo los procesos de intrusión marina incipiente frecuentes; muchos de los pozos ubicados en este acuífero han debido ser abandonados por este motivo. El gradiente hidráulico es mayor en el norte de la isla, por lo que el volumen de agua que fluye hacia el mar es también mayor contrarrestando así el fenómeno de la intrusión o salinización. Por otro lado, las aguas provenientes del acuífero Insular-Vertientes son más antiguas y de mayor mineralización que las de infiltración reciente que se depositan en los niveles superiores, formando una franja de agua de mejor calidad.

3. **Masa LP003.- Acuífero Complejo Basal.** Situada en el centro de la isla está constituida por el zócalo prácticamente impermeable, por lo que presenta una circulación de agua muy restringida. Actualmente no tiene una extracción directa pero, en un futuro, de acuerdo con estudios más específicos podrá evaluarse su potencial. Parece que existe cierto termalismo remanente.
4. **Masa LP004.- Acuífero Dorsal Sur.** Comprende la mitad sur del sistema acuífero insular. Se ubica sobre las lavas basálticas y conos de cenizas del edificio Dorsal Sur o Cumbre Vieja. En esta zona no se conoce exactamente la posición del Complejo Basal que forma el zócalo impermeable, aunque se cree que se sitúa por debajo del nivel del mar, con lo que todo el sistema de aguas subterráneas permanecería "flotando" sobre el agua del océano infiltrada en el subsuelo de la isla, con una zona de mezcla por difusión y dispersión hidrodinámica de dimensiones variables. Esta masa de agua subterránea se encuentra afectada por manifestaciones de CO₂ de origen volcánico, lo que condiciona elevadas concentraciones de bicarbonatos. También muestra actividad geotérmica que condiciona el termalismo detectado en la Fuente Santa.
5. **Masa LP005.- Acuífero Valle de Aridane-Tzacorte.** Definida a partir del Decreto 49/2000, de 10 de abril por el que se determinan las masas de agua afectadas por la contaminación de nitratos de origen agrario y se designan las zonas vulnerables por dicha contaminación (BOC nº 48, de miércoles 19 de abril, páginas 4712-4713), y caracterizada por un contenido en ión nitrato superior a 50 mg/l. Comprende los términos municipales de Los Llanos de Aridane y Tzacorte por debajo de la cota 300 msnm. Al igual que el acuífero Dorsal Sur, éste también está formado por las lavas basálticas y conos de cenizas del edificio Cumbre Vieja, pero presenta una acusada disminución de su calidad por procesos puntuales de salinización (se matiza el término intrusión marina dado que los valores de conductividad medidos son muy bajos para este proceso, lo que induce a pensar que su presencia es incipiente y con facilidad de recuperación) y contaminación difusa.

Tabla 20. Masas de agua subterránea en La Palma. Situación actual.

Código	Masa de Agua Subterránea	UTM X	UTM Y	Sup (km ²)
ES70LP001	Acuífero Insular-Vertientes	219.901	3.181.701	318,34
ES70LP002	Acuífero Costero	221.102	3.182.454	176,89
ES70LP003	Acuífero Complejo Basal	218.725	3.179.946	31,80
ES70LP004	Acuífero Dorsal Sur	223.172	3.162.059	162,86
ES70LP005	Acuífero Valle de Aridane-Tzacorte	214.928	3.168.210	20,19

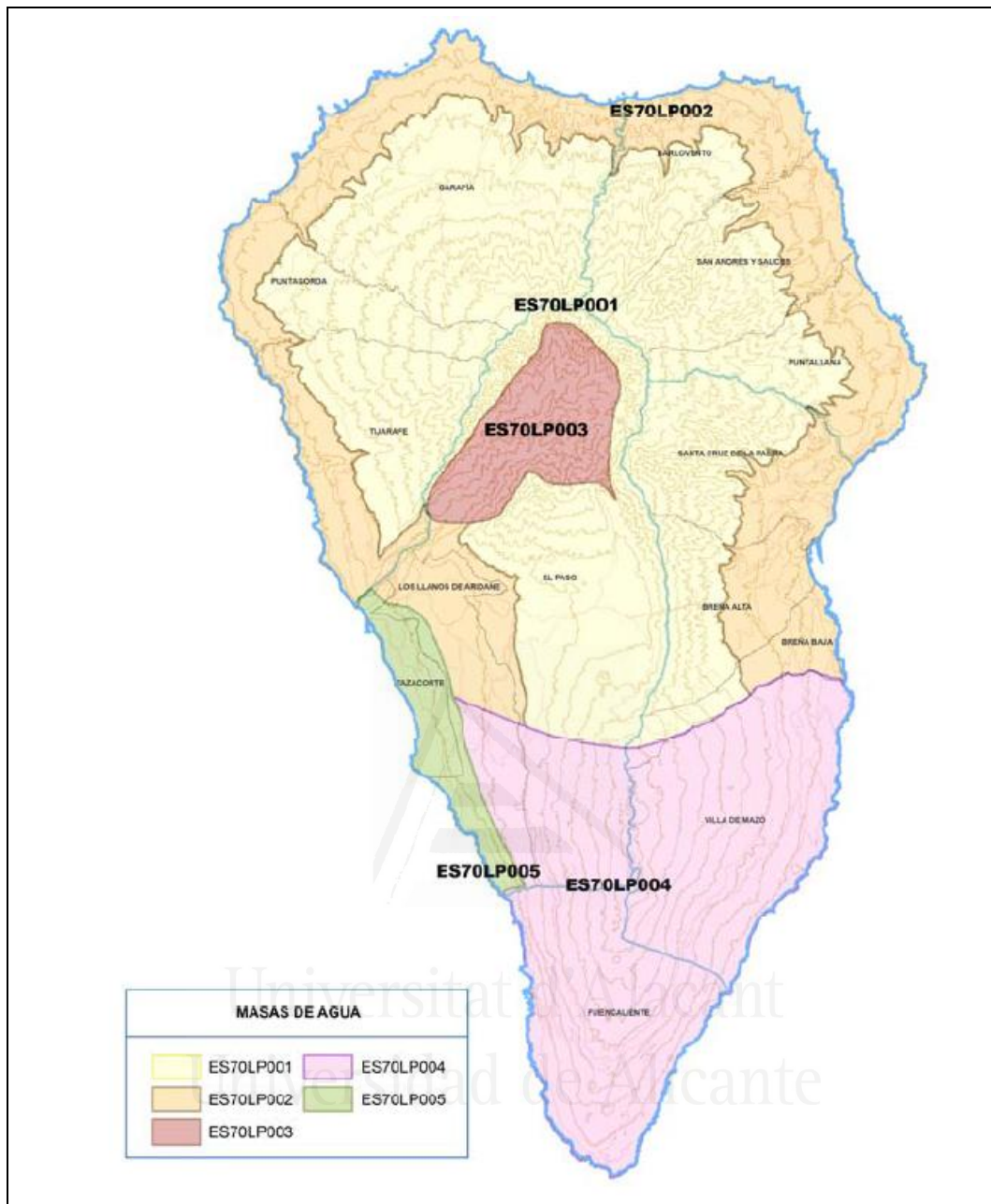


Figura 36. Localización de las masas de agua subterránea en La Palma (extraído de Poncela y Skupien, 2013).

3.4.2. Recursos subterráneos por tipología de captaciones

Los recursos subterráneos desglosados por tipología de captaciones se muestran en la Tabla 21 (Poncela y Skupien, 2013).

La Tabla 22 muestra el porcentaje de extracción por masa de agua subterránea.

Tabla 21. Caudales continuos (L/s) por masas de agua subterránea y captaciones en La Palma (2013) (Poncela y Skupien, 2013).

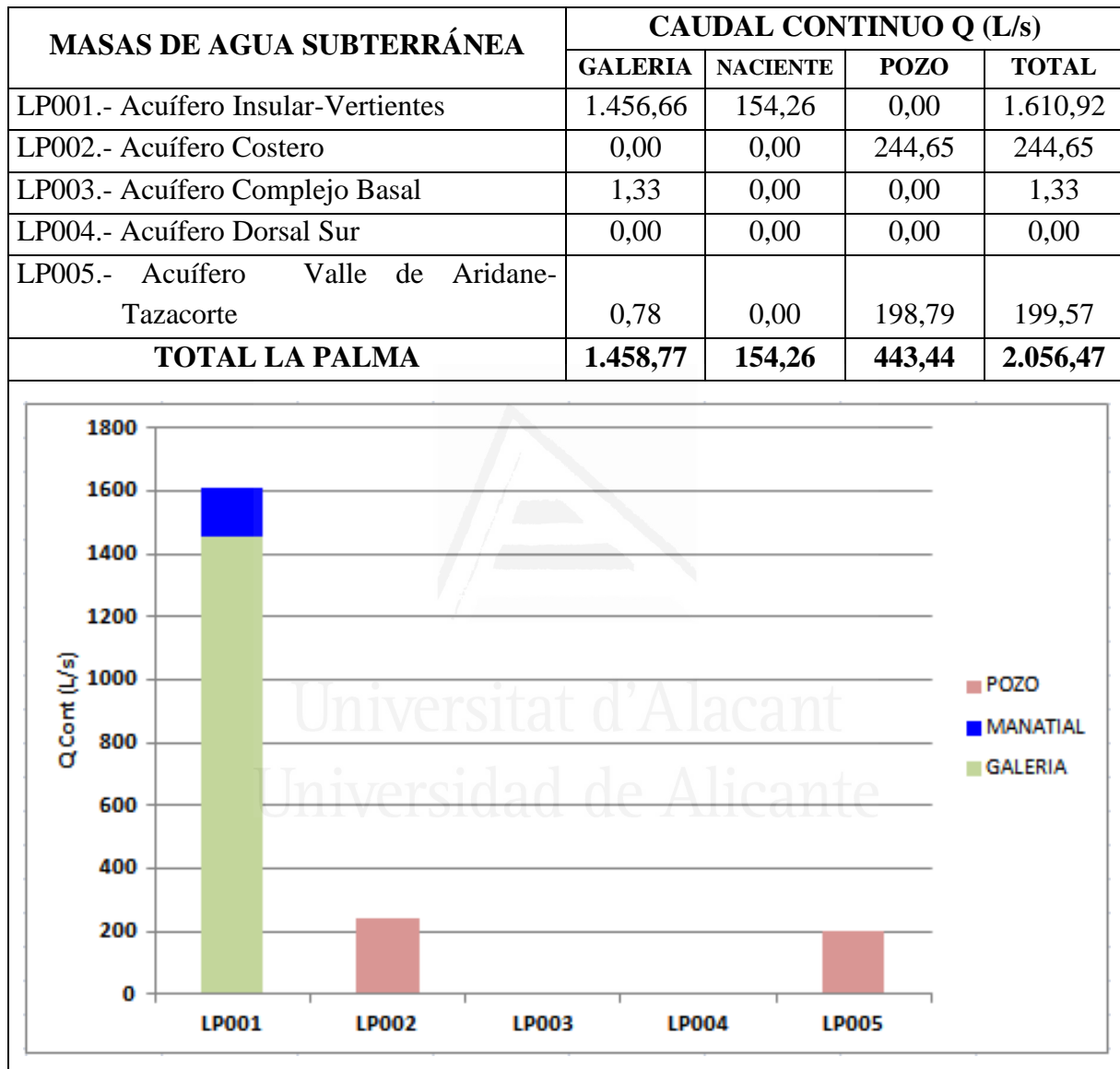
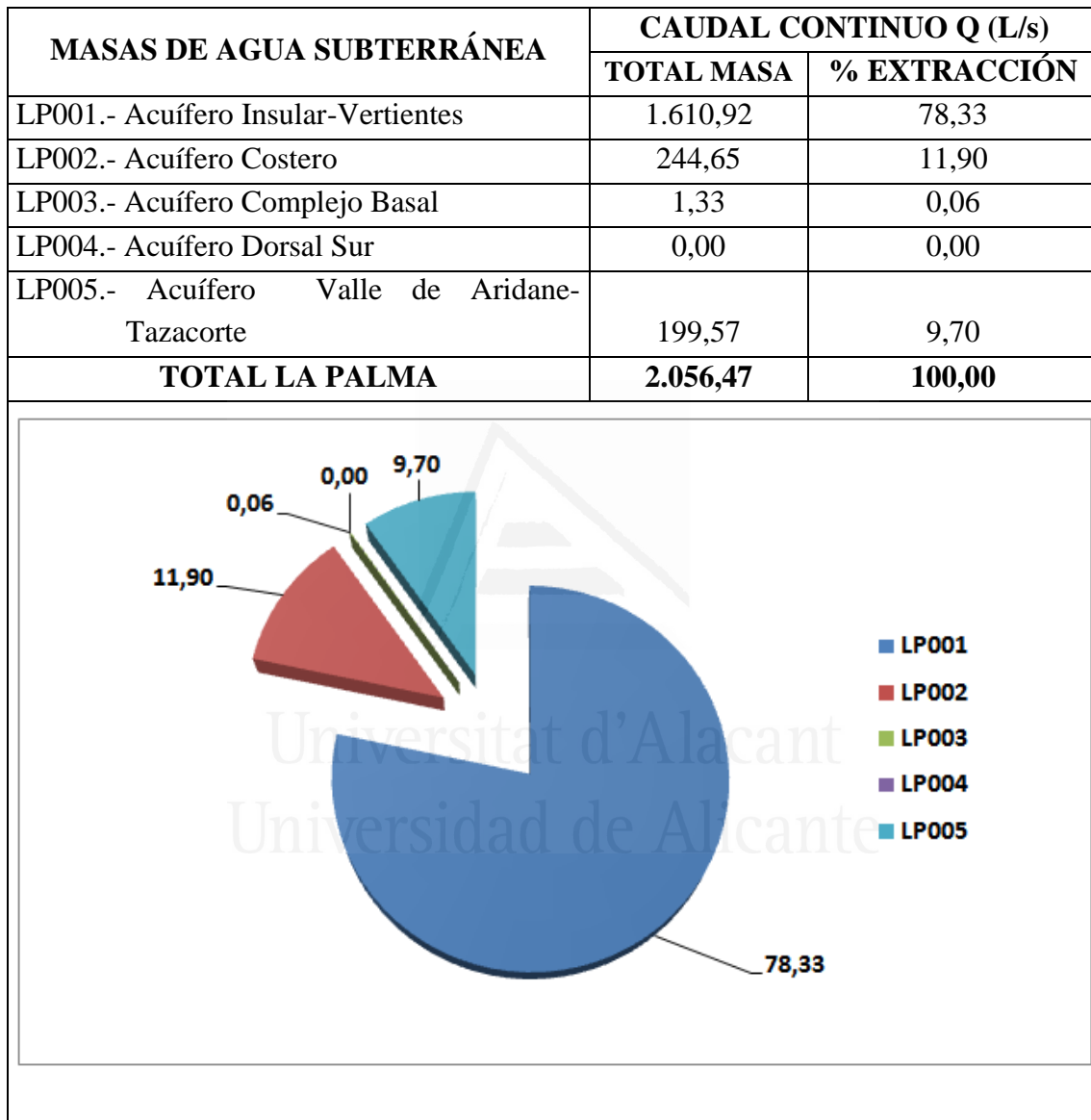


Tabla 22. Distribución de porcentajes de recursos subterráneos extraídos por masa de agua subterránea. Caudales continuos (L/s) (Poncela y Skupien, 2013).





CAPÍTULO 4

Universitat d'Alacant
HIDROQUÍMICA Y CALIDAD DE LAS AGUAS
Universidad de Alicante

CAPÍTULO 4. HIDROQUÍMICA Y CALIDAD DE LAS AGUAS

En este capítulo se trata sobre la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas de La Palma, la cual es indicativa de la influencia de la recarga natural así como de la interacción agua-roca en función del tiempo de residencia y de los procesos físico-químicos que pueden producir alteraciones.

Asimismo, se identifica el fondo hidroquímico por masas de aguas subterránea de acuerdo con los requerimientos derivados y actualizados de la Directiva Marco del Agua (2000/60/C), definiendo las principales facies hidroquímicas a partir de las técnicas hidrogeoquímicas de uso común en hidrología subterránea.

Finalmente, se realiza una descripción de las aguas minerales, mineromedicinales y termales de La Palma, con énfasis en la captación denominada "Fuente Santa", aplicando técnicas geotermométricas dentro del contexto hidrogeológico geotermal de la zona sur, activa desde el punto de vista volcánico, y con presencia e influencia de CO₂ en las aguas subterráneas locales.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.1. ANÁLISIS HISTÓRICO

Al igual que lo planteado para la hidrogeología, desde el punto de vista hidroquímico, se integra la planificación y la investigación, tanto pública como aplicada para estudios y proyectos, destacando como documentación de referencia: CIHS (1988); ITGE (1992, 1993); APHP (1992, 2012); Muñoz et al., (1997, 1998); Poncela (1997, 2005a, 2005b, 2008 y 2009); PHP (2001); IGME (2003); DGIE (2003); Martínez y García (2003); FCCA (2004); DGA (2006); Skupien y Poncela (2006, 2007b, 2011, 2013a); DGI (2008); Poncela y Skupien (2008, 2009, 2011, 2013); Skupien et al. (2008, 2012); CIAP (2009) y Poncela et al. (2012, 2015a).

La información hidroquímica general es importante pero muchas veces es parcial, por lo que su utilidad desde el punto de vista hidroquímico es más limitada. No obstante, se puede caracterizar el sistema acuífero volcánico de una manera precisa, todo ello concretado en los requerimientos que la DMA ha exigido para la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Poncela y Skupien, 2013).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.2. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Tal y como se indicaba en el Apartado 3.4.1, el Consejo Insular de Aguas de La Palma estableció, con carácter preliminar, y para cumplimentar lo dispuesto en los citados artículos 4 y 5 de DMA, cinco masas de aguas subterráneas (Poncela, 2005a).

En diciembre de 2006, se presentó el Programa de Control de las Aguas Subterráneas - Directiva Marco del Agua para La Palma (Skupien y Poncela, 2006), basado en las masas de aguas subterráneas definidas.

En marzo de 2007, el CIAP desarrolló la implementación de la red de control basada en la caracterización hidroquímica e isotópica ambiental de las masas de agua subterránea (Skupien y Poncela, 2007b), cuya operatividad se ha intentado mantener hasta el presente.

Durante los años 2008, 2010 y 2012 el CIAP ha realizado muestreos completos físico-químicos para la determinación de los principales parámetros de referencia, de acuerdo con los requerimientos de la DMA.

4.2.1. Observaciones sobre la hidroquímica de fondo

En la Isla de La Palma se destaca la existencia de una mineralización natural que caracteriza un fondo hidroquímico con valores algo elevados de algunos parámetros. Ello es debido principalmente a:

- Presencia de CO₂ de origen volcánico activo: Especialmente relevante en el Edificio Dorsal Sur (mitad meridional de La Palma). Su principal manifestación es en forma de un alto contenido de bicarbonatos.
- Presencia de otros elementos en concentraciones apreciables (hierro, sílice, etc.).
- Tiempos de tránsito moderados para sistemas de flujo profundos que permiten un mayor tiempo de interacción agua-roca, con la consiguiente mineralización asociada.
- Aridificación de la recarga, lo que crea una marca climática en el agua de recarga. Ello es relevante en las vertientes meridionales y a sotavento.

En general, las aguas del sistema acuífero de vertientes drenadas por galerías son de buena calidad, aunque variable, y se constituyen en principal suministro insular para abasto y agricultura. Existe, además, una importante zona no saturada, de espesor variable de cumbres a mar y de norte a sur, que actúa de filtro natural.

La franja costera está muy influenciada por las actividades antrópicas ligadas fundamentalmente a la agricultura, dada su favorable situación geomorfológica en algunos puntos. Esto favorece incipientes procesos de intrusión marina o salinización y contaminación por nitratos, especialmente

contrastables en condiciones desfavorables en el Valle de Aridane, y menos importantes en Santa Cruz de La Palma-Las Breñas, Puntallana y San Andrés y Sauces.

4.2.2. Definiciones para la caracterización del estado químico

Para la caracterización de los valores de referencia se ha tomado en consideración el documento D18: "Final proposal for a methodology to set up groundwater threshold values in Europe), basada en la metodología del "Proyecto BRIDGE (Background cRiteria for the IDentification of Groundwater thrEsholds)" (BRIDGE, 2006).

Como punto de partida, se definen algunos conceptos necesarios para la comprensión y caracterización de dichos valores, a saber:

- **Nivel de referencia (NR):** la concentración de una sustancia o el valor de un indicador en una masa de agua subterránea correspondiente a condiciones no sometidas a alteraciones antropogénicas o sometidas a alteraciones mínimas en relación con condiciones inalteradas. Es la traducción del "Natural Background Level", y sería el equivalente al "Nivel de Fondo" o "Fondo Natural", usado indistintamente en la literatura.
- **Valor criterio (VC):** Es la concentración de un contaminante, sin tomar en consideración concentraciones naturales de referencia, que, en caso de que sea superada, puede resultar en el incumplimiento del respectivo criterio de buen estado. Como su propia definición refleja, no tiene en cuenta los niveles de referencia naturales. Serán valores fijados por normas de calidad medioambiental específicas y cuantificados como concentraciones máximas admisibles (CMA), valores medios anuales (MA), etc.
- **Valor umbral (VU):** una norma de calidad de las aguas subterráneas fijada de conformidad con los criterios regulados en el artículo 3. de la DAS. Serán valores que, teniendo en cuenta los niveles de referencia naturales, se obtengan a partir de los valores criterio, basados en normas medioambientales. En ocasiones se utilizan otras definiciones como valor límite, valor de cumplimiento, nivel básico, etc..
- **Valor paramétrico adoptado (VPA):** la concentración de una sustancia o el valor de un indicador en una masa de agua subterránea que, partiendo de los valores de referencia o de una norma de calidad de las aguas subterráneas fijada de conformidad con los criterios regulados en el artículo 3. de la DAS, se ha adaptado a la Demarcación Hidrográfica de La Palma basado en los valores anteriores.

Para el establecimiento de niveles de referencia se ha procedido a la valoración y análisis de información hidroquímica seleccionada por masas de agua subterránea, hallando el intervalo de variación mínimo-máximo y el promedio de los resultados para cada parámetro de la lista, de manera que se ha definido el "fondo natural" de acuerdo con el quimismo proporcionado por los iones mayoritarios.

Como valor umbral está fijado por la directiva el de los plaguicidas y el del nitrato. Para la Demarcación Hidrográfica de La Palma se ha aplicado para estos valores y para los críticos el término de Valor Paramétrico Adoptado (VPA).

En el caso de que los niveles de referencia naturales de las aguas subterráneas excedan o igualen a los valores criterio establecidos, el valor umbral será igual al nivel de referencia; en este caso al VPA, es decir, VU o VC \equiv VPA.

En el caso de que los niveles de referencia naturales de las aguas subterráneas sea menor que el más restrictivo de los valores criterio establecidos por la legislación, es habitual considerar la media aritmética de los valores; no obstante, se ha preferido también en este caso utilizar el VPA. En el caso de los iones bicarbonato, calcio y magnesio se ha optado por no fijar ningún VPA.

Como criterio de alerta se ha establecido el valor del 75 % del VPA de cada parámetro, equiparable al estándar de calidad definido en la DMA (Poncela y Skupien, 2013), valor a partir del cual hay que aplicar las medidas correctoras para conseguir mantener el buen estado químico de la masa de agua subterránea.

Con este criterio, unido al conocimiento del sistema acuífero insular, se ha procedido al análisis pormenorizado para cada una de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica de La Palma.

4.2.3. Caracterización hidroquímica por masas

4.2.3.1. Masa LP001: Acuífero Insular - Vertientes

La Masa LP001 se constituye como el principal reservorio insular. Los principales parámetros de control cumplen con los valores paramétricos establecidos.

Las aguas subterráneas de esta masa se corresponden con aguas tipo:

- Bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.
- Bicarbonatadas sódicas.

Son de baja mineralización y muy apreciadas para ser declaradas como agua mineral natural. Por ello, y de acuerdo con la información hidroquímica de base, revisada y filtrada para considerar las analíticas con menor error (< 20 %) se tiene que los intervalos de variación para los distintos parámetros analizados se resumen en la Tabla 23 (adaptado de Poncela y Skupien, 2013) y Figura 37.

El número de muestras representativas después del análisis y filtrado con fiabilidad analítica superior al 80 % ha sido de 15.

Tabla 23. Intervalo de los valores de los parámetros físico-químicos seleccionados en las aguas subterráneas de las captaciones de la red de control en la masa de agua subterránea LP001 y VPA (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

Parámetro FQ o Índice	Intervalo de valores observados				VPA	Alerta 0,75*VPA
	(N*)	Min	Max	Medio		
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	(15)	80	577	229	1.500	1.125
Índice SAR	(15)	0,66	2,05	1,20	0 -12	---
pH	(8)	6,74	7,90	7,33	6,5 - 8,4	---
Bicarbonato HCO_3^- (mg/L)	(15)	6,10	278,80	106,07	---	---
Cloruro Cl^- (mg/L)	(15)	4,40	42,50	12,15	250	187,5
Sulfato $\text{SO}_4^{=}$ (mg/L)	(15)	1,20	142,50	12,82	250	187,5
Nitrato NO_3^- (mg/L)	(15)	1,00	18,80	4,70	50	37,5
Sodio Na^+ (mg/L)	(15)	8,10	49,90	19,59	200	150
Calcio Ca^{++} (mg/L)	(15)	1,00	50,40	9,71	---	---
Magnesio Mg^{++} (mg/L)	(15)	1,30	28,60	10,77	---	---
Amonio (mg/L)	(15)	0,06	0,10	0,09	0,50	0,375
Arsénico ($\mu\text{g/L}$)	(13)	< 2	< 10	< 6	10	7,5
Cadmio ($\mu\text{g/L}$)	(5)	< 1	< 5	< 3	5	3,75
Plomo ($\mu\text{g/L}$)	(5)	< 5	< 10	< 7,5	10	7,5
Mercurio ($\mu\text{g/L}$)	(5)	< 0,2	< 0,5	< 0,35	1	0,75
Tricloroeteno + Tetracloroeteno ($\mu\text{g/L}$)	(5)	< 2	< 4	< 3	10	7,5
Total plaguicidas ($\mu\text{g/L}$)	(5)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,50	0,375
Aldrín ($\mu\text{g/L}$)	(5)	< 0,01	< 0,03	< 0,02	0,03	0,023
Dieldrín ($\mu\text{g/L}$)	(5)	< 0,01	< 0,03	< 0,02	0,03	0,023
Heptacloro ($\mu\text{g/L}$)	(5)	< 0,01	< 0,03	< 0,02	0,03	0,023
Heptacloro epóxido ($\mu\text{g/L}$)	(5)	< 0,01	< 0,03	< 0,02	0,03	0,023

(*) (N): número de muestras representativas.

(**) S/D: sin dato (no medido o en estudio del CIAP).

[N°]: número de muestras que exceden el VPA.

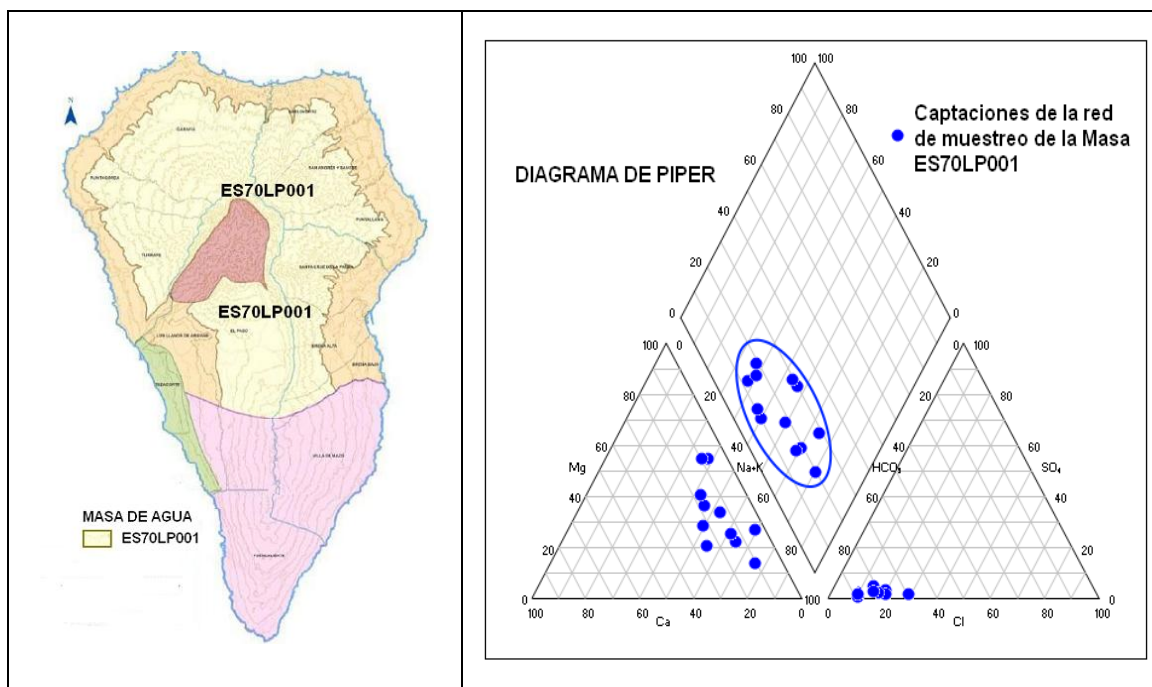


Figura 37. Diagrama de Piper de la masa de agua subterránea LP001 (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

4.2.3.2. Masa LP002: Acuífero Costero

La Masa LP002 se constituye como la prolongación al mar de la masa LP001, siendo el criterio de gestión de los pozos (< cota 600 msnm) el que la define.

Las aguas subterráneas de esta masa se corresponden con aguas tipo:

- Bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.
- Bicarbonatadas sódicas.
- Sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas.
- Cloruradas y/o sulfatadas sódicas.

La dispersión de las tipologías se produce como consecuencia de la distancia de las captaciones a la costa, así como del diferente régimen de bombeo establecido para cada una de ellas.

Por ello, y de acuerdo con la información hidroquímica de base, revisada y filtrada para considerar las analíticas con menor error (< 20 %) se tiene que los intervalos de variación para los distintos parámetros analizados se resumen en la Tabla 24 y Figura 38.

El número de muestras representativas después del análisis y filtrado con fiabilidad analítica superior al 80 % ha sido de 13.

En el caso del ión nitrato, existen varias captaciones que no cumplen con el VPA < 50 mg/L, siendo especialmente relevante en el Valle de Aridane. También pudiera existir cierta influencia orgánica como consecuencia de la presencia de zonas con deficiente saneamiento.

Tradicionalmente se ha citado que esta zona costera presenta intrusión marina pero, de acuerdo con los datos disponibles y no descartando la presencia o posibilidad de desarrollo incipiente de procesos característicos de intrusión marina, no parece razonable mantener este criterio, dado que lo que existe es una cierta salinización.

Unido con lo anterior, se destaca también que la mayoría de pozos en esta zona son de tipo canario, generalmente de unos 3 m de diámetro y con presencia de galería de fondo para un mayor aporte de agua dulce. Este hecho favorece la minimización de procesos de intrusión marina. Además, el coste energético de bombeo hace que las captaciones no alumbren en continuo, favoreciendo la recuperación de niveles y calidad; incluso algunas han sido "abandonadas" por su alto coste de mantenimiento.

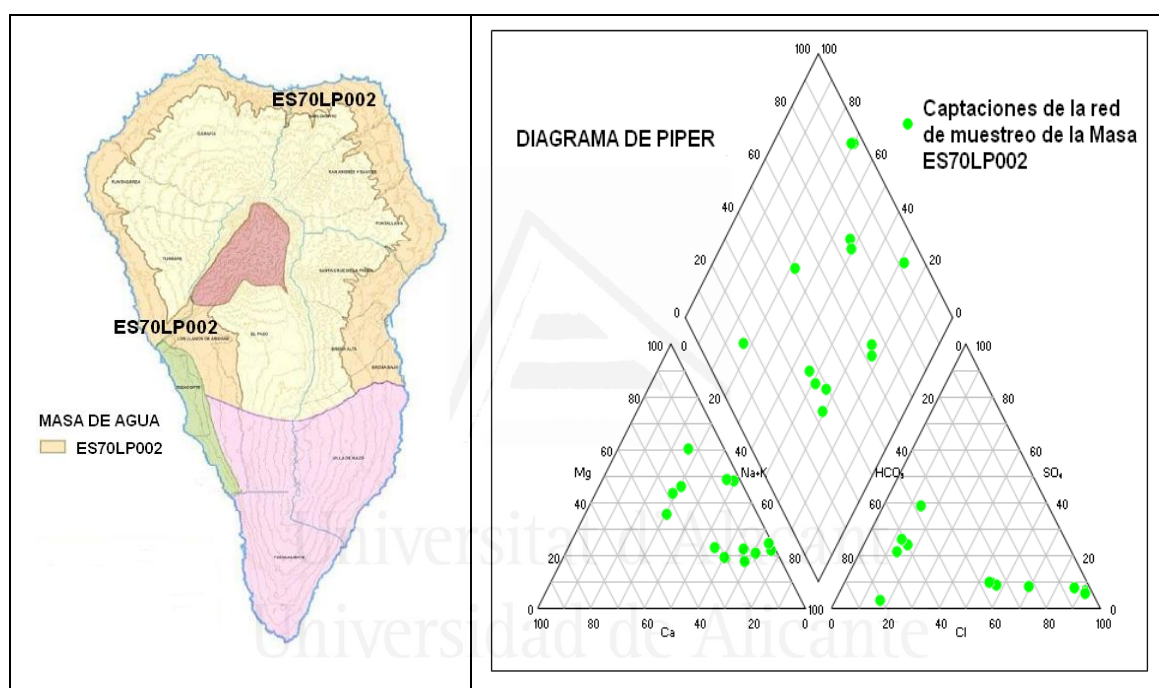


Figura 38. Diagrama de Piper de la masa de agua subterránea LP002 (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

Tabla 24. Intervalo de los valores de los parámetros físico-químicos seleccionados en las aguas subterráneas de las captaciones de la red de control en la masa de agua subterránea LP002 y VPA (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

Parámetro FQ o Índice	Intervalo de valores observados				VPA	Alerta 0,75*VPA
	(N*)	Min	Max	Medio		
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	(13)	269	1.652	830	2.500	1.875
Índice SAR	(13)	0,80	7,31	3,19	0 -12	---
pH	(9)	7,20	8,10	7,65	6,5 - 8,4	---
Bicarbonato HCO_3^- (mg/L)	(13)	7,93	455,90	191,76	---	---
Cloruro Cl^- (mg/L)	(13)	30,80	489,9	114,19	600	450
Sulfato $\text{SO}_4^{=}$ (mg/L)	(13)	13,20	142,70	65,24	250	187,5
Nitrato NO_3^- (mg/L)	(13)	2,70	117,0[4]	37,82	50	37,5
Sodio Na^+ (mg/L)	(13)	26,20	265,6[1]	99,99	200	150
Calcio Ca^{++} (mg/L)	(13)	1,90	56,20	28,41	---	---
Magnesio Mg^{++} (mg/L)	(13)	6,50	50,10	28,22	---	---
Amonio (mg/L)	(13)	0,10	0,50	0,13	0,50	0,375
Arsénico ($\mu\text{g/L}$)	(1)	< 2	< 2	< 2	10	7,5
Cadmio ($\mu\text{g/L}$)	S/D**	---	---	---	5	3,75
Plomo ($\mu\text{g/L}$)	S/D**	---	---	---	10	7,5
Mercurio ($\mu\text{g/L}$)	S/D**	---	---	---	1	0,75
Tricloroeteno + Tetracloroeteno ($\mu\text{g/L}$)	S/D**	---	---	---	10	7,5
Total plaguicidas ($\mu\text{g/L}$)	S/D**	---	---	---	0,50	0,375
Aldrín ($\mu\text{g/L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Dieldrín ($\mu\text{g/L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Heptacloro ($\mu\text{g/L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Heptacloro epóxido ($\mu\text{g/L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023

(*) (N): número de muestras representativas.

(**) S/D: sin dato (no medido o en estudio del CIAP).

[N°]: número de muestras que exceden el VPA.

4.2.3.3. Masa LP003: Acuífero Complejo Basal

La Masa LP003 está directamente relacionada con los materiales del Complejo Basal, tanto rocas plutónicas como lavas submarinas, que constituyen el basamento del edificio insular y, tradicionalmente, el "zócalo impermeable", si bien localmente fluye agua en su interior como consecuencia de discontinuidades que favorecen una cierta permeabilidad secundaria por fisuración.

Hay que indicar, no obstante, que las posibilidades acuíferas de esta masa son escasas, aunque existe termalismo residual activo que provoca una cierta mineralización natural, que constituye el fondo regional. Los valores medidos responden a mineralización natural, en una zona con importante protección ambiental, por lo que es el propio fondo hidroquímico natural el que determina alguno de los valores criterio o VPA, tal es el caso de la conductividad eléctrica, que se fija en 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y los sulfatos en 500 mg/L, valores estos superiores a los VPA generales establecidos para el resto de masas de agua subterránea.

Las aguas subterráneas de esta masa se corresponden con aguas tipo:

- Bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas. próximas al tipo sulfatadas.

Por ello, y de acuerdo con la información hidroquímica de base, revisada y filtrada para considerar las analíticas con menor error (< 20 %) se tiene que los intervalos de variación para los distintos parámetros analizados se resumen en la Tabla 25 y Figura 39.

El número de muestras representativas ha sido solo de una, por lo que es los resultados hay que tomarlos con precaución.

Asimismo, puede que alguna captación penetre en el entorno de este Complejo Basal, relacionada con las lavas suprayacentes de la serie del Taburiente y del Bejenado, no descartando, entonces, variaciones en el quimismo.

Tabla 25. Intervalo de los valores de los parámetros físico-químicos seleccionados en las aguas subterráneas de las captaciones de la red de control en la masa de agua subterránea LP003 y VPA (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

Parámetro FQ o Índice	Intervalo de valores observados				VPA	Alerta 0,75*VPA
	(N*)	Min	Max	Medio		
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	(1)	---	---	2.890	4.000	3.000
Índice SAR	(1)	---	---	0,50	0 -12	---
pH	(1)	---	---	6,32	6,5 - 8,4	---
Bicarbonato HCO_3^- (mg/L)	(1)	---	---	930,90	---	---
Cloruro Cl^- (mg/L)	(1)	---	---	124,08	250	187,5
Sulfato SO_4^{2-} (mg/L)	(1)	---	---	430,50	500	375
Nitrato NO_3^- (mg/L)	(1)	---	---	5,00	50	37,5
Sodio Na^+ (mg/L)	(1)	---	---	49,10	200	150
Calcio Ca^{++} (mg/L)	(1)	---	---	372,00	---	---
Magnesio Mg^{++} (mg/L)	(1)	---	---	211,40	---	---
Amonio (mg/L)	(1)	---	---	0,45	0,50	0,375
Arsénico ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	10	7,5
Cadmio ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	5	3,75
Plomo ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	10	7,5
Mercurio ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	1	0,75
Tricloroeteno + Tetracloroeteno ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	10	7,5
Total plaguicidas ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,50	0,375
Aldrín ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Dieldrín ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Heptacloro ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Heptacloro epóxido ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023

(*) (N): número de muestras representativas.

(**) S/D: sin dato (no medido o en estudio del CIAP).

[N°]: número de muestras que exceden el VPA.

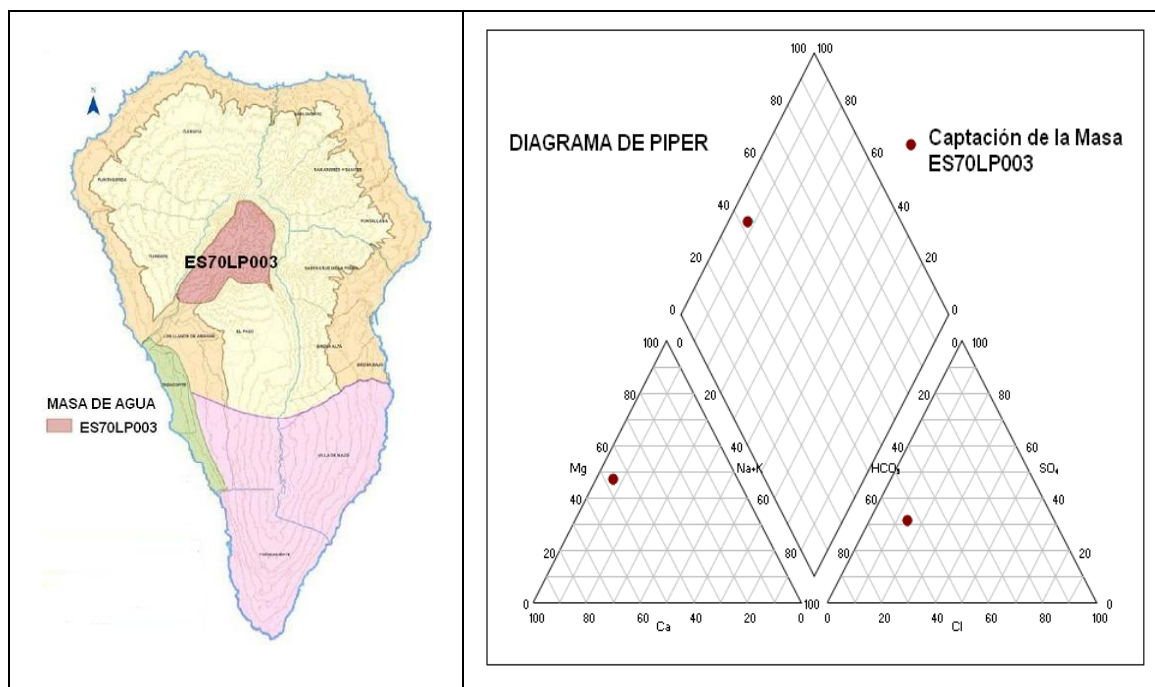


Figura 39. Diagrama de Piper de la masa de agua subterránea LP003 (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

4.2.3.4. Masa LP004: Acuífero Dorsal Sur

La Masa LP004 está directamente relacionada con el acuífero asociado al volcanismo remanente de la zona meridional de La Palma, caracterizado por la presencia de CO_2 de origen volcánico, que hace que las aguas del macizo sean principalmente bicarbonatadas. No obstante, existen muy pocos puntos de control y, por lo que se deduce, representan aspectos diferenciados dentro de la masa.

En este sentido, la Fuente Santa se corresponde con un manantial de descarga costero geotermal, asociado al volcanismo activo, con unas características singulares en cuanto a su composición que identifican sus aguas como carbogaseosas (influencia del CO_2 volcánico) y cloruradas (influencia de la zona de mezcla marina), únicas en su género (Poncela y Skupien, 2009; Skupien y Poncela, 2010; Poncela et al., 2012). El otro punto de control se asocia a las aguas de recarga y forma parte de una surgencia en una zona recreativa.

Para una mejor definición del fondo local, se ha partido de unas analíticas antiguas en dos captaciones de la franja occidental (Galería El Remo y Pozo El Delirio), que extraían aguas del macizo, lo que ha permitido una mejor definición del fondo regional en esta masa.

El punto singular de la Fuente Santa ha sido reconocido como agua minero medicinal y termal, y se está preparando para uso balneario, si bien, dadas sus características hidroquímicas específicas, no se ha tenido en consideración para la caracterización de la masa, ya que produciría un sesgo muy importante en las conclusiones.

Las aguas subterráneas de esta masa se corresponden con aguas tipo:

- Bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, próximas al tipo bicarbonatadas sódicas y/o cloruradas (estas como consecuencia del aerosol marino que marca la recarga natural).

Por ello, y de acuerdo con la información hidroquímica de base, revisada y filtrada para considerar las analíticas con menor error (< 20 %) se tiene que los intervalos de variación para los distintos parámetros analizados se resumen en la Tabla 26 y Figura 40.

El número de muestras representativas después del análisis y filtrado con fiabilidad analítica superior al 95 % ha sido de 2, por lo que es los resultados hay que tomarlos con precaución, si bien se hallan muy próximas.

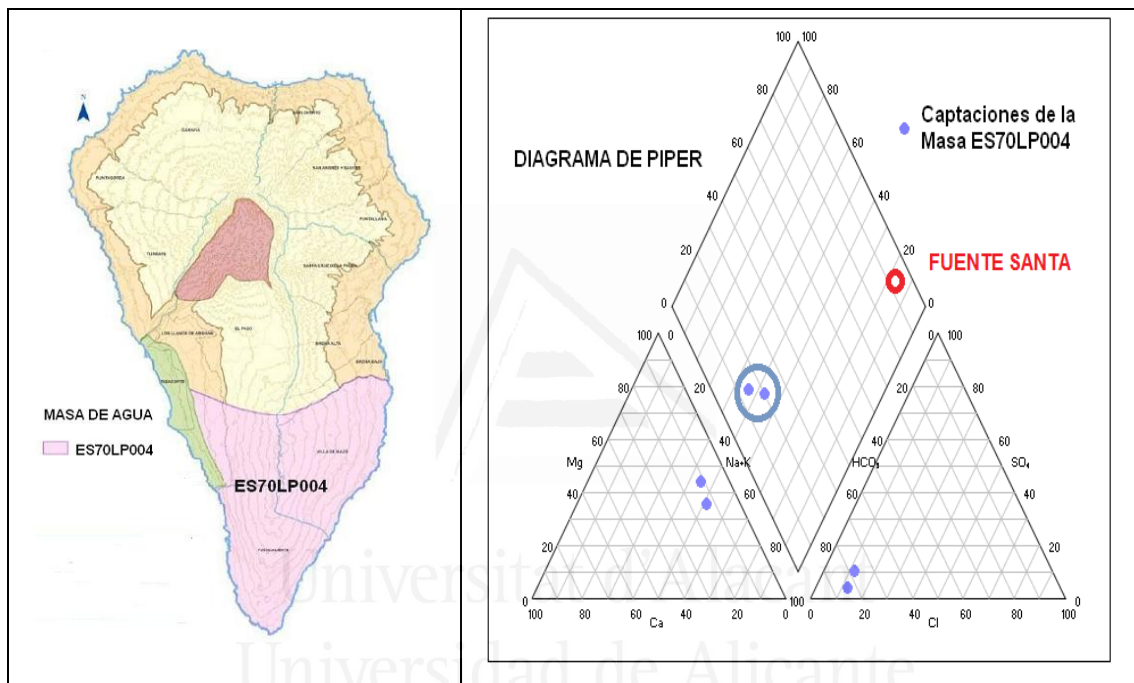


Figura 40. Diagrama de Piper de la masa de agua subterránea LP004 (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

Tabla 26. Intervalo de los valores de los parámetros físico-químicos seleccionados en las aguas subterráneas de las captaciones de la red de control en la masa de agua subterránea LP004 y VPA (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

Parámetro FQ o Índice	Intervalo de valores observados				VPA	Alerta 0,75*VPA
	(N*)	Min	Max	Medio		
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	(2)	698	764	731	2.500	1.875
Índice SAR	(2)	3,62	4,94	4,28	0 -12	---
pH	S/D**	---	---	---	6,5 - 8,4	---
Bicarbonato HCO_3^- (mg/L)	(2)	1.301,0	1.398,0	1.345,0	---	---
Cloruro Cl^- (mg/L)	(2)	104,00	114,00	109,00	600	450
Sulfato SO_4^- (mg/L)	(2)	58,00	150,00	104,00	250	187,5
Nitrato NO_3^- (mg/L)	(2)	1,00	1,00	1,00	50	37,5
Sodio Na^+ (mg/L)	(2)	230,00	300,00	265,00	400	300
Calcio Ca^{++} (mg/L)	(2)	72,00	90,00	81,00	---	---
Magnesio Mg^{++} (mg/L)	(2)	115,00	142,00	128,50	---	---
Amonio (mg/L)	S/D**	---	---	---	0,50	0,375
Arsénico ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	10	7,5
Cadmio ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	5	3,75
Plomo ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	10	7,5
Mercurio ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	1	0,75
Tricloroeteno + Tetracloroeteno ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	10	7,5
Total plaguicidas ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,50	0,375
Aldrín ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Dieldrín ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Heptacloro ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Heptacloro epóxido ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023

(*) (N): número de muestras representativas.

(**) S/D: sin dato (no medido o en estudio del CIAP).

[N°]: número de muestras que exceden el VPA.

4.2.3.5. Masa LP005: Acuífero Valle de Aridane - Tazacorte

La Masa LP005 está definida a partir del Decreto 49/2000, de 10 de abril por el que se determinan las masas de agua afectadas por la contaminación de nitratos de origen agrario y se designan las zonas vulnerables por dicha contaminación (BOC nº 48, de miércoles 19 de abril, páginas 4712-4713), y caracterizada por un contenido en ión nitrato superior a 50 mg/l. Comprende los términos municipales de Los Llanos de Aridane y Tazacorte, por debajo de la cota 300 msnm. En parte constituye la prolongación al mar de la masa LP001 y, por consiguiente, incluye la parte de lo que sería la masa LP002 en la zona de Tazacorte.

La masa se sitúa en una importante zona agrícola y de asentamiento de población.

Tradicionalmente se ha citado que esta zona costera presenta intrusión marina pero, de acuerdo con los datos disponibles y no descartando la presencia o posibilidad de desarrollo de incipientes procesos característicos de intrusión marina, no parece razonable mantener este criterio, dado que lo que existe es una cierta salinización que, además, por el valor de la conductividad medido y el contenido en ión cloruro, que se encuentran por debajo del VPA establecido para esta masa, confirma razonablemente esta afirmación.

Unido con lo anterior, se destaca también que la mayoría de pozos en esta zona son de tipo canario, generalmente de unos 3 m de diámetro y con presencia de galería de fondo para un mayor aporte de agua dulce. Este hecho favorece la minimización de procesos de intrusión marina.

Además, el coste energético de bombeo hace que las captaciones no alumbren en continuo, favoreciendo la recuperación de niveles y calidad; incluso algunas han sido "abandonadas" por su alto coste de mantenimiento.

Por ello, y de acuerdo con los objetivos medioambientales de la DMA, parece razonable afirmar que el riesgo por intrusión marina se puede definir como nulo. Estudios recientes, muestran de que existe evidencia científica de que parte de la salinidad de los pozos del Valle no procede de intrusión sino de procesos de lavado de los sedimentos de "fan delta" existentes (Pérez, 2008).

Las aguas subterráneas de esta masa se corresponden con aguas tipo:

- Bicarbonatadas sódicas, con salinidad variable.

Por ello, y de acuerdo con la información hidroquímica de base, revisada y filtrada para considerar las analíticas con menor error (< 20 %) se tiene que los intervalos de variación para los distintos parámetros analizados se resumen en la Tabla 27 y Figura 41.

El número de muestras representativas después del análisis y filtrado con fiabilidad analítica superior al 95 % ha sido de 3, por lo que es los resultados hay que tomarlos con precaución, si bien se hallan muy próximas.

Tabla 27. Intervalo de los valores de los parámetros físico-químicos seleccionados en las aguas subterráneas de las captaciones de la red de control en la masa de agua subterránea LP005 y VPA (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

Parámetro FQ o Índice	Intervalo de valores observados				VPA	Alerta 0,75*VPA
	(N*)	Min	Max	Medio		
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	(3)	1.171	1.594	1.386	2.500	1.875
Índice SAR	(3)	4,02	4,85	4,48	0 -12	---
pH	(3)	7,10	7,10	7,10	6,5 - 8,4	---
Bicarbonato HCO_3^- (mg/L)	(3)	500,20	567,40	540,13	---	---
Cloruro Cl^- (mg/L)	(3)	35,60	128,40	77,17	650	450
Sulfato $\text{SO}_4^{=}$ (mg/L)	(3)	101,60	119,80	109,10	250	187,5
Nitrato NO_3^- (mg/L)	(3)	51,00[3]	75,00[3]	59,67[3]	50	37,5
Sodio Na^+ (mg/L)	(3)	162,40	195,50	174,17	200	150
Calcio Ca^{++} (mg/L)	(3)	27,10	43,60	37,83	---	---
Magnesio Mg^{++} (mg/L)	(3)	43,10	48,80	46,77	---	---
Amonio (mg/L)	(3)	0,10	0,10	0,10	0,50	0,375
Arsénico ($\mu\text{g}/\text{L}$)	(5)	< 2	< 2	< 2	10	7,5
Cadmio ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	5	3,75
Plomo ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	10	7,5
Mercurio ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	1	0,75
Tricloroeteno + Tetracloroeteno ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	10	7,5
Total plaguicidas ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,50	0,375
Aldrín ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Dieldrín ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Heptacloro ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023
Heptacloro epóxido ($\mu\text{g}/\text{L}$)	S/D**	---	---	---	0,03	0,023

(*) (N): número de muestras representativas.

(**) S/D: sin dato (no medido o en estudio del CIAP).

[N°]: número de muestras que exceden el VPA.

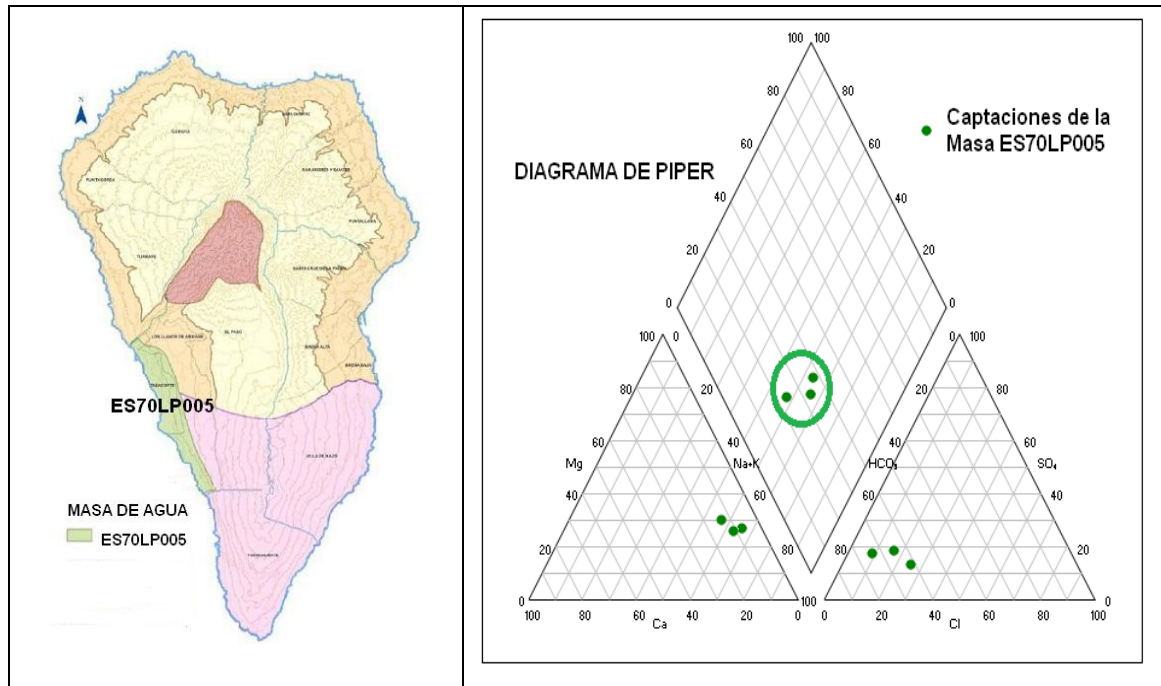


Figura 41. Diagrama de Piper de la masa de agua subterránea LP005 (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

4.2.4. Caracterización hidroquímica insular

Las principales tipologías de las facies hidroquímicas se resumen en la Tabla 28 y Figura 42.

Tabla 28. Principales facies hidroquímicas de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica de La Palma, según los iones dominantes a partir del Diagrama de Piper (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA	FACIES HIDROQUÍMICA
ES70LP001 Ac. Insular-Vertientes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bicarbonatada cálcica y/o magnésica. ▪ Bicarbonatada sódica.
ES70LP002 Ac. Costero	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bicarbonatada cálcica y/o magnésica. ▪ Bicarbonatada sódica. ▪ Sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica. ▪ Clorurada y/o sulfatada sódica.
ES70LP003 Ac. Complejo Basal	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bicarbonatada cálcica y/o magnésica, próxima al tipo sulfatada.
ES70LP004 Ac. Dorsal Sur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bicarbonatada cálcica y/o magnésica, próxima al tipo bicarbonatada sódica y/o clorurada (*).
ES70LP005 Ac. Valle de Aridane-Tzacorte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bicarbonatada sódica, con salinidad variable.

(*) La Fuente Santa, por su singularidad como agua minero medicinal y termal, ligada a un manantial de descarga costero, quedaría englobada en una tipología de agua clorurada y/o sulfatada cálcico-magnésica, como consecuencia de la influencia marina (zona de mezcla agua "dulce" - agua salada).

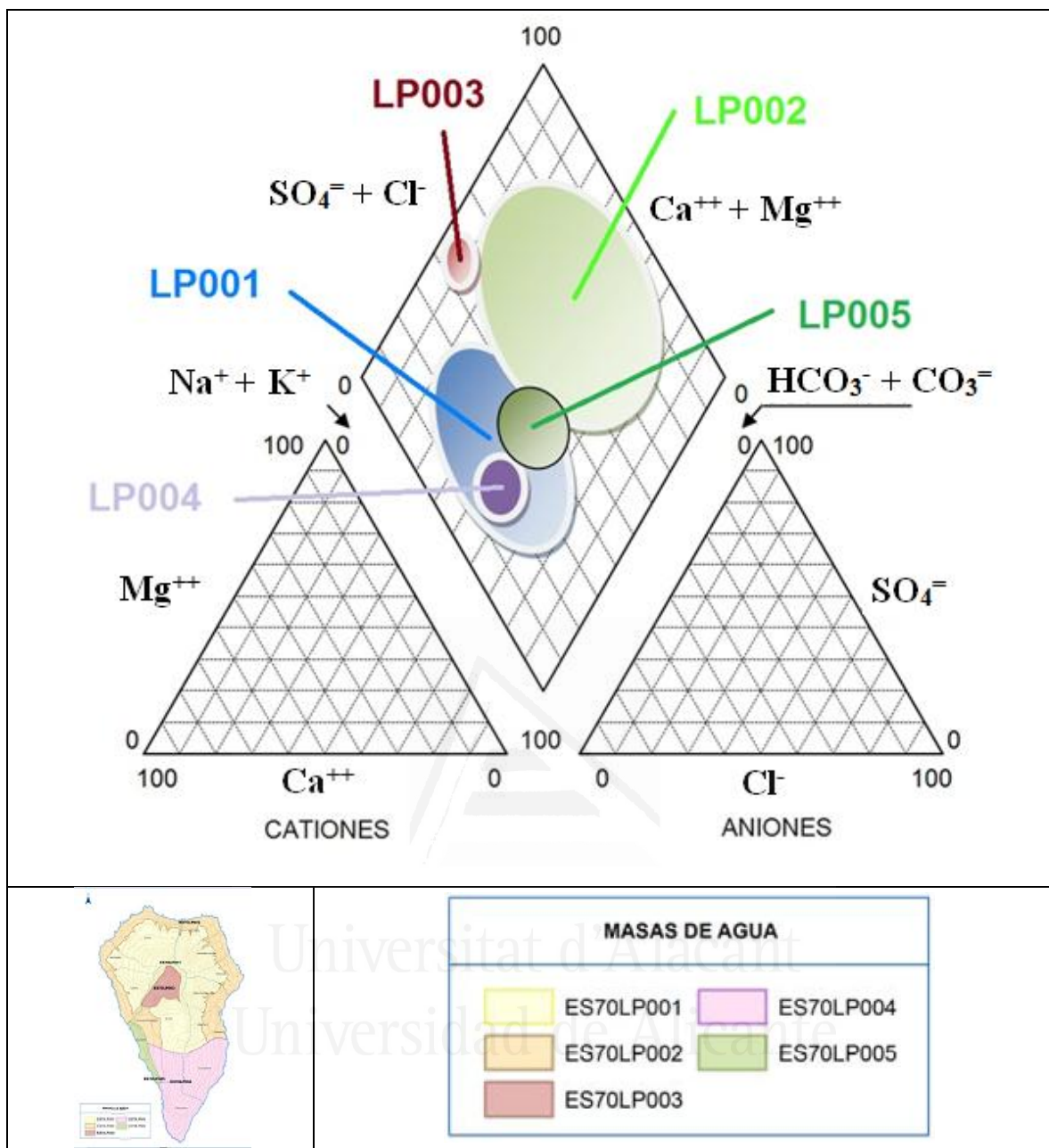


Figura 42. Facies hidroquímicas de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (adaptado de Poncela y Skupien, 2013).

En general, las agrupaciones son bastante características, con una dispersión lógica. El grado de solapamiento entre algunas facies no solo es debido a cuestiones hidrogeológicas e hidroquímicas, sino también a criterios de gestión y planificación hidráulica, que han dado muy buen resultado hasta la fecha.

4.2.5. Presiones e impactos actuales. Estimación de riesgos

4.2.5.1. Presiones e impactos actuales

En cumplimiento del artículo 5 de la DMA, se estudiaron las presiones e impactos de la actividad humana sobre las masas de agua de La Palma y se realizó y caracterizó un registro de las zonas protegidas, todo ello con el fin de caracterizar la Demarcación Hidrográfica de La Palma (Poncela, 2005a; CIAP, 2009).

Una vez identificadas y caracterizadas las masas de agua subterránea, se analizaron las presiones que actuaban sobre ellas y los impactos que éstas producían. A partir de este análisis se evaluó el riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales, para lo que el análisis de presiones e impactos es una de las piezas clave del proceso de planificación en el que se basa la DMA, ya que sirve para determinar qué masas presentan un riesgo de no cumplir los objetivos ambientales en 2015.

En este sentido, se ha procedido a evaluar las presiones brutas asociadas a los usos urbano, turístico, agrícola, ganadero e industrial, resumiéndose para el escenario actual del conjunto de la Isla (Tabla 29 y Figura 43).

Tabla 29. Presiones evaluadas en el escenario actual (APHP, 2012 y 2015; Poncela y Skupien, 2013).

Usos	Vol aguas utilizado (hm ³ /año)	Vol aguas vertidas (hm ³ /año)	DQO (t/año)	DBO ₅ (t/año)	SS (t/año)	N (t/año)	P (t/año)	K (t/año)	Metales pesados (t/año)
Urbano	6,5	4,9	841	545	332	19	5		
Turismo	2,0	1,5	271	175	107	6	2		
Agricultura	49,7					875	383	1.190	
Ganadería	0,1					270	145		
Industria	0,5	0,2	44	120	14	2	1		0,05
TOTAL	58,8	6,6	1.156	840	453	1.172	536	1.190	0,05

El volumen utilizado en los usos abastecimiento urbano, turismo e industria se refiere al volumen facturado frente al volumen distribuido desarrollado, es decir, es el volumen de agua descontando las posibles pérdidas del proceso de distribución a través de las redes.

En la agricultura el consumo representado es el que se utiliza en parcela y en ganadería el consumo se ha estimado por cabeza de ganado. Como se puede observar, la participación del regadío en el consumo de agua es la más relevante, con el 85,4 % del total; le siguen en importancia el abastecimiento urbano con el 11,0 %, y el turismo con el 3,4 %, siendo prácticamente inapreciable el peso de la industria y la ganadería.

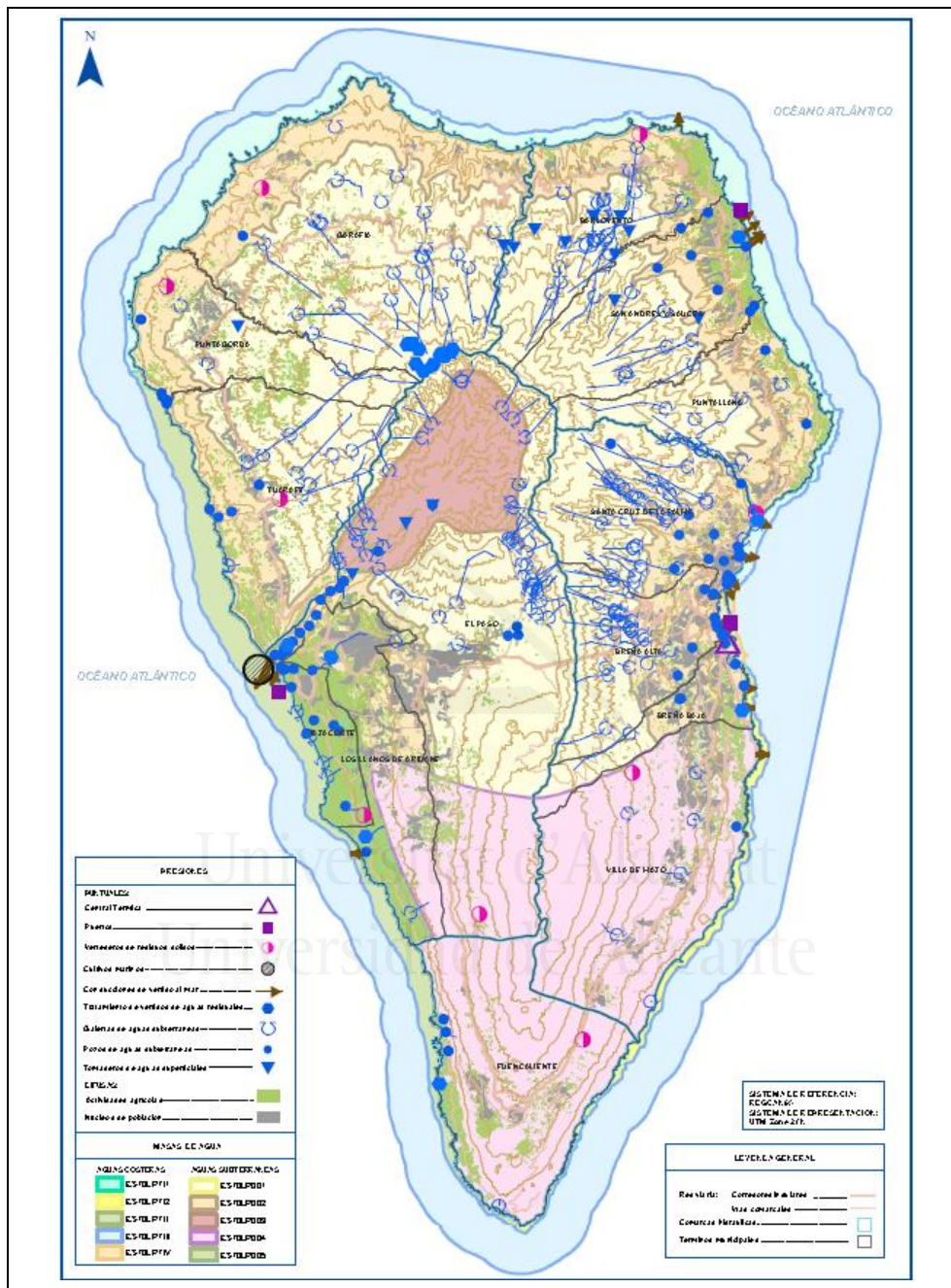


Figura 43. Principales presiones antropogénicas significativas (APHP, 2012 y 2015; Poncela y Skupien, 2013).

4.2.5.2. Estimación del riesgo

Respecto a las masas de aguas subterráneas de la Demarcación Hidrográfica de La Palma, las principales presiones detectadas sobre las mismas son las siguientes:

- **Contaminación difusa.** Básicamente se ha considerado la agricultura, la ganadería y la actividad humana (se ha considerado en riesgo seguro la LP005.- Acuífero del Valle de Aridane-Tazacorte debido principalmente a la agricultura y relacionada con la presencia de nitratos, principalmente de origen agrario).
- **Contaminación puntual.** Fundamentalmente se han considerado los vertidos de aguas residuales urbanas, los vertederos de residuos sólidos urbanos y los vertidos asociados a industrias IPPC (LP002.- Acuífero costero y LP005.- Acuífero del Valle de Aridane-Tazacorte).
- **Intrusión salina.** Se produce en las zonas costeras donde las extracciones excesivas pueden degradar la calidad original del recurso subterráneo. Esta situación se puede presentar en las masas de agua LP002 y LP005 y, en menor medida, en la LP004, si bien como se detalla más adelante, no debe hablarse estrictamente de intrusión salina en su acepción más tradicional.
- **Extracción de agua y recarga.** Su evaluación se ha realizado como porcentaje entre las extracciones mediante obras de captación de aguas subterráneas y la infiltración anual, siendo el umbral del 30 % el valor de referencia para determinar si esta presión es significativa o no (como promedio entre 20 y 40 %). Dado el balance entre entradas y salidas del sistema acuífero insular, se consideró que no había masas de agua subterráneas en riesgo seguro por extracción.

Referente a la intrusión marina, las masas centrales se consideraron en "riesgo nulo" y en "riesgo seguro" la LP002: Acuífero Costero y LP005: Valle de Aridane-Tazacorte. A día de hoy, si bien sigue estudiándose, la actual coyuntura económica ha hecho que parte los pozos hayan disminuido su extracción y, en algunos casos, cesado. Los valores de conductividad históricos no permiten hablar claramente de intrusión (más bien una débil salinización, en general $< 2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$, especialmente en la LP005).

Estudios recientes realizados por Pérez (2008) indican, además, que el sistema acuífero en la LP005 debe parte de su salinidad a los sedimentos del "Time" (depósitos aluviales tipo "fan delta", en tránsito con el antiguo mar). En vista de esta situación y, hasta que no se disponga de estudios más específicos, parece más prudente dejar "como riesgo en estudio" esta presión.

Dado el balance entre entradas y salidas del sistema acuífero insular, se ha considerado que no hay masas de agua subterráneas en riesgo seguro por extracción. La relación entre extracciones actuales e infiltración a nivel insular es de aproximadamente el 25 % (inferior al 30 % umbral).

En las Tablas 30 y 31 se determina la situación actual del riesgo de las masas de agua subterránea. Aunque se sigue en estudio, dicha tabla se diferencia del estudio preliminar en que en la Masa LP005 ha variado el riesgo por intrusión de "riesgo global seguro" a "riesgo en estudio", dado que existe evidencia científica de que parte de la salinidad de los pozos del Valle no procede de intrusión sino de procesos de lavado de los sedimentos de "fan delta" existentes (Pérez, 2008). No obstante, si se fija un criterio o indicador, esta situación puede pasar a "riesgo nulo" (más adelante se detalla esta circunstancia).

Tabla 30. Evaluación actual del riesgo de las masas de agua subterránea (actualizado de Poncela y Skupien, 2013).

Masas de agua subterránea		Masas de agua subterránea en riesgo seguro				
		Químico			Cuantitativo	Riesgo global seguro
Código	Nombre	Puntual	Difuso	Intrusión	Extracción	
ES70LP001	Ac. Insular - Vertientes	---	---	---	---	---
ES70LP002	Ac. Costero	---	---	X	---	X
ES70LP003	Ac. Complejo Basal	---	---	---	---	---
ES70LP004	Ac. Dorsal Sur	---	---	---	---	---
ES70LP005	Ac. Valle Aridane - Tazacorte	---	X	X	---	X
Total		---	1	2	---	2

Tabla 31. Evaluación actual del riesgo de las masas de agua subterránea considerando un valor umbral de 600 mg/L Cl⁻ como indicador de intrusión marina (actualizado de Poncela y Skupien, 2013).

Masas de agua subterránea		Masas de agua subterránea en riesgo seguro				
		Químico			Cuantitativo	Riesgo global seguro
Código	Nombre	Puntual	Difuso	Intrusión	Extracción	
ES70LP001	Ac. Insular - Vertientes	---	---	---	---	---
ES70LP002	Ac. Costero	---	---	---	---	---
ES70LP003	Ac. Complejo Basal	---	---	---	---	---
ES70LP004	Ac. Dorsal Sur	---	---	---	---	---
ES70LP005	Ac. Valle Aridane - Tazacorte	---	X	---	---	X
Total		---	1	---	---	1

Análogamente, en la vertiente oriental, la disminución del caudal de bombeo por parte de los pozos, hace que ese riesgo disminuya y se esté reevaluando.

La Figura 44 muestra la evaluación del riesgo en La Palma. Las masas representadas en color amarillo pueden considerarse a efectos prácticos como de color verde, pues todo apunta a que se está por debajo de los valores paramétricos que impiden el incumplimiento de los objetivos medioambientales, según informaciones recientes del CIAP (APHP, 2015).



Figura 44. Evaluación del riesgo en La Palma (APHP, 2012 y 2015; Poncela y Skupien, 2013).

La Tabla 32 presenta el resumen de riesgos actuales (horizonte 2015) en las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica de La Palma.

Tabla 32. Tipos de riesgos actuales (horizonte 2015) en las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (actualizado de Poncela y Skupien, 2013).

BUEN ESTADO		TIPO DE RIESGO		
		NULO	EN ESTUDIO	SEGURO
Estado cuantitativo	Extracción	5	0	0
	Estado químico			
	Puntual	0	5	0
	Difuso	1	3	1
	Intrusión marina	5	0	0

4.2.6. Valores umbral y de referencia. Valor paramétrico adoptado (VPA)

Para el establecimiento de los criterios de "buen estado de las aguas subterráneas" de acuerdo con los requerimientos establecidos en la DMA y, de acuerdo con la caracterización hidroquímica de las masas de agua subterránea de La Palma, teniendo también en perspectiva el posible uso asociado, se han fijado los criterios de referencia que se presentan en Tabla 33.

Tabla 33. Criterios aplicables para el control, seguimiento y evaluación del buen estado tanto cuantitativo como químico de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (actualizado de Poncela y Skupien, 2013).

Estado M.Ag.Sub	Masas de Aguas Subterráneas de la Demarcación Hidrográfica de La Palma				
	LP001	LP002	LP003	LP004	LP005
Buen estado cuantitativo	Extracción/Recarga < 30%				
Buen estado químico general	VPA	Directiva 2006/118/CE (En general y salvo mineralizaciones naturales, las concentraciones de contaminantes definidos en ellas deben de ser inferiores a los límites establecidos). Ver Tablas específicas para cada masa de agua subterránea			
Buen estado Químico (intrusión marina)	---	[Cl ⁻] ≤ 600 mg/L	---	[Cl ⁻] ≤ 600 mg/L	
Zona vulnerable (*)	---	[NO ₃ ⁻] ≤ 50 mg/L (**)	---	---	[NO ₃ ⁻] ≤ 50 mg/L (**)

(*) RD 49/2000. (**) Directiva 2006/118/CE.

4.2.6.1. Precisiones sobre el criterio de intrusión marina

La intrusión marina se produce siempre en zonas costeras como consecuencia de extracciones excesivas, dañando la calidad original del recurso subterráneo. En La Palma es un fenómeno del que se ha venido realizando un seguimiento a lo largo del tiempo, apuntando a posibles procesos de salinización, si bien las concentraciones detectadas no permiten hablar de claros procesos de intrusión marina.

Los estudios preliminares, de acuerdo con este criterio, han dado como "riesgo seguro" por intrusión marina las masas de agua subterránea (Poncela, 2005a):

- ES70LP002-Acuífero Costero.
- ES70LP005-Acuífero del Valle de Aridane–Tazacorte.

La red de control se basa en los pozos, principalmente pozos canarios, la mayoría con una o más galerías de fondo. En funcionamiento prolongado, las mediciones muestran una tendencia a la salinización, que revierte cuando cesa la extracción. A día de hoy, no obstante, gran parte de los pozos de la vertiente nororiental han cesado su producción por cuestiones económicas, por lo que el acuífero costero se está recuperando; no obstante, en los puntos de bombeo, la salinidad suele aumentar hacia finales del verano, si bien siempre de manera restringida.

En el Valle de Aridane, estudios recientes (Pérez, 2008) demuestran que no toda la salinidad de esta zona es proveniente de procesos de intrusión, una parte proviene del lavado de los sedimentos del antiguo "fan delta", ya de por sí salinizados.

No existe un criterio uniforme en la comunidad científica en cuanto a los límites de actuación, así que, cada Demarcación Hidrográfica establece sus propios criterios. En el caso de la Demarcación Hidrográfica de La Palma se ha utilizado el criterio de mezcla como indicador de intrusión marina, es decir, un agua "dulce" que contenga entre un 2- 3% de agua de mar, hace que aquella presente sabor salado.

El mejor indicador para estos casos es el ión cloruro, puesto que es el más conservativo de todos y, en ausencia de fuentes externas que lo incorporen o procesos que lo detraigan del medio, refleja bastante bien el movimiento del agua.

La expresión que caracteriza la fracción de agua de mar en una mezcla entre una "agua dulce" y una "agua salda" viene definida por la relación entre sus cloruros de acuerdo con la siguiente expresión (Custodio y Llamas, 1983) (Ecuación [21]):

$$Cl_{Muestra} = (1 - X)Cl_{Dulce} + XCl_{Marino} \quad [21]$$

Siendo:

X : La fracción de agua de mar en tanto por uno.

$Cl_{Muestra}$: Concentración de cloruros del agua muestra (en mg/L o meq/L).

Cl_{Dulce} : Concentración de cloruros del agua dulce de referencia (en mg/L o meq/L).

Cl_{Marino} : Concentración de cloruros del agua de mar (en mg/L o meq/L).

De la expresión anterior se deduce fácilmente que la fracción de agua de mar “X” puede expresarse como (Ecuación [22]):

$$X = \frac{Cl_{Muestra} - Cl_{Dulce}}{Cl_{Marino} - Cl_{Dulce}} \quad [22]$$

Si tomamos como referencia las siguientes concentraciones de cloruros: Cl (agua de mar promedio La Palma) = 21.000 mg/L, Cl (acuífero promedio LP002) = 114,19 mg/L Cl (VAP) = 600 mg/L, se tiene que la fracción de agua de mar $X = 0,023 \approx 2,3\%$, dentro del intervalo adoptado como criterio. Valores superiores indican mayores porcentajes de agua de mar en el agua del acuífero. Por consiguiente, es justificable este valor como valor paramétrico adoptado (VPA).

4.3. AGUAS MINERALES, MINEROMEDICINALES Y TERMALES

4.3.1. Aguas minerales

En los últimos años se ha incrementado el interés social y económico por la declaración y explotación de aguas catalogadas como minerales, ya sean de manantial o naturales, mineromedicinales y termales, especialmente en el ámbito de las Islas Canarias (IGME, 1992; Skupien y Poncela, 2011; Skupien et. al., 2013b) y Poncela et. al, 2013 y 2015a.

Su regulación tiene un marco jurídico de referencia basado en dos legislaciones principales:

- Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas (BOE nº 176, de 24 de julio, texto consolidado 14 de Octubre 2014), así como el Real Decreto 285/1978, de 25 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento General para el Régimen de la Minería (BOE nº 295, de 11 de diciembre de 1978, pp: 27847-27940).
- Real Decreto 1798/2010, de 30 de diciembre, por el que se regula la explotación y comercialización de aguas minerales naturales y aguas de manantial envasadas para consumo humano (BOE nº 16, de miércoles 19 de enero de 2011, pp: 6111-6133).

A día de hoy, en La Palma, solo existe una captación con la categoría de "Agua Mineral Natural" (correspondiente a la marca Aguas de La Palma) y que proviene de la galería Barbuzano, con una excelente calidad y baja mineralización.

No obstante, toda la vertiente oriental podría ser declarada como tal dadas sus excepcionales características organolépticas y baja mineralización.

Otros intentos para su declaración se iniciaron con los respectivos estudios pero, a día de hoy, no se ha resuelto el expediente administrativo, a pesar de ser aguas de una calidad excelente, del tipo bicarbonatadas cálcico-magnésicas, de débil mineralización y bajo contenido en sodio (Skupien y Poncela, 2009a, 2009b y 2009c).

4.3.2. Aguas mineromedicinales y termales

La existencia de esta actividad termal, en la zona meridional del Edificio Dorsal Sur o Cumbre Vieja, tuvo su última manifestación insular con la erupción del volcán Teneguía (26 de octubre a 18 de noviembre de 1971), que fue estudiada en su día por el IGME, organismo que concluyó que existía una masa cliente de roca seca bajo un sistema de alta entalpía, caracterizado por una elevada temperatura media en superficie y en sondeos térmicos someros, lo cual permitía pensar en la existencia de zonas con flujo de calor muy elevado situadas entre 0 y 400 m de profundidad (300-350 °C) que se harían continuas a partir de esa profundidad (IGME, 1983 y 1984).

En épocas históricas, especialmente durante la época de la conquista de América, eran famosas las aguas mineromedicinales y termales asociadas a la antigua franja costera de Fuencaliente, donde no

solo acudían los habitantes palmeros sino también ilustres personajes de la corte castellana, así como soldados de rango, para tratarse de sus dolencias.

4.3.2.1. *Hidroquímica y geotermómetros*

Los sistemas termales asociados los acuíferos se caracterizan no solo por su mayor temperatura en relación al contorno, aspecto este utilizado como criterio de termalismo, sino también porque con el aumento de temperatura las aguas subterráneas presentan una mayor capacidad de interacción agua-roca, cuya manifestación primordial suele ser un aumento de la mineralización de dichas aguas, en función de la temperatura del foco termal y su difusión térmica así como de las litologías presentes en el macizo encajante.

En La Palma, la actividad volcánica remanente, especialmente en la franja meridional, presenta las condiciones de foco térmico asociado al desplazamiento de la actividad magmática hacia el sur, favorecidas por la existencia de conductos de emisión y discontinuidades del terreno que permiten la evacuación de gases al exterior, principalmente CO₂ que condicionan, además, la mineralización del acuífero.

Uno de los métodos más utilizados para comprobar la existencia de un reservorio termal es la aplicación de técnicas geotermométricas (Custodio y Llamas, 1983) a partir de analíticas de aguas subterráneas, por lo que los geotermómetros se pueden definir como las relaciones existentes entre el quimismo del agua y su temperatura de origen (en el reservorio). Sólo son válidas si se cumplen las siguientes condiciones:

1. Las reacciones químicas utilizadas para estos geotermómetros deben ser dependientes de la temperatura del acuífero.
2. En el acuífero debe existir la suficiente cantidad de cada uno de los componentes químicos que se utilizan en la reacción dentro de los materiales del acuífero.
3. El equilibrio químico entre el agua caliente y los minerales específicos de la reacción debe tener tiempo suficiente para que se produzca.
4. El posterior desequilibrio producido por presión y temperatura desde el acuífero hasta la surgencia debe ser despreciable (no precipitación).
5. El agua emerge rápidamente a superficie sin dilución ni mezcla de aguas más frías.

Si bien es puede ser discutible que la condición de equilibrio químico sea estricta, en la práctica se puede asumir razonablemente. El resto de condiciones se asumen sin problemas puesto que existe en el acuífero suficiente cantidad de elementos químicos que reaccionan y que son dependientes de la temperatura del acuífero. Asimismo, es desequilibrio final es despreciable cuando no nulo (casi ausencia de precipitaciones o una muy ligera lámina de precipitado discontinuo en superficie, allí donde se manifiesta.

Cada geotermómetro utilizado suele dar un valor diferente de temperatura, siendo conveniente la utilización conjunta de varios para obtener una información más relevante y poder establecer, en su caso, el origen termal de esa agua.

Los principales geotermómetros utilizados en aguas subterráneas, expresados en grados centígrados, son los siguientes (Custodio y Lamas, 1983):

6. De sílice disuelta (Ecuación [23]):

$$T = \left[\frac{1.535,5}{5,768 - \log[\text{SiO}_2]} \right] - 273 \quad [23]$$

Siendo:

$[\text{SiO}_2]$: Concentración en sílice disuelta expresada en mg/L.

7. De relación sodio – potasio ($[\text{Na}^+]/[\text{K}^+]$) (Ecuación [24]):

$$T = \left[\frac{855,6}{\log\left(\frac{[\text{Na}^+]}{[\text{K}^+]}\right) + 0,8573} \right] - 273 \quad [24]$$

Siendo:

$[\text{Na}^+]$: Concentración en sodio disuelto expresada en mg/L.

$[\text{K}^+]$: Concentración en potasio disuelto expresada en mg/L.

8. De relación potasio – magnesio ($[\text{K}^+]/[\text{Mg}^{2+}]$) (Ecuación [25]):

$$T = \left[\frac{4.410,0}{13,95 - \log\left(\frac{[\text{K}^+]}{[\text{Mg}^{2+}]}\right)} \right] - 273 \quad [25]$$

Siendo:

$[\text{K}^+]$: Concentración en potasio disuelto expresada en mg/L.

$[\text{Mg}^{2+}]$: Concentración en magnesio disuelto expresada en mg/L.

9. De relación sodio – litio ($[\text{Na}^+]/[\text{Li}^+]$) (Ecuación [26]):

$$T = \left[\frac{1.000,0}{\log\left(\frac{[\text{Na}^+]}{[\text{Li}^+]}\right) + 0,38} \right] - 273 \quad [26]$$

Siendo:

$[\text{Na}^+]$: Concentración en sodio disuelto expresada en mg/L.

$[\text{Li}^+]$: Concentración en litio disuelto expresada en mg/L.

10. De relación sodio – potasio - calcio ($[\text{Na}] - [\text{K}] - [\text{Ca}]$) (Ecuación [27]):

$$T = \left[\frac{1.647,0}{\log \left(\frac{[Na^+]}{[K^+]} \right) + \beta \sqrt{\frac{[Ca^{2+}]}{[Na^+]}} + 2,24} \right] - 273 \quad [27]$$

Siendo:

$[Na^+]$: Concentración en sodio expresada en mol/L (peso de sustancia entre peso molecular por unidad de volumen).

$[K^+]$: Concentración en potasio expresada en mol/L.

$[Ca^{2+}]$: Concentración en calcio expresada en mol/L.

Con:

$$\beta = \frac{4}{3} \text{ si } \sqrt{\frac{[Ca^{2+}]}{[Na^+]}} > 1 \qquad \beta = \frac{1}{3} \text{ si } \sqrt{\frac{[Ca^{2+}]}{[Na^+]}} < 1$$

$\beta = 0$ no es factible puesto que o bien $[Ca^{2+}]$ es extremadamente baja o $[Na^+]$ es muy alta, o su relación es próxima a cero. En aguas con termalismo estos iones están presentes en la disolución en cantidades contrastables.

4.3.2.2. Aplicación a la Fuente Santa

Este antiguo manantial termal de descarga del acuífero costero, situado en la Playa del Ancón-Echentive, en el T.M. de Fuencaliente o Los Canarios, famoso desde la época de la Corona de Castilla por sus virtudes curativas (Soler, 2008), fue enterrado por la erupción del volcán Fuencaliente (conocido como San Antonio) el 23 de noviembre de 1677. La consejería de Obras Públicas del Gobierno de Canarias financió los trabajos de recuperación que, finalmente, acabaron con la recepción de las obras por parte del Consejo Insular de Aguas de La Palma, organismo competente en su gestión, bajo titularidad del Ayuntamiento de Fuencaliente.

El sistema hidrotermal costero asociado a la galería Fuente Santa se corresponde con un agua clorurado sódica y carbogaseosa, producto de la mezcla de agua marina local y agua subterránea procedente de la descarga del macizo volcánico del Edificio Dorsal Sur, afectada, asimismo, por la influencia de la emisión de CO_2 procedente de la actividad magmática remanente en la zona meridional de La Palma (Poncela y Skupien, 2009; Poncela et al., 2012). Ver Figura 45.

Las surgencias estudiadas, sin rezumes aparentes durante la bajamar, se sitúan en la zona intermareal, por debajo de la actual plataforma lávica ganada al mar con posterioridad a las erupciones históricas recientes (San Antonio y Teneguía, principalmente) y en contacto con el antiguo paleoacantilado (Figura 46). Ello condiciona la existencia de procesos de dispersión hidrodinámica y de difusión en la interfaz agua salada – agua dulce, favorecidos por la existencia de gradientes hidráulicos verticalizados en la zona de descarga del flujo subterráneo del macizo.

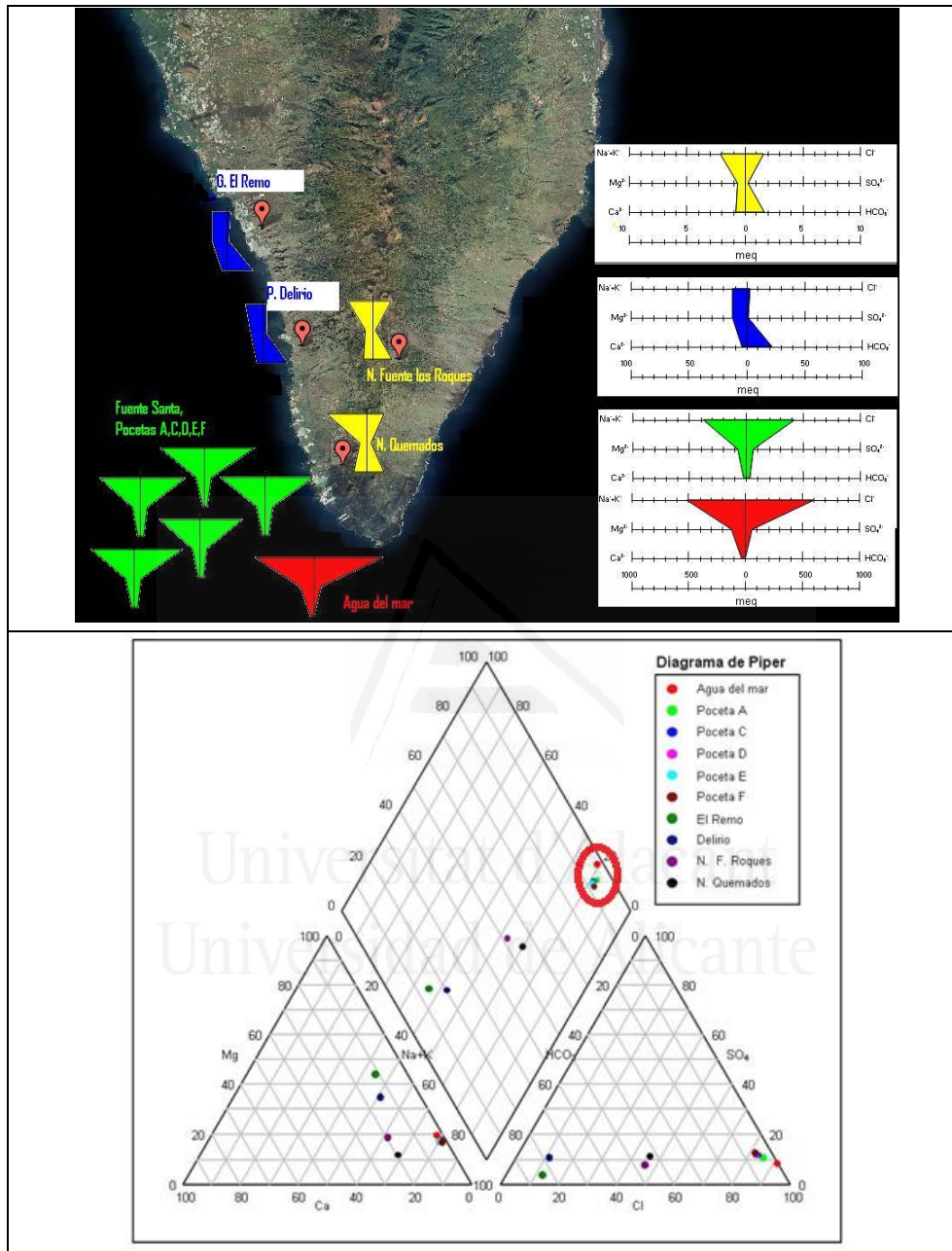


Figura 45. Diagramas de Stiff y de Piper de las aguas alumbradas en el macizo volcánico del Edificio Cumbre Vieja (adaptado de Poncela y Skupien, 2009; 2013).



Figura 46. Surgencias del manantial termal costero de la Fuente Santa (arriba y abajo izquierda: zona de poceta D; abajo derecha: zona de poceta E).

La mezcla calculada permite afirmar, con razonable aproximación, que la fracción de agua de mar en las pocetas varía entre el 56 y el 70 %, presentando una concentración elevada de bromuros procedentes de agua marina.

Las temperaturas medidas han variado según el momento y la carrera de marea pero, en general, en el frente del paleoacantilado, han oscilado entre los 33 y los 41 °C, no descartándose la posibilidad de temperaturas superiores.

Con el fin de comprobar la existencia de un reservorio termal, de influencia directa en la zona de descarga, se ha procedido a la aplicación de técnicas geotermométricas (Custodio y Llamas, 1983) a partir de analíticas realizadas por laboratorio acreditado (Oliver Rodés, S.L.).

En la mayoría de pocetas se produce una pequeña precipitación de carbonato cálcico a modo de película fina superficial discontinua, fácilmente visible. Aun así, dado su “volumen”, puede asumirse despreciable en relación al conjunto.

Todas las pocetas están influenciadas por la zona intermareal que interacciona con el acuífero costero, desarrollándose una amplia zona de dispersión hidrodinámica, favorecida por la temperatura de la surgencia. No obstante, se asumirá una incertidumbre en el valor, la cual será tratada como orden de magnitud que permitirá obtener valiosa información del sistema hidrogeológico termal.

Cada geotermómetro utilizado suele dar un valor diferente de temperatura, siendo conveniente la utilización conjunta de varios para obtener una información más relevante y poder establecer, en su caso, el origen termal de esa agua. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 34 a 37.

Tabla 34. Resultados de la analítica correspondiente a los iones utilizados en los geotermómetros para las aguas subterráneas alumbradas en la Fuente Santa (año 2005).

	Poceta A	Poceta C	Poceta D	Poceta E	Poceta F
[Na]:	8.573,0 mg/l (372,74 mol/l)	8.268,0 mg/l (359,47 mol/l)	8.632,0 mg/l (375,30 mol/l)	7.852,0 mg/l (341,39 mol/l)	7.763,0 mg/l (337,52 mol/l)
[K]:	423,5 mg/l (10,83 mol/l)	476,1 mg/l (12,17 mol/l)	521,7 mg/l (13,34 mol/l)	464,0 mg/l (11,86 mol/l)	446,5 mg/l (11,42 mol/l)
[Ca]:	340,5 mg/l (8,49 mol/l)	388,0 mg/l (9,67 mol/l)	459,4 mg/l (11,45 mol/l)	388,9 mg/l (9,69 mol/l)	310,7 mg/l (7,74 mol/l)
[Mg]:	917,1 mg/l	909,0 mg/l	911,0 mg/l	850,6 mg/l	792,7 mg/l
[Li]:	--	--	--	--	--
[SiO ₂]:	74,1 mg/l	116,0 mg/l	129,0 mg/l	88,0 mg/l	85,9 mg/l

Tabla 35. Resultados de los geotermómetros para las aguas subterráneas alumbradas en la Fuente Santa (año 2005).

Geotermómetro	T (°C) reservorio					Observaciones
	Poceta A	Poceta C	Poceta D	Poceta E	Poceta F	
De sílice disuelta	120,4	141,1	146,3	128,1	127,0	
De relación Na-K	122,5	135,0	139,1	137,2	134,9	
De relación K-Mg	35,7	36,9	37,7	37,3	37,6	Temp. Origen
De relación Na-Li	--	--	--	--	--	
De relación Na-K-Ca	157,4	164,4	166,5	165,6	164,9	

Tabla 36. Resultados de la analítica correspondiente a los iones utilizados en los geotermómetros para las aguas subterráneas alumbradas en la Fuente Santa (noviembre 2008).

	Poceta D	Poceta F	S-0
[Na]:	7.2000,0 mg/l (313,04 mol/l)	4.825,0 mg/l (209,78 mol/l)	1.125,0 mg/l (48,91 mol/l)
[K]:	625,0 mg/l (15,98 mol/l)	587,5 mg/l (15,12 mol/l)	217,5 mg/l (5,56 mol/l)
[Ca]:	220,0 mg/l (10,97 mol/l)	190,0 mg/l (9,47 mol/l)	280,0 mg/l (13,96 mol/l)
[Mg]:	1.074,0 mg/l	829,0 mg/l	722,0 mg/l
[Li]:	--	--	--
[SiO ₂]:	98,4 mg/l	35,4 mg/l	53,9 mg/l

Tabla 37. Resultados de los geotermómetros para las aguas subterráneas alumbradas en la Fuente Santa (año 2005).

Geotermómetro	T (°C) reservorio			Observaciones
	Poceta D	Poceta F	S-0	
De sílice disuelta	133,2	90,5	106,9	
De relación Na-K	172,9	209,9	271,6	
De relación K-Mg	37,9	39,8	31,7	Temp. Origen
De relación Na-Li	--	--	--	
De relación Na-K-Ca	185,2	203,6	216,9	

Según estos datos, el reservorio principal influenciado por el foco térmico podría estar entre 120 y 170 °C, previo a su manifestación en superficie, la cual llega hasta los 42-45 °C, y se tiene constancia de que se ha llegado en sondeos exteriores hasta 52 °C, en las proximidades del macizo.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.4. MINERALIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS POR CO₂ DE ORIGEN VOLCÁNICO

Se sabe desde hace muchos años que toda la zona sur correspondiente al Edificio Cumbre Vieja presenta actividad volcánica activa, manifestada no solo por los episodios eruptivos históricos, principalmente recordados por la erupción del volcán Teneguía, en 1971, sino por la presencia de CO₂ de origen volcánico que emana del subsuelo en forma difusa y, excepcionalmente, en forma concentrada a través de discontinuidades del terreno.

Este fenómeno es frecuente en el volcanismo cuaternario de Canarias, por lo que no es extraño encontrar zonas en las que se producen emanaciones de gases a través de fisuras profundas, que suelen representar escapes del CO₂ atrapado en el seno de las formaciones volcánicas o, que se ha generado en las cámaras magmáticas aún activas o en proceso de enfriamiento.

La influencia más inmediata de estas emanaciones profundas sobre las aguas subterráneas es que el contenido en CO₂ del agua aumente rápidamente (superando en ocasiones las 100 ppm, con pH bajos, incluso por debajo de 4). Todo ello condiciona que el agua sea muy agresiva y que se mineralice con mayor rapidez, aumentando consiguientemente el pH, e incorporándose cationes de la roca en equilibrio de acuerdo con su composición química y mineralógica, apareciendo iones carbonato y bicarbonato (favorecido en ocasiones por la presencia de vapor de agua) (Custodio, 1978).

Asimismo, esas áreas suelen presentar una excelente correlación con zonas de anomalías térmicas más o menos acusadas (IGME, 1983), y aportes menores de otros elementos como pueden ser el azufre, cloro, etc.

Por ello, en zonas volcánicas recientes es importante considerar la contribución del CO₂ magmático residual que se localiza en la porosidad de las formaciones y en el seno de las fisuras existentes, puesto que la consecuencia más directa es el incremento del contenido en bicarbonatos, lo que hace que estas aguas sean prácticamente inutilizables sin tratamiento, y el proceso sea considerado como una erróneamente llamada "contaminación" de origen natural.

Esta problemática no solo se detecta en el alto contenido en bicarbonatos sino también en diversos tramos de galerías situadas en el Arco de Cumbre Nueva y en Cumbre Vieja (Skupien y Poncela, 2013a), lo que contribuye a ser un elemento de riesgo desde el punto de vista de la seguridad de las instalaciones subterráneas.

El caso más notorio es el de la Fuente Santa, donde el dióxido de carbono atraviesa el terreno y se difunde por la atmósfera de la galería, en concentración variable dependiendo de las condiciones meteorológicas externas, y que requiere de ventilación forzada para su inspección, y donde además se disuelve con las aguas subterráneas, contribuyendo así a su carácter carbogaseoso.

También debe tenerse en cuenta que existen tramos de galerías que, o bien no han alumbrado agua, o lo hicieron en el pasado, y a día de hoy su alumbramiento o es nulo o testimonial como consecuencia del drenaje producido. En ocasiones, los sensores de medición de gases marcan la presencia de CO_2 en estos tramos pero su presencia no contribuye o, por lo menos no lo hace significativamente, al conjunto total alumbrado, dándose la paradoja de que esta circunstancia es compatible con aguas de excelente calidad, con baja mineralización, especialmente de bicarbonatos aun siendo estos uno de los componentes mayoritarios.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



CAPÍTULO 5

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ISÓTOPOS AMBIENTALES

CAPÍTULO 5. ISÓTOPOS AMBIENTALES

En este capítulo se trata del uso y aplicación de los isótopos ambientales del agua subterránea como herramienta complementaria a la hidroquímica y la hidrodinámica para la mejora y definición del sistema hidrogeológico.

En particular, la descripción se centra en los isótopos estables del agua subterránea (deuterio y oxígeno-18) a partir del análisis del "efecto altitudinal", lo que permite correlacionar el contenido isotópico (en relación a las desviaciones con respecto al patrón SMOW) con la altura de la zona de recarga (puesto que depende fuertemente de la topografía local), a la vez que se pueden identificar procesos evaporativos en los mecanismos de recarga natural al sistema acuífero, y evaluar las variaciones zonales en exceso de deuterio en relación a la recta meteórica mundial. Para ello, se necesita analizar el contenido isotópico del agua de precipitación a distintas altitudes como mínimo durante más de un año hidrológico, lo que no siempre es factible, por lo que se suele complementar con datos isotópicos de manantiales asociados a pequeñas cuencas de aporte y situados a diferentes altitudes para garantizar la representatividad

También se ha utilizado el tritio como radioisótopo natural de baja energía para el análisis de los sistemas de circulación de flujo subterráneo, así como para la definición de los tiempos de tránsito a través de la zona no saturada y el sistema acuífero volcánico insular, mediante la aplicación e interpretación hidrogeológica de un modelo matemático de mezcla exponencial decreciente.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

5.1. ISÓTOPOS ESTABLES DEL AGUA

5.1.1. Introducción

Los isótopos estables del agua han demostrado ser de gran utilidad para el estudio de numerosos problemas hidrológicos relacionados con las aguas subterráneas (Custodio, 1978; IAEA, 1981 y 1983; Custodio y Llamas, 1983; ITGE, 1993; Skupien, 1998 y 2005; IGME, 2002; Skupien y Poncela, 2008). Los procesos físicos y los fenómenos meteorológicos responsables del transporte del agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico producen una caracterización isotópica del agua que puede ser aprovechada para obtener conclusiones sobre su origen y comportamiento.

Los dos elementos que componen el agua son el hidrógeno y el oxígeno, los cuales, en su estado natural, están formados por la mezcla de sus isótopos:

- Para el hidrógeno: ^1H y ^2H (también conocido como deuterio o D).
- Para el oxígeno: ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O .

El ^1H y el ^{16}O son los isótopos mayoritarios. Por ello, la especie molecular más abundante en la naturaleza es la que corresponde a la fórmula $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ (con una abundancia de 997.680 ppm). Sin embargo, a parte de ésta especie molecular existen otras, aunque se encuentran en porciones muy inferiores.

A pesar de la amplia gama de combinaciones que se pueden encontrar, las únicas que son interesantes en el campo de la hidrogeología, son las especies que tienen incorporado o bien un átomo de D o bien uno de ^{18}O , de la siguiente manera: HDO (molécula que se encuentra en la naturaleza en concentraciones de aproximadamente 320 ppm) y H_2^{18}O (que presenta una abundancia de 2.000 ppm). Las demás combinaciones no interesan por encontrarse prácticamente en cantidades traza.

Al realizar los análisis y estudios de estas moléculas, lo que en realidad interesa conocer es la relación isotópica que guardan entre sí. Esta relación isotópica R se define como el cociente entre el número de moléculas de la especie pesada y de la especie ligera correspondiente a una muestra cualquiera de agua, es decir (Ecuación [28]):

$$R = \frac{\text{N}^\circ \text{ de moléculas del tipo } (^1\text{H}^2\text{H}_2^{16}\text{O}) \text{ ó } (^1\text{H}_2^{18}\text{O})}{\text{N}^\circ \text{ de moléculas del tipo } (^1\text{H}_2^{16}\text{O})} \quad [28]$$

Hay que tener en cuenta que la relación isotópica del agua no permanece constante, sino que se modifica durante su evolución a través del ciclo hidrológico, ya que sufre fraccionamiento isotópico. Para poder expresar de forma homogénea las variaciones de la relación isotópica fue preciso definir una muestra patrón que sirviera de referencia para los distintos laboratorios, y que se denominó "Patrón Medio de Agua de Mar", que en inglés se corresponde con las siglas SMOW

(Standard Mean Ocean Water), y que fue preparado originalmente por H. Craig en 1961 a partir de muestras de aguas de diferentes océanos tomadas a profundidades entre los 200 y 500 m.

Sin embargo, este patrón ya se agotó y el Organismo Internacional de Energía Atómica fue el encargado de reproducirlo. La preparación fue también realizada por H. Craig, mezclando agua destilada del Océano Pacífico con pequeñas cantidades de otros tipos de agua, a fin de obtener la misma composición del SMOW. Este nuevo patrón se denominó V-SMOW (IAEA, 1981).

Las variaciones de la relación isotópica para deuterio y oxígeno 18 se expresan como desviaciones respecto al patrón SMOW por medio de la expresión, en tanto por mil (Ecuación [29]):

$$\delta = \left(\frac{R_{MUESTRA} - R_{SMOW}}{R_{SMOW}} \right) \times 10^3 \quad [29]$$

El valor de δ puede ser positivo o negativo. Un δ positivo significa que la muestra tiene mayor concentración isotópica que el SMOW, y un valor de δ negativo significa que la muestra tiene menor relación isotópica que la del SMOW.

5.1.2. Fraccionamiento isotópico

Como se ha comentado anteriormente, el valor de la desviación δ varía en las aguas meteóricas entre muy amplios límites. Estas oscilaciones se deben a diferentes causas. Entre ellas se encuentra el proceso de fraccionamiento isotópico, producido durante los cambios de estado. Dichos cambios están modificados por las diferencias en la presión de vapor que presenta cada una de las distintas especies moleculares. En un sistema isotérmico se cumple que (Ecuación [30]):

$$p(H_2^{16}O) > p(H_2^{18}O) > p(HDO) \quad [30]$$

La presión de vapor determina la velocidad de evaporación o de condensación del agua. Por tanto, las moléculas ligeras ($^1H_2^{16}O$), que tienen mayor presión del vapor, se evaporan más deprisa y condensan más lentamente que las moléculas pesadas, o sea, que presentan una tendencia mayor a permanecer en la fase vapor durante el cambio de estado. El factor de fraccionamiento que rige este proceso isotérmico se define de la siguiente manera (Ecuación [31]):

$$\alpha = \frac{R_{EN FASE LÍQUIDA}}{R_{EN FASE GASEOSA}} \quad [31]$$

En condiciones de equilibrio entre fases, es decir, cuando la evaporación y la condensación se encuentran en equilibrio, α es equivalente al cociente entre las presiones de vapor de las dos especies consideradas. El valor de α es en este caso siempre mayor que la unidad y aumenta al disminuir la temperatura a la cual se produce el cambio de estado. Cuando el cambio de estado se produce en condiciones de equilibrio, las concentraciones de ^{18}O y D, así como las desviaciones δD y $\delta^{18}O$, se producen de manera lineal, y se relacionan entre sí por la expresión (Ecuación [32]):

$$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O \quad [32]$$

Siendo:

δD : Variación de la relación isotópica del deuterio respecto al patrón SMOW o V-SMOW expresada en tanto por mil.

$\delta^{18}O$: Variación de la relación isotópica del oxígeno-18 respecto al patrón SMOW o V-SMOW expresada en tanto por mil.

Debido al gran volumen de agua presente en el mar, la composición isotópica de éste no se modifica notablemente por efecto de la evaporación. Sin embargo, esto no ocurre cuando se trata de un volumen limitado de agua, tal como un lago, embalse o un cuerpo de agua de menor tamaño. En estos casos, la masa evaporada representa una fracción significativa de la masa total.

Como el proceso tiene lugar en condiciones de no equilibrio, el fraccionamiento isotópico aumenta proporcionalmente en mayor magnitud para el ^{18}O que para el D.

Como consecuencia de lo expuesto, las desviaciones δD y $\delta^{18}O$ de una masa de agua que experimenta evaporación en condiciones de no equilibrio se modifican a lo largo de la recta llamada línea de evaporación, que tiene un coeficiente angular menor de 8 y una ordenada en el origen menor de 10. El coeficiente angular de estas líneas de evaporación suele oscilar en la mayoría de los casos entre 4 y 6.

5.1.3. Composición isotópica de las aguas meteóricas

Con excepción de los casos en que las aguas marinas se encuentran en zonas de reducidas dimensiones, la composición isotópica del agua del mar es muy uniforme, teniendo un valor δ próximo a cero (IAEA, 1981).

Durante el ciclo hidrológico, el transporte del agua de mar hacia los continentes lleva asociado fenómenos de evaporación y condensación, el primero para formar la nube y el segundo para producir la lluvia. Estos fenómenos dan lugar al fraccionamiento isotópico de las especies moleculares existentes en el agua. Al evaporarse el agua de mar para formar la nube, ésta tendrá siempre valores más negativos de δ con respecto a su origen. Como dicho fraccionamiento aumenta al disminuir la temperatura, la nube será tanto más negativa cuando más baja sea la temperatura de evaporación. Como la evaporación se produce en condiciones de no equilibrio, se origina un efecto cinético adicional que hace que la nube y sus precipitaciones no se ajusten a la ecuación de equilibrio $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O$, sino que caigan dentro de una línea que obedece a la siguiente expresión (Ecuación [33]):

$$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \quad [33]$$

Esta expresión se conoce como “Recta Meteórica Mundial”. El valor 10 de esta ecuación representa la ordenada en el origen y se refiere a un exceso de deuterio con respecto a la ecuación 32 (IAEA, 1981).

Dicho exceso de deuterio, representado por la letra d , se calcula de manera general como diferencia entre los valores de desviación isotópica del deuterio y del oxígeno-18 (Ecuación [34]):

$$d = \delta D - 8 \cdot \delta^{18}O \quad [34]$$

Su valor generalmente es de +10 (Ecuación 33), pero puede ser menor en zonas costeras con gran humedad o en islas tropicales, y mayor (incluso hasta +22) como en las zonas áridas del Este Mediterráneo.

La historia del agua también varía cíclicamente entre verano e invierno, provocando que las precipitaciones de la mayor parte de los puntos del globo sean más negativas en invierno que en verano.

La composición isotópica de las precipitaciones puede modificarse también por el intercambio isotópico con el vapor atmosférico previamente existente por debajo de las nubes. Este fenómeno sólo influye durante los momentos iniciales de la precipitación, ya que luego la atmósfera se satura de vapor de igual composición que esta última.

El efecto altitudinal es otro factor muy importante que influye en la composición isotópica de la precipitación. La magnitud de este efecto depende del clima local y de la topografía.

La composición isotópica de las precipitaciones puede modificarse también durante el proceso de infiltración, como consecuencia de una evaporación parcial de la misma. El resultado es que el agua se hace más pesada y los puntos del diagrama que relaciona la ecuación δD y $\delta^{18}O$ caen a la derecha de la línea correspondiente a la ecuación definida por $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$. La evaporación del agua puede producirse por acumulación previa en la superficie o bien una vez que se encuentra en la capa superficial de la zona no saturada.

5.1.4. Relación entre la composición isotópica de las precipitaciones y de las aguas subterráneas

Debido a la existencia de gran número de factores, comentados anteriormente, que provocan las variaciones de los parámetros δD y $\delta^{18}O$ en las precipitaciones, no es posible calcular cuantitativamente la composición isotópica de las precipitaciones individuales. Sin embargo, dado el carácter cíclico de los parámetros meteorológicos, las precipitaciones medias de un determinado lugar, resultantes del tratamiento estadístico, tienen valores característicos, de forma que, si se consideran periodos de tiempo de varios años, los valores de δD y $\delta^{18}O$ se mantienen bastante constantes, salvo situaciones muy excepcionales.

Por otra parte, las aguas subterráneas de origen meteórico tienen, en la mayor parte de los casos, composiciones isotópicas similares a las de las precipitaciones medias locales ponderadas, debido al carácter integrador de los acuíferos, aunque la correlación no sea perfecta, ya que la composición isotópica puede modificarse durante el proceso de recarga, y también por el intercambio isotópico que pueda existir en el acuífero (Custodio, 1989b).

En La Palma no existen mediciones directas de la composición isotópica de las aguas de lluvia, exceptuando trabajos del IGME (ITGE, 1993), si bien en otras islas del archipiélago existe escasa información (Gonfiantini, 1973 y 1974; SPA-15, 1975; Sosa et. al., 2011).

De acuerdo con los trabajos de Gonfiantini et al. (1976), se define para Gran Canaria una recta meteórica local definida por: $\delta D = 7,35 \cdot \delta^{18}O + 13,5$.

Gasparini et al. (1990) obtienen un exceso de deuterio $d = +8,8$ para el mismo sector. Trabajos recientes en Tenerife (Sosa et al., 2011), obtienen la recta meteórica local a partir de datos tomados en la estación de El Rayo (La Laguna), muy similar a la de Gonfiantini: $\delta D = 7,57 \cdot \delta^{18}O + 13,7$.

Así pues, se puede considerar que la caracterización regional de las precipitaciones en promedio queda definida por un exceso de deuterio $d = +13,5$ a $+14$.

5.1.5. Aplicación a La Palma

Si bien el estudio de la composición isotópica de las aguas subterráneas no es novedosa en La Palma, su uso ha sido poco generalizado, exceptuando trabajos particulares de índole regional (SPA-15, 1975; MAC-21, 1980; ITGE, 1988 y 1993; Veeger, 1991; Skupien y Poncela, 2007b).

Otros trabajos realizados por el autor que suscribe han permitido completar el banco de datos (Skupien y Poncela, 2006, 2007, 2009a, 2009b, 2009c y 2011; Poncela y Skupien, 2008, 2009, 2011 y 2013; Poncela et. al., 2012).

Para el presente estudio se han recopilado los resultados de los trabajos realizados por Veeger (1991), ITGE (1993) y Poncela (periodo 2006-2015, a partir de la integración de datos propios), los cuales se presentan en las Tablas 38, 39 y 40.

Hay que destacar las notables deferencias de tiempo entre los muestreos realizados; no obstante, la densidad de puntos analizada en su globalidad y por tipología de captaciones, permite obtener conclusiones razonables en lo referente a la distribución y origen de la recarga, así como discutir algunas zonas singulares para cuyo análisis se apoya en la hidroquímica y en el contenido en tritio (que se explica más adelante), pues es de la integración de toda la información disponible de la que se puede extraer conclusiones para la mejora del conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico del sistema acuífero volcánico insular de La Palma.

Tabla 38. Recopilación de los resultados de las analíticas de isótopos estables de las aguas subterráneas de la Isla de La Palma (extraído y adaptado de Veeger, 1991).

Nombre de la Captación	Tipo	Cota (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
Las Goteras	Manantial	80	-1,5	-4,0
Fuente de los Roques	Manantial	1.110	-3,9	-18,0
Los Quemados	Manantial	395	-3,2	-12,5
Fuerte Aridane	Galería	1.400	-5,7	-26,5
La Faya	Galería	1.300	-5,2	-23,0
Altaguna	Galería	1.320	-5,9	-28,0
Los Guanches	Galería	1.500	-5,4	-26,0
Verduras de Alfonso	Galería	1.300	-6,4	-28,0
Ribancera	Manantial	500	-4,1	-17,0
Salto de los Puercos	Galería	800	-4,2	-19,0
Cordero	Manantial	1.420	-6,2	-32,0
Marcos	Manantial	1.360	-5,9	-28,0
Naciente del Toro	Manantial	155	-4,6	-23,0
Los Girineldos	Galería	300	-5,3	-26,0
Los Pajaritos	Galería	375	-5,6	-28,0
Garcés	Galería	1.180	-5,6	-28,0
San Andrés	Galería	580	-5,2	--
El Río	Galería	1.010	-4,1	--
Salto de las Cañas	Galería	800	-4,8	--
Fuente Las Mimbreras	Manantial	760	-3,5	--
Fuente Franceses	Manantial	1.020	-4,2	--
Dos Aguas	Sondeo	430	-4,6	-17,0
Pozo El Salto	Pozo	110	-4,0	-20,0
Peña Horeb	Pozo	40	-4,0	-18,0
Pozo Duque	Pozo	100	-3,4	-17,0
Pozo La Prosperidad	Pozo	56	-4,1	-20,0
Zona Alta	Pozo	76	-3,6	-19,0
Pozo California	Pozo	15	-4,4	-21,0

Tabla 39. Recopilación de los resultados de las analíticas de isótopos estables de las aguas subterráneas de la Isla de La Palma (extraído y adaptado de ITGE, 1993).

Nombre de la Captación	Tipo	Cota (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
La Guinderesa	Galería	775	-6,57	-40,0
Los Minaderos	Galería	1.420	-6,17	-27,0
Fuente Nueva	Galería	1.075	-6,51	-35,2
Roque de los Árboles	Galería	1.220	-6,26	-34,7
Cuevitas	Galería	595	-6,18	-41,8
Cuevitas	Galería	595	-6,07	-33,5
Los Girineldos	Galería	300	-5,13	-31,7
Los Girineldos	Galería	300	-5,87	-31,7
San Andrés	Galería	595	-5,05	-23,7
Caldero de los Tilos	Galería	570	-4,03	-19,9
Caldero de los Tilos	Galería	570	-5,38	-20,2
Aguatabar	Galería	630	-6,13	-23,0
Aguatabar	Galería	630	-6,08	-32,2
Aguatabar	Galería	630	-5,72	-32,2
La Rosita	Galería	1.003	-6,38	-39,4
Risco Blanco	Galería	850	-5,49	-29,1
Salto de las Poyatas	Galería	290	-5,38	-27,4
Corcho y Zarzalito	Galería	560	-5,58	-25,6
Hidráulica Las Nieves 1	Galería	1.100	-6,3	-33,0
Las Mercedes 1	Galería	730	-6,06	-29,1
La Madera (Santa Ana)	Galería	450	-5,87	-30,6
Los Alpes	Galería	275	-5,01	-21,1
La Afortunada	Galería	710	-4,81	-19,8
La Afortunada	Galería	710	-5,79	-20,0
La Afortunada	Galería	710	-5,62	-23,0
Hidráulica Breña Alta	Galería	300	-3,68	-15,1
Hidráulica Breña Alta	Galería	300	-4,53	-17,3
Poleos Bajos	Galería	1.175	-5,86	-30,6
La Faya	Galería	1.085	-5,25	-27,6
El Remo	Galería	75	-4,54	-26,7
Cumbre Nueva	Pluviómetro	1.400	-2,51	-13,1
Cumbre Nueva	Captanieblas	1.373	-1,36	-4,0

Tabla 40. Recopilación de los resultados de las analíticas de isótopos estables de las aguas subterráneas de la Isla de La Palma (adaptado de Poncela para este trabajo - periodo 2006-2015).

Nombre de la Captación	Tipo	Cota (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
Hidráulica Breña Alta	Galería	300	-5,91	-22,00
Marcos	Manantial	1.360	-6,45	-32,75
Cordero	Manantial	1.420	-5,84	-32,27
La Madera (Santa Ana)	Galería	450	-5,27	-30,10
Fuente de los Roques	Manantial	1.110	-1,75	1,66
Túnel Trasvase Este - Bocamina	Galería	430	-5,46	-21,70
Túnel Trasvase Oeste - Núcleo	Galería	426	-5,55	-24,70
Túnel Trasvase Oeste - SH	Galería	426	-5,33	-24,00
Matadero	Sondeo	820	-5,12	-21,9
Caseta Control Túnel Carreteras	Sondeo	900	-5,51	-22,30
Los Tilos	Sondeo		-4,98	-15,69
Poceta D - Fuente Santa	Poceta		-0,33	3,49
Poceta F - Fuente Santa	Poceta		-0,49	-0,85
Sondeo S-0 - Fuente Santa	Sondeo		-0,76	2,11
La Candelaria	Galería	465	-6,84	
La Candelaria	Galería	465	-6,45	

5.1.5.1. Relación $\delta^{18}\text{O}$ (‰) - δD (‰)

El estudio de las variaciones isotópicas del oxígeno 18 y del deuterio se realiza en un gráfico $\delta^{18}\text{O}$ (‰) - δD (‰), en el que se dibuja la ecuación para el agua de lluvia y que no es más que una recta que refleja la evaporación en condiciones de equilibrio (Custodio y Llamas, 1983). Esta recta es conocida como la recta meteórica mundial y viene expresada como: $\delta\text{D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$, como se indicó anteriormente.

La comparación de la distribución de las muestras sobre la misma permite realizar ajustes a rectas meteóricas locales y, en ocasiones, permiten caracterizar determinados procesos (evaporación, intercambio, termalismo, etc.).

En general, las pequeñas variaciones estacionales en el contenido isotópico son rápidamente amortiguadas durante la infiltración de modo que, en ausencia de acciones perturbadoras (riegos con aguas importadas, riegos con pozo, etc.) y de mezclas con otras aguas, las aguas subterráneas tienen composición isotópica casi estable, siendo la misma igual, o a lo sumo ligeramente superior que la infiltración local.

La Figura 47 muestra la distribución de puntos analizados y su relación a la recta meteórica mundial (galerías, manantiales y pozos seleccionados). Se puede comprobar que el ajuste es bueno, si bien el exceso de deuterio promediado es $d = +7,7$.

Este ajuste se dispersa cuando se individualiza el análisis por campañas (menor número de puntos y mayor dispersión en la distribución de las muestras).

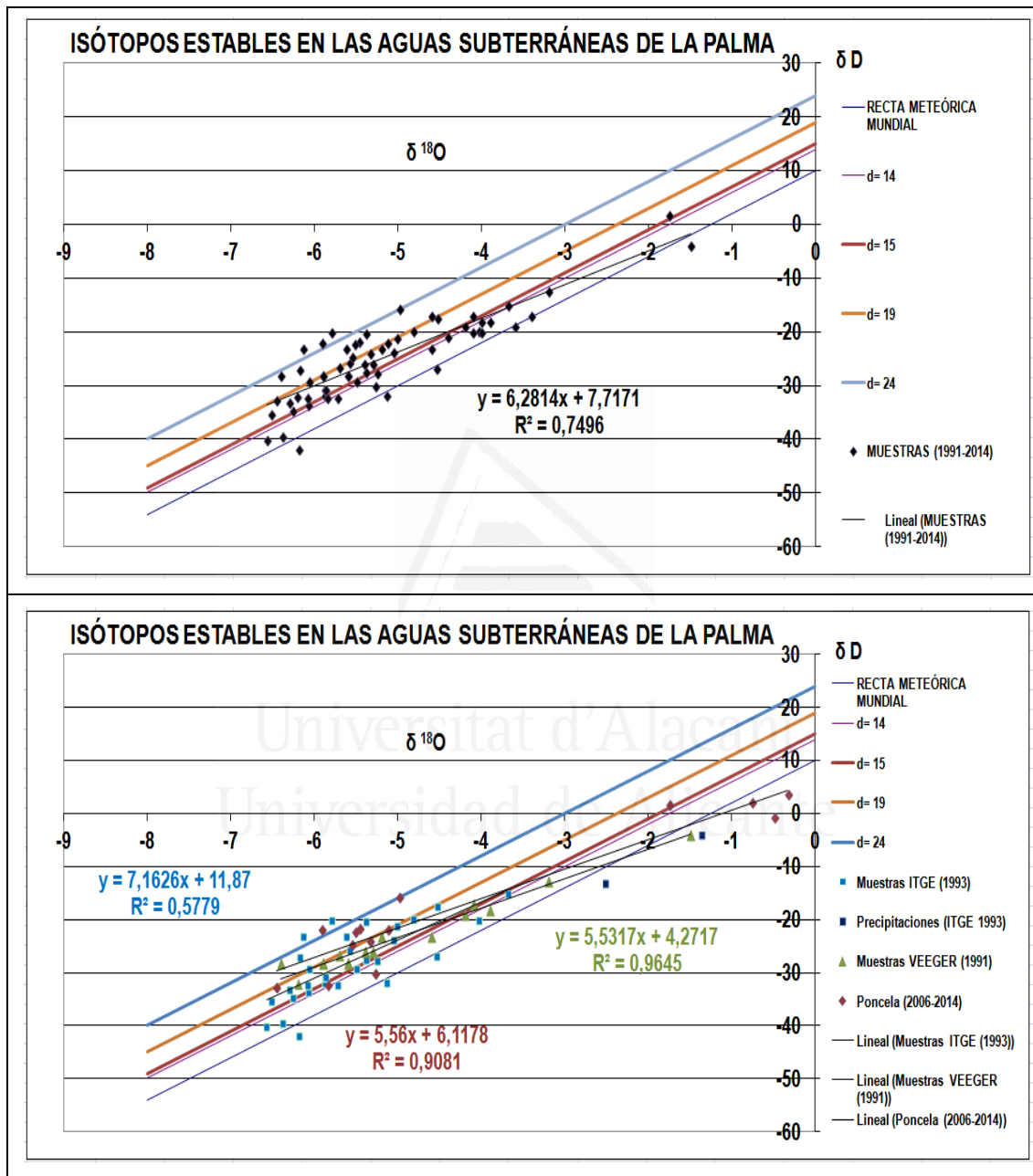


Figura 47. Distribución del contenido de isótopos estables en las aguas subterráneas de la Isla de La Palma. Arriba: situación promedio. Abajo: en verde (Veeger, 1991, en azul (ITGE, 1993) y en morado (Poncela, periodo 2006-2015).

La Figura 48 muestra la misma distribución pero diferenciada solamente para galerías y manantiales.

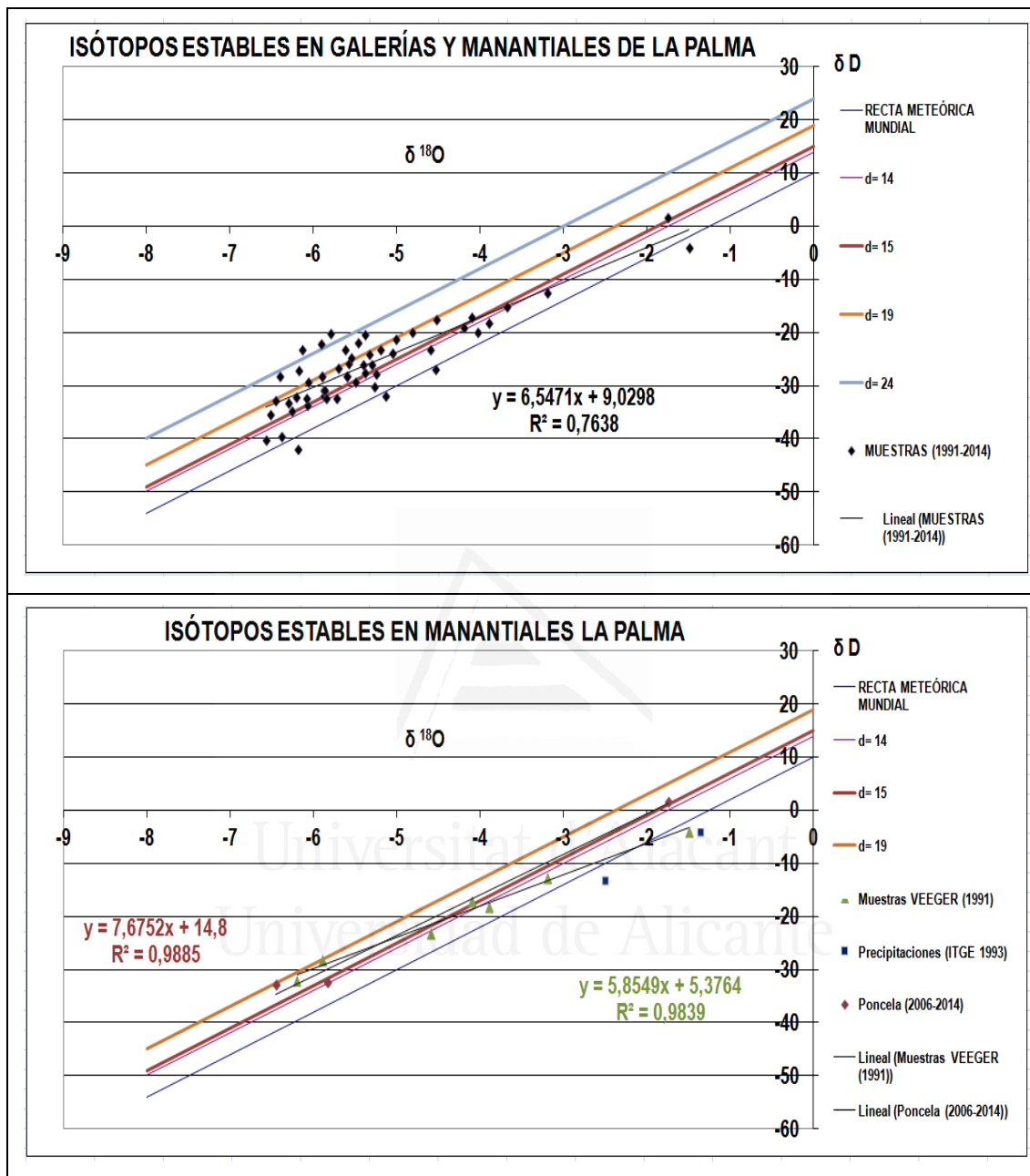


Figura 48. Distribución del contenido de isótopos estables en las aguas subterráneas de la Isla de La Palma. Arriba: situación promedio de galería y manantiales. Abajo: en verde (Veeger, 1991) y en morado (Poncela, periodo 2006-2015).

Los resultados obtenidos se sintetizan en la Tabla 41, donde se realiza el ajuste para cada una de las distribuciones analizada, así como por autores.

Tabla 41. Resumen de los ajustes de las rectas meteóricas a partir de los datos isotópicos (isótopos estables) analizados.

Descripción	Recta meteórica ajustada
Precipitaciones	
Recta Meteórica Mundial (IAEA, 1981)	$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$
Recta Meteórica de las precipitaciones locales en Tenerife (Sosa et al., 2011)	$\delta D = 7,6 \cdot \delta^{18}O + 13,7$
Muestras analizadas en La Palma (1991-2015)	
Total de muestras analizadas	$\delta D = 6,28 \cdot \delta^{18}O + 7,72$
Veeger (1991)	$\delta D = 5,53 \cdot \delta^{18}O + 4,27$
ITGE (1993)	$\delta D = 7,16 \cdot \delta^{18}O + 11,87$
Poncela (periodo 2006-2015)	$\delta D = 5,56 \cdot \delta^{18}O + 6,12$
Solo galerías y manantiales/nacientes (1991-2015)	$\delta D = 6,55 \cdot \delta^{18}O + 9,03$
Solo manantiales/nacientes	
Veeger (1991)	$\delta D = 5,85 \cdot \delta^{18}O + 5,38$
Poncela (periodo 2006-2015)	$\delta D = 7,68 \cdot \delta^{18}O + 14,8$

En general la mayoría de rectas se encuentran por debajo de un exceso de deuterio $d = + 10$ o muy próximo a él; no obstante existen situaciones donde este valor es superior y que se procede a comentar de forma particularizada.

Se destaca que los valores más representativos suelen concurrir en el análisis de galerías y manantiales poco influenciados y sin mezclas de aguas. Asumiendo ese principio, el análisis global de dichos valores muestran unas rectas meteóricas similares, con pendientes entre 6,28 a 7,68 lo cual parece indicar un cierto efecto evaporativo durante la caída e infiltración del agua de lluvia. Asimismo, el exceso de deuterio muestra valores d entre 9,03 a 14,8. Esta dispersión es normal pues se tiene contraste de diversas procedencias.

No obstante, el ajuste realizado para las muestras del IGME y de Poncela no difiere demasiado del ajuste de las precipitaciones locales, de influencia atlántica, propuesto por Sosa et al. (2011) para la zona de Tenerife (mediciones realizadas en la zona de Valle de Agüere, a 580 msnm).

Cuando se incluyen los pozos y sondeos el efecto de distorsión es notable, pues se mezclan distintas isocronas en el bombeo, lo que conduce a un efecto de suavizado notable. Esto se refleja en los ajustes realizados a los datos de Veeger (1991) y de Poncela, donde se obtienen pendiente de 5,5 y excesos de deuterio d entre 4,27 y 6,12.

Como conclusión, puede asumirse razonablemente bien que la recta meteórica local promedio se ajusta bien a: $\delta D = 6,55 \cdot \delta^{18}O + 9,03$, no excesivamente alejada de la recta meteórica mundial en exceso de deuterio pero con pendiente más tendida, y próxima en pendiente a la recta meteórica local definida para Tenerife, por lo que la valoración debe realizarse con cautela.

Por zonas, se pueden distinguir los siguientes intervalos de variación en el exceso de deuterio (Tabla 42):

Tabla 42. Resumen de los intervalos de variación en el exceso de deuterio a partir de los ajustes de las rectas meteóricas analizadas, por zonas.

Descripción	Exceso de deuterio
Zona Norte	d = +14 a +15
Zona Noreste	d = +9 a +14
Zona Oriental	d = +15 a +24
Arco de Cumbre Nueva	d = +19 (hasta +24)

Puede establecerse que la zona norte y nororiental de La Palma presentan un exceso promedio de deuterio d = +9 a +15, mientras que la vertiente oriental, incluido el Arco de Cumbre Nueva, muestra un exceso de deuterio d = +15 a +24 (las galerías del entorno de Cumbre Nueva muestran un ajuste razonable a d = +19 (Skupien y Poncela, 2006), lo cual es indicativo de que las precipitaciones que produjeron recarga estaban influenciadas por una mayor aridez, posiblemente de influenciada sahariana.

5.1.5.2. Relación altitudinal - $\delta^{18}O$ (‰) y δD (‰)

El "efecto altitudinal" permite correlacionar el contenido isotópico de las aguas subterráneas con la altura de la zona de recarga, puesto que depende fuertemente de la topografía local. En zonas de altos relieves montañosos, como La Palma, se tiene que, a barlovento de los mismos, los contenidos en isótopos estables en lluvia disminuyen al aumentar la altitud, y se convierten en aguas más ligeras debido a que aguas arriba las precipitaciones procedentes de masas de vapor están progresivamente empobrecidas isotópicamente por la pérdida de pesados en las lluvias precedentes, y por otro lado, a que la temperatura es más baja y el fraccionamiento de la condensación de vapor es mayor (IAEA, 1981; Custodio y Llamas, 1983; FCIHS, 2009).

Como no siempre es posible analizar el contenido isotópico del agua de precipitación a distintas altitudes durante más de un año hidrológico, se suele complementar con datos isotópicos de manantiales asociados a pequeñas cuencas de aporte y situados a diferentes altitudes para garantizar la representatividad.

En este trabajo se ha partido de las rectas definidas por Veeger (1991) y se han proyectado los valores del contenido isotópico en función de la altura de muestreo. En general, los puntos deben situarse por debajo de la recta trazada (los que están por encima son los datos originales para el trazado de la recta altitudinal). Con esa proyección se puede establecer la zona probable de recarga y contrastarla por otros métodos geológicos.

Las rectas altitudinales definidas por Veeger (1991) fueron:

- $H (m) = -416 \cdot \delta^{18}O - 755$ (gradiente: $-0,24 \cdot \delta^{18}O / 100$ m).
- $H (m) = -78,7 \cdot \delta D - 490$ (gradiente: $-1,27 \cdot \delta D / 100$ m).

Para su aplicación deben asumirse dos hipótesis:

- El agua subterránea no ha sufrido un desplazamiento vertical significativo, lo que permite considerar el muestreo a esa cotas como una cota mínima para la recarga.
- La composición isotópica del agua subterránea no ha sufrido alteraciones durante el tránsito desde el lugar de recarga al punto de muestreo.

En este trabajo, se ha procedido a un nuevo ajuste basado en la información disponible. Los datos de partida se presentan en la Tabla 43.

Tabla 43. Datos de partida para un nuevo ajuste de las rectas latitudinales en La Palma. Datos de Veeger (1991) y Poncela (periodo 2006-2015).

Nombre de la Captación	Tipo	Cota (m)	Cota estimada Recarga (m)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
Las Goteras	Manantial	80	80	-1,5	-4,0
Fuente de los Roques	Manantial	1.110	1.600	-3,9	-18,0
Los Quemados	Manantial	395	395	-3,2	-12,5
Ribancera	Manantial	500	1.100	-4,1	-17,0
Naciente del Toro	Manantial	155	900	-4,6	-23,0
Fuente Las Mimbreras	Manantial	760	760	-3,5	--
Fuente Franceses	Manantial	1.020	1.020	-4,2	--
Cordero	Manantial	1.420	2.200	-6,2	-32,0
Cordero	Manantial	1.420	2.200	-5,84	-32,27
Marcos	Manantial	1.360	2.200	-5,9	-28,0
Marcos	Manantial	1.360	2.200	-6,45	-32,75

La representación del nuevo ajuste se muestra en la Figura 49.

Así pues, las nuevas rectas que se proponen vienen definidas por las siguientes ecuaciones:

- $H (m) = -499,37 \cdot \delta^{18}O - 954,44$ (gradiente: $-0,20 \cdot \delta^{18}O / 100$ m).
- $H (m) = -77,58 \cdot \delta D - 289,37$ (gradiente: $-1,28 \cdot \delta D / 100$ m).

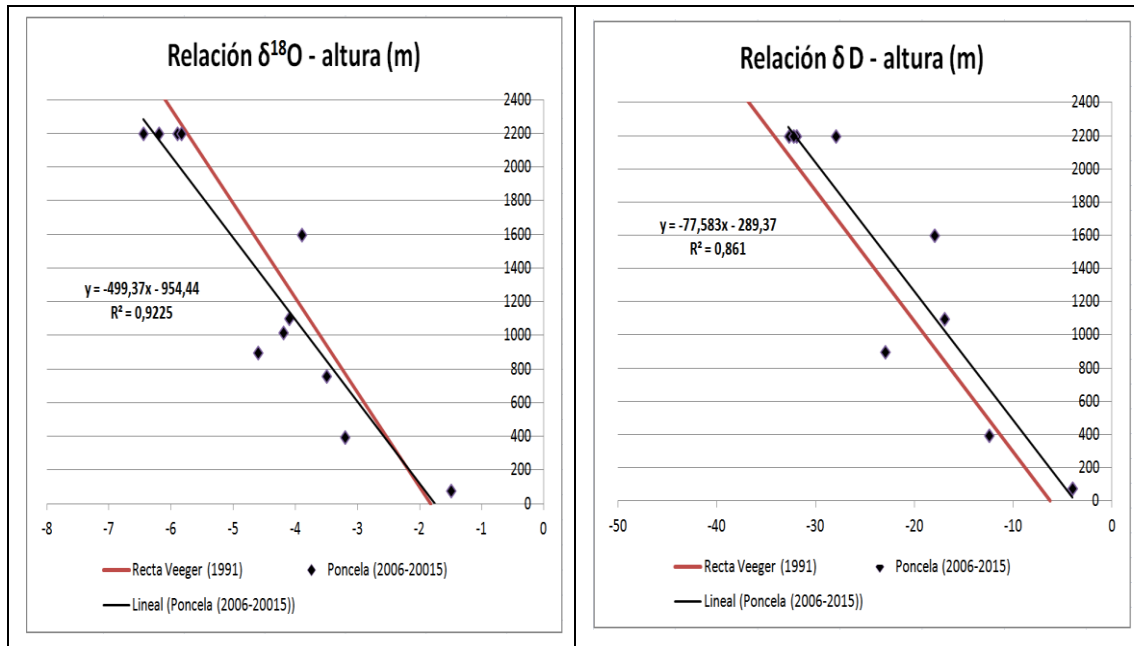


Figura 49. Representación del nuevo ajuste altitudinal para la altura de recarga (m) en función del contenido isotópico expresado en $\delta^{18}\text{O}$ (‰) y δD (‰).

La representación de la información analizada en función de sus alturas de muestreo se presenta en la Figura 50.

Se puede comprobar que la distribución de puntos permite acotar el área de recarga efectiva para las captaciones de La Palma entre los 600-700 y 2.400 msnm, estableciéndose la siguiente zonificación:

- Recarga en zona de cumbres: entre 1.500 y 2.400 m, que afecta a todo el sector septentrional, incluida la Caldera de Taburiente y la zona Nororiental superior (Garafía y Barlovento). Asimismo, comprende una zona de tránsito entre 1.800 y 2.200 que engloba la zona Nororiental inferior (hasta San Andrés y Saucos), en tránsito hacia la zona oriental.
- Recarga en la vertiente oriental: entre 1.200 y 1.800 m: comprende toda la zona oriental desde Puntallana hasta Breña Baja, englobando el Arco de Cumbre Nueva.
- Recarga local en zona de medianías: comprende las zonas entre 600-700 y 1.200 m para todas las franjas.

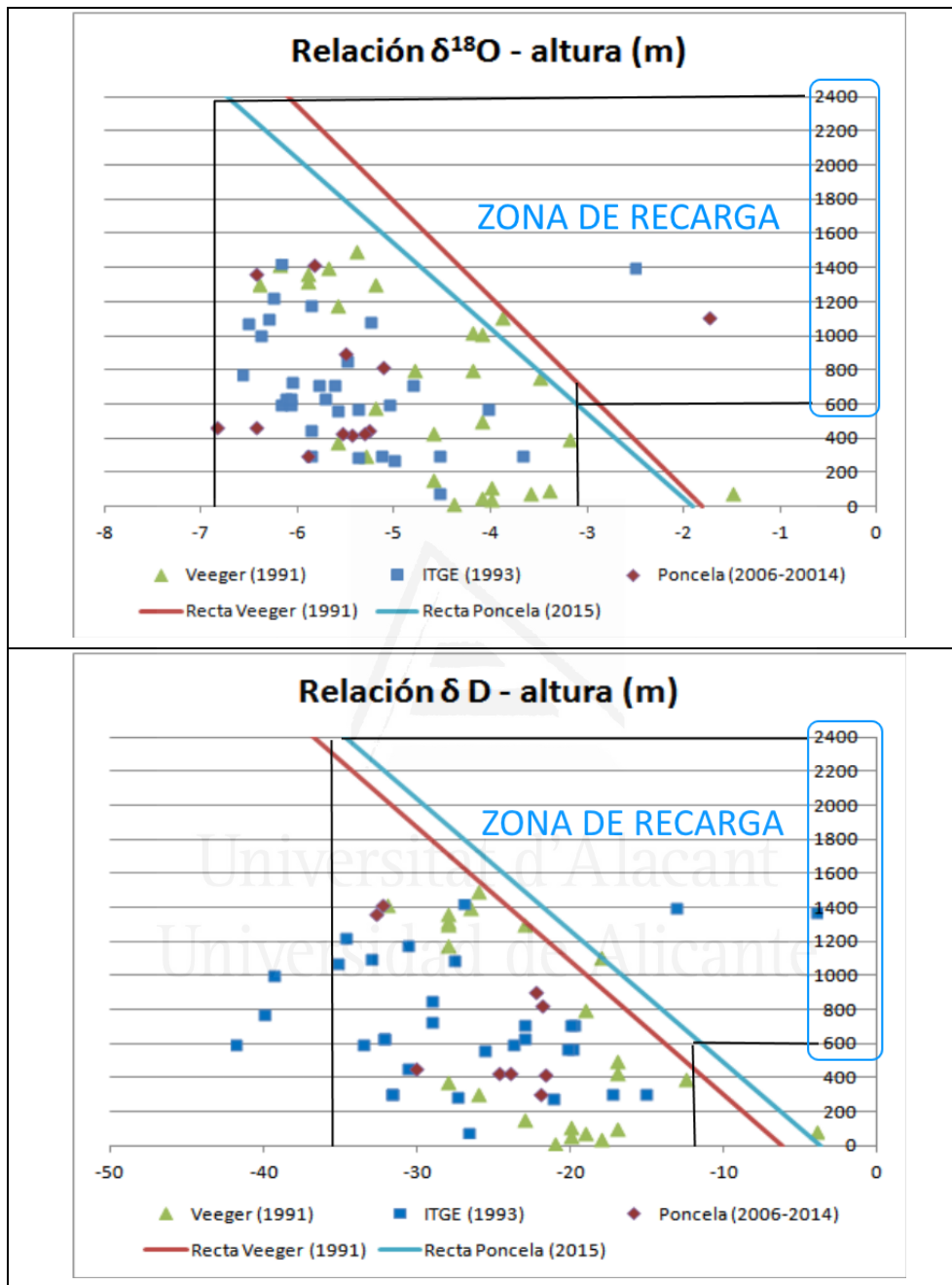


Figura 50. Relación entre el contenido en isótopos estables y la altitud en La Palma. Arriba: $\delta^{18}\text{O}$ (‰) - Altura (m). Abajo: δD (‰) - Altura (m). Rectas altitudinales: roja (Veeger, 1991), azul (Poncela, 2015).

5.1.5.3. Valoración del método

La ecuación de la recta de ajuste para las aguas subterráneas de La Palma con toda la información analizada es: $\delta D = 6,55 \cdot \delta^{18}O + 9,03$, algo diferente a la planteada por el IGME (ITGE, 1993), pero más ajustada a la realizada por Gasparini et al. (1990), aunque esta última para Gran Canaria. La pendiente difiere de la situación de fraccionamiento en equilibrio (8), lo que sugiere una cierta evaporación en el momento de la infiltración.

Como no parece que se produzcan intercambios isotópicos parece claro que el empobrecimiento en isótopos pesados responde a que el contenido isotópico del agua de infiltración no cambia en el acuífero, con lo que la composición observada en las aguas subterráneas puede ser debida a que las aguas se infiltraron a mayor altitud o que las condiciones climáticas eran más frías que las correspondientes a la zona donde hoy se encuentran.

En este sentido, la zona septentrional muestra unos valores promedio de exceso de deuterio $d = +9$ a $+15$, contrastados con los de la vertiente oriental y Cumbre Nueva, con $d = +15$ a $+24$, lo que vendría a confirmar que la zona norte y noreste, está sometida a los vientos alisios cargados de humedad que influyen de manera más directa en la recarga zonal, de ahí esos valores más bajos de exceso de deuterio en comparación con los de la zona oriental, dado que el tránsito de las lluvias provenientes del aliso hacia zonas más meridionales y o influencias más "saharianas", relativamente más elevados, son característicos de una mayor aridez.

Se han ajustado dos nuevas rectas altitudinales:

- $H (m) = -499,37 \cdot \delta^{18}O - 954,44$ (gradiente: $-0,20 \cdot \delta^{18}O / 100 m$).
- $H (m) = -77,58 \cdot \delta D - 289,37$ (gradiente: $-1,28 \cdot \delta D / 100 m$).

Con estos datos se pone de manifiesto que la recarga natural principal al sistema hidrogeológico se produce entre la zona de cumbres y la zona de medianías altas.

5.2. TRITIO

5.2.1. Introducción

El tritio (^3H) es un isótopo del hidrógeno que se desintegra conforme transcurre el tiempo, mediante la emisión de partículas β , con una energía de 0,018 MeV, y con un periodo de semidesintegración de 12,43 años (constante radiactiva $\lambda = 0,05576 \text{ años}^{-1}$). El producto de su decaimiento es el ^3He . Su medición se expresa en unidades de tritio (UT) o Bq/l (1Bq/l = 8,47 UT). El tritio existente en la atmósfera tiene dos orígenes distintos (IAEA, 1983):

- Origen natural, de procedencia cosmogénica, a partir de reacciones de activación neutrónica y protónica, así como de reacciones fotónicas debidas al bombardeo de átomos de ^{14}N y ^{16}O por la radiación cósmica.
- Origen antropogénico, a partir de pruebas de bombas nucleares. También se produce como residuo de la industria de generación electronuclear.

Hasta los años 1950 la procedencia de tritio existente en la atmósfera era exclusivamente de origen natural. Sin embargo, es a partir de la explosión de la primera bomba nuclear y siguientes, destacando el periodo de 1952-1962, cuando se realizó el mayor número de explosiones nucleares atmosféricas y se registró un aumento considerable de la concentración de tritio en las precipitaciones, hasta aproximadamente 1.000 veces respecto al valor natural.

En las islas oceánicas existe un importante efecto de dilución por vapor marino, pobre en tritio. Según estimaciones de Plata (en Custodio, 1978), el contenido de tritio ascendió en las Islas Canarias en el año 1963/1964 solamente hasta 300 UT.

Teniendo en cuenta que a partir del año 1963 hasta la actualidad se han detenido las explosiones nucleares provocadas en la atmósfera, la concentración de tritio en la misma está disminuyendo, mostrando una tendencia a recuperar los valores anteriores a las pruebas nucleares, estimados en base a cálculos ya que se tiene poca información de los valores anteriores a estas fechas.

Sin embargo, la industria nuclear, así como las plantas de reprocesamiento de combustible, la industria de aparatos luminosos y algunos laboratorios especializados producen en la actualidad una cierta cantidad de residuos, que contienen tritio.

De acuerdo con Eisenbud et al. (1979) se calcula que en el año 1980 se han sumado a la contribución del aumento de tritio las siguientes fuentes: 56 % procedente de las explosiones nucleares, 23 % del reprocesamiento de combustible nuclear en las plantas productoras de armas nucleares, 11 % de origen natural cosmogénico y el restante el 10 % de las centrales nucleares.

El tritio entra en contacto con la Tierra incorporándose a la hidrosfera mediante la precipitación. Sin embargo, la cantidad de tritio en la lluvia no es la misma en todas las zonas de la tierra. Existe una

gran diferencia entre la concentración de tritio en el hemisferio norte y en el hemisferio sur debido a que la mayoría de las explosiones nucleares han sido realizadas en el hemisferio norte. Aparte de este hecho, existen numerosos factores que influyen en la cantidad de tritio que puede encontrarse en una zona determinada. Entre estos factores se encuentra la geografía del lugar, lo que engloba otros fenómenos tales como el efecto de la dilución, el de la continentalidad y el de la latitud, entre otros.

De forma resumida se puede considerar que el mayor contenido de tritio se halla en aquellas zonas que están a mayor altitud, más alejadas del ecuador y más alejadas del mar.

Pero también existen otros factores locales que influyen en la concentración del tritio, como por ejemplo variaciones estacionales, mensuales y anuales. También la intensidad de cada precipitación afecta a la cantidad de tritio existente en una zona concreta, ya que el contenido de tritio no es constante en tiempo. Se producen ciclos anuales que tienen un máximo en primavera y verano y un mínimo en invierno. El origen de estos ciclos se relaciona con el intercambio de masas de aire entre la troposfera y la estratosfera (Fritz y Fontes, 1988).

5.2.2. Concentración de tritio en las precipitaciones locales

No existen datos sobre las concentraciones de tritio en las precipitaciones locales, salvo algunas medidas puntuales obtenidas en diversos proyectos de investigación (Gonfiantini, 1973 y 1974; SPA-15, 1975; MAC-21, 1980, etc.) se midieron en las precipitaciones del Archipiélago Canario concentraciones de tritio entre 20 y 30 UT, mientras que Plata (en Custodio, 1978) estima que para las Islas Canarias para el año 1963/64 el máximo era de 300 UT.

A pesar de ello, tales concentraciones pueden ser evaluadas con suficiente aproximación a partir de datos conocidos para otras áreas próximas pertenecientes a la red controlada por el GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation), dentro de los programas auspiciados por la IAEA (International Atomic Energy Agency) y la WMO (World Meteorological Organization). Las estaciones más próximas de referencia han sido: Gibraltar (España), Faro (Portugal), Ponta Delgada y Angra do Heroísmo (Azores, Portugal), Funchal (Madeira, Portugal) y puntualmente Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias, España). En este sector, los frentes nubosos importantes que dan origen a lluvias en esta franja tienen casi siempre la misma procedencia.

También se ha considerado la influencia del continente africano: Feis Sais (Marruecos), Malange (Angola) y Windhoek (Namibia).

La evolución de las concentraciones de tritio en las precipitaciones locales ha sido calculada en base al tratamiento estadístico de muestras recogidas mensualmente en pluviómetros cuando la serie es lo suficientemente continua y tratada anualmente (ponderación de la concentración de tritio en las precipitaciones), y estimada según la tendencia cuando las lagunas han sido más amplias (principalmente durante los últimos años).

Este tratamiento estadístico ha permitido definir una función preliminar de entrada de tritio, considerando la evolución normal según el proceso de desintegración radiactiva, y promediándose de acuerdo con las estaciones de base.

Las concentraciones de tritio que se han utilizado para este trabajo han sido también cotejadas con datos de Araguás (1991), datos elaborados por Poncela (1992, 2006 y 2014) y Skupien (1995). Asimismo, también se han consultado datos para el entorno de Azores y Madeira dentro del Proyecto Aquamac – Programa Interreg IIIb.

Dentro de la información recopilada de diferentes fuentes cabe destacar los siguientes valores:

- Las concentraciones de tritio en Tenerife para el año 1985 eran de 5 UT (Custodio, 1987).
- Las concentraciones de tritio medidas en la Gomera para el año 1998 oscilaban entre 8,65 y 14,17 UT (Skupien, 1988).
- Las concentraciones de tritio medidas en La Palma para el año 1991 oscilaban entre 0,59 y 8,98 UT.
- Las concentraciones de tritio en Tenerife para el año 2005 oscilaban entre 4,1 y 6,2 UT (Skupien, 2005).
- En la actualidad, son esperables valores contrastables entre 2 y 3 UT para las aguas superficiales y de precipitación directa y < 2 UT para la aguas subterráneas (generalmente < 1UT).

Para caracterizar el contenido en tritio de las aguas subterráneas de La Palma y proceder a su interpretación se ha recopilado la escasa información directa existente, especialmente relevante la de Veeger (1991) y la recopilada por Poncela (periodo 2006-2015) en diversos trabajos propios. Además, el periodo transcurrido de 25 a 30 años entre los muestreos da idea de cómo ha ido decayendo la concentración en las aguas subterráneas.

Los datos de partida se presentan en la Tabla 44 y Tabla 45.

Tabla 44. Recopilación de los resultados de las analíticas de tritio de las aguas subterráneas de la Isla de La Palma (Veeger, 1991).

Nombre de la Captación	Tipo	Cota (m)	Tritio (UT)
Fuente de los Roques	Manantial	1.110	4,66
Los Quemados	Manantial	395	6,86
Fuerte Aridane	Galería	1.400	0,59
La Faya	Galería	1.300	9,07
Altaguna	Galería	1.320	2,12
Verduras de Alfonso	Galería	1.300	2,12
Salto de los Puercos	Galería	800	2,71
Cordero	Manantial	1.420	6,27
Marcos	Manantial	1.360	5,59
Salto de las Cañas	Galería	800	0,50

Nombre de la Captación	Tipo	Cota (m)	Tritio (UT)
Fuente Las Mimbreras	Manantial	760	7,29
Fuente Franceses	Manantial	1.020	8,98
Dos Aguas	Sondeo	430	5,59
Pozo El Salto	Pozo	110	3,05
Peña Horeb	Pozo	40	1,02
Pozo Duque	Pozo	100	2,97
Pozo La Prosperidad	Pozo	56	2,29
Zona Alta	Pozo	76	2,03
Pozo California	Pozo	15	3,73

Tabla 45. Recopilación de los resultados de las analíticas de tritio de las aguas subterráneas de la Isla de La Palma (adaptado de Poncela para este trabajo - periodo 2006-2015).

Nombre de la Captación	Tipo	Cota (m)	Tritio (UT)
Hidráulica Breña Alta	Galería	300	0,4
Marcos	Manantial	1.360	1,6
Cordero	Manantial	1.420	1,3
La Madera (Santa Ana)	Galería	450	0,7
Fuente de los Roques	Manantial	1.110	1,1
Túnel Trasvase Este - Bocamina	Galería	430	0,5
Túnel Trasvase Oeste - Núcleo	Galería	426	0,5
Caseta Control Túnel Carreteras	Sondeo	900	0,5
Los Tilos	Sondeo	370	0,5
Sondeo S-0 - Fuente Santa	Sondeo	32,50	1,1
Túnel Trasvase Este	Galería	430	1,0
Los Remolinos	Galería	775	0,9
Dos Aguas	Tomadero	425	2,3
Túnel Trasvase Oeste - Núcleo	Galería	426	1,0
Túnel Trasvase Este	Galería	430	0,5
Túnel Trasvase Oeste - Núcleo	Galería	426	0,5
Túnel Trasvase Este - Frente	Galería	430	0,3
Túnel Trasvase Este - Hastial Izq	Galería	430	-0,8*
Hidráulica Breña Alta	Galería	300	0,0
Túnel Trasvase Este - Frente	Galería	430	-0,4*
Hidráulica Breña Alta	Galería	300	-0,4*
Túnel Trasvase Oeste - SV	Sondeo	426	1,4
Caseta Control Túnel Carreteras	Sondeo	900	0,5

(*) El valor negativo es absurdo. Indica que la muestra es más antigua o de la misma antigüedad que la muestra patrón.

5.2.3. Contenido de tritio en las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas son el resultado de la recarga natural a los acuíferos por la infiltración del agua de lluvia caída sobre el territorio (también puede contribuir la artificial inducida y/o las fugas en redes y otras infraestructuras hidráulicas).

Esta recarga tiene un tiempo de tránsito a través de la zona no saturada durante el que disminuye la concentración de tritio, excepto si existen vías de transferencia rápida a partir de discontinuidades en el terreno (Poncela et al., 1992, 1993).

Si se considera un acuífero como un todo en el que el volumen almacenado en el reservorio se mantiene constante, se define el tiempo de renovación como el cociente el volumen de agua almacenado y la recarga.

Este tiempo de renovación es un parámetro agregado que representa el comportamiento medio del sistema acuífero, suponiendo recarga homogénea en concentración y tasa sobre todo el acuífero (Custodio, E. y Custodio, J., 2013).

Los datos regionales y mundiales muestran que las evoluciones del contenido en tritio desde la perturbación de 1962 en distintas estaciones de referencia se ajustan razonablemente bien a una exponencial decreciente.

En esas circunstancias, y teniendo en cuenta que las entradas de agua con concentración de tritio irán "diluyéndose" como consecuencia del decaimiento por desintegración del isótopo, pero que a su vez se irán incorporando las que vayan entrando como consecuencia de las sucesivas recargas, se tiene que definir un modelo de mezcla adecuado para la interpretación.

5.2.4. Modelo interpretativo del tritio en el sistema acuífero volcánico de La Palma

La utilización del tritio de origen termonuclear permite, bajo ciertas hipótesis de partida acerca del funcionamiento del sistema hidrogeológico, la identificación de mezclas de aguas recargadas durante los últimos 50-60 años, y la estimación aproximada de dicha recarga en condiciones favorables (Custodio y Llamas, 1983; Zuber, 1986; Poncela et al., 1992, Skupien, 1998; IGME, 2002; Poncela, 2006 y 2014). En lo que sigue, se tratará principalmente de la evaluación de los tiempos de residencia del agua en el sistema.

La consideración del medio no saturado en la zona de acuífero libre debe tenerse en cuenta para no distorsionar los resultados; no obstante, la evidencia en pozos, sondeos y algunas galerías es que la recarga por infiltración en la vertical se produce de una manera rápida (pocas semanas a meses) con lo que, a efectos prácticos, dado el periodo de semidesintegración del tritio, puede considerarse poco significativo su efecto en estos sistemas. En este trabajo no se ha realizado un seguimiento y estudio más específico para confirmar o descartar esta hipótesis.

De acuerdo con lo anterior, la evaluación del tiempo de residencia de un agua que alcanza el acuífero y se mezcla con la existente puede interpretarse razonablemente bien mediante un modelo de mezcla exponencial o de mezcla total (Custodio y Llamas, 1983; Zuber, 1986; Poncela et al., 1992; Poncela, 2006 y 2014) para galerías y pozos con suficiente espesor saturado.

En este trabajo se presenta la comparativa de dos metodologías similares aplicadas a La Palma, zona en la que no existe una estación de medida de tritio en el agua de la lluvia, necesaria para la elaboración de la función de entrada local de tritio.

5.2.4.1. Función de entrada de tritio

Para el cálculo de la función de entrada de tritio se ha partido de los datos de contenido en tritio en las precipitaciones obtenidos de GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation), dentro de los programas auspiciados por la IAEA (International Atomic Energy Agency) y la WMO (World Meteorological Organization).

Al no existir datos locales, se han seleccionado las estaciones más próximas y en latitudes diferentes para poder ponderar las diferencias climatológicas de una manera razonable, y así definir a partir de una media geométrica la "Función de entrada de tritio en las Canarias Occidentales" (Poncela, 2006, 2014), pues su aplicabilidad no quedaría restringida solo a La Palma (Tabla 46 y Figura 51).

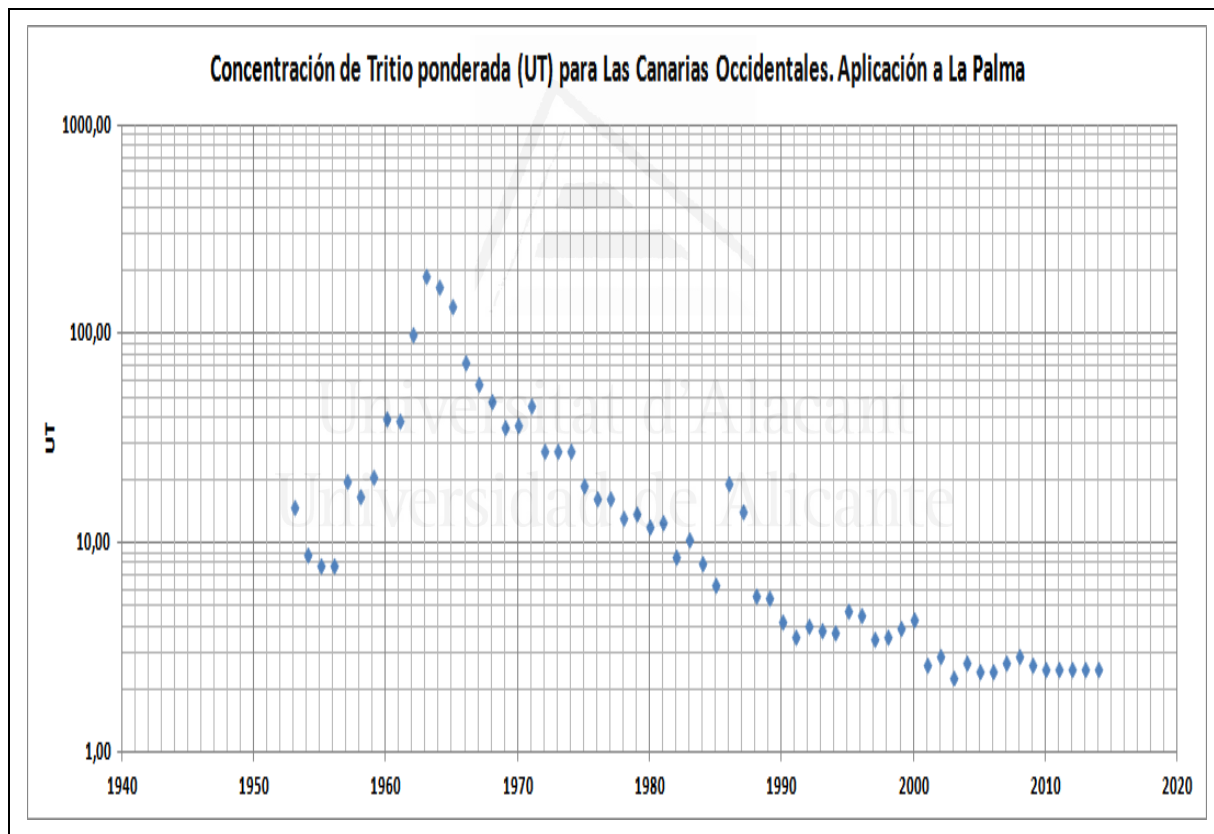


Figura 51. Concentración de tritio ponderada anual para las precipitaciones locales en las Canarias Occidentales. Aplicación a La Palma.

Tabla 46. Datos de contenido en tritio en las precipitaciones obtenidos de GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation), dentro de los programas auspiciados por la IAEA (International Atomic Energy Agency) y la WMO (World Meteorological Organization). En negrita se presenta la función de entrada de tritio ponderada a partir de las estaciones de referencia (elaborada por Poncela para este trabajo). (*) Extraído de Poncela et al. (1992). (**) Estimado por Poncela a partir de medidas de tritio en agua superficial bajo evento tormentoso.

AÑO	GNIP_6002000 SANTA CRUZ DE TENERIFE	GNIP_0851200 PONTA DELGADA (AZORES ISL)	GNIP_0851301 ANGRA DO HEROISMO (AZORES ISL)	GNIP_0852200 FUNCHAL (MADEIRA)	GNIP_0855400 FARO (PORTUGAL)	GNIP_0840500 GIBRALTAR	GNIP_6014100 FES SAIS (MARRUECOS)	GNIP_6621500 MALANGE (ANGOLA)	GNIP_6641000 MANONGUE (ANGOLA)	GNIP_6811000 WINDHOEK (NAMIBIA)	FUNCIÓN DE ENTRADA DE TRITIO PARA LAS CANARIAS OCCIDENTALES
1950						7,00*					7,00
1951						8,00*					8,00
1952						9,00*					9,00
1953						15,00*					15,00
1954						9,00*					9,00
1955						8,00*					8,00
1956						8,00*					8,00
1957						20,00*					20,00
1958						17,00*					17,00
1959						21,00*					21,00
1960						40,00*					40,00
1961						78,04*				19,53	39,04
1962		160,53				196,44				32,74	101,07
1963		287,61				482,48				53,31	194,85
1964		277,64				318,63				55,84	170,30
1965		120,12				161,87					139,44
1966		76,16				108,58				49,66	74,33
1967		49,36				94,91				43,65	58,91
1968		35,87				65,03				50,28	48,95
1969		40,40				52,28		26,88	30,92	35,86	36,29
1970		31,11				43,58		32,56	40,01	42,57	37,60
1971						70,15		50,26	33,95	39,01	46,49
1972						29,29		24,42	29,25	29,34	27,99
1973						28,13		26,65	30,12	27,16	27,98
1974						30,49		23,35	35,08	25,51	28,25
1975						20,73				17,77	19,19
1976						22,24				12,27	16,52
1977						17,86				15,56	16,67

AÑO	GNIP_6002000 SANTA CRUZ DE TENERIFE	GNIP_0851200 PONTA DELGADA (AZORES ISL)	GNIP_0851301 ANGRA DO HEROISMO (AZORES ISL)	GNIP_0852200 FUNCHAL (MADEIRA)	GNIP_0855400 FARO (PORTUGAL)	GNIP_0840500 GIBRALTAR	GNIP_6014100 FES SAIS (MARRUECOS)	GNIP_6621500 MALANGE (ANGOLA)	GNIP_6641000 MANONGUE (ANGOLA)	GNIP_6811000 WINDHOEK (NAMIBIA)	FUNCIÓN DE ENTRADA DE TRITIO PARA LAS CANARIAS OCCIDENTALES
1978					10,82	16,50				13,22	13,31
1979					10,77	28,41		11,02	13,23	11,80	13,94
1980					11,31	15,48		10,44	11,68		12,09
1981					11,93	21,64		8,66	11,38		12,63
1982					8,11	12,01		7,89	7,56		8,73
1983					15,00	9,40		9,10	9,42		10,49
1984					6,24	11,64				7,22	8,07
1985					6,12	7,31				5,85	6,40
1986					4,95	232,52				6,71	19,77
1987					5,43	37,18					14,21
1988		3,91	3,96	4,43	5,45	15,95					5,69
1989		4,32	4,72	3,91	3,80	16,86					5,52
1990		4,01	3,60	3,35	3,45	8,52					4,27
1991			2,00	2,94	4,80	5,84					3,58
1992				3,39		4,98					4,11
1993		3,16		3,29	3,65	6,10					3,90
1994		3,08		3,30	3,54		5,52				3,75
1995		2,98		2,77	2,67	19,47	5,69				4,76
1996		2,78		2,64	4,69	13,23	4,19				4,53
1997		2,69		2,87	2,55	5,75	4,89				3,54
1998		2,78			3,55	4,58	3,69				3,59
1999					2,95	5,07	4,13				3,96
2000	3,85	2,13			2,42	19,08					4,41
2001	2,47	2,23				3,27					2,62
2002	2,00	1,94				6,34					2,91
2003	2,63	1,91				2,48					2,32
2004	1,97	1,70				5,82					2,69
2005	1,65	3,28				2,81					2,48
2006	2,48	2,18				2,72					2,45
2007	2,70**										2,70
2008		2,92				2,87					2,90
2009		1,72				4,06					2,64
2010	2,50**										2,50
2011	2,50**										2,50
2012	2,50**										2,40
2013	2,50**										2,40

AÑO	GNIP_6002000 SANTA CRUZ DE TENERIFE	GNIP_0851200 PONTA DELGADA (AZORES ISL)	GNIP_0851301 ANGRA DO HEROISMO (AZORES ISL)	GNIP_0852200 FUNCHAL (MADEIRA)	GNIP_0855400 FARO (PORTUGAL)	GNIP_0840500 GIBRALTAR	GNIP_6014100 FES SAIS (MARRUECOS)	GNIP_6621500 MALANGE (ANGOLA)	GNIP_6641000 MANONGUE (ANGOLA)	GNIP_6811000 WINDHOEK (NAMIBIA)	FUNCIÓN DE ENTRADA DE TRITIO PARA LAS CANARIAS OCCIDENTALES
2014	2,50**										2,40

5.2.4.2. Modelo de mezcla total o exponencial

El cálculo de la función de contenido en tritio, c_t , en un sistema acuífero en el que la mezcla de aguas se puede representar por un modelo de mezcla total o exponencial viene definido por la siguiente expresión (Ecuación [35]):

$$C_t = \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t C_0(t') e^{\left[-\frac{1+\lambda\tau}{\tau}(t-t')\right]} dt' \quad [35]$$

Siendo:

- c_0 : Concentración de tritio en el tiempo t' .
- t : Tiempo actual de referencia.
- t' : Variable de integración.
- τ : Tiempo de residencia en años.
- λ : Constante radiactiva del tritio = 0,055746 años⁻¹.

Dicha ecuación puede resolverse transformándola en un sumatorio, para lo cual es común tomar como intervalo 1 año, de acuerdo con los datos de tritio que se utilizan. Con este método se producen errores para valores de τ pequeños ($\tau < 2$ a 3 años); a efectos de cálculo, y para mejorar la solución numérica de la ecuación, se ha considerado, además, la discretización del intervalo de integración en 10 partes (Ecuación [36]).

$$C_t = \sum_{k=1}^{N \times 10} \frac{1}{\tau} c(t_k') e^{\left[-\frac{1+\lambda\tau}{\tau}(t-t_k')\right]} \Delta t \quad [36]$$

Siendo:

- N : Número de años.
- $c(t_k')$: Concentración correspondiente al tiempo t_k' .
- t_k' : Tiempo correspondiente a cada subintervalo k .
- Δt : Incremento de tiempo entre dos subintervalos (= 1/10 año).
- τ : Tiempo de residencia en años.
- λ : Constante radiactiva del tritio = 0,055746 años⁻¹.

La representación de los datos de este modelo se muestra en la Figura 52.

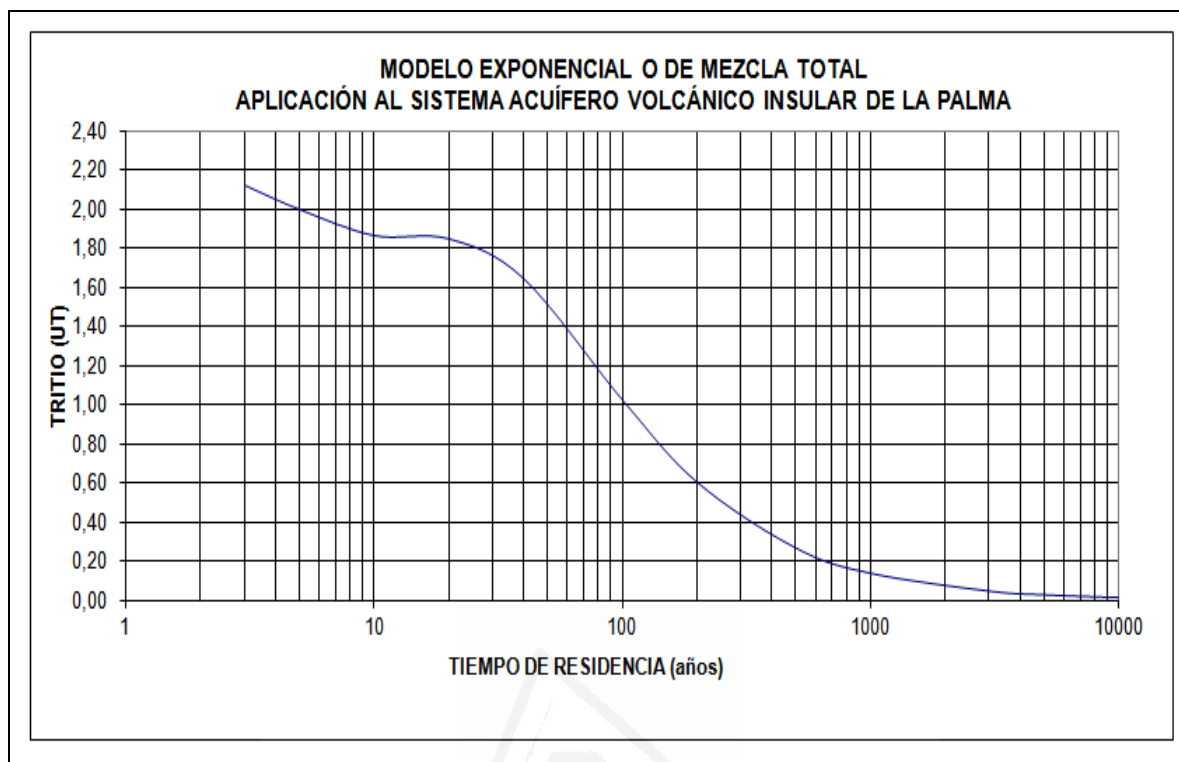


Figura 52. Tiempo de residencia del agua subterránea en el sistema acuífero volcánico insular de La Palma en función de la concentración de tritio muestreado en captaciones de agua subterránea de la isla. Año de referencia para el cálculo: 2014. Actualizado de Poncela (2006, 2014).

El conocimiento previo de la hidrogeología debe asumir que no se producen, o son muy poco significativas, las recargas directas al acuífero, de manera que el reservorio tenga tiempo de homogeneizar las aguas existentes con las de las sucesivas recargas. Esta situación se produce satisfactoriamente en el interior del sistema acuífero, mientras que para niveles más próximos a la superficie freática, puede existir cierta influencia, con lo que estos niveles superiores presentarían cierta estratificación de aguas con mayor contenido en tritio que su equivalente totalmente homogeneizado.

En el caso del túnel de trasvase se han detectado valores inferiores a 0,5 UT en el acuífero del núcleo del macizo de Cumbre Nueva, con más de 800 m de montera, lo que indicaría unos tiempos de renovación centenarios (Skupien y Poncela, en CIAP, 2006; Skupien y Poncela, 2007) y, posiblemente milenario en algún caso.

5.2.4.3. Modelo de mezcla simplificado exponencial decreciente

Otra forma de abordar la interpretación del contenido en tritio en las aguas subterráneas consiste en ajustar un modelo exponencial decreciente (Custodio, 1984), cuya formulación simplificada que se presenta (Custodio y Custodio, 2013), permite la sustitución de los valores reales de la función de entrada de tritio por una función matemática sencilla en la que se parametrizan, a partir de la

gráfica, los valores de concentración previos al pico, el valor del pico y valor postpico a decaimiento; el tramo de decaimiento se caracteriza por una constante de decaimiento λ' que se obtiene gráficamente, cuyo valor aproximado varía de un lugar a otro dependiendo del efecto marino o continental y la posible incorporación de tritio por la existencia de instalaciones nucleares y, en menor medida, de los usos industriales del tritio.

Para el caso de La Palma (y las Canarias Occidentales en general), su definición puede observarse en la Figura 53. Dicho valor ajustado es $\lambda' = 0,15 \text{ años}^{-1}$. Otros valores comparativos se presentan en la Tabla 47.

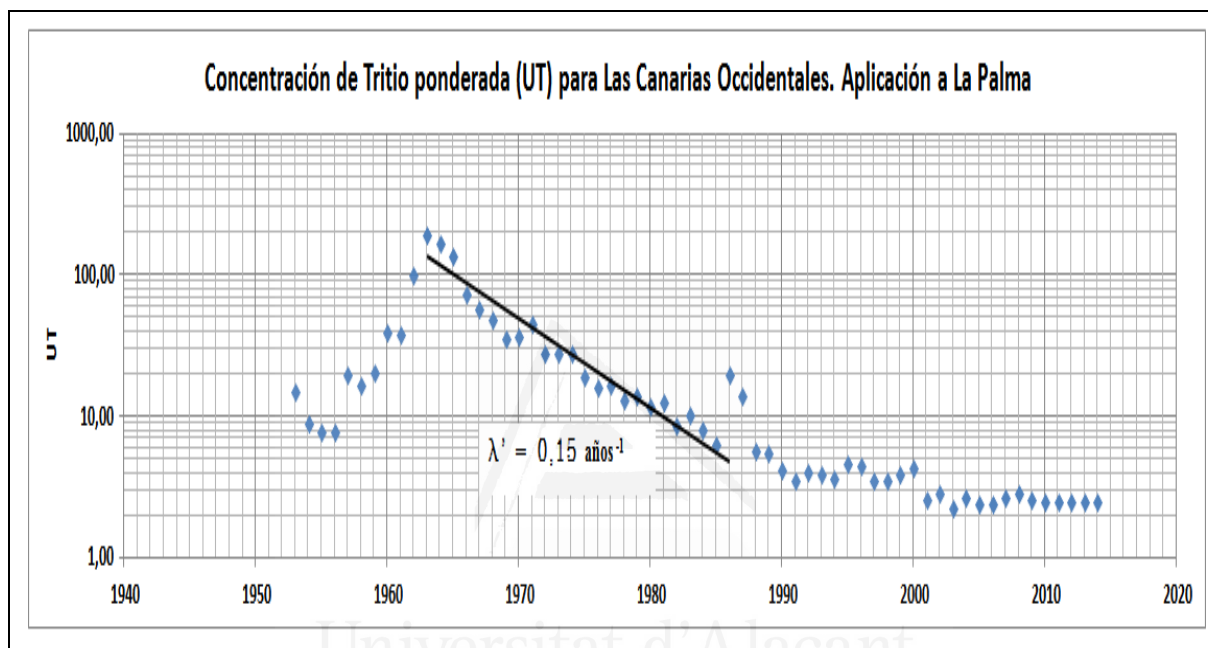


Figura 53. Concentración de tritio ponderada anual para las precipitaciones locales en las Canarias Occidentales. Aplicación a La Palma. En negro, ajuste del tramo de decaimiento natural al coeficiente $\lambda' = 0,15 \text{ años}^{-1}$.

En dicho ajuste no se ha considerado el pequeño pico correspondiente a 1986, que puede ser una medida anómala, ni el tramo pseudoestabilizado final por no cumplir el ajuste lineal del decaimiento principal, lo que condicionaría un resultado erróneo (el ajuste global daría una pendiente mucho menor y, en el caso del tramo final, se tendría la situación de fondo actual, con las pequeñas fluctuaciones estacionales, y reflejaría pendiente nula).

Tabla 47. Valores del coeficiente de decaimiento λ' (años⁻¹) deducidos de los datos existentes para el hemisferio norte (extraído de Custodio y Custodio, 2013).

Zona geográfica	Coeficiente de decaimiento λ' (años ⁻¹)
Península Ibérica	
Madrid	0,15
Barcelona	0,13
Gibraltar	0,11
Faro	0,11
Europa y América del Norte	
Valentia (Irlanda)	0,11
Vienna (Austria)	0,12
Ottawa (Canadá)	0,05
Otros	
Yakarta (Indonesia)	0,08
Kaitoke (nueva Zelanda)	0,11

La expresión que permite calcular la concentración de tritio en este modelo viene definida por (Ecuación [37]):

$$g(t) = \frac{1}{1 + \lambda\tau} \left[c_2 - (c_2 - c_1)e^{-\left(\frac{1}{\tau} + \lambda\right)\Delta t} \right] + \left[\frac{(c_m - c_2)e^{-\lambda'\Delta t}}{\tau \left(\frac{1}{\tau} + \lambda - \lambda'\right)} \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{\tau} + \lambda - \lambda'\right)\Delta t} \right) \right] \quad [37]$$

Siendo:

$g(t)$: Concentración de la mezcla (UT).

c_1 : Concentración previa al pico de tritio (UT).

c_m : Concentración del pico generado en t_1 (UT).

c_2 : Valor asintótico final (UT).

t : Tiempo actual de referencia.

t_1 : Tiempo en que se produce el pico de tritio.

Δt : Tiempo transcurrido desde el pico al tiempo de referencia.

τ : Tiempo de residencia en años.

λ : Constante radiactiva del tritio = 0,055746 años⁻¹.

λ' : Constante de decaimiento exponencial del ajuste de la función de entrada de tritio [t⁻¹].

Los parámetros característicos que se han utilizado para representar gráficamente la función (Figuras 54 y 55) han sido: $\lambda' = 0,15$ años⁻¹; $C_1 = 8$ UT; $C_m = 195$ (UT) y $C_2 = 2,5$ UT.

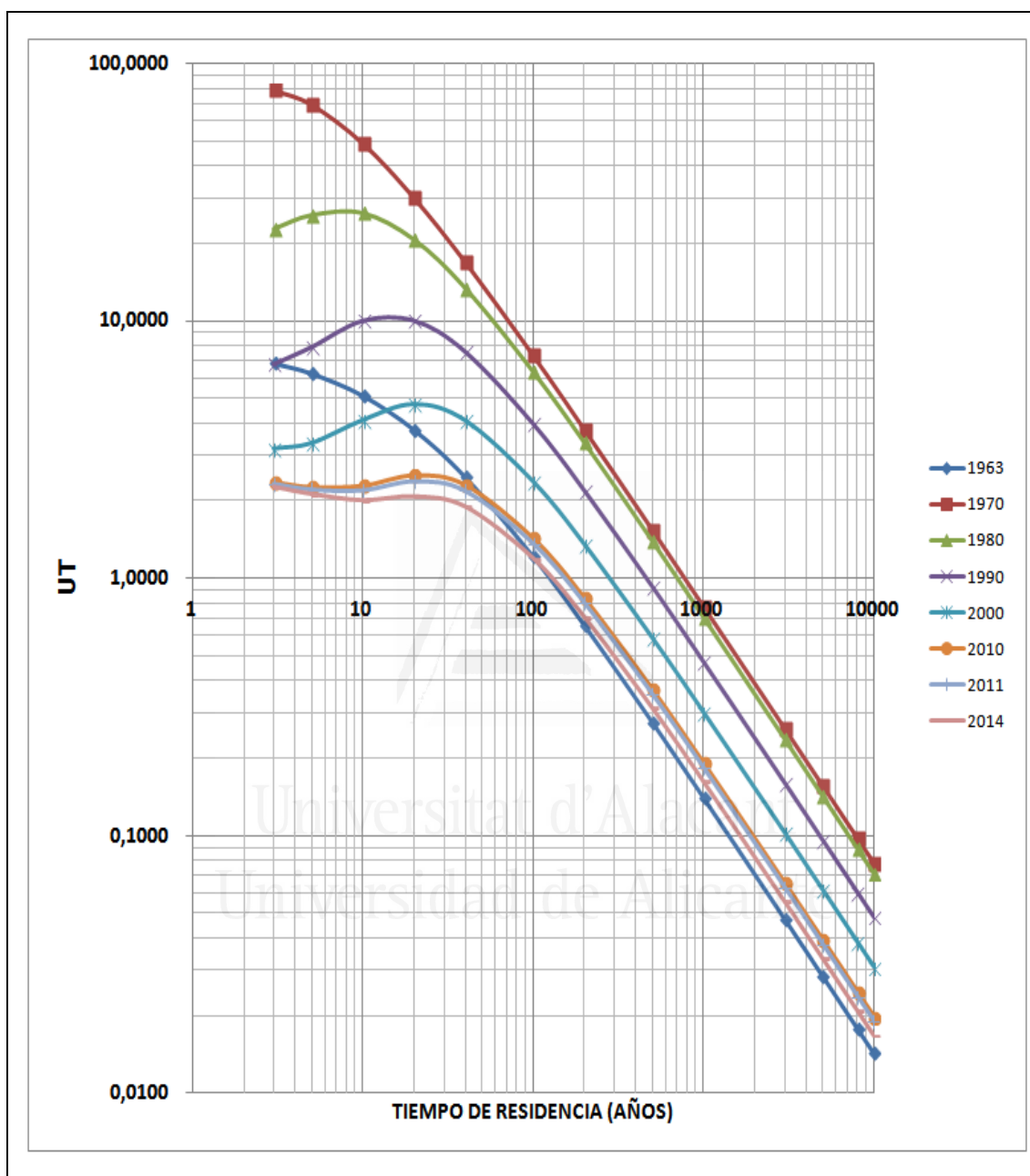


Figura 54. Representación de la evolución temporal del contenido en tritio en función del tiempo de residencia τ (años) para el año considerado, tomando como referencia de cálculo el pico de 1963. Aplicación a La Palma.

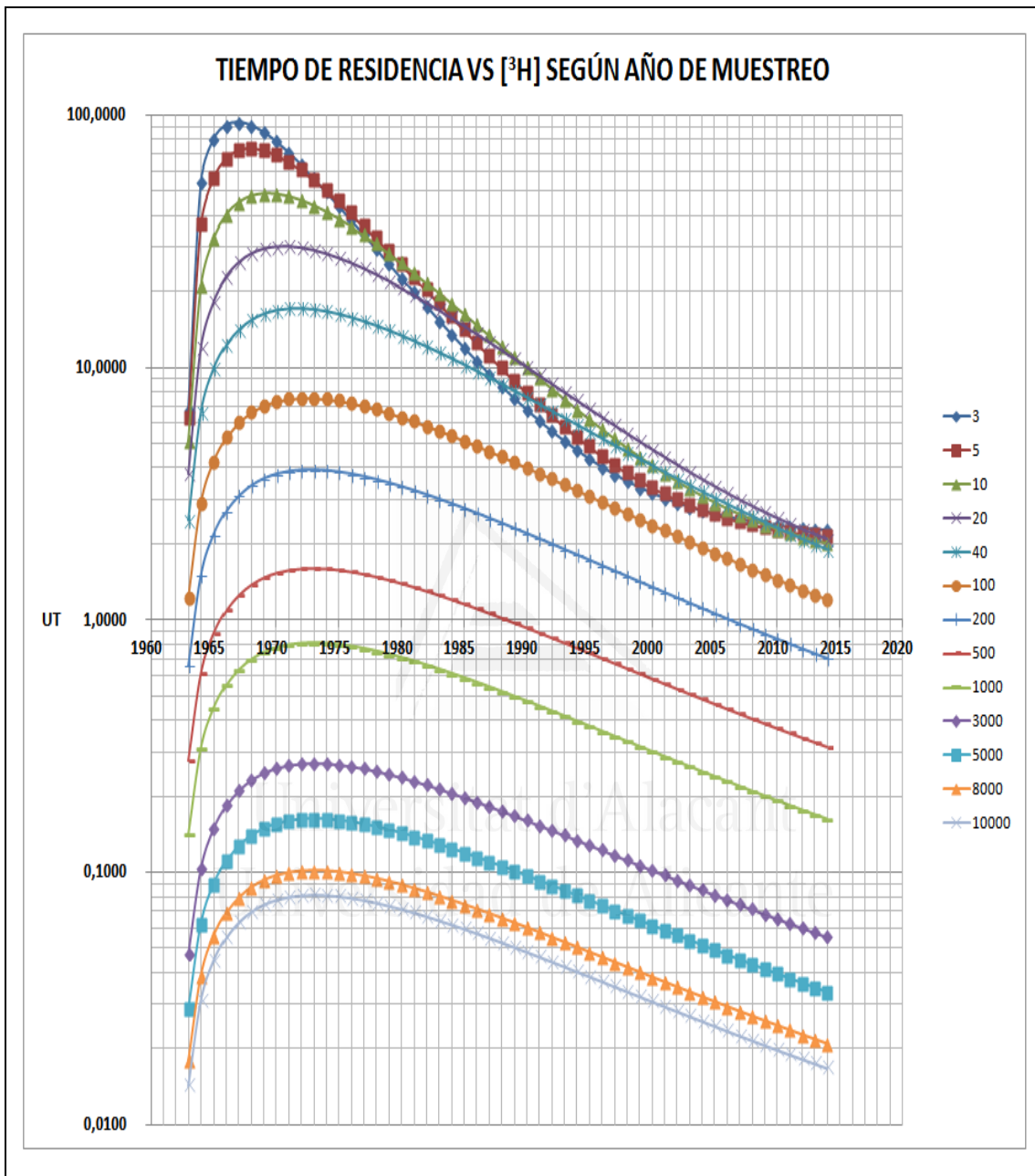


Figura 55. Representación de la evolución temporal del contenido en tritio en función del año para diversos tiempos de residencia τ (años), tomando como referencia de cálculo el pico del año 1963. Aplicación a La Palma.

5.2.4.4. Valoración de los resultados

La comparación de los métodos utilizados para la interpretación del contenido en tritio de las aguas subterráneas de La Palma varían muy ligeramente, debido especialmente a la parametrización que se realiza para el método simplificado (Custodio y Custodio, 2013) y que tiene una componente "subjetiva". No obstante, al ser el fundamento numérico el mismo, dicha diferencia permite acotar las incertidumbres asociadas al método, teniendo siempre presente la aplicabilidad conceptual de la mezcla total en el acuífero.

La Figura 56 muestra la comparación entre las gráficas que relacionan la concentración de tritio en las aguas subterráneas de La Palma en función del tiempo de residencia, calculadas por los métodos anteriormente expuestos y de acuerdo con un modelo interpretativo de mezcla total, perfectamente asumible en el núcleo de los macizos rocosos que componen el sistema acuífero volcánico insular.

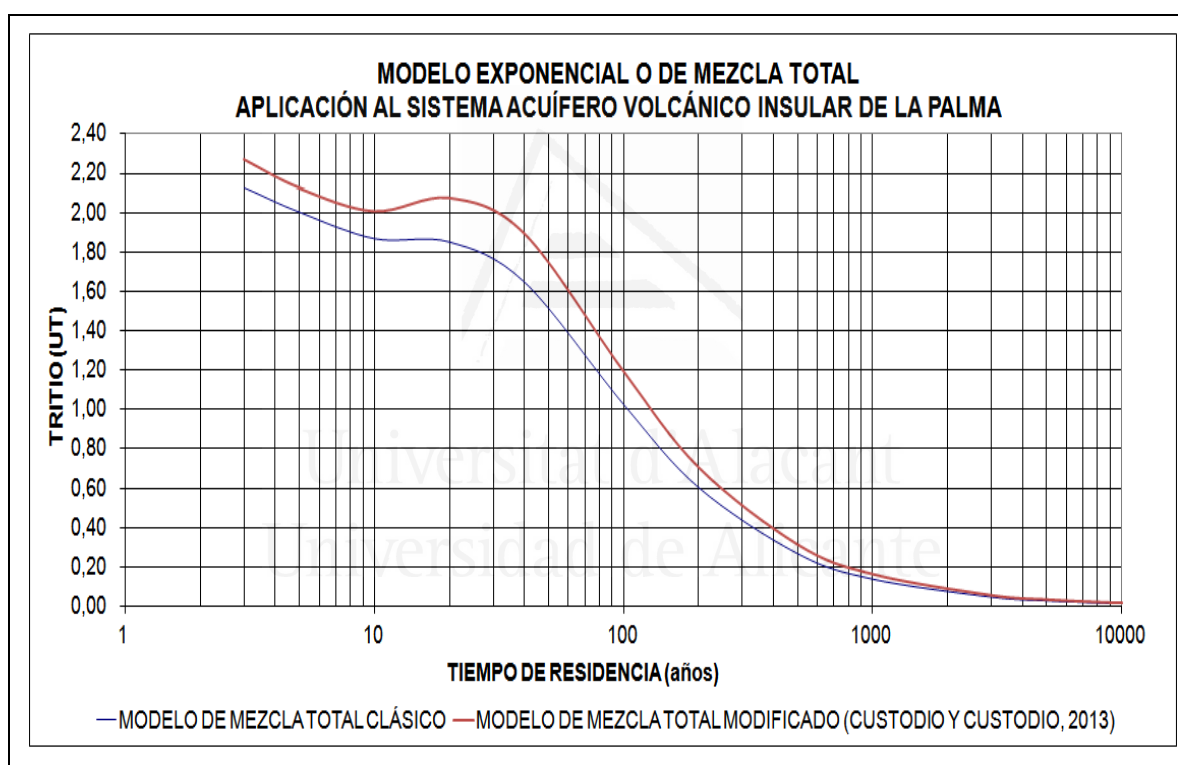


Figura 56. Comparación de los modelos interpretativos que relacionan la concentración de tritio en función del tiempo de residencia del agua subterránea en el sistema acuífero volcánico insular de La Palma. Año de referencia para el cálculo: 2014.

Como puede apreciarse, para tiempos de residencia centenarios las diferencias son mínimas (homogeneización de la mezcla), mientras que para tiempos recientes e inferiores a la última centuria (con base en 2014), esas diferencias son algo mayores. Se puede afirmar que aguas cuyos tiempos de residencia sean inferiores a 11 años (de acuerdo con la gráfica) son aguas recientes o con un corto tiempo de tránsito a través de la zona no saturada (en el caso de La Palma, esta circunstancia puede suponer de semanas a escasos meses, por lo que la aplicación de un modelo de

flujo de pistón para esta zona puede descartarse razonablemente, y así simplificar el cálculo, con un mínimo error).

El error o incertidumbre asociado a las medidas de tritio, facilitado por el propio laboratorio, es del orden de $\pm 0,1$ UT, por lo que en el caso de concentraciones bajas llega a ser del mismo orden de magnitud, o incluso superior que la propia medida, mientras que para valores contrastables muestra una muy buena precisión en la determinación analítica. No obstante, cuando la muestra patrón tiene una "antigüedad" similar a la muestra o es incluso más "joven", se pueden producir situaciones absurdas; en general, el propio laboratorio suele avisar de esta circunstancia, y siempre se tiene en cuenta para la interpretación de los resultados.

Los resultados obtenidos por ambos modelos son bastante similares, presentando un error cuadrático medio (ECM) de un 12,8% y un índice de ajuste (IOA) de 0,99, lo que se entiende como muy bueno en este tipo de modelos interpretativos del tritio en el acuífero (Poncela et al., 1992).

En el caso de tiempos de tránsito de varias décadas, las aguas subterráneas se pueden suponer recargadas anteriores al pico de 1963 (etapa prenuclear). El conocimiento del fondo actual y el funcionamiento del sistema acuífero volcánico insular contribuyen a que esta hipótesis sea razonablemente asumible.

Del análisis de las hipótesis de partida anteriormente comentadas, así como del resultado calculado por los modelos interpretativos de concentración de tritio de las aguas subterráneas de La Palma en función del tiempo de residencia, y si se acepta que la presencia de valores significativos en la concentración de tritio en el agua subterránea (o por lo menos, contrastables) se interpreta como un indicio claro de recarga reciente, se tiene que las precipitaciones actuales están contribuyendo de manera significativa a la recarga natural del sistema, especialmente en los niveles estratificados más altos de las masas acuíferas.

En base a este razonamiento derivado del análisis de la información hidrogeológica del sistema acuífero volcánico de La Palma, se pueden caracterizar los siguientes sistemas de flujo:

- Sistema de flujos regionales asociado a las zonas de recarga natural, tanto en los macizos del cono norte y zona de Caldera de Taburiente - Roque de Los Muchachos, así como en el Macizo de Cumbre Nueva, en dirección cumbre-mar. Se caracteriza por la existencia de sistemas de circulación lentos y profundos, largo periodo de interacción agua-roca, presencia de agua de origen prenuclear (mayor de 50 años) que se identifica con concentraciones de tritio $< 0,5$ UT, sin indicios de recarga reciente (o muy poco significativa) hasta la fecha, con conexión directa a la zona de descarga en la franja de alumbramiento y, posiblemente, con estratificación de aguas más recientes en los niveles superiores del embalse subterráneo. Los tiempos de residencia suelen ser elevados.
- Sistema de flujos locales, tanto en zonas elevadas como de medianías, incluso zonas cercanas a la franja costera. Se caracteriza por la existencia de sistemas de rápida circulación y renovación, de interacción rápida con el terreno que atraviesan, baja mineralización y con indicios de recarga reciente marcados por la presencia de tritio en concentraciones

apreciables y contrastables ($> 1,5-2$ UT). Dentro de estos flujos pueden considerarse situaciones intermedias caracterizadas por un contenido en tritio entre 0,5-1,5 UT. Su correcta identificación necesita de un buen conocimiento hidrogeológico e hidroquímico del entorno, y de una correcta argumentación de los procesos de mezcla en el acuífero que contribuyan a la aplicación del modelo de mezcla total.

No obstante lo anterior, debe tenerse en consideración que el sustrato geológico permite una permeabilidad vertical muy superior a la horizontal, por lo que es en el acuífero donde se producen las mezclas de aguas y, por lo que parece, se dispone de tiempo suficiente para ello pero, la existencia de vías preferentes por discontinuidades y macroporos, que acortan el tiempo de tránsito a través de la zona no saturada, puede interferir en la interpretación, especialmente en situaciones intermedias donde siendo esperables valores casi nulos de tritio, puedan aparecer concentraciones muy bajas (en ocasiones del orden de la incertidumbre).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



CAPÍTULO 6

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

REVISIÓN DEL MODELO HIDROGROLÓGICO INSULAR CONCEPTUAL

CAPÍTULO 6. REVISIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO INSULAR CONCEPTUAL

En este capítulo se revisa el modelo hidrogeológico conceptual a partir del análisis e interpretación de los datos obtenidos en este trabajo de investigación, en particular mediante la mejora de: el conocimiento geológico-hidrogeológico regional, la estimación de la recarga natural, la parametrización hidrogeológica y la profundización en la caracterización hidroquímica e isotópica ambiental de las aguas subterráneas de La Palma. Todo ello ha contribuido a un mejor conocimiento del funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero volcánico insular



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.1. ANTECEDENTES

El modelo hidrogeológico conceptual de funcionamiento fue planteado durante los estudios de la UNESCO (SPA-15, 1975) y caracterizado como sistema 86 (ITGE, 1989). La revisión y recopilación de información que se generó durante la redacción del Avance de los Plan Hidrológico de La Palma (APHP, 1992) sentó las bases de un modelo apoyado en la reinterpretación geológica de la isla a partir de los datos proporcionados por la geología del subsuelo, que suministró la perforación de galerías durante décadas, destacando la definición de la estructura COEBRA, en la zona norte, que contribuiría a tener un conocimiento más realista de la circulación de flujos subterráneos.

No obstante, seguían existiendo ciertas indefiniciones que motivaban que los resultados de los balances no se correspondiesen con la situación hídrica; en particular se subestimó la evapotranspiración, la escorrentía superficial y, por consiguiente, se sobreestimó la infiltración, situación esta que se ha mantenido hasta fechas recientes (PHP, 2001; APHP, 2012 y 2015).

Asimismo, el intento de parametrización hidrogeológica que se realizó durante el SPA-15 se dejó de lado aduciendo que "los terrenos volcánicos eran diferentes y que no se podían aplicar las formulaciones establecidas", concepción esta mantenida a día de hoy por muchas autoridades hidráulicas en el archipiélago.

No solo esta afirmación no es cierta sino que carece de base rigurosa, pues ya el SPA-15 obtuvo conclusiones muy significativas, apoyadas posteriormente por estudios específicos del IGME; Custodio, 1978 y 1983; ITGE, 1989 y Veeger, 1991. En esa misma línea, el geólogo que suscribe, Roberto Poncela, tanto en informes profesionales como en actividades de investigación aplicada ha conseguido importantes resultados que han permitido afianzar el conocimiento hidrogeológico del sistema acuífero volcánico insular (consultar bibliografía).

En La Palma son de aplicación las mismas leyes físicas que en el resto de territorios y, debido a la heterogeneidad espacial y anisotropía de los materiales que constituyen el sistema acuífero volcánico insular, el efecto de escala juega un papel primordial, por lo que es prioritario tener los conocimientos suficientes para definir el volumen elemental representativo. En general, a media y gran escala, el comportamiento acuífero es similar al de otros cuerpos de agua subterránea en otros ambientes, con ciertas particularidades (presencia de diques, "mortalones", etc.), por lo que son aplicables los mismos principios, con la debida cautela. No obstante, es cierto que a día de hoy todavía falta mucho desarrollo numérico que deberá producirse en los próximos años.

Para la zona de La Caldera de Taburiente y El Roque de Los Muchachos recientemente se ha presentado un modelo conceptual de funcionamiento (Martos et al., 2015; Morales et al., 2015) en el que se presenta poca conexión hidráulica entre las galerías que drenan esta área y los manantiales de cumbre, por presencia de niveles impermeable tipo almagre, y por considerar que los hidrogramas de caudales no reflejan suficientemente la estacionalidad meteorológica, aun existiendo diques y discontinuidades que conectan la superficie con el acuífero.

También se ha considerado tradicionalmente el importante impacto que produce la sobreexplotación de acuíferos, término que ha sido forzado en el lenguaje coloquial, no siempre con un criterio técnico suficientemente fundado. En este sentido, desde finales de la década de los ochenta se habla ya de sobreexplotación en La Palma (APHP, 1992), especialmente en el Valle de Aridane y en el acuífero COEBRA. Esta situación, recogida en el planeamiento, conlleva medidas legales muy restrictivas (Custodio, 1989a) que en La Palma nunca se produjeron. Unido a esta sobreexplotación citada estaban los procesos de intrusión marina que estaban reconocidos en la franja costera del Valle de Aridane y Tazacorte, así como en la costa de Santa Cruz de La Palma a San Andrés y Sauces. Este tipo de problemáticas ya fueron analizadas en Canarias (Poncela, 1997) y en la actualización del Plan Hidrológico de La Palma (Poncela y Skupien, 2013; APHP, 2015).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.2. ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Del conocimiento de la geología insular, así como de la revisión de la información hidrogeológica disponible y de la que se ha generado para este trabajo se puede afirmar que las series infrayacentes que constituyen el zócalo, ya sean aglomerados de tránsito, contacto con la estructura COEBRA o Complejo Basal, actúan como un nivel de base de baja a muy baja permeabilidad (a efectos prácticos, en general impermeable) aunque, ocasionalmente, los aglomerados permiten circulación de agua si el grado de compactación no ha sido excesivo. Las unidades generalmente aglomeráticas y de muy baja permeabilidad correspondientes al tránsito con el Edificio Garafía (también conocido como Taburiente I en la literatura del Avance del Plan Hidrológico de La Palma (PHP, 1992)), también quedarían englobadas en este zócalo.

El sistema acuífero principal queda englobado en las series basálticas del Edificio Taburiente Inferior y del Edificio Garafía, constituidas por apilamientos de coladas basálticas y escorias asociadas, con niveles piroclásticos discontinuos. Si bien existe cierto grado de compactación y de alteración, en general se preserva bastante la porosidad primaria, con moderada alteración.

Suprayacente al Edificio Taburiente Inferior, se presentan en una amplia distribución las series basálticas del Edificio Taburiente Superior, incluido el arco de Cumbre Nueva, constituidas por apilamientos de coladas basálticas y escorias asociadas, con niveles piroclásticos discontinuos. Ello confiere a estos materiales una elevada permeabilidad dado que están poco compactados y poco alterados, conservando prácticamente la porosidad inicial.

Así pues, el Edificio Taburiente (Inferior y Superior), conocido como Taburiente II en la literatura del Avance del Plan Hidrológico de La Palma (PHP, 1992) y las litologías basálticas y piroclásticas del Edificio Garafía, se constituyen como el principal reservorio de aguas subterráneas, definiendo la denominada masa de agua subterránea LP001.- Acuífero Insular-Vertientes (Poncela, 2005a y 2009; APHP, 2015).

La casi totalidad del sistema acuífero volcánico se halla atravesado por una intrincada red de diques, tanto más densa cuanto más próxima a las zonas de “rift” o ejes estructurales de La Palma (fundamentalmente en dirección N-S), pero no debe descartarse la influencia periclinal del arco norte, lo que amplía el abanico de direcciones desde el NO al NE.

Si se prescinde de la red de diques del Complejo Basal (zócalo impermeable), el acuífero principal se halla compartimentado por los diques que individualizan el macizo a modo de celdas, generalmente no estancas como lo demuestran los análisis isotópicos ambientales de las aguas subterráneas. Estos diques actúan de barrera hidrogeológica, apantallando el flujo subterráneo y haciendo que los niveles piezométricos tengan una altura superior a la que les correspondería como consecuencia directa del efecto de los coeficientes de almacenamiento de las formaciones acuíferas involucradas.

Unido con lo anterior, la marcada heterogeneidad espacial de las litologías presentes, así como la fuerte anisotropía vertical, contribuyen también a este efecto.

En ocasiones, los niveles de derrubios de avalancha ("debris avalanche" o "mortales") suelen ejercer efecto de semiconfinamiento (incluso confinamiento) sobre ciertos sectores del sistema acuífero, lo que también contribuye a una sobreelevación del nivel piezométrico local.

En general, el flujo subterráneo se dirige desde la zona de cumbres hacia mar, mediante caminos tortuosos dificultados por la presencia de diques, llegando a alcanzar los niveles piezométricos regionales alturas próximas a los 1.800 msnm en la zonas internas (Caldera de Taburiente) hasta llegar al nivel del mar en la zona costera.

De acuerdo con la información hidrogeológica recopilada, de la revisión y análisis de la misma, así como del modelo geométrico conceptual revisado, se presentan en las Figuras 57 y 58 los cortes geohidrológicos de interés que abarcan los sectores más representativos y formaciones acuíferas más relevantes de La Palma (adaptado de Poncela, 2009).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

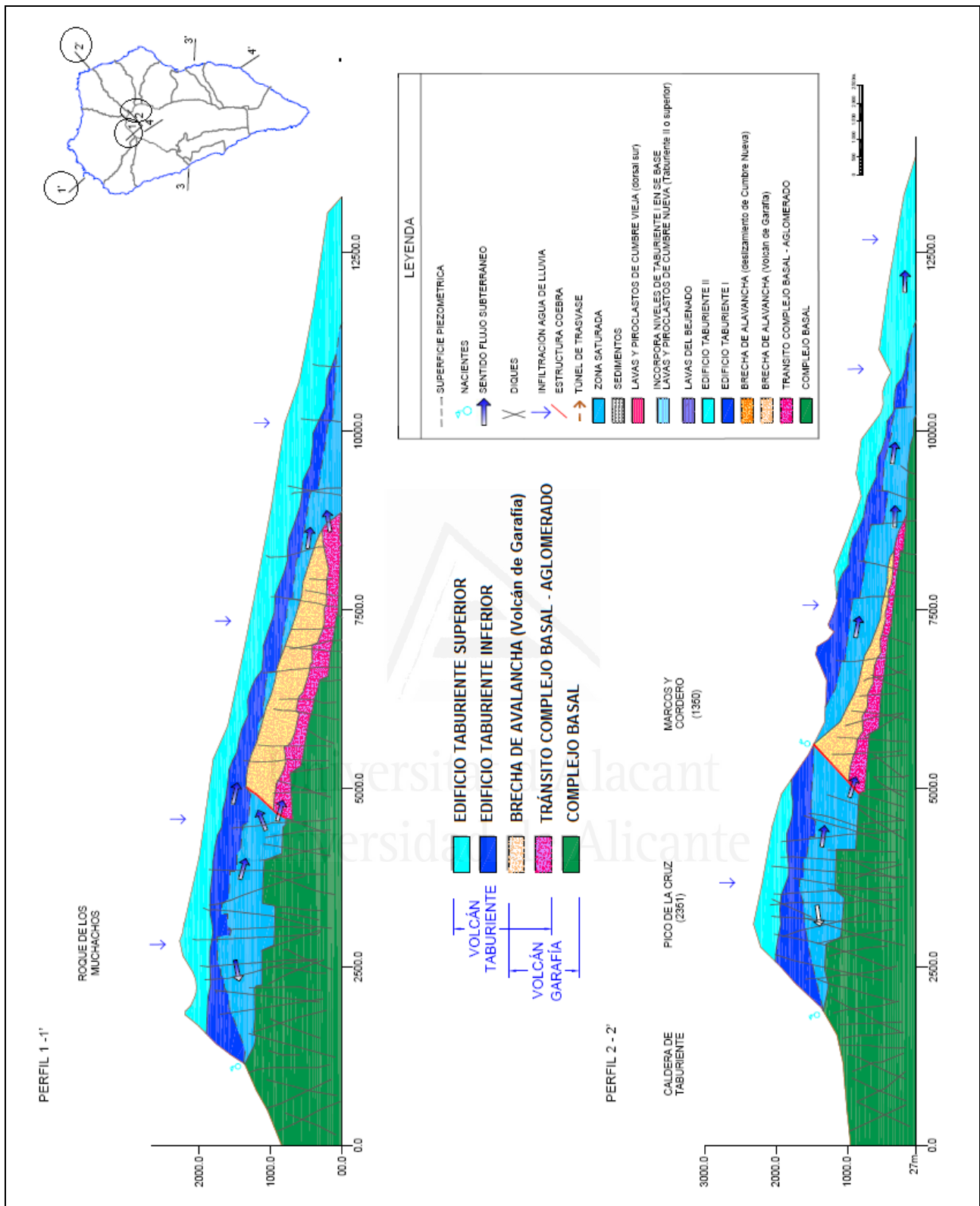


Figura 57. Cortes hidrogeológicos representativos del sistema acuífero complejo insular de La Palma. Zona Norte. Topografía: SITCAN. Reconstrucción a partir de datos del CIAP, CSIC y del hidrogeólogo Roberto Poncela.

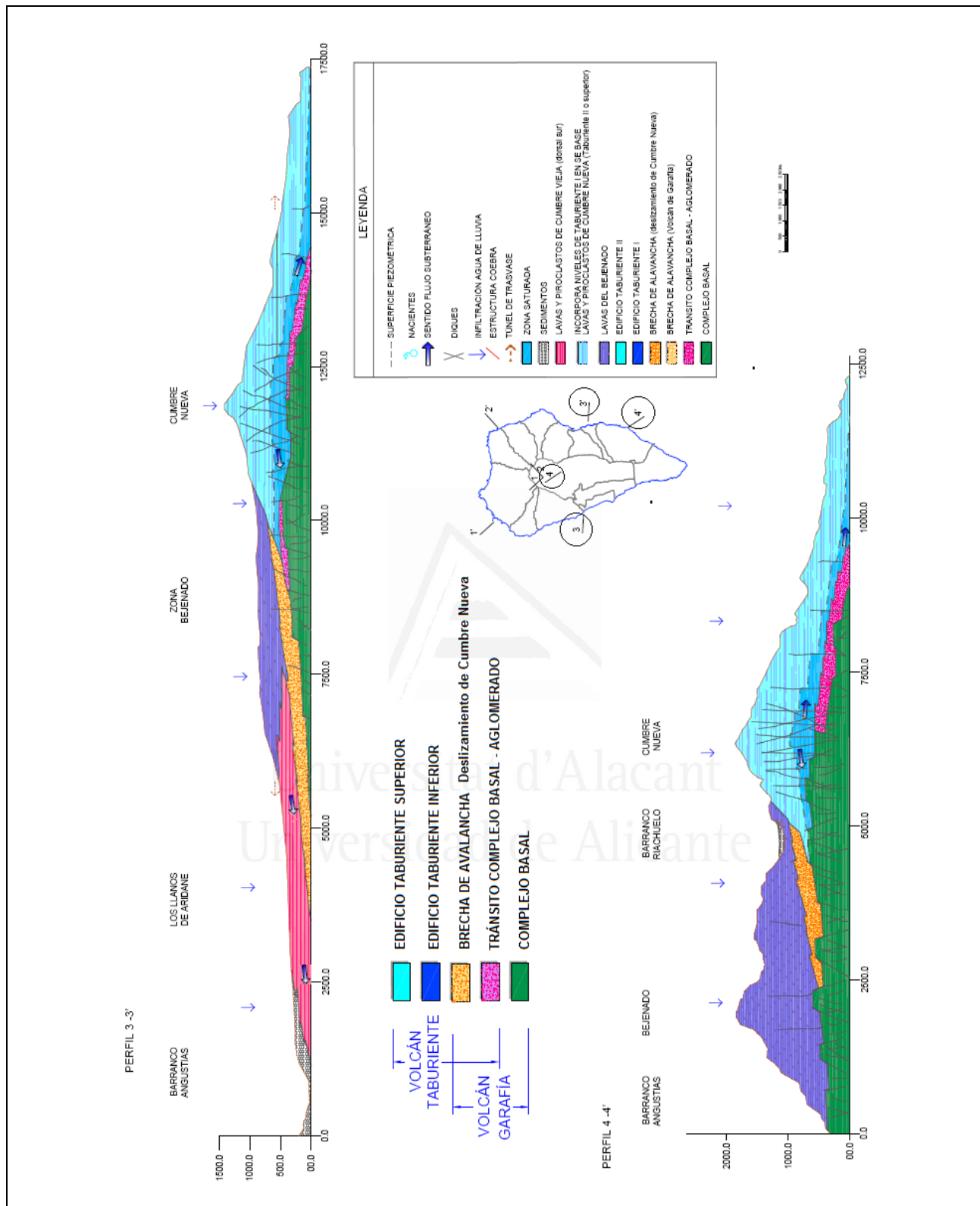


Figura 58. Cortes hidrogeológicos representativos del sistema acuífero complejo insular de La Palma. Zona Centro. Topografía: SITCAN. Reconstrucción a partir de datos del CIAP, CSIC y del hidrogeólogo Roberto Poncela.

6.3. FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO DEL SISTEMA ACUÍFERO VOLCÁNICO DE LA PALMA

En base a la información recopilada y generada para este trabajo, analizada y reinterpretada, se describe a continuación el funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero volcánico de La Palma:

- La recarga natural al sistema se produce por la infiltración del agua de lluvia a través del terreno, incluida la cobertera edáfica, en su caso. En general, existe una importante zona no saturada que suele presentar potencias entre varias decenas a varios centenares de metros, especialmente en las zonas de cumbres y medianías altas.
- En general, el flujo subterráneo se dirige desde la zona de cumbres hacia mar, mediante caminos tortuosos dificultados por la presencia de diques, llegando a alcanzar los niveles piezométricos regionales alturas próximas a los 1.800 msnm en las zonas internas hasta llegar al nivel del mar en la zona costera.
- La zona nororiental es la que presenta una mayor circulación subterránea como consecuencia de ser la zona con mayores índices de recarga natural, condicionados por la influencia casi permanente de los vientos alisios, cargados de mucha humedad (Figura 59).
- La zona de Cumbre Nueva se alimenta de la recarga natural del propio macizo de Cumbre Nueva y de una pequeña fracción proveniente del Norte, en la zona de tránsito. La contribución subterránea del sur parece muy poco relevante o casi nula, lo cual se apoya en estudios científicos hidrogeológicos, a partir de las mediciones de los isótopos ambientales del agua subterránea local.
- En este sentido, se caracterizan, al menos, dos sistemas principales de circulación de flujo subterráneo:
 - ✓ Sistema de flujos regionales asociado a las zonas de recarga natural, tanto en los macizos del cono norte y zona de Caldera de Taburiente - Roque de Los Muchachos, así como del Macizo de Cumbre Nueva, en dirección cumbre-mar. Este sistema presenta circulación lenta y profunda, largo periodo de interacción agua-roca, presencia de agua de origen prenuclear (mayor de 50 años) que se identifica con concentraciones de tritio $< 0,5$ UT, sin indicios de recarga reciente (o muy poco significativa) hasta la fecha, con conexión directa a la zona de descarga en la franja de alumbramiento y, posiblemente, con estratificación de aguas más recientes en los niveles superiores del embalse subterráneo. Los tiempos de residencia suelen ser elevados.
 - ✓ Sistema de flujos locales, tanto en zonas elevadas como de medianías, incluso zonas cercanas a la franja costera. Este sistema presenta rápida circulación y renovación, de interacción rápida con el terreno que atraviesan, baja mineralización y con indicios de recarga reciente marcados por la presencia de tritio en concentraciones apreciables y contrastables ($> 1,5$ -2 UT).

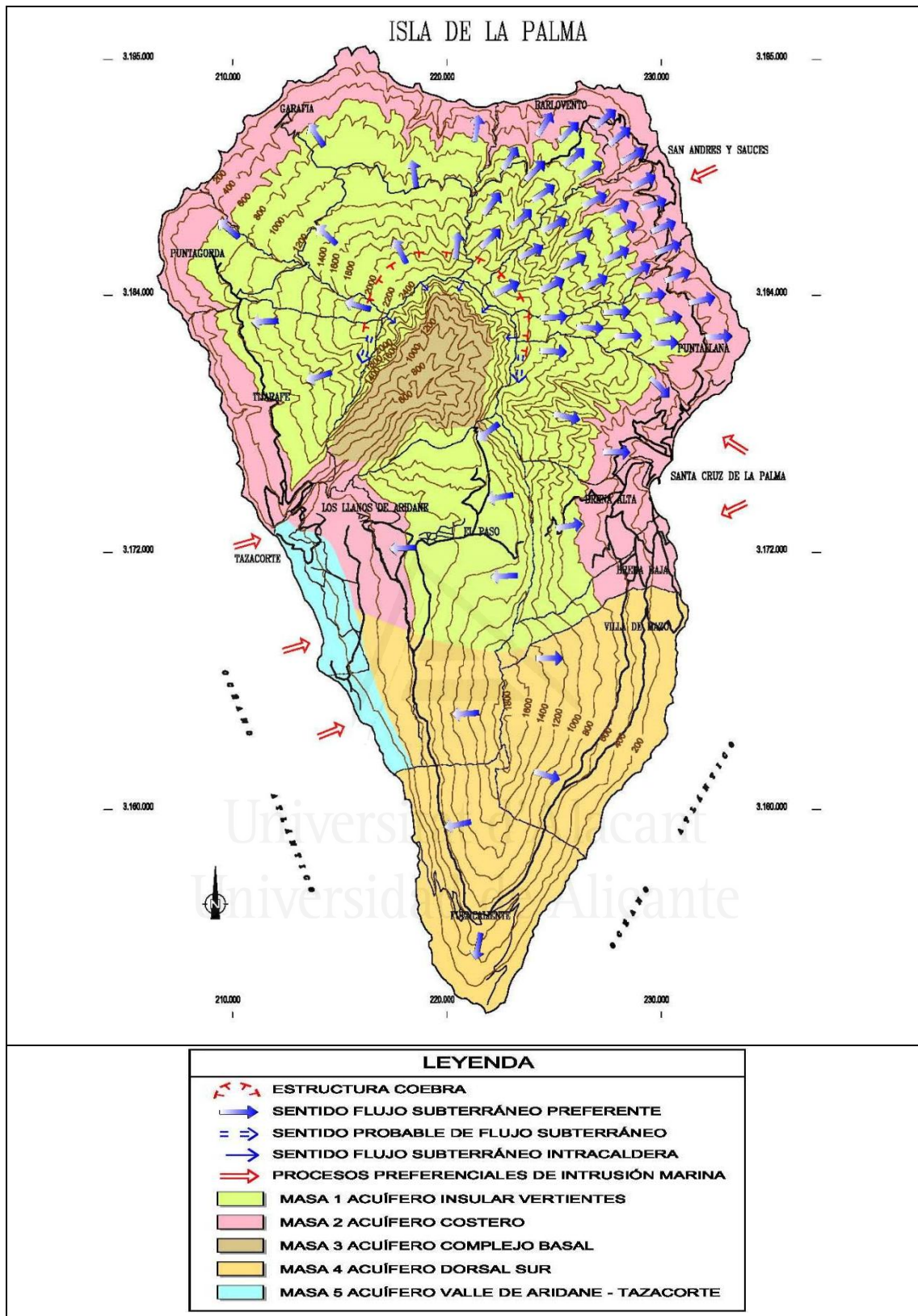


Figura 59. Circulación del flujo subterráneo de la Isla de La Palma (adaptado de Poncela, 2005a).

- Los isótopos estables del agua subterránea han permitido caracterizar la recta meteórica local, así como la rectas altitudinales promedio:
 - ✓ La ecuación de la recta de ajuste que se propone para las aguas subterráneas de La Palma es $\delta D = 6,55 \cdot \delta^{18}O + 9,03$. La pendiente difiere de la situación de fraccionamiento en equilibrio (valor 8), lo que sugiere una cierta evaporación en el momento de la infiltración.
 - ✓ La zona septentrional muestra unos valores promedio de exceso de deuterio $d = +9$ a $+15$, contrastables con los de la vertiente oriental y Cumbre Nueva, con $d = +15$ a $+24$, lo que vendría a confirmar que la zona norte y noreste, sometida a los vientos alisios, cargados de humedad, influyen de manera más directa en la recarga zonal, de ahí esos valores más bajos de exceso de deuterio en comparación con los de la zona oriental, dado que el tránsito de las lluvias provenientes del aliso hacia zonas más meridionales y o influencias más "saharianas", relativamente más elevados, son característicos de una mayor aridez.
 - ✓ Con estos datos se pone de manifiesto que la recarga natural principal al sistema hidrogeológico se produce entre la zona de cumbres y la zona de medianías altas, ajustándose dos nuevas rectas altitudinales Ecuaciones [38] y [39]:

$$H = -499,37 \cdot \delta^{18}O - 954,44 \quad (\text{gradiente: } = -0,20 \cdot \delta^{18}O/100 \text{ m}) \quad [38]$$

$$H = -77,58 \cdot \delta D - 289,37 \quad (\text{gradiente: } -1,28 \cdot \delta D/100 \text{ m}) \quad [39]$$

Siendo:

- H : Altura de la zona de recarga, expresada en m.
- δD : Variación de la relación isotópica del deuterio respecto al patrón SMOW o V-SMOW expresada en tanto por mil.
- $\delta^{18}O$: Variación de la relación isotópica del oxígeno-18 respecto al patrón SMOW o V-SMOW expresada en tanto por mil.

- La permeabilidad vertical es muy superior a la horizontal, en general con un orden de magnitud mayor que 100, lo que contribuye a que en pocos meses el agua llegue al acuífero, en especial en la zona de cumbres, donde valores promedio de dos a tres meses llegan a detectarse.
- En cambio, la transmisión horizontal se hace de manera mucho más lenta, coexistiendo sistemas locales de flujo con sistemas regionales con varias decenas hasta centenas de años de tránsito por el acuífero, lo que se demuestra a partir del contenido de tritio de las aguas subterráneas.
- Existen numerosos acuíferos colgados que dan lugar a multitud de manantiales o nacientes, la gran mayoría relacionados con el contacto con el complejo basal y aglomerados de tránsito y, en otros casos, ligados a la presencia de almagres o suelos arcillosos.

- La contribución del suelo al almacenamiento de agua (reserva útil) no es en absoluto despreciable, y su estimación es fundamental dado que reduce el valor asignado a la infiltración (tradicionalmente sobredimensionado) en la planificación hidrológica.
- Los barrancos se constituyen como drenes del sistema debido a lo profundo de su encajamiento en el relieve.
- La descarga al mar se realiza a través de la costa, bien sea mediante manantiales sumergidos como consecuencia de su enterramiento por las plataformas lávicas recientes, o como consecuencia de la descarga regional hacia la zona de mezcla agua dulce-agua salada, abarcando la zona intermareal.
- También se destaca la zona geotermal del sur insular, con actividad volcánica presente, y que caracteriza un sistema geotérmico de alta entalpía en roca seca. Como consecuencia de este volcanismo, existe abundante emisión de CO₂ difuso a través del terreno que llega a mineralizar la masa de agua subterránea LP004, lo que confiere a sus aguas una salinidad elevada como consecuencia del aumento de bicarbonatos.
- Se ha detectado cierta actividad hidrotermal en la zona de Dos Aguas, que encajaría con la presencia de CO₂ en galerías situadas entre Cumbre Nueva y La Caldera de Taburiente.
- Las zonas que suelen presentar mayor vulnerabilidad a los procesos de intrusión marina son las del acuífero costero del Valle de Aridane-Tazacorte, zona costera de Santa Cruz de La Palma y zona costera de San Andrés y Sauces.

En relación con las galerías, la situación actual en cuanto a los caudales alumbrados y la longitud perforada se presenta en las Tablas 48 y 49.

Como se observa en las tablas anteriores, los municipios con mayor rendimiento (relación entre el caudal alumbrado por kilómetro de galería perforado) se produce en los municipios de Los Llanos de Aridane y de Puntallana, respectivamente. A nivel de masas de agua subterránea, lógicamente el rendimiento es mayor en la LP001.- Acuífero Insular - Vertientes puesto que la casi totalidad de galerías está ubicada en su superficie.

El rendimiento promedio por kilómetro en galerías se calcula en 5,69 L/s/km perforado, con un máximo de 13,81 L/s/km perforado en el municipio de Puntallana.

En el caso de los pozos, este rendimiento promedio alcanza el valor de 36,44 L/s/km de pozo perforado, es decir, seis veces más, pero en este caso hay que tener en cuenta que este tipo de captaciones suele estar relativamente cerca de la costa, con lo que se presentan fenómenos de salinización frecuentemente, si bien las profundidades medias son muy inferiores a su equivalente en galerías. Se presenta un máximo de 132,95 L/s/km pozo perforado en el municipio de Los Llanos de Aridane.

En conjunto, la perforación de captaciones tipo galerías y pozos, en sus diferentes facetas, define un rendimiento promedio de 7,08 L/s/km perforado.

Tabla 48. Rendimiento de caudal por kilómetro perforado por municipios que disponen de galerías.

MUNICIPIO	Caudal Continuo Q (L/s)	Longitud Galerías LG (km)	Q (L/s) / LG (km)	Sup (km ²)	Lámina equivalente (mm)
BARLOVENTO	189,20	33,67	5,62	43,55	137,16
BREÑA ALTA	155,86	24,42	6,38	30,82	159,66
BREÑA BAJA	0,00	2,66	0,00	14,20	0,00
EL PASO	287,05	54,24	5,29	135,92	66,68
FUENCALIENTE	0,00	0,19	0,00	56,42	0,00
GARAFIA	135,23	38,81	3,48	103,00	41,45
LOS LLANOS DE ARIDANE	113,00	6,03	18,4	35,79	99,68
MAZO	0,00	1,84	0,00	71,17	0,00
PUNTAGORDA	0,00	3,23	0,00	31,10	0,00
PUNTALLANA	162,00	11,73	13,81	35,10	145,74
SAN ANDRES Y SAUCES	113,01	16,01	7,06	42,75	83,46
SANTA CRUZ DE LA PALMA	269,74	49,70	5,43	43,38	196,33
TAZACORTE	0,78	1,40	0,56	11,37	2,15
TIJARAFE	32,90	12,50	2,63	53,76	19,32
TOTAL / PROMEDIO	1.458,77	256,42	5,69	708,32	65,02

Tabla 49. Rendimiento de caudal por kilómetro perforado por masas de agua subterránea que disponen de galerías. (*)

Ajuste superficies.

MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA	Caudal Continuo Q (L/s)	Longitud Galerías LG (km)	Q (L/s) / LG (km)	Sup (km ²)	Lámina equivalente (mm)
LP001	1.456,66	244,49	5,96	318,34	144,47
LP002	0,00	5,69	0,00	176,79	0,00
LP003	1,33	2,01	0,66	31,80	1,32
LP004	0,00	0,00	0,00	162,86	0,00
LP005	0,00	0,78	0,56	20,19	1,21
TOTAL / PROMEDIO	1.457,99	254,98	5,69	710,08*	64,86*



CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En el capítulo actual se realizará una síntesis global del sistema acuífero volcánico de La Palma, atendiendo a la caracterización hidrogeológica, hidroquímica e isotópica ambiental desarrollada en los capítulos precedentes, lo que ha permitido profundizar en el conocimiento del sistema y revisar y actualizar su modelo conceptual de funcionamiento, presentando finalmente las futuras líneas de investigación derivadas del trabajo de investigación llevado a cabo.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

7.1. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha permitido mejorar el modelo hidrogeológico conceptual de funcionamiento del sistema acuífero volcánico de La Palma en base a una mejora conceptual derivada de los siguientes aspectos:

- Mejora y propuesta metodológica para la parametrización hidrogeológica.
- Aplicación de técnicas isotópicas ambientales.
- Redefinición del modelo hidrogeológico conceptual.

7.1.1. Mejora y propuesta metodológica para la parametrización hidrogeológica

En relación a la parametrización hidrogeológica se han analizado los hidrogramas de caudales históricos de las galerías, lo que ha permitido caracterizar una serie de agotamientos tipo, plasmados en una zonificación insular, dependiente de las litologías y la geometría de los puntos de descarga. Del análisis de dichos agotamientos, por ajuste de una función exponencial decreciente tipo Boussinesq-Maillet, se han obtenido los coeficientes de agotamiento característicos del sistema acuífero insular y que, en promedio, oscilan entre $0,001 - 0,0003 \text{ días}^{-1}$ en la zona septentrional y oriental; $0,0002-0,0004 \text{ días}^{-1}$ en la zona occidental y entre $0,0005$ y $0,0009 \text{ días}^{-1}$ en la zona de los Nacientes de Marcos y Cordero (extremo nororiental, ligados a la estructura COEBRA), todos ellos indicativos de magníficos reservorios subterráneos.

A su vez, la relación de este coeficiente de agotamiento con la difusividad hidráulica de un acuífero a partir de la expresión de Rorabaugh-Singh, ha permitido también una zonificación promedio que marca zonas con contraste significativo de este parámetro, destacando valores bajos (50 a $100 \text{ m}^2/\text{día}$) en el entorno del Roque de Los Muchachos y Caldera de Taburiente, corroborados por la interpretación de ensayos de recuperación a partir de datos de presiones obtenidas en cierres por compuerta hidráulica (conocidos localmente como "tranques") en galerías; valores medios (200 a $750 \text{ m}^2/\text{día}$) en las zonas: noreste (Garafía), este (Breña Alta y Cumbre Nueva) y Naciente Marcos (San Andrés y Sauces); valores altos (1.000 a $2.000 \text{ m}^2/\text{día}$) en la zona nororiental (Barlovento, San Andrés y Sauces y Puntallana); y valores muy altos (5.000 a $6.000 \text{ m}^2/\text{día}$): zona oriental (Santa Cruz de La Palma).

Los valores de transmisividad del sistema acuífero volcánico permiten caracterizar la zona del entorno del Roque de Los Muchachos y Caldera de Taburiente con $T = 15$ a $50 \text{ m}^2/\text{día}$, coherentes con lo expuesto anteriormente; en zonas costeras, principalmente representadas por materiales del Edificio Taburiente Superior, se pueden encontrar valores de $T = 250$ a $500 \text{ m}^2/\text{día}$; y en puntos de la desembocadura del Barranco de Las Angustias se han llegado a constatar valores de $2.000 \text{ m}^2/\text{día}$, posiblemente por la influencia de discontinuidades productivas en la zona de captación.

En la zona sur y, en concreto en la franja costera de la Fuente Santa, en el término municipal de Fuencaliente, se han obtenido valores de transmisividad en basaltos recientes del Edificio Dorsal Sur entre $T = 50$ a $225 \text{ m}^2/\text{día}$, pudiendo alcanzar valores de $T = 500$ a $4.000 \text{ m}^2/\text{día}$ cuando existen vías preferenciales de circulación de flujo subterráneo.

Asimismo, dependiendo del grado de discontinuidades y de su conectividad, en basaltos y rocas afines, la porosidad eficaz suele presentar valores entre el 1 y el 3 %, localmente hasta el 5 % (valor este muy utilizado en los cálculos). Si los materiales son piroclásticos, tipo cono de escorias, no son infrecuentes valores que pueden rondar $m_e = 15$ al 20 %. Si son lapillis ("picón") $m_e = 10$ al 12 %. En el caso de apilamientos de lavas, escorias y mantos de lapilli, se tiene un valor intermedio, en general entre el 5 y el 7 % para la realización de cálculos.

Localmente, y asociados a capas impermeables tipo "mortalón" (brecha de deslizamiento gravitacional), se pueden encontrar valores de $S < 1$ % (del orden de 5×10^{-3} e incluso inferiores), que muestran un efecto de semiconfinamiento (incluso confinamiento) en el comportamiento hidráulico del nivel acuífero. Este tipo de circunstancias también se manifiesta cuando son múltiples niveles los que suministran aguas subterránea.

En cuanto a los gradientes hidráulicos se tiene en general que en zonas altas $i = 15\%$; en zonas intermedias y de vertientes, $i = 5$ a 10 % y en zonas costeras, $i < 5$ %.

La utilización de los métodos de Lembke modificado y de Sáenz de Oiza modificado han permitido constatar que la influencia de una galería en relación a otra captación puede acotarse con relativa precisión, obteniéndose un intervalo entre 1.500 y 2.000 m como la distancia de influencia y/o posible interferencia.

7.1.2. Aplicación de técnicas isotópicas ambientales

Unido a la hidroquímica, estas técnicas han permitido mejorar la definición de las masas de agua subterránea de La Palma, así como las relaciones altitudinales de la recarga natural, la identificación de los principales sistemas de flujo subterráneo y los tiempos de tránsito de las aguas subterráneas, bajo ciertas hipótesis de partida, en relación con esos mismos sistemas de flujo.

En este sentido, el sistema acuífero volcánico de la Isla de La Palma se ha dividido en cinco masas de agua subterránea, destacando las facies hidroquímicas del tipo bicarbonatada cálcica y/o magnésica, bicarbonatada sódica y/o clorurada como las más representativas, seguidas de las facies sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica, y clorurada y/o sulfatada sódica.

En relación a los isótopos estables del agua subterránea, se ha ajustado una nueva recta meteórica local para las aguas subterráneas de La Palma con toda la información analizada. La ecuación de ajuste es: $\delta D = 6,55 \cdot \delta^{18}O + 9,03$.

Los valores de exceso de deuterio presentan diferencias contrastables por zonas, siendo $d = +9$ a $+15$ para la zona septentrional y $d = +15$ a $+24$ para la vertiente oriental y Cumbre Nueva, con lo que se confirma que la zona norte y noreste está sometida a la influencia de los vientos alisios cargados de humedad, responsables de la recarga zonal.

Asimismo, se han ajustado dos nuevas rectas altitudinales en función de la desviación del contenido en isótopo estable respecto del patrón SMOW:

- $H (m) = -499,37 \cdot \delta^{18}O - 954,44$ (gradiente: $-0,20 \cdot \delta^{18}O / 100$ m).
- $H (m) = -77,58 \cdot \delta D - 289,37$ (gradiente: $-1,28 \cdot \delta D / 100$ m).

Con estos datos se pone de manifiesto que la recarga natural principal al sistema hidrogeológico se produce entre la zona de cumbres y la zona de medianías altas.

Una aportación significativa de este trabajo ha sido la evaluación de una función de entrada de tritio para La Palma, que ha permitido calcular a partir de la aplicación de un modelo de mezcla total o exponencial, los tiempos de tránsito de las aguas subterráneas en el sistema acuífero volcánico, asumiendo que la mezcla de aguas a lo largo del tiempo se produce de forma eficaz y su captación se produce a través de galerías no sometidas directamente al efecto estacional.

Para ello, admitiendo que todavía existe contenido de tritio en las precipitaciones locales, del orden de 2 a 2,5 UT, la presencia de un valor contrastable del mismo es indicativo de aguas de recarga reciente o con cierta mezcla con agua reciente, mientras que valores $< 0,5$ UT son indicativos de tiempos de tránsito de edad prenuclear, por lo menos y, en general entre varias décadas a centurias. Ello ha permitido definir al menos los siguientes sistemas de flujo subterráneo:

- Sistema de flujos regionales asociado a las zonas de recarga natural próximas a los relieves montañosos, de dirección preferente cumbre-mar. Presentan circulación lenta y profunda, largo periodo de interacción agua-roca, presencia de agua de origen prenuclear (mayor de 50 años, con $< 0,5$ UT), sin indicios de recarga reciente (o muy poco significativa) hasta la fecha y tiempos de residencia elevados.
- Sistema de flujos locales, tanto en zonas elevadas como de medianías, incluso zonas cercanas a la franja costera. Presentan rápida circulación y renovación, interacción rápida con el terreno que atraviesan, baja mineralización y con indicios de recarga reciente marcados por la presencia de tritio en concentraciones apreciables y contrastables ($> 1,5-2$ UT). Dentro de estos flujos pueden considerarse situaciones intermedias caracterizadas por un contenido en tritio entre 0,5-1,5 UT.

7.1.3. Redefinición del modelo hidrogeológico conceptual

La recarga natural al sistema se produce por la infiltración del agua de lluvia a través del terreno, especialmente importante en los relieves montañosos, incluida la cobertera edáfica cuyo desarrollo debe tenerse en cuenta para la caracterización de la reserva útil y los procesos de evapotranspiración. En este trabajo se ha utilizado el método de Hargreaves, propuesto por la FAO, para la evaluación de la evapotranspiración de referencia, lo que ha permitido mejorar su cálculo y, por lo tanto, precisar la estimación de la recarga natural al sistema acuífero volcánico insular.

En general, existe una importante zona no saturada que suele presentar potencias entre varias decenas (zona costera) a varios centenares de metros (entre 100 a 700 entre medianías y cumbres).

Los espesores promedio de la zona saturada principal pueden estar entre los 200 y 400 m, si bien, en función de la paleotopografía del zócalo, puede reducirse a varias decenas. En ese contexto, los barrancos se constituyen como drenes del sistema debido a lo profundo de su encajamiento en el relieve.

Los isótopos ambientales contenidos en las aguas subterráneas de La Palma confirman que el flujo subterráneo general se dirige desde la zona de cumbres hacia mar, mediante caminos tortuosos dificultados por la presencia de diques, llegando a alcanzar los niveles piezométricos regionales alturas próximas a los 1.800 msnm en la zonas internas hasta llegar al nivel del mar en la zona costera, esta última vulnerable a los procesos de intrusión marina. Esta circulación se realiza a partir de sistemas tanto regionales, de mayor tiempo de tránsito (varias décadas a centurias), como locales, de mayor renovación, de acuerdo con unos nuevos gradientes altitudinales definidos en esta Tesis de: $-0,20 \cdot \delta^{18}\text{O} / 100 \text{ m}$ y $-1,28 \cdot \delta\text{D} / 100 \text{ m}$.

La mayor circulación de flujo subterráneo se produce en la zona nororiental como consecuencia de la influencia casi permanente de los vientos alisios, portadores de humedad abundante, que induce una mayor recarga natural al sistema acuífero, favorecida por las litologías del Edificio Taburiente y la parte permeable del Edificio Garafía. El exceso de deuterio $d = +15$ a 24 confirma esta circunstancia.

La zona de Cumbre Nueva se alimenta principalmente de la recarga natural del propio macizo de Cumbre Nueva y, es de esperar, que lo mismo ocurra en el Edificio Dorsal Sur, si bien en este la captación es prácticamente inexistente como consecuencia de la mineralización natural por CO_2 volcánico.

La permeabilidad vertical es muy superior a la horizontal, en general con un orden de magnitud mayor que 100, lo que contribuye a que en pocas semanas a meses el agua llegue al acuífero, en especial en la zona de cumbres, donde valores promedio de uno a tres meses llegan a detectarse (especialmente relevantes son los datos de los Nacientes de Marcos y Cordero en relación al desfase existente entre la pluviometría y los picos de caudal.).

Existen numerosos acuíferos colgados que dan lugar a multitud de manantiales o nacientes, la gran mayoría relacionados con el contacto con el complejo basal y aglomerados de tránsito y, en otros casos, ligados a la presencia de almagres o suelos arcillosos, y que suelen presentar régimen efímero.

La descarga al mar se realiza a través de la costa, bien sea mediante manantiales sumergidos como consecuencia de su enterramiento por las plataformas lávicas recientes, o como consecuencia de la descarga regional hacia la zona de mezcla agua dulce-agua salada, abarcando la zona intermareal.

Se confirma la actividad de la zona geotermal del sur insular, con actividad volcánica presente, y que caracteriza un sistema geotérmico de alta entalpía en roca seca. Como consecuencia de este volcanismo, existe abundante emisión de CO_2 difuso a través del terreno que llega a mineralizar la masa de agua subterránea LP004, lo que confiere a sus aguas una salinidad elevada como

consecuencia del aumento de bicarbonatos. Dicha actividad geotermal parece no ser exclusiva de la vertiente meridional sino que durante la migración al sur del volcanismo quedó relictiva actividad hidrotermal remanente en la zona de Dos Aguas, que encajaría con la presencia de CO₂ en galerías situadas entre Cumbre Nueva y La Caldera de Taburiente.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

7.2. RESUMEN FINAL

La Palma (Islas Canarias, España) es una isla de naturaleza volcánica que se abastece del alumbramiento de aguas subterráneas procedentes del sistema acuífero volcánico insular, prácticamente en su totalidad.

En esta tesis se ha revisado y mejorado el modelo hidrogeológico conceptual de funcionamiento de La Palma, basado en una revisión y propuesta metodológica sobre la parametrización hidráulica, el balance hidrometeorológico y la aplicación de técnicas isotópicas ambientales, lo que define un sistema acuífero volcánico formado por un apilamiento tabular de lavas y escorias, con intercalación de mantos piroclásticos, frecuentemente compartimentado por diques que individualizan celdas generalmente no estancas, con apantallamiento y sobre elevación del nivel piezométrico. El flujo subterráneo se dirige de cumbres a mar, donde se produce la descarga.

La parametrización hidrogeológica se ha caracterizado por el estudio de los hidrogramas de caudales, el cálculo de los coeficientes de agotamiento (indicativos de magníficos reservorios subterráneos en el ámbito de La Palma) y su relación con la distribución de la difusividad hidráulica del sistema acuífero insular, interpretando las variaciones de presión en compuertas hidráulicas en galerías, con el fin de precisar valores de transmisividad y porosidad y estimando la distancia de influencia entre galerías.

La calidad de las aguas subterráneas del reservorio principal se identifica principalmente con facies hidroquímicas tipo bicarbonatada cálcica y/o magnésica, y bicarbonatada sódica y/o clorurada, y baja mineralización general ($< 300 \mu\text{S}/\text{cm}$). La emisión de CO_2 volcánico medible en galerías de la Dorsal Sur está ligada a la actividad magmática remanente, con incremento de bicarbonatos e hidrotermalismo asociados a ese fenómeno.

Los isótopos estables (oxígeno-18 y deuterio) han confirmado que en las cumbres y medianías del Roque de Los Muchachos-Caldera de Taburiente, Cumbre Nueva y Cumbre Vieja se produce la mayor recarga natural procedente de la infiltración de agua de lluvia a través de la zona no saturada de una manera rápida, con excesos de deuterio próximo a +10, indicativos de la influencia de la humedad de los vientos alisios, pero también con valores entre +14 a +19, indicativos de condiciones más áridas durante cuando se produjo la recarga natural, posiblemente por influencia del área sahariana.

Asimismo, se han caracterizado nuevas rectas altitudinales en relación a la desviación δ de la variación de la relación isotópica del deuterio y oxígeno-18 respecto al patrón V-SMOW expresada en tanto por mil, lo que ha permitido mejorar la zonificación de la recarga natural a partir de la determinación de las concentraciones de dichos isótopos en las aguas subterráneas del sistema acuífero volcánico insular.

Se ha definido una función de entrada de tritio para La Palma, extrapolable a otras islas occidentales de Canarias, en especial las de mayor relieve, para la interpretación del contenido en tritio de las

aguas subterráneas mediante la utilización de un modelo de mezcla total, comparando dos formulaciones, lo que ha permitido identificar diferentes sistemas de flujo subterráneo (regionales y locales), definiendo el umbral en la concentración de tritio $<0,5UT$ como el que marca tiempos de tránsito de varias décadas hasta varias centurias, incluso superiores. La aplicabilidad de este modelo ha dado excelentes resultados en aquellas captaciones que drenan el sistema acuífero desde su núcleo y zonas aledañas, con poca o nula influencia directa de recargas directas rápidas a partir de la percolación vertical por discontinuidades en los macizos rocosos.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

7.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A continuación se presentan las principales líneas de investigación futura que encajan perfectamente con la naturaleza del trabajo presentado en este documento. Todas ellas son susceptibles de extrapolar los resultados obtenidos a otras áreas de naturaleza similar, especialmente a islas oceánicas volcánicas:

- Mejora del conocimiento y cuantificación de la recarga natural a los sistemas acuíferos volcánicos. Implementación del método de Penman-Monteith (en su defecto Hargreaves) para la definición de la evapotranspiración de referencia y realización de balances hidrometeorológicos diarios para diferentes zonas edafoclimáticas. Posibilidad de acoplamiento con un modelo de hidrología de superficie (a desarrollar), similar al existen en Tenerife.
- Mejora de la parametrización hidrogeológica del sistema volcánico insular mediante la realización e interpretación de diversos ensayos de bombeo y recuperación (incluyendo reinterpretaciones históricas) tanto en sondeos como en pozos de tipo canario. Para ello pueden diseñarse pruebas y ensayos específicos, con posibilidad de utilizar trazadores artificiales y analizar las curvas de recuperación del trazador que permiten la evaluación de parámetros hidrodinámicos como la dispersividad, entre otros. Unido con esta información, resulta necesario seguir actualizando la información procedente del análisis de los hidrogramas de descarga de galerías y manantiales para contrastar los valores de difusividad hidráulica con los obtenidos por otro tipo de ensayos.
- Modelación numérica del flujo subterráneo mediante perfiles 2D, para cotejar las diversas hipótesis de funcionamiento hidrodinámico del sistema hidrogeológico, rechazando las situaciones absurdas. Dicha modelación sería condición previa para una futura modelación numérica de flujo en 3D, teniendo en cuenta las restricciones geológicas, la hidrogeología insular y la condición de contorno que supone la costa y zona de descarga periférica.
- Acoplamiento de investigaciones del estudio del contenido isotópico (oxígeno-18, deuterio y tritio) de las aguas subterráneas con el estudio de dichos elementos en perfiles atmosféricos, lluvias, niebla y suelo (como se está desarrollando actualmente en Tenerife por parte del grupo de investigación en Hidrometeorología (GRIHM) de la Universidad de La Laguna y el Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA)), de manera que se puedan definir aquellas relaciones características entre la influencia de los frentes pluviosos en relación a la recarga por infiltración, tránsito por la zona edáfica y procesos asociados, y llegada al acuífero y zonas de descarga. En condiciones favorables se pueden modelar perfiles en 2D a lo largo de un sistema de flujo de cumbre a mar en las zonas de estudio.
- Estudio de la contaminación por nitratos en las aguas subterráneas en zonas agrícolas, con y sin influencia de zonas urbanas, al objeto de discriminar y estimar la proporción de nitratos procedente tanto de influencia agrícola como urbana, mediante el estudio de las variaciones del contenido del isótopo estable nitrógeno 15, cuyo desviación δ suele reflejar esta circunstancia, incluso en contraste con la de las aguas subterráneas del entorno. En condiciones favorables (zonas con suelo desarrollado o parcelas experimentales o fincas) se

pueden estudiar perfiles verticales a diferentes profundidades, abarcando suelo, zona no saturada y acuífero. Posibilidad de modelación numérica en 2D.

- Detección, delimitación e investigación de la intrusión marina en acuíferos costeros volcánicos de La Palma, especialmente en el Valle de Aridane, para caracterizar la salinización de las aguas subterráneas y sus orígenes, con objeto de establecer criterios de conservación y explotación de dichos acuíferos dentro de la planificación integral y gestión de los recursos hídricos insulares. Para ello, es conveniente y necesario, junto con la utilización de técnicas hidroquímicas y de isótopos estables clásicos como el oxígeno-18 y el deuterio, analizar la firma isotópica del estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) puesto que no se ve afectada por procesos de fraccionamiento isotópico y, además, en el caso de Canarias, presenta una marcada diferencia: en el agua de mar es de 0,70906 (con un contenido en Sr disuelto próximo a 8 mg/L) y en los basaltos alcalinos típicos de Canarias es de 0,7032, siendo estos la principal fuente de aporte en las aguas subterráneas (del orden de 0,2 mg/L), por lo que existe suficiente contraste. Para el estudio pueden implementarse sondeos multipiezométricos de control que permitan definir perfiles transversales objeto de modelación numérica de flujo subterráneo en 2D y transporte de masa considerando densidad variable.
- Hidrogeoquímica de gases disueltos en aguas subterráneas especialmente en zonas volcánicamente activas, fundamentalmente ligadas a los ejes estructurales de La Palma (Dorsal Sur, Cumbre Nueva y zona de la Caldera de Taburiente), como precursores hidrogeológicos en alerta temprana de procesos y eventos sismovolcánicos, con una clara orientación hacia la protección civil y la gestión de riesgos naturales, dentro de la planificación territorial. De especial relevancia es la difusión de CO_2 y otros gases ligados al azufre, cloro, etc.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Universitat d'Alacant
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
Universidad de Alicante

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afonso, A. (1974). "Geological sketch and historic volcanoes in La Palma, Canary Islands". *Estudios Geológicos* (vol: Teneguía): 7-13. Madrid.
- Ancochea, E.; Hernán, F.; Cendrero, A.; Cantagrel, J.M.; Fúster, J.M.; Ibarrola, E. y Coello, J. (1994). "Constructive and destructive episodes in the building of a Oceanic Island, La Palma, Canary Islands, and genesis of the Caldera de Taburiente. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 60(3-4): 243-262.
- APHP (1992). "Avance del Plan Hidrológico de La Palma". Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Aguas (Gobierno de Canarias)-Cabildo Insular de La Palma. 245 pp.+ figs. Santa Cruz de Tenerife.
- APHP (2012). "Avance o Proyecto de Plan Hidrológico de La Palma". Memoria de Información. Consultor: VIATRIO INGENIEROS, S.L. Consejo Insular de Aguas de La Palma. 136 pp + planos.
- APHP (2015). "Plan Hidrológico de La Palma. Aprobación Inicial". Memoria de Información. Consultor: MAREVA INGENIERÍA, S.L. Consejo Insular de Aguas de La Palma. 236 pp + planos.
- Araguás Araguás, L. (1991). *Adquisición de los contenidos isotópicos (^{18}O y D) de las aguas subterráneas: variaciones en la atmósfera y en la zona no saturada del suelo*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid. 286 pp. Madrid.
- Barrera Morate, J.L. y García Moral, R. (2011). *Mapa Geológico de Canarias. Memoria General*. GRAFCAN Ediciones. 502 pp. Santa Cruz de Tenerife.
- BRIDGE (2006). *Final proposal for methodology to set up groundwater threshold values in Europe*. Report D18. Author: Dietmar Müller. BRIDGE Project (Background criteria for the identification of groundwater thresholds). Revision: 0. Contract nº 006538 (SSPI). Co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006). Vienna. 63 pp.
- Cabrera, M.C. (2005). *Caracterización y funcionamiento hidrogeológico del acuífero costero de Telde (Gran Canaria)*. Tesis Doctoral. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca. 363 pp. Las Palmas de Gran Canaria.
- Cabrera, M.C.; Muñoz, R.; Poncela, R.; Socorro, A.R.; González, G. y Hernández, J.M. (1996). "Metodología para el estudio de la contaminación por pesticidas en acuíferos de Gran Canaria y Tenerife (Islas Canarias)". Comunicaciones presentadas en el IV Congreso Geológico de España. Universidad de Alcalá, Madrid. 1-5 Jul. *Geogaceta*, 20(6): 1.288-1.290.

- Cabrera, M.C.; Muñoz Carpena, R.; Poncela, R.; González, G. y Socorro, A.R. (1997). "Estudio de la contaminación por pesticidas en la zona no saturada y el acuífero de Gran Canaria y Tenerife (Islas Canarias)". En M.C. Cabrera E. Custodio y F. Roque (Eds): *Actas de las Jornadas sobre las aguas subterráneas en la planificación hidrológica en las Islas Canarias*. Las Palmas de Gran Canaria, 29, 30 y 31 de enero y 1 de febrero. 1997. AIH-GE: 211-217.
- Caloz, P. (1987). "Galerías de captación de agua en la Isla de Tenerife. Estudio de las curvas de agotamiento". IV Simposio de Hidrogeología. Palma de Mallorca, 5 a 9 de octubre de 1987. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos (XI)*: 813-825.
- CANARIAS-AGUA 2000 (1988). "Plan Hidrológico del Archipiélago Canario. Proyecto Canarias Agua 2000". Documentación Básica: Tomo I. Documento de Síntesis. Consultores: Synconsult, S.L. y AICASA. Informe Técnico. Dirección General de Aguas-Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Aguas-Gobierno de Canarias. 73 pp. Las Palmas.
- Carracedo, J.C. (1984). *Origen de las Islas*. En Geografía de Canarias. Editorial Interinsular Canaria, S.A. Tomo 1: 55-64. Santa Cruz de Tenerife.
- Carracedo, J.C. (1994). "The Canary Islands: an example of structural control on the growth of large oceanic-island volcanoes". *Journ. Volc. Geoth. Res.* (60): 225-241. Elsevier Science. B.V., Amsterdam.
- Carracedo, J.C.; Day, S.J.; Guillou, H. and Gravestock, P.J. (1997). "Geological Map: Cumbre Vieja Volcano (La Palma, Canary Islands)". Esc. aprox.: 1:33.000. *International Workshop on Volcanism Hazards in Immature Intraplate Oceanic Islands, La Palma, 15-18 September*. Santa Cruz de Tenerife.
- Carracedo, J.C.; Badiola, E.R.; Guillou, H.; de la Nuez, J. and Pérez Torrado, F.J. (2001). "Geology and Volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries". *Estudios Geológicos* 57(5-6): 175-373.
- Carracedo, J.C. (2011): *Geología de Canarias I: origen, evolución, edad y volcanismo*. Editorial Rueda, S.L. 398 p. Madrid.
- CIAP (2009). *Estudio General de la Demarcación Hidrográfica de La Palma*. Consejo Insular de Aguas de La Palma. 105 pp.
- CIHS (1988). *Aguas subterráneas: Instrumentación, medida y toma de muestras*. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Prensa XXI, S.A. 378 pp. Barcelona.
- CLIMCAN-010 (2010). "Caracterización climática de las Islas Canarias para la aplicación del Código Técnico de la Edificación". Gobierno de Canarias. 41 pp.+ aplicación informática.
- Coello, J. (1987). "Las aguas subterráneas en las formaciones volcánicas del norte de La Palma (Islas Canarias)". *Simp. Intern. Rec. Hidrául.: Canarias Agua 2000*. 11 pp.
- Cruz, J. V. (2011). *Hydrogeology of the Azores archipelago: a review*. En Cabrera, MC; Lambán, LJ; Manzano, M y Valverde, M (Edit.): Cuatro décadas de investigación y formación en

- aguas subterráneas. Libro homenaje al Profesor Emilio Custodio: 135-154. Zaragoza. AIH-GE. ISBN 978-84-938046-1-9.
- Cruz Fuentes, Tatiana (2008). *Contribución de la modelación numérica e hidroquímica al conocimiento del acuífero de La Aldea (Gran Canaria, Islas Canarias)*. Tesis Doctoral, Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 283 pp. Las Palmas de Gran Canaria.
- CSIC-IGME (2001). "Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, western Canaries". Mapa geológico de la Isla de La Palma. *Estudios Geológicos*. 57(5-6): 1-265. Madrid.
- Custodio, E. (1978). *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Instituto de Hidrología. Centro de Estudios Hidrográficos. Publicación 128. 303 pp. Madrid.
- Custodio, E.; Soler, C.; Lozano, O.; Jiménez, J. y Braojos, J. (1981). "Estudio Geohidroquímico de Tenerife. Proyecto MAC-21". Dirección General de Obras Hidráulicas - Cabildo Insular de Tenerife y Servicio Geológico de Obras Públicas. Tenerife - Las Palmas. 3 Tomos. Inédito.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. 2ª ed. Editorial Omega, S.A. 2 Vol. 2347 pp. Barcelona.
- Custodio, E. (1983). "Nuevas contribuciones al conocimiento hidrogeológico de las Islas Canarias". *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. (VII): 705-717. Madrid.
- Custodio, E. (1984). "Técnicas radioisotópicas ambientales". Documento interno. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona.
- Custodio, E. (1985). "Low permeability volcanics in the Canary Islands (Spain)". *Hydrogeology of Rocks of Low Permeability. Mémoires XVIII International Congress Association Hydrogeologists*. pp: 533-544. Tucson. Arizona.
- Custodio, E. (1989a). "Consideraciones sobre la sobreexplotación de acuíferos en España". Simposio Nacional: La sobreexplotación de acuíferos, Almería, 1989. Editado por el ITGE. *Temas Geológico-Mineros* (10): 43-64. Madrid.
- Custodio, E. (1989b). "Groundwater characteristics and problems in volcanic rocks terrains". In *Isotope techniques in the study of the hydrology of fractured and fissured rocks. Proceedings of an advisory group meeting on the application of isotope techniques in the study of the hydrology of fractures and fissured rocks*. IAEA-AG-329/6.2: 87-137. International Atomic Energy Agency. Vienna.
- Custodio, E. (2004). "Hydrogeology of Volcanic Rocks". In Kovalevsky, V. S. Kruseman, G. P. and Rushton, K. R. (Eds). *Groundwater Studies. An International guide for hydrogeological investigations. IHP-VI, series on groundwater* (3): 395-425. UNESCO.
- Custodio, E. (2005). "Aproximación al impacto del cambio climático en los recursos hídricos subterráneos de Canarias. Jornadas sobre impacto del cambio climático en la hidrología de Canarias". Santa Cruz de Tenerife, 1 y 2 d diciembre. Presentación Power Point: 19 diapositivas.

- Custodio, E. (2007). "Groundwater in volcanic hard rocks". In Krásný, J. and Sharp J. M. (Eds). Groundwater in fractured rocks. *International Association of Hydrogeologists Selected Papers* (9): 95–108.
- Custodio, E. y Cabrera, M. C. (2008). "Síntesis de la hidrogeología de las Islas Canarias". *Geo-Temas*, (10): 785-788.
- Custodio, E. (2011). *Evolución del conocimiento hidrogeológico e hidrológico de Canarias*. En Cabrera, MC; Jiménez, J y Custodio, E. (Edit.): El conocimiento de los recursos hídricos de Canarias cuatro décadas después del Proyecto SPA-15. Libro homenaje póstumo al Dr. Ingeniero D. José Sáenz de Oiza: 5-12. Las Palmas de Gran Canaria. ISBN 978-84-938046-0-2.
- Custodio Gimena, E. y Custodio Ayala, J. (2013). "Interpretación simplificada de la evolución del tritio en acuíferos con mezcla exponencial". X Simposio de Hidrogeología. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. Granada, 16-18 octubre. (XXX): 427-436.
- Custodio, E.; Cabrera, M.C.; Poncela, R. y Puga, L.O. (2015a). *Comentarios sobre la incertidumbre en el conocimiento y gobernanza de las aguas subterráneas en Canarias*. En María del Carmen Cabrera, Tatiana Cruz-Fuentes, Vanessa Mendoza-Grimón y María del Pino Palacios-Díaz (Eds): Actas del II Workshop: "Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas". Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 21 al 23 de enero de 2015, pp: 45-52. ISBN 978-84-938046-4-0.
- Custodio, E.; Cabrera, María del Carmen; Poncela Poncela, R.; Cruz-Fuentes, Tatiana; Naranjo, Gema y Puga de Miguel, Luis Olavo (2015b). "Uncertainty in groundwater governance. General comments and application to the volcanic Canary Islands, Spain". *Water*, 7(6): 2952-2977; doi: 10.3390/w7062952.
- Davis, S.N. and de Wiest, R.J.M. (1966). *Hydrogeology*. John Wiley & Sons. 463 pp. New York.
- De la Nuez, J. (1983). *El complejo intrusivo subvolcánico de la Caldera de Taburiente (La Palma)*. Col. Tesis Doctorales. Ed. Complutense. 401 pp. Madrid.
- De la Nuez, J., Casillas, R. y Martín, M.C. (2008). "Estructura interna y vulcanismo reciente de la Isla de La Palma". En Pérez Torrado y Cabrera (Eds). *Geoguías* (4): 127-153. Las Palmas de Gran Canaria.
- De León Llamazares, A.; Arriba Balenciaga, A. y De la Plaza, M.C. (1991). "Caracterización agroclimática de la provincia de Santa Cruz de Tenerife". Publicación del Departamento de Agroclimatología de la Sección de Estudios. Dirección General de la Producción Agraria. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 131 pp. + 25 mapas + apéndices. Madrid.
- DGA (2006). "Programa de control de las aguas subterráneas Directiva Marco del Agua. Memoria y Apéndices. La Palma". Informe Técnico. Consultor: PROINTEC, S.A. Dirección General de Aguas-CITV-GOBCAN. 91 pp + apéndices.

- DGIE (2003). "Guía para la elaboración de perímetros de protección de las aguas minerales y termales". Dirección General de Industria y Energía. Consejería de Industria y Nuevas Tecnologías. Gobierno de Canarias. Documento interno. 102 pp.
- DGI (2008). "Caracterización hidrogeológica e hidroquímica de las aguas minerales naturales de Canarias". Servicio de Minas. Dirección General de Industria y Energía. Consejería de Industria y Nuevas Tecnologías. Gobierno de Canarias, Santa Cruz de Tenerife. Inédito. 64 pp + anejo de fichas de datos.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1977). "Crop Water Requirements". Food and Agricultural Organization of the United Nations. Roma. Italy. *Irrig. and Drain.* Paper 24. Revised. 144 pp.
- Eisenbud, M.; Bennett, R.; Blanco, R.E.; Compere, E.L.; Goldberg, E.; Jacobs, D.G.; Koronda, J.; Moghissi, A.A.; Rust, J.M. and Soldat, J.K. (1979). "Tritium in the environment". NCRP Report n° 62. In Behaviour of tritium in the environment. Proc. Symp. San Francisco, 1978. IAEA. Vienna, pp:585-587.
- EUPR (1994). "Group IV: First Annual Progress Report". European Union Project n°: EV5VCT930322. Canary Islands, Spain.
- Falkland, A. and Custodio, E. (1991). "Hydrology and water resources of small islands: a practical guide". *Studies and Reports in Hydrology n° 49*. UNESCO Press. 435 pp. Paris.
- FAO (2006). "Evapotranspiración de cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". Autores: Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. y Smith, M. *Riego y Drenaje n° 56*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 298 pp.
- FCCA (2004). "Seguimiento y estudio de temas geológicos, hidráulicos y climatológicos relacionados con el Túnel de Tránsito Breña Baja – El Paso". Centro Canario del Agua. 59 pp. Santa Cruz de Tenerife. Informe interno.
- FCIHS (2009). *Hidrogeología: conceptos básicos de hidrología subterránea*. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. 768 pp. Barcelona.
- Font Tullot, I. (1956). "El tiempo atmosférico en las Islas Canarias". Memoria. Sección de Predicción. Servicio Meteorológico Nacional. Dirección General de Protección de Vuelo. Ministerio del Aire. Publicación Serie A(25): 96 pp. Madrid.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall. 604 pp. USA.
- Fritz, P. y Fontes, J. Ch. (1988). *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Vol. 1 y 2. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. 2ª edición. 515 pp.
- Fúster, J.M.; Araña, V.; Brändle, J.L.; Navarro, J.M.; Alonso, U. y Aparicio, A. (1968). *Geología y Volcanología de las Islas Canarias*. Instituto Lucas Mallada. CSIC. Madrid. pp: 1-218.
- Fúster, J.M. y otros (1989). "Ensayo de cronoestratigrafía de la Isla de La Palma". *Meeting on Canarias Volcanism*. Lanzarote. pp: 111-115.

- Gasparini, A.; Custodio, E., Fontes J.C., Jiménez, J. and Núñez, J.A. (1990). "Exemple d'étude geochemique et isotopique de circulations aquifères en terrain volcanique sous climat semi-aride (Amurga, Gran Canaria, Îles Canaries)". *Journal of Hydrology*. (114): 61-91.
- Gastesi, P.; Hernández-Pacheco, A. y Muñoz, M. (1966). "Las rocas holocristalinas de la Caldera de Taburiente, Isla de La Palma (Canarias)". *Estudios Geológicos* (22): 113-134. Madrid.
- Gingerich, S. B. and Oki, D. (2000). *Ground Water in Hawaii*. USGS, FS 126-00, pp 7.
- Gingerich, S. B. and Oki, D. (2011). *Hydrogeology of the Hawaiian Islands*. En Cabrera, MC; Lambán, LJ; Manzano, M y Valverde, M (Edit.): Cuatro décadas de investigación y formación en aguas subterráneas. Libro homenaje al Profesor Emilio Custodio: 119-134. Zaragoza. AIH-GE. ISBN 978-84-938046-1-9.
- Gonfiantini, R. (1973). "Isotope Study of Canary Islands Groundwater". Internal report. Informe inédito.
- Gonfiantini, R. (1974). "Reconocimiento isotópico ambiental del agua subterránea de las Islas Canarias". *Simposio Internacional sobre Hidrología de Terrenos Volcánicos*. Lanzarote, 4 a 8 de marzo. CEDEX-Gobierno de Canarias. (II): 617-659.
- Gonfiantini, R.; Gallo, G.; Payne, B.R. and Taylor, C.B. (1976). "Environmental isotopes and hydrochemistry in groundwater of Gran Canaria". In Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical data in Groundwater Hydrology. IAEA, Vienna. pp: 159-170.
- Guillou, H.; Carracedo, J.C. and Day, S.J. (1998). "Dating of the upper Pleistocene-Holocene volcanic activity of La Palma using the unspiked K-Ar technique". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (86): 137-149.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1982). Estimating Potential Evapotranspiration. Tech. Note. *J. Irri. Drain Eng.*, vol 108(3):225-230.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Appl. Eng. Agric.*, vol 1(2):96-99.
- Hernández, M. (1982). "Estudio científico sobre los requerimientos de agua de los cultivos en Gran Canaria y la viabilidad del proyecto MAC-21". CREP: Comisión Regional para el plátano.
- Hernández-Pacheco, A. (1971). "Nota previa sobre el Complejo Basal de la Isla de La Palma (Canarias)". *Estudios Geológicos* (27): 255-265. Madrid.
- Hernández-Pacheco, A. (1973). "Sobre el significado de las rocas granudas gabroides de los complejos basales de las Islas Fuerteventura, La Palma y La Gomera (Canarias)". *Estudios Geológicos* (29): 549-557. Madrid.
- Hernández-Pacheco, A. y Afonso, A. (1974). *Mapa Geológico del Complejo Basal de La Palma*. Dpto. Petrol. y Geoquim. CSIC. Madrid.

- Hernández-Pacheco, A. y Fernández Santín, S. (1975). "The submarine formations of the Caldera de Taburiente in La Palma (Canary Islands) and their metasomatic processes". *Bull. Volcanol. (spec. vol.: IAVCEI: Simposium Santiago de Chile)*.
- Hernández-Pacheco, A. y Valls, M.C. (1982). "The historic eruptions of lavas from La Palma (Canary Islands)". Eds. H.U. Schmincke y otros. Universidad de Azores. *Proceedings of the Symposium on activity in Oceanic Volcanoes*.
- Herrera Lameli, Christian (2001). *Caracterización hidrogeoquímica del Macizo de Betancuria, Archipiélago de Canarias*. Tesis Doctoral, Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartografia i Geofísica. E.T.S. d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universidad Politècnica de Catalunya. 225 pp. Barcelona.
- IAEA (1981). "Stable Isotope Hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle". Scientific editors: J.R. Gat and R. Gonfiantini. Vienna. Technical Reports Series. Nº 210. 337 pp.
- IAEA (1983). "Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology". Technical Reports Series. Nº 91. Second edition (revised). First edition in 1968. Vienna. 439 pp.
- IGME (1983). "Informe del trabajo de investigación geotérmica del Teneguía (Isla de La Palma) mediante termometría subterránea". Informe interno. Instituto Geológico y Minero de España. 33 pp + planos + anejos. Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- IGME (1984). "Análisis previo de viabilidad técnico-económica de la explotación de energía geotérmica en distintas zonas (Tenerife, La Palma, Orense y Vallés). Informe final". Informe interno. Instituto Geológico y Minero de España. 83 pp + anejos. Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- IGME (1992). *Jornadas de Aguas Minerales y Mineromedicinales en España*. Colección Temas Geológico-Mineros, Madrid. 139pp.
- IGME (2002). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico: Principios y aplicaciones*. Mook, W.G. (editor). Serie Guías y Manuales. Programa Hidrológico Internacional-UNESCO. Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid. 596 pp.
- IGME (2003). *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio*. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 10. Madrid. 273pp.
- IGME-OAPN (2011). "Parque Nacional de la Caldera de Taburiente: guía geológica". Roberto Rodríguez (Dir. y coord.). Instituto Geológico y Minero de España y Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Colección de Guías Geológicas de Parques Nacionales. Editorial Everest, S.A. 223 pp. Madrid.
- INM (1992). "Valores normales y estadísticos de observatorios meteorológicos principales (1971-2000). Vol 6: Islas Canarias. Instituto Nacional de Meteorología. Serie Estadísticas. 186 pp. Madrid.

- ITGE (1989). *Las aguas subterráneas en España*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Ministerio de Industria y Energía. Madrid. 2 Tomos. 591 pp. * 12 mapas.
- ITGE (1992). *Jornadas de Aguas Minerales y Mineromedicinales en España*. Colección Temas Geológico-Mineros. Madrid. 139 pp.
- ITGE (1993). "Estudio isotópico de las aguas subterráneas en la Isla de La Palma". Consultor: Geomecánica y Aguas, S.A. Instituto Tecnológico Geominero de España. Ministerio de Industria y Energía. 73 pp. + 3 anexos. Madrid.
- Izquierdo, T., Herrera, R. y Márquez, A. (2011). "Modelo conceptual del sistema acuífero de Enchereda (La Gomera, Islas Canarias): contribuciones a otras islas volcánicas". *Estudios Geológicos*, 67(1):41-58.
- Izquierdo Labraca, T. (2011): *Hydrogeology of La Gomera (Canary Islands): contributions to conceptual models of volcanic islands aquifers*. Ph.D. Dissertation. Department of Biology and Geology. University Rey Juan Carlos. 172 pp + Appendixes.
- Lau, L. S. and Mink, J. F. (2006). *Hydrology of the Hawaiian Islands*. University of Hawai'i Press. 274 pp.
- Lembke, K.E (1886). *Flujo de agua subterránea y la teoría de colectores de agua*. (En ruso). El Ingeniero. Revista del Ministerio de Comunicación. (2) y 1987 (17-18). En Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. 2ª ed. Editorial Omega, S.A. 2 Vol. 2347 pp. Barcelona.
- MAC-21 (1980). "Proyecto de planificación y explotación de los recursos de agua en el Archipiélago Canario". Comis. Interminist. Coord. Est. Mat. Aguas. Canarias.
- Machado, M. (2013). *Validación del método de predicción de direcciones principales de drenaje subterráneo en macizos anisótropos, en los terrenos volcánicos del Macizo de Anaga, Tenerife*. Tesis Doctoral, E.T.S.I. Minas (UPM). Universidad Politécnica de Madrid. 158 pp + 4 Anexos. Madrid.
- Marrero Díaz, Rayco (2010). *Modelo hidrogeoquímico del acuífero de Las Cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya. 501 pp+Anexos. Barcelona.
- Martínez, C. y García, A. (2003). *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio*. Ed. IGME, Serie: Hidrogeología y Aguas subterráneas, nº 10. 273 pp. Madrid.
- Martos Rosillo, S.; Morales García, R.; García de Domingo, A.; Fernández Ruiz, L. y Durán Valsero, J.J. (2015). *Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del sector del Roque de los Muchachos (acuífero insular de las Vertientes) en la Isla de La Palma, Canarias*. En María del Carmen Cabrera, Tatiana Cruz-Fuentes, Vanessa Mendoza-Grimón y María del Pino Palacios-Díaz (Eds): Actas del II Workshop: "Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas". Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 21 al 23 de enero de 2015, pp: 215-222. ISBN 978-84-938046-4-0.

- MFS (2002). "Revisión y actualización del modelo de simulación del flujo subterráneo en la Isla de Tenerife". Consultor: SURGE Estudios Hidráulicos e Hidrológicos, S.L. Consejo Insular de Aguas de Tenerife-Cabildo de Tenerife. 193 pp + 6 Anejos. Tenerife.
- MMA (2003). "Proyecto Modificado nº 2.- Túnel de Trasvase de la vertiente Este a la Oeste (Isla de La Palma)". Consultor: ACS, S.A. Ministerio de Medio Ambiente y Dirección General de Aguas del Gobierno de Canarias.
- Molinero, J.; Samper, F.J. y Juanes, R. (2000). *Filtración hacia túneles en medios fracturados: simulación dinámica del avance de la excavación*. Revista de Obras Públicas (3397): 33-49. Madrid.
- Monteith, J.L. (1965). *Evaporation and Environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology*. University Press, Cambridge, (19): 205-234.
- MOPT (1992). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*. Serie Monografías de la Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y del Medio Ambiente. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid. 809 pp.
- Morales García, R.; Martos Rosillo, S.; García de Domingo, A.; Fernández Ruiz, L. y Durán Valsero, J.J. (2015). *La incidencia del vertido de aguas residuales domésticas de las instalaciones del Instituto Astrofísico de Canarias en el Roque de los Muchachos (La Palma, Canarias) sobre las aguas subterráneas. Método de estudio y resultados*. En María del Carmen Cabrera, Tatiana Cruz-Fuentes, Vanessa Mendoza-Grimón y María del Pino Palacios-Díaz (Eds): *Actas del II Workshop: "Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas"*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 21 al 23 de enero de 2015, pp: 239-246. ISBN 978-84-938046-4-0.
- Muñoz Sanz, Josefa (2005). *Caracterización hidrogeológica del acuífero de La Aldea (Gran Canaria)*. Tesis Doctoral, Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 584 pp. Las Palmas de Gran Canaria.
- Muñoz Carpena, R.; Socorro, A.R.; A. Pérez; González, G.; Pérez, N. y Poncela, R. (1997). "Aspectos hidrológicos de la contaminación de suelos y aguas por el riego del banano en las Islas Canarias (España)". En Brevé, M. (Ed). *Riego y Drenaje de Banano. Actas del Simp. Int. Riego y Drenaje en Banano*. 19-22 agosto. EARTH: San José (Costa Rica).
- 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 Morell, I. y Candela, L. (Eds): *Plaguicidas: Aspectos ambientales, analíticos y toxicológicos*. Col.lecció Summa-Ciències Experimentals/(5):75-96. AIH-GE, Univ. Jaume I-Castellón y CICYT. Madrid.
- Navarro Latorre, J.M. (1992). *Esquema Geovolcanológico de La Palma*. Esc. red. aprox.: 1:300.000. Avance del Plan Hidrológico de La Palma. Santa Cruz de Tenerife.

- Navarro Latorre, J.M. (1993). *Mapa Geológico de La Palma*. Esc. 1:125.000. Geoprin, S.A. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación-ICONA (Instituto para la Conservación de la Naturaleza). Madrid.
- Navarro Latorre, J.M. y Coello Bravo, J.J. (1993). *Mapa Geológico de la Caldera de Taburiente*. Esc. 1:25.000. Geoprin, S.A. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación-ICONA (Instituto para la Conservación de la Naturaleza). Madrid.
- Pérez, N. (2008). "La firma isotópica del estroncio ($^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$): la mejor huella dactilar para la detección y cuantificación de la intrusión marina en acuíferos volcánicos insulares". *El Manantial*. IX:2-5.Tenerife.
- PHP (2001). "Plan Hidrológico Insular de La Palma". Consultor: TECAMAC, S.A. Consejo Insular de Aguas de La Palma. 3 vol.
- Poncela, R.; Manzano, M. y Custodio, E. (1992). "Medidas anómalas de tritio en el área de Doñana". V Simposio de Hidrogeología. Alicante, 23-27 marzo. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. (XVII): 351-365. Madrid
- Poncela, R. (1993). *Análisis del funcionamiento hidrogeológico del Parque Nacional de Doñana en el entorno del Arroyo de La Rocina*. Tesina de Master en Hidrología Subterránea. Departamento de Ingeniería del Terreno. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña, en colaboración con la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. 173 pp. Barcelona.
- Poncela, R. (1997). "Problemas actuales y futuros de salinidad y calidad del agua subterránea en Canarias. Incidencia en la planificación hídrica y en las actuaciones". *Jornadas sobre: Las aguas subterráneas en la planificación hidrológica en las Islas Canarias*. Las Palmas de Gran Canaria, 29, 30 y 31 de enero y 1 de febrero. 1997. AIH-GE: 153-160.
- Poncela, R. (2005a). "Actividades requeridas para el cumplimiento de la Directiva Marco del Agua en las islas de Tenerife, La Palma, la Gomera y El Hierro". Informe Técnico. Dirección General de Aguas-Consejería de Infraestructuras, Transportes y Vivienda-Gobierno de Canarias. Santa Cruz de Tenerife. 135 pp. + 4 planos + anejos.
- Poncela, R. (2005b). "Control, seguimiento y actualización de la evolución del acuífero asociado al túnel de trasvase de La Palma". Dirección General de Aguas-Consejería de Infraestructuras, Transportes y Vivienda. Gobierno de Canarias. Informe Técnico. 102 pp + anejos. Santa Cruz de Tenerife.
- Poncela, R. (2006). "Estimación preliminar de los tiempos de residencia de las aguas subterráneas de Tenerife bajo diferentes hipótesis de la función de entrada de tritio". Informe inédito. Tenerife.
- Poncela, R. (2008). "Estudio de la evolución de la calidad del acuífero subterráneo encontrado con el túnel de trasvase de la Isla de La Palma". Dirección General de Aguas-Consejería de Obras Públicas y Transportes. Gobierno de Canarias. Informe Técnico. Revisión marzo. 69 pp. Santa Cruz de Tenerife.

- Poncela, R. y Skupien, E.; (2008). "Características químicas e isotópicas del agua subterránea del acuífero volcánico de Cumbre Nueva (La Palma, Islas Canarias)". VII Congreso Geológico de España. Las Palmas de Gran Canaria, 14 a 18 de julio de 2008. *Revista Digital Geo-Temas*, (10): 825-828. Libro de resúmenes p: 253.
- Poncela (2009). "Definición del modelo conceptual del flujo subterráneo de la Isla de La Palma; elección de las galerías cuyo control serviría como red de seguimiento de evolución del acuífero y la definición a nivel de proyecto básico de su cierre hidráulico, con el propósito de conseguir el buen estado de las masas de agua subterránea que indica la Directiva Marco 2000/60/CE. Caracterización hidrogeológica". Informe Técnico. Consultor: CCIMA, S.L. Dirección General de Aguas-Consejería de Obras Públicas y Transportes-Gobierno de Canarias. Santa Cruz de Tenerife. 144 pp + 8 planos.
- Poncela, R. y Skupien, E. (2009). "Estudio de evaluación hidrogeológica actual de la Fuente Santa (T.M. de Fuencaliente)". Informe Técnico. CIAP: Consejo Insular de Aguas de La Palma. Clave: OB-40/08. 136 pp.
- Poncela Poncela, R. y Skupien Balon, E. (2011). *Hidrogeología e hidroquímica del agua subterránea del acuífero volcánico de las vertientes a partir de datos medidos en galerías (La Palma, Islas Canarias)*. En Cabrera, MC; Lambán, LJ; Manzano, M y Valverde, M (Edit.): Cuatro décadas de investigación y formación en aguas subterráneas. Libro homenaje al Profesor Emilio Custodio: 181-192. Zaragoza. AIH-GE. ISBN 978-84-938046-1-9.
- Poncela Poncela, R.; Skupien Balon, E.; Martín Castro, F.J. y Rodríguez López, M. (2012). "Metodología para el estudio hidrogeológico de un manantial minero medicinal en zona costera desde la perspectiva de la Fuente Santa". *VIII Simposio sobre el Agua en Andalucía - SIAGA 2012*. Cádiz, 1-3 octubre. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.- Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas 30(I): 491-500.
- Poncela, R. (2012). "Estudio de afección entre la boca Este del túnel de trasvase y la galería Hidráulica Breña Alta". CIAP: Consejo Insular de Aguas de La Palma. Informe Técnico. 64 pp. Santa Cruz de Tenerife.
- Poncela, R. y Skupien, E. (2013). "Estado de las masas de agua subterránea de La Palma". Informe Técnico. CIAP: Consejo Insular de Aguas de La Palma. 131 pp.
- Poncela, R.; Skupien, E.; Lario, R. y Morales, Á. (2013). "Protection perimeters for natural mineral water catchment in volcanic aquifers in the Canary Islands". En J.C. Santamarta y L.E. Hernández (Eds): *Proceedings from the 1st International Workshop in Environmental Security, Geological Hazards and Management*. San Cristóbal de La Laguna, Tenerife (Canary Islands, Spain). 10-12 April. 2013. Part 2: Water Management and Protection, pp: 125-130. ISBN 978-84-616-2005-0.
- Poncela, R. (2014). "Estimación preliminar de los tiempos de residencia de las aguas subterráneas de La Palma bajo diferentes hipótesis de la función de entrada de tritio". Informe inédito. La Palma.

- Poncela, R. y Skupien, E. (2014). "Estudio de la situación hidrogeológica actual de las galerías: "El Altito " (T.M. de Valle Gran Rey) e "Ipalán" (T.M. de San Sebastián). Memoria y anexos". Viceconsejería de Pesca y Aguas. Gobierno de Canarias. 116 pp.
- Poncela, R. (2015). "Nueva contribución a la caracterización de las rectas altitudinales en función del contenido de isótopos estables de las aguas subterráneas de La Palma". Informe inédito. La Palma.
- Poncela Poncela, R.; Skupien Balon, E.; Morales González-Moro, Á.; Lario-Báscones, R.J. y Santamarta Cerezal, J.C. (2015a). *Caracterización hidroquímica e isotópica ambiental de las aguas subterráneas alumbradas en los nacientes La Mina y El Molinillo (T.M. de Tejeda, Gran Canaria)*. En María del Carmen Cabrera, Tatiana Cruz-Fuentes, Vanessa Mendoza-Grimón y María del Pino Palacios-Díaz (Eds): Actas del II Workshop: "Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas". Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 21 al 23 de enero de 2015, pp: 255-262. ISBN 978-84-938046-4-0.
- Poncela, R.; Santamarta, J.C; García, J. (2015b). "Characterization of the hydraulic diffusivity in volcanic aquifers systems. Case of La Palma (Canary Islands)". En prensa.
- Reiss, W. (1861). *Die Diabas und Lava Formation der Insel Palma*. Dreidel, Wiesbaden. pp: 1-75. En Kunkel, G. (1976)(Edit.): *Biogeography and Ecology in the Canary Islands: Capítulo IV.- The geology of the Canary Islands: 67-183*. Dr. Junk bv. Publishers. The Hague. ISBN 978-94-010-1568-4.
- Rivet, F. (2004). "Mesures et suivi d'une galerie d'extraction d'eau. Cas de tunnel de transvasement d'eau potable de Breña Alta-Los Llanos, île de La Palma (Espagne)". Informe de Estadía de fin de 2º año. École Nationale Supérieure de Géologie. Vandoeuvre Les Nancy Cedex (Francia). Septiembre de 2004. 42 pp + anexos.
- Runston, K.R. and Ward, R.C. (1979). "The estimation of groundwater recharge". *Journal of Hydrology*. 41(3/4): 345-361.
- Sáenz de Oiza, J. (2011). *Zona de influencia de una galería*. En Cabrera, MC; Jiménez, J y Custodio, E. (Edit.): *El conocimiento de los recursos hídricos de Canarias cuatro décadas después del Proyecto SPA-15. Libro homenaje póstumo al Dr. Ingeniero D. José Sáenz de Oiza: 171-179*. Las Palmas de Gran Canaria. ISBN 978-84-938046-0-2.
- Samper, J.; Poncela, R.; Custodio, E. y García Vera, M.A. (1991a). "Estimation of infiltration recharge from a combination of meteorological and hydrogeological data". *XXIII IAH International Congress: Aquifer Overexploitation*, Puerto de la Cruz, Tenerife (Canary Islands, Spain), 15-19. July. (I): 85-88.
- Samper, J.; García Vera, M.A.; Poncela, R. y Custodio, E. (1991b). "Comparison of Groundwater Recharge Estimation Methods for Arid and Evaporitic Environments". En: *Increasing groundwater recharge in semi-arid zones. XXIV IAHR Congress, Asociación Internacional de Investigación Hidráulica*. Madrid.

- Santamarta, J.C. (Ed.), (2001). "Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos: métodos y técnicas experimentales en las Islas Canarias". Colegio de Ingenieros de Montes. Madrid. 552 pp.
- Santamarta, J.C. (2009). *Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales*. Tesis Doctoral, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). Universidad Politécnica de Madrid. 395 pp. Madrid.
- Santamarta, J.C. y Rodríguez-Martín, J. (2012). "Obras hidráulicas en islas y terrenos volcánicos". *Ingeopress*, 211:14-19.
- Santamarta, J.C.; Lario-Báscones, R.J.; Rodríguez-Martín, J.; Hernández, L.E. and Poncela, R. (2014a). "Introduction to hydrology of volcanic islands". Proceedings from the 2014 International Conference on Environment Systems Science and Engineering. IERI Procedia 9: 135-140. Elsevier.
- Santamarta, J.C.; Poncela, R. y Fontes, J.C (2014b). "Surface hydrology and soil conservation in volcanic islands; strategies against climate change". In Polgár, A.; Bazsó, T.; Nagy, C. and Gálos, B. (editors) (2014: Local and regional challenges of climate change adaptation and green technologies. *Proceedings Kongerencia-kiadvány. UWH FF - NymE EMK*, UWH Press - NymE Kiadó, Sopron. 109: 75-79 pp. ISBN 978-963-334-192-6.
- Santamarta, J.C.; Neris, J. and Poncela, R. (2015). "Hydrological parameters in volcanic forest soils: analysis and interpretation in the Canary Islands". En prensa iForest.
- Sapper, K. (1906). "Beitrage zur Denntnis von Palma und Lanzarote". *Peterm. Geogr. Mitt.* (52): 145-184. En Kunkel, G. (1976)(Edit.): Biogeography and Ecology in the Canary Islandas: Capítulo IV.- The geology of the Canary Islands: 67-183. Dr. Junk bv. Publishers. The Hague. ISBN 978-94-010-1568-4.
- Shade, P. J. (1997). *Water budget for the island of Molokai, Hawaii*. Honolulu, Hawaii, USGS, pp 20.
- SIHTV (1974). "Comunicaciones científicas del Simposio Internacional sobre Hidrología de Terrenos Volcánicos". *Simposio Internacional sobre Hidrología de Terrenos Volcánicos*. CEDEX-Gobierno de Canarias. Lanzarote, 4 a 8 de marzo. 2 Tomos. 1296 pp.
- Singhal, B,B,S, and Gupta, R.P. (2010). *Applied Hidrogeology of Fractures Rocks*. Second edition. 408 pp. Berlin.
- Skupien, E. (1998). *Aguas subterráneas en las rocas volcánicas de La Gomera*. Tesis Doctoral. Departamento de Geología de la Academia de Minería y Siderurgia "Stanislau Staszic" de Cracovia (Polonia). Facultad de Geología, Geofísica y Protección del Ambiente. Universidad AGH. 121 pp.
- Skupien, E. (2005). "Aplicación de los isótopos estables en los recursos hídricos de la Isla de Tenerife". Dirección General de Universidades e Investigación. Consejería de Educación, Cultura y Deportes del Gobierno de Canarias. 38 pp. Informe inédito.

- Skupien, E. y Poncela, R. (2006). "Informe sobre la caracterización hidroquímica e isotópica ambiental preliminar del acuífero asociado al túnel de trasvase. Funcionamiento hidrogeológico del sistema (Isla de La Palma)". CIAP: Consejo Insular de Aguas de La Palma. Informe Técnico. 116 pp + Addenda. Santa Cruz de Tenerife.
- Skupien, E. y Poncela, R. (2007a). "Seguimiento del acuífero asociado al túnel de trasvase. Funcionamiento hidrogeológico del sistema (Isla de la Palma)". Informe Técnico. CIAP: Consejo Insular de Aguas de La Palma. Clave: OB-20/07. 67 pp.
- Skupien, E. y Poncela, R. (2007b). "Informe sobre la caracterización hidroquímica de las masas de agua subterránea de la Isla de La Palma". CIAP: Consejo Insular de Aguas de La Palma. Informe Técnico. 63 pp. Santa Cruz de Tenerife.
- Skupien, E. y Poncela, R. (2007c). "Contribución de los isótopos ambientales al conocimiento hidrogeológico del acuífero de Cumbre Nueva asociado al túnel de trasvase (Isla de La Palma)". *XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales*. Oviedo, 7 a 11 de Octubre de 2007. Libro de resúmenes pp: 400-401. Texto completo en CD: Área III.- Tecnología y usos del agua, III.1.- Hidrogeología. 13 pp.
- Skupien Balon, E. y Poncela Poncela, R. (2008). "Contribución de los isótopos estables y del tritio al conocimiento hidrogeológico de la zona central-sur de Tenerife. IX Simposio de Hidrogeología". Elche, 28 a 30 de enero de 2008. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, (XXVIII): 145-153.
- Skupien Balon, E.; Morales González-Moro, Á. y Poncela Poncela, R. (2008). *Caracterización hidrogeológica e hidroquímica de las aguas minerales naturales de Canarias*. En López Geta, J.A.; Loredó Pérez, J.; Fernández Ruiz, L. y Pernía Llera, J.M. (Eds): Investigación y gestión de los recursos del subsuelo. Libro homenaje al Profesor Fernando Pendás Fernández: 865-880. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas (27): 865-880. ISBN: 978-84-7840-773-6. IGME. Madrid.
- Skupien, E. y Poncela, R. (2009a). "Estudio hidrogeológico e hidroquímico del Naciente de Marcos para su declaración como agua mineral natural según los Reales Decretos 1074/2002 y 1744/2003 (T.M. de San Andrés y Sauces)". Comunidad de Regantes de Los Sauces. 131 pp.
- Skupien Balon, E. y Poncela Poncela, R. (2009b). "Estudio hidrogeológico e hidroquímico de los Nacientes Marcos y Cordero (La Palma) para su declaración como agua mineral natural". *El Manantial*, (45): 6. Boletín Informativo de la Fundación Centro Canario del Agua. Santa Cruz de Tenerife.
- Skupien Balon, E. y Poncela Poncela, R. (2009c). "Calidad de las aguas del Naciente Marcos para la declaración como agua mineral natural". *Jornadas "Marcos y Cordero: oportunidades económicas para las aguas del manantial"*. San Andrés y Sauces, 9, 10 y 11 de noviembre de 2009. Fundación Marcos y Cordero – Fundación Canaria.

- Skupien, E. y Poncela, R. (2010). "Prueba de aforo y recuperación de las aguas alumbradas en la Fuente Santa. Informe Técnico". CIAP: Consejo Insular de Aguas de La Palma. Clave: OB-82/09. 102 pp.
- Skupien Balon, E. y Poncela Poncela, R. (2011). *Características hidrogeológicas, químicas e isotópicas del agua subterránea del acuífero volcánico de las vertientes en el entorno de los Nacientes Marcos y Cordero (La Palma, Islas Canarias)*. En Cabrera, MC; Jiménez, J y Custodio, E. (Edit.): El conocimiento de los recursos hídricos de Canarias cuatro décadas después del Proyecto SPA-15. Libro homenaje póstumo al Dr. Ingeniero D. José Sáenz de Oiza: 87-92. Las Palmas de Gran Canaria. ISBN 978-84-938046-0-2.
- Skupien Balon, E.; Poncela Poncela, R.; Morales González-Moro, Á. y Lario Báscones, R. (2012). Aguas minerales naturales en terrenos volcánicos del Archipiélago Canario. En Santamarta Cerezal, J.C. (ed.) et al. (2013). Avances en la investigación de los recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos: 49-62. Reunión científica nacional sobre el estudio de los recursos hídricos en islas volcánicas. Universidad de La Laguna. Nov. 2012. Tenerife.
- Skupien Balon, E.; Poncela Poncela, R. (2013a). "Presencia de CO₂ en galerías de agua subterránea en los edificios volcánicos Cumbre Nueva y Cumbre Vieja (La Palma, Islas Canarias)". *XIII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales*. Santander, 3 a 5 de Octubre de 2013, pp:60-70.
- Skupien, E. y Poncela, R. (2013b). "Estudio geológico, hidrogeológico e hidroquímico del sistema acuífero asociado a los nacientes "La Mina" y "El Molinillo" para solicitud de autorización de aprovechamiento de agua mineral natural según el Real Decreto 1798/2010 (T.M. de Tejeda)". Ayuntamiento de Tejeda. Informe Técnico. 156 pp + 10 planos. Santa Cruz de Tenerife.
- Soler, C. (2008). "La Fuente Santa: leyenda y realidad". *Tierra y Tecnología*. (33): 3-14.
- Sosa, E.; Guerra, J.C. and Arencibia, M.T. (2011). "Isotopic composition of rainwater in the subtropical island of Tenerife, Canary Islands". *Journal of Environmental Hydrology*. 19 (paper 17): 1-13.
- SPA-15 (1975). "Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias". Informe Técnico final preparado por Heras, R.; Fernandopullé, D.; Sáenz-Oiza, J. y Custodio, E. UNESCO/UNDP/(MOP-DGOH-Gobierno Español). Proyecto SPA/69/515. 3 Tomos+planos. Las Palmas-Madrid.
- Staudigel, H. and Schmincke, H.U. (1984). "The Pliocene seamount series of La Palma. Canary Islands". *Journ. Geophys. Res.* (89): 11955-11215.
- Staudigel, H.; Feraud, G. and Giannerini, G. (1986). *The history of intrusive activity on the island of La Palma. Canary Islands. Journ. Volc. Geoth. Res.* (27): 299-322. Elsevier Science. B.V., Amsterdam.
- Takasaki, K. J. and Mink, J. F. (1985). *Evaluation of major dike-impounded groundwater reservoirs, Island of Oahu*. USGS, Honolulu, pp 76.

- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, (38):55-94.
- Veeger, A.I. (1991). *Geochemical methods for evaluating the origin and evolution of ground water in volcanic rocks*. Ph.D. Dissertation. Department of Hydrology and Water Resources. University of Arizona. 239 pp.
- Von Buch, L. (1825). *Physikalische Beschreibung der Kanarische Inseln*. 201 pp. Berlin. En IGME-OAPN (2011). "Parque Nacional de la Caldera de Taburiente: guía geológica". Roberto Rodríguez (Dir. y coord.). Instituto Geológico y Minero de España y Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Colección de Guías Geológicas de Parques Nacionales. Editorial Everest, S.A. 223 pp. Madrid.
- Williams J. A. and Soroos, R. L. (1973). "Evaluation of methods of pumping test analyses for application to Hawaiian aquifers". Honolulu (HI): Water Resources Research Center, University of Hawaii at Manoa. WRRC technical report, 70, pp 159.
- Zuber, A. (1986). *Mathematical models for the interpretations of environmental radioisotopes in groundwater systems*. In Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Elsevier. (2): 1-59.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ANEJO 1. LISTADO DE PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS

ANEJO 1. LISTADO DE PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS

Listado 1.- Listado de parámetros físico-químicos e índices de los análisis realizados en la Red de Control de la Demarcación Hidrográfica de La Palma (datos seleccionados con fiabilidad analítica superior al 80%) para la caracterización hidroquímica del sistema acuífero volcánico insular.

MASA	CÓDIGO WISE	TIPO	FECHA	LABORATORIO	CE (µS/cm)	pH	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ⁺⁺ (mg/L)	Mg ⁺⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	CO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SAR	Error
LP001	1250019	Gal	19-05-06	EDAFOLOGIA	388	6,74	34,29	12,22	16,63	16,73	0,08	220,61	0,00	13,03	5,02	11,59	1,42	6,29
LP001	1250022	Gal	19-05-06	EDAFOLOGIA	352	7,12	26,27	6,79	9,35	24,69	0,09	213,58	0,00	12,24	6,83	2,54	1,02	5,35
LP001	1250001	Gal	27-12-07	AGUAS TELDE	126	7,00	14,60	3,50	1,30	3,20	0,10	47,60	0,00	10,70	1,50	1,30	1,57	7,47
LP001	1250014	Gal	28-12-07	AGUAS TELDE	151	7,40	21,00	6,20	1,00	4,20	0,10	70,80	0,00	12,40	2,50	1,00	2,05	7,31
LP001	1250016	Gal	28-12-07	AGUAS TELDE	501	7,90	23,00	4,00	50,40	25,80	0,10	179,30	0,00	10,70	142,50	1,00	0,66	8,13
LP001	1250008	Gal	08-09-10	CANARAGUA	185	7,76	12,50	4,60	8,80	6,30	0,10	6,10	0,00	42,50	4,12	5,00	0,79	10,39
LP001	1250022	Gal	18-01-12	EDAFOLOGIA	234	7,29	17,41	3,48	5,29	16,13	0,06	131,17	0,00	12,34	8,37	12,39	0,85	16,24
LP001	1250022	Gal	10-07-12	EDAFOLOGIA	258	7,44	20,02	3,93	5,04	16,68	0,06	140,32	0,00	13,11	4,55	2,43	0,97	7,59
LP001	1250014	Gal	08-10-12	LABAQUA	166	---	16,90	6,40	5,70	6,60	0,10	73,80	0,00	9,90	3,50	1,40	1,14	8,89
LP001	1250019	Gal	08-10-12	LABAQUA	577	---	49,40	13,70	23,60	28,60	0,10	278,80	0,00	17,20	7,20	18,80	1,62	9,12
LP001	1250008	Gal	30-11-12	LABAQUA	124	---	14,60	5,60	3,80	3,50	0,10	57,30	0,00	5,80	1,30	5,20	1,30	3,84
LP001	1250006	Gal	11-11-12	LABAQUA	117	---	11,70	2,60	5,70	3,80	0,10	54,40	0,00	8,20	1,20	1,10	0,93	1,05
LP001	S/Ref	Gal	13-12-12	LABAQUA	85	---	13,30	4,40	2,30	1,30	0,10	36,20	0,00	4,80	1,20	1,80	1,74	15,92
LP001	1250009	Gal	13-12-12	LABAQUA	91	---	10,80	4,90	2,80	2,30	0,10	41,80	0,00	5,00	1,20	2,60	1,16	3,99
LP001	1250005	Man	14-01-13	LABAQUA	80	---	8,10	2,40	4,00	1,70	0,10	39,20	0,00	4,40	1,30	2,40	0,85	9,28
LP002	1250007	Pozo	21-12-07	AGUAS TELDE	269	7,50	42,40	3,70	1,90	6,50	0,10	58,60	0,00	51,50	14,40	3,30	3,29	7,39
LP002	1250002	Pozo	27-12-07	AGUAS TELDE	469	7,70	42,90	6,20	5,60	25,50	0,10	63,40	0,00	113,60	22,60	3,40	1,71	7,93

MASA	CÓDIGO WISE	TIPO	FECHA	LABORATORIO	CE (µS/cm)	pH	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ⁺⁺ (mg/L)	Mg ⁺⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	CO ₃ ⁼ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁼ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SAR	Error
LP002	1250010	Pozo	27-12-07	AGUAS TELDE	300	7,20	44,60	5,10	2,10	7,90	0,10	61,00	0,00	58,60	14,70	4,50	3,16	7,01
LP002	1250017	Pozo	10-01-08	AGUAS TELDE	1.189	7,90	199,90	22,90	41,50	35,30	0,50	420,90	0,00	62,10	142,70	104,80	5,51	6,97
LP002	1250013	Pozo	22-01-08	AGUAS TELDE	613	7,60	61,70	8,20	5,70	33,50	0,10	81,70	0,00	142,00	26,50	10,00	2,18	1,99
LP002	1250015	Pozo	22-01-08	AGUAS TELDE	627	8,10	45,20	6,70	50,20	28,90	0,10	207,40	0,00	30,80	134,20	25,20	1,26	6,23
LP002	1250010	Pozo	12-08-10	CANARAGUA	777	7,46	34,00	8,90	29,60	31,60	0,10	9,20	0,00	223,30	26,70	4,29	1,04	19,88
LP002	1250023	Pozo	18-08-10	CANARAGUA	669	7,42	29,40	19,20	20,80	50,10	0,11	335,50	0,00	35,45	13,20	17,44	0,80	1,69
LP002	1250002	Pozo	09-09-10	CANARAGUA	546	7,95	26,20	7,30	28,00	24,30	0,10	7,93	0,00	152,40	14,88	5,00	0,87	1,80
LP002	1250015	Pozo	08-10-12	LABAQUA	1.037	---	125,00	10,40	50,90	27,40	0,10	335,80	0,00	36,50	109,50	89,00	3,51	2,41
LP002	1250017	Pozo	08-10-12	LABAQUA	1.387	---	212,10	21,20	44,20	28,40	0,10	455,90	0,00	50,60	127,10	117,00	6,12	6,32
LP002	1250018	Pozo	08-10-12	LABAQUA	1.255	---	170,90	13,70	56,20	26,60	0,10	397,90	0,00	48,10	132,20	105,00	4,70	3,61
LP002	1250007	Pozo	10-10-12	LABAQUA	1.652	---	265,60	10,50	32,60	40,90	0,10	57,70	0,00	489,90	69,40	2,70	7,31	3,50
LP003	S/Ref	Sond	23-08-10	CANARAGUA	2.890	6,32	49,10	16,40	372,00	211,40	0,45	930,30	0,00	124,08	430,50	5,00	0,50	32,37
LP004	S/Ref	Pozo	03-09-06	S/Ref	2.070	---	300,00	54,00	90,00	115,00	---	1.301,00	0,00	104,00	150,00	1,00	4,94	3,51
LP004	S/Ref	Gal	24-12-06	S/Ref	2.050	---	230,00	88,00	72,00	142,00	---	1.389,00	0,00	114,00	58,00	1,00	3,62	1,18
LP005	1250021	Pozo	11-01-08	AGUAS TELDE	1.171	7,10	164,60	73,80	27,10	43,10	0,10	500,20	0,00	67,50	119,80	53,00	4,57	3,58
LP005	1250020	Pozo	08-10-12	LABAQUA	1.394	---	162,40	36,70	43,60	48,40	0,10	567,40	0,00	35,60	105,90	75,00	4,02	3,18
LP005	1250021	Pozo	08-10-12	LABAQUA	1.594	---	195,50	62,50	42,80	48,80	0,10	552,80	0,00	128,40	101,60	51,00	4,85	4,00

Listado 2.- Listado de otros contaminantes y plaguicidas principales de los análisis realizados en la Red de Control de la Demarcación Hidrográfica de La Palma.

MASA	CÓDIGO WISE	TIPO	FECHA	LABORATORIO	As (µg/L)	Cd (µg/L)	Pb (µg/L)	Hg (µg/L)	Tricloroetileno + tetracloroetileno (µg/L)	Total Plaguicidas (µg/L)	Aldrin (µg/L)	Dieldrin (µg/L)	Heptacloro (µg/L)	Heptacloro epoxido (µg/L)
LP001	1250022	Gal	21-12-07	AGUAS TELDE	< 10	< 5	< 20	< 0,5	< 2	< 0,5	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LP001	1250019	Gal	24-12-07	AGUAS TELDE	< 10	< 5	< 20	< 0,5	< 2	< 0,5	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LP001	1250019	Gal	01-07-10	AGUAS TELDE	< 10	< 5	< 20	< 0,5	< 2	< 0,5	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LP001	1250022	Gal	07-07-10	AGUAS TELDE	< 10	< 5	< 20	< 0,5	< 2	< 0,5	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LP001	S/Ref	Gal	15-03-11	OLIVER RODÉS	< 2	< 1	< 5	< 0,2	< 4	< 0,5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
LP001	1250014	Gal	10-10-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP001	1250019	Gal	10-10-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP001	1250006	Gal	22-11-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP001	S/Ref	Gal	03-12-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP001	1250008	Gal	03-12-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP001	S/Ref	Gal	14-12-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP001	1250009	Gal	14-12-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP001	1250005	Man	16-01-13	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP002	1250007	Pozo	21-12-07	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP002	1250015	Pozo	10-10-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP002	1250017	Pozo	10-10-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP002	1250018	Pozo	10-10-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP005	1250020	Pozo	10-10-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LP005	1250021	Pozo	10-10-12	LABAQUA	< 2	---	---	---	---	---	---	---	---	---

