



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Departamento de Física

TESIS DOCTORAL

CONTRIBUCIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA E HIDROQUÍMICA AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO DE LA ALDEA (GRAN CANARIA, ISLAS CANARIAS)

TATIANA CRUZ FUENTES

2008





UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Departamento de Física

TESIS DOCTORAL

CONTRIBUCIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA
E HIDROQUÍMICA AL CONOCIMIENTO
DEL ACUÍFERO DE LA ALDEA
(GRAN CANARIA, ISLAS CANARIAS)

TESIS PRESENTADA POR:

TATIANA CRUZ FUENTES

DIRIGIDA POR:

Dra. MARÍA DEL CARMEN CABRERA SANTANA

Dr. JAVIER HEREDIA DÍAZ

LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, 2008

A mi marido, Dani
A mi madre, mami
A mis hermanas: Bibi, Ana y Jeza
Y a Taidia

*Por muy larga que sea la tormenta,
el sol siempre vuelve a brillar entre las nubes.*

Khalil Gibran

AGRADECIMIENTOS

Es muy complicado sintetizar en pocos párrafos la gratitud que siento hacia las personas que me han ayudado y apoyado en este proyecto, así que perdónenme si en algún momento me paso de sensible, pero tengo mucho que agradecer.

En primer lugar mi agradecimiento es para ellos, para mis directores Dra. María del Carmen Cabrera y Dr. Javier Heredia, sin su tiempo, apoyo y conocimiento no se hubiera realizado esta tesis doctoral. A Mari Carmen quisiera expresar mi más sincero agradecimiento por haberme brindado la oportunidad de realizar esta tesis. Deseo dar las gracias, más que a una directora, a una compañera y amiga que en los momentos difíciles, que los hubo, apostó por mí inquebrantablemente. A Javier quisiera agradecerle todo lo que me ha enseñado en los últimos años, y sobre todo, por haberme brindado su tiempo y paciencia en el desarrollo de esta tesis. Muchas gracias de todo corazón a los dos. También quiero dar las gracias en este párrafo a Francisco José Pérez Torrado que ha prestado desde un segundo plano todo el apoyo que estaba a su alcance, gracias por hacerlo todo más fácil.

Al Exmo. Cabildo Insular de Gran Canaria por subvencionar mi trabajo estos años con una beca de investigación y más concretamente al Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria y a su Gerente Jose Luís Guerra. Sin el apoyo económico de esta institución no hubiera sido posible este proyecto.

A la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y más concretamente al departamento de Física, por permitir la realización de este trabajo en sus instalaciones. Quiero hacer extensivo este agradecimiento a los profesores de la universidad José Mangas, Ignacio Alonso, Inmaculada Menéndez, Jose Luís Pacheco y Ángelo Santana que han aportado su granito de arena ampliando mis conocimientos en campos de la ciencia que desconocía.

Al Instituto Geológico y Minero de España, por haber permitido que Javier Heredia sea mi director de tesis y por la hospitalidad, eficiencia y calidez ofrecidas en mis estancias en Madrid. Gracias de forma especial a Silvino Castaño por ayudarme en los principios, que siempre son duros, a Carolina Guardiola por estar ahí cuando la he necesitado y a Luís Moreno por sus brillantes contribuciones a este trabajo, sus sabios consejos y su apoyo.

A Gonzalo Meneses del Servicio Hidráulico del Gobierno de Canarias, por tener tantos datos valiosos para el desarrollo de este trabajo al alcance de todos.

Al municipio de La Aldea, que conscientes de su lejanía, hacen que las estancias en su municipio sean muy agradables. Haciendo extensivo este agradecimiento a Sergio Rodríguez Almeida (Concejal del Ayuntamiento de La Aldea), Facundo del Toro (Gerente de la comunidad de regante), Francisco Herrera (encargado de las desaladoras), Cooperativas de agricultores y a los dueños de pozos. Y en especial a Francisco Suárez de la oficina de Extensión Agraria en La Aldea,

de él nunca tuve un no por respuesta y sus conocimientos sobre la agricultura del municipio son infinitos.

A mis compañeros de laboratorio que están en la actualidad o que han pasado por éste a lo largo de los años: Ale, Pilar, Laura, Esmeralda, Isora, Annetty, Cati, Albert y Fina. Ustedes me han levantado cuando me han visto caer, gracias por crear un ambiente de trabajo difícil de superar.

A mis compañeros de desayuno en Las Palmas Javi y Leti y en Madrid Irene, Paola, Patricia, Mónica, Héctor, Juan y Esther, gracias por esas charlas que hicieron más ameno y llevadero el trabajo diario, en algunas épocas estos eran lo mejores momentos del día.

A la Federación de Jóvenes Investigadores (FJI) que lucha por el reconocimiento de que todos los Investigadores son trabajadores de pleno derecho. Aunque en mi caso no haya podido ser, por lo menos lo hemos intentado. ¡NINGÚN INVESTIGADOR SIN CONTRATO!.

A mis mejores amigas, esas personas tan importantes en nuestra vida, en especial a Leticia, que me ha enseñado con su ejemplo que hay vida después del trabajo, y a Dácil, Patricia y Romina que nunca han dejado de escucharme y darme una palabra de apoyo.

A Pili, Rafa, Belén, David y Diana por su constante apoyo y hacerme sentir como en casa en mis estancias en Madrid. Y a la pequeña Celia, que en un fin de semana, me robó el corazón.

A mis hermanas, Bibiana, Ana y Jezabel, porque aun siendo tan diferentes, me permiten ver la vida desde otro punto de vista. Mil besos y mil disculpas por el tiempo que no hemos compartido.

A Taidia, a Raquel y a Lucía, mis niñas, porque con una mirada y una sonrisa compensan una mala semana, un mal mes, un mal año, una mala vida. Las tardes de los miércoles han hecho mi vida más alegre en estos últimos años.

Por encima de todo gracias a mi madre por intentar que mi vida sea más fácil, aunque a veces se entristezca porque no lo consiga, y a mi marido, mi gratitud y todo mi amor por su apoyo constante en los momentos fáciles y sobre todo en los momentos difíciles. Les quiero muchísimo a los dos.

RESUMEN

En la presente tesis, se ha estudiado y contrastado el funcionamiento hidrogeológico de un acuífero en terreno volcánico a partir de la modelación del flujo y del transporte de solutos en el mismo. Para ello, primero se ha establecido un modelo conceptual del comportamiento del flujo de aguas subterráneas en la zona de estudio que ha ido sufriendo modificaciones a medida que se avanzaba en la modelación. Posteriormente, se ha elaborado un modelo numérico de flujo que ha representado y explicado el comportamiento del acuífero de forma coherente, se ha realizado una interpretación del comportamiento de los iones mayoritarios y una modelación hidrogeoquímica donde se ha hecho intervenir todos los procesos que contribuyen a la salinización del acuífero, para finalizar con un modelo de transporte de soluto que ha englobado todo el conocimiento obtenido en los procesos anteriores.

El barranco de La Aldea (Gran Canaria) se dedica de forma intensiva a la agricultura con una superficie media de cultivo de unas 645 ha y un consumo agrícola de unos 6.5 hm³/año. El aporte de aguas superficiales para riego en el período 1997-2000 se ha visto comprometido debido a la sequía que ha azotado la zona y las aguas subterráneas han suplido las necesidades de agua para riego, circunstancia que ha sido contemplada y reproducida por el modelo de forma satisfactoria. La geología de la zona presenta una unidad sedimentaria, heterogénea, constituida por los materiales aluviales y derrubios de ladera y una unidad volcánica, también heterogénea, formada por Basaltos Miocenos que se sitúan debajo de la unidad sedimentaria y ocupa toda la superficie.

La modelación del flujo se ha realizado mediante un modelo tridimensional considerando tres capas que representan aproximadamente la geología de la zona: la capa superior incluye los materiales sedimentarios (aluvial y derrubios) y parte de los basaltos más alterados; las capas inferiores están conformadas por basaltos cuya permeabilidad disminuye en profundidad. La caracterización geológica de esta capa superior hizo necesaria, en los primeros pasos de la modelación, una campaña de campo para cartografiar los derrubios de ladera, pues estos no habían sido considerados relevantes hasta el momento y su importancia hidrogeológica se puso de manifiesto durante el desarrollo del modelo. Igualmente, el modelo ha evidenciado la existencia de una entrada de agua desde las zonas altas de la isla que se suponía impermeables por la existencia de una caldera volcánica.

La modelación hidrogeoquímica se ha llevado a cabo mediante la simulación de las reacciones que tienen lugar en el acuífero. Ello ha permitido cuantificar la composición química del agua subterránea, que está controlada por la composición química del agua de lluvia local; la influencia de la deposición seca de aerosol marino y el polvo sahariano; la incorporación del CO₂ del suelo; la alta evapotranspiración; la meteorización y disolución de los minerales silicatados; los

aportes de los retornos de riego (origen antrópico) y los aportes de aguas salinas existentes en la parte central de la zona (con un origen natural aunque influencia antrópica). Mediante la integración del modelo de flujo, la interpretación del comportamiento de los iones mayoritarios y la modelación hidrogeoquímica, se ha elaborado un modelo de transporte de cloruro que reproduce satisfactoriamente la distribución espacial de las iso-concentraciones de cloruro en la zona de estudio y se ha corroborado la cuantificación llevada a cabo mediante la modelación hidrogeoquímica.

ABSTRACT

The hydrogeological features of an aquifer in a volcanic terrains region have been studied and contrasted with the output of a flow and solute transport model. To accomplish this, a conceptual model of the groundwater flow behaviour in the study area was developed, evolving in accord with the results obtained during the modelling process. Afterwards, a numerical model of flow was elaborated, representing and explaining the function of the aquifer in a coherent way. In addition, the behaviour of the major and minor ions and the processes that contribute to the salinization of the aquifer have been explained through the modelling process. Finally, a solute transport model was constructed that confirmed all the conclusions previously obtained.

The La Aldea ravine (Gran Canaria) is dedicated to the intensive agriculture, with an average surface dedicated to agriculture about 645 ha and consuming for agricultural activity some $6.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$. Surface waters used normally for irrigation declined during 1997-2000 due to a drought and groundwater was used to meet the irrigation requirements. This event has been simulated and reproduced satisfactorily by the model. The geology of the zone presents a heterogeneous sedimentary unit, constituted by alluvial materials and flank scree deposits and a volcanic unit, also heterogeneous, formed by Miocene Basalts that are located both beneath and above the sediments throughout the region.

The modelling has been performed by means of three layers that represent approximately the geology of the area. The upper layer includes the sedimentary materials (alluvial and scree) and some metres of the more altered basalts. The other two layers are basalts that decrease in permeability with depth. The model demonstrated the hydrogeologic importance of the upper layer necessitating a field campaign to map the scree in this region, which had never been considered relevant, and its hydrogeological significance became evident during the flow modelling. The model also demonstrated the groundwater flow from the highland of the island, a concept that had been previously rejected due to the existence of a volcanic caldera.

The hydrogeochemical modelling was developed to simulate the different chemical reactions that take place in the aquifer. This allowed the chemical composition of groundwater to be quantified. The model considered control by local rain; the influence of marine aerosol deposition and Saharian dust; incorporation of soil CO_2 ; high evapotranspiration; weathering and dissolution of silicate minerals; contribution from irrigation returns (anthropic origin); as well as salinization. The salinization here is found in the central part of the area and has both a natural and an anthropic component). By integration of the flow model, interpretation of major ion behaviour and hydrogeochemical modelling, a chloride transport model was developed. This reproduced satisfactorily the spatial distribution of the chloride concentration in the study area and confirmed the quantitative predictions from the hydrogeochemical model.

ÍNDICE

Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN	3
1.1.- OBJETIVOS	3
1.2.- ANTECEDENTES	4
1.2.1.- Modelos Hidrogeológicos.....	4
1.2.2.- Marco insular	6
1.2.3.- Zona de Estudio	7
1.3.- METODOLOGÍA DE TRABAJO	8
Capítulo 2.-MARCO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	15
2.1.- MARCO GEOGRÁFICO	15
2.2.- MARCO GEOLÓGICO.....	19
2.3.- MARCO HIDROGEOLÓGICO	27
Capítulo 3.-FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO CONCEPTUAL	35
3.1.- CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO	35
3.2.- CLIMATOLOGÍA	37
3.3.- MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	39
3.3.1.- Parámetros hidráulicos	40
3.3.2.- Flujo del agua subterránea	41
3.3.3.- Límites	43
3.3.4.- Explotación de las aguas subterráneas.....	43
3.3.5.- Entradas y salidas al acuífero	48
3.4.- BALANCE HÍDRICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	49
3.4.1.- Entradas.....	49
3.4.1.1.- Recarga por Lluvia.....	49
3.4.1.2.- Retornos de Riego.....	52
3.4.1.3.- Entrada por la Cabecera del Barranco	54
3.4.1.4.- Entrada por la Red de Abastecimiento	56
3.4.1.5.- Infiltración por Escorrentía	57
3.4.2.- Salidas.....	57
3.4.2.1.- Explotación	58
3.4.2.2.- Salida al Mar	58

Capítulo 4.- MODELO DE FLUJO DEL ACUÍFERO DE LA ALDEA	63
4.1.- GEOMETRÍA DEL MODELO	63
4.2.- CONDICIONES INICIALES Y DISCRETIZACIÓN TEMPORAL	64
4.3.- DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y CONDICIONES DE CONTORNO	64
4.4.- DATOS PIEZOMÉTRICOS Y DE BOMBEO	68
4.5.- INFORMACIÓN PREVIA DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS	71
4.6.- INFORMACIÓN DE LA RECARGA	71
4.7.- SIMULACIÓN DEL FLUJO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO	74
4.7.1.- Ajuste, Calibración y Análisis de Sensibilidad	74
4.7.2.- Parámetros Hidráulicos	77
4.7.3.- Balance de Masas	80
4.7.4.- Piezometría calculada	82
4.8.- SIMULACIÓN DEL FLUJO EN RÉGIMEN TRANSITORIO	83
4.8.1.- Ajuste, Calibración y Análisis de Sensibilidad	83
4.8.2.- Parámetros Hidráulicos	84
4.8.3.- Evolución Piezométrica	86
4.8.4.- Balance de Masas	91
4.9.- VALIDACIÓN DEL MODELO	93
Capítulo 5.- HIDROGEOQUÍMICA	99
5.1.-MARCO HIDROGEOQUÍMICO	99
5.1.1.- Características generales de la hidroquímica en terrenos volcánicos	99
5.1.2.- Características generales de la hidroquímica de Gran Canaria	100
5.1.3.- Características generales de la hidroquímicas de la zona de estudio	102
5.2.-EVOLUCIÓN DE LA HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	118
5.3.-CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS DE RECARGA	144
5.3.1.- Química del agua de lluvia	144
5.3.1.1.- La influencia del aerosol marino	147
5.3.1.2.- Las influencias del polvo sahariano	148
5.3.2.- Química del agua de presa y la escorrentía	149
5.3.3.- Química del agua de riego y los retornos de riego	151
5.3.4.- Relación agua - roca. Influencia de basaltos y azulejos	152
5.4.-MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA	156
5.4.1.- Proceso de simulación	156
5.4.1.1.- Simulación para pozos no influenciados por aportes antropogénicos	158
5.4.1.2.- Simulación de reacciones a lo largo de una línea de flujo	159

Capítulo 6.- MODELO DE TRANSPORTE DE SOLUTOS DEL ACUÍFERO DE LA ALDEA 163

6.1.- INTRODUCCIÓN	163
6.2.- INFORMACIÓN PREVIA DE PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS.....	165
6.3.- CONDICIONES INICIALES.....	169
6.4.- CONDICIONES DE CONTORNO	169
6.5.- PUNTOS DE OBSERVACIÓN.....	173
6.6.- SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE SOLUTO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO	174
6.6.1.- Ajuste, Calibración y Análisis de Sensibilidad.....	175
6.6.2.- Parámetros de Transporte	177
6.6.3.- Distribución calculada del ión Cloruro	178
DISCUSIÓN	183
MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL Y MODELO DE FLUJO	183
HIDROGEOQUÍMICA Y MODELO DE TRANSPORTE	190
BALANCE HÍDRICO.....	195
CONCLUSIONES.....	203
BIBLIOGRAFÍA	207
ANEJOS.....	217
ANEJO 1.- DATOS ABASTECIMIENTO Y DOTACIONES DE RIEGO	219
ANEJO 2.- CÁLCULO DEL NÚMERO DE CURVA	231
A.2.1.- INTRODUCCIÓN	233
A.2.2.- METODOLOGÍA	233
A.2.3.- RESULTADOS.....	235
A.2.4.- DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	243
ANEJO 3.- DATOS DE RECARGA.....	245
ANEJO 4.- DATOS DE ENTRADA AL MODELO.....	249
ANEJO 5.- DATOS DE HIDROQUÍMICA	269

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS DISTINTAS ETAPAS REALIZADAS EN EL PRESENTE TRABAJO.	10
FIGURA 2.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA DEL BARRANCO DE LA ALDEA (GRAN CANARIA). LA ZONIFICACIÓN DE LAS CUENCAS Y SUBCUENCAS ES LA UTILIZADA EN EL SPA-15 (1975) Y EN LOS PLANES HIDROLÓGICOS REALIZADOS CON EL CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE GRAN CANARIA (PHGC, 1992; PHGC, 1998).	16
FIGURA 2.2. MAPA DETALLADO DE TOPÓNIMOS DE LA ZONA DE ESTUDIO.	17
FIGURA 2.3. MAPA GEOLÓGICO DE GRAN CANARIA (MODIFICADO DE CARRACEDO ET AL. 2002).	20
FIGURA 2.4. MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO (MODIFICADO DE BALCELLS ET AL., 1992).	22
FIGURA 2.5. MAPA DE DOMINIOS GEOLÓGICOS DEDUCIDOS A PARTIR DEL MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA.	26
FIGURA 2.6. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO HÍDRICO NATURAL Y CON EXPLOTACIÓN INTENSIVA EN CANARIAS (CUSTODIO Y CABRERA, 2002).	29
FIGURA 3.1. LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS DE LAS DISTINTAS REDES DE CONTROL REALIZADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO: A) RED DE CONTROL GENERAL, B) RED DE CONTROL SALOBRE, C) RED DE CONTROL DE DESALINIZADORAS Y D) RED DE CONTROL ACTUAL.	36
FIGURA 3.2. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE LA ESTACIÓN AUTOMÁTICA Y LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS UBICADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO. LA DISTRIBUCIÓN DE LAS DISTINTAS ÁREAS SE AJUSTAN A LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ISOYETAS.	38
FIGURA 3.3. DISTRIBUCIÓN ANUAL DE LA PRECIPITACIÓN, ETR Y ESCORRENTÍA CALCULADAS MEDIANTE EL BALANCE DIARIO DE AGUA EN EL SUELO CON EL CÓDIGO EASY BAL V.3.	38
FIGURA 3.4. PIEZOMETRÍA PARA LOS AÑOS 1992 A) Y 1999 B) PARA EL BARRANCO DE LA ALDEA (MUÑOZ, 2005).	42
FIGURA 3.5. CORTES TOPOGRÁFICOS DONDE SE PUEDE OBSERVAR LO ABRUPTO DE LA SUPERFICIE Y EL LÍMITE INFERIOR DE LA ZONA A ESTUDIAR.	44
FIGURA 3.6. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL CAUDAL DE EXPLOTACIÓN ANUAL PARA LOS POZOS UBICADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO OBTENIDO A PARTIR DE LOS DATOS DE EXPLOTACIÓN REALIZADOS EN LA PRESENTE TESIS (UNIDADES: L/S).	47

FIGURA 3.7.TÉRMINOS DE ENTRADAS Y SALIDAS DE AGUA HACIA Y DESDE LA ZONA DE ESTUDIO.	48
FIGURA 3.8.LOCALIZACIÓN DE LA PRESAS DE EL PARRALILLO, SIBERIO Y EL CAIDERO DE LA NIÑA.	49
FIGURA 3.9.LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS DONDE SE HA REALIZADO EN CÁLCULO DEL CAUDAL DE ENTRADA POR LA CABECERA DEL BARRANCO.	55
FIGURA 4.1.LOCALIZACIÓN DE LAS DIFERENTES CONDICIONES DE CONTORNOS EN LA ZONA DE ESTUDIO. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL DREN EN EL ALUVIAL PRINCIPAL Y LOS BARRANCOS SECUNDARIOS DEL FUREL Y TOCODOMÁN Y OTROS BARRANCOS SECUNDARIOS DE MENOR ENTIDAD Y LA CONDICIÓN DE NIVEL CONSTANTE EN LA LÍNEA DE COSTA, DE FLUJO NULO EN EL NORTE Y SUR Y CAUDAL FIJO EN EL ESTE. ..	65
FIGURA 4.2.MAPA DE LA ZONA DE ESTUDIO CON LA SITUACIÓN Y CORTES EN LOS QUE SE MUESTRAN LA GEOMETRÍA DE LAS DISTINTAS CAPAS QUE SE PROPONEN EN EL MODELO.	67
FIGURA 4.3.LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.....	68
FIGURA 4.4.LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO ZONIFICADO PARA LA REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PIEZOMETRÍA.	69
FIGURA 4.5.LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS DE BOMBEO PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO EN RÉGIMEN A) ESTACIONARIO Y B) TRANSITORIO.	70
FIGURA 4.6.DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA RECARGA PARA EL MODELO DE FLUJO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO Y TRANSITORIO.	71
FIGURA 4.7.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA RECARGA PARA EL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO. LA ZONIFICACIÓN COINCIDE CON LA MOSTRADA EN LA FIGURA 4.6.	73
FIGURA 4.8.NIVELES PIEZOMÉTRICOS OBSERVADOS FRENTA A NIVELES PIEZOMÉTRICOS CALCULADOS POR EL MODELO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.	75
FIGURA 4.9.DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS RESIDUOS OBTENIDOS EN EL MODELO ESTACIONARIO EN LOS DISTINTOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN.	76
FIGURA 4.10.DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ZONAS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA PARA LA CAPA SUPERFICIAL DEL MODELO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.	78
FIGURA 4.11.BALANCE HÍDRICO PARA EL MODELO DE FLUJO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.	81

FIGURA 4.12.DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ZONAS SELECCIONADAS PARA EL BALANCE DE MASAS ($\text{HM}^3/\text{AÑO}$) PARA LA CAPA SUPERFICIAL (CAPA 1). LAS FLECHAS AZULES INDICAN EL APORTE DE LOS BASALTOS, DERRUBIOS Y ALUVIALES SECUNDARIOS DE MENOR ENTIDAD AL ALUVIAL DEL BARRANCO DEL FUREL. LAS FLECHAS VERDES INDICAN LO MISMO PARA EL BARRANCO DE TOCODOMÁN Y LAS FLECHAS ROJAS INDICAN LO MISMO PARA EL ALUVIAL PRINCIPAL. LAS FLECHAS Y CIFRAS NARANJAS MUESTRAN EL APORTE DE LOS ALUVIALES DE FUREL Y TOCODOMÁN AL ALUVIAL PRINCIPAL.	81
FIGURA 4.13.MAPA PIEZOMÉTRICO OBTENIDO POR EL MODELO DE FLUJO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO PARA EL AÑO 1992.....	82
FIGURA 4.14.NIVELES PIEZOMÉTRICOS OBSERVADOS FRENTE A NIVELES PIEZOMÉTRICOS CALCULADOS POR EL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.	83
FIGURA 4.15.DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO PARA LA CAPA SUPERFICIAL DEL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....	85
FIGURA 4.16.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES CALCULADOS POR EL MODELO (LÍNEAS) Y OBSERVADOS (PUNTOS) EN LA ZONA ALUVIAL 1 EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....	88
FIGURA 4.17.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES CALCULADOS POR EL MODELO (LÍNEAS) Y OBSERVADOS (PUNTOS) EN LA ZONA ALUVIAL 2 EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....	88
FIGURA 4.18.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES CALCULADOS POR EL MODELO (LÍNEAS) Y OBSERVADOS (PUNTOS) EN LA ZONA ALUVIAL 3 EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....	89
FIGURA 4.19.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES CALCULADOS POR EL MODELO (LÍNEAS) Y OBSERVADOS (PUNTOS) EN LA ZONA ALUVIAL 4 EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....	89
FIGURA 4.20.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES CALCULADOS POR EL MODELO (LÍNEAS) Y OBSERVADOS (PUNTOS) EN LA ZONA DE TOCODOMÁN EN RÉGIMEN TRANSITORIO.	90
FIGURA 4.21.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES CALCULADOS POR EL MODELO (LÍNEAS) Y OBSERVADOS (PUNTOS) EN LA ZONA DE FUREL EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....	90
FIGURA 4.22.CAUDALES DE LAS ENTRADAS (ARRIBA) Y LAS SALIDAS (ABAJO) DE AGUA AL SISTEMA OBTENIDAS EN EL MODELO DE FLUJO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.	92
FIGURA 4.23.NIVELES PIEZOMÉTRICOS OBSERVADOS FRENTE A NIVELES PIEZOMÉTRICOS CALCULADOS PARA LA VALIDACIÓN POR EL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.	94
FIGURA 4.24.DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN UTILIZADOS PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO.	95
FIGURA 4.25.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES CALCULADOS POR EL MODELO (LÍNEAS) Y OBSERVADOS (PUNTOS) EN LA ZONA DEL ALUVIAL EN RÉGIMEN TRANSITORIO EN EL PROCESO DE VALIDACIÓN.....	96

FIGURA 4.26. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES CALCULADOS POR EL MODELO (LÍNEAS) Y OBSERVADOS (PUNTOS) EN LA ZONA DE TOCODOMÁN EN RÉGIMEN TRANSITORIO EN EL PROCESO DE VALIDACIÓN. .	96
FIGURA 5.1. DIAGRAMAS DE STIFF MODIFICADOS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS REPRESENTATIVAS EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA LA CAMPAÑA DE CAMPO REALIZADA EN 1992 (MODIFICADO DE MUÑOZ, 2005). .	103
FIGURA 5.2. DIAGRAMAS DE STIFF MODIFICADOS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS REPRESENTATIVAS EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA LA CAMPAÑA DE CAMPO REALIZADA EN 1999 (MODIFICADO DE MUÑOZ, 2005). .	104
FIGURA 5.3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA LAS CAMPAÑAS DE CAMPO DE 1992 Y 1999.	109
FIGURA 5.4. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE Cl^- EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA LAS CAMPAÑAS DE CAMPO DE 1992 Y 1999.	110
FIGURA 5.5. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE NO_3^- EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA LAS CAMPAÑAS DE CAMPO DE 1992 Y 1999.	111
FIGURA 5.6. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SO_4^{2-} EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA LAS CAMPAÑAS DE CAMPO DE 1992 Y 1999.	112
FIGURA 5.7. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE Mg^{+2} EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA LAS CAMPAÑAS DE CAMPO DE 1992 Y 1999.	114
FIGURA 5.8. REPRESENTACIÓN DE LAS RELACIONES R_{Mg} VS. R_{Cl} Y R_{Mg}/R_{Cl} VS. R_{Cl} PARA LAS MUESTRAS DE AGUA DE MAR, LLUVIA, ESCORRENTÍA, PRESAS, RETORNOS DE RIEGO POR HIDROPONÍA Y POZOS LOCALIZADOS EN EL ALUVIAL, DERRUBIOS DE LADERA, BASALTOS Y ALUVIALES SECUNDARIOS (FUREL Y TOCODOMÁN) PARA LAS CAMPAÑAS DE CAMPO DE 1992 Y 1999.	116
FIGURA 5.9. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA RELACIÓN R_{Mg}/R_{Cl} EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA LAS CAMPAÑAS DE CAMPO DE 1992 Y 1999.	117
FIGURA 5.10. LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS CERCANOS A LAS TABLADAS, MANANTIALES DE CHOPARRAJANA O CAÑADA HONDA Y LOS POZOS DE LA RED DE CONTROL ACTUAL.	118
FIGURA 5.11. DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DEL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 0218-O1.	119
FIGURA 5.12. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS Y NITRATOS Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS NIVELES Y LOS CAUDALES MEDIOS CONTINUOS EQUIVALENTE (QMCE) PARA EL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 0218-O1. NIVEL ESTÁTICO (E), DINÁMICO (D) Y RECUPERACIÓN (R).	120
FIGURA 5.13. DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DEL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 0389-TP.	121

FIGURA 5.14.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS Y NITRATOS Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS NIVELES Y LOS CAUDALES MEDIOS CONTINUOS EQUIVALENTE (QMCE) PARA EL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 0389-TP. NIVEL ESTÁTICO (E), DINÁMICO (D) Y RECUPERACIÓN (R).	122
FIGURA 5.15.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DEL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 0391-TP.	123
FIGURA 5.16.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS Y NITRATOS Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS NIVELES Y LOS CAUDALES MEDIOS CONTINUOS EQUIVALENTE (QMCE) PARA EL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 0391-TP. NIVEL ESTÁTICO (E) Y RECUPERACIÓN (R).	124
FIGURA 5.17.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DEL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 0774-TP.	125
FIGURA 5.18.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS Y NITRATOS Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS NIVELES Y LOS CAUDALES MEDIOS CONTINUOS EQUIVALENTE (QMCE) PARA EL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 0774-TP. NIVEL ESTÁTICO (E), DINÁMICO (D) Y RECUPERACIÓN (R).	126
FIGURA 5.19.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DEL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 0779-TP.	127
FIGURA 5.20.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS Y NITRATOS Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS NIVELES Y LOS CAUDALES MEDIOS CONTINUOS EQUIVALENTE (QMCE) PARA EL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 0779-TP. NIVEL ESTÁTICO (E), DINÁMICO (D) Y RECUPERACIÓN (R).	128
FIGURA 5.21.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DEL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 2714-TP.	129
FIGURA 5.22.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS Y NITRATOS Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS NIVELES Y LOS CAUDALES MEDIOS CONTINUOS EQUIVALENTE (QMCE) PARA EL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 2714-TP. NIVEL ESTÁTICO (E), DINÁMICO (D), RECUPERACIÓN (R) Y NO SE SABE (N).	130
FIGURA 5.23.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DEL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 2860-TP.	131
FIGURA 5.24.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS Y NITRATOS Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS NIVELES Y LOS CAUDALES MEDIOS CONTINUOS EQUIVALENTE (QMCE) PARA EL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 2860-TP. NIVEL ESTÁTICO (E), DINÁMICO (D) Y RECUPERACIÓN (R).	132
FIGURA 5.25.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DEL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 4823-TP.	133
FIGURA 5.26.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS Y NITRATOS Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS NIVELES Y LOS CAUDALES MEDIOS CONTINUOS EQUIVALENTE (QMCE) PARA EL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 4823-TP. NIVEL ESTÁTICO (E), RECUPERACIÓN (R) Y NO SE SABE (N).	134
FIGURA 5.27.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DEL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 4826-TP.	135

FIGURA 5.28.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS Y NITRATOS Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS NIVELES Y LOS CAUDALES MEDIOS CONTINUOS EQUIVALENTE (QMCE) PARA EL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 4826-TP. NIVEL ESTÁTICO (E), DINÁMICO (D), RECUPERACIÓN (R) Y NO SE SABE (N).	136
FIGURA 5.29.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DEL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 4858-BTP.	137
FIGURA 5.30.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS Y NITRATOS Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS NIVELES Y LOS CAUDALES MEDIOS CONTINUOS EQUIVALENTE (QMCE) PARA EL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 4858-BTP. NIVEL ESTÁTICO (E), DINÁMICO (D), RECUPERACIÓN (R) Y NO SE SABE (N).	138
FIGURA 5.31.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DEL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 4886-TP.	139
FIGURA 5.32.EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS Y NITRATOS Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS NIVELES Y LOS CAUDALES MEDIOS CONTINUOS EQUIVALENTE (QMCE) PARA EL POZO DE LA RED DE CONTROL ACTUAL 4886-TP. NIVEL ESTÁTICO (E).	140
FIGURA 5.33.DIAGRAMA DE PIPER - HILL - LANGELIER PARA LOS ANÁLISIS DEL AGUA DE LLUVIA (COLECTORES 107, 263 Y 219), AGUA DE RIEGO, AGUA DE RETORNOS DE RIEGO, AGUA DE ESCORRENTÍA, AGUA DE PRESA Y AGUAS DE POZOS LOCALIZADOS EN LA LÍNEA DE FLUJO DEL ACUÍFERO PRINCIPAL.	142
FIGURA 5.34.DIAGRAMA DE PIPER - HILL - LANGELIER PARA LOS ANÁLISIS DEL AGUA DE LLUVIA (COLECTORES 107, 263 Y 219), AGUA DE RIEGO, AGUA DE RETORNOS DE RIEGO, AGUA DE ESCORRENTÍA, AGUA DE PRESA, AGUA OBTENIDA EN LOS ENSAYOS BATCH (AZULEJOS), LA MUESTRAS DE LOS REZUMES LOCALIZADOS EN LAS TABLADAS (CH Y CAÑADA HONDA) Y AGUAS DE POZOS LOCALIZADOS AL PIE DE LAS TABLADAS EN EL ACUÍFERO PRINCIPAL.	143
FIGURA 5.35.LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DONDE ESTÁN UBICADOS LOS COLECTORES DEL AGUA DE LLUVIA.	145
FIGURA 5.36.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DE LAS AGUAS DE LA LLUVIA MEDIA PARA LOS DISTINTOS COLECTORES UBICADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.	147
FIGURA 5.37.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DE LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA TOMADAS EN EL BARRANCO PRINCIPAL DE LA ALDEA Y DE LAS TRES PRESA UBICADAS AGUAS ARRIBA DE LA ZONA DE ESTUDIO. ...	151
FIGURA 5.38.DIAGRAMA DE SCHÖELLER-BERKALOFF DE LAS AGUAS DE RIEGO Y RETORNOS DE RIEGO TOMADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO EN UNA EXPLOTACIÓN DE TOMATES.	152
FIGURA 5.39.DIAGRAMA DE SCHÖELLER- BERKALOFF DE LAS MUESTRAS DE LOS ENSAYOS BATCH (AZULEJOS 1 Y 2), MANANTIALES DE LAS TABLADAS (CH Y CAÑADA HONDA) Y POZOS INFLUENCIADOS POR LOS AZULEJOS (UBICACIÓN DE LOS POZOS EN FIGURA 5.10).	155

FIGURA 5.40.MODELO CONCEPTUAL DE LA MINERALIZACIÓN DEL AGUA EN LA ZONA NO SATURADA EN RÉGIMEN NATURAL.....	157
FIGURA 5.41.REPRESENTACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LLUVIA MEDIA PARA LA ESTACIÓN 219, EL AGUA DE LLUVIA EVAPORADA Y DEL POZO 4823-TP OBSERVADO Y CALCULADO.....	159
FIGURA 5.42.REPRESENTACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LOS POZOS 2714-TP, EL RESULTADO DE LA MEZCLA DEL AGUA DEL POZO 2714-TP CON EL AGUA DE RETORNOS DE RIEGO Y EL AEROSOL MARINO Y DEL POZO 0779-TP OBSERVADO Y CALCULADO.....	160
FIGURA 5.43.REPRESENTACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LOS POZOS 2714-TP, EL RESULTADO DE LA MEZCLA DEL AGUA DEL POZO 2714-TP CON EL AGUA DE RETORNOS DE RIEGO Y EL AEROSOL MARINO Y DEL POZO 0218-O1 OBSERVADO Y CALCULADO.....	161
FIGURA 6.1.PLUMA DE CLORURO GENERADA POR LOS AZULEJOS DE LAS TABLADAS.	166
FIGURA 6.2.DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ZONAS DE DISPERSIVIDAD Y POROSIDAD EFICAZ PARA LA CAPA SUPERFICIAL DEL MODELO DE TRANSPORTE DE SOLUTO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO. LA DISPERSIVIDAD Y POROSIDAD EFICAZ DE LAS CAPAS 2 Y 3 ES LA MISMA QUE LA DE LOS BASALTOS MIOCENOS DE LA CAPA 1.....	168
FIGURA 6.3.DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS VALORES DE CONCENTRACIÓN DE CLORURO DE LA RECARGA PARA EL MODELO DE TRANSPORTE EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.	171
FIGURA 6.4.LOCALIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO EMPLEADAS EN EL CONTACTO CON EL MAR, AL OESTE, Y POR LA CABECERA, AL ESTE.	172
FIGURA 6.5.LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE. ...	173
FIGURA 6.6.CONCENTRACIONES OBSERVADAS FRENTE A CONCENTRACIONES CALCULADAS POR EL MODELO DE TRANSPORTE EN RÉGIMEN ESTACIONARIO CON LOS POZOS DE TOCODOMÁN.	176
FIGURA 6.7.CONCENTRACIONES OBSERVADAS FRENTE A CONCENTRACIONES CALCULADAS POR EL MODELO DE TRANSPORTE EN RÉGIMEN ESTACIONARIO SIN LOS POZOS DE TOCODOMÁN.	176
FIGURA 6.8.DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ZONAS DE POROSIDAD EFICAZ PARA LA CAPA SUPERFICIAL DEL MODELO DE TRANSPORTE DE SOLUTO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.	177
FIGURA 6.9.MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CLORUROS EN LA ZONA DE ESTUDIO OBTENIDO EN EL MODELO DE TRANSPORTE EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.....	180
FIGURA D.1. LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS DONDE SE HA REALIZADO EN CÁLCULO DEL CAUDAL DESDE LA ZONA INTRA-CALDERA (LÍMITE DE LA CALDERA DE TEJEDA) CON DATOS DE JUNIO DE 1992.....	187

FIGURA D.2. LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN Y ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA PARA LA MODELACIÓN HIDROQUÍMICA.....	190
FIGURA D.3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE Cl^- Y NO_3^- EN LA ZONA DEL BARRANCO DE TOCODOMÁN PARA LAS CAMPAÑAS DE CAMPO DE 1992 Y 1999.....	193
FIGURA D.4. BLOQUE RESUMEN DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS MEDIAS DEL FLUJO EN EL BALANCE HÍDRICO (UNIDADES EN $HM^3/AÑO$).....	195
FIGURA D.5. ALGUNOS CAUDALES DE ENTRADA Y SALIDA DE AGUA AL SISTEMA OBTENIDOS EN EL MODELO DE FLUJO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....	200
FIGURA A.1. ESQUEMA METODOLÓGICO.....	234
FIGURA A.2. MAPA DE PENDIENTE DEL TERRENO.....	236
FIGURA A.3. MAPAS DE TIPOS DE SUELO SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE LA FAO (1974).....	236
FIGURA A.4. MAPA DE TIPOS DE SUELO SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DEL SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS).....	237
FIGURA A.5. MAPA DE USOS DEL SUELO OBTENIDO A PARTIR DE LA INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL EXMO. CABILDO INSULAR DE GRAN CANARIA.....	237
FIGURA A.6. MAPA DE LOS USOS DEL SUELO SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DEL SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS).....	238
FIGURA A.7. MAPA DE NÚMEROS PRIMOS OBTENIDOS.....	242
FIGURA A.8. MAPA DE NÚMERO DE CURVA CON LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ISOYETAS.....	242
FIGURA A.9. RECTA DE RELACIÓN ENTRE LOS DATOS DE TEMPERATURA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE AGAETE (619) Y LA ESTACIÓN AUTOMÁTICA DE LA ALDEA PARA INTRODUCIR LOS DATOS DE TEMPERATURA EN EL EASY BAL PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA.....	247

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1. CUADRO RESUMEN DE LA HISTORIA GEOLÓGICA DE GRAN CANARIA (MODIFICADO DE CARRACEDO ET AL., 2002).....	19
TABLA 2.2. CUADRO RESUMEN DE LAS ETAPAS Y UNIDADES QUE AFLORAN EN LA ZONA DE ESTUDIO (MUÑOZ, 2005).	21
TABLA 2.3. VALORES DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS ESTABLECIDOS PARA DIFERENTES MATERIALES VOLCÁNICOS (SPA-15,1975).	30
TABLA 2.4. VALORES DE DIFERENTES PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN GRAN CANARIA (INTECSA, 1981).	30
TABLA 3.1. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LAS DOS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DEL ACUÍFERO DE LA ALDEA CALCULADOS A PARTIR DE MUÑOZ (2005).	40
TABLA 3.2. CAUDAL MEDIO CONTINUO EQUIVALENTE (Q.M.C.E.) PARA LAS CAMPAÑAS DE 1992 Y 1999 EN EL BARRANCO DE LA ALDEA Y TOCODOMÁN (MUÑOZ, 2005).	45
TABLA 3.3. EXPLOTACIÓN TOTAL EN LOS POZOS DE LA ALDEA PARA LAS CAMPAÑAS DE 1992 Y 1999. COMPARACIÓN ENTRE LOS OBTENIDOS POR MUÑOZ (2005) Y LOS REALIZADOS EN EL PRESENTE TRABAJO.	46
TABLA 3.4. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL SUELO NECESARIOS PARA LA REALIZACIÓN DEL BALANCE CON EL EASY BAL.	50
TABLA 3.5. RESULTADOS DE RECARGA POR LLUVIA OBTENIDOS POR EL EASY BAL PARA LOS DISTINTOS AÑOS HIDROLÓGICOS.	51
TABLA 3.6. DATOS DE SUPERFICIE CULTIVADA A LO LARGO DEL AÑO POR DISTINTOS CULTIVOS EN EL BARRANCO DE LA ALDEA.	52
TABLA 3.7. AGUA TEÓRICA USADA PARA EL RIEGO DE LOS DISTINTOS CULTIVOS QUE SE DESARROLLAN EN LA ZONA CEDIDOS POR LA AGENCIA DE EXTENSIÓN AGRARIA DEL CABILDO DE GRAN CANARIA EN LA ALDEA.	53
TABLA 3.8. DATOS DE RIEGO Y RETORNOS DE RIEGO PARA LOS DISTINTOS AÑOS HIDROLÓGICOS (HM ³ /AÑO).	54

TABLA 3.9. COTA DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS PARA LOS POZOS 4914-TP Y 5137-TP LOCALIZADOS EN LA CABECERA DEL BARRANCO DE LA ALDEA PARA EL CÁLCULO DEL GRADIENTE HIDRÁULICO (UNIDAD: M)..	55
TABLA 3.10. CÁLCULO DEL CAUDAL DEL FLUJO (HM ³ /AÑO) QUE ENTRA POR LA CABECERA DEL BARRANCO DE LA ALDEA REALIZADO POR LA LEY DE DARCY PARA LAS CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS MÍNIMA (26 M/D), MÁXIMA (85 M/D) Y MEDIA (55 M/D).	56
TABLA 3.11. DATOS DE ABASTECIMIENTO Y RECARGA POR PERDIDAS EN LA RED PARA LOS DISTINTOS AÑOS HIDROLÓGICOS (HM ³ /AÑO).	56
TABLA 3.12. RESULTADO DE ESCORRENTÍA Y RECARGA PRODUCIDA POR LA ESCORRENTÍA PARA LOS DISTINTOS AÑOS HIDROLÓGICOS (HM ³ /AÑO).	57
TABLA 3.13. RESULTADO DE LA EXPLOTACIÓN DE LOS POZOS DE LA ZONA DE ESTUDIO PARA LOS DISTINTOS AÑOS HIDROLÓGICOS (HM ³ /AÑO).	58
TABLA 3.14. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIO DE LOS DISTINTOS TÉRMINOS DEL BALANCE HÍDRICO (HM ³ /AÑO).	59
TABLA 3.15. ENTRADAS Y SALIDAS TOTALES DEL BALANCE HÍDRICO CON LA VARIACIÓN MEDIA EN EL ALMACENAMIENTO (HM ³ /AÑO).	59
TABLA 4.1. RECARGA INTRODUCIDA EN EL MODELO DE FLUJO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO CALCULADAS A PARTIR DEL BALANCE HÍDRICO PARA 1991/92. TAMBIÉN SE MUESTRA EL TIPO DE RECARGA Y EL ÁREA QUE OCUPA. LAS ZONIFICACIÓN COINCIDE CON LA MOSTRADA EN LA FIGURA 4.6.	72
TABLA 4.2. CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS PARA LAS DISTINTAS ZONAS OBTENIDAS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO ESTACIONARIO.	79
TABLA 4.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LOS PARÁMETROS CALIBRADOS EN EL MODELO DE FLUJO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.	80
TABLA 4.4. VALORES RESULTANTES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA OBTENIDOS EN LA CALIBRACIÓN DEL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.	84
TABLA 5.1. DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS DISTINTOS PARÁMETROS QUÍMICOS OBTENIDOS EN LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO PARA LOS POZOS DE LA ZONA DE ESTUDIO EN LA CAMPAÑA DE 1992 (EN MG/L, EXCEPTO LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN μS/CM).	106
TABLA 5.2. DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS DISTINTOS PARÁMETROS QUÍMICOS OBTENIDOS EN LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO PARA LOS POZOS DE LA ZONA DE ESTUDIO EN LA CAMPAÑA DE 1992 (EN MG/L, EXCEPTO LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN μS/CM).	106

TABLA 5.3. DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS DISTINTOS PARÁMETROS QUÍMICOS OBTENIDOS EN LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO PARA LOS POZOS DE LA ZONA DE ESTUDIO PARA LA CAMPAÑA DE JUNIO DEL 2006 DE LA RED DE CONTROL ACTUAL (EN MG/L, EXCEPTO LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN $\mu\text{S}/\text{CM}$).	107
TABLA 5.4. CONCENTRACIÓN DE RMG Y RCL Y LOS VALORES DE LA RELACIÓN RMG/RCL PARA LAS MUESTRAS DE AGUA DE MAR, LLUVIA (DISTINTAS FECHAS), ESCORRENTÍA (I Y II TOMADAS EN EL ALUVIAL PRINCIPAL Y III EN TOCODOMÁN), PRESAS, RIEGO Y RETORNOS DE RIEGO POR HIDROPONÍA.	115
TABLA 5.5. VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y CONCENTRACIONES DE IONES MAYORITARIOS DE AGUA DE LLUVIA EN LA ZONA DE ESTUDIO TOMADAS ENTRE OCTUBRE DE 2000 Y ABRIL DE 2002. LOS DATOS ESTÁN EN MG/L PARA LOS ELEMENTOS QUÍMICOS Y $\mu\text{S}/\text{CM}$ PARA LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) (MUÑOZ, 2005).	146
TABLA 5.6. VALORES ESTADÍSTICOS DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y CONCENTRACIONES DE IONES MAYORITARIOS DE AGUA DE LLUVIA EN LA ZONA DE ESTUDIO TOMADAS ENTRE OCTUBRE DE 2000 Y ABRIL DE 2002. LAS UNIDADES SON MG/L PARA LOS ELEMENTOS QUÍMICOS Y $\mu\text{S}/\text{CM}$ PARA LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE).	146
TABLA 5.7. VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y CONCENTRACIONES DE IONES MAYORITARIOS DE AGUA DE PRESA EN LA ZONA DE ESTUDIO TOMADAS EN EL 2006. LOS DATOS ESTÁN EN MG/L PARA LOS ELEMENTOS QUÍMICOS Y $\mu\text{S}/\text{CM}$ PARA LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE).	149
TABLA 5.8. VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y CONCENTRACIONES DE IONES MAYORITARIOS DE AGUA DE ESCORRENTÍA EN LA ZONA DE ESTUDIO TOMADAS EN EL 2006. LAS MUESTRAS DE ESCORRENTÍA I Y II FUERON TOMADAS EN EL BARRANCO PRINCIPAL. LOS DATOS ESTÁN EN MG/L PARA LOS ELEMENTOS QUÍMICOS Y $\mu\text{S}/\text{CM}$ PARA LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE).	150
TABLA 5.9. VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y CONCENTRACIONES DE IONES MAYORITARIOS DE AGUA DE RIEGO Y DE RETORNOS DE RIEGO USADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO TOMADAS EN EL 2006. LOS DATOS ESTÁN EN MG/L PARA LOS ELEMENTOS QUÍMICOS Y $\mu\text{S}/\text{CM}$ PARA LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE).	152
TABLA 5.10. VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, SÍLICE Y CONCENTRACIONES DE IONES MAYORITARIOS DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL ENSAYO BATCH. LAS UNIDADES SON MG/L PARA LOS ELEMENTOS QUÍMICOS Y $\mu\text{S}/\text{CM}$ PARA LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE).	153
TABLA 5.11. VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, SÍLICE Y CONCENTRACIONES DE IONES MAYORITARIOS DE LAS MUESTRAS DE LOS REZUMES LOCALIZADOS EN LAS TABLADAS. LAS UNIDADES SON MG/L PARA LOS ELEMENTOS QUÍMICOS Y $\mu\text{S}/\text{CM}$ PARA LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) (MUÑOZ, 2005).	154
TABLA 6.1. VALORES DE DISPERSIVIDAD PARA EL ALUVIAL Y LOS BASALTOS LOCALIZADOS EN LA BIBLIOGRAFÍA. .	167

TABLA 6.2. RANGO DE VALORES DE LOS DISTINTOS PARÁMETROS OBTENIDOS DE LA BIBLIOGRAFÍA PARA CALIBRAR EN EL MODELO DE TRANSPORTE EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.	169
TABLA 6.3. RECARGA INTRODUCIDA EN EL MODELO DE FLUJO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO CALCULADAS A PARTIR DEL BALANCE HÍDRICO PARA 1991/92. TAMBIÉN SE MUESTRA EL TIPO DE RECARGA, EL ÁREA QUE OCUPA Y LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS DE LA RECARGA. LAS ZONIFICACIÓN COINCIDE CON LA MOSTRADA EN LA FIGURA 6.3.	170
TABLA 6.4. POROSIDAD OBTENIDA EN LA CALIBRACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.	178
TABLA D.1. PARÁMETROS HIDRÁULICOS OBTENIDOS EN EL MODELO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO Y TRANSITORIO. COMPARACIÓN CON LOS OBTENIDOS POR MUÑOZ (2005).	185
TABLA D.2. COTA DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS PARA LOS POZOS 0414-TP Y 5024-TP LOCALIZADOS EN EL BARRANCO DE TOCODOMÁN CERCA DE LA ZONA DE CONTACTO CON LA INTRA-CALDERA EN JUNIO DE 1992 PARA EL CÁLCULO DEL GRADIENTE HIDRÁULICO (PROFUNDIDADES Y COTAS EN M Y CAUDAL EN HM ³ /AÑO).	188
TABLA D.3. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MODELACIÓN HIDROQUÍMICA EN CONDICIONES NATURALES (DESDE EL AGUA DE LLUVIA A LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS) Y EN CONDICIONES ANTRÓPICAS (LÍNEA DE FLUJO DENTRO DEL ACUÍFERO ALUVIAL) (LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS Y ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA FIGURA D.2) UNIDADES EN MMOL/L.....	191
TABLA D.4. RELACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA USADO PARA EL RIEGO Y LA EXPLOTACIÓN (HM ³ /AÑO).....	196
TABLA D.5. ERRORES MEDIOS ANUALES DEL BALANCE (HM ³ /AÑO).	198
TABLA D.6. COMPARACIÓN DE LAS DISTINTAS COMPONENTES DEL BALANCE CALCULADAS POR EL MODELO DE FLUJO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO Y LA INFORMACIÓN PREVIA DISPONIBLE PARA EL AÑO HIDROLÓGICO 1991/92.	199
TABLA A.1. VOLUMEN DE AGUA SUMINISTRADO POR EL AYUNTAMIENTO DE LA ALDEA DE SAN NICOLÁS PARA EL ABASTECIMIENTO USADO COMO DATOS DE ABASTECIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN LA RED EN EL BALANCE HÍDRICO.....	222
TABLA A.2. DATOS DE SUPERFICIE DE CULTIVO EN HECTÁREAS PARA LOS DISTINTOS CULTIVOS QUE SE DESARROLLAN EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE LA ALDEA DE SAN NICOLÁS CEDIDOS POR EL INSTITUTO DE ESTADÍSTICA DEL GOBIERNO DE CANARIAS.	222
TABLA A.3. DATOS DE RIEGO Y RETORNO DE RIEGO DESDE 1990 HASTA 2003 PARA LOS DISTINTOS CULTIVOS QUE SE DESARROLLAN EN LA ZONA USADOS COMO DATOS RETORNOS DE RIEGO EN EL BALANCE HÍDRICO. HAN SIDO CALCULADOS A PARTIR DE LA TABLA A.2. Y TABLA 3.7 (CAPÍTULO 3).	226

TABLA A.4. NÚMEROS PRIMOS ASIGNADOS A LAS DIVERSAS CLASES DE PENDIENTES, TIPOS DE SUELO Y USOS DEL SUELO.	239
TABLA A.5. VALORES RESULTANTES DEL PRODUCTO DE NÚMEROS PRIMOS.	240
TABLA A.6. NÚMERO DE CURVA.....	241
TABLA A.7. VALORES DEL NÚMERO DE CURVA Y UMBRAL DE ESCORRENTÍA OBTENIDOS PARA TODA LA SUPERFICIE DE ESTUDIO Y LAS DISTINTAS ÁREAS.	242
TABLA A.8. DATOS DE PRECIPITACIÓN, RECARGA, ETR Y ESCORRENTÍA ANUALES ESTIMADOS POR EL EASY_BAL V3.0.	249
TABLA A.9. DATOS DE RECARGAS INTRODUCIDOS EN EL VISUAL MODFLOW PARA EL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....	252
TABLA A.10. POZOS DE OBSERVACIÓN EN EL MODELO DE FLUJO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.	254
TABLA A.11. POZOS DE OBSERVACIÓN EN EL MODELO DE FLUJO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....	259
TABLA A.12. DATOS DE EXPLOTACIÓN MEDIA (L/S) PARA LOS DISTINTOS POZOS DE LA ZONA DE ESTUDIO CALCULADOS A PARTIR DE LA BASE DE DATOS.	262
TABLA A.13. DATOS QUÍMICOS RED DE CONTROL ACTUAL USADOS PARA LOS DISTINTOS DIAGRAMAS (CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN $\mu\text{S}/\text{CM}$).....	272
TABLA A.14. DATOS Y ESTADÍSTICOS DE LOS DISTINTOS PARÁMETROS QUÍMICOS OBTENIDOS EN LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO PARA LOS POZOS DE LA ZONA DE ESTUDIO EN LAS DISTINTAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA RED DE CONTROL ACTUAL. DATOS EN MG/L EXCEPTO LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN $\mu\text{S}/\text{CM}$	280
TABLA A.15. DATOS Y ESTADÍSTICOS DE LOS DISTINTOS PARÁMETROS QUÍMICOS OBTENIDOS EN LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO PARA LOS DISTINTOS POZOS DE RED DE CONTROL ACTUAL. DATOS EN MG/L EXCEPTO LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN $\mu\text{S}/\text{CM}$	282



1. INTRODUCCIÓN

Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN

El barranco de La Aldea se dedica de forma intensiva a la agricultura. Ésta se abastece principalmente de aguas superficiales, pero este aporte se ha visto comprometido debido a la sequía que ha azotado la zona en los últimos años, pasando las aguas subterráneas a jugar un papel importante. La respuesta del acuífero ante la explotación intensiva a que ha sido sometido ha consistido en una merma importante de la cantidad y calidad de sus aguas.

Los trabajos llevados a cabo en el Acuífero de La Aldea, fundamentalmente dentro del Proyecto CICYT financiado con fondos FEDER 1FD-0525 "Estudio Hidrogeológico del acuífero de La Aldea (Gran Canaria)", proporcionaron como resultado una tesis doctoral cuyo título es "Caracterización hidrogeológica del acuífero de La Aldea (Gran Canaria)" (Muñoz, 2005) y un estudio exhaustivo del funcionamiento del sistema acuífero del barranco de La Aldea en su parte distal acompañado de un extenso trabajo de campo que proporcionó gran cantidad de datos. En esta tesis se revisa y amplía el conocimiento hidrológico del acuífero y se abordan temas que el trabajo anteriormente mencionado no desarrolla mediante la elaboración de modelos numéricos de flujo y de transporte y de la modelación hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en el acuífero de La Aldea (Gran Canaria).

1.1.- OBJETIVOS

El objetivo principal de la presente tesis es la mejora de conocimiento hidrogeológico e hidrogeoquímico del acuífero de La Aldea (Gran Canaria), para ello se han desarrollado modelos numéricos de flujo y de transporte y un modelo hidrogeoquímico que han permitido contrastar y mejorar el modelo conceptual establecido para el acuífero y cuantificar los procesos hidrogeológicos e hidroquímicos que ocurren en éste. Para alcanzar este objetivo se han debido conseguir una serie de objetivos parciales:

- 1) Revisar la geología de la zona y su papel como condicionante en el funcionamiento hidrogeológico de la misma.
- 2) Analizar e interpretar la información hidrogeológica existente que incluye el inventario de puntos de agua, hidrología e hidrogeoquímica, ampliando el trabajo realizado por Muñoz (2005).
- 3) Recopilar nuevos datos de campo que permitan establecer un modelo conceptual del flujo del agua subterránea y validándolo posteriormente mediante modelos de flujo y transporte.

- 4) Simular el flujo de agua subterránea a partir del modelo conceptual elaborado plasmándolo en un modelo de diferencias finitas mediante el programa Visual Modflow (Waterloo Hydrogeologic, 2001; Waterloo Hydrogeologic, 2005). Realizándose primero la simulación en régimen estacionario para calibrar los parámetros hidráulicos y, a su vez, obtener una piezometría inicial de la zona de estudio para una posterior simulación en régimen transitorio. El modelo será usado para analizar y evaluar el sistema acuífero y predecir su respuesta ante estímulos tales como el bombeo de los pozos o la disminución de la recarga reproduciendo la piezometría.

- 5) Simular los procesos de transporte de distintos elementos químicos mayoritarios para cuantificar los procesos hidrogeológicos que ocurren en el acuífero, como la salinización y contaminación de las aguas subterráneas. Para ello se ha caracterizado químicamente el agua de recarga y el agua subterránea.

1.2.- ANTECEDENTES

1.2.1.- Modelos Hidrogeológicos

El empleo de programas informáticos como herramienta para el estudio del flujo y transporte de contaminantes en las aguas subterráneas está ampliamente reconocido y extendido entre la comunidad científica. A continuación se recoge una pequeña recopilación de trabajos en los que se ha empleado programas informáticos en la elaboración de modelos matemáticos y han servido como guía metodológica para el desarrollo de la presente tesis:

- * Acuífero Almonte-Marismas: se han realizado varios modelos matemáticos de flujo y de transporte del sistema acuífero de Almonte-Marismas y actualizaciones de estos modelos donde se va integrando la nueva información geológica y hidrogeológica como parte del estudio del Parque Nacional de Doñana (IRYDA, 1976; IGME, 1976; Lucena y García Fernández, 1978; IGME, 1982; IGME, 1986; Martín Machuca y Virgós Soriano, 1995; Trick *et al.*, 1995; Castro, 1999; Lozano, 2004).

- * Acuífero del río Llobregat: se utiliza la modelación de flujo y de transporte para la gestión del acuífero con la elaboración de varios modelos sucesivos. El delta del río Llobregat tiene una complicada geometría y heterogeneidad y problemas de intrusión marina que han ido estudiándose y añadiéndose a los sucesivos modelos de la zona. También se ha desarrollado un modelo de gestión para diseñar medidas correctoras para recuperar la calidad del agua de dicho acuífero (Custodio *et al.*, 1971; PHPO, 1985; Iribar *et al.*, 1997; Vázquez-Suñé *et al.*, 2005a y 2005b)

- * Acuífero Motril-Salobreña (Granada): se ha desarrollado un modelo de flujo subterráneo empleando Modflow para estudiar las repercusiones de las influencias antrópicas sobre el régimen hidrológico del acuífero detrítico costero de Motril-Salobreña (Heredia *et al.*, 2002a; Heredia *et al.*, 2002b).
- * Acuífero del valle de Lerma (Salta, Argentina): se presenta un modelo hidrogeológico para el acuífero aluvial del valle de Lerma realizado con Modflow donde se consiguió un buen ajuste entre los niveles de campo y los obtenidos por el modelo (Martínez *et al.*, 1999).
- * Acuífero de Trifa (Marruecos): se ha desarrollado un modelo hidrogeológico con Modflow para estudiar el estado actual del acuífero y la evolución de las reservas de agua subterránea con el fin de asegurar los aportes de aguas subterráneas para riego en el futuro (El Idrysy y De Smedt, 2006).
- * Cuenca de Azraq (Jordania): se ha elaborado un modelo de flujo en estado estacionario y transitorio de la cuenca donde se han ejecutado distintos escenarios de explotación y recarga para predecir la respuesta del sistema. El agua de la zona es explotada por más de 500 pozos y es usada para abastecimiento, agricultura e industria observándose una disminución de los niveles que ha provocado intrusión marina (Abdulla *et al.*, 2000).
- * Acuífero de Pearl Harbor (Oahu, Hawaii): Se ha desarrollado un modelo en 3 dimensiones de flujo y transporte en el acuífero volcánico de la isla de Oahu para estudiar el estado de la intrusión marina y los movimiento y distribución de los solutos con el programa Sutra (Gingerich y Voss, 2005).

Se debe mencionar dentro del apartado de antecedentes el modelo de flujo realizado por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife en colaboración de la empresa SURGE Estudios Hidráulicos e Hidrológicos S.A. de toda la isla de Tenerife, por su cercanía y semejanza geológica con la zona de estudio. Dicho modelo comenzó al finalizar el proyecto MAC-21 en 1980 y ha ido sufriendo posteriores actualizaciones como el MOD-91 en 1991 y la última en el 2002.

El principal objetivo del primer modelo realizado en Tenerife fue alcanzar una calibración satisfactoria en régimen estacionario para los datos disponibles, para ello se integró toda la información existente en la zona en el modelo, pero este objetivo no fue alcanzado debido a la falta de datos. En 1991 y ante la imposibilidad de comprobar la capacidad predictiva del anterior modelo, se optó por desarrollar un nuevo modelo que fue denominado MOD-91 (SURGE, 1991). Los objetivos de este nuevo modelo eran los mismos que los del anterior: sintetizar y comprobar la coherencia de los datos, permitir su uso como instrumento de análisis, realizar un diagnóstico de la situación en ese momento y permitir su uso para pronósticos futuros. El programa usado fue el Trescott de McDonald y Harbaugh en su versión de 1983 modificado para adaptarlo a las

características hidrogeológica de la isla, recibiendo el nombre de MODTENE. Permitía simular las anisotropías de los ejes estructurales de la isla, el tratamiento de la sequía de celdas y profundización de galerías pero la falta de datos en algunas zona continuaba siendo un problema. Por último en el 2002 se realizó una actualización del MOD-91, aumentando los datos de precipitaciones, el estado de galerías y pozos y se modificó la estructura hidrogeológica y la recarga por infiltración del agua de lluvia. El ajuste del nuevo modelo tiene una calidad semejante o incluso peor que la del MOD-91, sin embargo su representación del flujo subterráneo es más realista (CIAT, 2002).

1.2.2.- Marco insular

El primer estudio hidrogeológico de carácter general realizado en la isla de Gran Canaria fue el Estudio Científico de los Recursos de Agua en las Islas Canarias (SPA-15, 1975), donde se elaboraron estudios de hidrología de superficie y subterránea de todas las islas del archipiélago. En este estudio no se realizó ninguna investigación específica en la zona de La Aldea, aunque sí se concluyeron algunos resultados generales aplicables a esta área como algunas propiedades físicas de la cuenca y parámetros hidráulicos en unidades hidrogeológicas equivalentes. En 1980, la empresa INTECSA completó los datos del SPA-15 en el Proyecto titulado “Planificación y Explotación de los Recursos de Agua de las Islas Canarias (MAC-21)” (MAC-21, 1980). En este proyecto se inventariaron una serie de pozos distribuidos por toda la isla, de los cuales 45 se encontraban en La Aldea. Los datos recabados en los distintos pozos daban información de la situación, administrativos, de propiedad, características constructivas de los pozos, régimen de explotación, piezometría, parámetros químicos del agua tomados en el campo y parámetros químicos obtenidos en el laboratorio. A partir de estos datos, la misma empresa realizó un modelo matemático de simulación de flujo subterráneo en Gran Canaria (INTECSA, 1981).

El modelo matemático se realizó mediante un programa de simulación de flujo tridimensional por el método de las diferencias finitas, desarrollado por Trescott en 1975 y constaba de tres capas de 1020 nudos cada una. Se realizaron tres modelos matemáticos, dos en régimen estacionario para datos de 1971 y 1980, y uno, en régimen transitorio con datos del periodo de 1971 a 1980. El modelo matemático en régimen estacionario de 1971 se realizó para alcanzar un estado inicial coherente con las permeabilidades calibradas. El modelo matemático en régimen estacionario de 1980 tenía como objetivo calibrar las permeabilidades y acotar las magnitudes de los elementos que constituyen el balance (entradas y salidas). Por último el modelo matemático en régimen transitorio del periodo 1971-1980 permitió calibrar el coeficiente de almacenamiento.

La escasez de datos y su distribución espacio – temporal irregular, fue la principal causa de los problemas en el proceso de análisis, elaboración y síntesis de los mismos. Tan solo un 8% de todos los datos introducidos en el modelo se conocían con fiabilidad. La falta de datos en el oeste de Gran Canaria (que incluye la zona de estudio del presente trabajo) impidió la simulación

completa de la isla. Debido a ello, se optó por asignar una permeabilidad estimada en algunas zonas, por lo que los resultados del modelo presentan notables limitaciones, inconsistencias e incertidumbres.

A escala insular, el Plan Hidrológico de Gran Canaria constituyó, después del SPA-15, el siguiente estudio completo de la hidrología de Gran Canaria (PHGC, 1992; PHGC, 1998). Dentro de los trabajos realizados para su redacción, en la zona de estudio se hizo una campaña de campo exhaustiva en la que se inventariaron más de 350 puntos de agua. Además, se revisó el modelo conceptual del acuífero insular y se recopilaron nuevos datos de la geología subterránea.

1.2.3.- Zona de Estudio

A partir del inventario de puntos de agua para el Plan Hidrológico de Gran Canaria (1992), se realizó un estudio preliminar del acuífero de La Aldea dentro del proyecto "Development of analytical and sampling methods for priority pesticides and relevant transformation products in aquifers" financiado por la Unión Europea con la participación de la Dirección General de Aguas del Gobierno de Canarias durante los años 1994-96 (Muñoz *et al.*, 1996; Cabrera *et al.*, 1996). En este proyecto se analizaron dos áreas de estudio en el archipiélago: Valle Guerra en Tenerife y el barranco de La Aldea en Gran Canaria. En este estudio se propuso el primer modelo conceptual hidrogeológico para la zona de La Aldea, consistente en un acuífero aluvial que se apoya sobre un basamento basáltico en el que el agua extraída es mezcla de ambas unidades hidrogeológicas (Muñoz *et al.*, 1996).

Dentro de este proyecto se estableció la primera red de control de puntos de agua, consistente en seis pozos seleccionados a lo largo del valle. El objetivo era llevar un registro periódico de la evolución del acuífero. También se identificaron varios procesos de salinización de las aguas subterráneas como la difusión por contaminación agrícola, una leve intrusión marina y un proceso probablemente geológico que confería una salinidad muy alta a las aguas subterráneas.

Posteriormente, en 1997, se realizó el trabajo que lleva como título "Estudio Hidrogeológico de los procesos de salinización en el Acuífero de San Nicolás de Tolentino (La Aldea)" (Delgado, 1998; Cabrera *et al.*, 2000), como parte del trabajo práctico en el Curso Internacional de Hidrología Subterránea de la Universidad Politécnica de Cataluña. En este trabajo se caracterizaron las distintas familias hidrogeoquímicas de aguas que se encuentran en la zona, su origen, distribución y las relaciones entre ellas, así como los procesos de aumento de concentración de solutos natural y antropogénico que provocan la salinización del acuífero, dándole importancia a los retornos de riego y la geoquímica de los materiales de la zona (Cabrera *et al.*, 2000).

En 1999, se inició el Proyecto CICYT con fondos FEDER 1FD-0525 titulado "Estudio Hidrogeológico del acuífero de La Aldea (Gran Canaria)" cuyo objetivo principal era realizar un

estudio del funcionamiento del acuífero de La Aldea. Dentro de este proyecto, se realizaron una serie de trabajos concretos:

- * “Apoyo topográfico e implementación de una Base Cartográfica Digital destinada al estudio hidrológico del barranco de La Aldea” (Marrero y Muñoz, 2001) donde se realizó una nivelación topográfica de detalle de 100 pozos de La Aldea y dio lugar a un proyecto fin de carrera de la en la Escuela de Ingenieros de Topografía de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- * “Elaboración de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación por nitratos en el acuífero de La Aldea, Gran Canaria” (Bejarano, 2002; Bejarano *et al.*, 2002; Bejarano *et al.*, 2003) donde se desarrolló la modelación del flujo de nitratos de la zona no saturada mediante un Sistema de Información Geográfica.
- * “Informe sobre las características del acuífero costero de La Aldea” (Cabrera, 2001) realizado a petición del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, para identificar la zona más adecuada para emplazar un sondeo de investigación. Para ello se realizaron cálculos de parámetros hidráulicos en el aluvial y los basaltos.
- * “Volcanología y petrología de los azulejos y su relación con la química de las aguas subterráneas del valle de La Aldea, Gran Canaria” (Antón, 2002; Cabrera *et al.*, 2006) donde se caracterizó el depósito de los Azulejos y la influencia que pueden tener sobre las aguas que los atraviesan. Este trabajo fue financiado por la Fundación Simón Benítez Padilla del Cabildo Insular de Gran Canaria.
- * “Caracterización hidrogeológica del acuífero de La Aldea (Gran Canaria)” tesis doctoral de Muñoz (2005) donde se analizó el funcionamiento hidrogeológico del acuífero. Para ello se realizó un inventario de puntos de agua, un estudio de las unidades hidrológicas en superficie y en profundidad, se cuantificaron los parámetros hidráulicos y las reservas de agua, se analizó la explotación de estas aguas y el funcionamiento hidráulico del acuífero y se caracterizó la hidroquímica de las aguas subterráneas mediante análisis químicos e isotópicos.

1.3.- METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo ha seguido las fases habituales de desarrollo de los modelos hidrogeológicos. Ha ido precedida por una recopilación de bibliografía de la zona de estudio o de otras zonas con características parecidas y de una etapa de toma de datos. Para la realización de la presente tesis ya se disponía de una base de datos hidrogeológica e hidroquímica de puntos de agua recopilados a lo largo de los años que se mantuvo y amplió durante su desarrollo.

Los datos disponibles en la base han sido obtenidos a partir de una serie de campañas de campo y redes de control realizadas desde 1975 hasta la actualidad. Del proyecto SPA-15, en 1975, se dispone de datos de 11 pozos en el valle de La Aldea, que incluyen información hidrogeológica, sobre el estado de las captaciones y algunos recogen análisis químicos de agua de pozo. Durante el proyecto MAC-21 (1980) se realizó un inventario de 42 pozos, cuyos datos son bastante completos e incluyen información de interés hidrogeológica y algunos análisis químicos. Para el Plan Hidrológico de Gran Canaria (PHGC, 1992) se realizó una campaña de inventario de pozos donde se registraron 363 puntos de agua en el barranco de La Aldea. En 1999, para el proyecto FEDER 1FD97-0525 "Estudio hidrogeológico del acuífero de La Aldea (Gran Canaria)" se realizó una campaña donde se visitaron 375 puntos de agua. Entre estas dos últimas grandes campañas de campo, se realizaron pequeñas campañas para los proyectos "Development of analytical and sampling methods for priority pesticides and relevant transformation products in aquifers" (Muñoz *et al.*, 1996; Cabrera *et al.*, 1996) y "Estudio hidrogeológico de los procesos de salinización en el acuífero de San Nicolás de Tolentino" (Delgado, 1998; Cabrera *et al.*, 2000).

Con respecto a las redes de control, en 1995 se estableció la primera de la zona denominada red de control general. En 1997 se examinaron pozos de la red de control establecida anteriormente y se seleccionaron además otros pozos con agua especialmente salobre denominándola red de control salobre. En 1999 se estableció una nueva red de control en base a los pozos que abastecen las plantas desalinizadoras de los agricultores de la zona, denominándose red de control desalinizadoras, y se continuaron midiendo las redes de control que ya estaban establecidas.

Para la presente tesis se ha establecido una nueva red de control piezométrica e hidroquímica adaptada a las necesidades para una buena validación del modelo constituida por 25 pozos. Las tareas realizadas en las campañas han sido: medición de los niveles piezométricos de los pozos de la red de control piezométrica y obtención de los datos de explotación de dichos pozos a partir de la información de los propietarios. En los pozos de la red de control hidroquímica, también ha sido medido el nivel piezométrico y se han tomado datos de explotación, pero principalmente se ha tomado muestra de agua para analizar y se ha medido *in situ* la conductividad, pH, alcalinidad y temperatura del agua. Los análisis de laboratorio realizados incluyen pH, conductividad, TSD, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻ y SiO₂.

El desarrollo de la modelación numérica se ha efectuado de acuerdo con el protocolo mostrado en Anderson and Woessner (2002), en donde destacan como elementos principales la identificación del modelo conceptual, la definición de la estructura del modelo (discretización espacio – temporal, condiciones de contorno, parametrización), calibración, análisis de sensibilidad, validación y su posterior uso como herramienta predictiva. Durante el desarrollo de la modelación los resultados parciales obtenidos en el proceso de calibración, ya sea en régimen estacionario

como transitorio, pueden obligar a una revisión y modificación del modelo conceptual, reiniciándose el proceso (Figura 1.1).

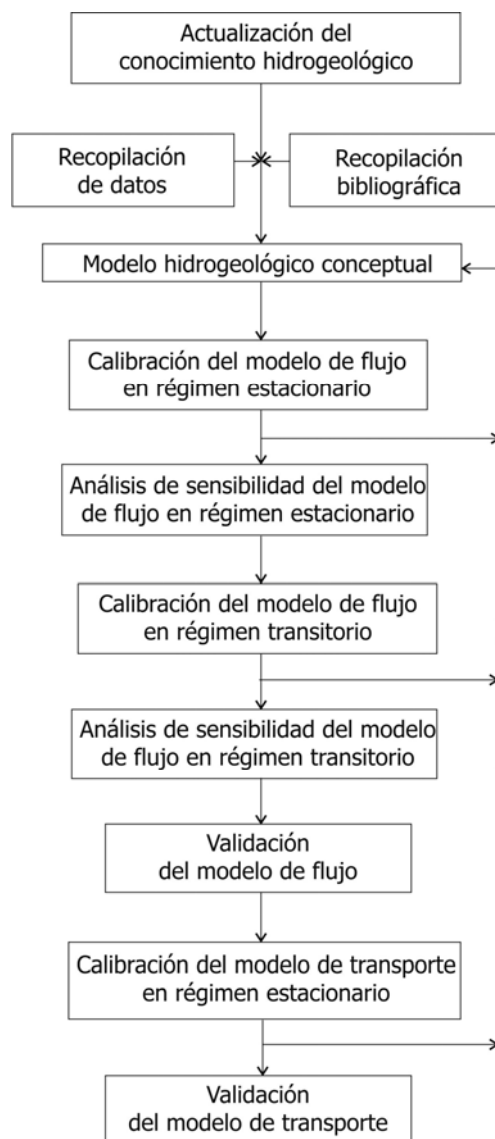


Figura 1.1. Diagrama de flujo de las distintas etapas realizadas en el presente trabajo.

Una vez establecido el modelo conceptual, se han desarrollado los modelos de flujo y transporte. Los códigos aplicados han sido, para el problema de flujo, el programa en diferencias finitas MODFLOW (Harbaugh *et al.*, 2000; Harbaugh, 2005) y, para el problema de transporte, el programa MT3DMS (Zheng y Wang, 1999) en la versión del paquete integrado Visual Modflow (Waterloo Hydrogeologic, 2001; Waterloo Hydrogeologic, 2005). En el modelo de flujo se simuló el régimen estacionario para las condiciones medias anuales de recarga y explotación de 1992, en donde se realizó una exhaustiva campaña de campo en la zona, y el régimen transitorio para el periodo de 1992 hasta 1999 con datos de recarga y explotación mensuales. En 1999 fue realizada una segunda exhaustiva campaña de campo, por lo que para el modelo de flujo en régimen transitorio se disponía de los datos de las distintas campañas de campo y las redes de control

realizadas en ese periodo de tiempo. La validación se ha realizado con los datos de los años 2005-2006 obtenidos en la red de control realizada para este trabajo. En el modelo de transporte en régimen estacionario se simuló las condiciones medias de 1992. Para la elaboración de este modelo de transporte fue necesaria una interpretación y modelación hidrogeoquímica que ha permitido establecer las condiciones de contorno del modelo.

Para los distintos modelos realizados han sido definidas unas condiciones de contorno que delimitan el sistema, tras lo cual se ha procedido a la ejecución, calibración (cualitativa y cuantitativamente) y validación el modelo mediante iteraciones y modificación de variables e incluso del modelo conceptual, para finalmente obtener un resultado coherente con los datos disponibles.



2.

MARCO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E
HIDROGEOLÓGICO

Capítulo 2.- MARCO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLOGICO

2.1.- MARCO GEOGRÁFICO

El Archipiélago Canario está formado por un conjunto de islas de origen volcánico situadas en el sector noreste del Atlántico Central, entre 27° y 30° de latitud norte, a 100 km de la costa africana. El clima de las islas es de tipo oceánico subtropical seco. Las temperaturas son suaves en todas las estaciones y las precipitaciones varían dependiendo de la altitud, desde más de 1300 mm/año en las cumbres hasta 100 mm/año en las costas. Los vientos alisios del noreste son frecuentes, lo que produce un efecto suavizador del clima y lluvias abundantes en las laderas orientadas al noreste; las laderas de sotavento, sin lluvias, se mantienen generalmente secas.

La isla de Gran Canaria tiene una superficie de 1532 km² y un perímetro de unos 225 km. Presenta una morfología cónica, con una base aproximadamente circular (49 x 48 km de eje), y una altura máxima de 1949 m situada en el centro de la isla. La orografía de la isla es irregular y las cotas aumentan desde la costa hacia el centro, desde donde se forman una serie de barrancos radiales, más o menos encajados y abruptos que desembocan en el mar (Figura 2.1). En estos barrancos no existen cursos de agua permanentes, aunque pueden producirse avenidas de cierta importancia durante episodios de lluvias torrenciales. Las precipitaciones en Gran Canaria varían con la altitud desde 900 mm/año en la cumbre hasta 100 mm/año en la costa. La mayoría de las lluvias se concentran entre los meses de noviembre y marzo, siendo los meses de diciembre y enero los más lluviosos, pudiendo descargar en estos meses más del 50% de la precipitación anual. La pluviometría de la isla viene generalmente ligada a la existencia de temporales sur-suroeste, durante los cuales es usual que los barrancos recojan la escorrentía superficial y la descarguen al mar.

El barranco que drena la mayor cuenca de la isla (180 km²) es el barranco de Tejeda-La Aldea, que parte del centro de la isla y drena hacia el oeste. La zona de estudio se asienta en la desembocadura de este barranco (Figura 2.1) en el sector más occidental de la isla de Gran Canaria, presenta un fondo plano rodeado de fuertes escarpes con una extensión de unos 44 km² en los que se pasa del nivel del mar a cotas de más de 1400 m de altitud. Los límites sur y norte son las montañas de Cedro y Horgazales (sur) y de Anden Verde (norte); el límite oeste lo da la línea de costa bañada por el Océano Atlántico y el límite este es el contacto entre los Basaltos Miocenos y los Materiales Sálidos de la Caldera de Tejeda. En la Figura 2.2 se muestra un mapa detallado de la zona con la localización de los topónimos usados en este trabajo.

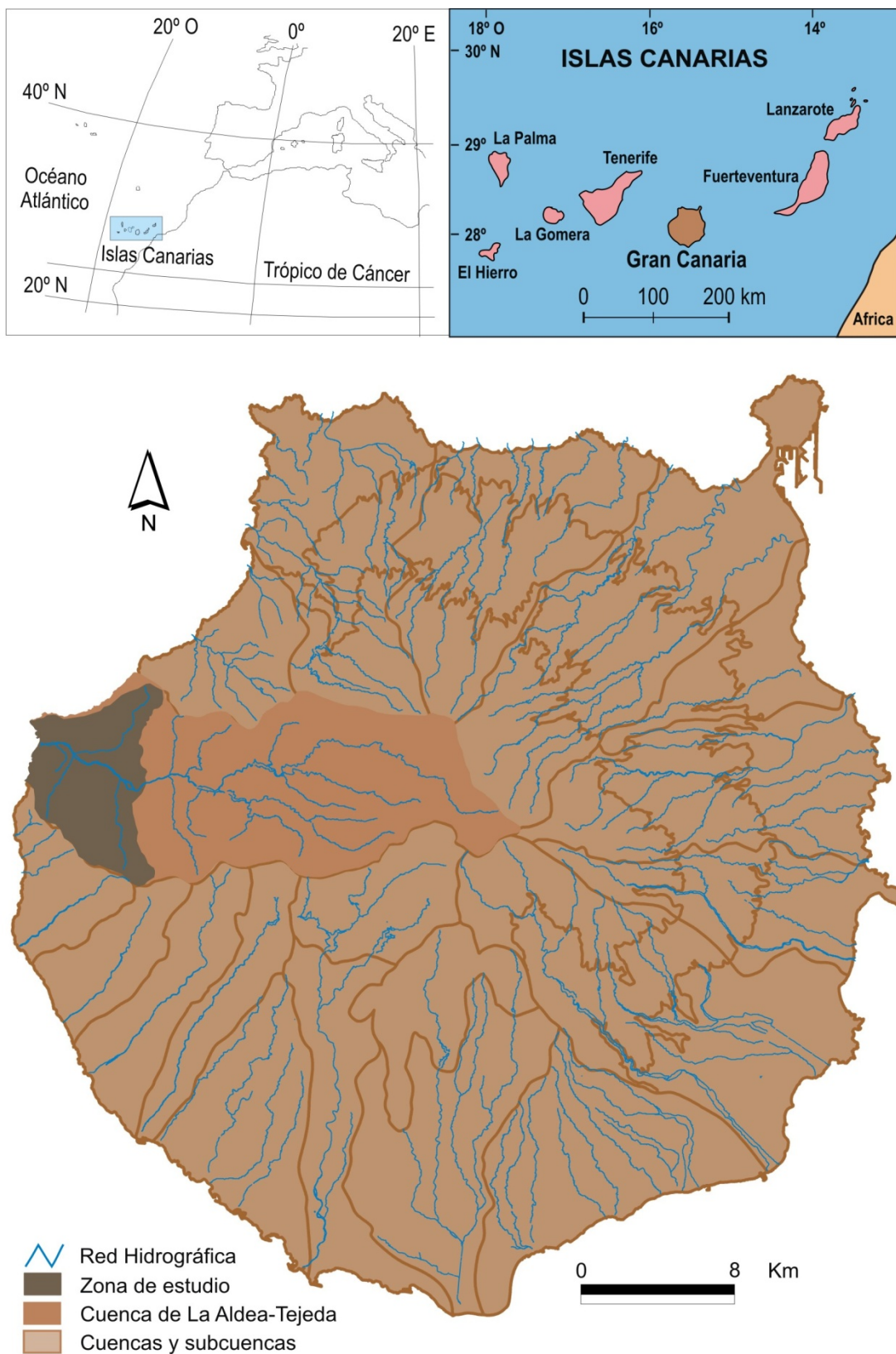


Figura 2.1. Situación geográfica del barranco de La Aldea (Gran Canaria). La zonificación de las cuencas y subcuencas es la utilizada en el SPA-15 (1975) y en los Planes Hidrológicos realizados con el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (PHGC, 1992; PHGC, 1998).

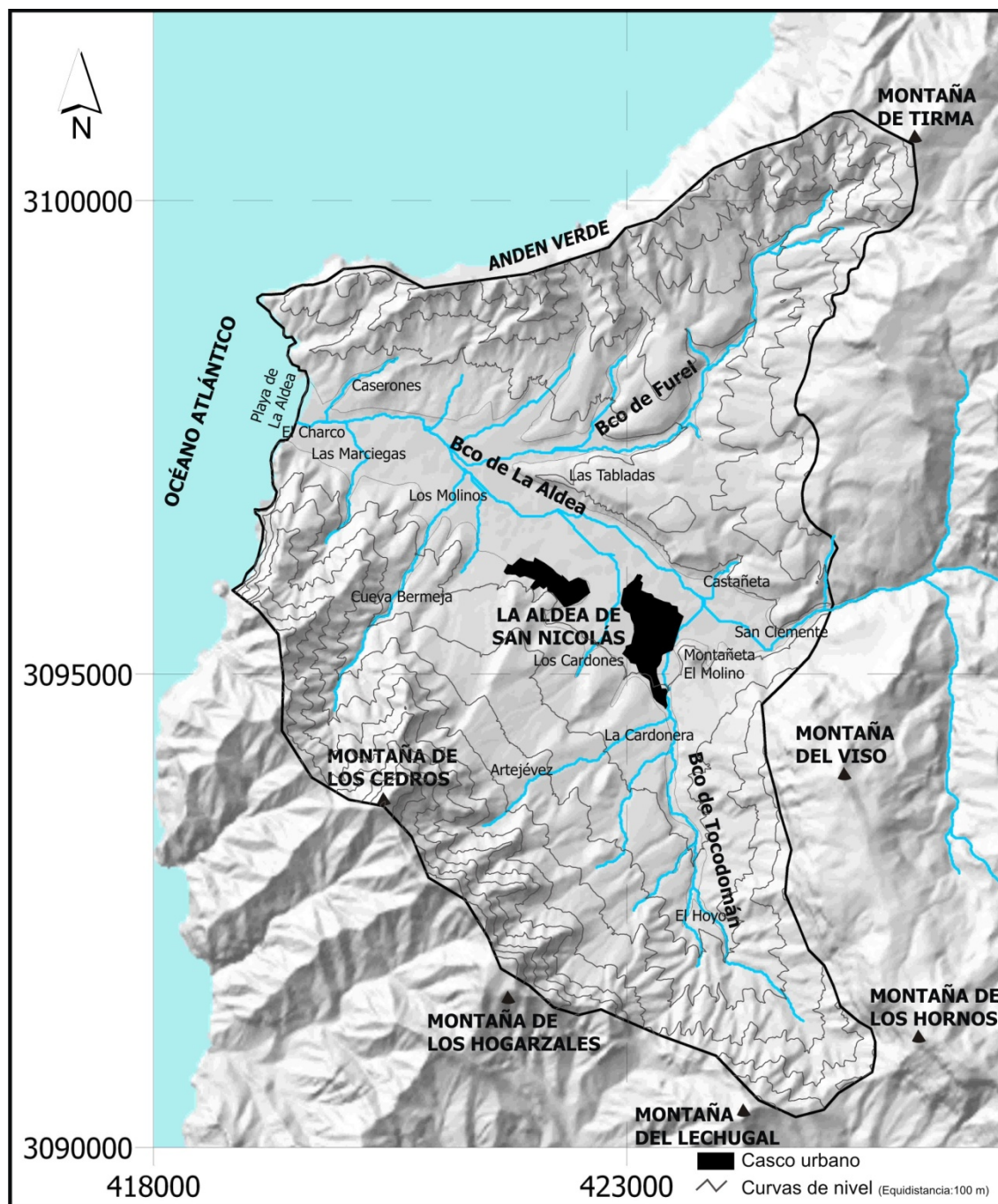


Figura 2.2. Mapa detallado de topónimos de la zona de estudio.

El clima de Gran Canaria está influenciado por la morfología de la isla generando una visible división climática: una zona norte, más húmeda y con temperaturas más bajas, y una zona sur, más seca y con temperatura mayores. Los vientos alisios, de componente noreste, se encuentran con la isla en su cara norte originando un mar de nubes que aporta una elevada humedad y reduce la evapotranspiración mientras que la zona sur queda expuesta a una mayor sequedad de los vientos, con una mayor insolación y evapotranspiración. El barranco de La Aldea se localiza al oeste de Gran Canaria y su clima coincide aproximadamente con el descrito para la zona sur de la isla, clima seco con altas temperaturas.

El valle de La Aldea está dedicado a la agricultura intensiva con una superficie media de cultivo de unas 645 ha de media en los últimos 15 años (Comunicación personal Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación del Gobierno de Canarias, 2006) y un consumo agrícola de 6.5 hm³/año. La superficie de cultivo en 1992 era de 950 ha y ha ido disminuyendo paulatinamente hasta estabilizarse en aproximadamente 550 ha a partir de 1996 y los mismo ha sucedido con el consumo agrícola que ha pasado de más 9 hm³/año a estabilizarse en 5.5 hm³/año. Estos datos muestran una tasa de riego en la zona de estudio de 1 hm³/100ha.año. El cultivo predominante es el tomate, que supedita el riego y los bombeos a la época de *zafra* (desde agosto hasta mayo) y aportan la mayor parte de los retornos de riego en la zona, aunque también se cultivan papas, cítricos, hortalizas y algunos frutales tropicales.

El suministro de agua en la zona está cubierto principalmente por aguas superficiales, mediante tres presas situadas aguas arriba en el barranco de La Aldea. Sin embargo, la vulnerabilidad del sistema en épocas de sequía es grande y es, en esos momentos, cuando las aguas subterráneas adquieren mayor protagonismo (Muñoz *et al.*, 2002), produciéndose un notable aumento en los volúmenes de explotación del acuífero.

La vegetación natural se encuentra formada por especies adaptadas al clima de altas temperaturas y bajas precipitaciones, con una importante abundancia de cardones, tabaibas, aulagas, etc. En el ecosistema costero de El Charco destaca un bosque de tarajales, juncos y otras especies muy característico de la zona. En la zona de transición hacia la montaña quedan relictos ejemplares de almácigos, sabinares y acebuches, y en las faldas de montaña se dan matorrales como escobón y horgazos -al que debe su nombre la Montaña de Horgazales. También existen zonas de pinares en las cumbres más altas y un reducto de cedro canario en la montaña del mismo nombre (Suárez Moreno, 1999), ya fuera de la zona de estudio

La evolución demográfica ha variado en función del desarrollo económico de la comarca, desde que se rompió el aislamiento terrestre del municipio con la apertura de la carretera general Agaete-La Aldea en 1939. No obstante, la población se ha mantenido constante en los últimos 10 años con una media de 8100 habitantes. La dotación de agua de la población ha variado en el tiempo con una dotación de 50 l/hab.día en 1991 (PHGC, 1991) a una dotación de 80 l/hab.día en el 2003 (Comunicación Personal Ayuntamiento de La Aldea, 2004) (Tabla A.1 Anejo 1).

El desarrollo económico de la zona está sostenido por el sector agrícola, sobre todo el cultivo del tomate, aunque también existe un importante sector ganadero y agrícola de otros cultivos.

2.2.- MARCO GEOLÓGICO

Las Islas Canarias constituyen un archipiélago volcánico intra-placa en un margen continental pasivo dentro de la placa litosférica africana (Carracedo *et al.*, 2002).

La evolución geológica de Gran Canaria sigue las pautas generales de cualquier isla volcánica de punto caliente mediante la sucesiva emisión de materiales volcánicos y puede dividirse en dos etapas: **Juvenil** (incluyendo escudo, caldera y post-caldera) y **Post-Erosiva o de rejuvenecimiento**, separadas entre sí por un amplio periodo (≈ 3 Ma) de escasa a nula actividad volcánica (Carracedo *et al.*, 2002). A estas dos etapas hay que añadir una previa de crecimiento submarino (Tabla 2.1 y Figura 2.3).

Tabla 2.1. Cuadro resumen de la historia geológica de Gran Canaria (modificado de Carracedo *et al.*, 2002).

EDADES (Ma)	NATURALEZA DE LOS MATERIALES	PROCESOS MAS DESTACADOS	VOLM. (km ³)	ETAPAS
PLIOCUATERNARIO	Nefelinitas - Basanitas Traquibasaltos	Calderas freatomagmáticas	≥ 10	REJUVENECIMIENTO
		Rift NO-SE		
	Basanitas - Fonolitas	Estratovolcán	≥ 200	
5,5	INTERVALO DE INACTIVIDAD VOLCANICA			
7,3	Cone-Sheet	Depósitos aluviales y marinos	≥ 500	JUVENIL (ESCUDO, CALDERA Y POST-CALDERA)
8,8		Estratovolcán?		
13,3	Intrusiones intracaldera	Fonolitas Traquitas	≥ 250	
	Sienitas	Relleno Caldera	≥ 300	
	Riolitas peralc. - Traquitas	Ignimbritas (HARI)	≥ 1000	
14	Caldera de Tejeda		≥ 8700	
14,5	Basaltos alcalinos	Volcán/es en escudo Erupciones fisurales		
	VOLCANISMO SUBMARINO			≥ 8700

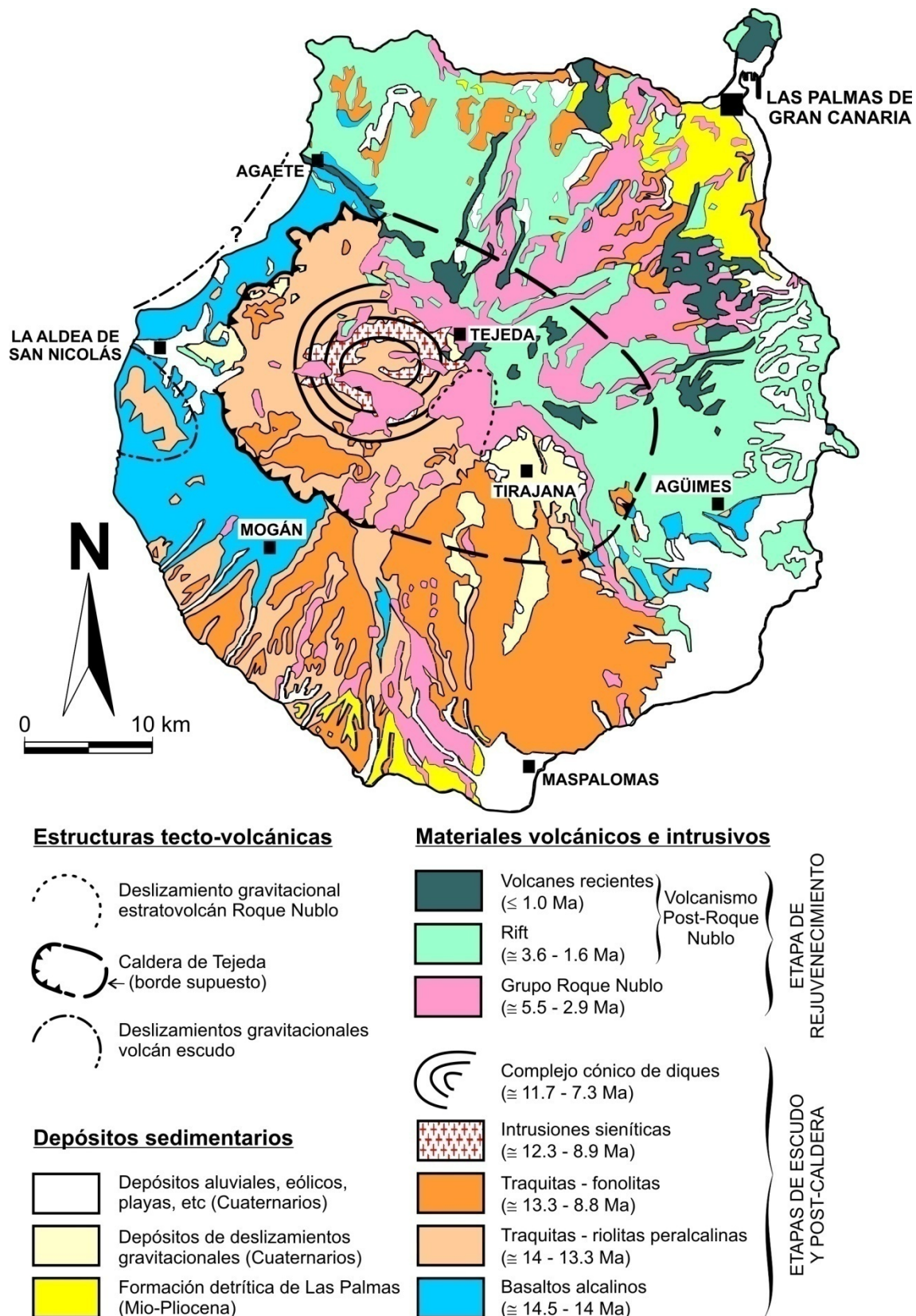


Figura 2.3. Mapa Geológico de Gran Canaria (modificado de Carracedo et al. 2002).

Dentro del marco geológico insular, la zona de estudio se sitúa en materiales que pertenecen fundamentalmente a la etapa de vulcanismo en escudo. Pueden observarse principalmente Basaltos Miocenos en Escudo que constituyen el basamento de la isla en cuanto a materiales subaéreos. También afloran materiales más modernos de la Etapa Juvenil, con escasos afloramientos de la etapa de rejuvenecimiento localizados en el área de Las Tabladas (Tabla 2.2 y Figura 2.4).

Tabla 2.2. Cuadro resumen de las etapas y unidades que afloran en la zona de estudio (Muñoz, 2005).

EIDADES (Ma)		ETAPA	SUB-ETAPA	GRUPO	FORMACIÓN	TRAMO	
CUATER.	0,8	POST-EROSIVA		RECIENTE		Depósitos de barranco actual	
						Derrubios de ladera	
						Terrazas antiguas	
PLIOCENO	3			POST-ROQUE NUBLO		Depósitos de deslizamiento gravitacionales	
						Coladas basálticas	
				ROQUE NUBLO	Detrítica de Las Palmas	Superior	Conglomerados aluviales y lahares
MIOCENO	5,5	INTERVALO DE INACTIVIDAD VOLCÁNICA				Brecha volcánica Cotalas basálticas (aa y pillow-lavas)	
						Dep. Deslizamientos gravitacionales	
					Detrítica de Las Palmas	Medio	Arenas y conglomerados aluvial/marino
				Inferior			
	8,3					Glacis-conos	
		JUVENIL	POST-CALDERA	SÁLICO	Intra-caldera	Ignimbritas y lavas traquítico-riolíticas	
					Extra-caldera	Tobas vitrofílicas ignimbritas y lavas traquítico-riolíticas	
14,5	ESCUDO			Basaltos Miocenos en escudo	Superior		
					Medio		
					Inferior	IA	
IB							

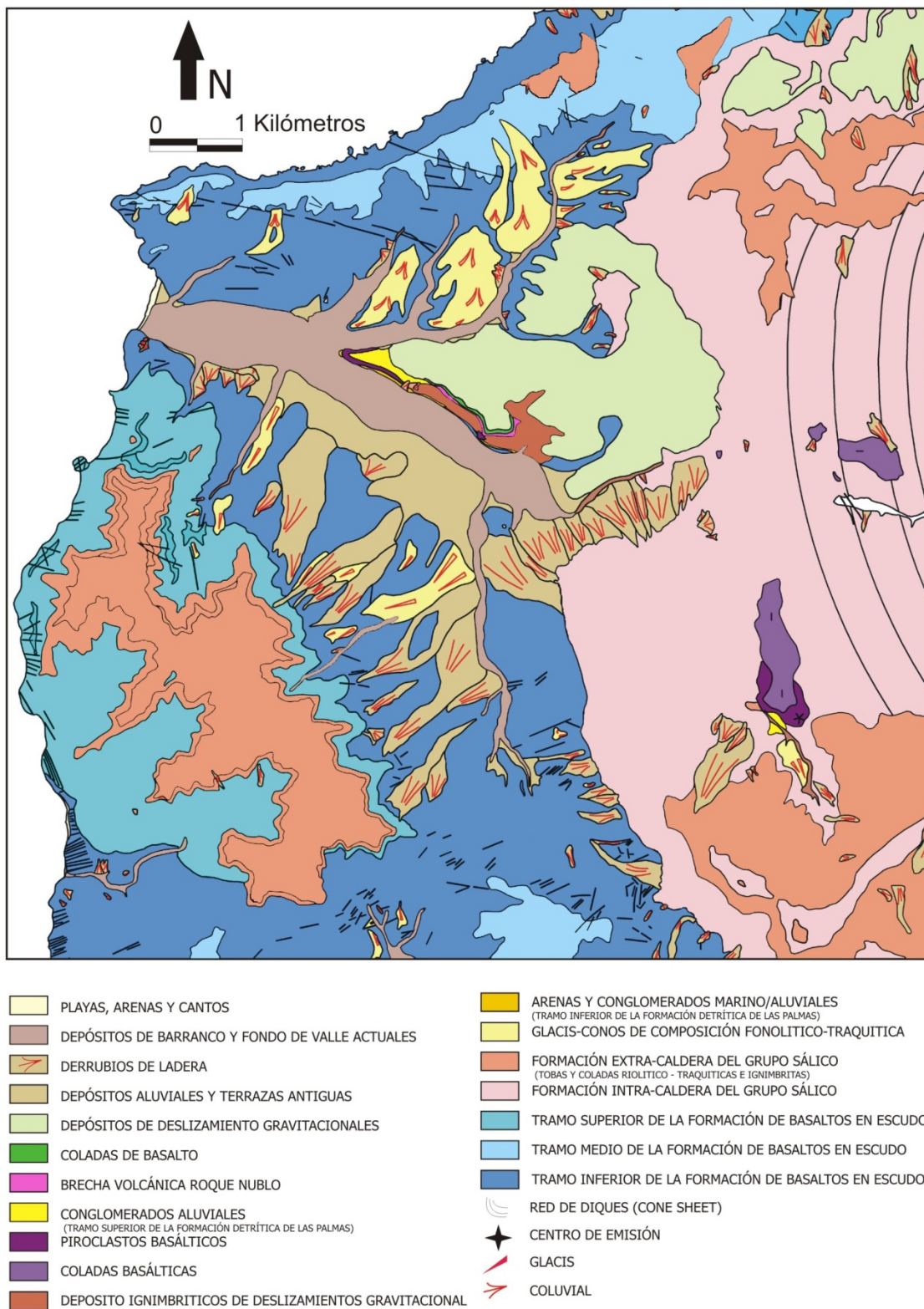


Figura 2.4. Mapa geológico de la zona de estudio (Modificado de Balcells et al., 1992).

La **Etapa Juvenil** de crecimiento de Gran Canaria (14.5 - 8.8 Ma) está representada en la zona por la Formación de Basaltos Miocenos en Escudo y el Grupo Sáfico con materiales extra e intra-caldera:

- * Con respecto a los **Basaltos Miocenos en Escudo**, se pueden encontrar los tres tramos establecidos dentro de los mismos: *el Tramo Inferior, el Medio y el Superior*. Se trata de potentes apilamientos lávicos sub-horizontales (con pendientes de flujo inferiores a 15°) dirigidos hacia el mar cuya base se desconoce. Se localizan en toda la superficie de estudio y se caracterizan por el apilamiento de coladas de potencia media entre 2 y 4 m, del tipo "Pahoehoe" y "aa" de composición basáltica con olivinos y clinopiroxenos. También se encuentran coladas de basaltos plagioclásticos y algunos depósitos piroclásticos intercalados en las coladas (Barrera y Gómez, 1990).
- * Del **Grupo Sáfico** están representados materiales extra e intra-caldera, entre los que destacan unos Depósitos Hidrotermales denominados *Azulejos* en el límite de la caldera. Hay grandes afloramientos relictos de los materiales extra-caldera de la *Formación Traquítico-Riolítica* que cubren la Formación Basáltica desde las laderas de las montañas de Horgazales, del Cedro y Peñón Bermejo hasta Amurga (ubicados estos últimos fuera de la zona de estudio), lo que permite deducir que toda la zona de estudio estuvo cubierta por estas emisiones que fueron posteriormente erosionadas. También se pueden observar ignimbritas con niveles de traquibasaltos intercalados al sur del barranco de La Aldea. La *Formación Traquítico-Riolítica* intra-caldera se localiza fuera de la zona de estudio pero en contacto con ésta por el este. Está constituida por el apilamiento de materiales lávicos y piroclásticos de naturaleza ignimbrítica intruidos por una compleja red de diques cónicos también denominados "cone-sheet" (Barrera y Gómez, 1990).

En la **Etapa de Inactividad Volcánica** (8.8 - 5.5 Ma) se formaron glacis-conos de cantos fonolíticos-traquíticos, arenas y conglomerados marinos / aluviales relacionados con el Miembro Inferior y Medio de la Formación Detrítica de Las Palmas y depósitos ignimbríticos de deslizamientos gravitacionales. Las principales características de esta etapa son:

- * Los *Glacis-conos fonolíticos-traquíticos* se localizan en la ladera del barranco de La Aldea, están constituidos por materiales detríticos gruesos sin ordenación interna y de composición mayoritariamente sáfica (fonolitas e ignimbritas) aunque también en menor medida basáltica (Barrera y Gómez, 1990).
- * Los *depósitos de arenas y conglomerados* están situados en la base de Las Tabladas y se trata de conglomerados de cantos principalmente basálticos (Barrera y Gómez, 1990).

- * Los *depósitos ignimbríticos de deslizamientos gravitacionales* están situados en la zona de Las Tabladas y constituidos por bloques de diferente naturaleza. Muchos de ellos son tobas de tipo "Azulejos" (Barrera y Gómez, 1990).

La **Etapa de Rejuvenecimiento o Post-Erosiva** está representada en la zona por el Grupo Roque Nublo (5.5 - 2.9 Ma) con coladas basálticas (aa y pillow-lavas), conglomerados aluviales y brecha volcánicas, el Grupo Post-Roque Nublo (2.9 - 0.8 Ma) con coladas volcánicas, y depósitos de deslizamiento gravitacionales y el Grupo Reciente (desde el Holoceno hasta la actualidad) con terrazas aluviales antiguas, derrubios de laderas y depósitos aluviales de fondo de barranco (Guillou *et al.*, 2004). Sus características más notables son:

- * Los materiales del **Grupo Roque Nublo** se localizan en Las Tabladas, los *sedimentos aluviales* están formados por conglomerados de cantos basálticos, traquíticos y fonolíticos. También en esa zona se localizan apilamientos de *coladas basálticas* de entre 30 y 35 m de espesor y las *brechas volcánicas* de naturaleza basáltica.
- * Los materiales del **Grupo Post-Roque Nublo** también se localizan en la zona de Las Tabladas y están constituidos por *coladas basálticas* formadas por basaltos olivínicos.
- * Los materiales del **Grupo Reciente**, de naturaleza sedimentaria, ocupan la parte central de la zona de estudio en la parte baja del barranco de La Aldea. Los *depósitos aluviales antiguos y terrazas* están constituidos por cantos de diversa naturaleza (basálticos, vitrificados, ignimbríticos y traquíticos) con tamaños comprendidos entre 8 y 30 cm. Los *derrubios de ladera* están constituidos por una acumulación caótica de cantos y bloques cuya naturaleza depende de la ladera donde se localizan. Los *depósitos de barranco* de entre 20 y 30 m de espesor en el barranco de La Aldea, están constituidos por arenas, limos y gravas heterométricas de naturaleza basáltica, ignimbrítica, traquítica y fonolítica.

La geología subterránea fue estudiada a partir de columnas litológicas de pozos y perfiles sísmicos realizados en la zona (Muñoz, 2005). Las columnas proceden de descensos en los pozos, de descripciones de los testigos de sondeos realizados y de testimonios orales. Los perfiles sísmicos fueron elaborados e interpretados por una entidad privada con fines geotécnicos. Se observó que las unidades geológicas presentes en profundidad son, de techo a muro, la unidad conformada por detriticos-aluviales del Holoceno y actuales (situado en el fondo de los barrancos) y por debajo de éstos los Basaltos Miocenos en Escudo, que afloran en superficie en las zonas donde no hay aluvial.

Los Depósitos Aluviales de barranco son una formación heterogénea, y a nivel petrológico se trata de conglomerados de clastos decimétricos a centimétricos y composición variada. La matriz puede ser arenosa-arcillosa con proporción variada (Muñoz, 2005).

La formación del Tramo Inferior de Basaltos en Escudo también posee una naturaleza heterogénea. Estos basaltos incluyen piroclastos y lavas con alteraciones y fracturas, ambos materiales presentan su porosidad rellena por minerales secundarios. Petrologicamente se tratan de basaltos olivínicos con alteración a iddingsita. Se encuentran en un estado de alteración muy avanzado sobre todo entre los 15 m superficiales (Muñoz, 2005).

Desde el punto de vista hidrogeológico se puede simplificar la geología de la zona en dos unidades geológicas principales: una unidad volcánica y una unidad sedimentaria, que pueden ser consideradas como unidades hidrogeológicas. La unidad sedimentaria está constituida por los materiales aluviales del barranco principal de La Aldea y los secundarios de Tocodomán y Furel y otros barrancos secundarios de menor entidad. También forman parte de la unidad sedimentaria los depósitos de deslizamientos gravitacionales o derrubios de ladera. Debajo de la unidad sedimentaria se localiza la unidad volcánica formada por Basaltos Miocenos que ocupa toda la superficie de la zona de estudio. Existe en la zona un relieve residual denominado Las Tabladas (situado al este de la zona de estudio entre el barranco principal y el barranco de Furel) que tiene como base los Basaltos Miocenos, cuya geología es compleja. El límite este de la zona de estudio está definido por la existencia de una caldera volcánica (Caldera de Tejada), rellena por materiales de la Formación Intra-caldera del Grupo Sáfico.

Estas unidades se subdividen en dominios hidrogeológicos, cuya distribución espacial se puede observar en la Figura 2.5. A continuación se describen las características geológicas de estos dominios:

- * DOMINIO I: El aluvial se localiza en el centro de la zona de estudio y está formado por las terrazas antiguas, derrubios de ladera y depósitos aluviales de barranco actual. Está compuesto por la acumulación de cantos y bloques de diferentes naturalezas: basáltica, ignimbrítica, traquítica y fonolítica, con granulometría desde limos a gravas. Entre los cantos también se pueden localizar en algunas zonas materiales arcilloso.

- * DOMINIO II: Las Tabladas es un relieve residual que separa los barrancos de La Aldea y Furel. En este dominio, afloran materiales volcánicos y sedimentarios de las Etapas Erosiva y de Rejuvenecimiento y tienen como base los Basaltos en Escudo. Se puede encontrar materiales del Miembro Inferior y Medio de la Formación Detrítica de Las Palmas de la Etapa Erosiva, coladas basálticas y brecha volcánica del Grupo Roque Nublo, y coladas basálticas del Grupo Post - Roque Nublo.

- * DOMINIO III: Los Basaltos Miocenos se distribuyen en toda la superficie de estudio y se caracterizan por la acumulación de coladas con potencias medias de 2 a 4 metros. Se pueden diferenciar dos tipos de depósitos: los lávicos y los piroclásticos, éstos últimos presentan una alta porosidad intersticial que está rellena de minerales secundarios (Muñoz 2005). En cuanto a las lavas, los primeros 15 metros están formados por los basaltos muy

alterados, el resto por basaltos alterados y el límite inferior lo dan los basaltos frescos o sin alterar.

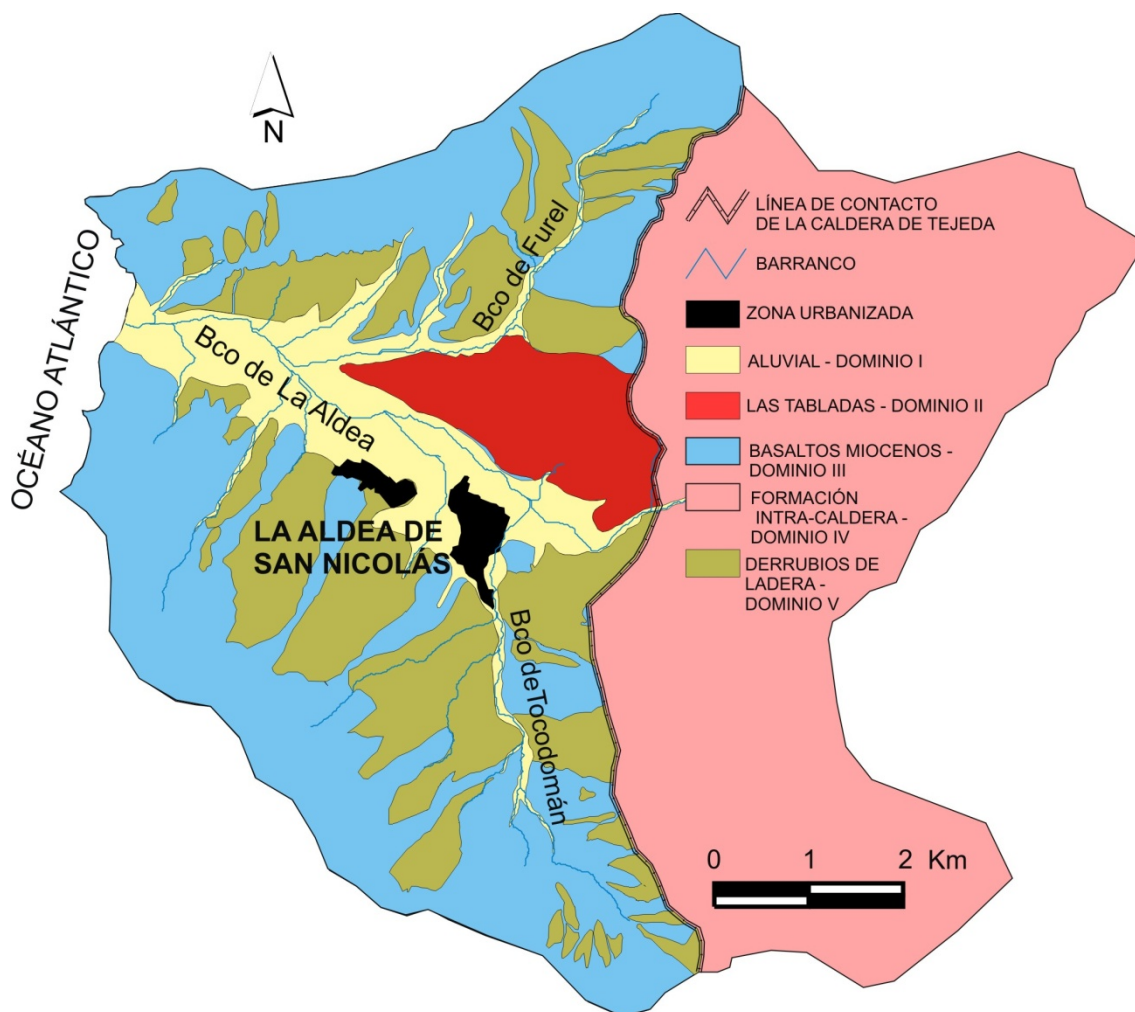


Figura 2.5. Mapa de Dominios Geológicos deducidos a partir del mapa geológico de la zona.

- * DOMINIO IV: Lo constituye los materiales de la Formación Intra-caldera del Grupo Sálico y se localiza al este del barranco de La Aldea siendo el límite de la zona de estudio en su contacto con la Caldera de Tejada. Está formado por tobas y lavas traquíutico-riolitas. El borde de la caldera está marcado por depósitos hidrotermales de colores muy llamativos denominados "Azulejos". Estos depósitos están constituidos por tobas volcánicas de diferente naturaleza, estratificadas con escasa continuidad lateral (pocos decenas de metros) y potencias que van desde métricas hasta varias decenas de metros (Antón, 2002). La variación del color de estos materiales responde al grado de alteración del componente juvenil original de las tobas (Pérez Torrado *et al.*, 2004; Cabrera *et al.*, 2006).
- * DOMINIO V: Está formado por materiales de la etapa erosiva como Glacis-cono y depósitos de deslizamientos gravitacionales o derrubios de ladera. Los Glacis-conos están constituidos por material detrítico grueso y la composición de sus cantos es mayoritariamente lavas

traquítico-fonolítica, ignimbrita y en menor medida, lavas basálticas. Sus potencias son variables y se ubican principalmente en la ladera sur del barranco de La Aldea. Los derrubios de ladera están constituidos por bloques de ignimbrita con niveles intercalados de tobas riolíticas y envueltos en una matriz arcillosa. Se ubican alrededor del aluvial.

Muñoz (2005) agrupó los materiales diferenciando cuatro ámbitos geológicos y geomorfológicos. El primero estaría formado por el barranco principal de La Aldea y los barrancos secundarios de Tocodomán y El Furel. El segundo corresponde a la zona ocupada por el Tramo Inferior de los Basaltos Miocenos en Escudo de la Etapa Juvenil y recubrimientos de las laderas. El tercer ámbito, lo constituye Las Tabladas. El cuarto y último ámbito, se ubica geográficamente en las cumbres más altas de la zona de estudio y en él aflora el Tramo Superior de los Basaltos Miocenos, el Grupo Sáfico (Formación extra-caldera al oeste e Intra-caldera al este ambos en su etapa juvenil) y niveles de alteración hidrotermal (Azulejos) que marcan el borde de colapso de la Caldera de Tejeda. Para la presente tesis, los Basaltos Miocenos van a ocupar un único ámbito y se añaden dos dominios más; la zona de Intra-caldera, que aunque no está en la zona de estudio es el ámbito de contacto con el resto de la isla y es donde se localiza el borde de la Caldera de Tejeda y el dominio formado por derrubios de ladera, dada la importancia que adquiere en la elaboración del modelo, según se verá posteriormente.

2.3.- MARCO HIDROGEOLÓGICO

La estructura general de las formaciones volcánicas puede ser considerada como una combinación de capas porosas, fundamentalmente lávicas y piroclásticas, cruzadas por fisuras (Custodio, 2004). Estas capas pueden ser desde muy compactas hasta de una porosidad que supera el 50%, desde las que tienen las cavidades totalmente conectadas hasta aquellas que, pudiendo ser muy porosas, tienen sus poros aislados unos de otros, desde las que no presentan grietas hasta las que poseen un elevado índice de cavidades debidas a la fisuración, dando así un conjunto sumamente heterogéneo y anisótropo a pequeña escala, que aumenta debido a la presencia de discontinuidades como diques, fisuras y almogres. Además, al transcurrir el tiempo las rocas volcánicas sufre una serie de transformaciones debido a la compactación por el peso de nuevas acumulaciones y a las reacciones químicas que producen la alteración de los minerales de la roca y pueden rellenar cavidades y cerrar fisuras. De forma que tiende a convertirse en más compacta y homogénea, perturbadas por diques y otras formas intrusivas. Por todo ello, si hay algo que caracteriza a un terreno volcánico es su extraordinaria heterogeneidad y anisotropía (Custodio, 1978).

Las heterogeneidades más patentes son las de pequeña escala, debidas a diferencias en el grado de permeabilidad de los elementos litológicos individuales que componen el subsuelo. Las diferencias mencionadas son mayores en los terrenos jóvenes que en los antiguos, pues éstos han experimentado una alteración y compactación que atenúa los contrastes de porosidad y por la misma razón la permeabilidad tiende a ser menor cuanto más antiguo es el terreno (Custodio,

1978). A mayor escala, la heterogeneidad persiste pero es más difícil de percibir ya que se debe a los elementos que integran el subsuelo (coladas, diques, brechas, etc.) (Custodio, 1986).

La anisotropía en los terrenos volcánicos es muy variable dependiendo del tipo de formación que se considere (Custodio, 1978). La acumulación horizontal de coladas jóvenes, cuyas zona superior e inferior son más permeables que su interior, y la existencia de almogres justifica que la permeabilidad horizontal sea mayor que la vertical, formando un conjunto marcadamente anisótropo. Sin embargo, la presencia de grietas y fisuras verticales en materiales jóvenes y fundamentalmente de diques puede introducir una marcada anisotropía en la permeabilidad, de manera que localmente la permeabilidad vertical puede llegar a superar a la horizontal (Custodio, 1986; Custodio y Llamas, 1996).

La porosidad total de los terrenos volcánicos es generalmente alta debido a los vacíos generados por los gases expulsados. No es raro encontrar valores del 40% en depósitos piroclásticos de lapilli, pómez y cenizas. Pero las lavas compactas y los diques tienen una porosidad total menor del 5%. Sin embargo, en la mayor parte de esta porosidad está desconectada y el agua no puede fluir fácilmente. El resultado es que la porosidad eficaz de los materiales volcánicos es mucho menor que la porosidad total, especialmente en los materiales volcánicos jóvenes (Custodio, 2004).

La permeabilidad de los terrenos volcánicos varía desde valores casi nulos hasta valores del orden de 1000 m/d. Las lavas masivas y las ignimbritas presentan una permeabilidad muy baja mientras que el lapilli suelto, las lavas jóvenes y las lavas escoriáceas son muy permeables (Custodio, 2004).

El flujo del agua subterránea en las islas volcánicas está condicionado por las circunstancias anteriormente explicadas. A pesar de las heterogeneidades y discontinuidades que caracterizan los terrenos volcánicos, distintos trabajos han puesto en evidencia un nivel de saturación regional (Custodio, 1978). Surge así la idea conceptual de acuífero insular, por lo que el modelo de flujo de la isla de Gran Canaria se puede esquematizar como un cuerpo de agua único aunque estratificado y heterogéneo en el que la recarga tiene lugar en la cumbre y la circulación se produce hacia la costa. El patrón de flujo presentaría inicialmente una importante componente vertical en la zona central de la isla, siendo en la costa prácticamente horizontal, con salidas intermedia en manantiales, hoy secos y sustituidos por extracciones en pozos (Figura 2.6). El flujo se canaliza preferentemente por los materiales más permeables próximos a la superficie y su movimiento depende de la combinación de las distintas capas y fisuras (Custodio, 2004).

La piezometría de la isla viene condicionada por la distribución de las permeabilidades, con gradientes altos si las permeabilidades son bajas y gradientes muy pequeños en zonas más permeables (Custodio, 2004).

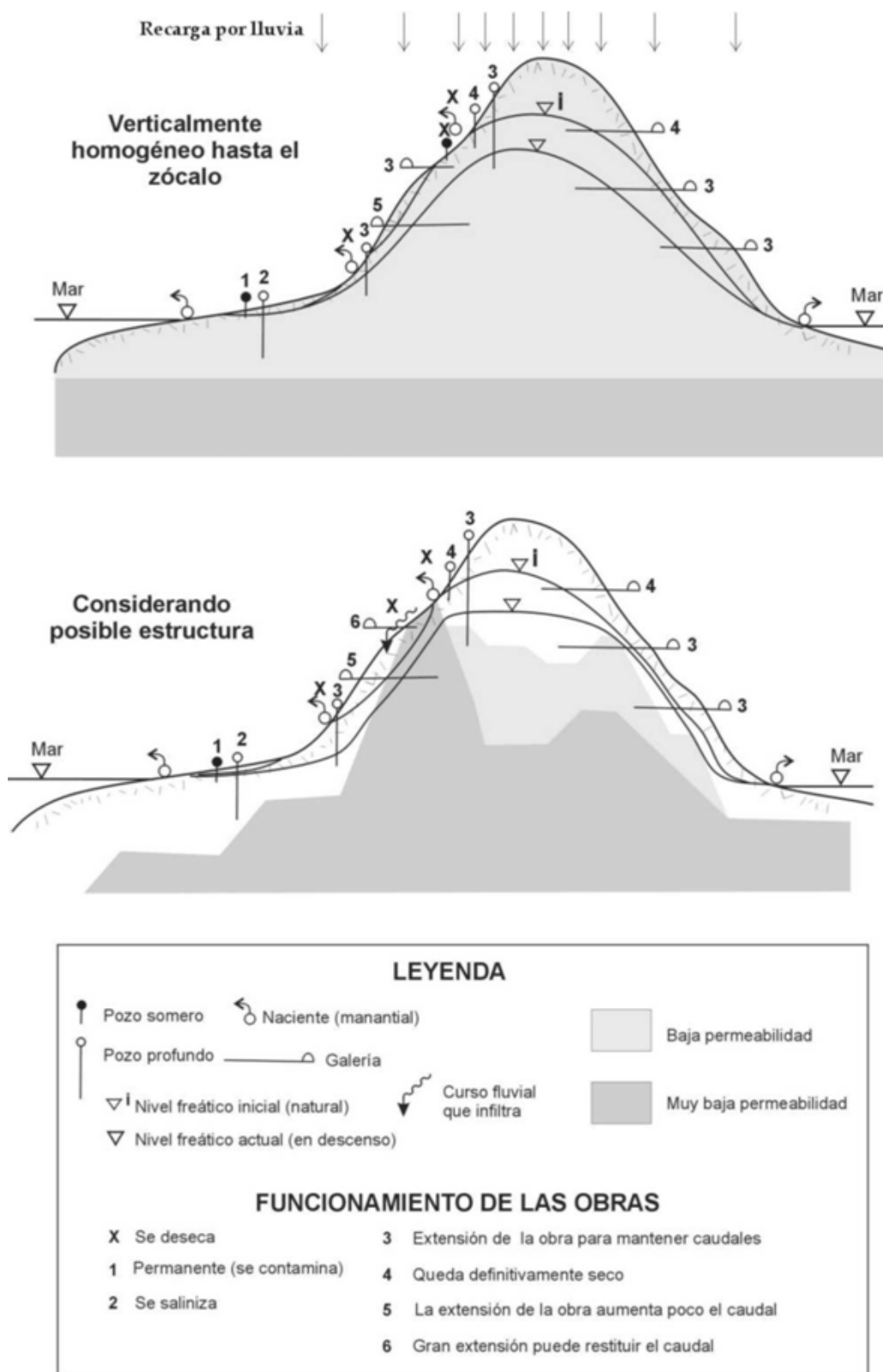


Figura 2.6. Esquema de funcionamiento hídrico natural y con explotación intensiva en Canarias (Custodio y Cabrera, 2002).

El almacenamiento de agua tiene lugar sobre todo en las zonas porosas (escorias, piroclastos, tobas, etc.). El flujo se produce a través de los poros conectados del terreno y de las fisuras. Aunque hay una tendencia a considerar el medio volcánico como fisurado, existen casos en que las condiciones se asemejan más a un medio poroso. En muchas circunstancias se puede hablar de un medio con doble porosidad (Custodio, 1986).

Durante los trabajos llevados a cabo en el proyecto SPA-15 (1975) se investigaron las características hidráulicas de las diferentes formaciones que forman parte de la isla de Gran Canaria, a partir de ensayos de bombeo y recuperación, y de estudios que relacionan los caudales específicos con las transmisividades. Los parámetros hidráulicos obtenidos en este proyecto se muestran en la Tabla 2.3. Las permeabilidades en terrenos volcánicos son generalmente bajas, excepto en los depósitos sedimentarios, y tienen un rango de variación amplio llegando a alcanzar un orden de magnitud. El coeficiente de almacenamiento en los materiales volcánicos está por debajo del 4%, llegando a alcanzar el 10% los materiales sedimentarios.

Tabla 2.3. Valores de parámetros hidráulicos establecidos para diferentes materiales volcánicos (SPA-15, 1975).

FORMACIÓN	TRANSMISIVIDAD (m ² /d)	PERMEABILIDAD (m/d)	COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO
Basaltos Miocenos	5-20	0.05-0.5	0.005-0.01
Fonolitas, Complejo Traquisienítico e Ignimbritas	5-10	0.1-0.5	0.001-0.005
Fonolitas (zonas excepcionales)	10-25		0.0001-0.001
Roque-Nublo (aglomerados)	25-50	0.3-0.75	0.015-0.035
Roque Nublo (niveles basálticos y sedimentos)	50-200		
Basaltos Cuaternarios (contactos con fonolitas, Basaltos Miocenos, etc.)	10	0.2-1	0.01-0.02
Basaltos Cuaternarios (condiciones variables)	40-200		
Depósitos aluviales	200-800	5-25	0.03-0.1
Formación detrítica de Las Palmas		1.5-8	

En el modelo matemático elaborado por INTECSA (1981) se empleó como parámetros iniciales los deducidos en el SPA-15 (1975) considerando como prácticamente impermeables los materiales traquisieníticos y los Basaltos Miocenos. Sin embargo los valores resultantes de la calibración del modelo (Tabla 2.4) diferían apreciablemente de los iniciales y su fiabilidad es discutible.

Tabla 2.4. Valores de diferentes parámetros hidráulicos en Gran Canaria (INTECSA, 1981).

FORMACIÓN	PERMEABILIDAD HORIZONTAL (m/d)	ANISOTROPÍA VERTICAL (K _v /K _h)	COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO
Formación Detrítica de Las Palmas	1.5-2	20	
Basaltos modernos	1	100	
Roque-Nublo	0.15-0.45	100	0.05-0.07
Fonolitas	0.06-0.09	100	0.03-0.05
Traquisienitas y traquitas	0.015-0.03	100	0.02
Basaltos Miocenos	0.04-0.32	100	0.02-0.05

Otros estudios posteriores (Custodio, 1985) daban valores de permeabilidad horizontal para los Basaltos Miocenos diferenciando entre dos tipos: tipo aa con k_h entre 0.01 y 0.04 m/d y tipo pahoehoe con valores entre 0.1 y 1 m/d.

En la isla de Gran Canaria, el acuífero es explotado de forma intensiva, aunque también los recursos superficiales de agua juegan un papel muy importante debido a su orografía y la baja permeabilidad de algunos materiales de superficie. El aprovechamiento de las aguas superficiales se realiza mediante presas y *tomaderos*, obras con las que se derivaban las aguas pluviales de los barrancos hacia los embalses. Existen 60 grandes presas con una capacidad de almacenamiento de 76.8 hm³ y a menor escala, aproximadamente 590 obras de almacenamiento como estanques y depósitos (PHGC, 1998). Testimonios orales de los propietarios de los pozos en la zona de estudio recogen una contribución al riego del 25% de agua de pozo frente a un 75% de agua de presa, aunque esta situación es excepcional en la isla.

Las extracciones de agua en la isla se realizan mediante pozos y galerías (dominando los primeros) y en menor proporción mediante sondeos, encontrándose inventariadas 3.639 captaciones en el PHGC (1998). El volumen de agua extraída ha ido variando dependiendo del año, en 1991 fue estimado en 98 hm³ (PHGC, 1992) y en 1998 en 78 hm³ (PHGC, 1998). Estos recursos subterráneos provienen principalmente del agua de lluvia y en los últimos años, de los retornos de riego.

Gran Canaria tiene una población media de 800.000 habitantes y además al ser el turismo la principal actividad económica, cuenta con un importante número de población flotante. La dotación media neta insular es de 103 l/hab./día, el agua proviene de las desaladoras de agua de mar y aguas salobres distribuidas a lo largo de toda la isla y que abastecen preferentemente las poblaciones situadas por debajo de la cota 300. La eficacia en la distribución varía dependiendo del municipio entre el 20% y el 50% de pérdidas en la red de abastecimiento (PHGC, 1998). Las aguas residuales urbanas son depuradas y reutilizadas principalmente para riego de campos de golf y algunos cultivos tolerantes a las mismas.



3.
FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO Y
MODELO CONCEPTUAL

Capítulo 3.- FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO CONCEPTUAL

3.1.- CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO

La isla de Gran Canaria constituye un acuífero único donde la recarga natural se produce principalmente en las medianías y cumbres de la isla y la descarga al mar en la zona de costa (SPA-15, 1975; Custodio, 2004). La zona de estudio está localizada en la costa oeste de Gran Canaria, por lo que se trata de un área de descarga al mar.

A grandes rasgos, el sistema acuífero está constituido por un acuífero único libre formado por un aluvial y un acuitardo debajo de este conformado por los Basaltos Miocenos. Este último, en las zonas donde no hay aluvial o cuando este está completamente seco, adquiere un papel importante en la explotación de los recursos subterráneos (Muñoz, 2005).

Así se puede hablar de un acuífero bicapa con dos permeabilidades distintas: por un lado la del acuífero aluvial formado por conglomerados heterométricos con matriz arcillo-arenosa (Muñoz, 2005) y por otro lado los materiales basálticos que cumplen con las características de los materiales volcánicos descritos en el capítulo anterior. Estos materiales basálticos suelen presentar permeabilidades bajas, formando un sistema de doble porosidad, la porosidad propia del material que lo forma y otra producto de su fracturación / fisuración (Custodio, 1978). También en estos materiales se han encontrado otros elementos condicionantes del flujo como los almogres y conos enterrados que pueden originar zonas de flujo nulo o de flujo preferente. Otra característica de los Basaltos Miocenos de la zona de estudio es su alto grado de alteración, debido a su edad, que ha derivado en una oclusión de la porosidad mediante la precipitación de carbonatos y zeolitas (Muñoz, 2005). Esto obstaculiza el flujo ya que dificulta la interconexión de los poros disminuyendo la porosidad eficaz.

En 1995 se estableció en la zona de estudio la primera red de control y fue denominada "red de control general" (Figura 3.1A). Esta red de control estaba constituida por 7 pozos con registros trimestrales desde 1995 hasta el año 2003 con algunas lagunas. En 1997, se examinaron los pozos de la red de control establecida anteriormente y se seleccionaron además otros pozos con agua especialmente salobre y se llamó "red de control salobre" (Figura 3.1B). Esta nueva red de control estaba compuesta por 11 pozos con registros aproximadamente trimestrales desde 1997 hasta el año 2002. En 1999, se estableció una nueva red de control en base a los pozos que abastecen las plantas desalinizadoras de los agricultores de la zona, denominándose "red de control desalinizadoras" (Figura 3.1C) la constituyen 39 pozos y sus registros abarcan un periodo

desde 1999 a 2002. Para la presente tesis, se ha establecido una nueva red de control piezométrico y de calidad de las aguas durante el 2005 y 2006 constituida por 25 puntos de agua que ha estado activa hasta septiembre de 2006 (Figura 3.1D).

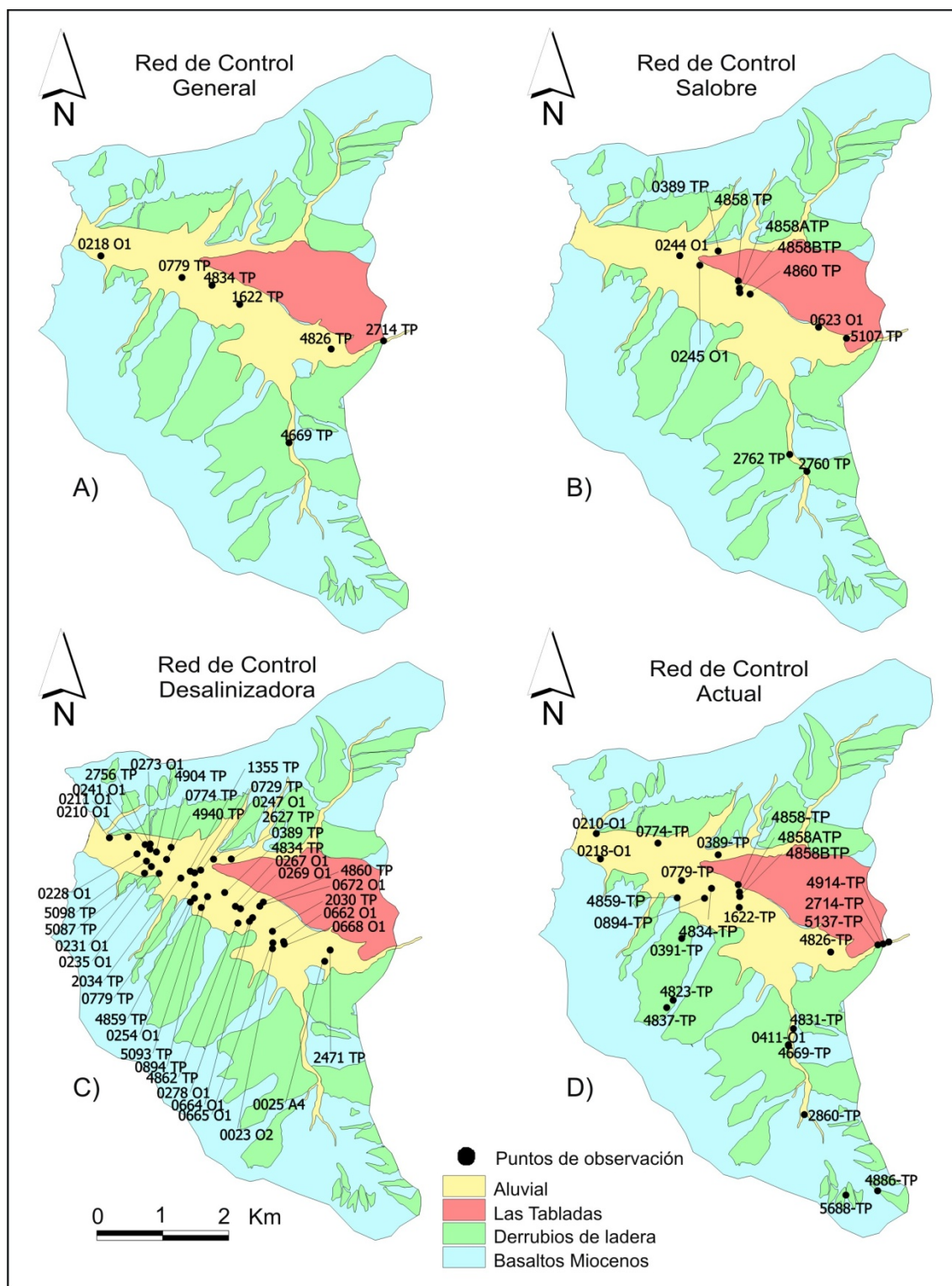


Figura 3.1. Localización de los pozos de las distintas redes de control realizadas en la zona de estudio: A) Red de control general, B) Red de control salobre, C) Red de control de desalinizadoras y D) Red de control actual.

La red de control actual responde a los objetivos siguientes:

- * el buen desarrollo de una futura validación del modelo de flujo,
- * conocer la evolución temporal de las entradas por la cabecera del barranco ya que solo se disponía de los datos obtenidos en las campañas de 1992 y 1999,
- * obtener datos químicos distribuidos en toda al área de estudio para la realización de un modelo de transporte y una mejor caracterización hidroquímica del medio teniendo registradas todas las posibles entradas de agua al sistema en las distintas unidades hidrogeológicas localizadas en la zona de estudio.

3.2.- CLIMATOLOGÍA

En la zona de estudio se localizan 6 estaciones pluviométricas (Figura 3.2) con datos diarios de precipitación desde el año 1980 a la actualidad dentro de la red de estaciones pluviométricas de la Dirección General de Aguas del Gobierno de Canarias. También se dispone de una estación automática promovida por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación desde el año 2000. Los parámetros que se obtienen en esta última son precipitación, temperatura y humedad del aire, velocidad y dirección del viento, radiación solar y precipitación, de forma que se puedan extraer conclusiones acerca de las necesidades de riego de los distintos cultivos, principalmente el tomate, basadas en datos reales de las propias zonas.

Del estudio de los datos de precipitación de las estaciones pluviométricas se desprende que la precipitación de la zona de estudio varía espacial y temporalmente. La Figura 3.2 muestra las isoyetas elaboradas a partir de los datos de las estaciones indicadas. La precipitación media anual desde 1980 hasta 2005 oscila entre los 183 mm/año en las zonas más altas del barranco y 138 mm/año en la zona costera con un valor medio de 161 mm/año. La mayoría de las lluvias se concentran entre noviembre y marzo, siendo los meses de enero y diciembre los más lluviosos y donde se concentran más del 50% de las precipitaciones anuales. La pluviometría está generalmente ligada a la existencia de temporales S – SO, durante los cuales es usual que el barranco recoja la escorrentía superficial y la descargue al mar. En el estudio de la pluviometría de los últimos 25 años (Figura 3.3) no se aprecia una disminución de la precipitación media. Se pueden calificar como años especialmente lluviosos 1984 y 1996 (precipitación \approx 300 mm/año) y años muy secos (precipitación $<$ 100 mm/año): 1982, 1986, 1992, 1997, 2000 y 2003 (Figura 3.3).

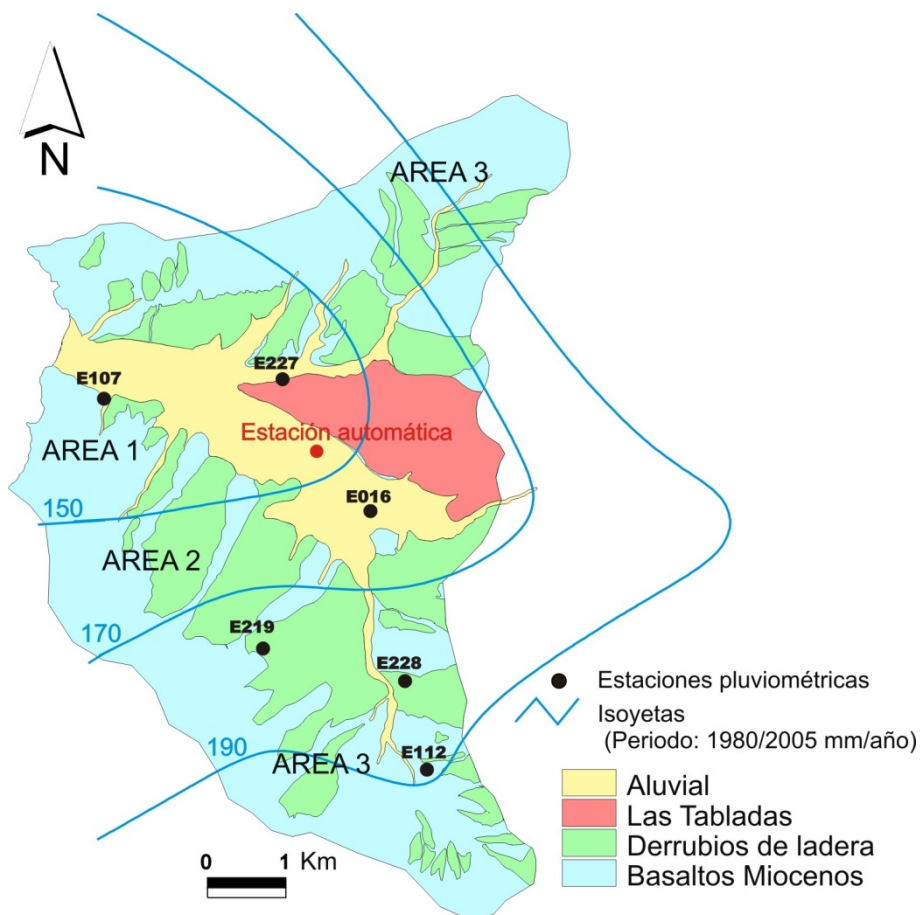


Figura 3.2. Localización espacial de la estación automática y las estaciones pluviométricas ubicadas en la zona de estudio. La distribución de las distintas áreas se ajustan a la distribución de las isoyetas.

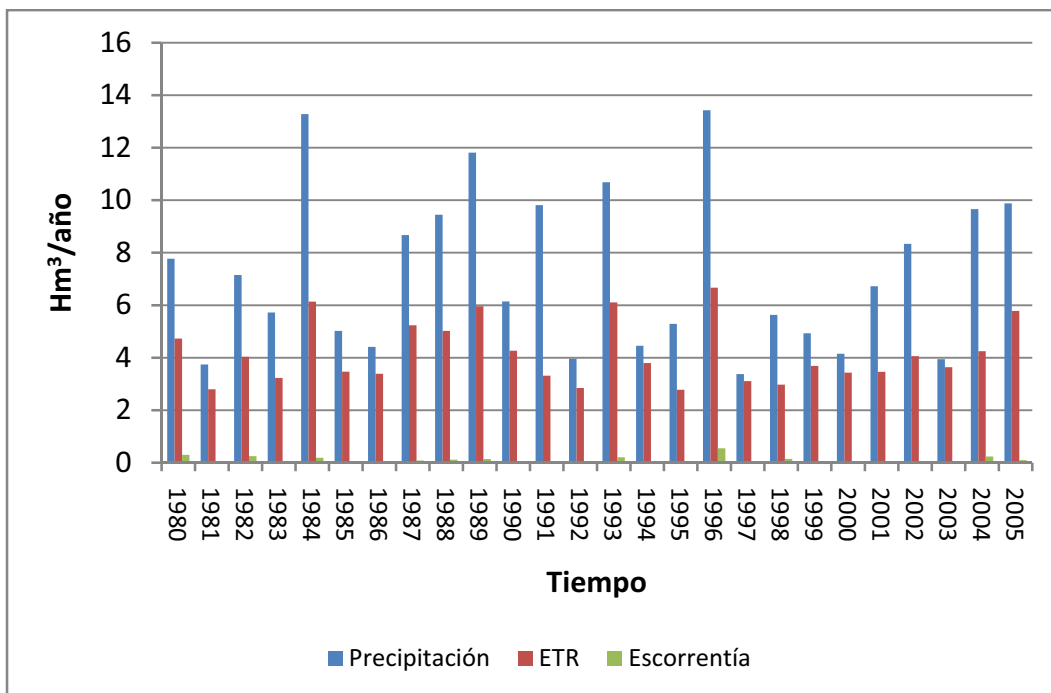


Figura 3.3. Distribución anual de la precipitación, ETR y escorrentía calculadas mediante el balance diario de agua en el suelo con el código Easy bal v.3.

La evapotranspiración real ha sido calculada con la ayuda del programa Easy Bal v.3 desarrollado en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña (1998). Este programa estima la recarga y evapotranspiración real a partir de datos diarios de temperatura y precipitación. Los datos de precipitación han sido calculados como la media de las distintas estaciones localizadas en las zonas comprendidas entre las distintas áreas representadas en la Figura 3.2. Los datos de temperaturas han sido obtenidos de la estación automática de La Aldea a partir del año 2000 y para los años anteriores han sido extrapolados mediante regresión lineal de los datos de la estación meteorológica de Agaete la más cercana a la zona de estudio, que pertenece al Instituto Nacional de Meteorología. Para el método de regresión lineal se han usado datos del año 2000 al 2003 de la estación automática para definir la línea de regresión (Figura A.9 Anejo 3) obteniendo un coeficiente de correlación de 0.899, por lo que podemos decir que el ajuste es bueno. La evapotranspiración real se obtiene a partir de la evapotranspiración potencial media mensual calculada según el método de Thornthwaite, que varía entre 62 y 150 mm/año con una media en este periodo de 94 mm/año (Figura 3.3).

La temperatura media diaria en la zona de estudio oscila entre los 17°C en invierno y 24°C en verano. La humedad media diaria es del 63% y suele oscilar entre 45% y 80%. Las variaciones de dirección y velocidad del viento son muy aleatorias, teniéndose una velocidad diaria media de 1.49 m/s y llegándose a alcanzar velocidades máximas de 6 m/s con un predominio de los vientos del NNE, cambios en la dirección del viento suelen venir acompañados de lluvias torrenciales. La media de horas diarias de sol es 11 horas, estas aumentan en los meses de verano llegando a alcanzar las 13 horas de sol y disminuye en los meses de invierno a 9 horas.

3.3.- MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

La modelación numérica constituye una herramienta potente tanto para la investigación de sistemas hidrogeológicos, como para diseñar una gestión hídrica sostenible de los mismos. Sin embargo, para abordar la modelación de un sistema hidrogeológico se debe contar con un modelo conceptual y una cantidad de información que permitan desarrollar la representación numérica de forma consistente. Los acuíferos volcánicos no constituyen una excepción a esta premisa, es más, sus características particulares, como heterogeneidad y anisotropía marcadas, un nivel de saturación regional no siempre reconocible a pequeña escala y variaciones laterales en los parámetros hidráulicos no predecibles, pueden hacer la labor de modelado especialmente dificultosa.

El acuífero de La Aldea está conformado por dos unidades geológicas principales: una unidad volcánica y una unidad sedimentaria, que han sido consideradas como unidades hidrogeológicas. Estas unidades se subdividieron en dominios hidrogeológicos como se ha comentado en el capítulo anterior. La unidad sedimentaria está constituida por los materiales aluviales del barranco principal de La Aldea, los secundarios de Tocodomán y Furel y otros

barrancos secundarios de menor entidad, con un espesor máximo de 30 metros para el aluvial principal (Muñoz, 2005). También forman parte de la unidad sedimentaria los depósitos de deslizamientos gravitacionales o derrubios de ladera que están constituidos por material detrítico y cantos de traquitas-fonolitas, ignimbritas y en menor medida, basaltos. Sus potencias son variables y se ubican rodeando el aluvial principal, principalmente en la ladera sur del barranco de La Aldea. Debajo de la unidad sedimentaria se localiza la unidad volcánica formada por Basaltos Miocenos que ocupa toda la superficie de la zona de estudio, con una permeabilidad mucho menor que la de los materiales aluviales y un espesor desconocido. Existe en la zona un relieve residual denominado Las Tabladas (situado al este de la zona de estudio entre el barranco principal y el barranco secundario de Furel) que tiene como base los Basaltos Miocenos y cuya geología es compleja. El límite este de la zona de estudio está definido por la existencia de una caldera volcánica (Caldera de Tejada) rellena por materiales de la Formación Intra-caldera del Grupo Sáfico.

3.3.1.- Parámetros hidráulicos

Los datos de parámetros hidráulicos de que se dispone han sido obtenidos en los trabajos y proyectos que se han llevado a cabo en la zona, habiéndose realizado ensayos de bombeo en distintos pozos distribuidos sobre todo en la superficie aluvial, control de niveles para el cálculo de caudales específicos y control de las ondas de las mareas para pozos costeros (Cabrera, 2001; Muñoz, 2005). En la Tabla 3.1 se presentan los valores de los parámetros hidráulicos del aluvial y del basalto, cuyo resultado es producto de la ponderación de los valores medios obtenidos con los métodos anteriormente citados. La permeabilidad se ha calculado considerando un espesor de zona saturada medio ponderado de los sedimentos aluviales de 20 m, obtenido de las descripciones de las columnas de los pozos que incluyen estos materiales. La permeabilidad para los Basaltos Miocenos del valle de La Aldea se calcula con el espesor de basaltos alterados descrito en un sondeo de investigación de 163 m de profundidad (0090-BSI). Los valores de coeficiente de almacenamiento corresponden a los que se daban en anteriores trabajos.

Tabla 3.1. *Parámetros hidráulicos de las dos unidades hidrogeológicas del acuífero de La Aldea calculados a partir de Muñoz (2005).*

	TRANSMISIVIDAD (m ² /d)	PERMEABILIDAD (m/d)	COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO
SEDIMENTOS ALUVIALES	1102 (512-1695)	55 (26-85)	0.065 (0.03-0.1)
BASALTOS MIOCENOS	5	0.03	0.075 (0.005-0.01)

Los materiales aluviales presentan una conductividad hidráulica entre 26 y 85 m/d, valor que es tres órdenes de magnitud más alto que el de los basaltos que es 0.03 m/d. Para el material aluvial, el rango de la transmisividad obtenido por Muñoz (2005) es de un orden de magnitud, el valor más bajo lo obtuvo a partir de los datos de niveles de pozos afectados por las mareas, 512 m²/d, y el más alto a partir de los ensayos de bombeo, 1695 m²/d, y optó por tomar el valor medio de los tres métodos como valor medio de la transmisividad, 1102 m²/d. Para el material basáltico, se descartó el resultado obtenido a partir de las mareas porque daba un valor excesivo para este tipo

de materiales posiblemente debido al efecto de apertura del barranco al mar. La transmisividad obtenida por los otros métodos fue de $5 \text{ m}^2/\text{d}$.

La anisotropía (k_x/k_y) para las capas conformadas únicamente de material basáltico es de 100 (INTECSA, 1981) siendo este el único dato encontrado en la bibliografía de la zona de estudio para este material. No hay referencia bibliográfica para el aluvial de la zona, aunque su anisotropía se supone menor que la de los basaltos.

Con respecto a otros parámetros, Custodio (2004) propone para los basaltos valores de porosidad total de 0.05 – 0.4 y de 0.02 – 0.08 para la porosidad eficaz y para el aluvial valores de porosidad total de 0.2 – 0.4 y de porosidad eficaz de 0.05-0.35 (Custodio y Llamas, 1996).

3.3.2.- Flujo del agua subterránea

En la zona de estudio se han realizado dos grandes campañas de campo en los años 1992 y 1999 donde se midieron los niveles piezométricos de más de 300 pozos en la zona de estudio que permitieron la elaboración de piezometrías para los periodos de campañas (Muñoz, 2005) y se exponen en la Figura 3.4.

Según evidencia la piezometría, el agua se mueve fundamentalmente a través de los materiales aluviales existiendo un flujo preferente a lo largo del barranco principal de La Aldea desde el este al oeste. En el barranco de Tocodomán el flujo tiene lugar de sur a norte desembocando en el aluvial principal y en las laderas del barranco de La Aldea el flujo va desde los Basaltos Miocenos a los materiales aluviales del lecho del barranco. No hay información piezométrica en la zona de Furel porque no hay pozos ni datos de niveles en esa zona.

El gradiente hidráulico varía de 0.02% a 0.01% desde la zona alta (cabecera) hasta la zona baja del acuífero aluvial (desembocadura). La diferencia es debida al cambio en el espesor del aluvial, y con ello la transmisividad, que en la cabecera del barranco es menor que en el cauce medio y la desembocadura, por lo que el gradiente piezométrico en la cabecera es mayor que en el resto del aluvial (Muñoz, 2005). En el barranco de Tocodomán el gradiente medio es 0.08% (Muñoz, 2005) y el flujo de agua subterránea es de sur a norte. Los valores de los gradientes hidráulicos no varían entre las piezometrías de 1992 y 1999, lo que si se observa en la Figura 3.4 es un descenso de los niveles en la zona de estudio de 1999 con respecto a 1992, con la formación de depresiones por debajo del nivel del mar en la desembocadura, que podría implicar procesos de intrusión marina.

La respuesta de los niveles piezométricos en los pozos de la zona es muy sensible a la variación de la recarga. Son visibles los cambios estacionales provocados por la temporada de lluvias y por las imposiciones del calendario agrícola (Muñoz, 2005).

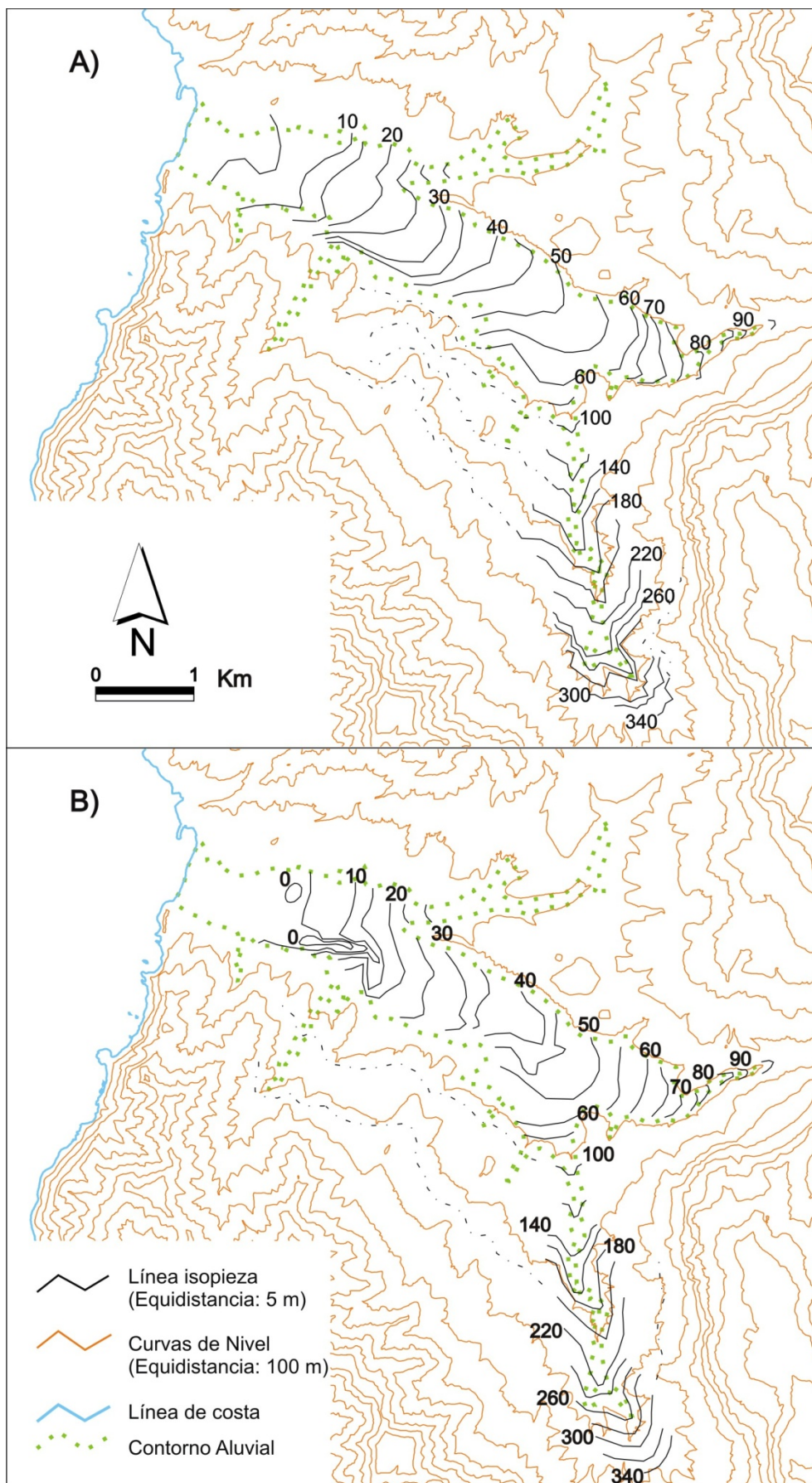


Figura 3.4. Piezometría para los años 1992 A) y 1999 B) para el barranco de La Aldea (Muñoz, 2005).

3.3.3.- Límites

Los límites de la zona de estudio vienen definidos por las divisorias de aguas, coincidentes con las cumbres de las montañas al norte y al sur, el mar al oeste y el borde de la caldera al este.

El contacto con el límite este de la zona, exceptuando el lecho del barranco, ha sido considerado impermeable en la bibliografía, debido a la existencia del borde de la Caldera de Tejada (Muñoz, 2005). Sin embargo el presente trabajo aborda y discute el papel que tiene este borde en el funcionamiento del acuífero.

La zona de estudio presenta la característica de no tener un límite inferior claro definido por un basamento impermeable. Ante ello y dada la necesidad de poner un límite inferior a los basaltos para el desarrollo de un modelo, se ha adoptado como límite inferior el contacto entre los basaltos alterados (más permeables) y los basaltos sin alterar (menos permeables). Este contacto se ha localizado en el sondeo 0090BSI a 163 metros de profundidad (Figura 3.5). Para el resto de la superficie de la zona de estudio se ha considerado una pendiente del 3% para los Basaltos Miocenos hacia la costa, siguiendo el buzamiento medio que presentan y según proponen Barrera y Gómez (1990) en sus mapas geológicos. En la Figura 3.5 también se muestran 3 cortes topográficos O-E de la zona de estudio donde se puede apreciar lo abrupto de la superficie sobre todo en la zona de los barrancos secundarios del Furel y Tocodomán y la distribución espacial impuesta al límite inferior.

La red hídrica superficial en la zona de estudio está conformada principalmente por los barrancos de La Aldea, Tocodomán y Furel. Su régimen hídrico es torrencial. En cuanto a la vinculación de los barrancos con las aguas subterráneas, estos pueden ser considerados como drenes.

3.3.4.- Explotación de las aguas subterráneas

Existen en la zona más de 370 pozos de gran diámetro (2.5 y 3 m), excavados a mano, con profundidades que oscilan entre los 4 y 240 m, con una profundidad media de 30 metros. Los pozos están situados principalmente en la parte central del acuífero y explotan agua de los conglomerados aluviales, aunque algunos atraviesan también los basaltos situados debajo, extrayendo agua conjuntamente de los dos materiales. Son frecuentes los sondeos radiales o *catas* en el interior de los pozos. Las paredes suelen tener revestimiento de ladrillo o cemento en los primeros metros de profundidad.

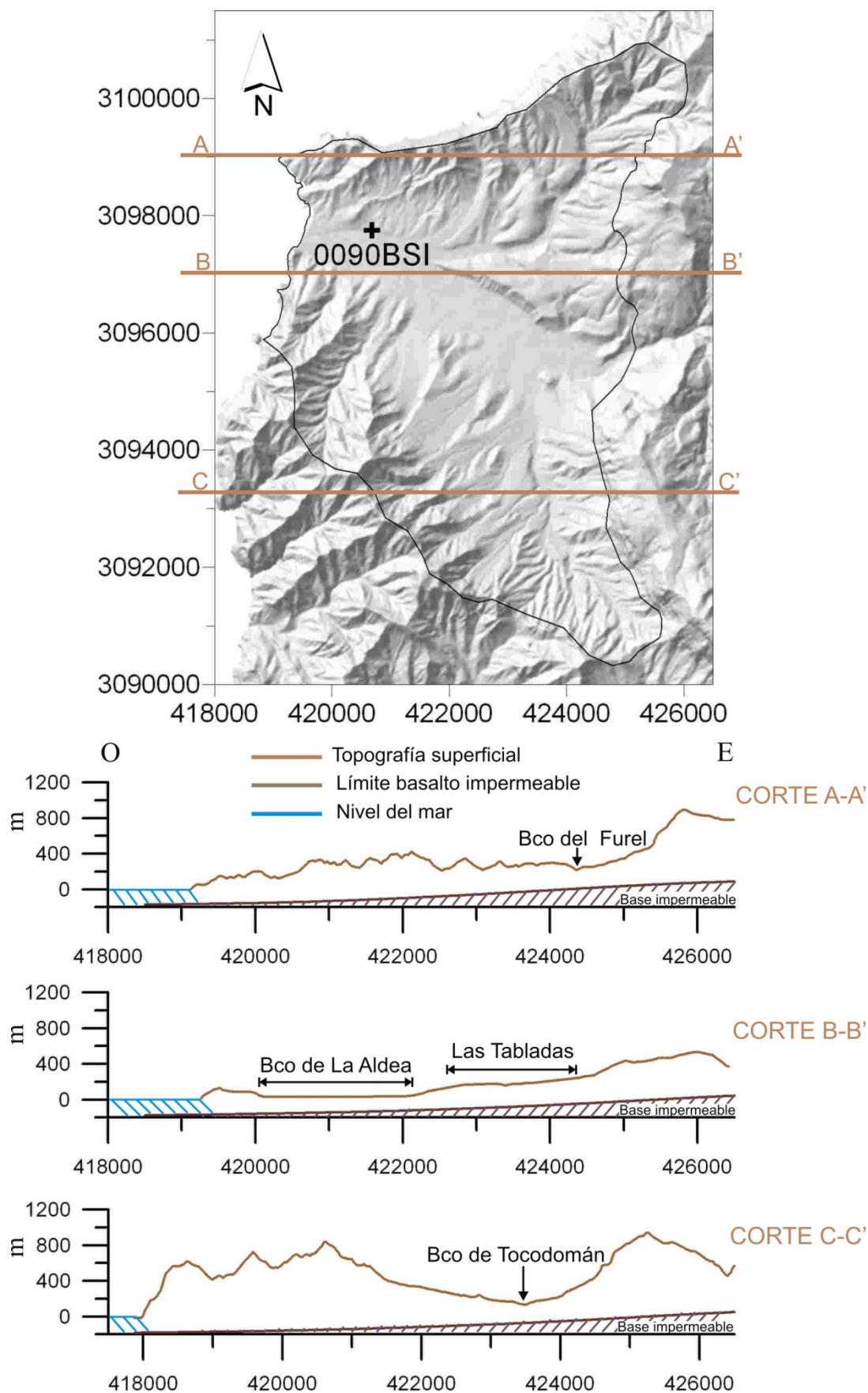


Figura 3.5. Cortes topográficos donde se puede observar lo abrupto de la superficie y el límite inferior de la zona a estudiar.

El régimen de extracción de las captaciones es variable, hay pozos con bombeo automático mediante sistema de boyas o de encendido manual, lo que dificulta los cálculos de la explotación. El agua se usa fundamentalmente para agricultura mezclada con agua de presa o de desaladora, en muy pocas ocasiones se utiliza para riego directo. También se emplea en menor medida para la ganadería y el abastecimiento.

El calendario agrícola del tomate (cultivo mayoritario en la zona) influye en la distribución temporal de la explotación de los pozos. El comienzo de la temporada se produce en agosto con la plantación de los brotes ya crecidos en el semillero y en el mes de octubre comienza la recogida de la cosecha que dura hasta mayo, estos son los meses de mayor explotación del acuífero. Entre junio y agosto no hay plantación en los invernaderos por lo que la explotación disminuye haciéndose casi nula. Según lo expuesto, se deduce que los bombeos de la mayoría de las captaciones son discontinuos, y depende de las necesidades del propietario y del riego a lo largo del año.

Para el estudio de la explotación del acuífero, se calculó el Caudal Medio Continuo Equivalente (Q.M.C.E.). Se trata de un promedio anual de los datos de bombeo calculado con los datos de explotación de los pozos tomados en los diferentes inventarios. En la Tabla 3.2 se reflejan los datos referentes al Q.M.C.E. en los inventarios de los años 1992 y 1999 (Muñoz, 2005). Se puede observar que la cantidad de agua extraída en 1992 es menor que la extraída en 1999, según Muñoz (2005) esto se debió a que los años que precedieron a 1992 fueron húmedos y el riego se llevaba a cabo principalmente con agua de presa.

Tabla 3.2. Caudal Medio Continuo Equivalente (Q.M.C.E.) para las campañas de 1992 y 1999 en el Barranco de La Aldea y Tocodomán (Muñoz, 2005).

		Nº datos	Q.M.C.E. (l/s)						
			Media	Máx.	Mín.	Varianza	Desv. estándar		
1992	Bco. La Aldea	56	0.28	0.21	2.22	0.001	0.17	0.41	0.26
	Bco. Tocodomán	15	0.14		0.42	0.004	0.015	0.12	
1999	Bco. La Aldea	116	0.51	0.33	8.33	0.0002	1.36	1.16	0.76
	Bco. Tocodomán	36	0.15		2.18	0.0015	0.13	0.36	

En la Tabla 3.3 se comparan la explotación total anual evaluada por Muñoz (2005) y la evaluada dentro del presente trabajo. Como se desprende de la tabla, los datos obtenidos en este trabajo superan ampliamente los calculados por Muñoz (2005). Ello se debe a que se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de las bases de datos de explotación existentes y se han extrapolado las series de datos de los años en que dispone de información al resto de los años del periodo de estudio, con el fin de tener series temporales de explotación para desarrollar el modelo numérico

de flujo del sistema. Para realizar la extrapolación, se han considerado las características de los pozos, el uso de agua y el tipo de cultivo que abastece, así como la cantidad y calidad de los datos disponibles. En ambos casos se evidencia un aumento significativo entre 1992 y 1999, aunque este es mucho mayor según los cálculos de Muñoz (2005).

Tabla 3.3. *Explotación total en los pozos de La Aldea para las campañas de 1992 y 1999. Comparación entre los obtenidos por Muñoz (2005) y los realizados en el presente trabajo.*

	1992	1999
Muñoz (2005)	0.57 hm ³ (74 datos)	2.16 hm ³ (164 datos)
Este trabajo	2.8 hm ³ (207 datos)	4.18 hm ³ (207 datos)

En la Figura 3.6 se puede observar la distribución espacial del Q.M.C.E. de los pozos de La Aldea que están en funcionamiento los años representados y en el Anejo 4 (Tabla A.12) los datos de explotación media calculados en este trabajo a partir de los datos de explotación de la base de datos de La Aldea para los distintos pozos. Se indica en esta figura la explotación realizada por los propietarios según los datos aportados por los agricultores referentes a caudales de bombeo, horas de bombeo diarias, días de bombeo al mes y meses de bombeo al año. Se ha considerado que el promedio obtenido es representativo de la explotación para cada año. Además, en el inventario de 1999 se ha recopilado información sobre el uso que se hace del agua posteriormente, por lo que las estimaciones han podido ser contrastadas.

En la figura se aprecia claramente que la gran mayoría de los pozos están localizados en el aluvial del barranco principal de La Aldea y son los que más agua extraen aunque gran parte de los pozos realizan una explotación inferior a 0.5 l/s de Q.M.C.E.

Igualmente, a partir de los datos de que se dispone, se puede observar que también existen extracciones de agua en el barranco de Tocodomán y la explotación es casi nula en el barranco de Furel. Respecto a la explotación en los Basaltos Miocenos y derrubios de ladera, se observa que existen extracciones al sur de la zona de estudio y en el barranco de Tocodomán con unos caudales de explotación en todos los pozos inferiores a 0.5 l/s de Q.M.C.E. Esta distribución de la explotación muestra que la mayor explotación se concentra en el aluvial principal y el barranco secundario de Tocodomán.

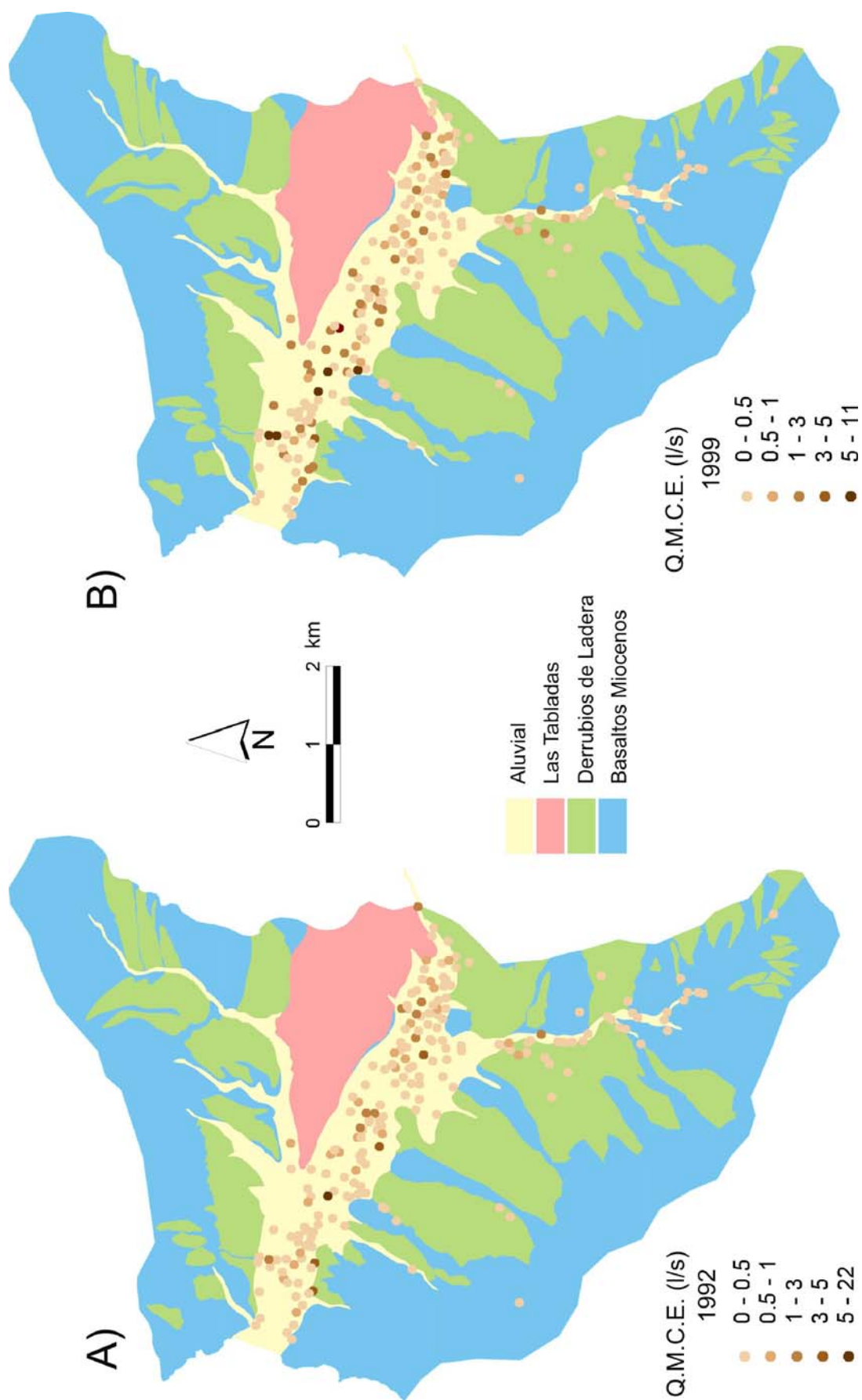


Figura 3.6. Distribución espacial del caudal de explotación anual para los pozos ubicados en la zona de estudio obtenido a partir de los datos de explotación realizados en la presente tesis (unidades: l/s).

3.3.5.- Entradas y salidas al acuífero

La zona de La Aldea constituye un área de descarga hacia el mar en la que la circulación se produce de oeste a este, excepto en las zonas de los barrancos del Furel y Tocodomán donde se produce en el sentido norte-sur para el primero y sur-norte en el segundo.

Las entradas de agua al acuífero están constituidas por la recarga a partir del agua de lluvia, la entrada de agua por la cabecera del barranco principal de La Aldea, los retornos de riego, pérdidas de la red de abastecimiento y la infiltración en la escorrentía (Figura 3.7). Las principales entradas son los retornos de riego y la recarga por lluvia. Las salidas del acuífero son la descarga al mar y las extracciones por bombeo para riego y en menor medida para abastecimiento urbano.

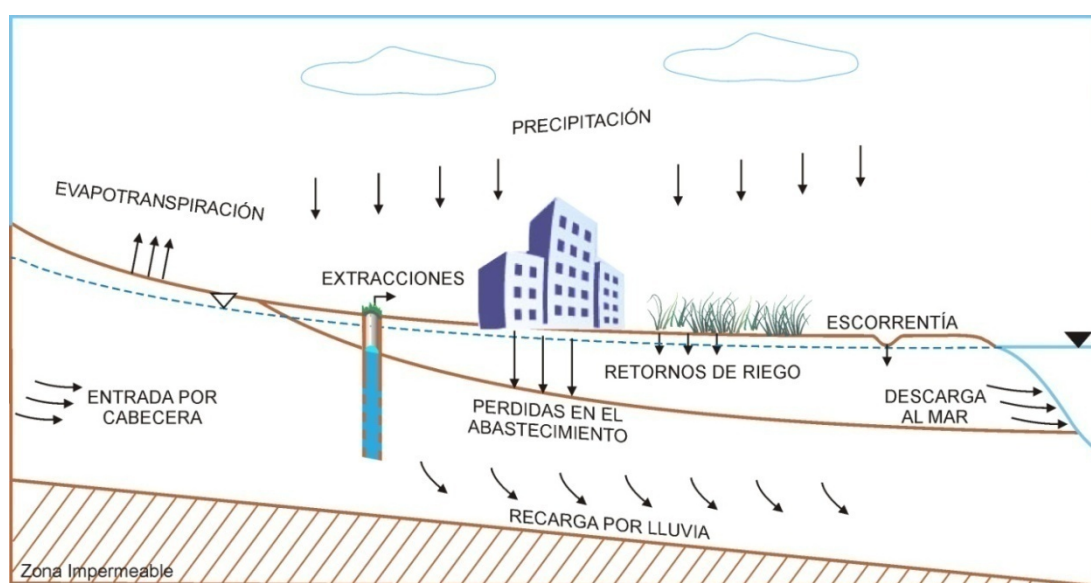


Figura 3.7. Términos de entradas y salidas de agua hacia y desde la zona de estudio.

Tres cuartas partes del agua de riego utilizada en La Aldea provienen de tres presas emplazadas aguas arriba del barranco de La Aldea (Comunicación Personal Francisco Suárez, 2004). Estas presas están situadas en el dominio de la Caldera de Tejada (Figura 3.8), en un sustrato rocoso constituido por ignimbritas traquítico-riolitas. La presa del Parralillo es la de mayor volumen de almacenamiento, 4.6 hm^3 , y fue finalizada en el año 1970; la presa de Siberio tiene un volumen de almacenamiento de 4.3 hm^3 y se finalizó en 1978 y por último, la presa del Caidero de la Niña con un volumen de almacenamiento de 2 hm^3 , es la de menor volumen y la más antigua de todas ya que fue terminada en 1958 (CIAGC, 2005).

La construcción de estas tres presas para el aprovechamiento de aguas superficiales brinda a los agricultores agua para riego con una mayor calidad, fundándose la Comunidad de Regantes de La Aldea para su gestión (los datos de agua de presa para riego han sido cedidos por ellos). También supuso una disminución del volumen de las aguas subterráneas bombeadas.

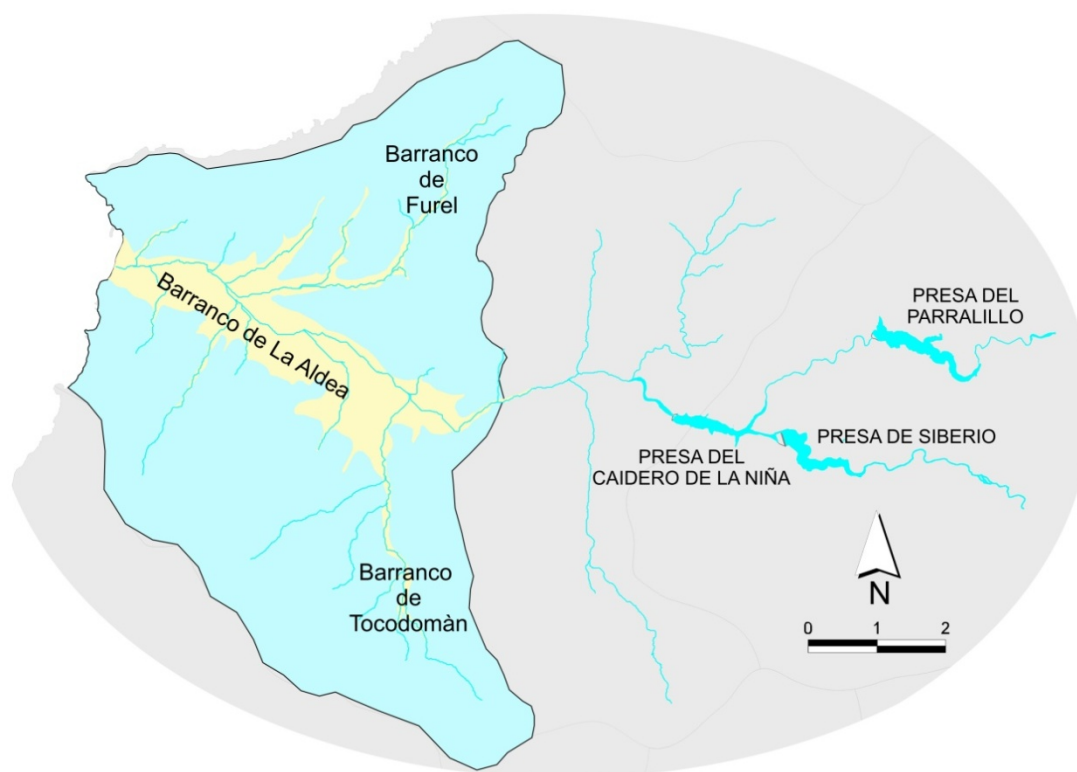


Figura 3.8. Localización de la presas de El Parralillo, Siberio y El Caidero de la Niña.

Después de los años de sequía de 1997 y 2000 se instalaron en la zona varias plantas desalinizadoras, tanto de agua de pozo como de agua de mar a través de pozos filtrantes en la costa, lo que produjo un aumento en la explotación del acuífero y una disminución en la calidad de las aguas subterráneas (Cabrera *et al.*, 2001).

3.4.- BALANCE HÍDRICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance hídrico se ha realizado para el periodo comprendido entre 1992 y 1999 siguiendo el esquema definido en el modelo conceptual.

3.4.1.- Entradas

Los términos de entrada principales en el balance son las entradas por precipitación y los retornos de riego aunque también existen otras entradas de caudal inferior como la producida por la cabecera del barranco, las pérdidas en la red de abastecimiento y la escorrentía superficial.

3.4.1.1.- Recarga por Lluvia

La recarga por lluvia ha sido calculada con el programa Easy bal v.3. Éste programa calcula el balance diario de agua en el suelo a partir de datos diarios de precipitación y temperatura, y proporciona valores de recarga y ETR diarias, mensuales y anuales a partir del cálculo de la ETP por

el método de Thornwaite. La estimación de la recarga se ha realizado por áreas de acuerdo a la cota, el relieve y la distribución de las isoyetas media anuales, y coincidiendo con la ubicación de los pluviómetros, quedando la zona dividida en tres áreas (Figura 3.2). Aunque los datos presentados en este apartado se refieren a toda el área de estudio, en el modelo de flujo si se realizó esta distinción de áreas cuando se abordó la recarga.

En la Tabla 3.4 se muestran los parámetros característicos del suelo introducidos en el Easy bal, la capacidad de campo y el punto de marchitez han sido obtenidos de la bibliografía (Bejarano, 2002), al igual que el espesor del suelo (Sánchez, 1975), el valor de laminación (valor de lluvia a partir del cual se produce escorrentía) se ha calculado mediante la Generación Automática del Número de Curvas con un Sistema de Información Geográfico (Anejo 2). El número de curva es el parámetro hidrológico que utiliza el método del U.S. Soil Conservation Service para el cálculo de la escorrentía (McCuen, 1982). La metodología seguida para su cálculo ha sido descrito en Ferrer *et al.* (1995). Se ha considerado la humedad inicial del suelo en el punto de marchitez y la reserva útil igual a la capacidad de campo con una reserva inicial nula. El balance se ha realizado para el periodo 1980-2005 y todos los resultados se pueden ver en la Tabla A.8 del Anejo 3, en este apartado se presentan los resultados para el periodo 1991-1999.

Tabla 3.4. *Parámetros característicos del suelo necesarios para la realización del balance con el Easy bal.*

Capacidad Campo (en volumen)	0.32*
Humedad Inicial (en volumen)	0.2
Espesor suelo (m)	0.1**
Punto de Marchitez Permanente	0.2*
VALOR LAMINACIÓN (mm)	15,16,20***
Reserva Útil (mm)	0.32
Reserva Inicial (mm)	0.00

* Bejarano (2002)

** Sánchez (1975)

*** Calculado por la Generación Automática del Número de Curva para las 3 áreas pluviométricas.

En la Tabla 3.5, se muestran los volúmenes de precipitación y recarga por lluvia obtenido en el Easy bal. El volumen de recarga varía desde 0.04 hm³/año hasta 2.4 hm³/año dependiendo de si el año es seco o lluvioso, con un volumen medio de 1 hm³/año. El porcentaje de infiltración varía dependiendo de las precipitaciones desde el 2% hasta el 16% con una recarga media del 13.4 % de la lluvia en el periodo de estudio. En trabajos previos, la recarga se calculó mediante balance de cloruro, variando entre el 15% y el 18% de la precipitación (Alcalá, 2005), y extrapolando el método del número de curva calibrado a partir de mediciones de la infiltración en el suelo, en este caso la recarga variaba entre 17% y 28% de la precipitación (SPA-15, 1975). Los valores de recarga obtenidos en este trabajo están un poco por debajo de los valores mínimos obtenidos en estas evaluaciones previas, lo que puede ser debido a que el periodo de estudio representa un periodo de años poco lluviosos.

Tabla 3.5. Resultados de recarga por lluvia obtenidos por el Easy bal para los distintos años hidrológicos.

Año hidrológico	Precipitación (hm ³ /año)	Recarga (hm ³ /año)	Recarga (%)
1991/92	8.51	1.11	13.0%
1992/93	6.42	0.93	14.5%
1993/94	9.94	1.34	13.5%
1994/95	1.77	0.04	2.3%
1995/96	14.38	2.39	16.6%
1996/97	5.97	0.95	15.9%
1997/98	5.55	0.93	16.8%
1998/99	2.59	0.37	14.3%
Media	6.89	1.01	13.4%

Los métodos para estimar la recarga por lluvia son de variada naturaleza entre los que se destacan los balances hidrológicos, la cuantificación del flujo subterráneo y las fórmulas empíricas entre los más usuales. Los resultados son inseguros debido a la incertidumbre de las componentes consideradas en las ecuaciones, la naturaleza empírica o semiempírica de las fórmulas utilizadas, la simplificación de las variables y de los procesos y errores en las mediciones de calibración. La incertidumbre en el cálculo de la recarga de agua subterránea es mayor en regiones áridas y semiáridas que en regiones húmedas, y las consecuencias de la incertidumbre en los cálculos de la recarga son más serias. El cálculo de la incertidumbre se ha realizado según el método propuesto por Custodio (1997) para todo el periodo de estudio.

Sea $R = R(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n)$ una fórmula de cálculo de la recarga en función de una serie de variables y parámetros α_i que tienen un error. Se supone que la distribución de los valores reales siguen una distribución estadística normal de desviación tipo σ_i que se supone con media igual a 0. El error de R, r_i , debido a que la variable α_i contiene un error ϵ_i , vale:

$$r_i = \frac{\partial R}{\partial \alpha_i} \epsilon_i$$

Considerando todas las variables, y suponiendo que los errores de cada una de ellas son independientes entre sí, la desviación tipo del error de R es:

$$\sigma_R^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial \alpha_i} \sigma_i \right)^2$$

Sea la expresión común para el cálculo anual de la recarga R en un lugar en función de la precipitación anual P:

$$R = \alpha(P - P_0)$$

donde α es un factor de proporcionalidad procedente de un ajuste que le asigna un cierto error y P_0 una precipitación umbral obtenida de forma similar. Resulta:

$$\sigma R^2 = (P - P_0)^2 \sigma_\alpha^2 + \alpha^2 \sigma_P^2 + \alpha^2 \sigma_{P_0}^2$$

o en valores relativos del error:

$$\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha}\right)^2 + \frac{P^2}{(P - P_0)^2} \left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 + \frac{P_0^2}{(P - P_0)^2} \left(\frac{\sigma_{P_0}}{P_0}\right)^2$$

Aplicando este método, se ha obtenido un error medio en la recarga de $\pm 0.89 \text{ hm}^3/\text{año}$, un error muy alto para el valor de recarga medio obtenido, $1.01 \text{ hm}^3/\text{año}$. No obstante, es coherente con la observación de que la incertidumbre en la estimación de la recarga es mayor en zonas áridas y semiáridas.

3.4.1.2.- Retornos de Riego

La Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación del Gobierno de Canarias publica todos los años un resumen de datos estadísticos agrícolas de Gran Canaria con la colaboración de las Agencias de Extensión Agraria del Exmo. Cabildo Insular de Gran Canaria. Los datos de superficie cultivada corresponden al total ocupado a lo largo del año por cada cultivo. En la Tabla 3.6 se pueden ver los datos de superficie cultivada en la zona de estudio y se observa una superficie media de 700 Ha en el periodo de tiempo. La superficie de cultivo en 1992 es de 950 ha y ha ido disminuyendo paulatinamente hasta estabilizarse en aproximadamente 550 ha a partir de 1996.

Tabla 3.6. Datos de superficie cultivada a lo largo del año por distintos cultivos en el barranco de La Aldea.

TIPO DE CULTIVO	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Cítrico	19	24	28	32	34	24	3	4	4
Plátano	8	8	3	3	4	6	10	40	40
Frutales	30	59	11	12	19	66	39	23	37
Papas	23	23	20	36	18	12	8	6	6
Flores y plantas ornamentales	1	1	0	2	0	5	16	12	12
Forrajero	227	227	12	11	16	12	39	15	15
Tomate	530	530	550	610	610	370	370	408	408
Otras hortalizas	101	97	41	64	69	46	46	45	45
Total	939	969	665	770	770	541	531	553	567

El cultivo principal es el tomate que ocupan entre un 56% y un 75% de la superficie total cultivada dependiendo del año. También se cultivan plátanos, árboles frutales y distintas hortalizas en menor proporción. El tomate se cultiva en suelo con riego por goteo y en hidroponía con una relación de superficie cultivada de 7:1 en 1997, año que comenzó a usarse este método de cultivo en la zona (7 Ha de superficie de cultivo en suelo por cada Ha de cultivo en hidroponía) hasta alcanzar la relación 4:1 en la actualidad.

El volumen de agua de riego ha sido estimado a partir de los datos de gasto de agua teórica usada para el riego de los distintos cultivos (Tabla 3.7) y han sido suministrados por la Agencia de Extensión Agraria.

Tabla 3.7. Agua teórica usada para el riego de los distintos cultivos que se desarrollan en la zona cedidos por la Agencia de Extensión Agraria del Cabildo de Gran Canaria en La Aldea.

TIPO DE CULTIVO	DENSIDAD (plantas/ha)	Gasto (m ³ /ha.año)
Cítricos	330	6000-9000
Plátano	1500	12000-15000
Frutales varios	400	4000-7000
Papas	10000	7000-11000
Flores y plantas ornamentales	10000	9000-12000
Forrajero	10000	7000-10000
Tomate hidroponía	20000	9000-15000
Tomate suelo	14400	9000-12000
Otras hortalizas	35000	9000-12000

Los retornos de riego han sido estimados por las distintas cooperativas dedicadas al cultivo del tomate, principalmente hidropónico, mediante las medidas del volumen de agua drenada como 30% del agua usada para riego, y este dato ha sido confirmado por la Agencia de Extensión Agraria del La Aldea de San Nicolás (Comunicación Personal Francisco Suárez, 2004) y generalizado al tomate en suelo y al resto de los cultivos.

En las Tabla A.2 y Tabla A.3 del Anejo 1 puede observarse datos de superficie de cultivo, de volumen de riego y retorno de riego para los distintos cultivos que se desarrollan en la zona desde 1990 hasta 2003 respectivamente. En la Tabla 3.8 se muestra un resumen de los datos de gasto hídrico para riego en la zona de estudio para los distintos años hidrológicos. El gasto hídrico medio anual varía entre 9.27 hm³/año y 5.28 hm³/año. Este va disminuyendo en el tiempo, al igual que la superficie cultivada, estabilizándose entre 5.2 hm³/año y 5.9 hm³/año a partir de 1996. Esto muestra una tasa de riego media de 1 hm³/100ha.año.

Los retornos de riego se consideran un 30% del volumen usado para riego y oscila entre los 1.58 hm³/año y 2.78 hm³/año, con un valor medio de 2.1 hm³/año. La media de los valores

máximos y mínimos son 2.4 hm³/año y 1.77 hm³/año respectivamente lo que da un error medio de ±0.3 hm³/año en el volumen de agua de retornos de riego.

Tabla 3.8. Datos de riego y retornos de riego para los distintos años hidrológicos (hm³/año).

	Superficie en Producción (Ha)	Gasto hídrico			Retornos de riego (30%)		
		Min.	Máx.	Medio	Min.	Máx.	Medio
1991/92	954	7.82	10.71	9.27	2.35	3.21	2.78
1992/93	817	6.83	9.31	8.07	2.05	2.79	2.42
1993/94	718	6.24	8.42	7.33	1.87	2.53	2.20
1994/95	770	6.68	9.02	7.85	2.00	2.71	2.36
1995/96	656	5.56	7.54	6.55	1.67	2.26	1.96
1996/97	536	4.47	6.09	5.28	1.34	1.83	1.58
1997/98	542	4.72	6.35	5.54	1.42	1.91	1.66
1998/99	560	4.96	6.64	5.80	1.49	1.99	1.74
Media	694	5.91	8.01	6.96	1.77	2.40	2.09

3.4.1.3.- Entrada por la Cabecera del Barranco

El barranco de Tejeda-La Aldea ocupa una superficie de 180 km² y se extiende desde el centro de la isla de Gran Canaria hasta el mar. La zona de estudio se asienta en la desembocadura de este barranco, y aunque el contacto entre esta y el resto del barranco aguas arriba ha sido considerado impermeable, se ha observado una entrada de agua por la cabecera del aluvial. Esta agua procede principalmente de las pérdidas de las presas situadas en esa zona y por aportes de agua al aluvial de las ignimbritas de la zona.

El cálculo de la entrada por la cabecera del aluvial ha sido realizado por la Ley de Darcy en la cabecera del aluvial. La fórmula empleada es:

$$Q_{salida} = k * b * \frac{\Delta h}{\Delta l} * L$$

k : conductividad hidráulica (m/d)

b : espesor del aluvial (m)

Δh : diferencia de nivel (m)

Δl : distancia entre pozos (m)

L : ancho del aluvial (m)

La conductividad hidráulica usada para los cálculos es 55 m/d para el aluvial (estimado por Muñoz (2005) como valor medio para la conductividad que varía entre los 26 m/d y 85 m/d). Los puntos de observación de los niveles han sido los pozos 4914-TP y 5137-TP, localizados en la cabecera del barranco (Figura 3.9) y hay medidas del nivel de ambos en fechas próximas. La distancia entre los pozos (Δl) considerados es de 206 m, la profundidad del aluvial en la zona es de

10 m, según los datos tomados en el pozo 4826-TP (Muñoz, 2005), y el ancho del aluvial (L) es de 50 m. Los pozos 4914-TP y 5137-TP están a una cota de 98 y 90 m respectivamente. Los niveles piezométricos han sido obtenidos en distintas redes de control para julio de 1992, septiembre de 1999, junio y agosto de 2005 y febrero, abril, junio y septiembre de 2006 (Tabla 3.9).

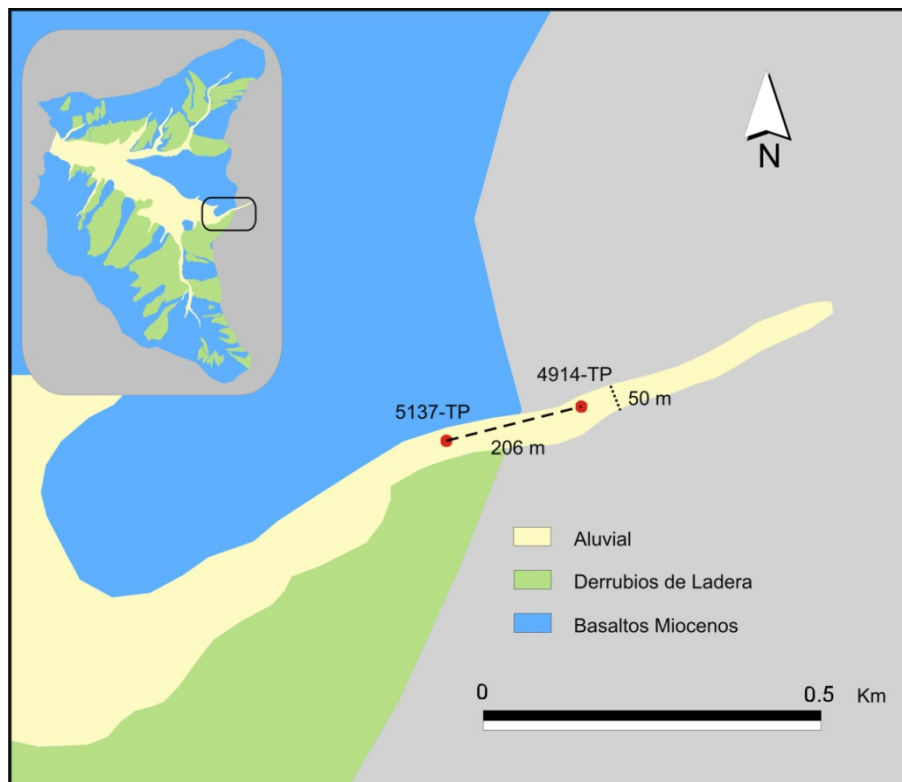


Figura 3.9. Localización de los pozos donde se ha realizado en cálculo del caudal de entrada por la cabecera del barranco.

Tabla 3.9. Cota de los niveles piezométricos para los pozos 4914-TP y 5137-TP localizados en la cabecera del barranco de La Aldea para el cálculo del gradiente hidráulico (Unidad: m).

Año	5137-TP			4914-TP			Δh	Gradiente hidráulico
	Mes	Profundidad del nivel	Cota del nivel	Mes	Profundidad del nivel	Cota del nivel		
1992	Julio	5.77	84.23	Julio	6.28	91.72	7.49	0.036
1999	Septiembre	5.72	84.28	Junio	6.09	91.91	7.63	0.037
2005	Junio	4.70	85.3	Junio	4.45	93.55	8.25	0.040
2005	Agosto	4	86	Agosto	4.98	93.02	7.02	0.034
2006	Febrero	1.25	88.75	Febrero	1.70	96.3	7.55	0.036
2006	Abril	4.63	85.37	Abril	2.95	95.05	9.68	0.046
2006	Junio	5.3	84.7	Junio	4.04	93.96	8.66	0.042
2006	Septiembre	6.47	83.53	Septiembre	9.02	88.98	5.45	0.026

Los valores de gradiente hidráulico varían entre 0.026 y 0.046. Muñoz (2005) obtuvo valores de 0.02 para la zona donde convergen el barranco principal y el de Tocodomán, situada aguas abajo, por lo que es razonable obtener valores mayores en la cabecera del barranco debido al menor espesor de los materiales aluviales en esta zona.

El caudal medio de entrada (Tabla 3.10) varía para las distintas medidas realizadas con un valor mínimo medio calculado de 0.18 hm³/año y máximo medio de 0.58 hm³/año. Los caudales son menores en los meses de verano y mayores en primavera después del período anual de máximas precipitaciones (desde noviembre hasta marzo). El caudal medio de entrada es de 0.38 hm³/año. El error medio obtenido como la diferencia entre la media y los valores máximos y mínimos es de ±0.2 hm³/año.

Tabla 3.10. *Cálculo del caudal del flujo (hm³/año) que entra por la cabecera del barranco de La Aldea realizado por la Ley de Darcy para las conductividades hidráulicas mínima (26 m/d), máxima (85 m/d) y media (55 m/d).*

Año	Mes	Caudal de entrada por cabecera		
		min.	Máx.	media
1992	Julio	0.17	0.56	0.36
1999	Septiembre	0.18	0.57	0.37
2005	Junio	0.19	0.62	0.40
2005	Agosto	0.16	0.53	0.34
2006	Febrero	0.17	0.57	0.37
2006	Abril	0.22	0.73	0.47
2006	Junio	0.20	0.65	0.42
2006	Septiembre	0.13	0.41	0.27
	Media	0.18	0.58	0.38

3.4.1.4.- Entrada por la Red de Abastecimiento

Los datos de abastecimiento han sido cedidos por el Ayuntamiento de La Aldea como volúmenes anuales de abastecimiento. En la Tabla 3.11 se muestra la evolución del volumen de agua destinada al abastecimiento, donde se observa un aumento progresivo de este volumen desde 0.153 hm³/año en 1991/92 a 0.203 hm³/año en 1998/99 con un volumen de abastecimiento medio de 0.177 hm³/año. El ayuntamiento estima las pérdidas en la red entre 35% y 45%. Por lo que se valoran las pérdidas medias en 0.071 hm³/año con un error de ±0.009 hm³/año.

Tabla 3.11. *Datos de abastecimiento y recarga por pérdidas en la red para los distintos años hidrológicos (hm³/año).*

Año hidrológico	Abastecimiento	Pérdidas		
		min.	Máx.	media
1991/92	0.153	0.054	0.069	0.061
1992/93	0.161	0.056	0.072	0.064
1993/94	0.162	0.057	0.073	0.065
1994/95	0.171	0.060	0.077	0.068
1995/96	0.179	0.063	0.081	0.072
1996/97	0.189	0.066	0.085	0.076
1997/98	0.197	0.069	0.089	0.079
1998/99	0.203	0.071	0.091	0.081
Media	0.177	0.062	0.080	0.071

El pueblo de La Aldea se dedica a la agricultura y la ganadería y no es un pueblo turístico, por lo que no existe en la zona una variación estacional del abastecimiento, ya que la población no varía de verano a invierno.

3.4.1.5.- Infiltración por Escorrentía

El barranco de La Aldea, por su ubicación, está sujeto a sequías continuas intercaladas por lluvias torrenciales de frentes que provienen del suroeste. Esto, junto con la orografía de la zona produce en periodos de lluvia escorrentías por las montañas que finalizan en el barranco principal y los barrancos secundarios del Furel y Tocodomán. En estos eventos tormentosos, e inmediatamente después de los mismos, se produce una infiltración desde el cauce de los barrancos.

Debido a la falta de estaciones de aforo en la zona de estudio, la escorrentía se ha calculado por el método del Número de Curva (El método en Anejo 2 y los resultados en la Tabla A.8 Anejo 3). Según este método, la escorrentía media en el periodo de estudio es 0.33 hm³/año (Tabla 3.12) que supone un 5 % de la precipitación caída.

Tabla 3.12. Resultado de escorrentía y recarga producida por la escorrentía para los distintos años hidrológicos (hm³/año).

Año hidrológico	Escorrentía	Infiltración por escorrentía
1991/92	0.00	0.00
1992/93	0.17	0.01
1993/94	0.44	0.03
1994/95	0.01	0.00
1995/96	1.61	0.10
1996/97	0.01	0.00
1997/98	0.42	0.03
1998/99	0.00	0.00
Media	0.33	0.02

El cálculo de infiltración de la escorrentía superficial fue realizado por el SPA-15 (1975) para los años hidrológicos 1970/73 a partir de los datos de lluvia diaria y del cálculo de la escorrentía por el método del Número de Curvas (NC) propuesto por el U.S. Soil Conservation Service (1964; 1972) para toda la cuenca de La Aldea-Tejeda. La infiltración de la escorrentía ha sido evaluada en un 6% del volumen de agua de escorrentía (SPA-15, 1975) lo que supondría un volumen medio de 0.02 hm³/año.

3.4.2.- Salidas

Las salidas de agua del sistema se producen exclusivamente a través de las extracciones en los pozos y la descarga al mar.

3.4.2.1.- Explotación

En la mayoría de los pozos se dispone únicamente de datos de explotación para los años 1992 y 1999, que fue cuando se realizaron las dos grandes campañas de campo en la zona de estudio. Igualmente, en los pozos de las distintas redes de control existen algunas series temporales. Como se ha comentado con anterioridad, para la elaboración de explotación se ha realizado un análisis exhaustivo de los datos de explotación de la base de datos de La Aldea extrapolándose las series de los años en que disponen al resto de los años a modelar para tener una serie temporal de explotación completa e introducirlos en el modelo. Para realizar la extrapolación, se han tenido en cuenta las características de los pozos, el uso de agua y el tipo de cultivo que abastece, así como la cantidad y calidad de los datos disponibles. En la Tabla 3.13 se presentan los resultados de la explotación de la zona de estudio para los distintos años hidrológicos. La explotación media anual estimada ha sido de 3.06 hm³/año con unos valores mínimos y máximos de 2.05 y 3.51 hm³/año respectivamente. Si se analiza la evolución temporal de la explotación en el periodo de tiempo de estudio se observa un aumento de esta de 2.88 hm³/año, en 1992, a 3.81 hm³/año en 1999, lo que supone un aumento en la explotación para este periodo, pese a la reducción de la superficie cultivada, esto es debido a la sequia de este periodo. Por otro lado, se observa un notable incremento de la explotación a partir de 1997 debido probablemente a la instalación de plantas desaladoras en muchos pozos de la zona.

Tabla 3.13. Resultado de la explotación de los pozos de la zona de estudio para los distintos años hidrológicos (hm³/año).

Año hidrológico	Explotación media	Explotación mín.	Explotación Máx.
1991/92	2.88	1.67	3.15
1992/93	2.84	1.78	3.17
1993/94	2.97	1.99	3.17
1994/95	2.95	1.96	3.22
1995/96	2.91	2.11	3.22
1996/97	2.89	2.04	3.20
1997/98	3.22	2.59	3.91
1998/99	3.81	2.26	5.03
Media	3.06	2.05	3.51

3.4.2.2.- Salida al Mar

Para el cálculo del flujo de salida al mar se ha empleado la Ley de Darcy:

$$Q_{salida} = k * b * i * L$$

k : conductividad hidráulica (m/d)

b : espesor del aluvial (m)

i : gradiente hidráulico

L : ancho del aluvial (m)

El gradiente hidráulico (i) para la zona costera fue calculado por Muñoz (2005) a partir de las piezometrías de 1992 y 1999 en 0.01, el ancho de la sección del aluvial (L) es de 500 m y el espesor medio (b) para el periodo de tiempo estudiado, teniendo en cuenta un descenso en los niveles de 1999 con respecto a 1992, es de 18 m y su conductividad hidráulica (k) varía entre 26 y 85 m/d con un valor medio de 55 m/d (Muñoz, 2005). Para esto datos, el caudal medio de salida al mar es de 1.81 hm³/año, con un caudal mínimo de 0.85 hm³/año y máximo de 2.79 hm³/año.

En la Tabla 3.14 se presentan de forma resumida las cifras de entradas y salidas del balance hídrico destacando los retornos de riego como entrada principal seguida por la recarga por lluvia y la salida por explotación de los pozos de bombeo como principal salida de agua del sistema. En la Tabla 3.15 se muestra la diferencia entre las entradas y salidas, éstas sugieren un déficit hídrico y con ello un descenso en los niveles confirmado por las piezometrías realizadas en los años 1992 y 1999 y comentado por Muñoz (2005).

Tabla 3.14. Evolución de los valores medio de los distintos términos del balance hídrico (hm³/año).

Año hidrológico	Entrada por lluvia	Entrada por escorrentía	Entrada por cabecera	Entradas por pérdidas en la red	Entrada por retorno de riego	Salidas por Explotación	Salida al mar
1991/92	1.11	0.00	0.38	0.061	2.766	2.846	1.81
1992/93	0.93	0.01	0.38	0.064	2.65	2.866	1.81
1993/94	1.34	0.03	0.38	0.065	2.103	2.936	1.81
1994/95	0.04	0.00	0.38	0.068	2.357	2.965	1.81
1995/96	2.39	0.10	0.38	0.071	2.197	2.867	1.81
1996/97	0.95	0.00	0.38	0.076	1.58	2.933	1.81
1997/98	0.93	0.03	0.38	0.079	1.62	3.287	1.81
1998/99	0.37	0.00	0.38	0.081	1.733	3.925	1.81
Media	1.01	0.02	0.38	0.071	2.126	3.078	1.81

Tabla 3.15. Entradas y salidas totales del balance hídrico con la variación media en el almacenamiento (hm³/año).

Año hidrológico	Entradas	Salidas	Entradas - salidas
1991/92	4.32	4.65	-0.34
1992/93	4.03	4.67	-0.64
1993/94	3.92	4.74	-0.83
1994/95	2.85	4.77	-0.93
1995/96	5.14	4.68	0.46
1996/97	2.99	4.74	-1.76
1997/98	3.04	5.10	-2.06
1998/99	2.56	5.73	-3.17
Media	3.61	4.89	-1.28



4.

MODELO DE FLUJO DEL ACUÍFERO DE LA
ALDEA

Capítulo 4.- MODELO DE FLUJO DEL ACUÍFERO DE LA ALDEA

El modelo de flujo del acuífero de La Aldea ha sido realizado utilizando el código de simulación Modflow (McDonald y Harbaugh, 1988; Harbaugh *et al.*, 2000; Harbaugh, 2005) desarrollado por U.S. Geological Survey, compilado en la adaptación comercial de Waterloo Hydrogeologic Inc., Visual Modflow (Waterloo Hydrogeologic, 2001; Waterloo Hydrogeologic, 2005). El Visual Modflow permite modelar, en tres dimensiones, el problema de flujo mediante el método de las diferencias finitas.

4.1.- GEOMETRÍA DEL MODELO

El dominio del modelo coincide con la zona de estudio. Éste se ha definido de forma que coincida con límites hidrogeológicos naturales conocidos, lo cual ha facilitado la imposición de las condiciones de contorno, y su geometría viene condicionada por la geología y la topografía de esta zona. Los límites norte y sur son definidos por las respectivas divisorias de aguas superficiales que conforman las cadenas montañosas, el límite este se localiza en el borde de la Caldera de Tejada y, por último, el límite oeste coincide con el nivel del mar. El límite geométrico superior viene dado por la superficie topográfica, que es muy abrupta al norte y al sur, donde se localizan cadenas montañosas, y plana en el centro de la zona de estudio donde se sitúa el cauce del barranco principal. El límite geométrico inferior se localiza en el contacto entre los basaltos alterados (más permeables) y los basaltos sin alterar (menos permeables) que se ha identificado en el sondeo 0090BSI (Figura 3.5) a una profundidad de 163 m y se ha extendido al resto del dominio con una pendiente del 3% hacia la costa (Barrera y Gómez, 1990).

En la zona se localizan dos unidades hidrogeológicas principales: el aluvial, que ocupa la zona centro del área de estudio, y los Basaltos Miocenos, que ocupan toda la superficie de la zona de estudio pero únicamente afloran en las zonas montañosas.

El modelo se ha discretizado verticalmente en tres capas. La primera capa (Capa 1) es heterogénea y está formada por los aluviales (principales y secundarios), los Basaltos Miocenos más superficiales, Las Tabladas y los derrubios de ladera, las otras dos capas están ubicadas debajo de la capa anterior y están formadas únicamente por Basaltos Miocenos (Capas 2 y 3). La evolución del espesor de las capas se definió atendiendo al requerimiento de la estabilidad numérica del modelo.

4.2.- CONDICIONES INICIALES Y DISCRETIZACIÓN TEMPORAL

La superficie piezométrica de partida adoptada para la simulación en régimen estacionario ha sido una piezometría paralela a la topografía situada 5 m debajo de ésta. Para el régimen transitorio se optó por poner una condición inicial obtenida a partir del modelo en régimen estacionario en el que se simuló el año medio hidrológico 1991/92.

Para la modelación del régimen estacionario se ha considerado el año hidrológico 1991/92, introduciendo los datos medios anuales de recarga y explotación y los datos de nivel obtenidos en la campaña piezométrica realizada en junio de 1992.

El modelo en régimen transitorio comprende el período 1991/92 – 1998/99 (2880 días). El periodo de simulación está dividido en periodos de tiempo, durante los cuales todas las perturbaciones que sufre el sistema permanecen constantes. En el modelo en régimen transitorio, los datos se han definido temporalmente en intervalos mensuales. Esto ha supuesto 96 períodos de tiempo de 30 días. Los datos de explotación se han calculado a partir de los diferentes inventarios de puntos de agua de la zona. Asimismo, se han extrapolado las series de datos de los puntos en que dispone de información a otros puntos en los que se desconoce sus extracciones. Para realizar la extrapolación, se han tenido en cuenta las características de los pozos, el uso de agua y el tipo de cultivo que abastece, así como la calidad de los datos disponibles.

4.3.- DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y CONDICIONES DE CONTORNO

Los modelos numéricos resuelven la ecuación de flujo de aguas subterráneas considerando unas condiciones de contornos dadas. Las condiciones de contorno impuestas al modelo se exponen en la Figura 4.1. Los límites norte y sur del dominio modelado – montañas de Cedro y Horgazales y de Andén Verde respectivamente – son bordes impermeables que representan la divisoria de aguas subterráneas, que se hace coincidir con la divisoria superficial, la cual se asume que viene dada por las cotas máximas de las cadenas montañosas existentes. El límite oeste está constituido por la línea de costa, por lo que se impuso una condición de contorno de nivel prefijado adoptándose en la celdas de la capa superior un nivel constante de 0 m.s.n.m. Por último, en el límite este se ha impuesto una condición de caudal prefijado tanto en la cabecera del barranco, como en el contacto entre la intra-caldera y el dominio modelado, ambos evaluados por la Ley de Darcy. En los estudios realizados hasta el presente trabajo, este borde siempre se había considerado impermeable (SPA-15, 1975; Muñoz, 2005) pero la existencia de un caudal de entrada desde la zona de intra-caldera es una hipótesis plausible que mejora la calibración del sistema. La base del acuífero se consideró impermeable. Las condiciones de contorno en los límites se asumieron como invariables en el tiempo.

Los datos recogidos indican que cuando hay en la zona periodos de lluvia muy prolongados, en el barranco corre agua y se vierte al mar, aún después de la construcción de las

presas aguas arriba. Para representar este proceso se ha puesto una condición de contorno de dren para la red hidrográfica formada el barranco principal y los secundarios de Tocodomán y Furel y otros barrancos secundarios de menor entidad con una conductancia de 500 m²/día (Figura 4.1). Este parámetro se ha calculado de acuerdo a la siguiente relación:

$$C = \frac{K \cdot L \cdot W}{M}$$

Donde C corresponde a la conductancia del dren (m²/d), K es la conductividad hidráulica del material que conforma la base del dren (0.1 m/d para arenas limosas (Custodio y Llamas, 1996)), L es el largo de alcance a través de una celda (50 m), W es el ancho del dren en la celda (20 m) y M es el espesor de la base del dren (0.2 m).

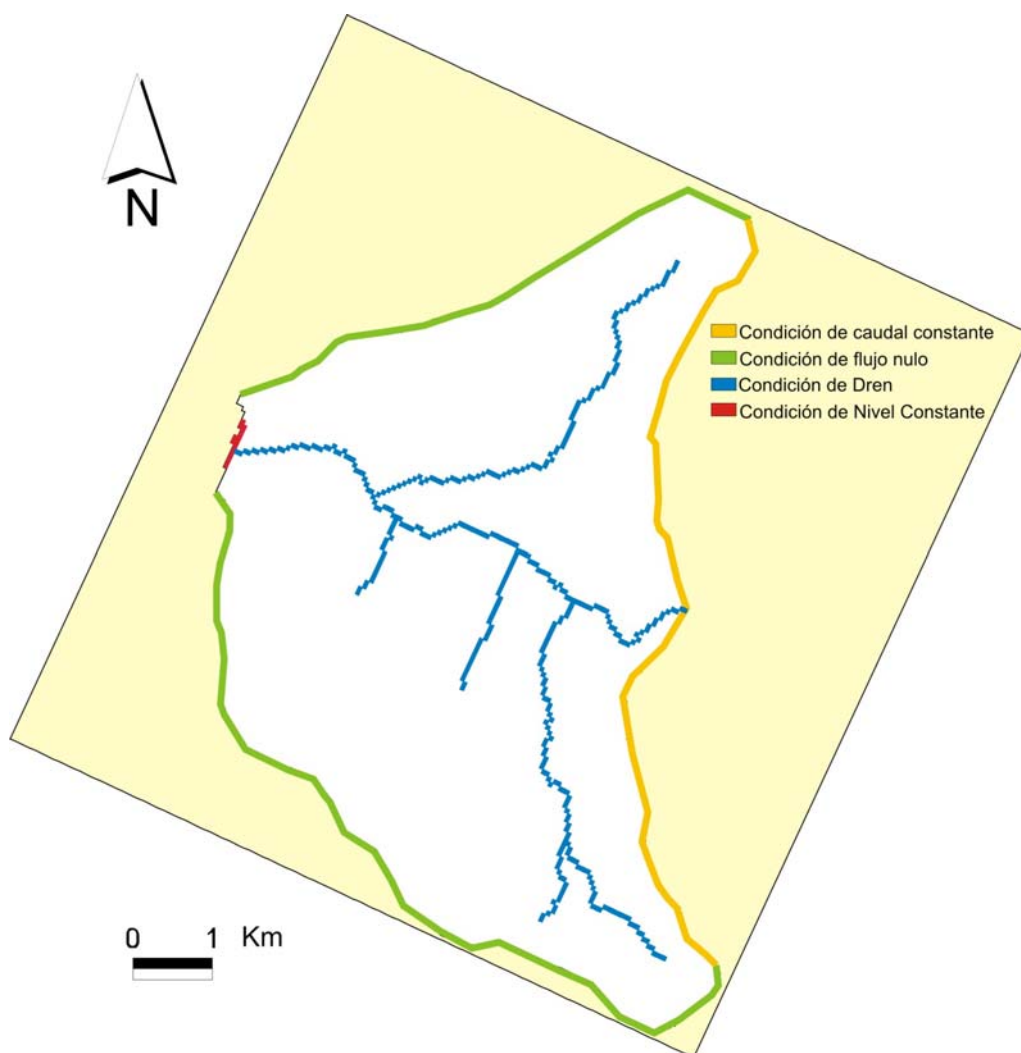


Figura 4.1. Localización de las diferentes condiciones de contornos en la zona de estudio. Distribución espacial del dren en el aluvial principal y los barrancos secundarios del Furel y Tocodomán y otros barrancos secundarios de menor entidad y la condición de nivel constante en la línea de costa, de flujo nulo en el norte y sur y caudal fijo en el este.

Para la discretización se utilizó como soporte un Modelo Digital del Terreno resultante de interpolar mediante kriging binario con un modelo teórico lineal e isótropo sobre la base de la cartografía 1:5000 (GRAFCAN, 1998) con una malla de 25 x 25 m.

La discretización horizontal de la zona de estudio se ha realizado mediante una malla constituida por celdas rectangulares, orientadas en el sentido principal del flujo de las aguas subterráneas, para esto la zona de estudio tuvo que ser girada 25° hacia el sur. Modflow trabaja con una interpolación centrada en cada bloque o celda y para que cada celda únicamente tuviera un punto de observación la discretización horizontal fue refinada en la zona del aluvial principal, donde se sitúa la mayor densidad de puntos de agua. Por otro lado, la orografía de la zona que, con sus grandes pendientes en los bordes norte y sur induce un alto gradiente hidráulico, obligó igualmente a refinar la discretización en esa zona para evitar una desconexión geométrica entre celdas contiguas. Por todo ello, se optó por una discretización homogénea de 50 x 50 m sin ningún refinamiento sectorial. La Figura 4.2 muestra la alineación de los vértices del modelo, aunque no se han representado las celdas debido a que su pequeño tamaño impide que puedan ser visualizadas a esta escala.

Como ya se ha indicado, el cálculo de la base del acuífero se ha realizado a partir de los datos del sondeo 0090BSI, y se ha localizado a 163 m de profundidad (cota -143 m.s.n.m.) con una pendiente de los Basaltos Miocenos que oscila entre 3° y 5° (Barrera y Gómez, 1990). La superficie resultante varía entre las cotas de -143 m en la costa y los 350 m al este de la zona de estudio.

La discretización vertical en tres capas se realizó inicialmente procurando atender de la forma más fidedigna a consideraciones geológicas. Así, al definir el espesor de la capa superior, conformada por el aluvial, Las Tabladas, los derrubios de ladera y los basaltos más alterados, se tuvo en cuenta las columnas geológicas de algunos pozos, los datos de sismica en la zona de los basaltos y los descensos máximos medidos en los pozos de observación situados en la zona de estudio. Sin embargo, las grandes pendientes topográficas en los límites norte y sur del dominio del modelo contribuían a problemas de estabilidad numérica debido a los fuertes gradientes existentes entre celdas contiguas. Asimismo, estos grandes gradientes piezométricos inducían al secado de un número suficiente de celdas que impedían la resolución del sistema de ecuaciones. Ambas dificultades se solventaron con una discretización espacial adecuada. Esta discretización espacial se caracteriza por una partición vertical homogénea para las tres capas, correspondiendo un espesor de 1/3 del espesor total a cada una de las celdas (Figura 4.2). Esta partición final supone que la capa 1 estaría formada por el aluvial, Las Tabladas, los derrubios de ladera, los Basaltos Miocenos muy alterados y los Basaltos Miocenos alterados infrayacentes inmediatos a estas litologías, y su espesor variaría desde los 50 m en la zona del aluvial (de los cuales como máximo 30 m son de aluvial) y los 550 m en las zonas montañosas. Las capas 2 y 3 estarían conformadas por los Basaltos Miocenos alterados. Y si bien, con esta discretización continúan secándose algunas celdas de la capa superior en las zonas montañosas, se desconoce si las mismas debieran estar secas o no debido a la falta de información piezométrica en este sector.

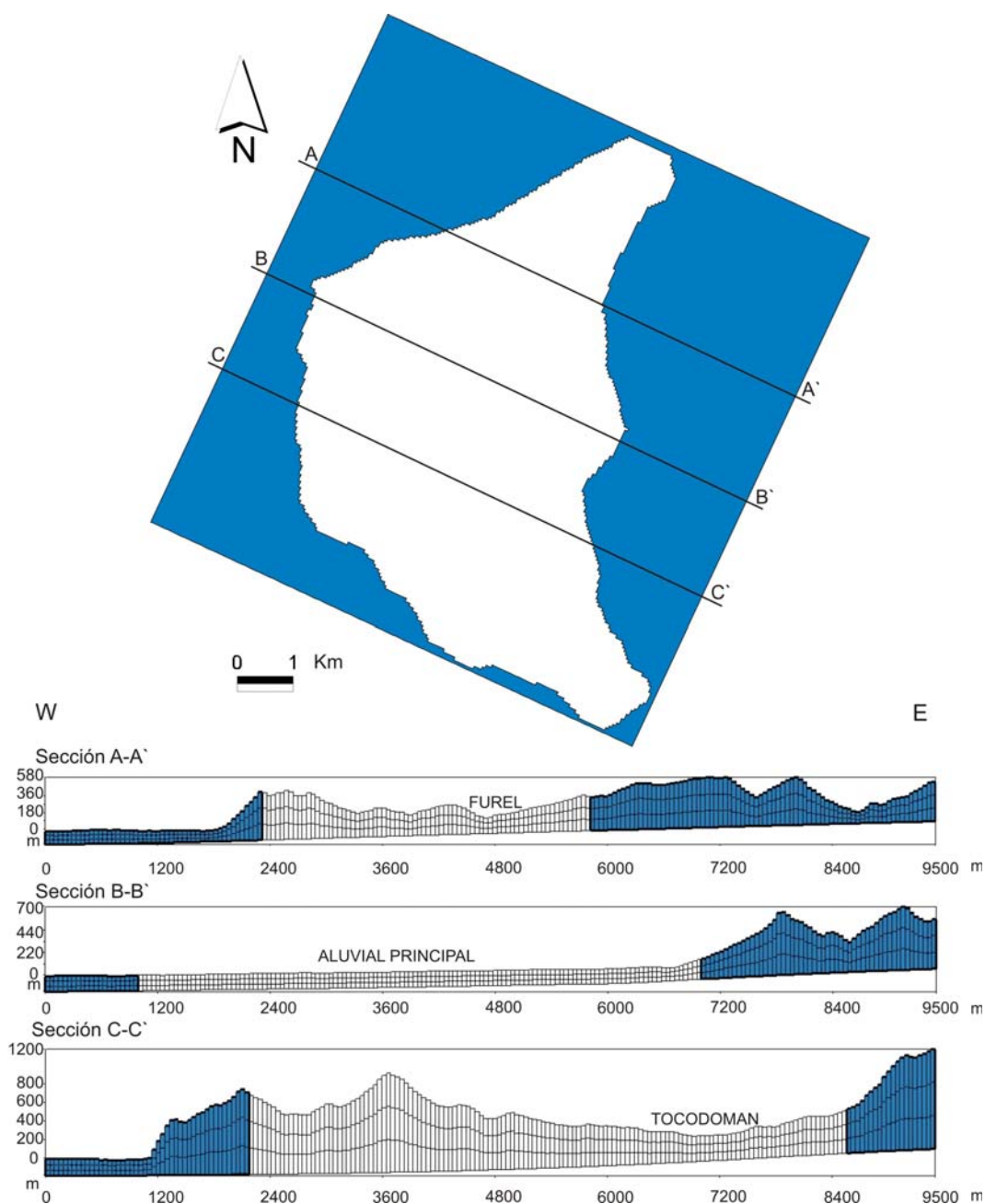


Figura 4.2. Mapa de la zona de estudio con la situación y cortes en los que se muestran la geometría de las distintas capas que se proponen en el modelo.

En la Figura 4.2 también se puede observar cómo afecta este criterio de discretización a la distribución vertical de las distintas capas del modelo. La sección A-A' realiza un corte a distintos barrancos secundarios, incluido el barranco del Furel donde se observa una disminución del espesor. La sección B-B' está realizada a través del aluvial principal donde el espesor medio es de 50 m y la superficie es básicamente plana. En la sección C-C' se observan los mayores espesores en las distintas capas y una orografía más abrupta que en la zona del aluvial principal y la del Furel. La zona de color azul que rodea el área de estudio en la discretización horizontal y en la vertical

corresponde al conjunto de las celdas inactivas que delimitan el contorno de la superficie del área a modelar.

4.4.- DATOS PIEZOMÉTRICOS Y DE BOMBEO

Uno de los primeros condicionantes para la realización de un modelo es la disponibilidad de datos adecuados, en número y calidad. Los datos necesarios para su realización se extiende desde parámetros que caracterizan física e hidrogeológicamente al sistema (geometría, características hidrogeológicas, permeabilidades, coeficientes de almacenamiento,...) hasta datos sobre las acciones externas a las que está sometido (explotación, recarga,...) y a la propia evolución temporal de las variables del sistema (niveles piezométricos, concentración de soluto,...).

Los puntos de observación usados para el ajuste y calibración del modelo se han obtenido de la base de datos de La Aldea, seleccionando aquellos pozos con nivel estático en los meses de junio y julio de 1992 para el régimen estacionario, obteniéndose 197 puntos de observación (Figura 4.3), y los que tienen más de 3 datos de nivel estático desde 1992 a 1999 para el modelo transitorio, obteniéndose 32 puntos de observación (Figura 4.4). La extensión de las series piezométricas de los puntos de observación difieren notablemente entre sí, la serie más extensa posee 11 datos distribuidos en los 7 años de estudio, con intervalos de medidas irregulares.

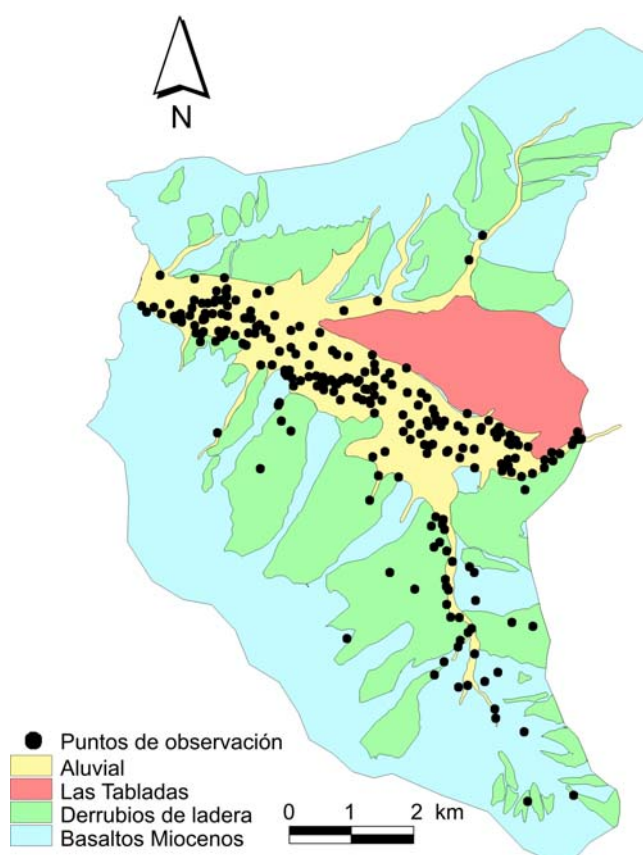


Figura 4.3. Localización de los puntos de observación para la calibración del modelo en régimen estacionario.

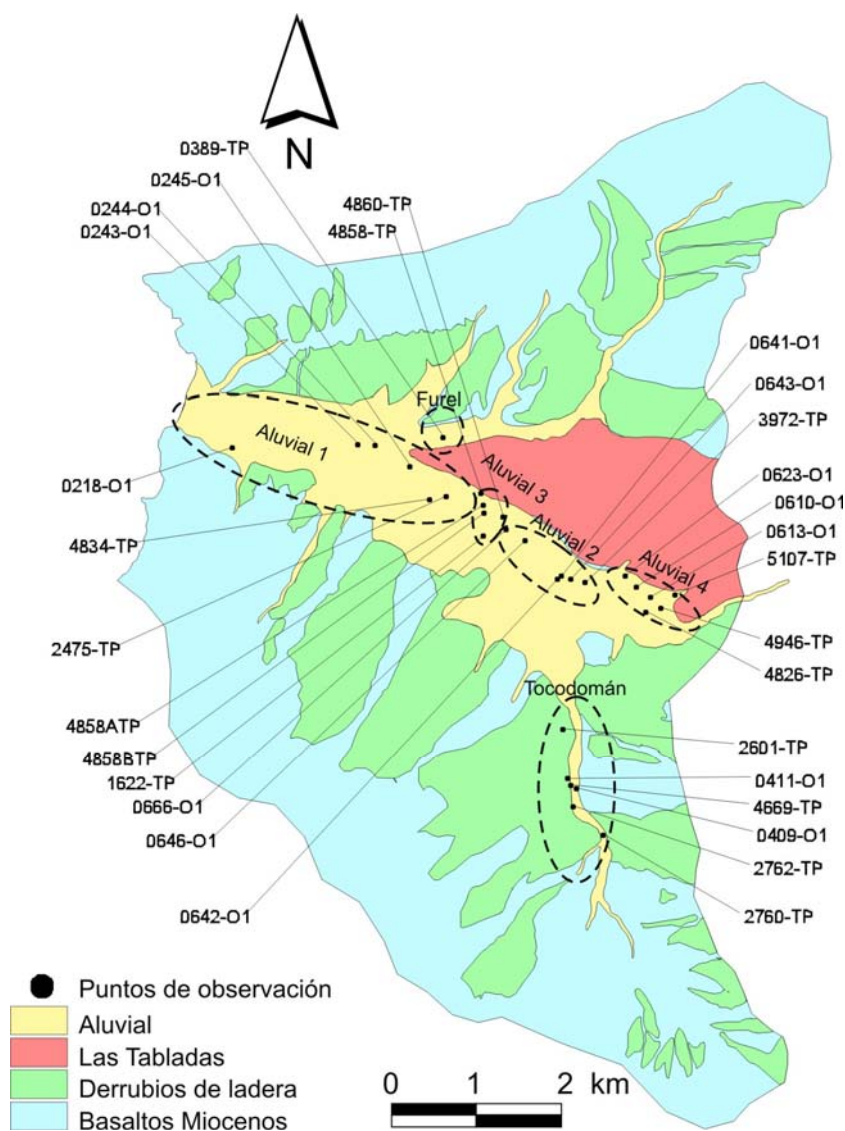


Figura 4.4. Localización de los puntos de observación para la calibración del modelo en régimen transitorio zonificado para la representación de la evolución temporal de la piezometría.

Los pozos de observación para el modelo en régimen estacionario están distribuidos en toda el área y aunque el mayor número se localiza en el aluvial principal y en Tocomodán, también se han seleccionado puntos en los basaltos y los derrubios de ladera. Esta distribución de la información piezométrica le confiere consistencia a la calibración de las permeabilidades de todas las unidades hidrogeológicas. Sin embargo, para el modelo en régimen transitorio, los pozos de observación se localizan únicamente en el aluvial principal y en Tocomodán, esta distribución de la información piezométrica no permite una calibración consistente de los parámetros hidrogeológicos de los derrubios de ladera y los aluviales de los barrancos secundarios menores. Ello se hizo evidente en el análisis de sensibilidad correspondiente.

Hay que destacar que el nivel piezométrico tomado en un pozo, por superposición de efectos representa un sumatorio de las "situaciones" de los pozos vecinos ya que los radio de influencia en la zona han sido estimados para el aluvial de más de 180 m para un día de bombeo y

de 55 m para los basaltos (Muñoz, 2005) y las captaciones en la zona están muy próximas entre sí. Así, es de esperar que los niveles estáticos medidos en pozos sin bombeo estén influenciados por el bombeo de pozos vecinos.

Se ha asignado un pozo de inyección en la cabecera del barranco para simular la entrada de agua por la cabecera. También se han asignado pozos de bombeo para representar las extracciones. Los datos de extracción han sido obtenidos a partir de las comunicaciones orales de los usuarios de los pozos en las distintas campañas de campo y redes de control realizadas completándose para todo el período a modelar al igual que la información piezométrica. En la Figura 4.5 se puede observar la distribución espacial de los pozos de bombeo para el modelo de flujo en régimen estacionario y transitorio, la mayoría de los pozos de bombeo están localizados en el aluvial principal y en el barranco secundario de Tocodomán. En la Tabla A.12 del Anejo 4 se recogen en forma de tabla los valores de explotación para los distintos pozos tanto en el modelo en régimen estacionario como en el régimen transitorio.

Los pozos de explotación y observación son pozos de gran diámetro (2.5 y 3 m) con profundidades que oscilan entre los 5 y 55 m, con una profundidad media de 28 m y están ubicados en la capa 1.

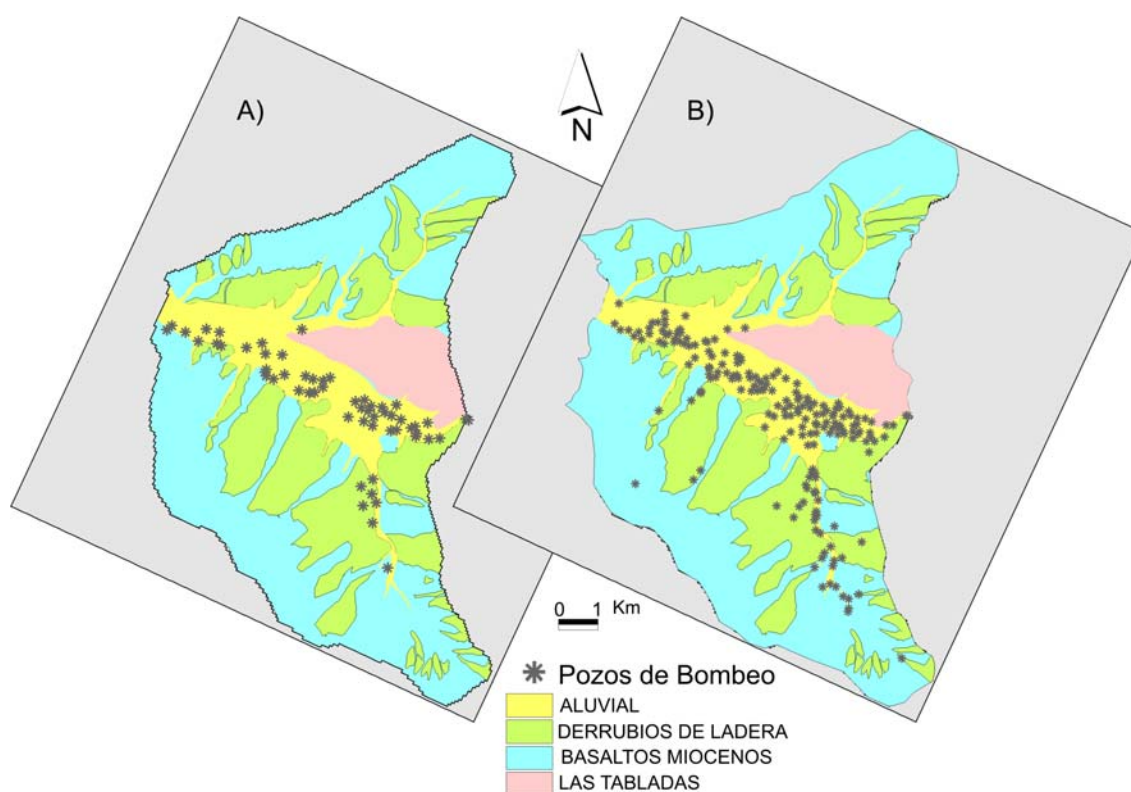


Figura 4.5. Localización de los pozos de bombeo para la calibración del modelo en régimen A) estacionario y B) transitorio.

4.5.- INFORMACIÓN PREVIA DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Los valores de los parámetros hidráulicos usados como información previa y los distintos rangos de valores para las unidades hidrogeológicas son los recogidos en el apartado 3.3.1. La conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento se han zonificado basándose en criterios geológicos como litología, grado de alteración y el ordenamiento granulométrico de los depósitos de las distintas unidades geológicas.

4.6.- INFORMACIÓN DE LA RECARGA

La recarga está originada por la infiltración directa del agua de lluvia, los retornos de riego, la entrada desde la zona intra-caldera y la red de abastecimiento. Estas han sido tratadas conjuntamente en el modelo y se han aplicado en las celdas superiores de la malla. La recarga ha sido distribuida en 13 áreas atendiendo al origen de la misma. La distribución espacial se ha llevado a cabo mediante la utilización de un Sistema de Información Geográfica que ha permitido ir integrando las distintas recargas en cada zona (Figura 4.6).

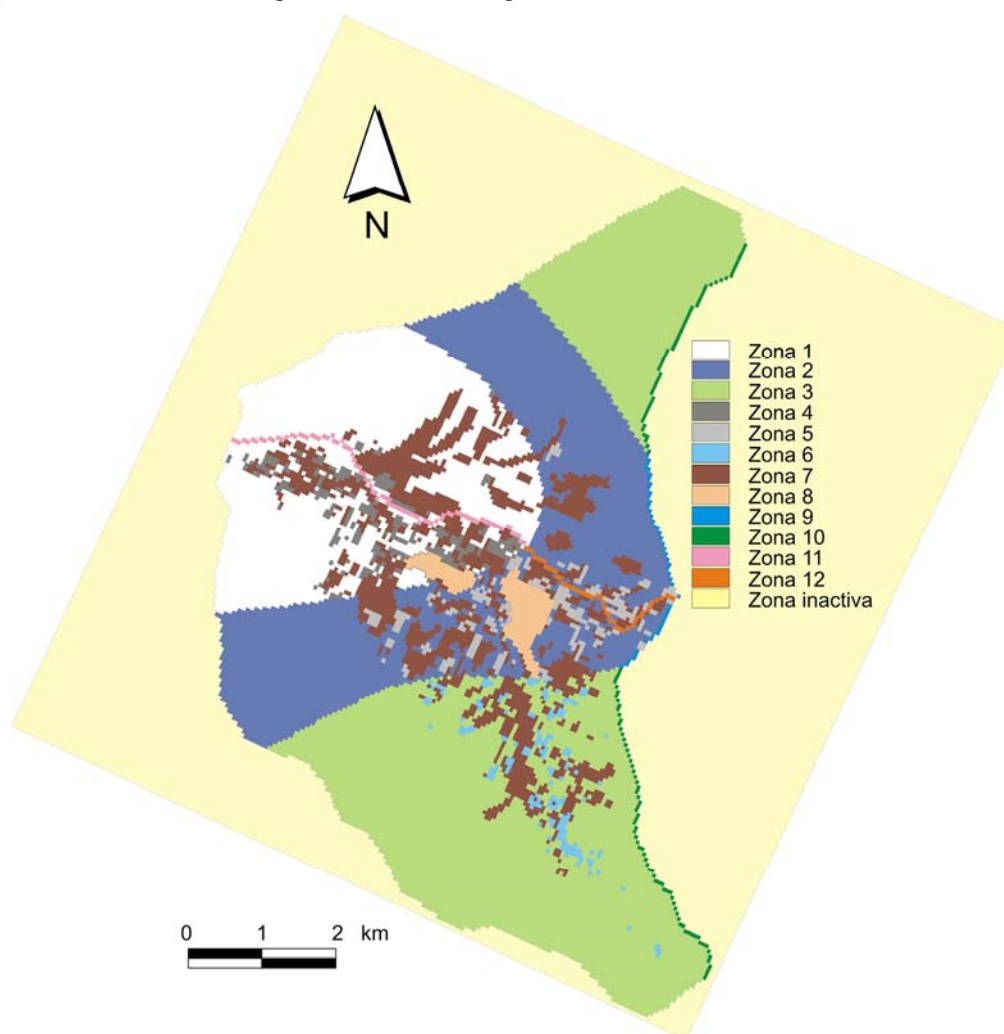


Figura 4.6. *Distribución espacial de la recarga para el modelo de flujo en régimen estacionario y transitorio.*

La recarga en las zonas 1, 2 y 3 son las producidas por la lluvia dependiendo de la altura y distribución de las isoyetas como se expone en capítulos anteriores. La recarga en las zonas 4, 5 y 6 es la suma de los retornos de riego en los cultivos fuera de invernadero más la recarga de la lluvia correspondiente en cada área. La recarga en la zona 7 es la producida por los retornos de riego en las zonas de cultivo con invernadero, cuya distribución superficial se corresponde con la situación de los mismos según la cartografía 1:5.000 de GRAFCAN (1998), al igual que la distribución de las zonas urbanizadas y los cultivos sin invernadero. La recarga en la zona 8 viene producida por las pérdidas en la red de abastecimiento y ocupa el área urbanizada. Las recargas en las zonas 9 y 10 representan las entradas desde la zona intra-caldera más la lluvia para las dos áreas afectadas. Por último, las recargas en las zonas 11 y 12 proceden de la escorrentía más el agua de lluvia para las áreas 1 y 2.

Los datos de recarga introducidos para el modelo estacionario se muestran en la Tabla 4.1 donde también se muestra el tipo de recarga y el área que ocupa. La evolución temporal de la recarga para el modelo en régimen transitorio se puede observar en la Figura 4.7 y los datos se recogen en la Tabla A.9 del Anejo 4. Los valores de recarga mayores corresponden a los retornos de riego en las zonas 4, 5 y 6. Los picos en todas las zona son producidos por la recarga de la lluvia. Se observa la estacionalidad de los retornos de riego y su disminución de caudal a partir de 1995.

Tabla 4.1. *Recarga introducida en el modelo de flujo en régimen estacionario calculadas a partir del balance hídrico para 1991/92. También se muestra el tipo de recarga y el área que ocupa. Las zonificación coincide con la mostrada en la Figura 4.6.*

ZONA	TIPO	SUPERFICIE (Ha)	RECARGA (mm/año)
1	Precipitación área 1	831.25	11
2	Precipitación área 2	969.5	5.7
3	Precipitación área 3	1579.5	16.2
4	Precipitación área 1 + retornos de riego	76.75	387
5	Precipitación área 2 + retornos de riego	75	381.7
6	Precipitación área 3 + retornos de riego	45.25	392.2
7	Invernadero	548.5	376
8	Abastecimiento	72.5	86
9	Precipitación área 2 + intra-caldera	11.5	55.7
10	Precipitación área 3 + intra-caldera	32.5	66.2
11	Precipitación área 1 + escorrentía	30.2	1.1
12	Precipitación área 2 + escorrentía	18.2	1.81

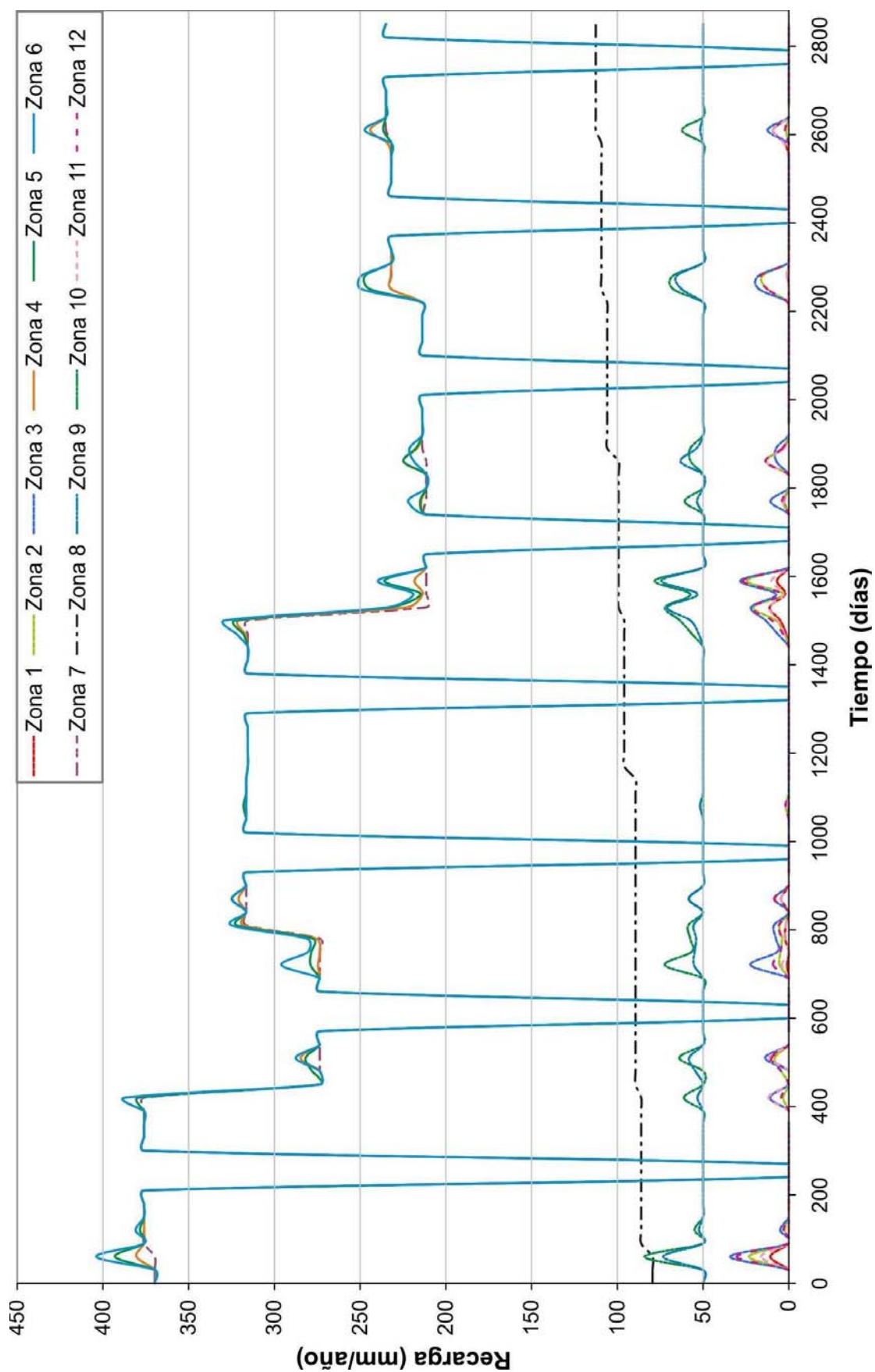


Figura 4.7. Evolución temporal de la recarga para el modelo en régimen transitorio. Las zonificación coincide con la mostrada en la Figura 4.6.

4.7.- SIMULACIÓN DEL FLUJO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO

El sistema se calibró en régimen estacionario para un mejor conocimiento de las características hidrogeológicas del terreno y para disponer de una piezometría inicial para el modelo en régimen transitorio. Los parámetros calibrados fueron las conductividades hidráulicas.

4.7.1.- Ajuste, Calibración y Análisis de Sensibilidad

La calibración es sin duda la etapa más crítica del proceso de modelación, debido tanto a los diferentes objetivos que puede tener un modelo, y a los diferentes escenarios en que ésta puede desarrollarse. La bondad de la calibración se evaluó mediante distintos estadísticos (máximo residual, media de los valores absolutos y la desviación estándar) sobre el conjunto de los residuos de niveles (esto es, la diferencia entre los niveles calculados y observados) y la consistencia del balance hídrico del sistema. La media de los valores absolutos da la bondad del ajuste del conjunto de los datos y la desviación estándar también permite valorar el ajuste del conjunto de los datos pero da más peso a los residuos mayores. Se debe observar que minimizar la desviación estándar en términos de optimización implica un ajuste por mínimos cuadrados.

En el proceso de calibración se adoptaron como datos observados los niveles piezométricos medidos en la campaña de junio y julio de 1992. Se procuró ajustar la piezometría calculada respecto a la observada o, lo que es lo mismo, minimizar los residuos de niveles (diferencia entre los niveles calculados y observados). Los parámetros del modelo susceptibles de calibración fueron las permeabilidades hidráulicas. Sin embargo, el proceso mismo de calibración obligó a sucesivas modificaciones del modelo conceptual del sistema al poner en evidencia las inconsistencias de las distintas conceptualizaciones. Ello llevó a que se fuesen revisando la caracterización del sistema, tanto por reinterpretación de la información existente como por la existencia de nuevas evidencias de campo. El resultado de este proceso de reconceptualización fue que variara el número de zonas y la geometría de las mismas en la zonificación de las permeabilidades del modelo.

Se comenzó con 3 zonas de conductividad hidráulica: aluvial, basaltos y Las Tabladas. Sin embargo durante el proceso de modelación se puso en evidencia la importancia hidrogeológica de dos nuevas zonas: los derrubios de ladera, que aunque sí estaban cartografiados en la geología, hidrogeológicamente no se les consideraba relevantes, y los barrancos secundarios menos importantes que Tocomán y Furel, que confluían en éstos y en el barranco principal. Estos barrancos secundarios menores han sido cartografiados mediante foto aérea y en campo, y si bien se desconoce su espesor, se los supone menor que el espesor del aluvial principal. El espesor de los derrubios de ladera ha sido observado en algunos cortes, midiéndose espesores desde los 5 a los 20 m.

Una vez obtenida una zonificación consistente para la permeabilidad, se realizó la calibración manual del modelo mediante un proceso iterativo de prueba y error. El ajuste entre los

niveles calculados y observados en algunos pozos presentó ciertas dificultades durante el proceso de calibración debido a que o bien eran a la vez pozos de bombeo y observación o se encontraban influenciados por alguna de las condiciones de contorno propuestas. Debido a ello, los residuos de niveles obtenidos en estos pozos se ponderaron cuantitativamente con un peso menor al de los residuos de los restantes pozos, al valorar los sucesivos ajustes resultantes durante el proceso de calibración.

El ajuste de los niveles observados y los calculados para la calibración del modelo se expone en la Figura 4.8. El número de puntos empleados para la calibración es de 197. El coeficiente de correlación es prácticamente 1. La media de los valores absolutos, que da una idea de la bondad del conjunto de los residuos, es 2.2m. La desviación estándar, una medida de la dispersión de los valores calculados con relación a los valores observados, es 3 m, este valor se puede considerar satisfactorio teniendo en cuenta el rango de los niveles. El residuo máximo, punto que presenta mayor diferencia entre el valor estimado y el observado, es 10.5 m y se localiza en un barranco secundario del barranco de Tocodomán. Para la zona del aluvial principal, la desviación estándar es 2.2 m, este valor es inferior al valor general y se puede considerar satisfactorio. La media de los valores absolutos es 1.7 m. El residuo máximo es 7 m y se localiza en la zona donde se abre la cabecera del aluvial principal.

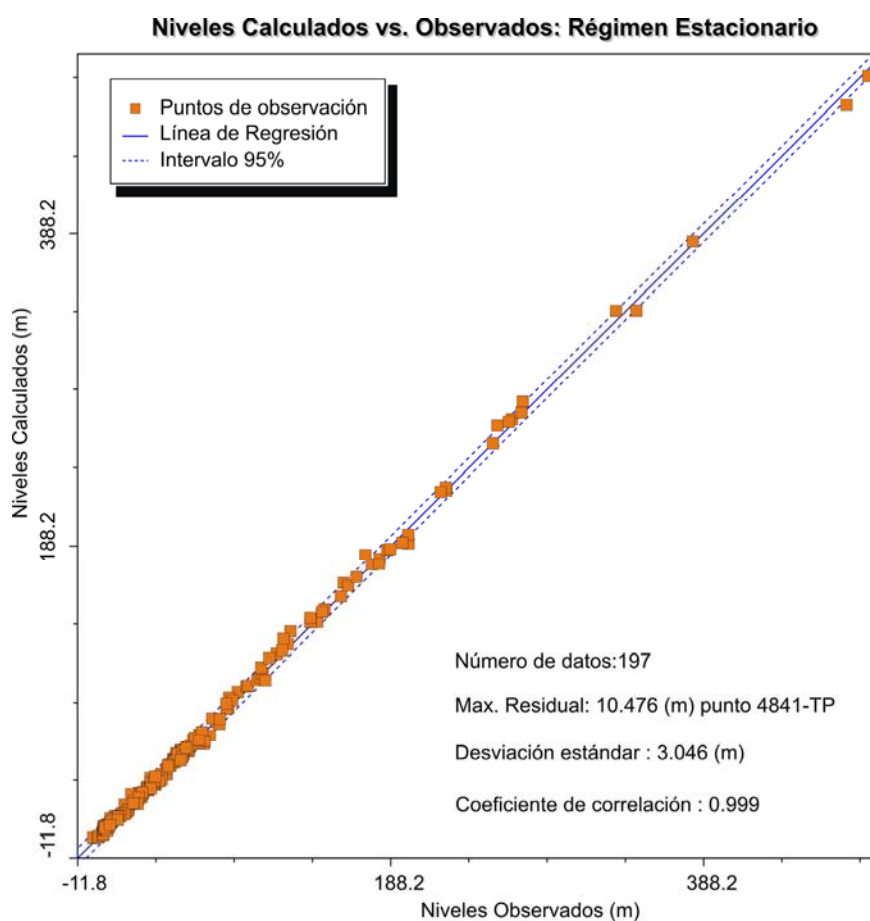


Figura 4.8. Niveles piezométricos observados frente a niveles piezométricos calculados por el modelo en régimen estacionario.

Como es de esperar, los mayores niveles calculados se observan en los pozos localizados en los barrancos secundarios del Furel y Tocodomán. En la zona del aluvial principal los niveles se sitúan entre 0 y 100 m.s.n.m. Los mayores errores se localizan en los pozos ubicados en las zonas de contacto entre dos conductividades hidráulicas diferentes, en Tocodomán y donde se abre la cabecera del aluvial principal, como se ha comentado con anterioridad. En esta última zona, los residuos de niveles parecían sugerir la existencia de una barrera de baja permeabilidad dado que los niveles observados eran superiores a los calculados. Debido a ello se llevó a cabo una campaña de geofísica, consistente en varios perfiles de SEV (Sondeos Eléctricos Verticales) en la que no se apreció la posible barrera, ni se identificó ninguna otra particularidad del sistema que justificase la creación de una nueva zona de permeabilidad en este sector.

El modelo evidenció que si se consideraba una cierta recarga desde la zona de intracaldera, hipótesis plausible desde el punto de vista conceptual, se obtenía una marcada mejoría en el ajuste entre los niveles simulados y los observados, aún cuando, no había sido considerado en los modelos conceptuales planteados hasta el momento (SPA-15, 1975; Muñoz, 2005).

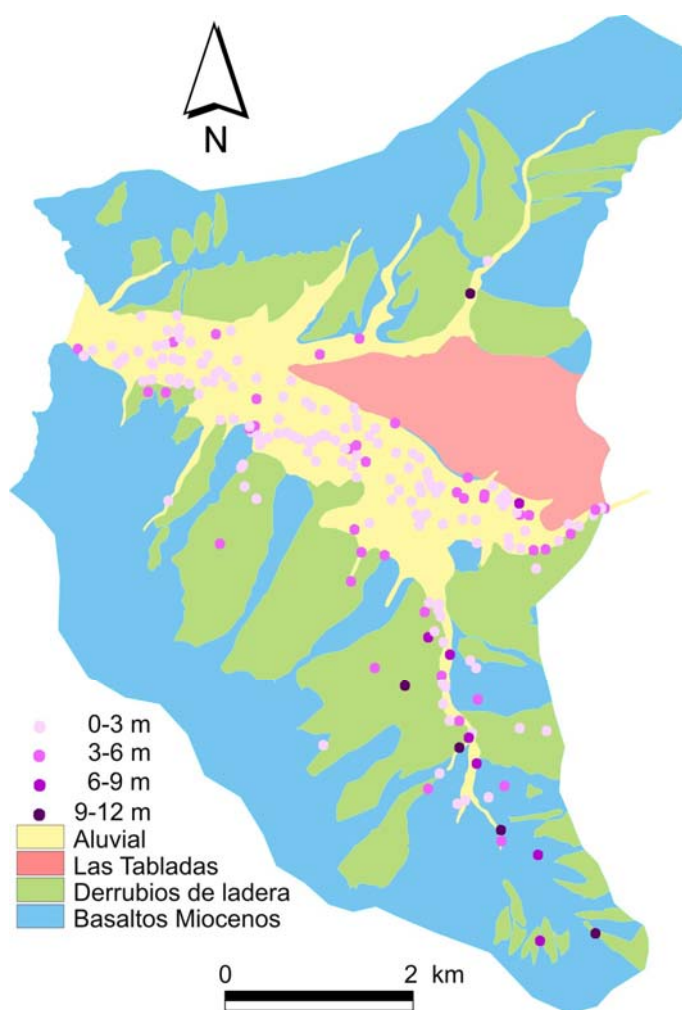


Figura 4.9. Distribución espacial de los residuos obtenidos en el modelo estacionario en los distintos puntos de observación.

4.7.2.- Parámetros Hidráulicos

En la calibración de las permeabilidades se partió de 3 zonas que representaban el aluvial, los basaltos y Las Tabladas, obteniéndose finalmente a partir de la calibración 10 zonas de las cuales 9 están ubicadas en la capa superior del modelo (Figura 4.10) debido a su heterogeneidad litológica y a que los puntos de observación se concentran en ésta.

El aluvial principal se localiza en el centro de la zona de estudio y ha sido a su vez dividido en 3 zonas con distinta permeabilidad: desembocadura, centro y cabecera. Debe observarse que aunque la permeabilidad de una capa es independiente del espesor de esta por la propia definición de permeabilidad, en el caso de la capa 1, al estar esta conformada por el aluvial y los Basaltos Miocenos ubicados debajo del aluvial, y la permeabilidad final de la capa en las distintas zona va a ser una media ponderada entre la permeabilidad del aluvial y la permeabilidad de los basaltos donde los coeficientes de ponderación va a ser los espesores del aluvial y los basaltos respectivamente. Por otro lado, la permeabilidad está vinculada al ordenamiento granulométrico del aluvial donde se produce una selección ordenada donde el material más grueso y más permeable se localiza en la cabecera y el más fino y menos permeable en la desembocadura. Las Tabladas separa los barrancos de La Aldea y el Furel y se representa por una única zona de permeabilidad. El barranco secundario del Furel está representado por una zona de permeabilidad y en él desembocan pequeños barrancos al igual que sobre el barranco secundario de Tocodomán y sobre el barranco principal. Por último, los derrubios de ladera se distribuyen sobre los Basaltos Miocenos más superficiales y se localizan en la zona norte y sur de la zona de estudio. Suelen tener un comportamiento homogéneo exceptuando una zona al sur de la zona de estudio, por lo que está representado por 2 zonas de permeabilidad. Parte de la capa superior, todas las capas intermedia e inferior está formada por Basaltos Miocenos y están representadas por una zona de permeabilidad homogénea.

Se debe recordar que se ha realizado una distribución homogénea de las 3 capas en la discretización vertical correspondiéndole a cada capa un tercio del espesor total representado. Las capas 2 y 3 están formadas por los Basaltos Miocenos alterados y la capa 1 está formada por el aluvial, Las Tabladas, los Basaltos Miocenos muy alterados y los Basaltos Miocenos alterados que varían su espesor dependiendo del espesor del aluvial y los derrubios de ladera.

La anisotropía vertical de la permeabilidad (k_v/k_h) adoptada en el modelo para las capas conformadas únicamente de material basáltico es de 100 como se ha identificado según la bibliografía (INTECSA, 1981). En la bibliografía no se especifica la anisotropía de la permeabilidad del material aluvial, si bien se considera que debe ser menor que la de los basaltos se ha asumido una anisotropía vertical igual a la de éstos ya que forman una parte importante de la capa 1.

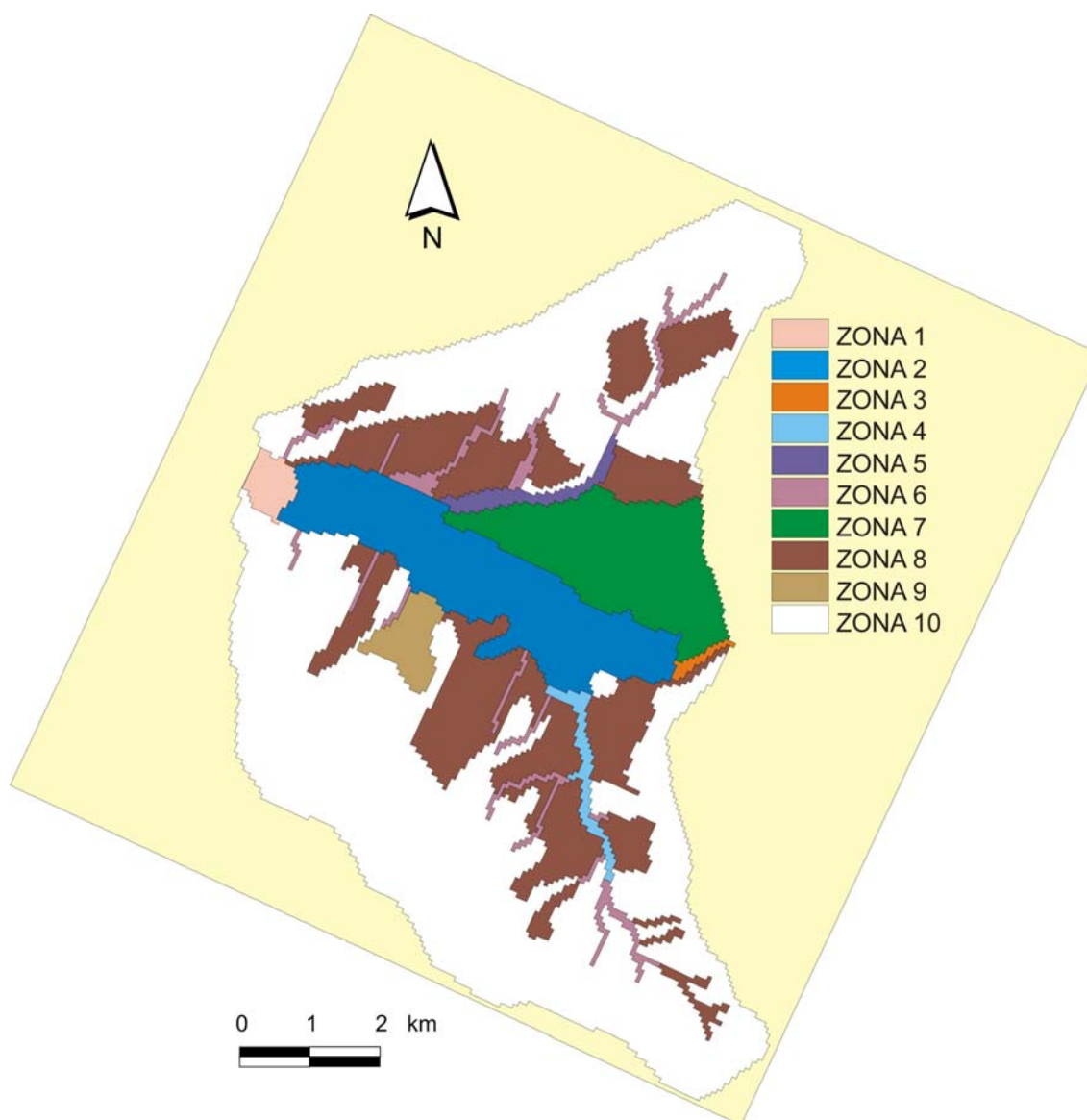


Figura 4.10. *Distribución espacial de las zonas de conductividad hidráulica para la capa superficial del modelo en régimen estacionario.*

Los valores de permeabilidad obtenidos para las distintas zonas establecidas en el modelo (Zonas 1-10 de la Figura 4.10) y para las distintas unidades hidrogeológicas se recogen en la Tabla 4.2. La permeabilidad resultante para el aluvial principal en su zona central es de 17 m/d, alcanzando 38 m/d y 67 m/d en la desembocadura y cabecera, respectivamente. Las permeabilidades resultantes varían entre 9 y 22 m/d para los aluviales de los barrancos de Furel y Tocodomán, correspondiendo a este último los valores mayores. Los aluviales de los restantes barrancos secundarios tienen una permeabilidad de 5.5 m/d. La permeabilidad de los Basaltos Miocenos es de 0.0009 m/d y varía entre 0.4-1.2 m/d para los derrubios de ladera. Estas permeabilidades para las distintas unidades hidrogeológicas se han calculado a partir de las obtenidas para la capa del modelo en cada zona, utilizando la potencia conocida de los diferentes materiales geológicos.

Tabla 4.2. Conductividades hidráulicas para las distintas zonas obtenidas de la calibración del modelo en régimen estacionario.

Zona	Espesor medio de la capa (m)	Kh	Kv	Kz	Espesor saturado medio aluvial y derrubios (m)	Espesor medio basaltos (m)	Kh aluvial y derrubios (m/d)	Kh Basaltos (m/d)
1	45	17	17	0.17	20	25	38	0.0009
2	40	6.3	6.3	0.063	15	25	17	0.0009
3	40	25	25	0.25	12	25	67	0.0009
4	65	3.4	3.4	0.034	10	55	22	0.0009
5	40	2.2	2.2	0.022	10	30	9	0.0009
6	70	0.4	0.4	0.0004	5	65	5.5	0.0009
7		0.009	0.009	0.000009				
8	80	0.025	0.025	0.00025	5	75	0.4	0.0009
9	60	0.1	0.1	0.001	5	55	1.2	0.0009
10		0.0009	0.0009	0.000009				

Según Anderson y Woessner (2002) el modelo calibrado está influenciado por la incertidumbre correspondientes a la incapacidad de poder definir la distribución exacta, tanto espacial como temporal, de los valores de los parámetros hidráulicos en el dominio. También existen incertidumbres en la definición de las condiciones de contorno. Por esto, debe llevarse a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar la incertidumbre en el modelo calibrado.

En este apartado se ha realizado un análisis de sensibilidad de los parámetros que han sido ajustados en el modelo en régimen estacionario. Para ello se ha realizado un estudio sistemático que consiste en que en cada simulación se ha variado un único parámetro de conductividad hidráulica, que son los parámetros calibrados, dejando fijos todos los demás. Los parámetros se han variado en un porcentaje fijo, multiplicándose y dividiéndose por 2 el valor de cada parámetro en cada simulación. De este modo se puede comparar directamente la incidencia sobre el modelo de los cambios impuestos a los distintos parámetros, identificando aquellos para los cuales el modelo es más sensible. Esta comparación se ha realizado con el resultado del mejor ajuste obtenido en el proceso de calibración del modelo y se ha denominado "Inicio". Estrictamente la sensibilidad del modelo se evalúa en los puntos de observación.

El análisis de sensibilidad (Tabla 4.3) indica que el modelo es muy sensible a la variación de la conductividad hidráulica en todas las zonas, excepto para Las Tabladas (zona 7), donde no hay puntos de observación, el barranco de Furel (zona 5), donde los puntos de observación son escasos y la desembocadura del aluvial (zona 1) donde los pozos se ven afectados por la condición de contorno de nivel prefijado impuesta. Principalmente es sensible a las variaciones de los basaltos, el aluvial principal y Tocodomán, que son las zonas donde más puntos de observación hay localizados.

Tabla 4.3. Resultados del análisis de sensibilidad para los parámetros calibrados en el modelo de flujo en régimen estacionario.

	Doble de K			Mitad de K		
	Residuo máximo	Media de los valores absolutos	Desviación estándar	Residuo máximo	Media de los valores absolutos	Desviación estándar
INICIO (I)	10.5	2.2	3.0	10.5	2.2	3.0
ZONA 1	10.5	2.2	3.1	10.5	2.5	3.3
ZONA 2	-22.1	7.0	8.9	11.4	4.0	5.1
ZONA 3	10.5	2.8	3.5	-14.3	4.0	4.9
ZONA 4	-31.9	3.9	6.8	12.9	3.8	4.6
ZONA 5	-24.4	2.4	3.6	10.5	2.3	3.1
ZONA 6	-26.8	2.8	4.5	21.6	2.8	4.3
ZONA 7	-11.5	2.3	3.2	10.5	2.2	3.1
ZONA 8	-24.9	2.9	4.8	40.2	3.6	6.8
ZONA 9	-12.2	2.4	3.4	22.4	2.5	3.6
ZONA 10	-69.0	3.6	8.5	116.4	4.4	13.1

4.7.3.- Balance de Masas

Los balances de masas son una herramienta muy útil en la modelación del flujo subterráneo. Por un lado, proporcionan una medida de la importancia relativa de cada componente en el balance total. Por otro lado es una manera de medir la precisión del modelo mediante la comprobación del principio de conservación de la masa, de forma que los errores del balance de masas en los modelos de flujo deban ser en general inferiores al 0.1% (Konikow, 2002); así como, comparando los flujos de cada componente de balance introducidas en el modelo con los datos de campo en la zona de estudio.

El resultado del balance viene principalmente condicionado por los datos introducidos en la recarga, de forma que el error obtenido en el calculo es 0.07%. El balance hídrico obtenido (Figura 4.11) indica que las entradas de agua al sistema se producen por la recarga por precipitación, retornos de riego y aportes desde la zona intra-caldera, que aporta 3.32 hm³/a, y por la cabecera del aluvial principal con 0.40 hm³/a, siendo las entradas totales 3.72 hm³/a. Las salidas al mar de aguas subterráneas son de 0.87 hm³/a y por los pozos sale 2.8 hm³/a, por lo que las salidas totales 3.71 hm³/a. El balance hídrico se ajusta a los resultados mostrados en el modelo conceptual dando consistencia al modelo.

Se realizaron balances hídricos en áreas específicas en las que calcularon las entradas y las salidas. En la Figura 4.12 se representan los volúmenes de flujo para la capa superior (capa 1) en varias zonas diferenciadas: Tocodomán, Furel y aluvial principal y el aporte de los basaltos, derrubios y aluviales secundarios de menor entidad a los aluviales. Los resultados del cálculo del balance están representados por los caudales de flujo entre zonas en hm³/año. Se observa que el aporte de los basaltos, aluviales secundarios de menor entidad y los derrubios de ladera al aluvial

(principal y secundarios principales) es de $2.14 \text{ hm}^3/\text{año}$ aportando $1 \text{ hm}^3/\text{año}$ al aluvial principal y $0.81 \text{ hm}^3/\text{año}$ y $0.33 \text{ hm}^3/\text{año}$ a los aluviales secundarios de Tocodomán y Furel respectivamente. El barranco de Tocodomán aporta al Aluvial principal $0.65 \text{ hm}^3/\text{año}$ y Furel $0.30 \text{ hm}^3/\text{año}$. Con estos datos se comprueba que el aporte de los derrubios de ladera y aluviales secundarios de menor entidad al aluvial principal llegan a superar el aporte de Furel y Tocodomán juntos, además se debe destacar que gran parte del aporte a los aluviales secundarios Furel y Tocodomán proviene a su vez de los derrubios y aluviales secundarios de menor entidad que les rodea, lo que queda patente la importancia de los derrubios y aluviales secundarios de menor entidad en el flujo del agua subterránea.

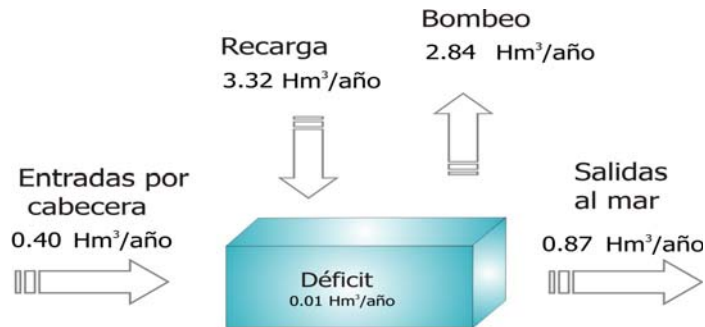


Figura 4.11. Balance hídrico para el modelo de flujo en régimen estacionario.

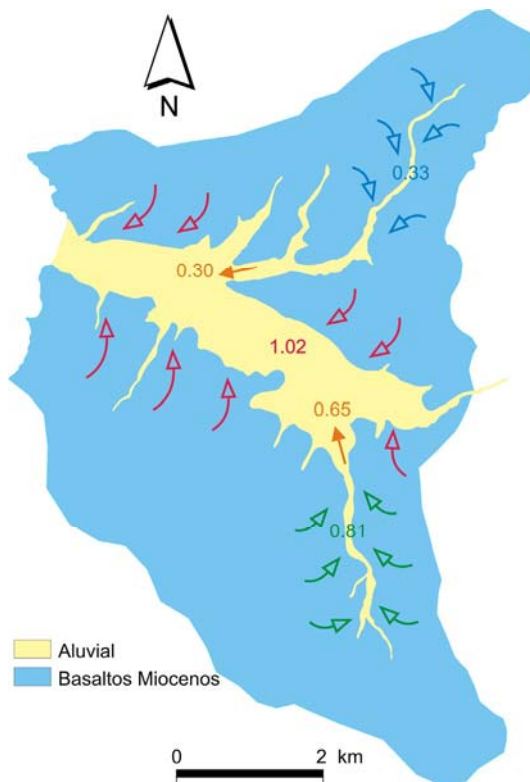


Figura 4.12. Distribución espacial de las zonas seleccionadas para el balance de masas ($\text{hm}^3/\text{año}$) para la capa superficial (capa 1). Las flechas azules indican el aporte de los basaltos, derrubios y aluviales secundarios de menor entidad al aluvial del Barranco del Furel. Las flechas verdes indican lo mismo para el Barranco de Tocodomán y las flechas rojas indican lo mismo para el Aluvial principal. Las flechas y cifras naranjas muestran el aporte de los aluviales de Furel y Tocodomán al aluvial principal.

4.7.4.- Piezometría calculada

La superficie piezométrica resultante (Figura 4.13) se ajusta al modelo conceptual descrito. Los mayores gradientes se localizan al sur de la zona de estudio y en la cabecera de los barrancos secundarios de Tocodomán y Furel. Las líneas de flujo del agua subterránea indican una descarga en sentido este-oeste hacia el mar y un aporte de agua de las zonas montañosas al norte y sur hacia el aluvial principal. La zona de Las Tabladas cede agua al aluvial principal y al barranco del Furel. Las isopiezas se ajustan a la distribución geológica estando más concentradas en los materiales menos permeables como los basaltos y más separadas en el aluvial.

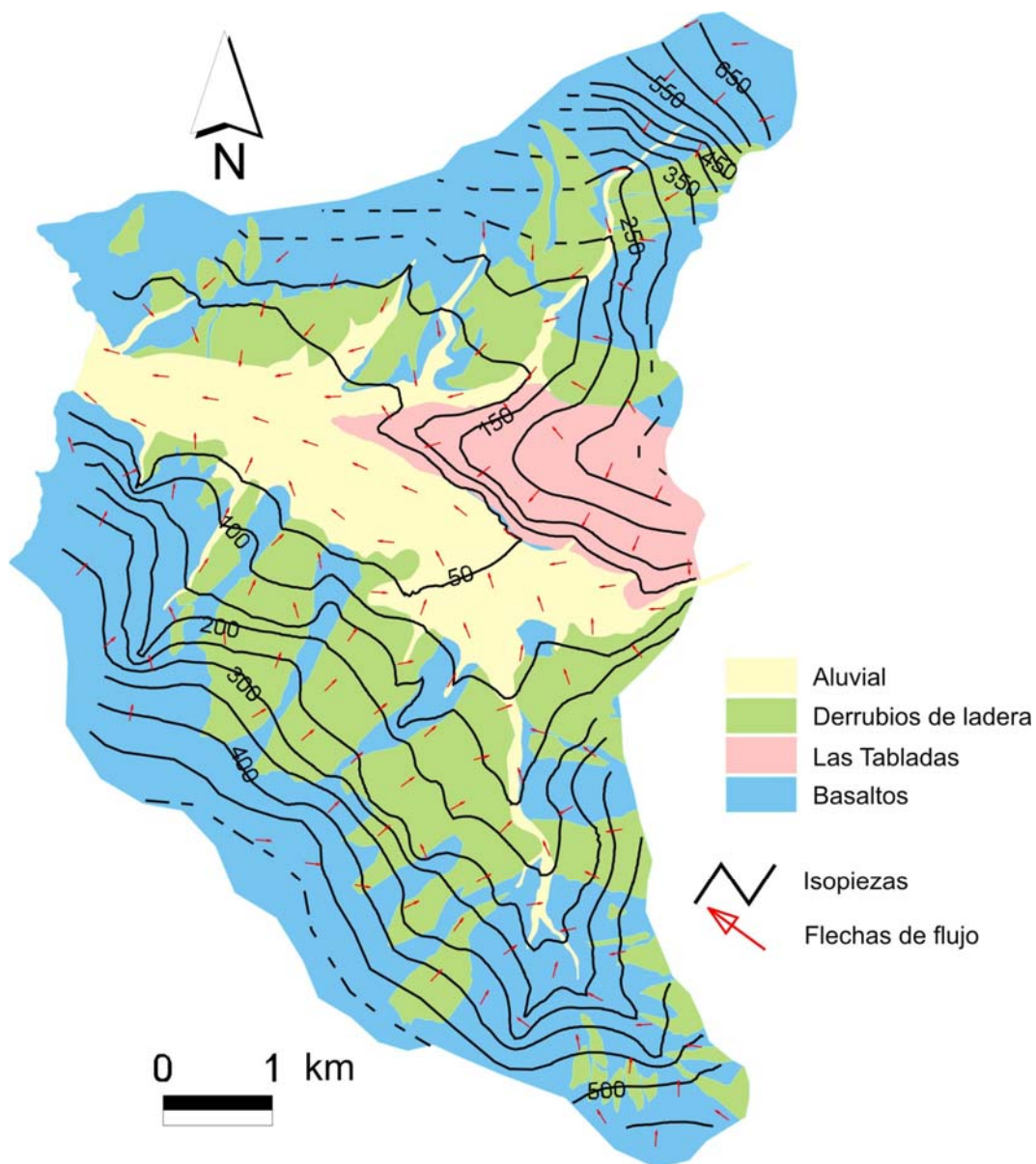


Figura 4.13. Mapa piezométrico obtenido por el modelo de flujo en régimen estacionario para el año 1992.

4.8.- SIMULACIÓN DEL FLUJO EN RÉGIMEN TRANSITORIO

El objetivo de la calibración en régimen transitorio es poder desarrollar una herramienta numérica adecuada que permita tanto avanzar en el conocimiento del medio, como en la gestión de sus recursos. El periodo de calibración utilizado en el acuífero de La Aldea se extiende entre los años hidrológicos de 1991/92 y 1998/99 y se adopta como condición inicial la resultante de la modelación en régimen estacionario, situación media anual para el año hidrológico 1991-92.

4.8.1.- Ajuste, Calibración y Análisis de Sensibilidad

Para la elaboración del modelo de flujo en régimen transitorio se ha tomado como base el modelo en régimen estacionario. Respetando las zonas de recarga, de dren y de conductividad hidráulica, adaptando los datos a la nueva escala temporal y modificando los pozos de observación y bombeo. Por otro lado también se ha añadido el parámetro del coeficiente de almacenamiento que, obviamente, no era necesario para el modelo en régimen estacionario.

Los pozos de observación para la calibración en régimen transitorio se localizan casi en su totalidad en el barranco principal y en Tocodomán. No existen puntos de observación en el aluvial del Furel, los Basaltos Miocenos y los derrubios de ladera (Figura 4.4). Los parámetros calibrados han sido la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento.

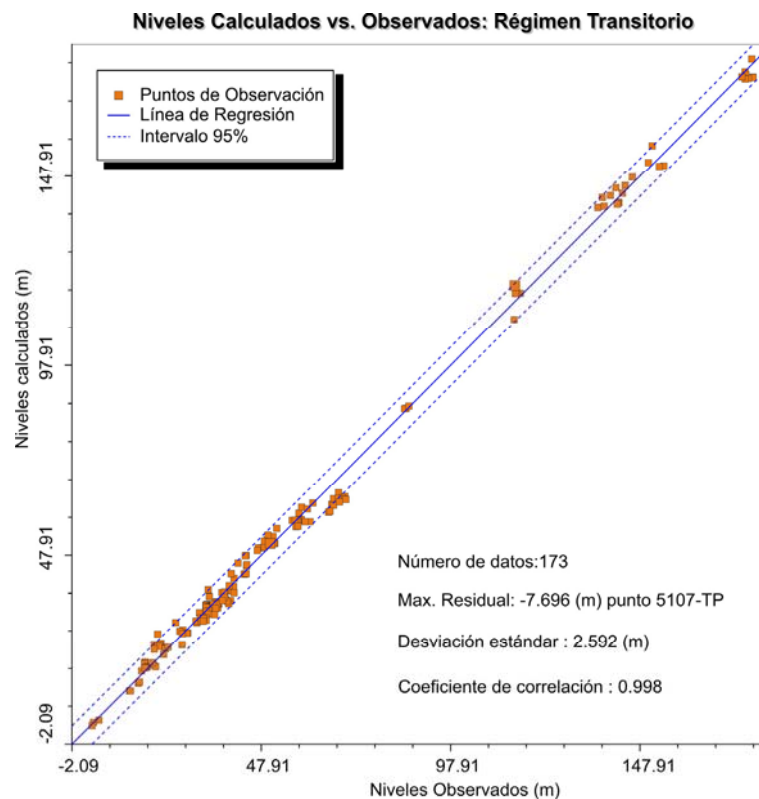


Figura 4.14. Niveles piezométricos observados frente a niveles piezométricos calculados por el modelo en régimen transitorio.

Al igual que en el régimen estacionario los criterios de calibración fueron los estadísticos del conjunto de los residuos de niveles. La desviación estándar fue 2.6 m (Figura 4.14), considerándose este valor satisfactorio al igual que la media de los valores absolutos, 1.9 m. El coeficiente de correlación entre los niveles calculados y observados es de 0.998. El residuo máximo, de 7.7 m, se localiza en un pozo situado donde comienza a abrirse el barranco principal en su cabecera en mayo de 1998. Los niveles mayores corresponden al barranco de Tocodomán, presentando una cierta dispersión, y los niveles menores a los puntos de observación del aluvial. En éste existe un grupo de pozos con residuos mayores situados donde se abre la cabecera del barranco principal.

4.8.2.- Parámetros Hidráulicos

La Tabla 4.4 muestra los resultados de los valores de los parámetros hidráulicos de la calibración en régimen transitorio y en la Figura 4.10 se puede observar la zonificación. La permeabilidad obtenida en el aluvial principal en su zona central es 17 m/d, con valores menores en la desembocadura del barranco, 29 m/d, y mayores en la cabecera, 106 m/d, estos dos fuertemente influenciados por las condiciones de contorno. Los valores de permeabilidad para los barrancos secundarios de Tocodomán y el Furel fueron 22 m/d en ambos. Debe observarse que la escasez de información piezométrica ligada al aluvial del Furel introduce cierta incertidumbre sobre el parámetro calibrado con un único punto de observación. El aumento en la permeabilidad de los basaltos, a 0.005 m/d, respecto al obtenido en la calibración del régimen estacionario, mejoró notablemente el ajuste entre niveles. En cuanto a las zonas restantes, los valores de permeabilidad fueron los calibrados en régimen estacionario: 5.5 m/d en los barrancos secundarios y entre 0.25-0.33 m/d en los derrubios de ladera. En Las Tabladas se obtuvo una permeabilidad de 0.009 m/d.

Tabla 4.4. *Valores resultantes de conductividad hidráulica obtenidos en la calibración del modelo en régimen transitorio.*

Zona	Espesor medio de la capa (m)	K_h	K_v	K_z	Espesor medio aluvial y derrubios (m)	Espesor medio basaltos (m)	K_h aluvial y derrubios (m/d)	K_h Basaltos (m/d)
1	45	13	13	0.13	20	25	29	0.005
2	40	6.6	6.6	0.066	15	25	17	0.005
3	40	40	40	0.4	12	25	106	0.005
4	65	3.4	3.4	0.034	10	55	22	0.005
5	40	5.5	5.5	0.055	10	30	22	0.005
6	70	0.4	0.4	0.004	5	65	5.5	0.005
7		0.009	0.009	0.00009				
8	80	0.025	0.025	0.00025	5	75	0.33	0.005
9	60	0.025	0.025	0.00025	5	55	0.25	0.005
10		0.005	0.005	0.00005				

En la Figura 4.15 se muestra la distribución espacial del coeficiente de almacenamiento, con las 3 zonas establecidas. Las zonas 1 está formada por el aluvial principal, la zona 2 conformada por los barrancos secundarios de Furel y Tocodomán, la zona 3 está formada por el resto de las zonas que comprenden los basaltos de las 3 capas, los derrubios y los barrancos secundarios menos importantes. La zonificación de este parámetro no se ha realizado con mayor detalle debido a la falta de puntos de observación en algunos de los ambientes hidrogeológicos como los derrubios y los basaltos.

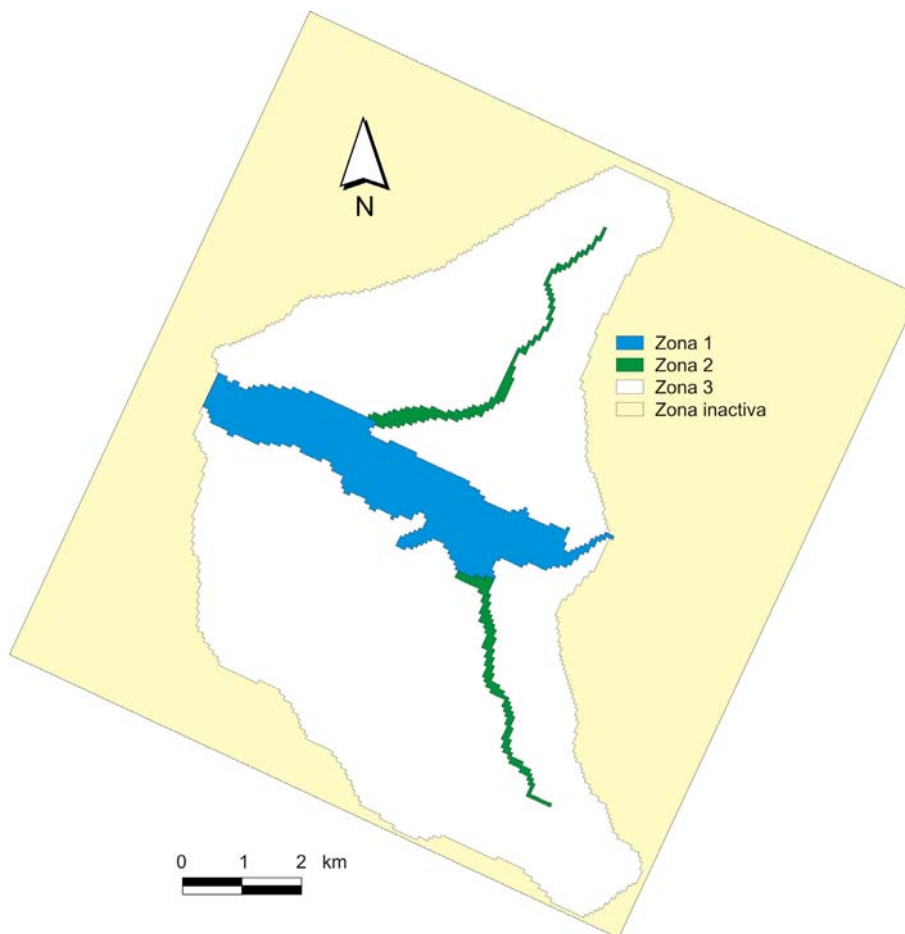


Figura 4.15. Distribución espacial del coeficiente de almacenamiento para la capa superficial del modelo en régimen transitorio.

La calibración del coeficiente de almacenamiento ofreció los siguientes resultados: 0.08 y 0.03 para el aluvial principal (zona 1) y secundarios (zona 2) respectivamente y 0.0002-0.03 para los Basaltos Miocenos (zona 3) dependiendo si están confinados (capa 2 y 3 del modelo) o no confinados (capa 1 del modelo), respectivamente. Estos valores son coherentes con la información previa de este parámetro (Muñoz, 2005).

El análisis de sensibilidad para el modelo en régimen transitorio ha seguido el mismo procedimiento que el expuesto para el régimen estacionario para la conductividad. El modelo

presenta mayor sensibilidad respecto a aquellos parámetros soportados por mayor información piezométrica: las zonas del aluvial principal, el barranco secundario de Tocodomán y los basaltos alterados. También es sensible a la variación del coeficiente de almacenamiento del aluvial principal y los basaltos.

4.8.3.- Evolución Piezométrica

Para facilitar la exposición y análisis de los resultados obtenidos en la evolución piezométrica en el modelo en régimen transitorio se han diferenciado seis zonas (Figura 4.4): cuatro en el aluvial principal, una el barranco secundario de Tocodomán y otra en el barranco secundario del Furel.

A continuación se presentan los hidrogramas calculados y medidos en los puntos de observación agrupados acorde a las distintas zonas definidas para analizar los resultados:

- * Aluvial 1: ocupa el área de desembocadura y parte del centro del barranco principal que abarca los puntos de observación 0218-O1, 0243-O1, 0244-O1, 0245-O1, 2475-TP y 4834-TP. En los pozos de esta zona los niveles calculados por el modelo se ajustan bastante bien a los observados (Figura 4.16) sobre todo en los pozos situados más cerca de la desembocadura, notándose la influencia de la condición de contornos de nivel constante en la evolución temporal de los niveles piezométricos calculados. En el pozo 2475-TP los niveles calculados están un metro por debajo que los observados y en los pozos 0244-O1, 0245-O1 y 4834-TP aunque el ajuste no es bueno, el modelo alcanza a reproducir adecuadamente las variaciones estacionales que se observan en los niveles debido a la influencia de los bombeos. La desviación estándar para este grupo de pozos es de 2.15 m, por debajo de la desviación estándar obtenida para el modelo en régimen transitorio, 2.6 m, y el residuo máximo, 6.53 m en el pozo 0245-O1 en julio de 1992 (día 298).

- * Aluvial 2: ocupa el área central del aluvial principal y contiene los pozos 0641-O1, 0642-O1, 0643-O1, 0646-O1, 0666-O1 y 3972-TP. Para esta área (Figura 4.17), el ajuste es bastante bueno para los pozos 0646-O1 y 0666-O1 con diferencias máximas de 1 m entre los valores observados y calculados, para los pozos 0642-O1 y 0641-O1 se aprecia un desajuste debido a que son pozos de bombeo y de observación al mismo tiempo, en estos pozos los niveles calculados están por encima de los observados. La desviación estándar para este grupo de pozos es de 2.3 m y el residuo máximo, 4 m en el pozo 0642-O1 en julio de 1999 (día 2791).

- * Aluvial 3: también ocupa el área del centro del barranco principal que abarca los puntos de observación 1622-TP, 4858-TP, 4858-ATP, 4858-BTP y 4860-TP. El ajuste es bastante bueno para la mayoría de los puntos de observación (Figura 4.18) obteniéndose un mejor ajuste en el pozo 4858-TP. Por otro lado, en los pozos 1622-TP y 4860-TP el ajuste es

pobre, ello es debido a que estos son pozos de bombeo con un alto caudal de explotación. La desviación estándar para este grupo de pozos es de 1.6 m, consiguiendo este grupo de pozos el mejor de los ajustes, y el residuo máximo, 4 m en el pozo 4858-BTP en febrero de 1998 (día 2297).

- * Aluvial 4: se localiza en la cabecera del barranco principal y contiene los pozos 0610-O1, 0613-O1, 0623-O1, 4826-TP, 4946-TP y 5107-TP (Figura 4.19). Esta zona desde las primeras simulaciones siempre ha presentado cierta dificultad en el ajuste, incluso en la simulación en régimen estacionario, los niveles calculados presentan evoluciones distintas a las observadas y no se han obtenido buenos ajustes para las distintas condiciones establecidas en el modelo en la mayoría de los pozos. El mejor ajuste se observa en el pozo 0610-O1, para el resto se observa por un lado, la influencia de los pozos de bombeo, sobre todo a los que se localizan en la zona centro del aluvial y por otro lado la influencia del contacto con Las Tabladas que produce las oscilaciones como las que se observa en los niveles calculados en el pozo 5107-TP. En general los niveles calculados están por debajo de los observados. La desviación estándar para este grupo de pozos es de 4.6 m, siendo éste el grupo con el peor ajuste, y el residuo máximo, 7.6 m en el pozo 5107-TP en mayo de 1998 (día 2389).

- * Tocodomán: está situado en el barranco secundario de Tocodomán formado por los pozos 0409-O1, 0411-O1, 2601-TP, 2760-TP, 2762-TP y 4669-TP. El ajuste es muy bueno ya que los niveles calculados y observados prácticamente coinciden (Figura 4.20). Se observa un importante descenso de los niveles a partir del abril de 1997 (día 2010) que coincide con un descenso importante en la recarga por retornos de riego que afecta más a la zona de Tocodomán porque es la fuente de recarga principal en esta zona. La desviación estándar para este grupo de pozos es de 2.6 m y el residuo máximo, 5 m en el pozo 2762-TP en junio de 1992 (día 293).

- * Furel: situado en el barranco secundario del Furel está formado por un único dato (0389-TP) localizado cerca de la desembocadura de este barranco con el barranco principal. El ajuste para este pozo es bastante bueno, con una desviación estándar de 2 m y un residuo máximo de 5 m en junio de 1992 (día 298), consiguiendo reflejarse bastante bien las oscilaciones estacionales (Figura 4.21).

El contraste entre los niveles observados y calculados (Figura 4.14) evidencia la bondad del ajuste piezométrico alcanzado en la calibración del régimen transitorio. Igualmente, se aprecia como los hidrogramas calculados reproducen adecuadamente la evolución de los niveles observados. En el aluvial principal, el ajuste es en general bueno, con una desviación estándar media de 2.6 m, si bien existen ajustes más pobres en ciertos pozos que son a la vez de observación y bombeo. En la zona de Tocodomán se obtienen buenos ajustes en la evolución de los niveles calculados, 2.6 m de dispersión estándar, aunque presentan una cierta dispersión. En ambos casos,

se aprecian las variaciones estacionales de los bombeos y la recarga -principalmente por retornos de riego- y una tendencia decreciente de los niveles.

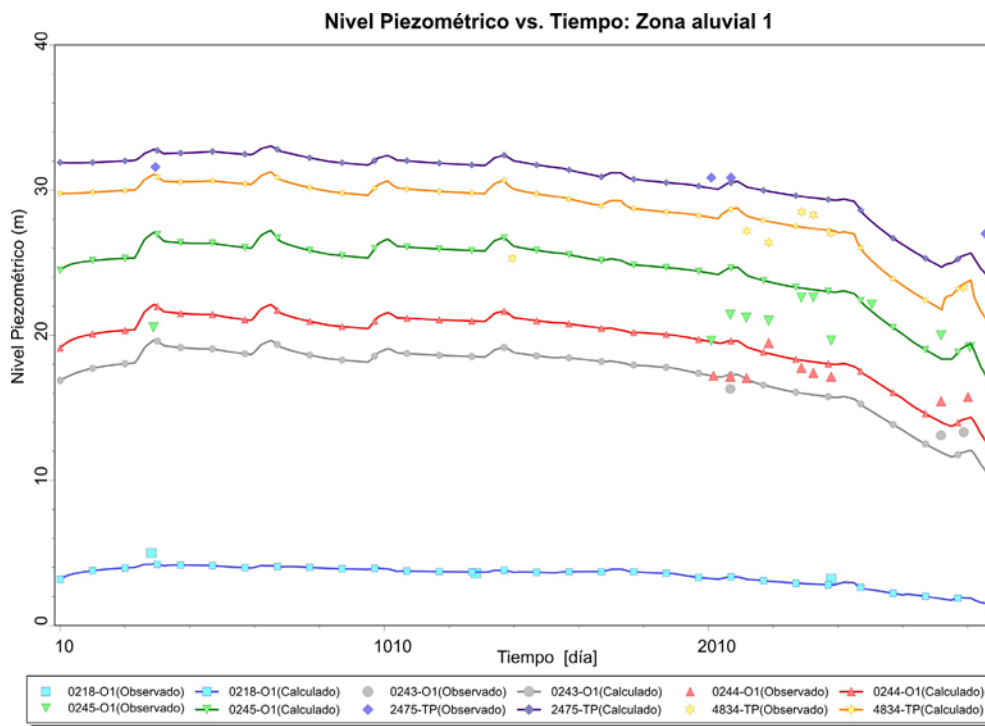


Figura 4.16. Evolución temporal de los niveles calculados por el modelo (líneas) y observados (puntos) en la zona Aluvial 1 en régimen transitorio.

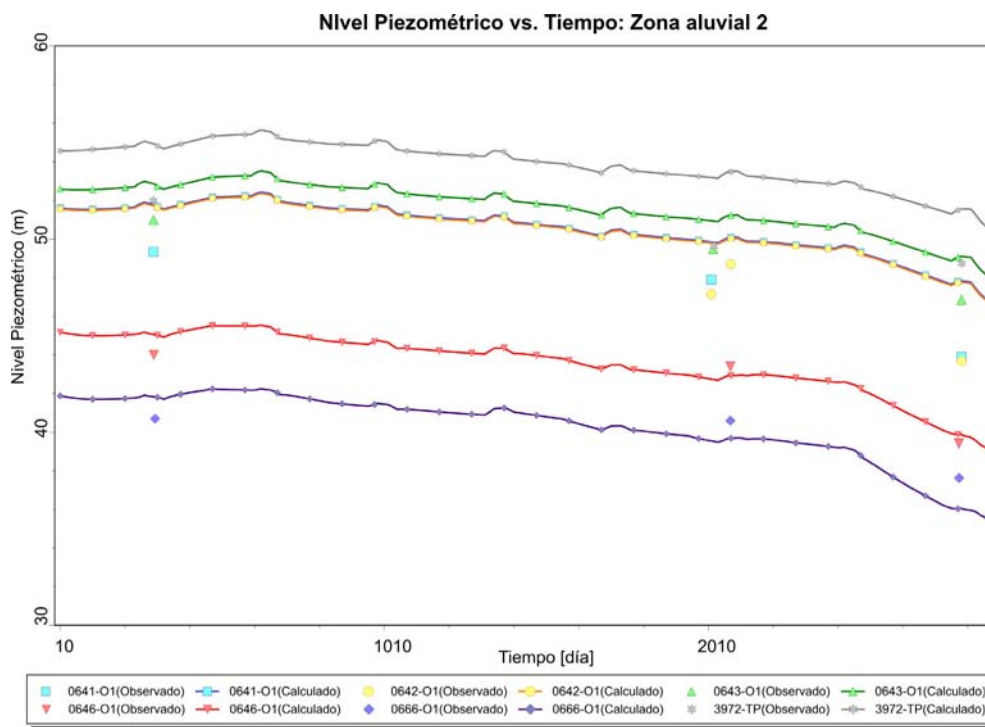


Figura 4.17. Evolución temporal de los niveles calculados por el modelo (líneas) y observados (puntos) en la zona Aluvial 2 en régimen transitorio.

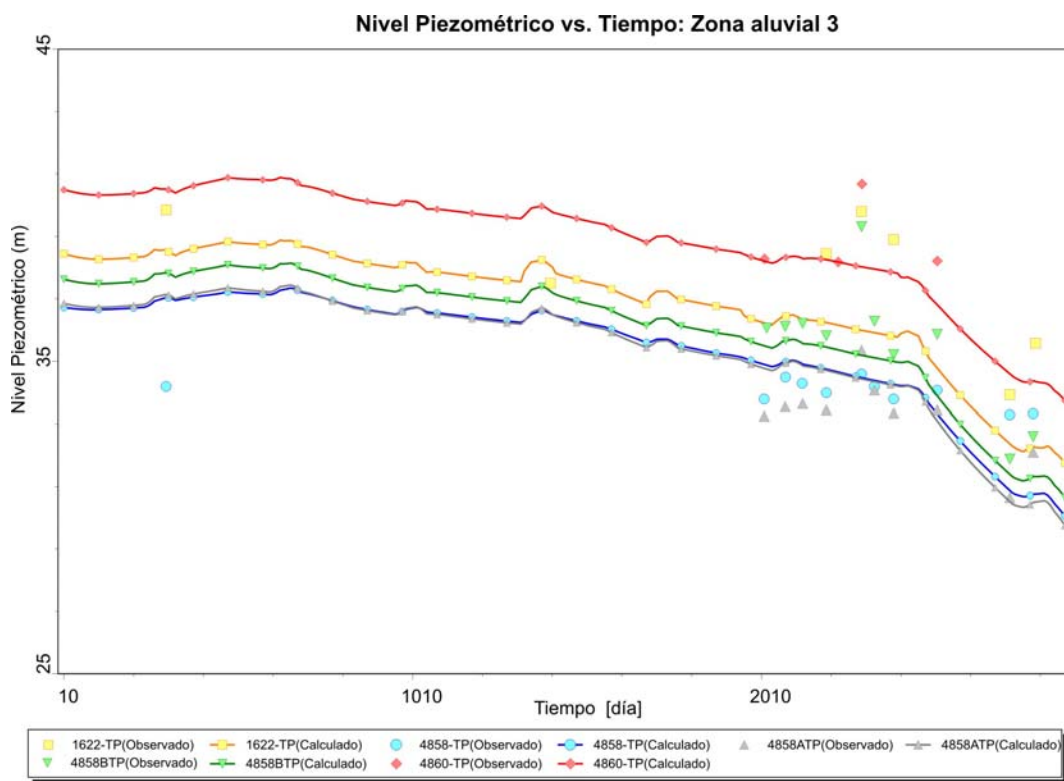


Figura 4.18. Evolución temporal de los niveles calculados por el modelo (líneas) y observados (puntos) en la zona Aluvial 3 en régimen transitorio.

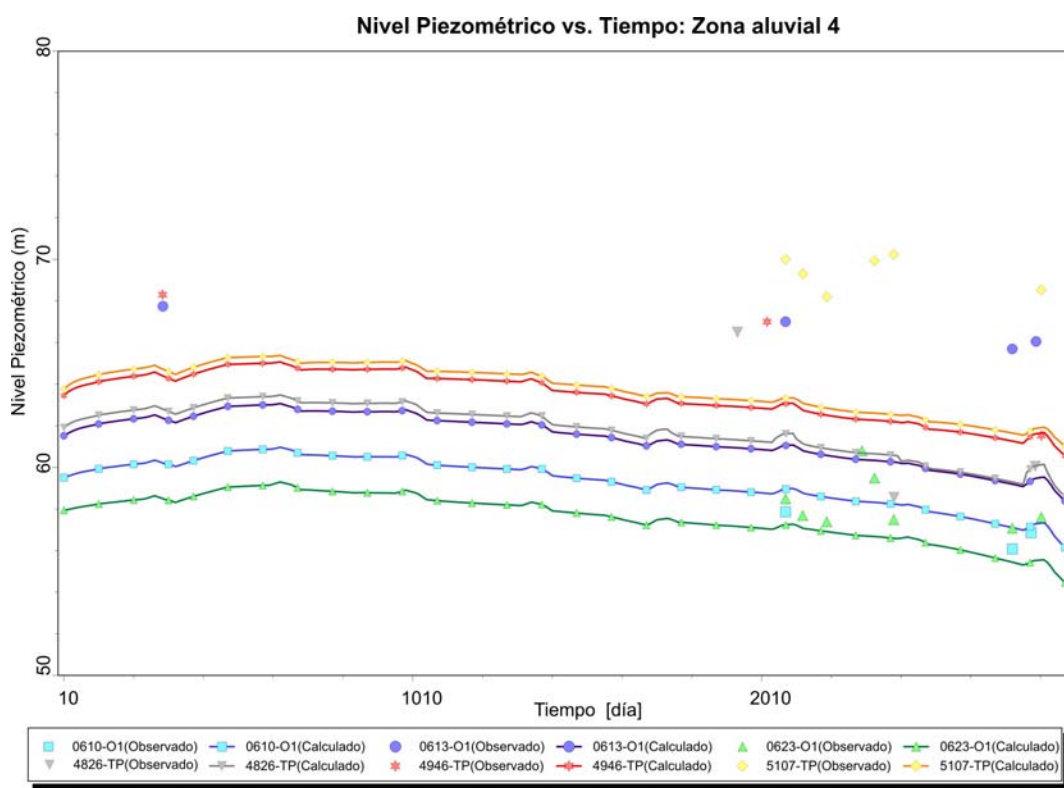


Figura 4.19. Evolución temporal de los niveles calculados por el modelo (líneas) y observados (puntos) en la zona Aluvial 4 en régimen transitorio.

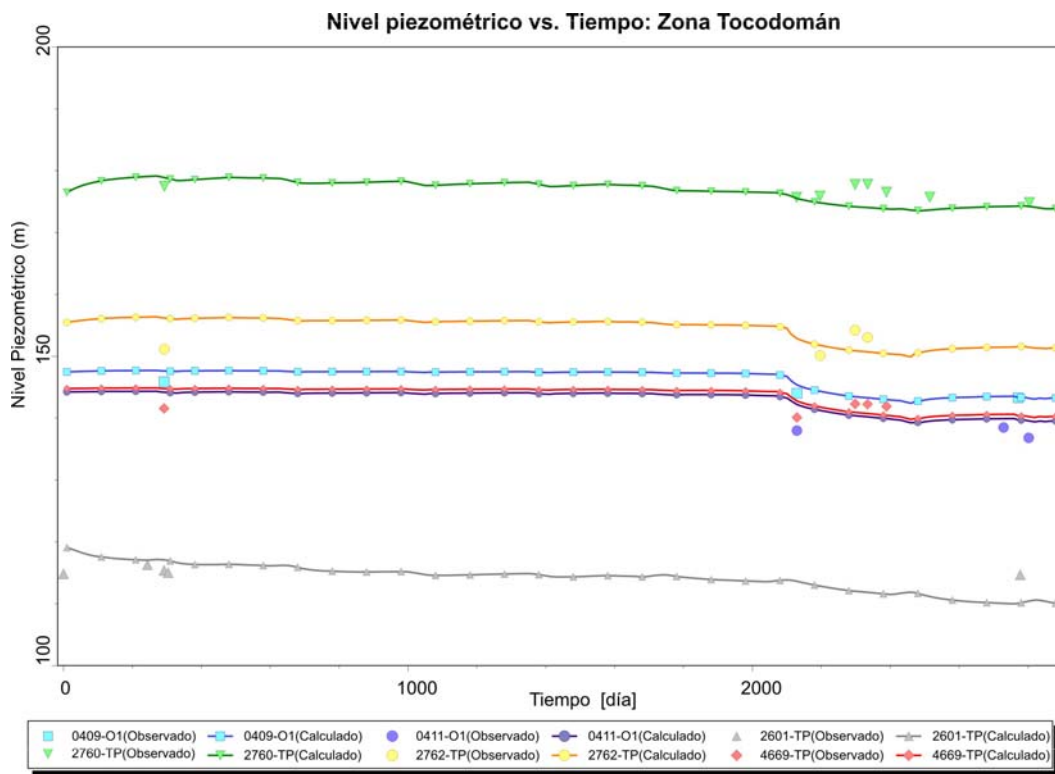


Figura 4.20. Evolución temporal de los niveles calculados por el modelo (líneas) y observados (puntos) en la zona de Tocodomán en régimen transitorio.

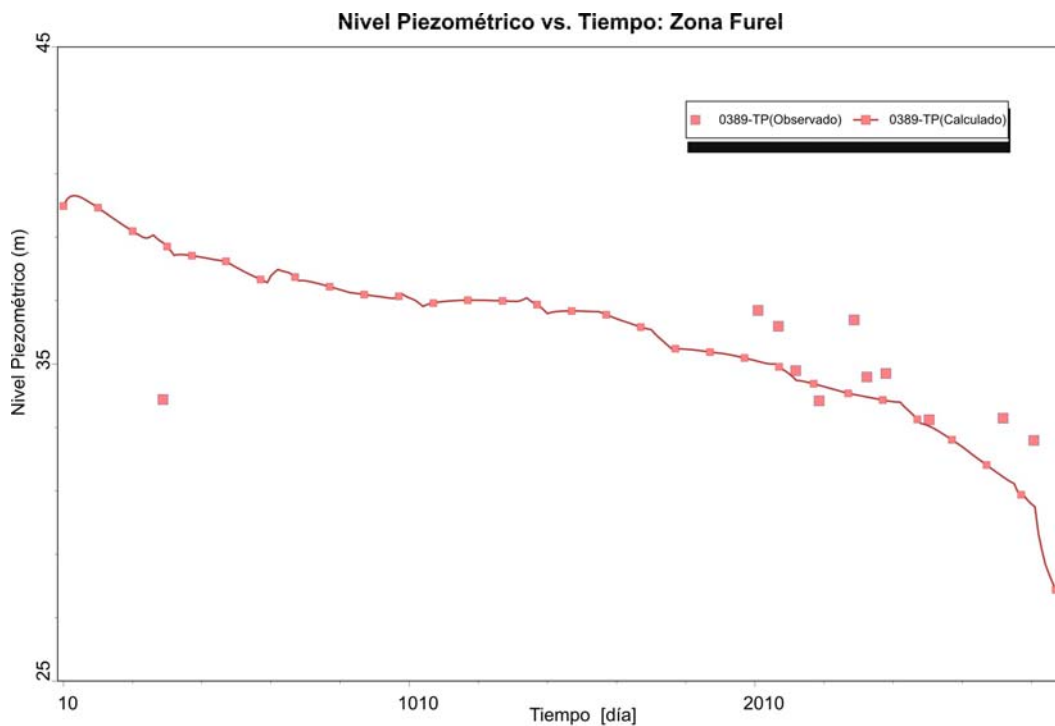


Figura 4.21. Evolución temporal de los niveles calculados por el modelo (líneas) y observados (puntos) en la zona de Furel en régimen transitorio.

4.8.4.- Balance de Masas

Como resultado del modelo, se ha realizado un balance para todo el conjunto del sistema en régimen transitorio.

En la Figura 4.22 se expone la evolución de las entradas (Arriba) y salidas (Abajo) del balance hídrico del sistema para el modelo en régimen transitorio. Con respecto a las entradas, los picos positivos en la recarga (color azul en la figura) son causados por la precipitación y van acompañados, consiguientemente, de un pico en sentido contrario en el almacenamiento (color rojo en la figura). Así, se observa cómo al producirse una entrada de agua directa, por la precipitación en este caso, se reduce el aporte de agua desde el almacenamiento al sistema. Por el contrario, en los periodos en que disminuye la recarga, anualmente en verano al no existir retornos de riego, se incrementa el aporte desde el almacenamiento al sistema.

La entrada de agua por la cabecera del barranco (color verde en la figura) es una condición de contorno impuesta al sistema y es constante. Este hecho no es cierto en realidad, ya que las entradas por cabecera pueden variar estacional y anualmente, pero se optó por un valor constante ya que la incertidumbre que encierran los cálculos de los caudales al dar valores de permeabilidades medias en el acuífero es grande de por sí. Por ello carece de sentido trabajar con un grado de detalle superior frente a hacerlo sólo con el promedio. Asimismo, se trata de la entrada de agua al sistema que presenta un menor volumen. El modelo no acusa la existencia de entradas por la desembocadura del barranco, lo que resulta coherente con la observación de que no hay evidencias de intrusión marina en el acuífero a partir de los datos que se dispone.

La evolución temporal del total de entradas (color gris en la figura) al sistema acuífero muestra una estacionalidad fuertemente influenciadas por los retornos de riego (que disminuyen drásticamente en verano dado el carácter estacional de los cultivos de tomate). Son también los retornos de riego los responsables de la disminución de las entradas al sistema entre 1992 y 1997, así como el posterior aumento (aunque ligero en 1998). El análisis de los datos permite constatar que el abandono de superficie de cultivo es progresivo en la etapa entre 1992 y 1997, y especialmente notable en 1996, así como un ligero aumento a partir de este año (Tabla 3.8).

En cuanto a las salidas del sistema (Figura 4.22 Abajo), se observa un fuerte descenso en el almacenamiento del mismo (línea roja en la figura) durante el periodo de modelación, producido por el mantenimiento e incluso ascenso del volumen de extracción (a partir de 1998) con una recarga que disminuye a partir de 1996 (coincidiendo con el abandono de superficie cultivada). Así, la salida más importante del sistema acuífero está constituida por la extracción por bombeos en los pozos (color verde en la figura), en los que se constata una naturaleza cíclica, con una disminución en verano y unos niveles relativamente constantes en las épocas de riego. Las salidas por nivel constante hacia el mar (color naranja en la figura) presentan una disminución generalizada a partir del verano de 1997, sin que se observe una influencia directa de las variaciones de la recarga. Esta

disminución debe estar fuertemente influenciada por el aumento de las extracciones. Por otro lado, las salidas del sistema al dren (barranco) sí que se ven afectadas por la disminución de la recarga en los momentos en que disminuyen los retornos de riego, según lo esperable.

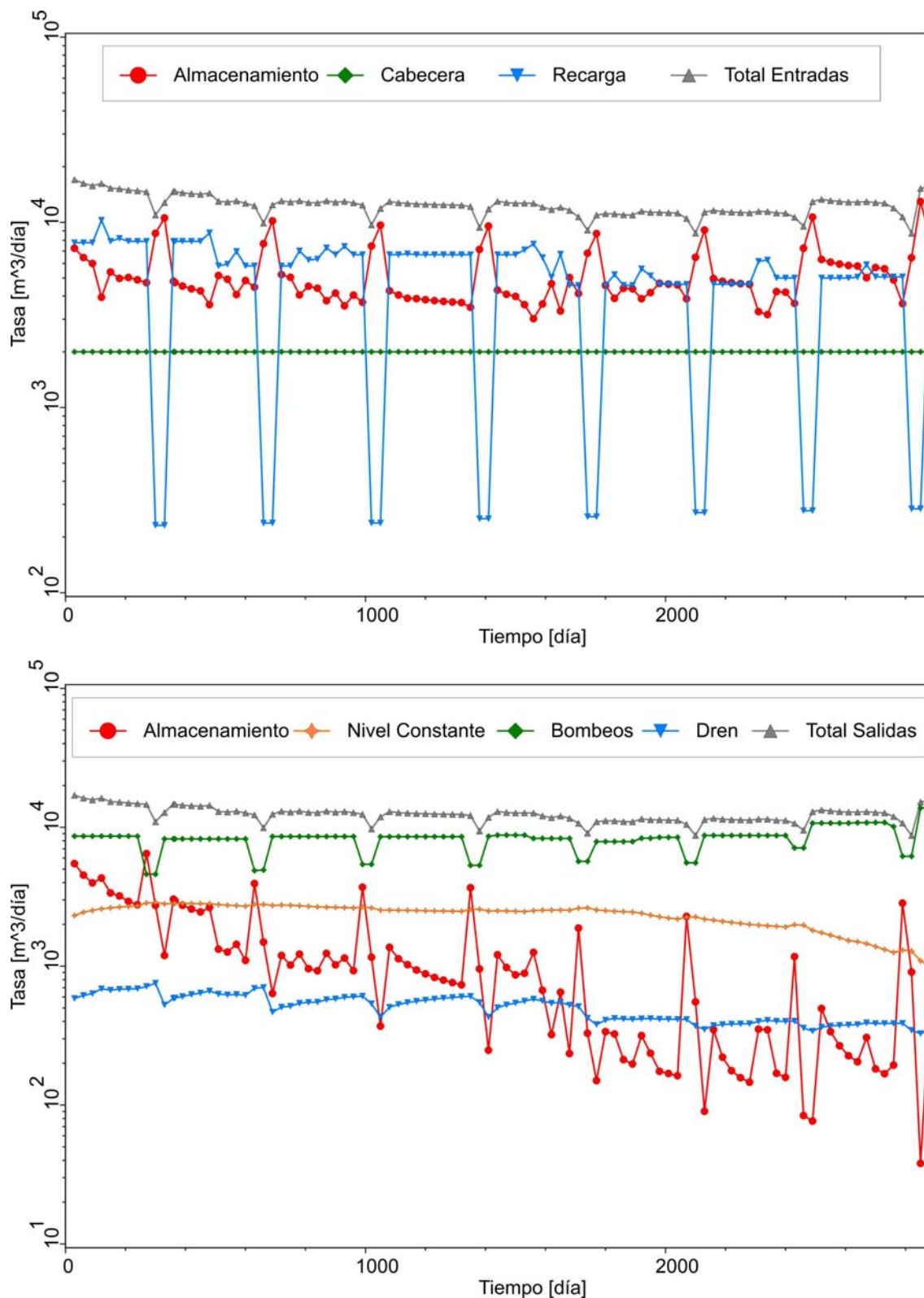


Figura 4.22. Caudales de las entradas (arriba) y las salidas (abajo) de agua al sistema obtenidas en el modelo de flujo en régimen transitorio.

Este balance de masas es complementario al balance hídrico realizado para el acuífero en el capítulo anterior y en líneas generales constata los resultados obtenidos: los retornos de riego constituyen la principal recarga y condicionan fuertemente el sistema acuífero, tanto por la cantidad de agua que aporta al mismo como porque le aporta una fuerte componente estacional. Por otro lado, las extracciones suponen la principal salida del sistema, muy influenciadas por la superficie cultivada en la misma.

4.9.- VALIDACIÓN DEL MODELO

El objetivo de la validación de un modelo es verificar que este es capaz de simular adecuadamente un periodo de tiempo distinto al empleado para su calibración. No obstante, ello no exige que como resultado de un proceso de validación se pueda producir algún ajuste en los parámetros y/o condiciones de contorno del modelo (Wang y Anderson, 1982). La validación de un modelo le otorga mayor consistencia a este como herramienta predictiva.

La práctica de validación más común, y la usada en este modelo, es la comparación del resultado del modelo con datos de campo no usados en la calibración. Para ello, se ha decidido ampliar el tiempo de modelación para contrastar que los datos observados en el campo y los calculados por el modelo no sólo se ajustan al periodo de la calibración sino también a años posteriores. La validación del modelo ha sido realizada con los datos piezométricos obtenidos en la red de control actual durante el año hidrológico 2005/06 para los pozos que no han sido explotados durante este periodo de tiempo. Partiendo del modelo en régimen transitorio se ha extendido el periodo de modelación a 5400 días (hasta septiembre del 2006).

Los resultados de la validación se exponen en la Figura 4.23, en la que se aprecia un buen ajuste entre los niveles calculados y los observados. Para este ajuste se ha dispuesto de menos pozos que para el régimen estacionario y transitorio y se localizan en el barranco principal, en la zona baja de Tocodomán, en la desembocadura del barranco de Furel y la zona sur del área de estudio sobre los derrubios de ladera y los basaltos (Figura 4.24). Los criterios de ajuste son: 8.8 m para la desviación estándar, 7.3 m para la media de los valores absolutos y 19 m para el residuo máximo. El coeficiente de correlación entre los niveles calculados y observados es de 0.997. En el pozo con los niveles mayores, ubicado en la cabecera del barranco de Tocodomán, sobre los basaltos, los niveles calculados son menores a los observados, al igual que los pozos del aluvial. En el único punto donde los niveles calculados son mayores a los observados, se sitúa en los derrubios de ladera del sur, punto 0391-TP. Para esta zona, se obtuvo en la calibración en régimen estacionario una permeabilidad de 1.2 m/d, sin embargo en la calibración del transitorio esta fue de 0.4 m/d. El análisis de la validación sugiere que en esta zona la permeabilidad más plausible sería la resultante de la calibración del régimen estacionario. Los mejores ajustes se obtienen en los sondeos que se localizan en la zona baja del barranco secundario de Tocodomán.

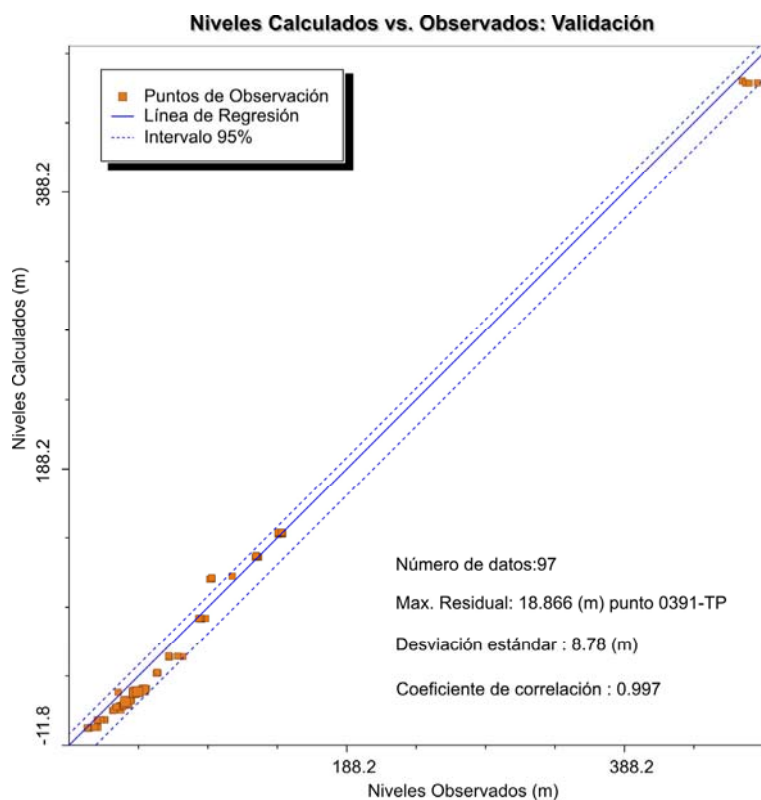


Figura 4.23. Niveles piezométricos observados frente a niveles piezométricos calculados para la validación por el modelo en régimen transitorio.

Para facilitar la exposición de los resultados obtenidos se presentan los hidrogramas calculados y los niveles observados de algunos pozos usados en la validación, se han diferenciado dos zonas: zona baja y zona alta (Figura 4.24).

*Zona Baja: los pozos de esta zona están distribuidos principalmente en el barranco principal exceptuando 0389-TP que se localiza en la desembocadura del barranco secundario de Furel. Los niveles calculados por el modelo están por debajo de los observados en la mayor parte de los puntos de observación (Figura 4.25), lo que podría ser debido a una sobreestimación de la explotación en este periodo de tiempo (2005-06). Esta hipótesis es plausible ya que la explotación para el periodo de validación ha sido extrapolada de la explotación de 1999 por falta de datos de explotación directos y en este tiempo ha disminuido la superficie de cultivo y ha aumentado el cultivo hidropónico lo que ha podido llevar a una disminución de la explotación real. El pozo que mejor se ajusta es el pozo más cercano a la desembocadura (0210-O1), notándose la influencia de la condición de contornos de nivel constante en la evolución temporal de los niveles piezométricos calculados. Los hidrogramas calculados no reproducen adecuadamente la evolución de los niveles observados en los puntos de observación, lo que es debido a la influencia de los bombeos y a que los propios puntos de observación son a la vez pozos de bombeo. La desviación estándar es de 8 m y el residuo máximo de 15 m en el pozo 1622-TP.

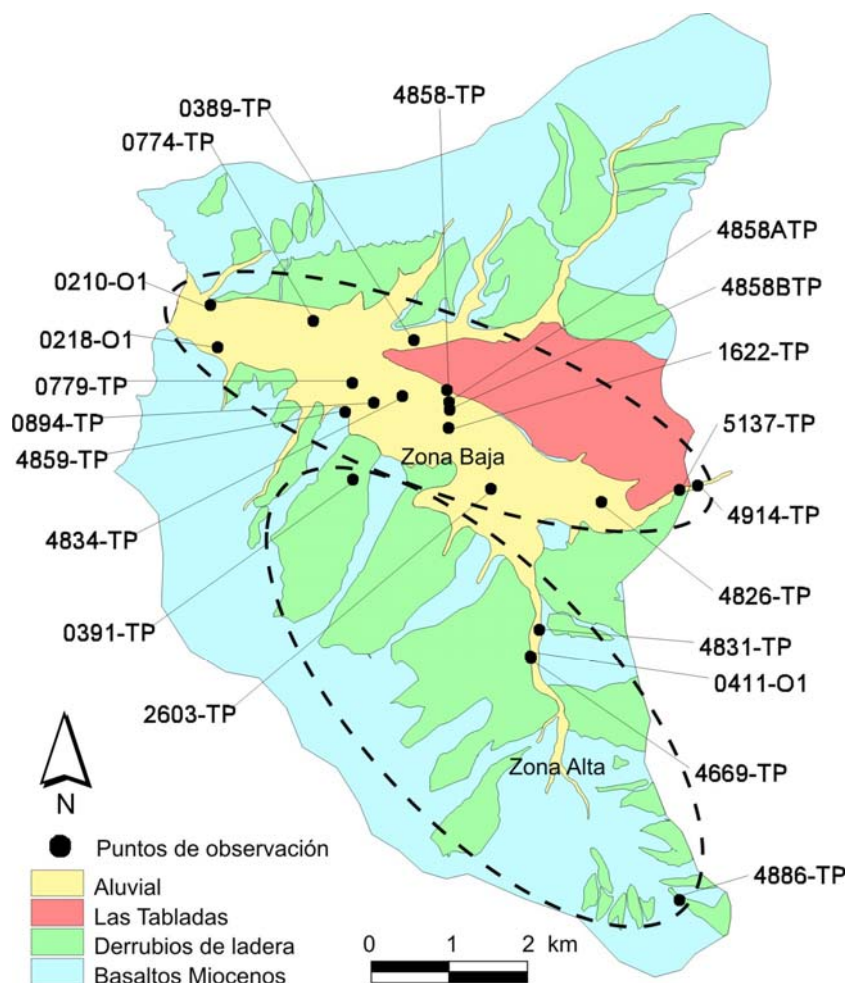


Figura 4.24. Distribución espacial de los puntos de observación utilizados para la validación del modelo.

*Zona Alta: los pozos están situados en su mayoría en el barranco secundario de Tocodomán, excepto el 0391-TP que se localiza en los derrubios de ladera al sur de la zona de estudio. En estos pozos se logra un mejor ajuste que en la zona baja, aunque en mucho de ellos, los niveles calculados continúan estando por debajo de los observados. El mejor ajuste se observa en los pozos ubicados en la zona baja de Tocodomán (4831-TP, 0411-O1 y el 4669-TP). El pozo 0391-TP, ubicado sobre los derrubios de ladera, ha sido el único donde los niveles observados están por debajo de los calculados y como ya se ha explicado en el apartado anterior podría ser debido a que la permeabilidad en esta zona debe ser menor que la impuesta en la validación, procedente de la calibración del modelo de flujo en régimen transitorio. En general, se observa una desviación estándar de 9 m y un residuo máximo de 18 m (Figura 4.26).

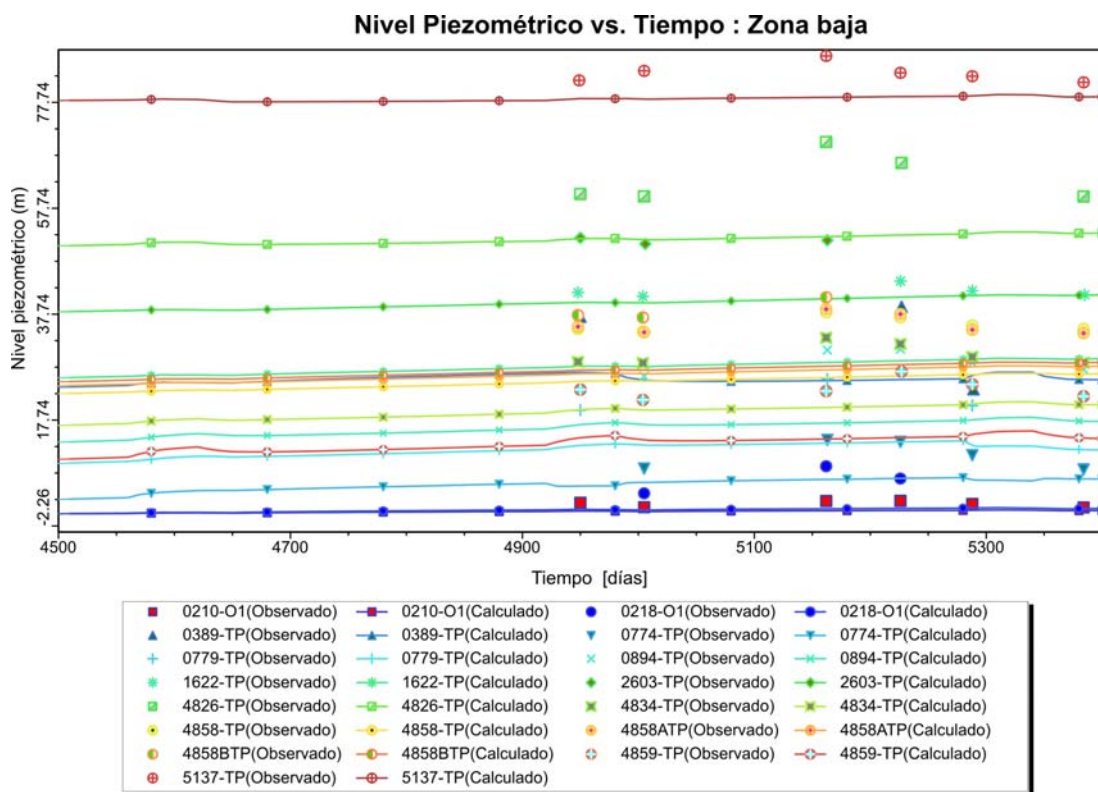


Figura 4.25. Evolución temporal de los niveles calculados por el modelo (líneas) y observados (puntos) en la zona del aluvial en régimen transitorio en el proceso de validación.

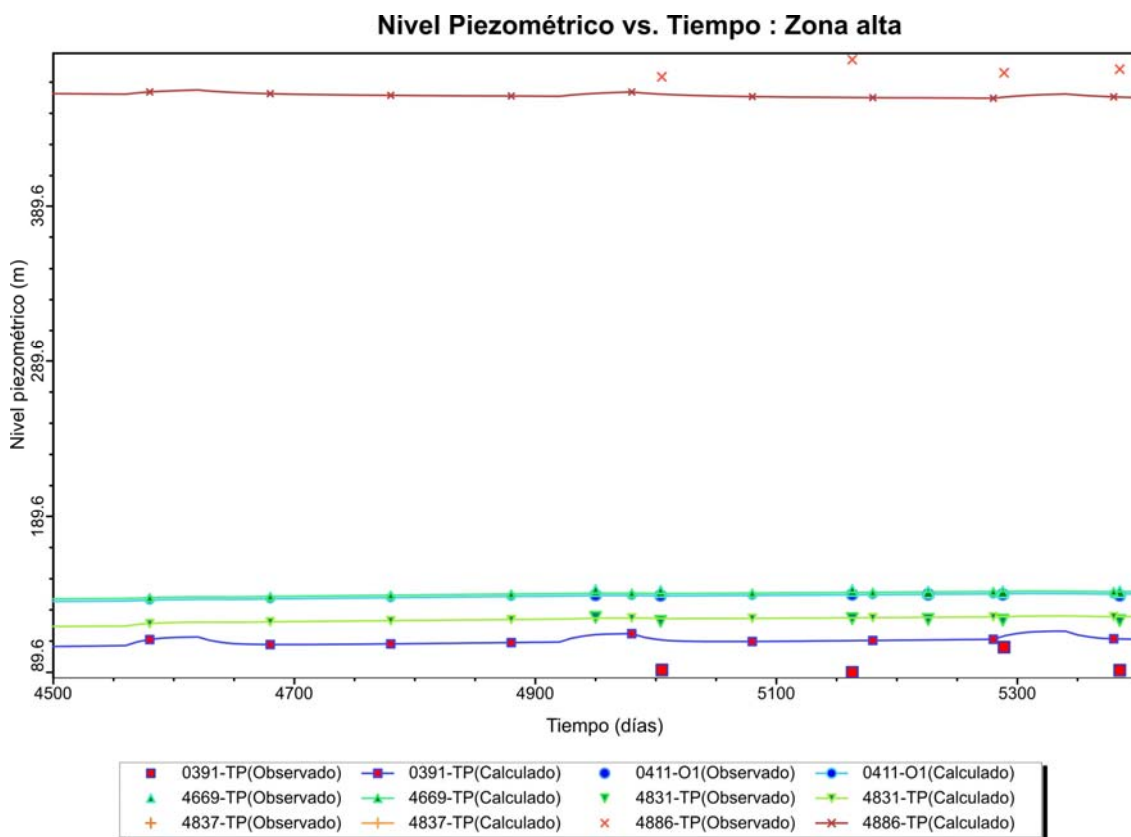


Figura 4.26. Evolución temporal de los niveles calculados por el modelo (líneas) y observados (puntos) en la zona de Tocodomán en régimen transitorio en el proceso de validación.



5.
HIDROGEOQUÍMICA

Capítulo 5.- HIDROGEOQUÍMICA

5.1.- MARCO HIDROGEOQUÍMICO

La hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la zona de estudio ha sido caracterizada en trabajos anteriores (Muñoz *et al.*, 1996; Delgado, 1998; Cabrera *et al.*, 2000; Cabrera *et al.*, 2001). El trabajo más exhaustivo (Muñoz, 2005) recoge análisis químicos de muestras de agua de la lluvia y del acuífero, prestando especial atención a su evolución temporal y espacial, y principalmente orientada a aclarar los procesos y causas de la salinización del acuífero.

En este capítulo, se resumirán y analizarán las principales conclusiones hidrogeoquímicas obtenidas en estos trabajos con el fin de identificar y clasificar distintos tipos hidrogeoquímicos de agua y determinar el aporte natural y la contaminación antropogénica de éstas a partir de sus condiciones de referencia. Todo ello, con el objetivo de caracterizar los procesos que serán considerados en la modelación del transporte de soluto. Para ello, se ha realizado una actualización de los resultados hidrogeoquímicos introduciendo los datos obtenidos en la red de control actual y comparándolos con los resultados obtenidos por Muñoz (2005). Para finalizar, se ha realizado un modelo hidrogeoquímico que ha ayudado a identificar el funcionamiento de los elementos químicos mayoritarios de las aguas subterráneas y a estudiar la evolución espacio-temporal de la concentración de estos elementos químicos en el acuífero.

5.1.1.- Características generales de la hidroquímica en terrenos volcánicos

Las características químicas de las aguas subterráneas de los terrenos volcánicos dependen de la composición de la lluvia, del clima de la zona, del tipo de roca en el que se localiza o discurre, el tiempo de contacto con la roca, la temperatura del agua, etc. (Custodio, 1978). El estado de división de la roca es otro aspecto importante en el grado de interacción con las aguas subterráneas. En una roca masiva por la que el agua sólo circula a través de unas pocas fisuras, el agua tiene muy poca oportunidad de reaccionar, mientras que las rocas porosas ofrecen una superficie de contacto muy elevada y por tanto, una gran oportunidad de ataque químico (Custodio, 1978).

En general, las rocas volcánicas son fácilmente alterables cediendo iones que hacen que el agua que circula a través de la formación tienda a tener características propias identificables de la roca que la contiene (Custodio, 1978). La inmensa mayoría de los minerales que forman los terrenos volcánicos son poco solubles, principalmente los silicatos, aunque son fácilmente alterables por la presencia de CO₂ disuelto en cantidades suficientes. Las rocas volcánicas apenas tienen

fracción aniónica soluble. En condiciones de clima húmedo o semi-húmedo el anión dominante es el $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ procedente del CO_2 del suelo y de la lluvia. En condiciones de aridez puede ser que domine el Cl^- en equilibrio con cationes. Por ello es muy importante conocer las características químicas del agua de recarga. La diferente contribución catiónica depende de la composición de la roca y aunque las relaciones catiónicas del agua no suelen coincidir con la de las rocas, si está muy relacionada con ella (Custodio, 1978).

La acción del hombre también puede alterar la situación natural de las aguas subterráneas mediante el aporte de sales o contaminantes al terreno. Un ejemplo de estos casos lo constituyen los retornos de riego, que producen un aporte de sales al acuífero por la concentración resultante del proceso de evapotranspiración, además del aporte de nitratos y otros iones contenidos en los abonos agrícolas. También puede aportar plaguicidas y sus metabolitos al agua subterránea. El resultado suele ser el enriquecimiento de las aguas en nitratos, sulfatos y/o cloruros, además de otros compuestos en menor medida.

5.1.2.- *Características generales de la hidroquímica de Gran Canaria*

Durante el proyecto SPA-15 (1975) se realizó el primer estudio hidrogeoquímico a escala insular. En este proyecto se recogieron muestras de aguas subterráneas y de agua de escorrentía y lluvia que permitieron clasificar las aguas subterráneas en distintas familias hidroquímicas y estudiar la relación roca-agua de las formaciones geológicas asociadas a cada muestra. Las conclusiones generales resultantes señalaban que el agua subterránea adquiría sus características químicas como resultado de los cambios que se producen a lo largo de las líneas de flujo, desde el centro de la isla hasta la costa (SPA-15, 1975).

Según la clasificación establecida por Fernandopullé (1974) estos cambios pueden explicarse por la saturación de los bicarbonatos junto con el aporte progresivo de cloruros a lo largo de las líneas de flujo debido principalmente al aerosol marino y los retornos de riego. Los agentes que provocan estos cambios están marcados por los tipos de roca atravesados, los procesos de lixiviado en la zona no saturada y la zona saturada, y los fenómenos volcánicos relacionados con el contenido de CO_2 .

Los condicionantes hidrogeoquímicos para toda la isla, establecidos en el SPA-15 (1975) y ampliados en trabajos posteriores, pueden resumirse en los siguientes puntos:

- * La temperatura del agua subterránea aumenta desde la cumbre hacia la periferia, existiendo un gran paralelismo con la temperatura ambiental. Las irregularidades en la temperatura suelen coincidir con los puntos de emanación de gases de origen volcánico.
- * El pH disminuye bruscamente en las zonas de aportes de CO_2 profundo, para recuperarse lentamente aguas abajo a medida que se consume por agresión al terreno. En general, los

valores menores de pH se asocian a basaltos de la Etapa de Rejuvenecimiento (Custodio, 1978).

- * El contenido en SiO_2 , en condiciones normales de pH, está entre 15 y 30 ppm (Custodio, 1978) con una ligera tendencia al aumento a medida que crece la mineralización del agua, los aportes de CO_2 y la elevación de la temperatura.
- * La conductividad eléctrica, la dureza total y los contenidos de Cl^- y SO_4^{-2} tienden a crecer desde la cumbre hasta la periferia. Las razones de esta tendencia pueden ser variadas: un progresivo lavado del terreno al aumentar el recorrido, el tiempo de contacto y temperatura, la recarga local con aguas cada vez más salinas de las zonas más bajas y áridas, llegada a la zona saturada de aguas procedentes de excedentes de riego (responsables sobre todo del aporte de SO_4^{-2}), una disminución del caudal infiltrado, posible contaminación marina, etc. (Custodio, 1978).
- * La relación $r\text{Na}^+/r\text{K}^+$ tiende a aumentar hacia la costa, si bien hay irregularidades que pueden asociarse a los cambios litológicos (SPA-15, 1975). Más concretamente, las fonolitas del Grupo Sáfico y la base del Grupo Roque Nublo coinciden con niveles bajos de este valor, mientras que su aumento se asocia a un predominio de ignimbritas de Roque Nublo (Custodio, 1978).
- * La relación $r\text{Mg}^{+2}/r\text{Ca}^{+2}$ tiende a crecer también en dirección a la costa, mostrando los valores más altos (> 1) en los Basaltos Miocenos (Custodio, 1978).
- * La relación $r(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ presenta valores superiores a 1 en Basaltos Miocenos y piroclastos del Ciclo Roque Nublo, a excepción de que sean aguas que ya tengan una salinidad muy alta. Se da el caso de un aumento brusco en el perfil Cumbre de Gran Canaria-Telde relacionado con la presencia de sedimentos de la Formación Detrítica de Las Palmas en los que aumenta la disolución de carbonatos (Custodio, 1978; Cabrera, 1995; Cabrera y Custodio, 2004).
- * La relación $r\text{Cl}^-/r(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{-2})$ es función del recorrido y de la aportación profunda por emanaciones de CO_2 . La relación aumenta aguas abajo ya que el contenido en CO_2 disminuye más rápido que el crecimiento de Cl^- , hasta que se consume toda su agresividad y sufre un descenso notable en las zonas de la isla donde existen aguas con CO_2 de origen volcánico.
- * La relación $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r\text{Cl}^-$ muestra normalmente un exceso de alcalinos que hace subir la relación por encima de 1, aunque en aguas con alta salinidad puede llegar a dominar el ión

Cl. El aporte de aguas de retornos de riego tiene como consecuencia una rápida elevación de la relación.

5.1.3.- *Características generales de la hidroquímicas de la zona de estudio*

El primer modelo conceptual de funcionamiento hidrogeoquímico en la zona de estudio fue establecido por Muñoz *et al.* (1996) partiendo de trabajos anteriores. Este modelo conceptual propone que existe un flujo de agua desde los basaltos hacia el aluvial y por lo tanto, el agua extraída es mezcla de ambas unidades hidrogeológicas y muestra características hidrogeoquímicas acorde con esta mezcla. Los procesos de empeoramiento de la calidad de las aguas subterráneas identificados fueron: una contaminación debida a los retornos de riego en las zonas agrícolas, una leve intrusión marina en la costa, un aporte de origen geológico que afecta a toda la superficie de estudio debido a los Basaltos Miocenos y las Ignimbritas Traquítico-Riolíticas y otro aporte de tipo geológico de aguas con alta salinidad localizado en la zona de Las Tabladas atribuido a los depósitos conocidos como Azulejos.

En el trabajo titulado "Estudio hidrogeológico de los procesos de salinización en el acuífero de San Nicolás de Tolentino" (Delgado, 1998) se estudiaron los factores que provocan la salinización del acuífero. Las conclusiones de este trabajo coincidieron con los resultados del proyecto anterior (Muñoz *et al.*, 1996) en que los factores litológicos y agrícolas son los principales elementos que contribuyen a la salinización del acuífero, pero no contempló la intrusión marina como fuente de salinización e identificó una posible aridificación de la recarga en su lugar.

El estudio hidrogeoquímico realizado en Muñoz (2005) permitió separar varias familias hidrogeoquímicas de aguas que reflejan la explotación de diferentes materiales y la actuación de los diferentes mecanismos de salinización en el acuífero.

En lo que respecta a las distintas familias de agua y para tener una visión general de la distribución espacial de la composición química de las aguas subterráneas, Muñoz (2005) representó en un mapa de la zona los análisis químicos de los distintos pozos en Diagramas de Stiff modificados para las campañas de campo de 1992 y 1999 (Figura 5.1 y Figura 5.2). Estos diagramas permiten distinguir distintas familias hidroquímicas en la zona dependiendo de la composición química de sus elementos mayoritarios. Las familias hidroquímicas más destacadas y su localización se describen a continuación:

- * Aguas Cloruradas Sódicas y Cloruradas Cállicas: las aguas Cloruradas Sódicas se concentran en la cabecera y desembocadura del barranco de La Aldea y en el barranco de Tocodomán, observándose un aumento de la salinidad en el sentido del flujo. Estas aguas son originadas por el aporte del aerosol marino y la aridificación de la recarga de la lluvia. Las Cloruradas Cállicas aparecen a lo largo del barranco principal y representa a las aguas mezcla de aerosol marino, retornos de riego y aporte de agua de los basaltos.

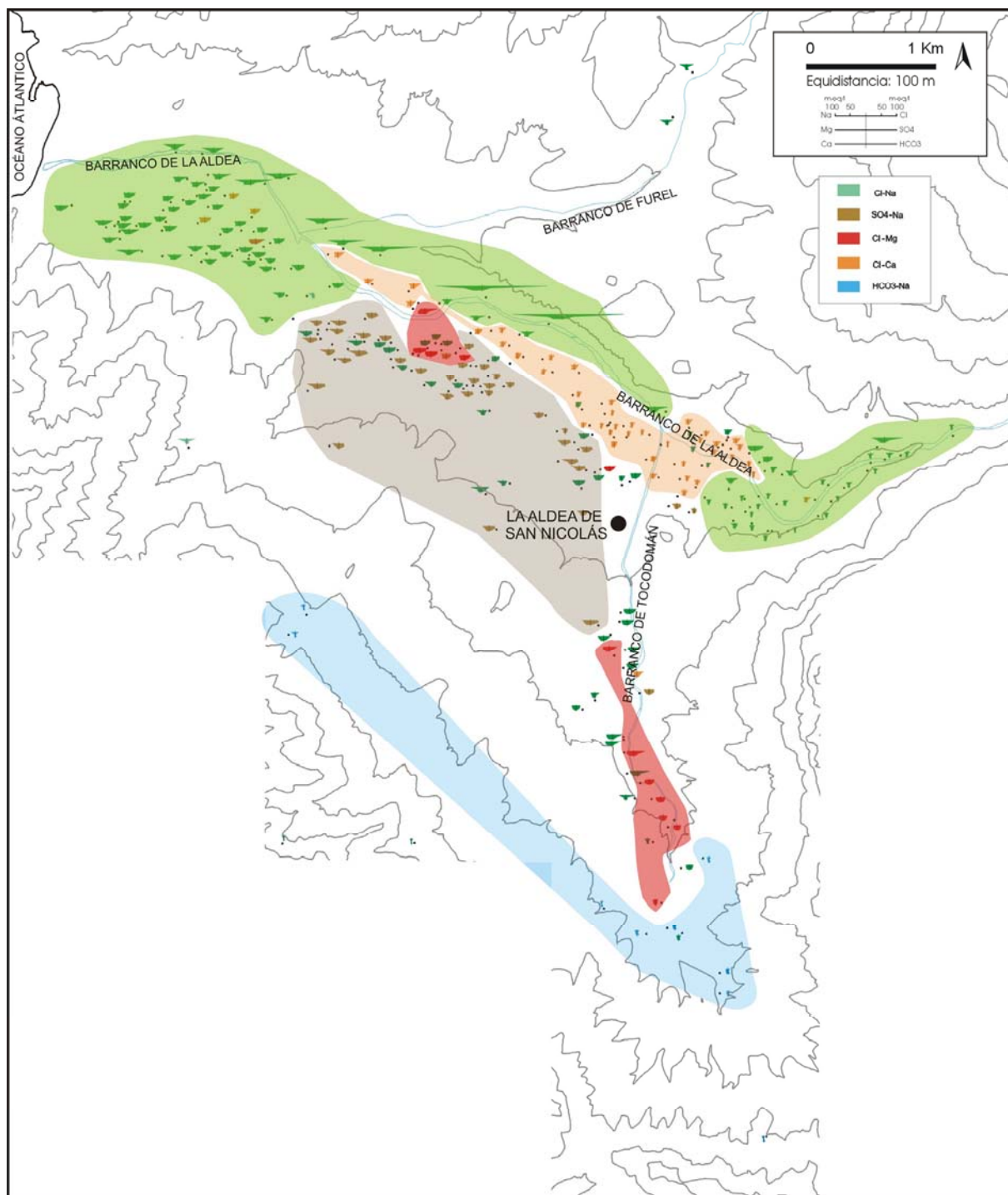


Figura 5.1. Diagramas de Stiff modificados de las aguas subterráneas representativas en la zona de estudio para la campaña de campo realizada en 1992 (Modificado de Muñoz, 2005).

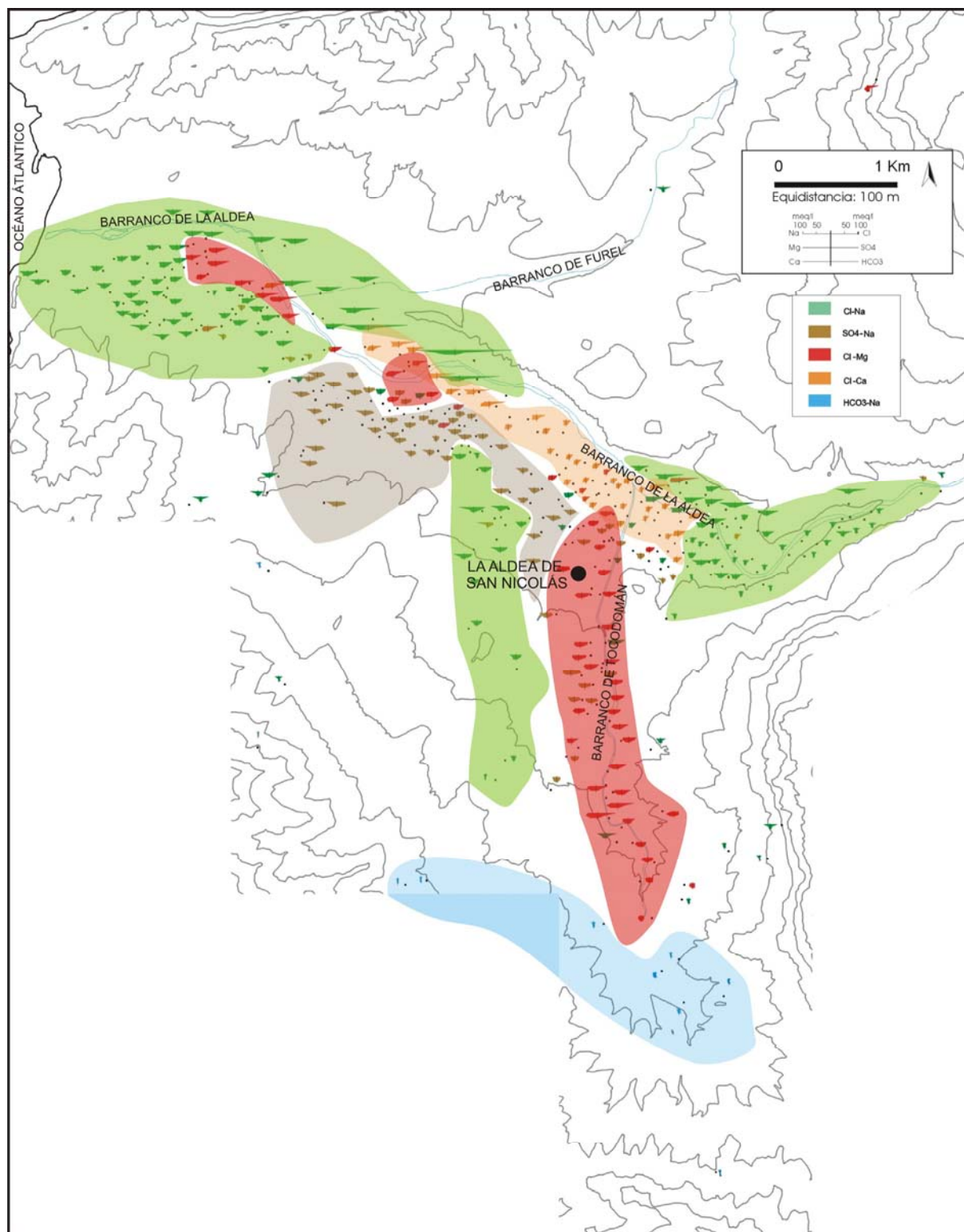


Figura 5.2. Diagramas de Stiff modificados de las aguas subterráneas representativas en la zona de estudio para la campaña de campo realizada en 1999 (Modificado de Muñoz, 2005).

- * Aguas Sulfatadas Sódicas: aparecen en el cauce medio del barranco principal de La Aldea, aguas abajo de la confluencia con el barranco de Tocodomán. En Tocodomán aparece algún punto hacia la mitad del barranco. Son originadas principalmente por los retornos de riego. En la ladera oeste del barranco de Tocodomán aparecen unas aguas Sulfatadas Magnésicas, que deben tener la marca geológica de los basaltos y de los retornos de riego. En ambas aguas se observa una alta concentración de nitratos.
- * Aguas Cloruradas Magnésicas: se concentra principalmente en el tramo medio del barranco de Tocodomán aunque también aparecen algunas agrupaciones pequeñas situadas en el tramo medio y bajo del cauce del barranco principal de La Aldea. Aparecen en pozos que explotan los Basaltos Miocenos principalmente en el barranco de Tocodomán, por lo que presentan una clara marca geológica atribuida a los mismos.
- * Aguas Bicarbonatadas Sódicas: se observan en la cabecera del barranco principal y de Tocodomán. Estas aguas responden al agua de infiltración de las zonas altas si no se ven afectadas por ningún mecanismo de salinización.

Con respecto a los mecanismos de salinización, Muñoz (2005) caracteriza cinco fenómenos de salinización del acuífero que van permitir identificar distintas mezclas de agua dentro del mismo: la explotación de aguas antiguas de los Basaltos Miocenos, el lavado de los Azulejos en la zona de Las Tabladas, los retornos de riego en las zonas agrícolas, la aridificación de la recarga en toda el área de estudio y la influencia marina en conos de bombeo en la zona costera.

Otras conclusiones de Muñoz (2005) son:

- * Las aguas de los Basaltos Miocenos tienen una marca hidroquímica muy definida que se aprecia principalmente en el barranco de Tocodomán donde éstos basaltos constituyen la única unidad productiva. En el barranco principal de La Aldea también se observa un cambio de aguas entre 1992 y 1999, pasando de Clorurado-Sódicas a Clorurado-Magnésicas al aumentar la explotación. Otra de las características hidroquímicas de las aguas procedentes de los basaltos son los altos contenidos en HCO_3^- y SiO_2 y relaciones $r\text{Mg}^{+2}/r\text{Ca}^{+2}$ más altas que las procedentes de los sedimentos aluviales.
- * La aridificación de la recarga se pone de manifiesto en la caracterización del agua de lluvia. Los distintos colectores localizados en la zona muestran una mineralización progresiva en función de la cercanía al mar y la altitud. Esta mineralización se produce mediante dos agentes: la adquisición de sales marinas por aridificación de la recarga y la salinidad aerotransportada, tanto del aerosol marino como del polvo atmosférico.

- * Los retornos de riego tienen una influencia muy patente en el acuífero, principalmente en los contenidos de SO_4^{-2} y NO_3^- , con cifras que alcanzan los 1850 y 700 mg/l respectivamente. En los nacientes de las partes bajas del barranco, los contenidos de estos componentes son mucho más altos que los que están situados en las zonas altas de las laderas, reflejando el impacto de las prácticas agrícolas. Los estudios isotópicos de ^{34}S confirman que los SO_4^{-2} proceden de los fertilizantes y pesticidas que utiliza la agricultura.

Se ha realizado un estudio estadístico y una representación espacial de los distintos parámetros químicos obtenidos en los pozos de la zona de estudio para las campañas de campo de 1992 y 1999 (Tabla 5.1 y Tabla 5.2) y se han comparado con los datos obtenidos en la campaña de verano (Junio 2006) de la red de control actual (Tabla 5.3). Debido a la diferencia en el número de datos en las distintas campañas los resultados de estas comparaciones no van a ser significativos desde un punto de vista cuantitativo pero si van a mostrar una idea de la evolución temporal de los distintos elementos químicos analizados. Los datos para el resto de las campañas de la red de control actual se pueden ver en la Tabla A.15 del Anejo 5.

Tabla 5.1. *Datos estadísticos de los distintos parámetros químicos obtenidos en los análisis de laboratorio para los pozos de la zona de estudio en la campaña de 1992 (en mg/l, excepto la conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$).*

1992		C.E.	SiO ₂	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
Número de datos		250	250	250	250	250	250	250	250	250	242
Media		3437.5	43.7	170.8	133.2	428.2	12.8	260.0	592.5	711.1	88.4
Desv. típica		1916.1	17.0	96.4	87.2	391.5	7.9	79.5	352.6	786.4	85.4
Mínimo		9.4	9.6	12.8	8.5	37.7	0.8	96.0	13.9	31.6	1.6
Máximo		13900.0	94.2	631.2	781.1	3910.0	47.3	523.2	1853.8	8153.6	484.2
Percentiles	25	1935.0	32.1	108.3	67.8	211.5	7.2	193.8	260.9	373.9	27.9
	50	3505.0	40.7	161.2	130.6	362.7	11.1	250.8	633.6	586.8	65.1
	75	4452.5	55.6	231.8	181.1	506.1	16.5	312.0	859.8	794.5	124.4
	95	5906.0	74.6	292.0	264.7	879.1	27.2	398.2	1088.5	1476.6	275.2

Tabla 5.2. *Datos estadísticos de los distintos parámetros químicos obtenidos en los análisis de laboratorio para los pozos de la zona de estudio en la campaña de 1992 (en mg/l, excepto la conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$).*

1999		C.E.	SiO ₂	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
Número de datos		373	370	373	373	373	373	373	373	373	362
Media		4571.6	52.0	248.3	207.2	559.3	20.5	235.9	800.9	1110.4	175.8
Desv. típica		2803.3	16.2	163.2	128.3	435.5	12.2	87.5	381.7	1061.3	101.3
Mínimo		971.0	5.7	12.4	14.5	106.7	2.4	5.4	9.6	158.0	1.3
Máximo		20300.0	114.9	1043.6	827.4	3693.8	99.7	540.6	1851.8	7477.0	708.7
Percentiles	25	2865.0	39.6	149.5	117.6	308.5	13.5	176.1	543.6	568.9	108.5
	50	4150.0	50.5	218.2	186.6	457.9	18.0	231.6	815.0	782.8	166.5
	75	5055.0	64.2	301.4	260.2	658.1	24.2	285.9	1045.7	1252.4	226.6
	95	9109.0	79.6	571.8	439.7	1229.0	40.0	393.0	1482.7	2939.8	339.7

Tabla 5.3. Datos estadísticos de los distintos parámetros químicos obtenidos en los análisis de laboratorio para los pozos de la zona de estudio para la campaña de junio del 2006 de la red de control actual (en mg/l, excepto la conductividad eléctrica en $\mu\text{S/cm}$).

Junio 2006		C.E.	SiO ₂	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
Número de datos		11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Media		4268	53.33	183.10	156.74	522.43	16.16	261.24	622.22	926.82	205.19
Desv. típica		3035	17.93	138.75	140.91	358.81	12.96	94.09	547.56	975.44	192.44
Mínimo		837	33.16	11.60	13.07	88.38	2.69	160.92	25.12	129.47	9.44
Máximo		11370	83.83	479.91	507.55	1231.28	50.26	493.17	1841.05	3662.74	544.02
Percentiles	25	1767	36.33	67.46	46.86	251.17	8.35	196.79	149.29	364.57	27.38
	50	4360	54.94	192.87	143.46	464.43	14.85	259.27	626.80	729.00	201.74
	75	5650	61.14	252.92	200.19	739.86	18.54	298.61	879.89	1023.57	365.34
	95	5950	81.96	282.20	255.53	886.48	22.32	323.12	1052.31	1228.01	420.24

Se analizan a continuación los parámetros químicos significativos:

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

El valor medio de las muestras de agua obtenidas en la zona de estudio es 3437 $\mu\text{S/cm}$ para 1992 y 4571 $\mu\text{S/cm}$ en 1999 lo que supone un aumento notable de la salinización del agua subterránea. Se ha producido también un aumento paralelo de los valores mínimos y máximos.

La media obtenida para la campaña de junio de 2006 de la red de control actual es 4271 $\mu\text{S/cm}$. Este valor están más próximos a los resultados obtenidos en 1999 que a los obtenidos en 1992.

En la Figura 5.3 se puede observar la distribución espacial de la conductividad para las campañas de 1992 y 1999. Se aprecia que los mayores valores de conductividad se localizan en el contacto del aluvial con Las Tabladas, la zona baja del barranco de Tocodomán, la zona sur el barranco principal y la desembocadura de este. Los valores mínimos de conductividad se observan en los pozos localizados en los Basaltos Miocenos y en la cabecera del barranco principal. La comparación de ambos mapas evidencia el aumento de la salinidad sufrido por el acuífero.

CLORURO

Los cloruros son sales generalmente muy solubles y muy difíciles de precipitar. Se le considera un ión típicamente conservativo y un excelente trazador químico porque apenas experimenta intercambios en el agua. Es el anión más abundante en el agua del mar y su contenido en el agua de lluvia depende de la distancia a la costa y de la intensidad de las precipitaciones. Suele ir asociado al sodio. En la zona de estudio, los valores muy altos de este ión deben su origen geológico a los Azulejos de Las Tabladas. Otros orígenes de cloruros son el reciclaje de aguas de riego y el agua de recarga que lo contiene en cierta medida.

La concentración media de cloruros es 711 mg/l para 1992 y 1110 mg/l para 1999. Aunque se alcanzan valores superiores a los 7500 mg/l en ambos años, suelen ser casos puntuales ya que el 95% de los valores está por debajo de los 1500 mg/l para 1992 y 3000 mg/l para 1999. La media para la red de control actual es 926 mg/l por lo que no se observa una disminución importante en las concentraciones de cloruro para este periodo con respecto a 1999.

Las mayores concentraciones se localizan en el contacto de Las Tabladas con el aluvial principal. También se observan concentraciones altas en la parte intermedia y la desembocadura del barranco de Tocodomán y en el barranco del Furel (Figura 5.4), así como en la desembocadura del barranco principal para 1999. En general, existe coincidencia entre la dirección del flujo subterráneo y el aumento en el contenido de Cl⁻, aunque localmente se aprecian algunas desviaciones en los pozos cercanos a Las Tabladas y en principales barranco de Tocodomán.

NITRATO

En la zona de estudio, la concentración media de este elemento es de 88 mg/l para 1992 y 175 mg/l para 1999 lo que supone un aumento apreciable en la concentración para este periodo de tiempo. Los valores máximos son 484 mg/l para 1992 y 708 mg/l para 1999. El valor medio para la red de control actual es 205 mg/l, esto supone un pequeño aumento con respecto a los resultados de 1999. Los valores máximos se localizan en la desembocadura del barranco de Tocodomán y la parte sur del barranco principal para 1992. En 1999 altos valores de nitratos ocupaban casi todo el aluvial (Figura 5.5).

Según la Directiva 91/676/CEE (1991) relativa a las aguas destinadas a consumo humano, se establece una concentración máxima admisible de 50 mg/l de nitratos que es superada en la mayoría de los análisis realizados en la zona de estudio, por lo que el agua subterránea no es apta para el consumo.

SULFATO

En la zona de estudio las actividades agrícolas son la principal fuente de sulfatos, ya que se utiliza frecuentemente como soporte de fertilizantes.

La concentración media de SO₄⁻² es 592 mg/l para 1992 y 800 mg/l para 1999, con un valor de concentración máximo para ambos años de 1850 mg/l. Para la red de control actual la concentración media es 622 mg/l. Su distribución espacial (Figura 5.6) muestra cierto paralelismo con los NO₃⁻.

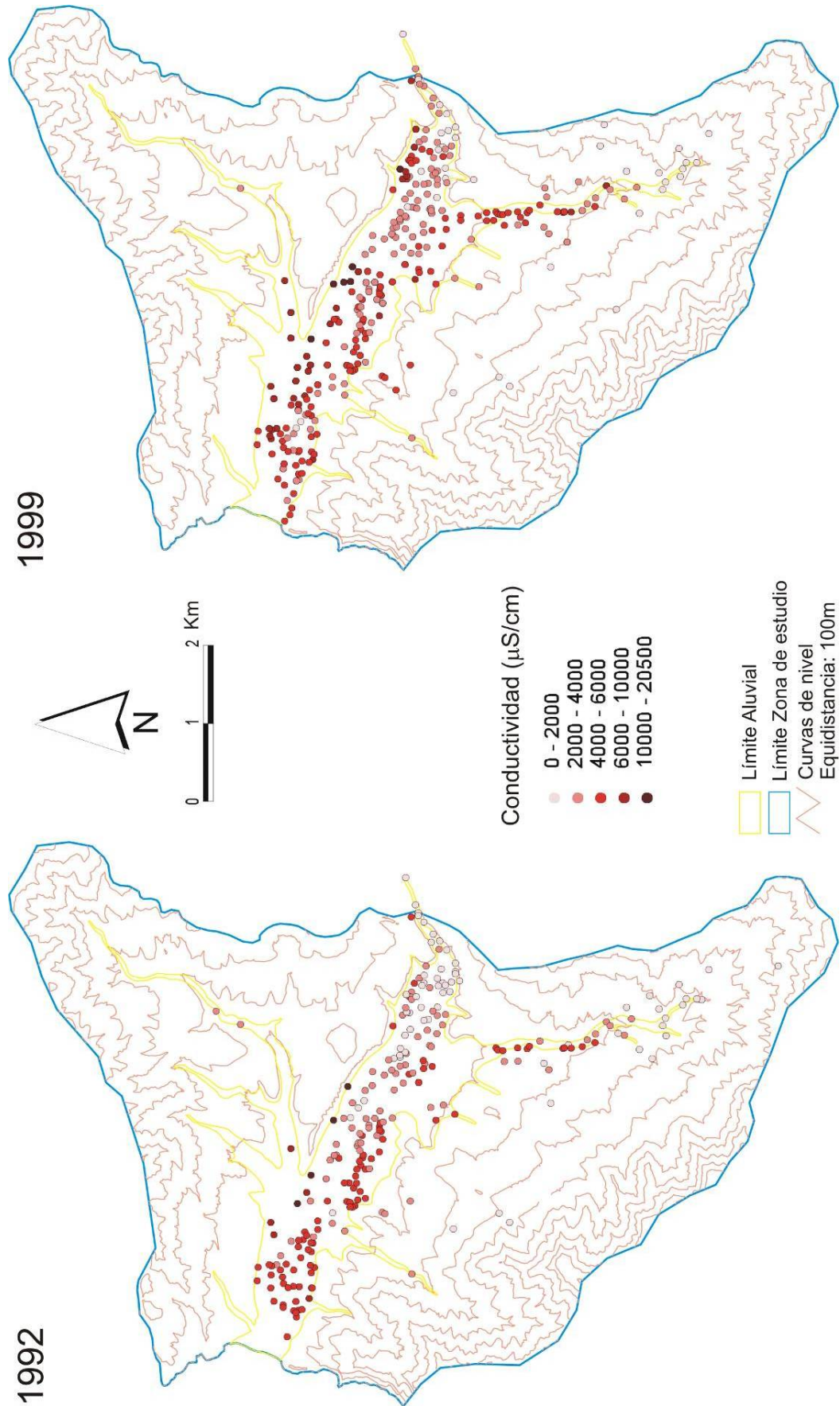


Figura 5.3. Distribución espacial de la conductividad eléctrica en la zona de estudio para las campañas de campo de 1992 y 1999.

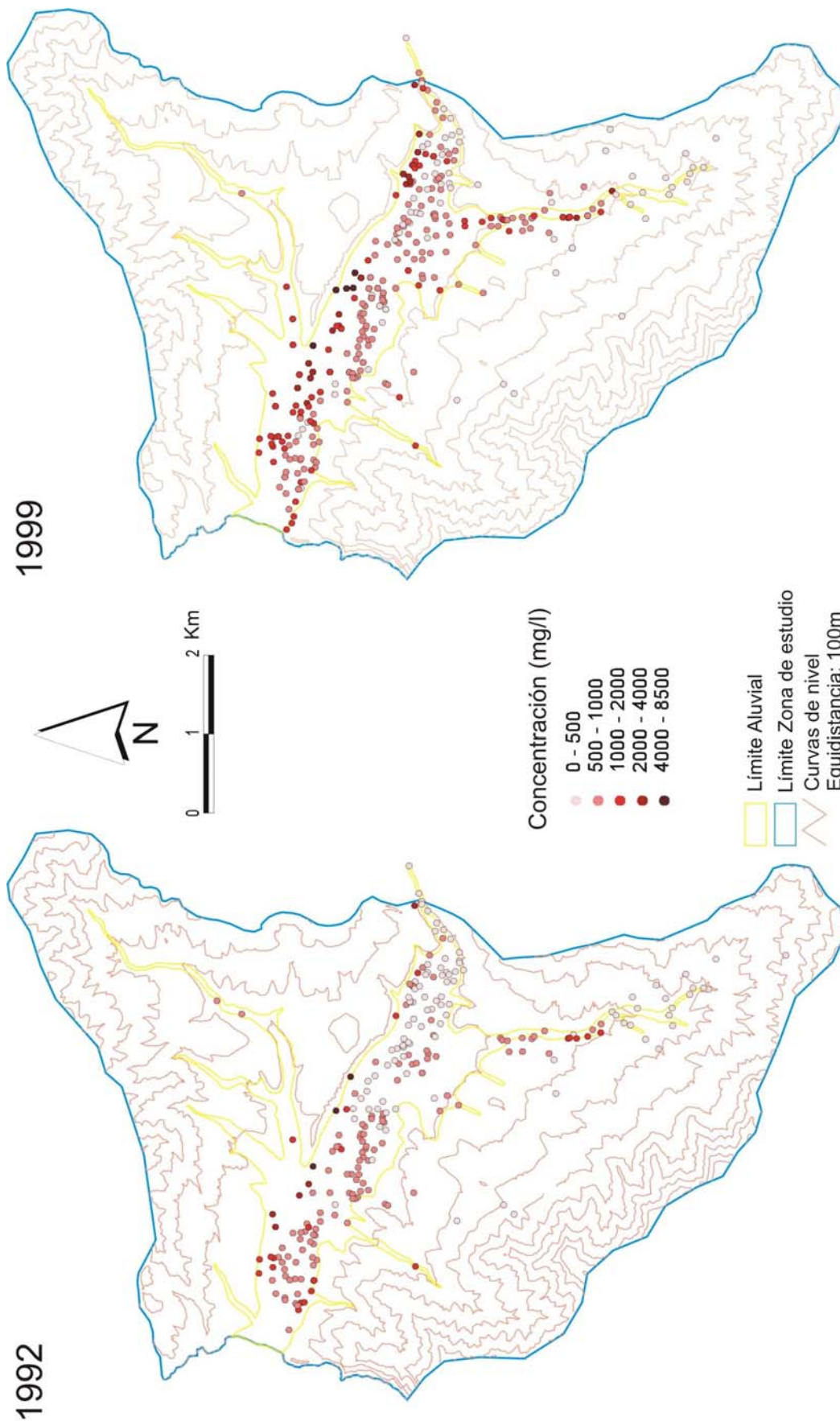


Figura 5.4. Distribución espacial de Cl en la zona de estudio para las campañas de campo de 1992 y 1999.

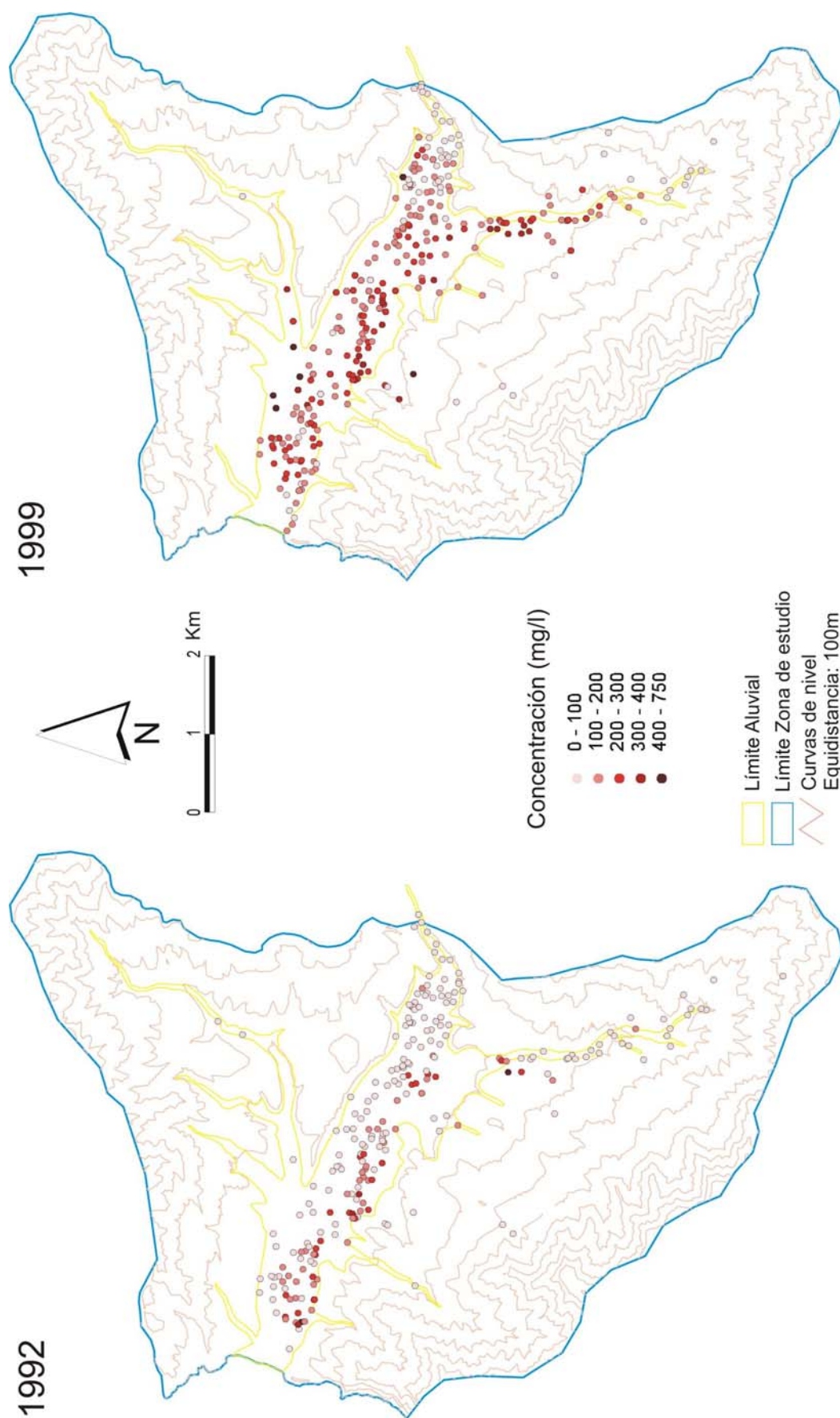


Figura 5.5. Distribución espacial de NO_3^- en la zona de estudio para las campañas de campo de 1992 y 1999.

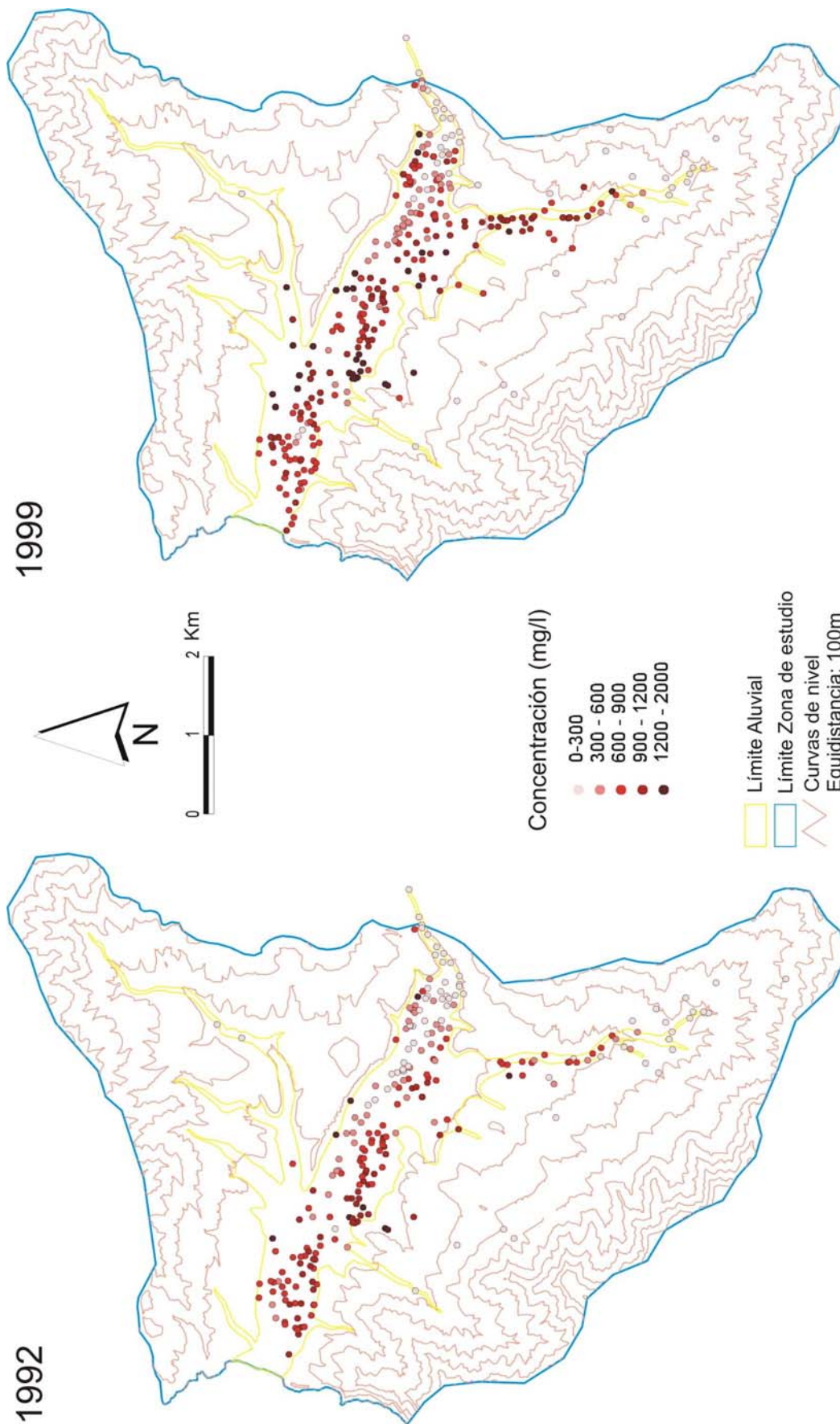


Figura 5.6. Distribución espacial de SO_4^{2-} en la zona de estudio para las campañas de campo de 1992 y 1999.

MAGNESIO

El magnesio tiene su origen principal en las rocas basálticas y es aportado en la zona de estudio por minerales como el dióxido y la forsterita, aunque también el agua del mar posee elevados contenidos en magnesio.

El valor medio del contenido en magnesio obtenido en el conjunto de las aguas subterráneas del acuífero estudiado es 133 mg/l para 1992 y 207 mg/l para 1999 lo que supone un aumento de la concentración en este periodo de tiempo. El valor mínimo oscila en 100 mg/l y el máximo en 800 mg/l para ambos años. La media obtenida para la red de control actual es 156 mg/l. La concentración de magnesio en el agua subterránea de la zona depende de que los pozos se localicen en el aluvial o en los basaltos, y de su profundidad, ya que a mayor profundidad, se le supone mayor tiempo de contacto con la roca. Así, los pozos más profundos muestran un mayor contenido en Mg^{+2} .

Los mayores valores se observan en el contacto de Las Tabladas con el aluvial principal, su distribución espacial es parecida a la del Cl^- (Figura 5.7).

RELACIÓN rMg/rCl

Dada la alta concentración de magnesio en el agua de mar, el estudio de esta relación tiene cierto interés para evaluar la posible mezcla de agua de origen meteórico con agua marina. Sin embargo el estudio de esta relación debe ser tomado con precaución debido a posibles aportes de magnesio al agua como consecuencia de la alteración de los basaltos (Custodio y Llamas, 1996).

En la Tabla 5.4 se muestra la concentración de rMg y rCl y los valores de la relación rMg/rCl para las muestras de agua de mar, lluvia, escorrentía (I y II tomadas en el aluvial principal y III en Tocodomán), presas, riego y retornos de riego por hidroponía. El valor de esta relación para el agua de mar es de 0.21, el valor para el agua de lluvia oscila entre 0.03 y 0.57, con un valor medio de 0.2 que podría indicar la influencia del aerosol marino. Para las muestras de escorrentía y de presa esta relación aumenta por el aporte de magnesio al agua por el lavado del suelo. El valor de la relación para la muestra de retornos de riego de hidroponía es de 1.21. Esta agua recarga el acuífero en toda el área de estudio, por lo que contribuye al aumento de esta relación en el agua de los pozos.

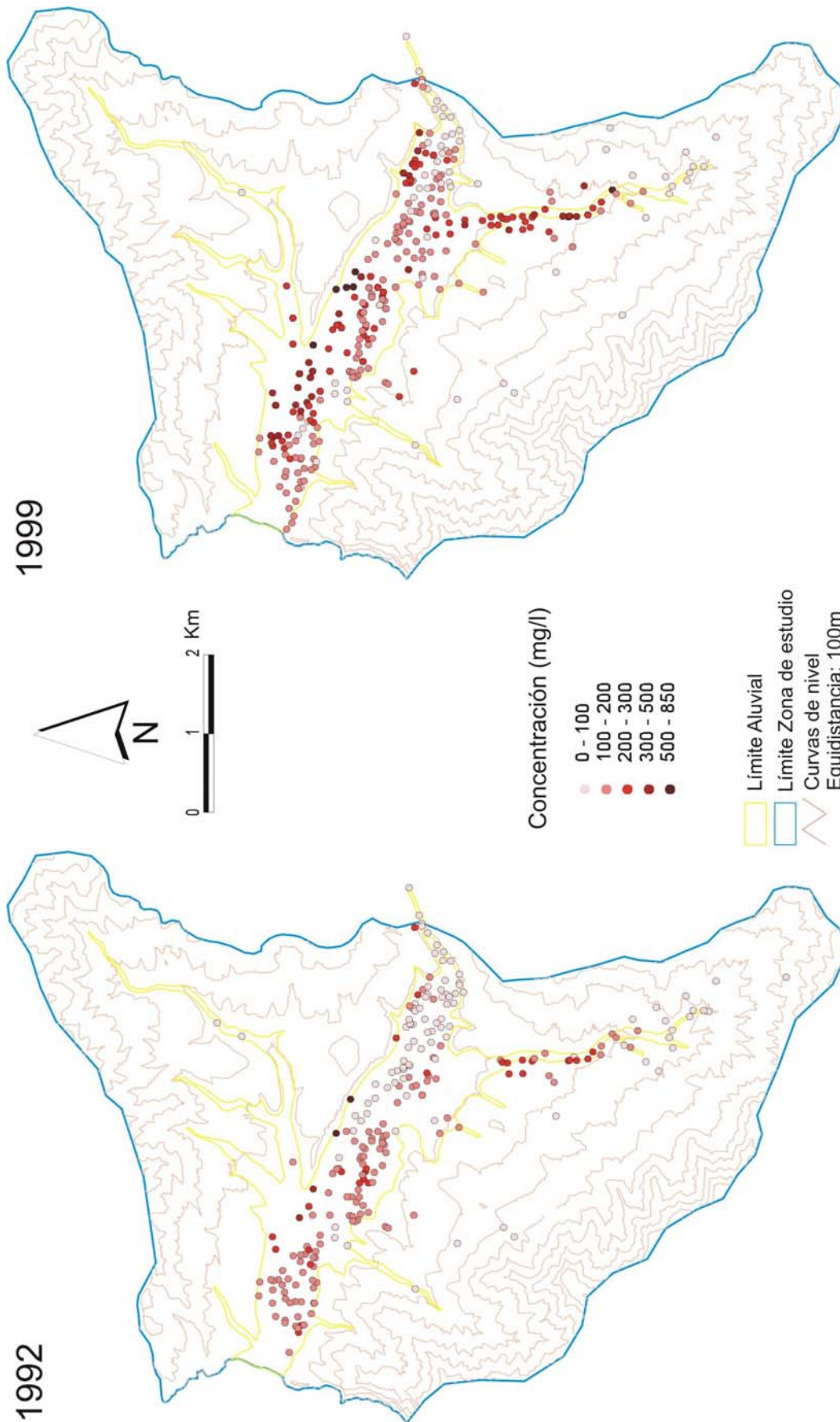


Figura 5.7. Distribución espacial de Mg^{+2} en la zona de estudio para las campañas de campo de 1992 y 1999.

Tabla 5.4. Concentración de rMg y rCl y los valores de la relación rMg/rCl para las muestras de agua de mar, lluvia (distintas fechas), escorrentía (I y II tomadas en el aluvial principal y III en Tocodomán), presas, riego y retornos de riego por hidroponía.

	rMg	rCl	rMg/rCl
Agua de mar	122.21	571.07	0.21
Agua de riego La Aldea	1.36	1.53	0.89
Contaminación hidroponía	3.61	2.98	1.21
ESCORRENTÍA I	1.01	2.30	0.44
ESCORRENTÍA II	0.96	2.02	0.48
ESCORRENTÍA III	13.05	15.84	0.82
Presa El Caidero de la Niña	1.16	1.15	1.01
Presa El Parralillo	2.30	1.46	1.58
Presa Siberio	0.41	0.70	0.58
Lluvia E107	1.15	7.19	0.16
	0.21	4.60	0.04
	0.08	2.93	0.03
Lluvia E263	0.82	5.25	0.16
	0.49	1.72	0.29
	0.29	1.81	0.16
Lluvia E219	0.66	5.59	0.12
	0.29	1.10	0.26
	0.29	0.51	0.57

En la Figura 5.8 se representa la relación rMg vs. rCl y rMg/rCl vs. rCl para las muestras de agua de mar, lluvia, escorrentía, presas, retornos de riego por hidroponía y pozos localizados en el aluvial, derrubios de ladera, basaltos y aluviales secundarios (Furel y Tocodomán) para las campañas de campo de 1992 y 1999. Se observa que la mayoría de los pozos se sitúan por encima del valor marino excepto los pozos de cabecera y los pozos con influencia de Las Tabladas con mayor concentración de cloruros que se sitúan en torno al valor marino. Para los pozos ubicados en cabecera, esta aproximación con el valor marino puede ser atribuida al aporte del aerosol marino al agua de lluvia que produce la recarga. Para los pozos ubicados en Tocodomán no se puede atribuir el origen al aporte del aerosol marino a la relación de estas muestras. En los pozos localizados en el aluvial y los derrubios de ladera, los valores de la relación se sitúan entre el valor marino y el de los retornos de riego. En los pozos localizados en Tocodomán y los basaltos esta relación se sitúa por encima del valor del mar e incluso llega a superar el valor de los retornos de riego, esto evidencia otros aportes de magnesio como consecuencia del lavado de los basaltos que son el principal aporte de agua en esta zona.

En la Figura 5.9 se muestra la distribución espacial de la relación rMg/rCl en la zona de estudio para las campañas de campo de 1992 y 1999, los mayores valores de la relación se sitúan en el barranco de Tocodomán y en la zona central del aluvial principal (donde los pozos explotan los Basaltos Miocenos), los menores se ubican en los derrubios de ladera, barranco secundario de Furel y cabecera del aluvial principal.

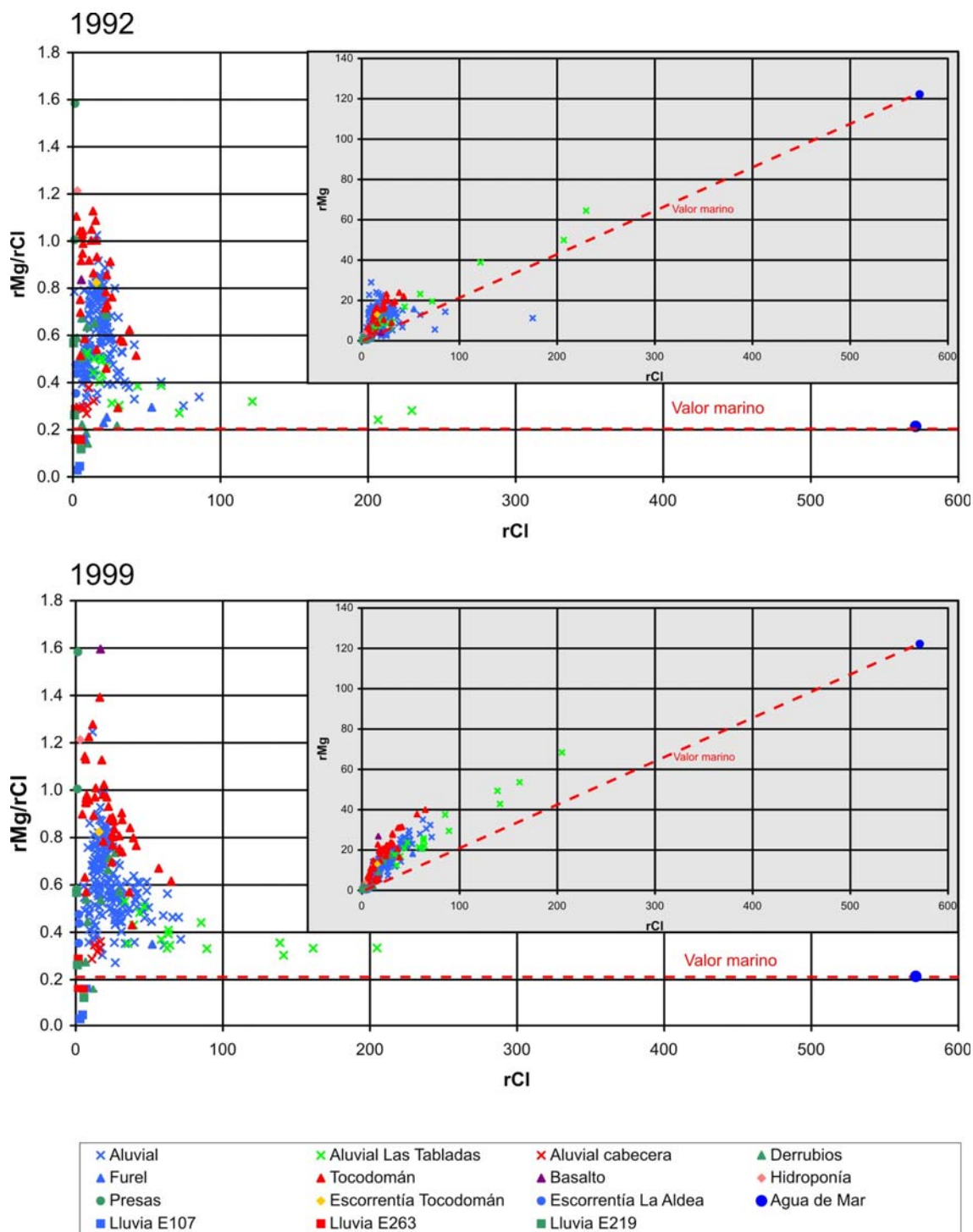


Figura 5.8. Representación de las relaciones rMg vs. rCl y rMg/rCl vs. rCl para las muestras de agua de mar, lluvia, escorrentía, presas, retornos de riego por hidroponía y pozos localizados en el aluvial, derrubios de ladera, basaltos y aluviales secundarios (Furel y Tocodomán) para las campañas de campo de 1992 y 1999.

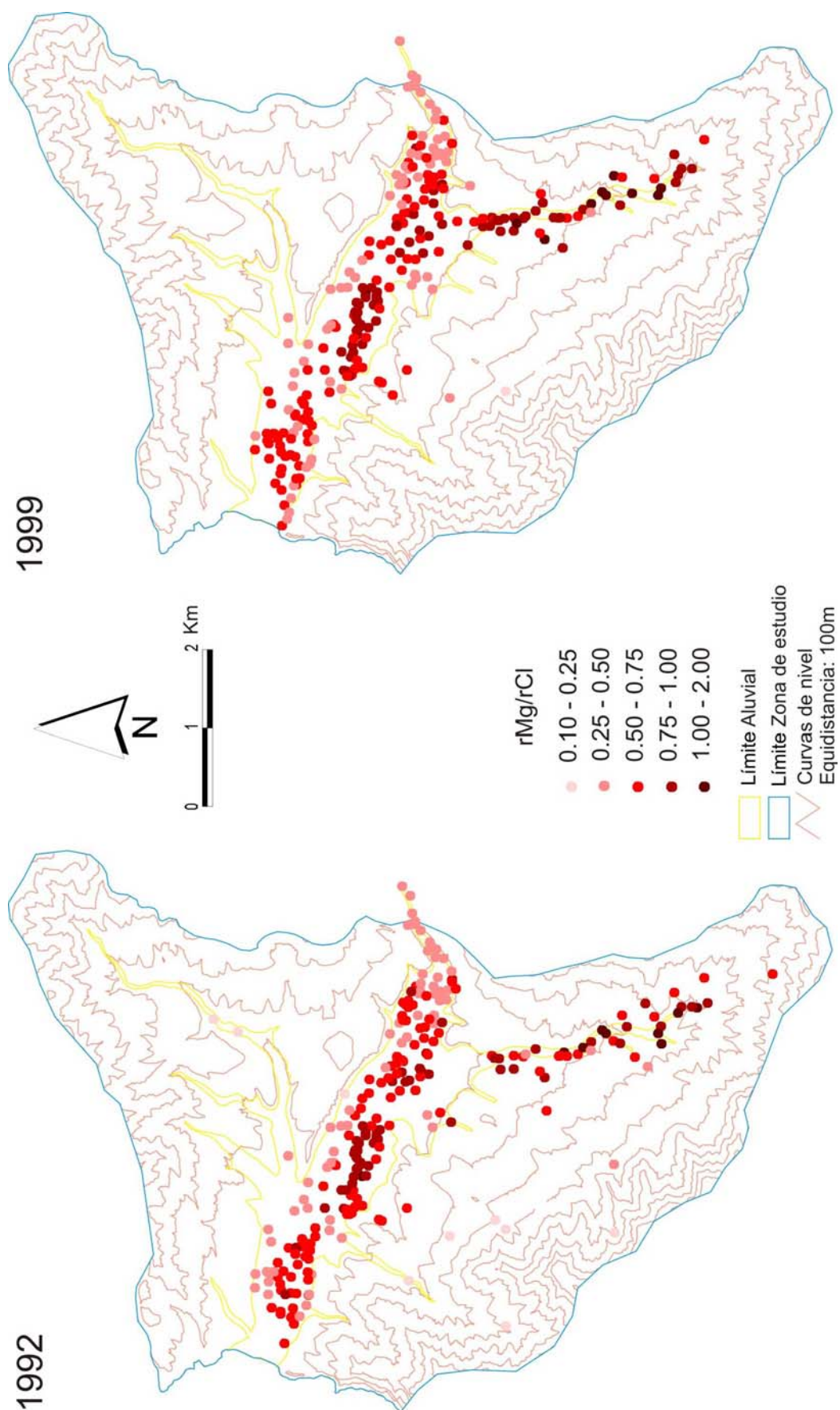


Figura 5.9. Distribución espacial de la relación rMg/rCl en la zona de estudio para las campañas de campo de 1992 y 1999.

5.2.- EVOLUCIÓN DE LA HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

En este apartado se ha realizado un estudio de las variaciones temporales en la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la zona. Para ello, se han elaborado diagramas de Schöeller-Berkaloff de las aguas tomadas de los pozos de la red de control actual (Figura 5.10), gráficas de evolución temporal de Cl^- , NO_3^- , Caudal Medio Continuo Equivalente (QMDE) y niveles piezométricos y diagramas de Piper. Los resultados químicos de la red de control actual usados para los distintos diagramas se pueden observar en la Tabla A.13 del Anejo 5.

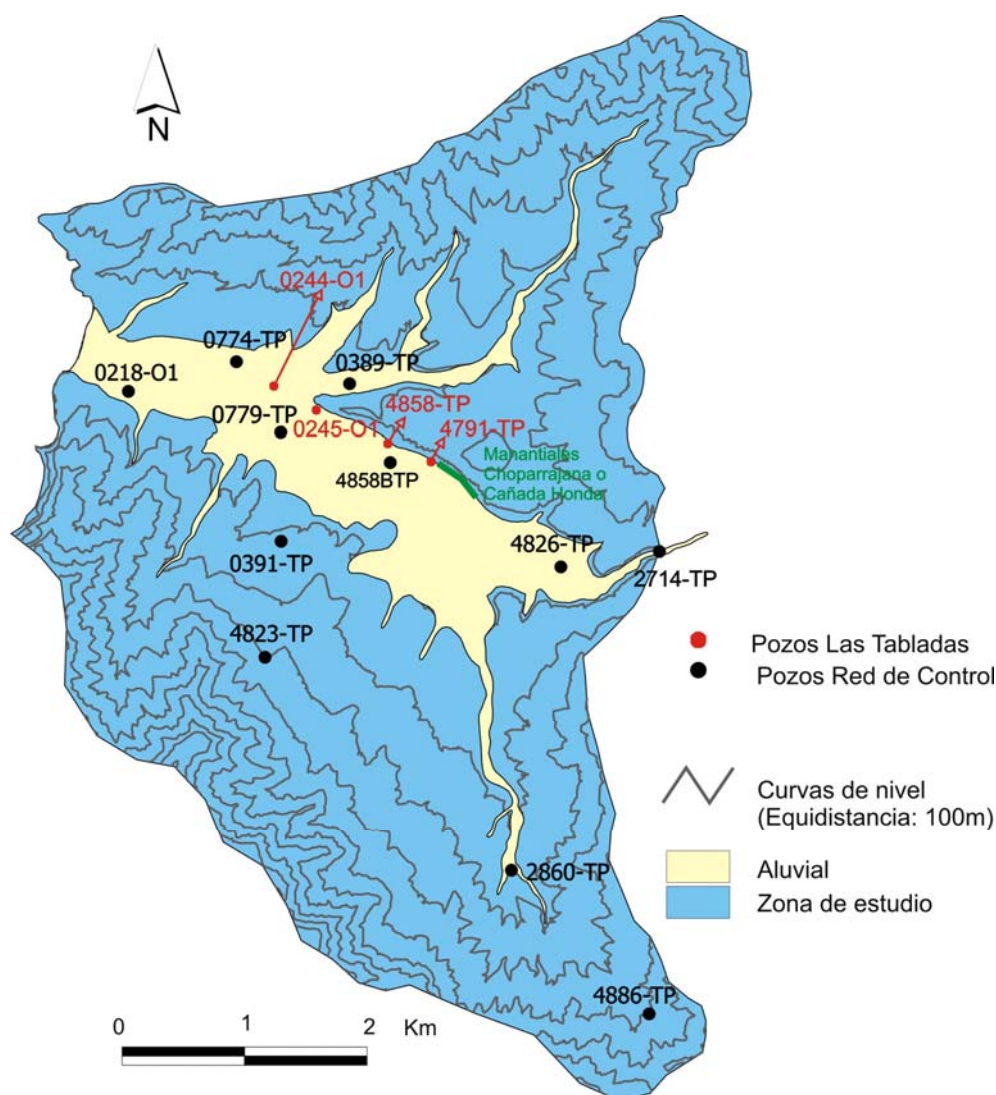


Figura 5.10. Localización de los pozos cercanos a Las Tabladas, manantiales de Choparrajana o Cañada Honda y los pozos de la red de control actual.

A continuación se exponen las observaciones realizadas en cada pozo:

- * 0218-O1: Este pozo está ubicado a cota 14, en la desembocadura del Barranco de La Aldea y extrae agua hasta cota -2 m. Su quimismo es estable, extrayendo aguas de una alta salinidad de tipo Clorurada Sódica. La concentración en NO_3^- es de 400 mg/l hasta 2003, aumentando a 600 mg/l a partir de 2005. Este incremento se acompaña de un aumento en SO_4^{2-} y Na^+ . Este pozo extrae agua del aluvial con una fuerte influencia marina, con importantes aportes de retornos de riego cuyo porcentaje aumenta a partir de agosto de 2005, coincidiendo con una subida de los niveles y un descenso de la explotación (Figura 5.11 y Figura 5.12).

0218-O1

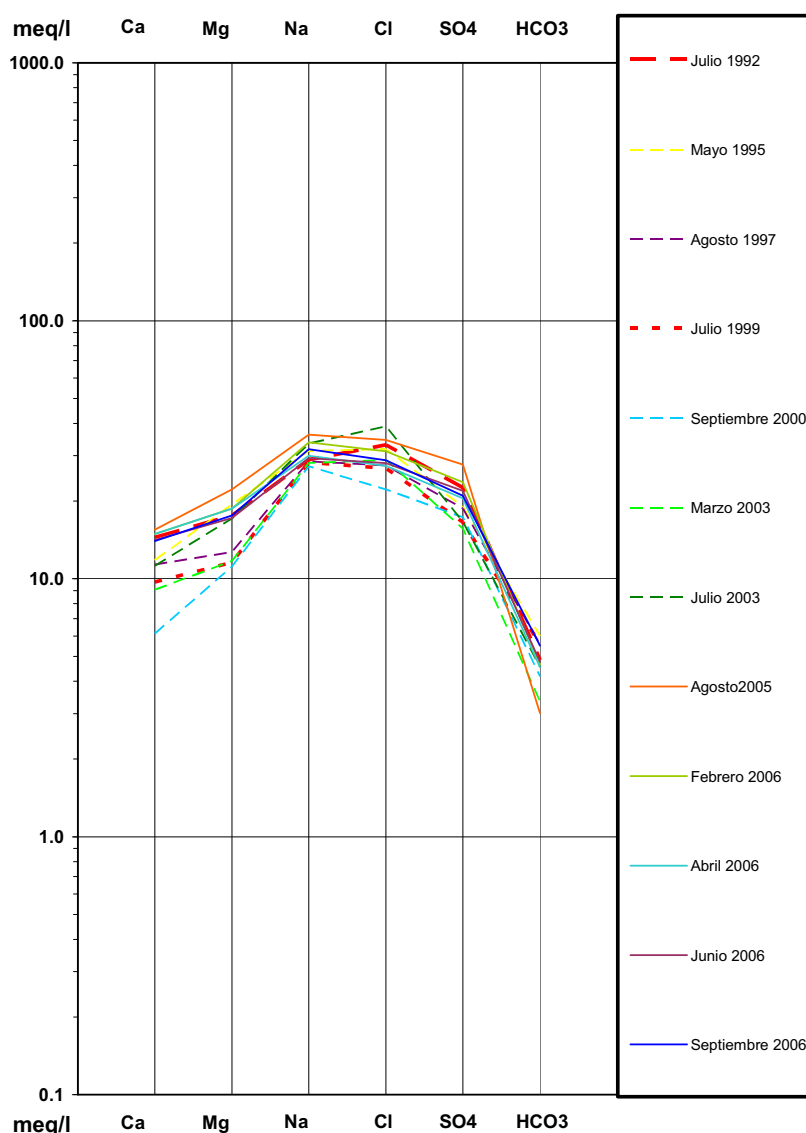


Figura 5.11. Diagrama de Schöeller-Berkaloff del pozo de la red de control actual 0218-O1.

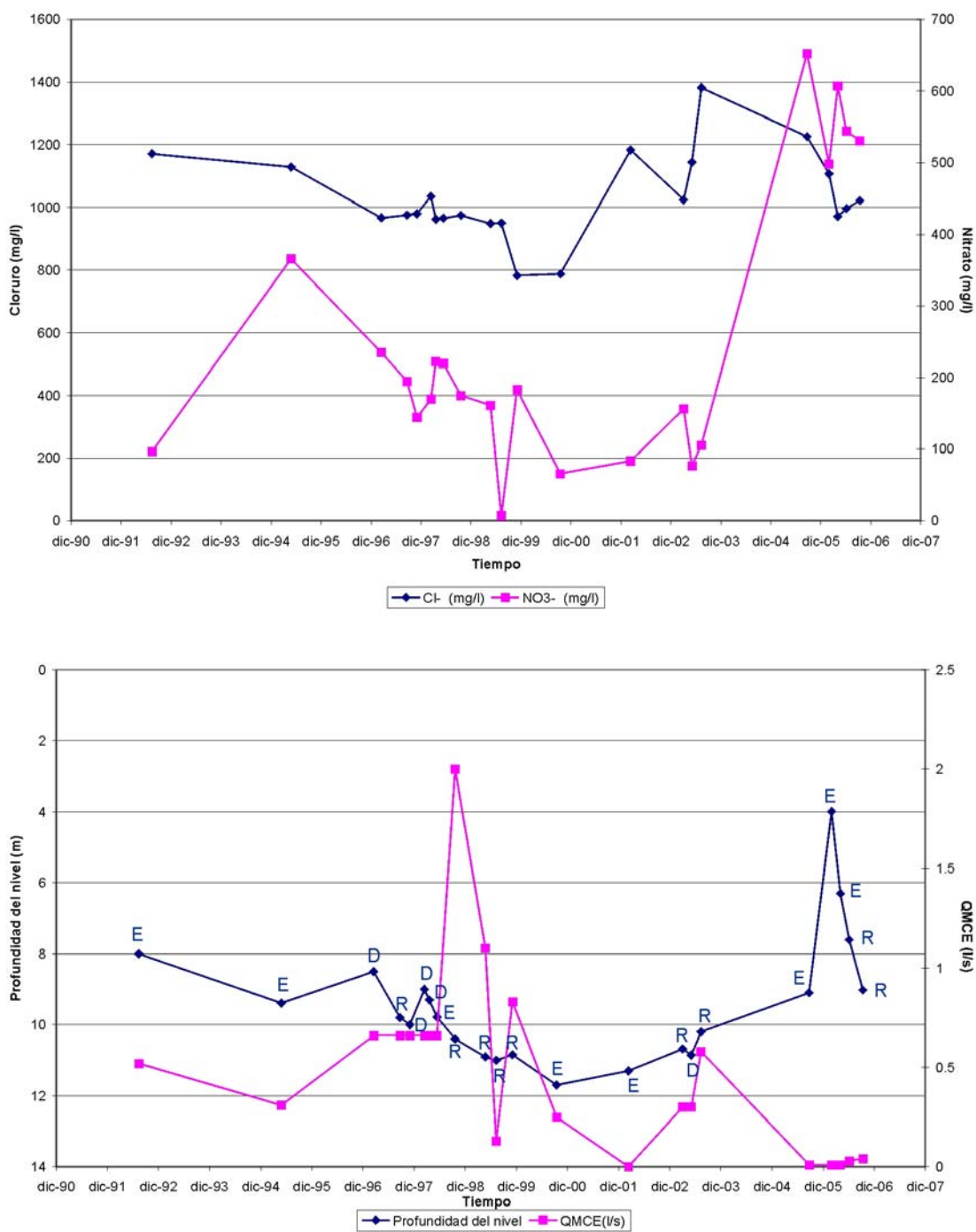


Figura 5.12. Evolución temporal de la concentración de cloruros y nitratos y de la profundidad de los niveles y los caudales medios continuos equivalente (QMCE) para el pozo de la red de control actual 0218-01. Nivel estático (E), dinámico (D) y recuperación (R).

- * 0389-TP: El pozo se ubica en la desembocadura del barranco de Furel a cota de 47 m y tiene 27 m de profundidad. Las aguas más salinas pertenecen a las muestras tomadas antes de agosto de 2005. A partir de estas fechas se observa un exceso de Na^+ con respecto al Cl^- , acompañado de un aumento de la concentración de NO_3^- , que alcanza los 400 mg/l, lo que indica un aporte de retornos de riego. A partir de 2005, se produce un descenso de la explotación unido a un aumento de los niveles. En general las aguas del aluvial en esta zona son Cloruradas Sódicas con influencia marina y de retornos de riego (Figura 5.13 y Figura 5.14).

0389-TP

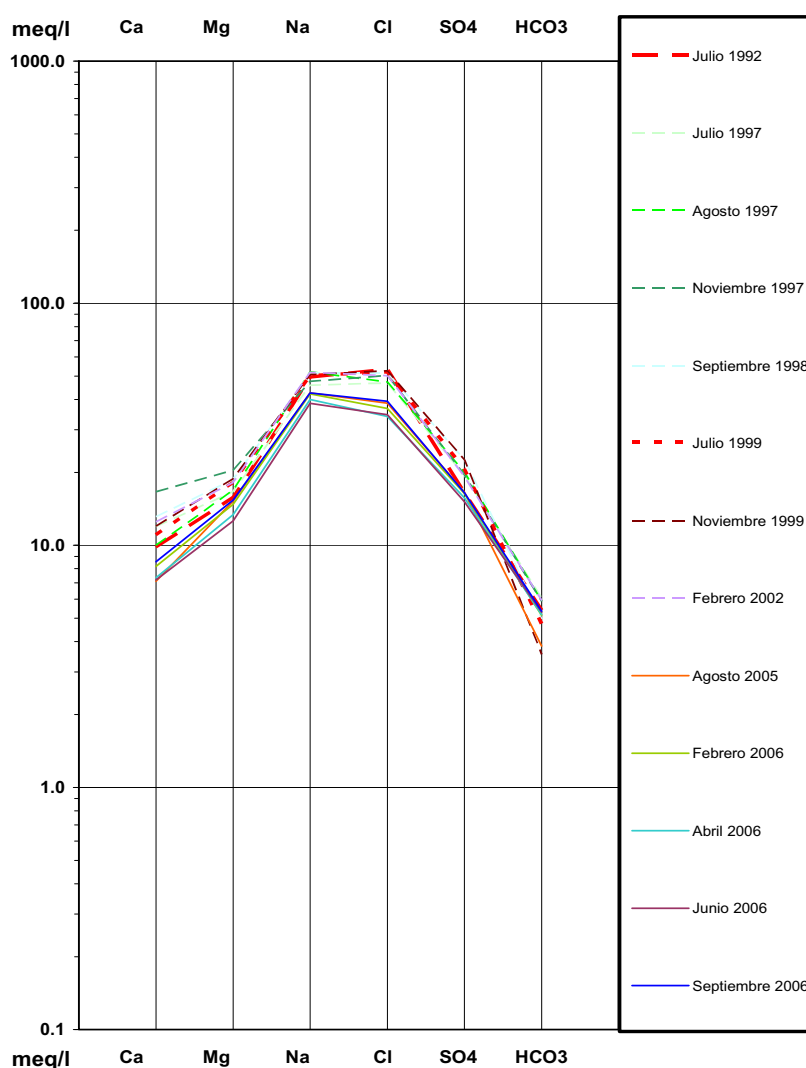


Figura 5.13. Diagrama de Schöeller-Berkaloff del pozo de la red de control actual 0389-TP.

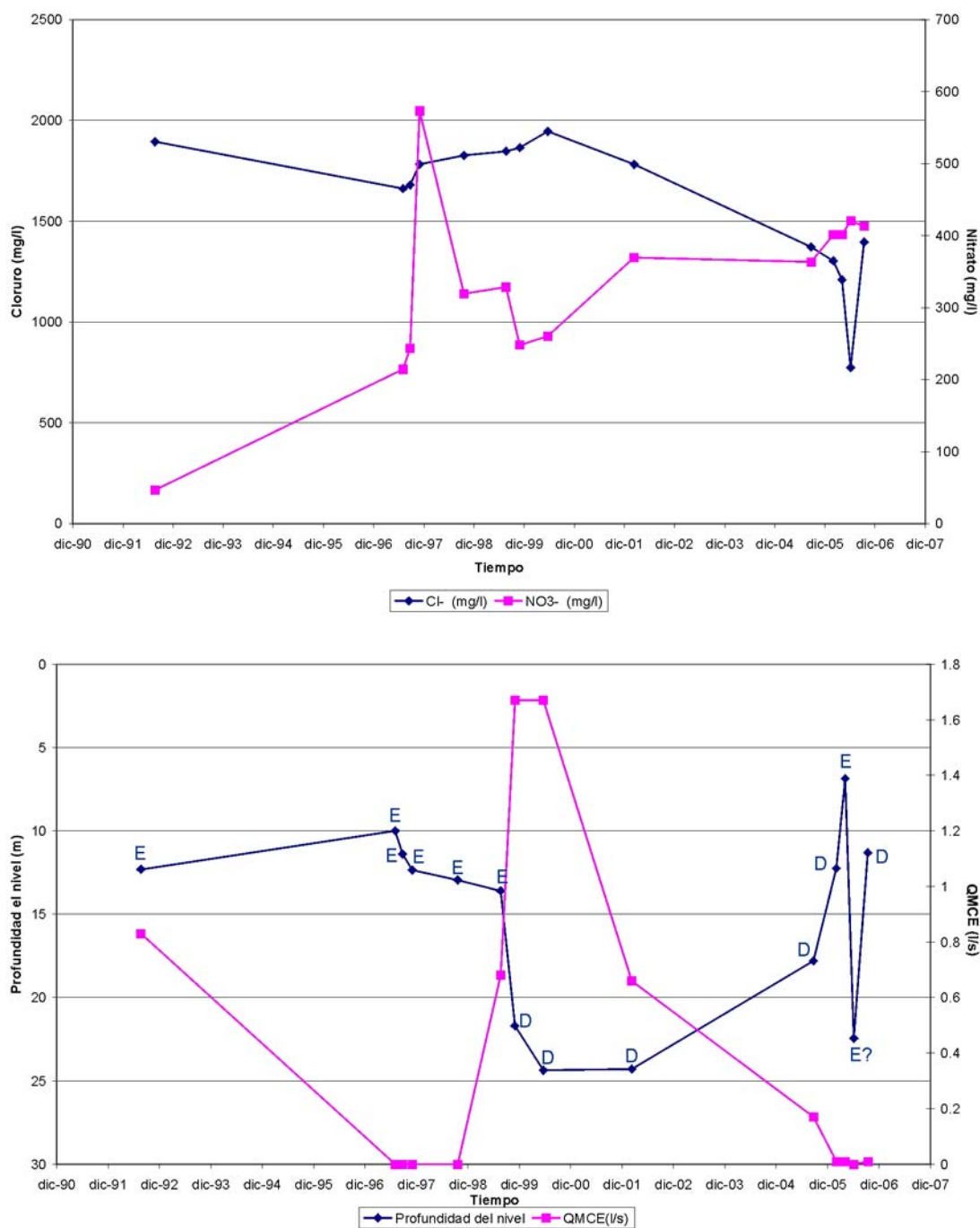


Figura 5.14. Evolución temporal de la concentración de cloruros y nitratos y de la profundidad de los niveles y los caudales medios continuos equivalente (QMCE) para el pozo de la red de control actual 0389-TP. Nivel estático (E), dinámico (D) y recuperación (R).

- * 0391-TP: El pozo está localizado a cota de 114 m sobre derrubios de ladera en la ladera de la montaña ubicada al sur del barranco principal de La Aldea. Las aguas son del tipo Sulfatadas Sódicas y sufren una salinización notable a partir de julio de 1999. La concentración de NO_3^- varía entre 200 y 500 mg/l en las muestras posteriores a 1992 lo que apunta a una alta influencia de los retornos de riego en el agua del pozo (Figura 5.15 y Figura 5.16).

0391-TP

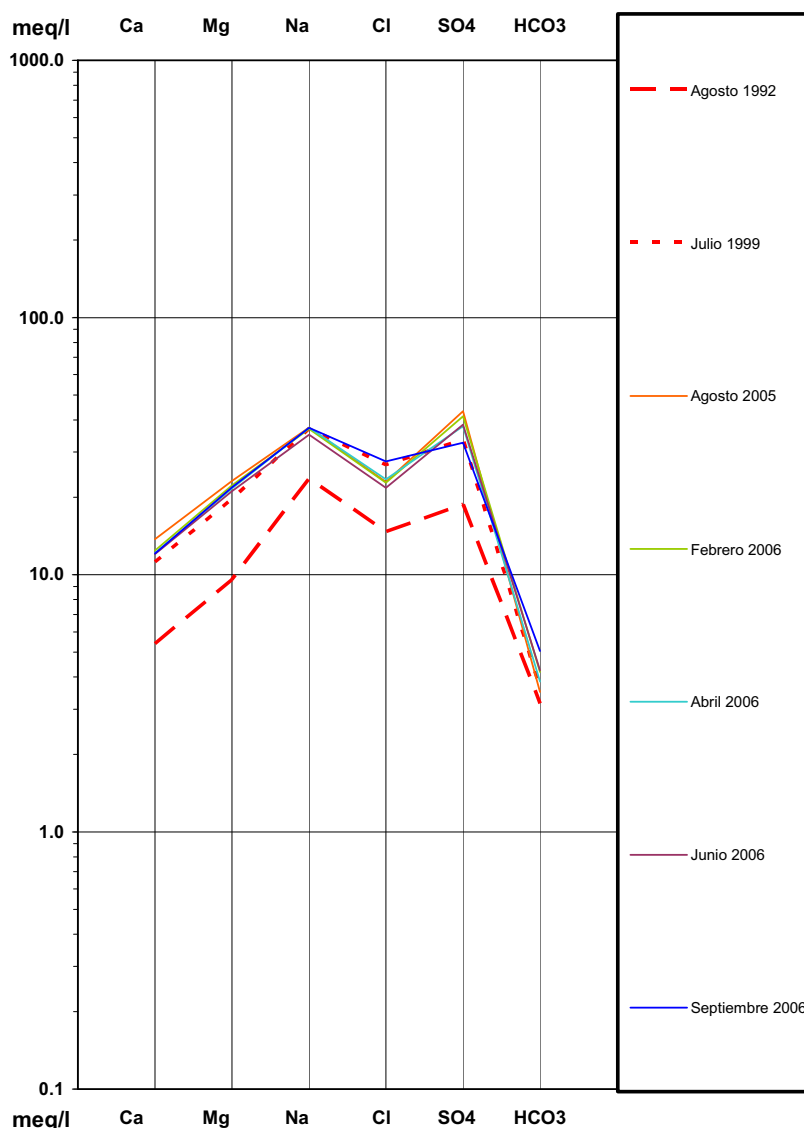


Figura 5.15. Diagrama de Schöeller-Berkaloff del pozo de la red de control actual 0391-TP.

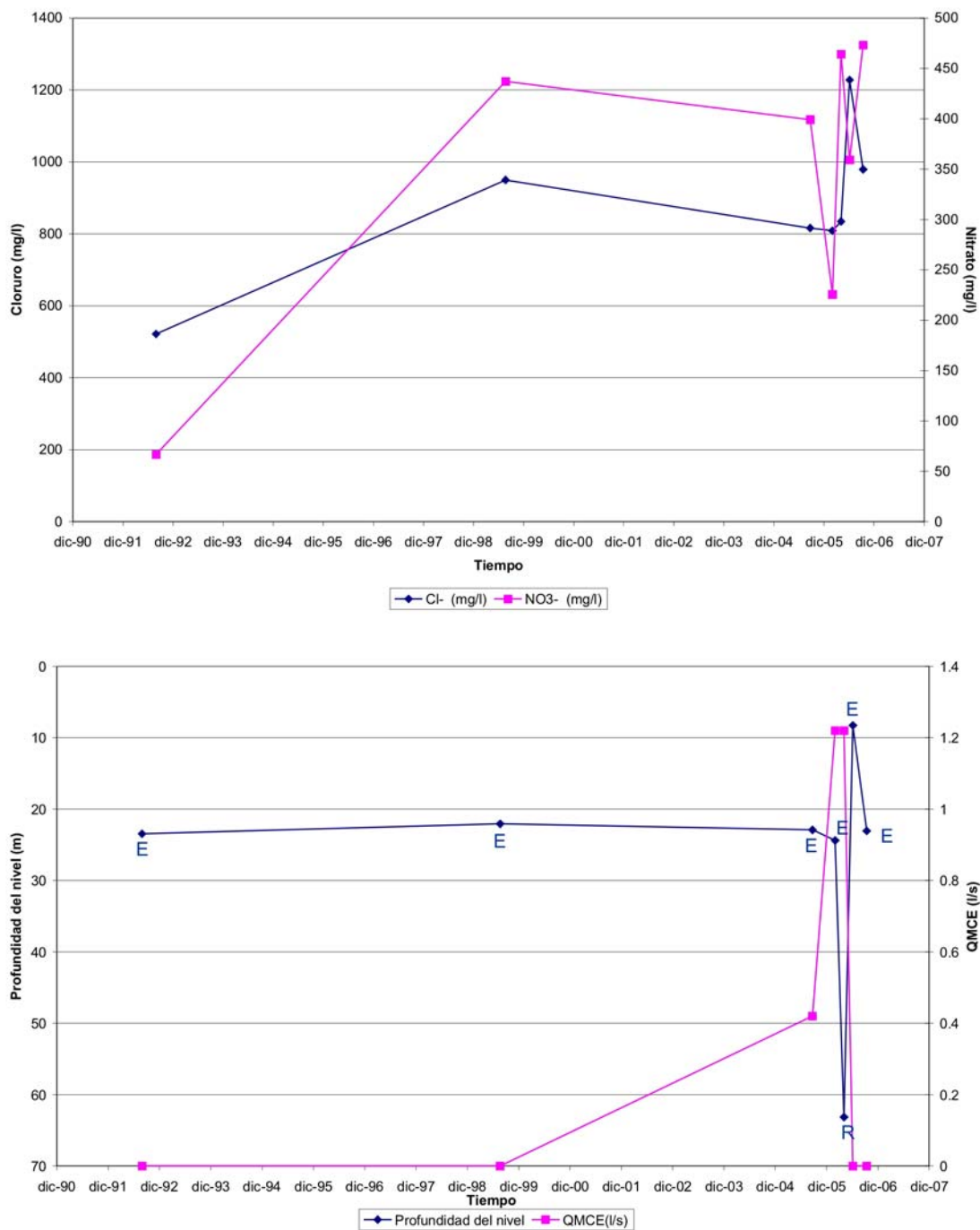


Figura 5.16. Evolución temporal de la concentración de cloruros y nitratos y de la profundidad de los niveles y los caudales medios continuos equivalente (QMCE) para el pozo de la red de control actual 0391-TP. Nivel estático (E) y recuperación (R).

- * 0774-TP: Este pozo se emplaza en el margen norte del barranco principal de La Aldea a 19 m de altitud y tiene una profundidad de 24 m. Se trata de aguas Cloruradas Sódicas con altos contenidos en NO_3^- (hasta 500 mg/l) y exceso de Na^+ . La salinidad del agua baja en épocas de lluvia intensa (Abril-Junio 2006) así como los contenidos en NO_3^- y el exceso de Na^+ . Así se trata de un agua con una fuerte influencia de los retornos de riego que debe recibir recarga directa y a través del cauce en épocas de lluvia (Figura 5.17 y Figura 5.18).

0774-TP

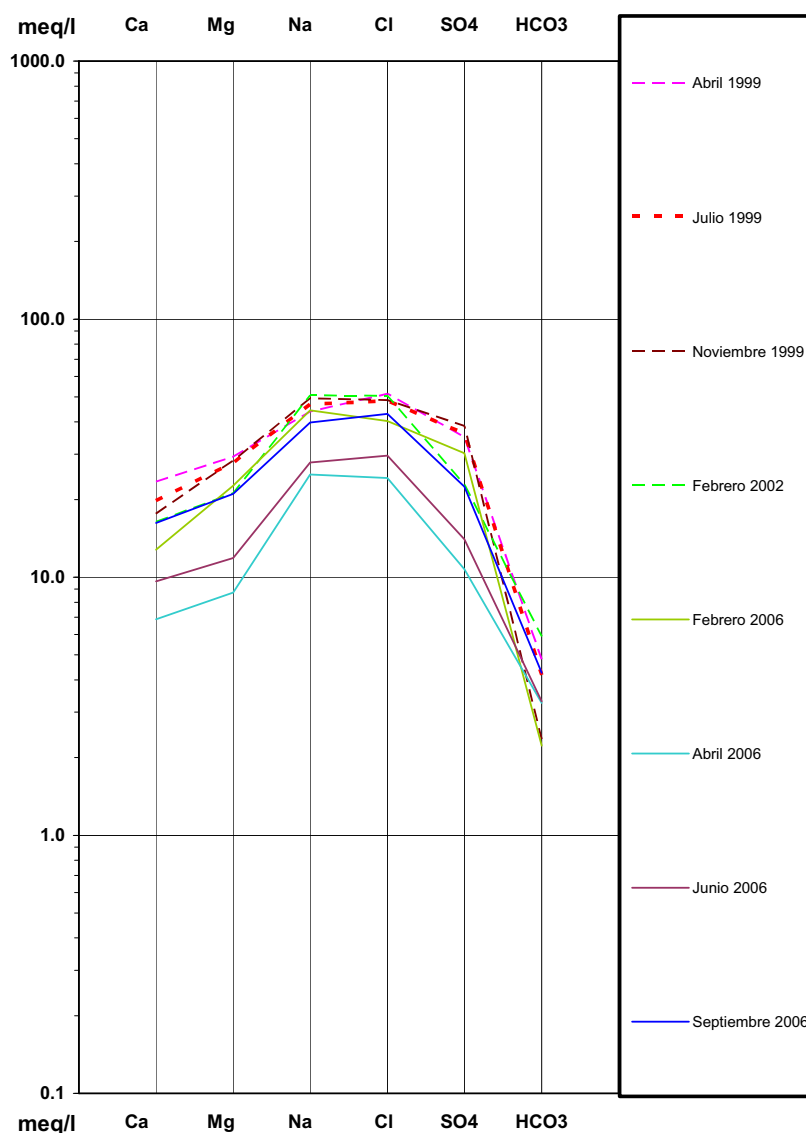


Figura 5.17. Diagrama de Schöeller-Berkaloff del pozo de la red de control actual 0774-TP.

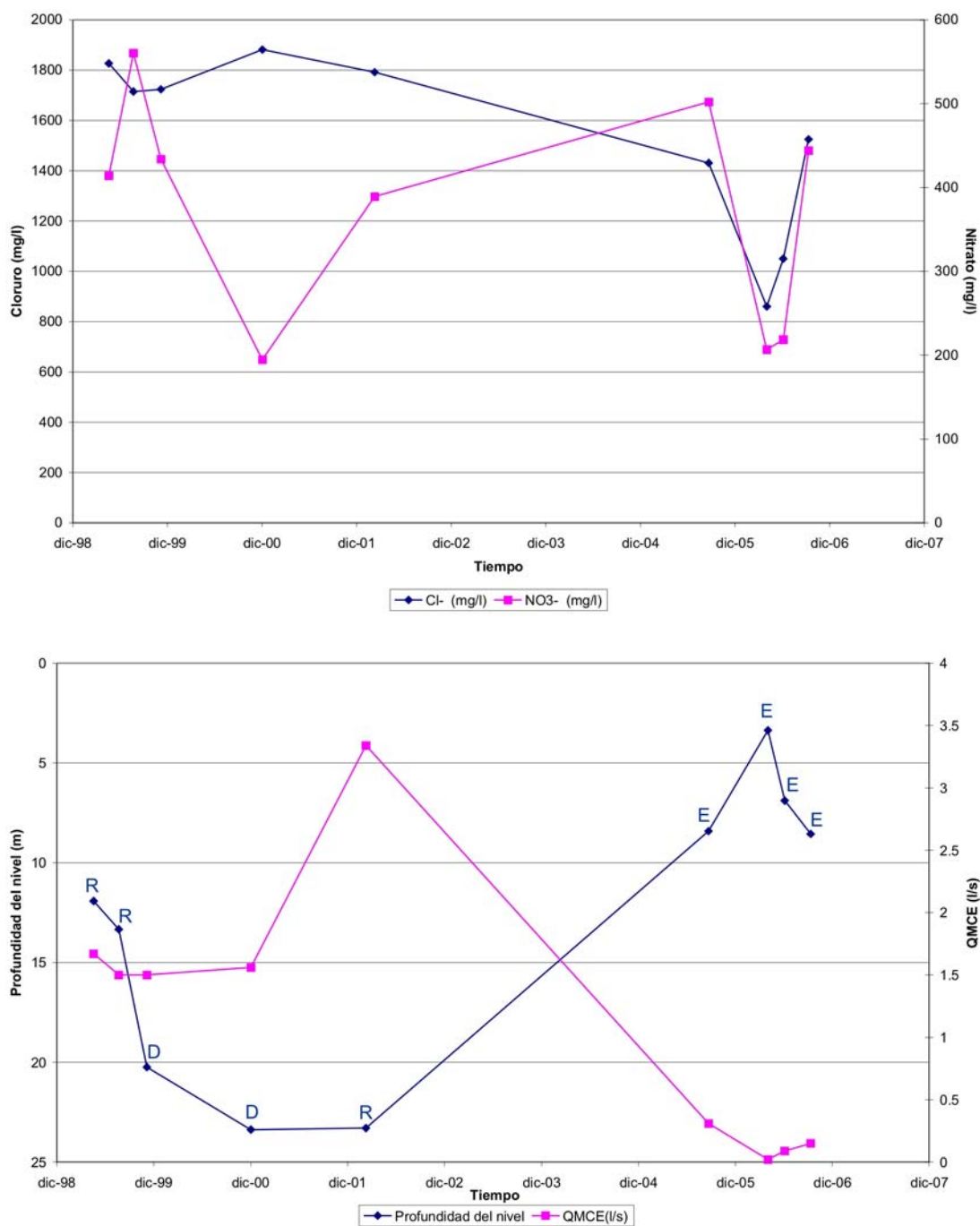


Figura 5.18. Evolución temporal de la concentración de cloruros y nitratos y de la profundidad de los niveles y los caudales medios continuos equivalente (QMCE) para el pozo de la red de control actual 0774-TP. Nivel estático (E), dinámico (D) y recuperación (R).

- * 0779-TP: Se localiza en el centro del barranco principal de La Aldea a cota de 31 m y tiene una profundidad de 35 m. Se observa una clara mezcla de agua, habiendo aguas Cloruradas Magnésicas, Cloruradas Sódicas y Sulfatadas Sódicas. Las Cloruradas Magnésicas se observan después de periodos secos cuando la cota de los niveles están más bajas y el agua del pozo la ceden los basaltos principalmente. La muestra con menos salinidad es la de febrero de 2006, después de un periodo de importantes lluvias y que probablemente corriera el barranco por lo que su concentración es parecida a la del agua de escorrentía, lo que apunta a una infiltración rápida después de lluvias continuas. Este pozo muestra una mezcla entre aguas procedentes de los basaltos con aguas infiltradas desde el lecho del barranco y retornos de riego (Figura 5.19 y Figura 5.20).

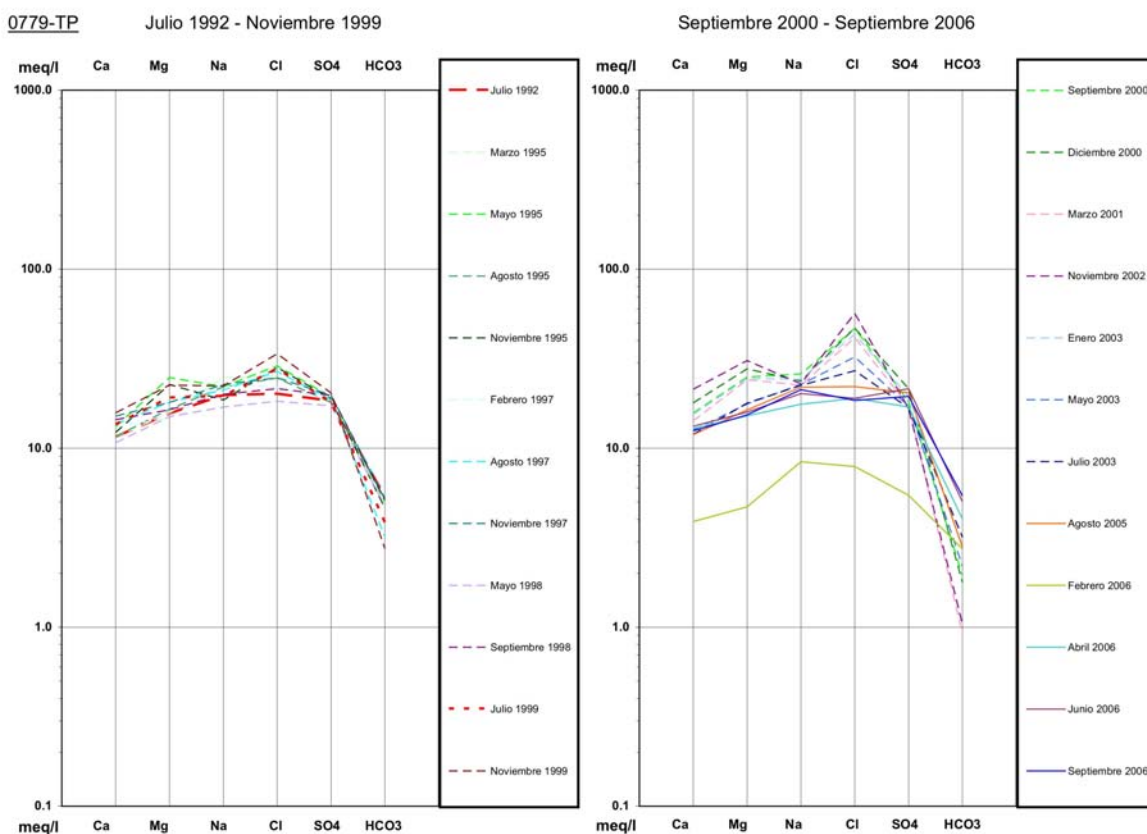


Figura 5.19. Diagrama de Schöeller-Berkaloff del pozo de la red de control actual 0779-TP.

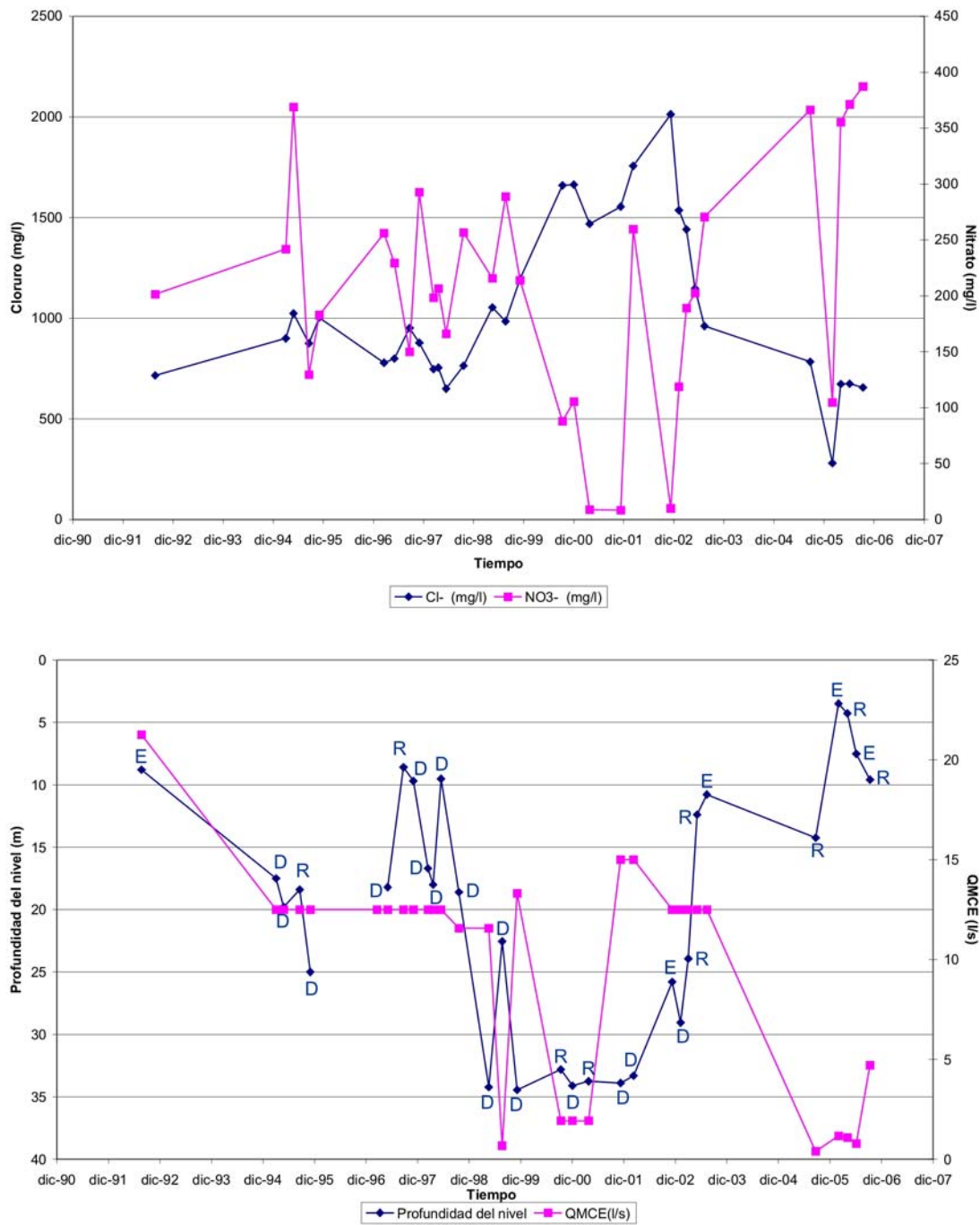


Figura 5.20. Evolución temporal de la concentración de cloruros y nitratos y de la profundidad de los niveles y los caudales medios continuos equivalente (QMCE) para el pozo de la red de control actual 0779-TP. Nivel estático (E), dinámico (D) y recuperación (R).

- * 2714-TP: El pozo se localiza en la cabecera del barranco principal de La Aldea a 94 m de altitud y posee una profundidad de 26 m extrayendo agua del aluvial del barranco principal y los basaltos. Las aguas son Cloruradas Sódicas y las muestras con mayor salinidad son también las que tienen mayor concentración de NO_3^- (1999-2001), evidenciando los aportes de retornos de riego, aunque las concentraciones de NO_3^- no alcanzan los 100 mg/l. La distribución de las concentraciones de los distintos elementos es muy parecida a la de la escorrentía pero con concentraciones superiores. Las variaciones en la concentración de Mg^{+2} y Na^+ podrían indicar el aporte de los basaltos en periodos secos observándose un ligero intercambio de bases en septiembre y febrero de 1998. En este pozo no se observa el aumento de NO_3^- a partir de 2005 (Figura 5.21 y Figura 5.22).

2714-TP

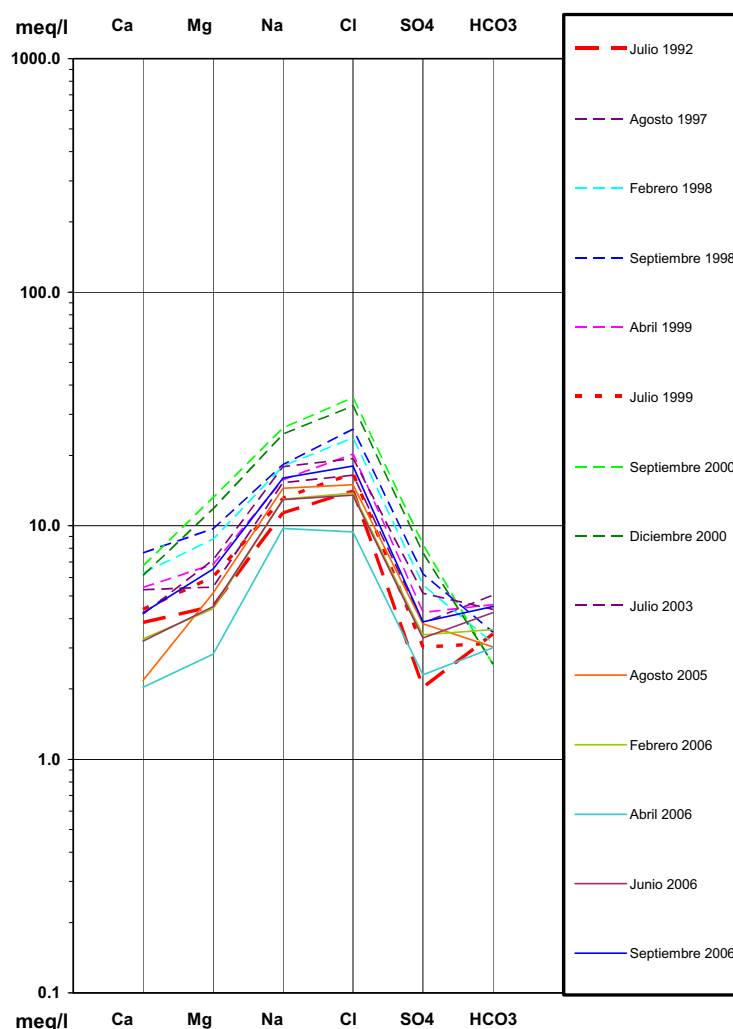


Figura 5.21. Diagrama de Schöeller-Berkaloff del pozo de la red de control actual 2714-TP.

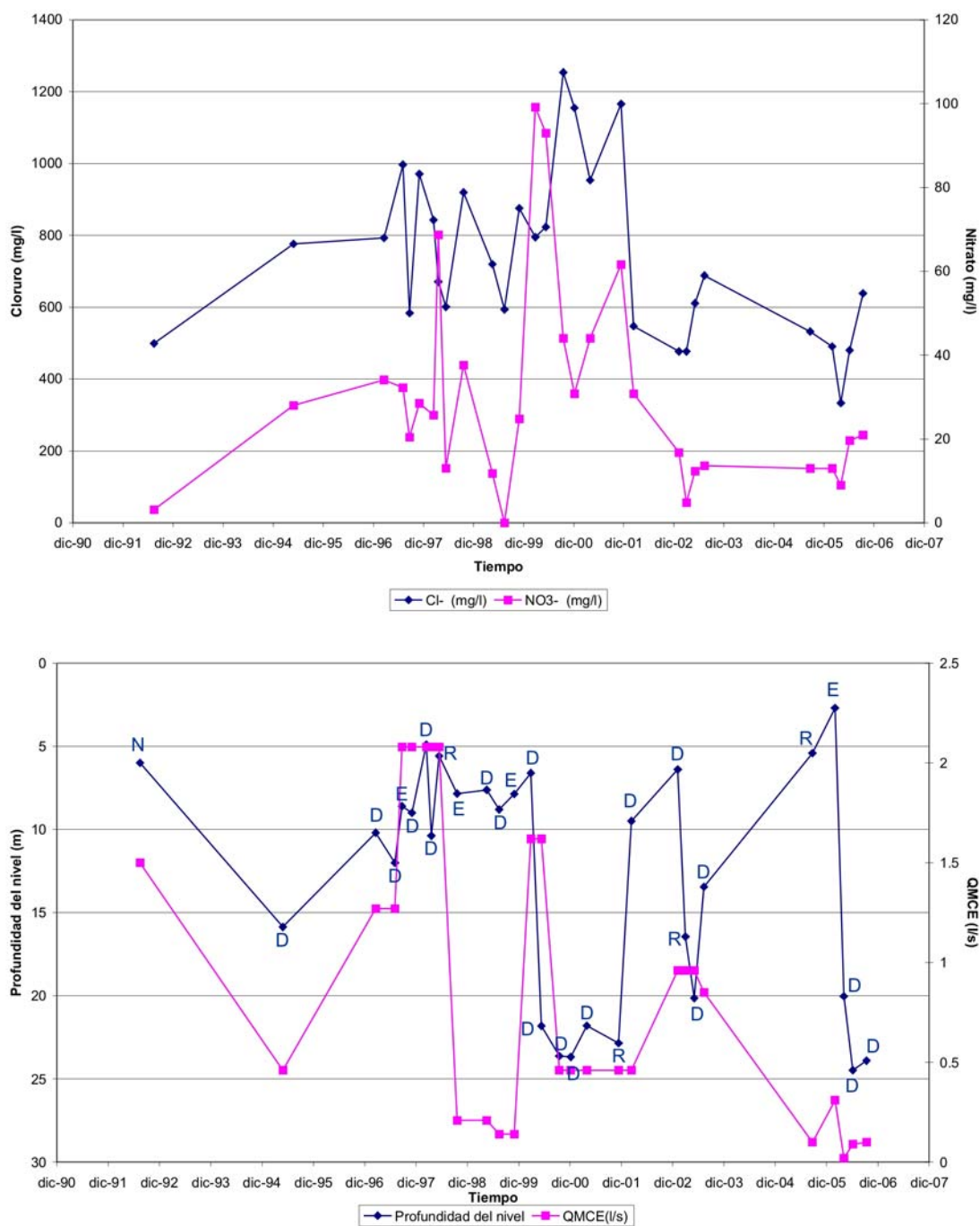


Figura 5.22. Evolución temporal de la concentración de cloruros y nitratos y de la profundidad de los niveles y los caudales medios continuos equivalente (QMCE) para el pozo de la red de control actual 2714-TP. Nivel estático (E), dinámico (D), recuperación (R) y no se sabe (N).

- * 2860-TP: el pozo se ubica en la cabecera del barranco de Tocodomán a 235 m de altura y tiene una profundidad de 42 m por lo que extrae agua de aluvial y basaltos. Las variaciones de la concentración de los distintos elementos es pequeña. Son aguas Cloruradas Magnésicas y el aumento en la concentración de NO_3^- después de 1992 indican un pequeño aporte de retornos de riego. Esta agua ha estado en contacto con los basaltos el tiempo suficiente para tener su marca, así como la de agua de aluvial y de retornos de riego (Figura 5.23 y Figura 5.24).

2860-TP

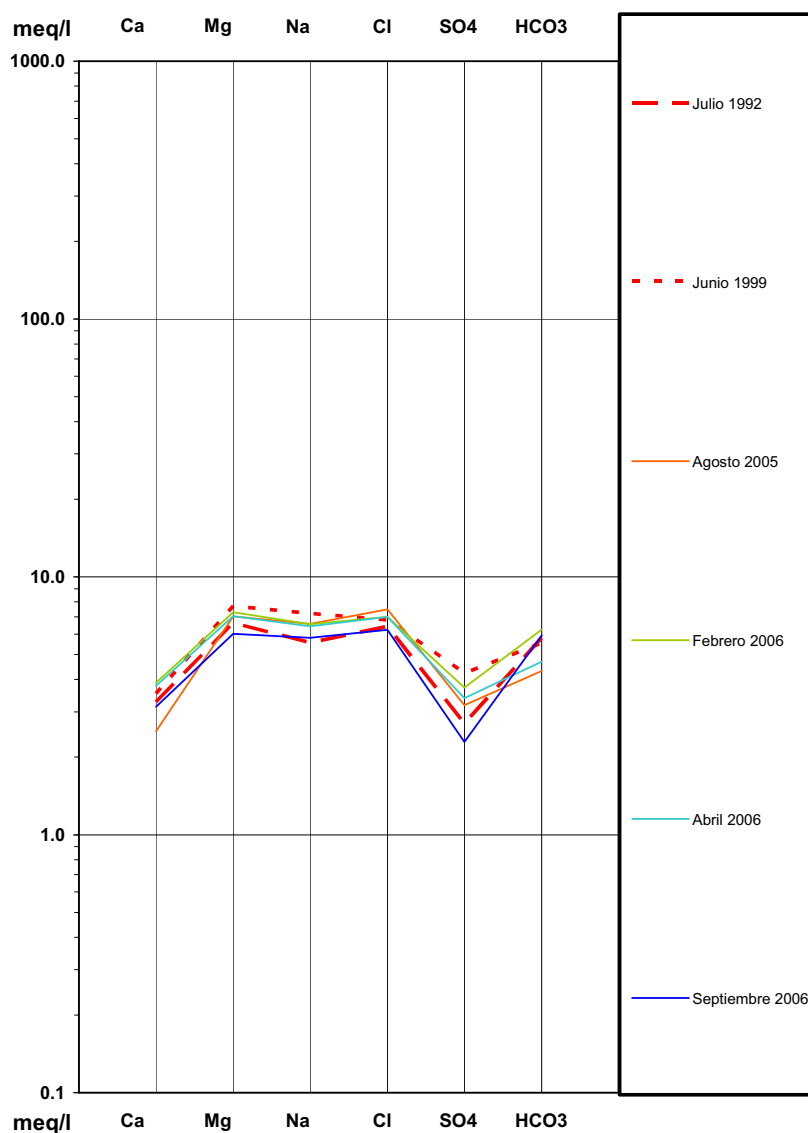


Figura 5.23. Diagrama de Schöeller-Berkaloff del pozo de la red de control actual 2860-TP.

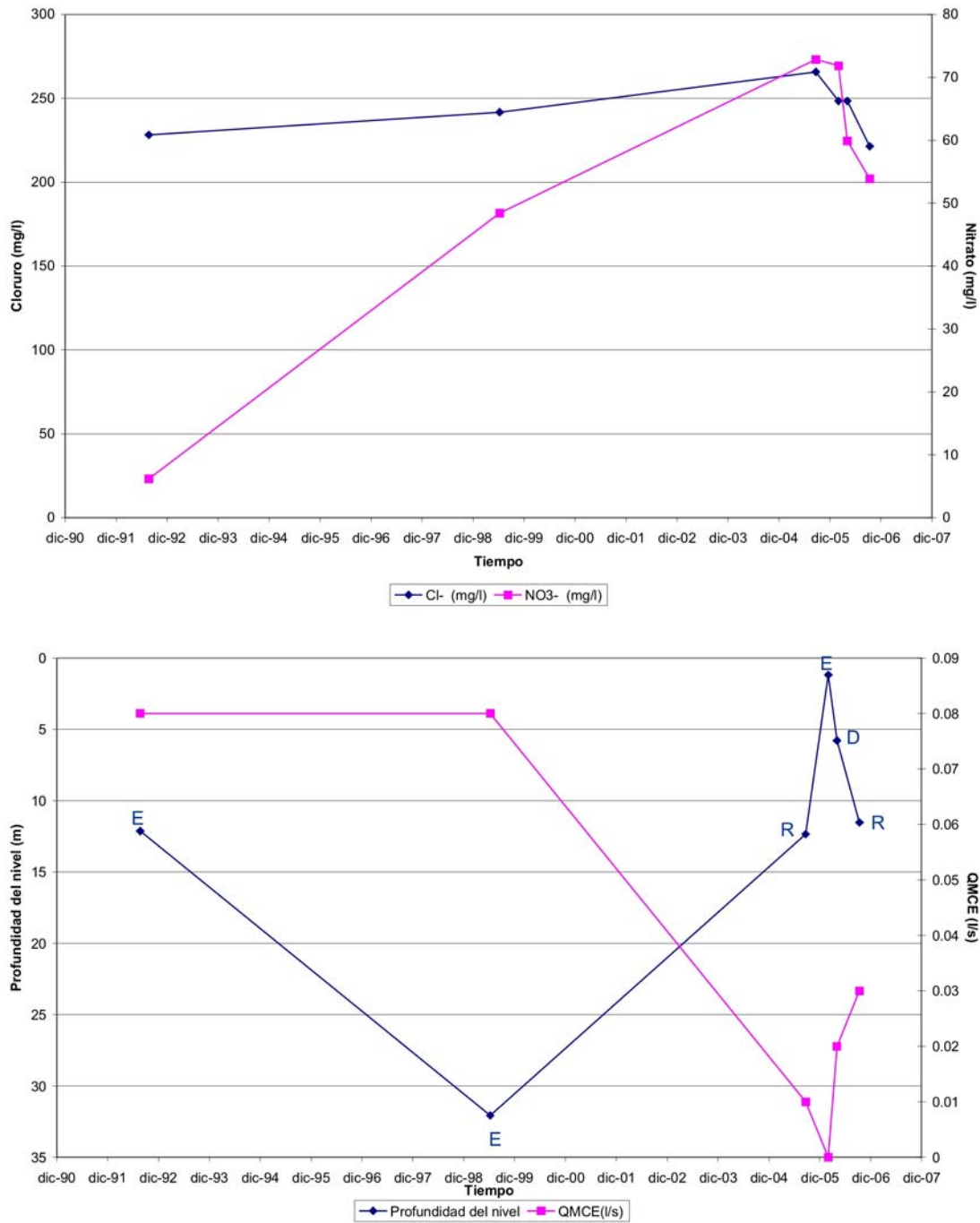


Figura 5.24. Evolución temporal de la concentración de cloruros y nitratos y de la profundidad de los niveles y los caudales medios continuos equivalente (QMCE) para el pozo de la red de control actual 2860-TP. Nivel estático (E), dinámico (D) y recuperación (R).

- * 4823-TP: Se localiza en la ladera de las montañas al sur de la zona de estudio a cota 302 m y tiene una profundidad de 27 m. Las aguas son Cloruradas Sódicas de baja salinidad lo que indica que hay una pequeña influencia del aerosol marino. La baja concentración de NO_3^- entre 0 y 25 mg/l indica poca influencia de los retornos de riego, aunque podría influir en la salinidad dado el paralelismo observado entre Cl^- y NO_3^- . El exceso de Na^+ en todas las muestras podría ser debido al lavado de las rocas traquítico riolíticas de los derrubios de ladera (Figura 5.25 y Figura 5.26).

4823-TP

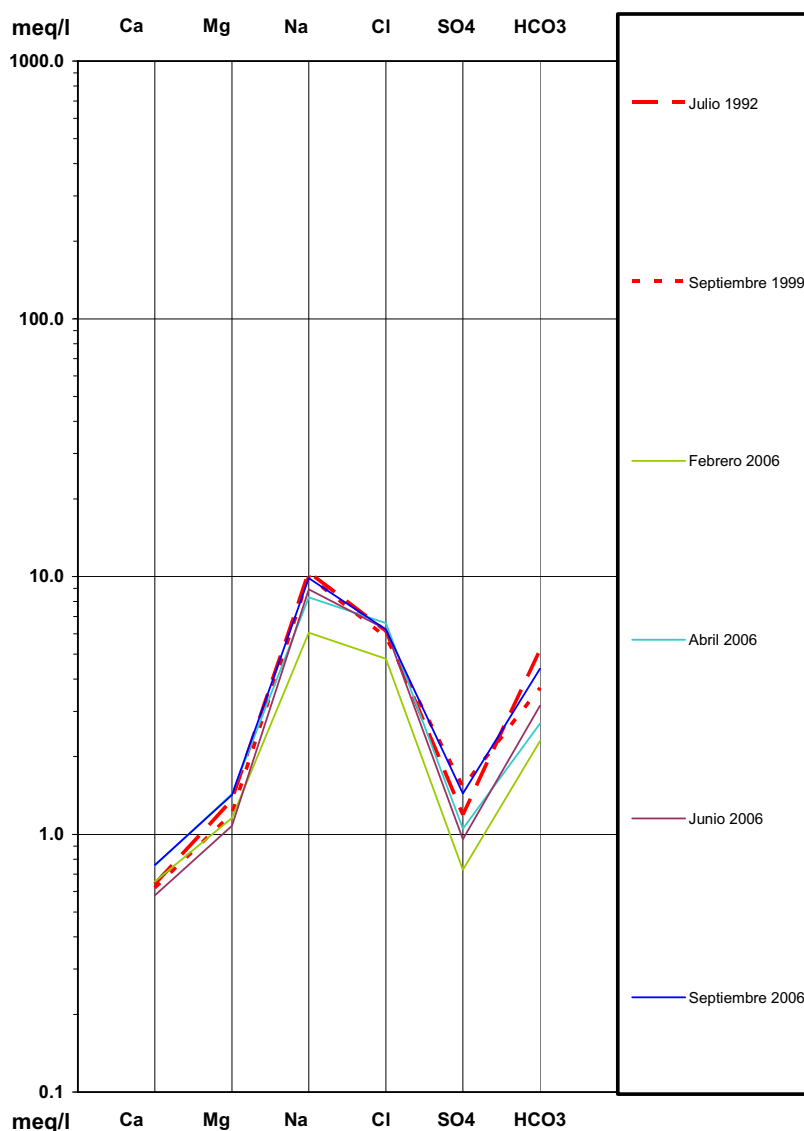


Figura 5.25. Diagrama de Schöeller-Berkaloff del pozo de la red de control actual 4823-TP.

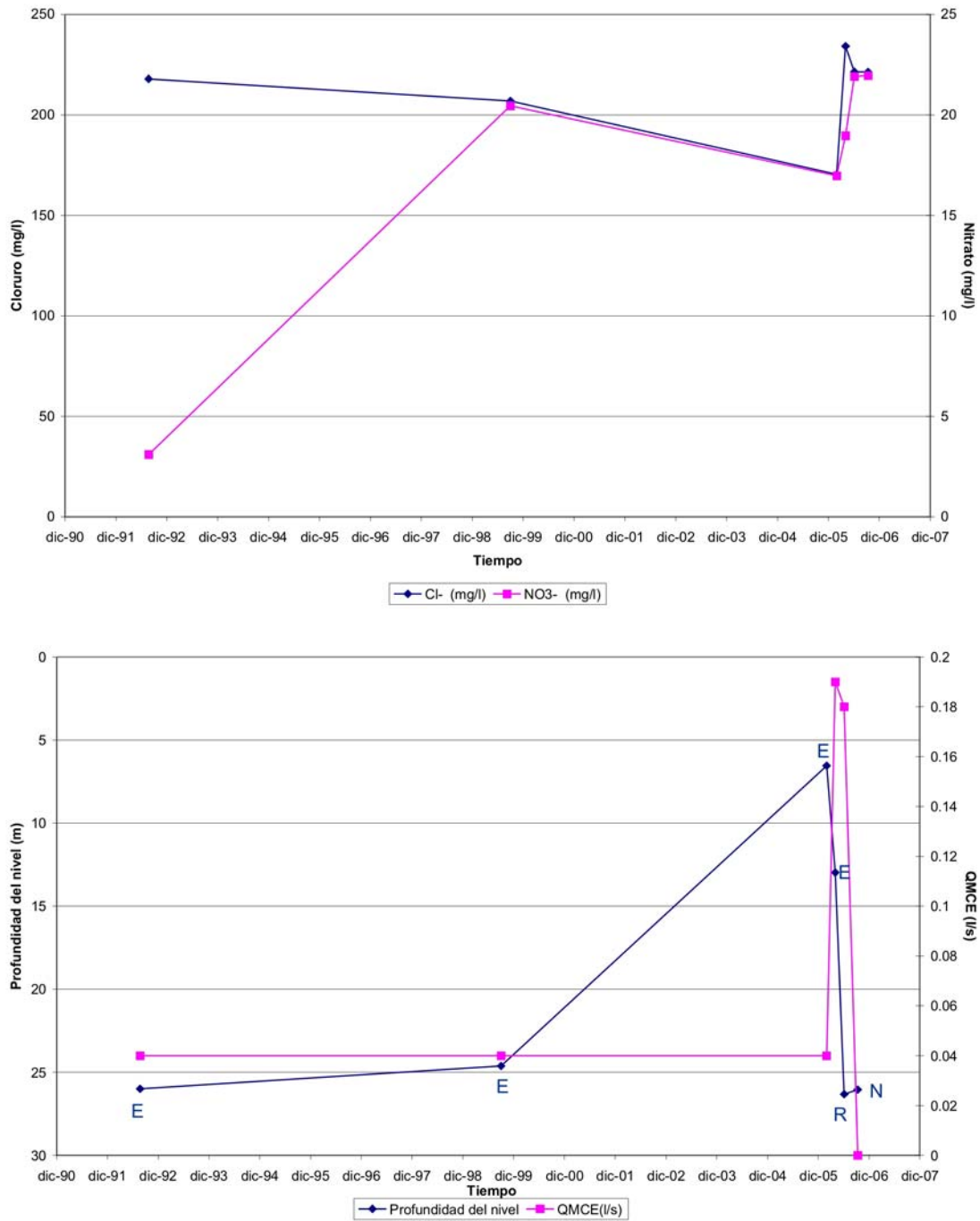


Figura 5.26. Evolución temporal de la concentración de cloruros y nitratos y de la profundidad de los niveles y los caudales medios continuos equivalente (QMCE) para el pozo de la red de control actual 4823-TP. Nivel estático (E), recuperación (R) y no se sabe (N).

- * 4826-TP: Se localiza en el barranco principal antes de la desembocadura del barranco de Tocodomán a 76 m de altura y tiene una profundidad de 35 m. Las aguas son Cloruradas Sódicas con salinidades variables. Las muestras menos salinas son las tomadas en 2006 después de un periodo de lluvias. Se observa que el agua procede del aluvial con algo de retornos de riego por la baja salinidad después del periodo de lluvia, que se va mezclando con retornos de riego, aumentando su salinidad en periodos más secos (Figura 5.27 y Figura 5.28).

4826-TP

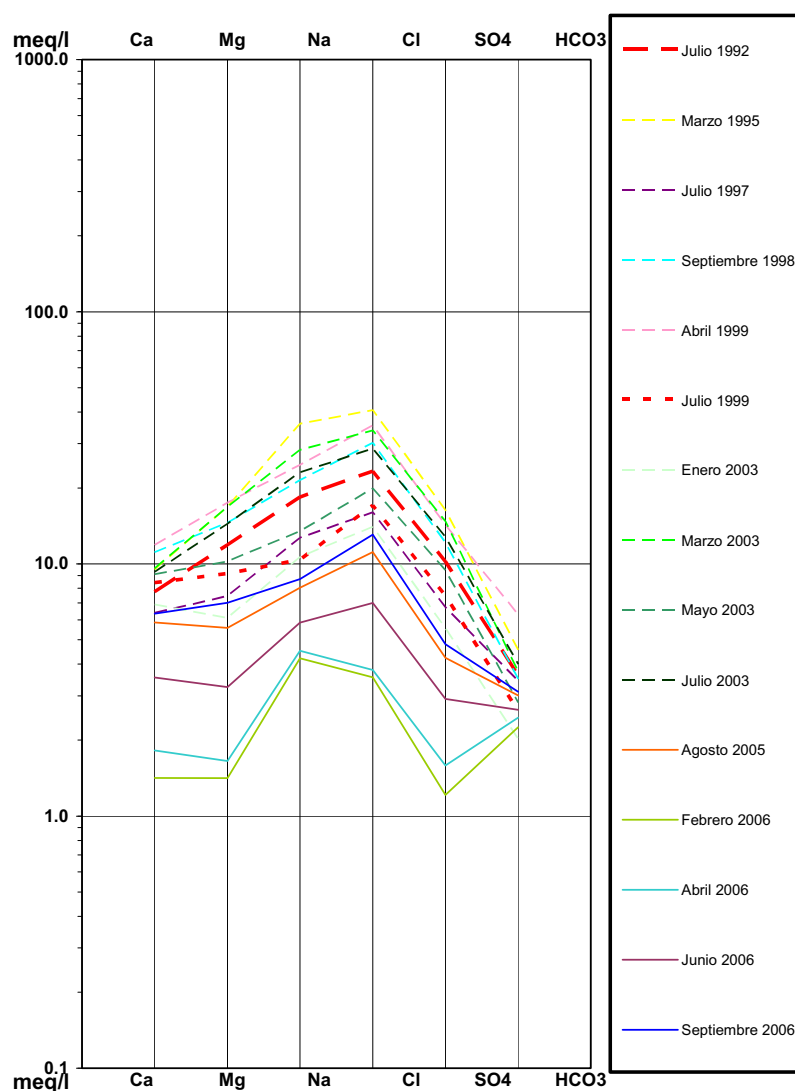


Figura 5.27. Diagrama de Schöeller-Berkaloff del pozo de la red de control actual 4826-TP.

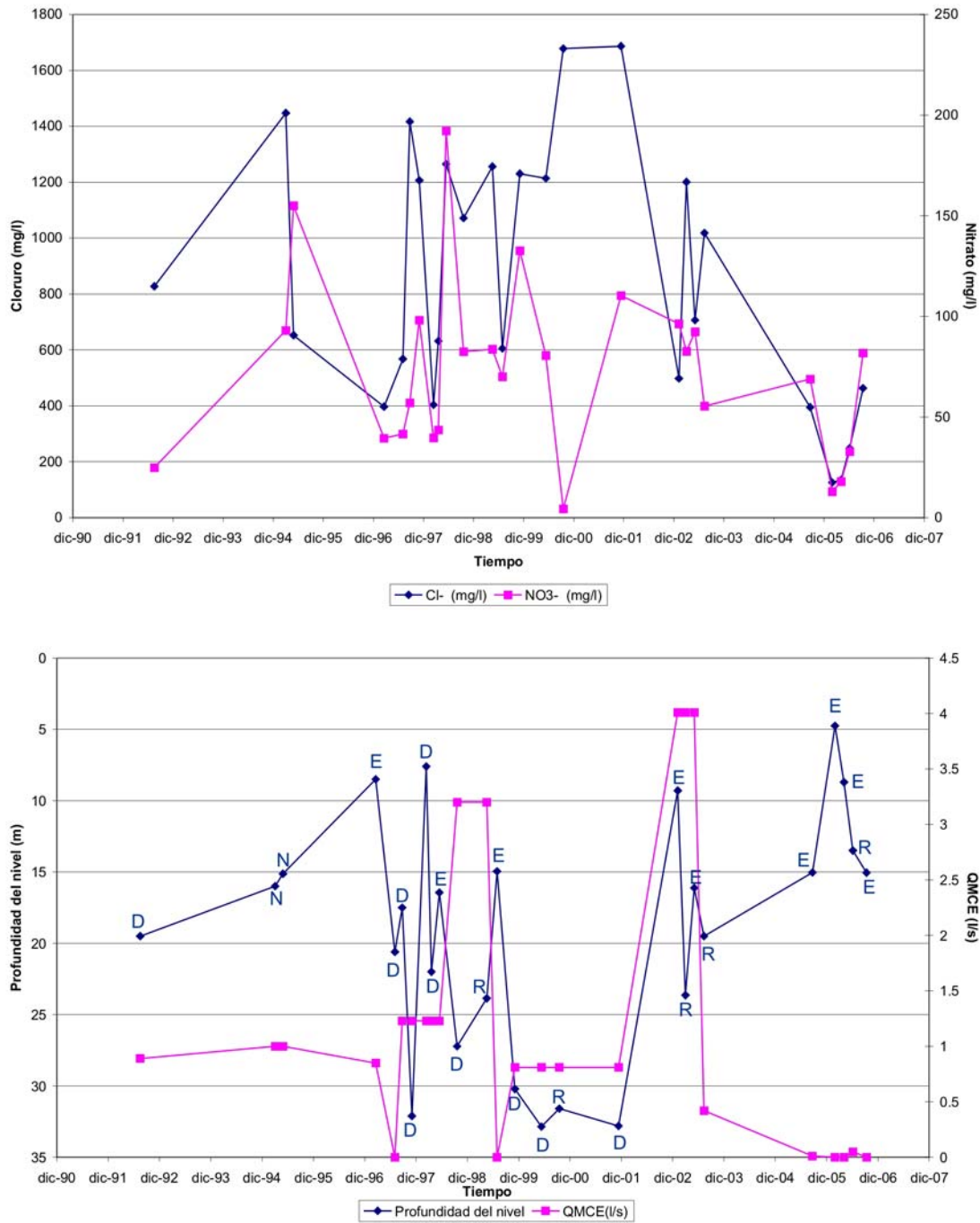


Figura 5.28. Evolución temporal de la concentración de cloruros y nitratos y de la profundidad de los niveles y los caudales medios continuos equivalente (QMCE) para el pozo de la red de control actual 4826-TP. Nivel estático (E), dinámico (D), recuperación (R) y no se sabe (N).

- * 4858-BTP: Se ubica en el margen norte del barranco principal a una cota de 46 m y tiene una profundidad de 36 m. Las aguas son Cloruradas Sódicas con alta salinidad. Las aguas más salinas coinciden con un periodo de sequía importante (1999) y en ellas se puede ver un proceso incipiente de cambio de bases. Se observa una clara influencia de los retornos de riego a partir de 2005 cuando se puso en regadío la zona sobre el pozo y este se puso en explotación (Figura 5.29 y Figura 5.30).

4858-BTP

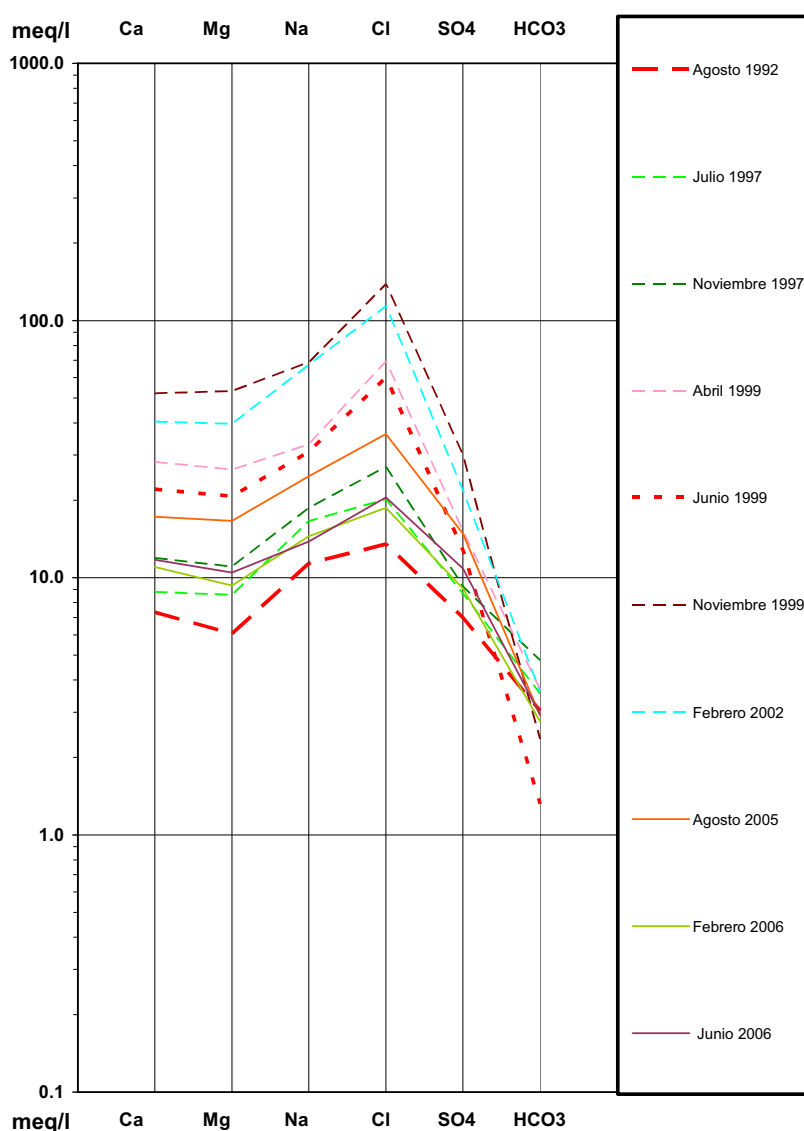


Figura 5.29. Diagrama de Schöeller-Berkaloff del pozo de la red de control actual 4858-BTP.

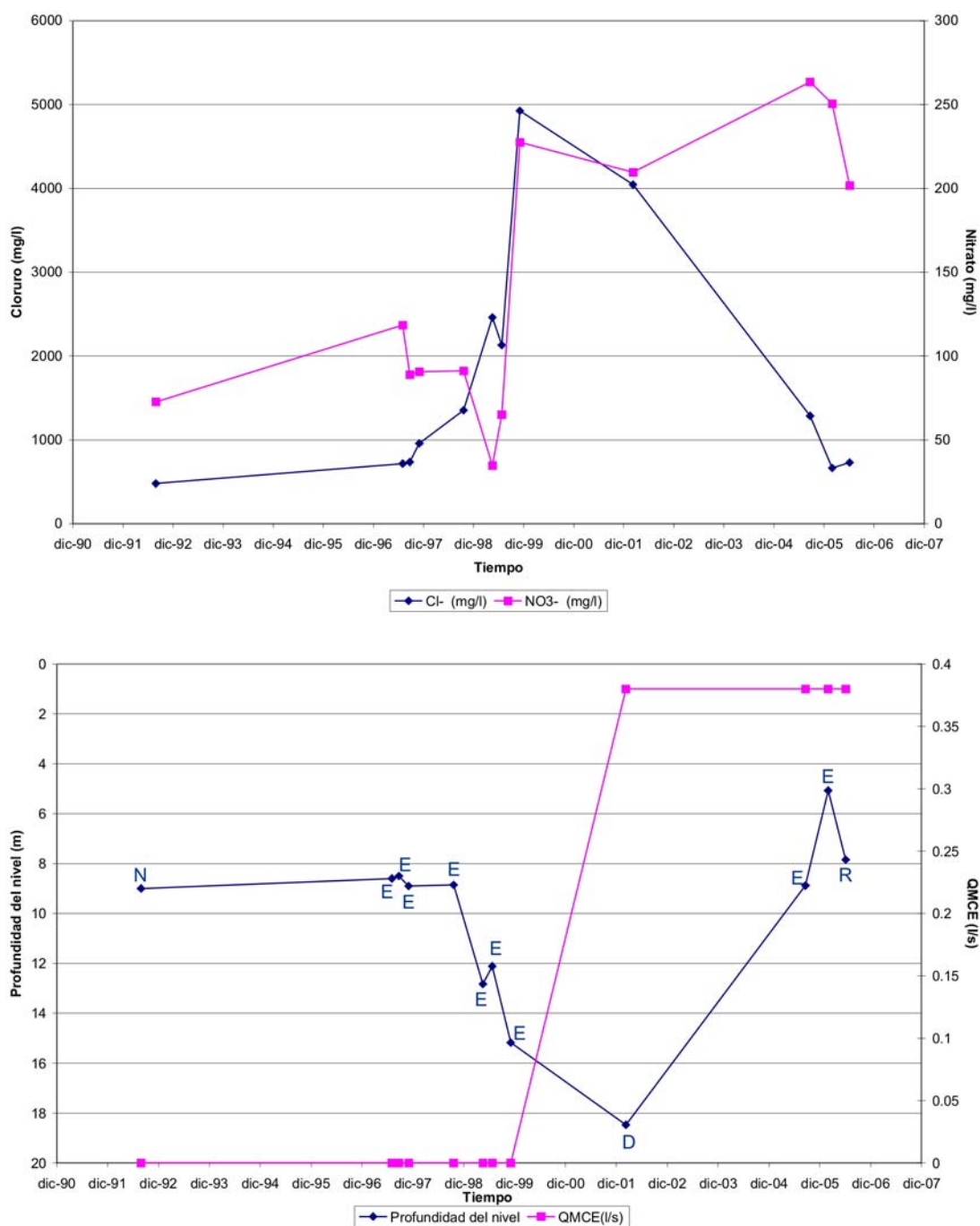


Figura 5.30. Evolución temporal de la concentración de cloruros y nitratos y de la profundidad de los niveles y los caudales medios continuos equivalente (QMCE) para el pozo de la red de control actual 4858-BTP. Nivel estático (E), dinámico (D), recuperación (R) y no se sabe (N).

- * 4886-TP: Está localizado en la cabecera del barranco de Tocodomán a 497 m de altitud y con una profundidad de 25 m. Las aguas son Cloruradas Bicarbonatadas Sódicas. La baja concentración de SO_4^{-2} y NO_3^- en todas las muestras indican que no hay aporte de retornos de riego y la alta concentración de Mg^{+2} muestran la influencia de basaltos. La comparación de esta agua con el agua de lluvia de la estación 219 muestra un aumento de la concentración de Cl^- , Na^+ , Mg^{+2} y una disminución de la concentración de Ca^{+2} (Figura 5.31 y Figura 5.32).

4886-TP

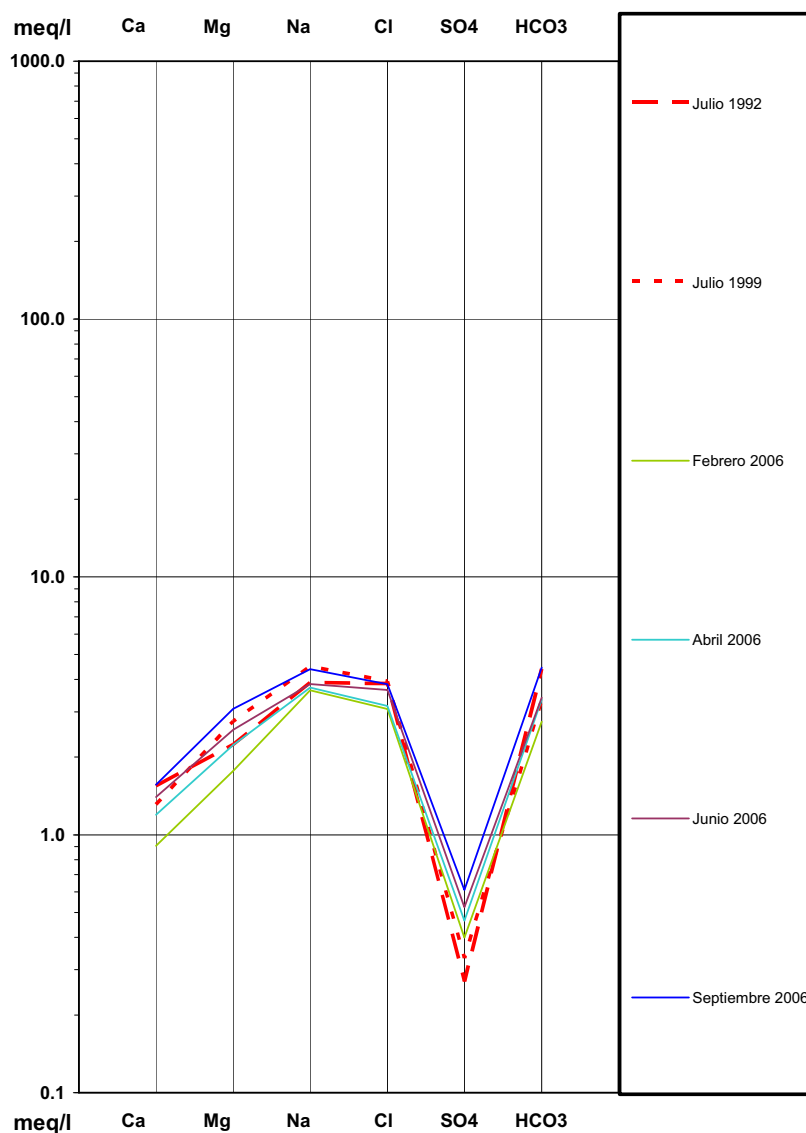


Figura 5.31. Diagrama de Schöeller-Berkaloff del pozo de la red de control actual 4886-TP.

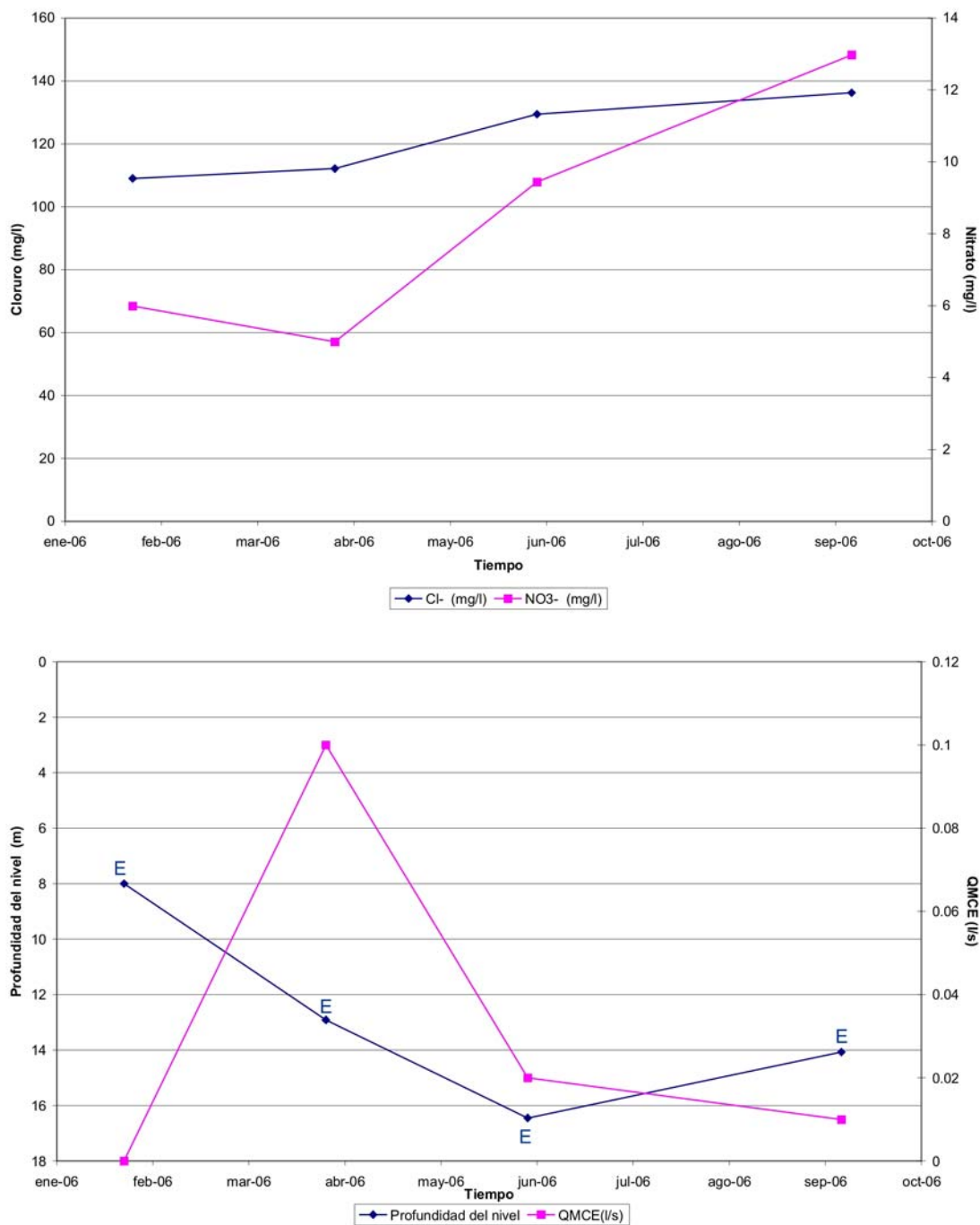


Figura 5.32. Evolución temporal de la concentración de cloruros y nitratos y de la profundidad de los niveles y los caudales medios continuos equivalente (QMCE) para el pozo de la red de control actual 4886-TP. Nivel estático (E).

En la mayoría de los pozos de la red de control actual, las aguas son Cloruradas Sódicas, lo que indica la influencia del aerosol marino en la zona. Cuando esta influencia es baja (zonas más altas de la zona de estudio y más alejadas del mar) las aguas son Cloruradas Bicarbonatadas Sódicas. En los pozos que extraen agua de los basaltos, por su profundidad o porque están ubicados fuera del aluvial, se observa un aumento en la concentración de Mg^{+2} y en algunos casos de Ca^{+2} mostrando una clara marca geológica. También se observa la marca geológica en los pozos ubicados en los derrubios de ladera con un aumento en la concentración de Na^+ . La influencia de Las Tabladas se distingue por un importante aumento en la concentración del Cl^- , Na^+ y SO_4^{-2} y está muy localizada en los alrededores de esta. El dominio de los retornos de riego se observa en casi todos los pozos estudiados siendo mayor en el aluvial principal y el barranco de Tocodomán con un claro aumento en las concentraciones de SO_4^{-2} .

En general, se observa para todos los pozos una disminución de la explotación junto con una subida de niveles y un aumento de NO_3^- y disminución de Cl^- . En la mayoría de los pozos del aluvial, después del periodo de lluvia, se observa una disminución de la salinidad que con el paso del tiempo, se va mezclando con retornos de riego y aumentando su salinidad en periodos más secos, lo que indica que en la zona del aluvial se debe recibir recarga directa y a través del cauce en épocas de lluvia.

La representación de los datos en el diagrama de Piper-Hill-Langelier se muestran en las Figura 5.33 y Figura 5.34, en ambas figuras se han representado los datos de lluvia, riego, retornos de riego, escorrentía, presas, mar. Además en la Figura 5.33 se sitúan los análisis de los pozos de la red de control actual para la campaña de junio de 2005 y en la Figura 5.34 los análisis de los pozos localizados al pie de Las Tabladas para la campaña de junio y julio de 1999, los datos de los rezumes de Las Tabladas y los resultados de los ensayos Batch.

La Figura 5.33 muestra el diagrama de Piper - Hill - Langelier de los pozos de la red de control actual localizados en el aluvial principal para la campaña de junio de 2005. Las aguas de lluvia de los colectores situados a cierta altura (263 y 219) son Bicarbonatadas Cállicas y sufren un proceso de evaporación y precipitación de $CaCO_3$ en el paso de agua de lluvia a agua de presa (Flecha roja). En los pozos se distingue un proceso de mezcla desde el agua de presa y escorrentía hacia el agua de mar y los retornos de riego a medida que se avanza en la dirección del flujo como se indica en la Figura 5.33 por una flecha azul. Y otro proceso de la influencia de la marca geológica de los basaltos en los pozos ubicados en el barranco de Tocodomán (2860-TP y 5688-TP) indicado por una flecha verde.

El agua obtenida de los ensayos Batch es Sulfatada Clorurada Sódica (Figura 5.34) con un bajo porcentaje de Ca^{+2} , Mg^{+2} y HCO_3^- con respecto al Cl^- , SO_4^{-2} y Na^+ . Los pozos cercanos a los azulejos de Las Tabladas, son Clorurados Sódicos. Se localizan con respecto a los aniones entre el agua de mar y las muestras obtenidas en los ensayos Batch, pero más cercanos a las proporciones del agua de mar. Con respecto a los cationes son más ricos en Mg^{+2} y más pobres en Na^+ y K^+ que

las muestras obtenidas en los ensayos Batch. Las aguas de los manantiales ubicados en la base de Las Tabladas también son Clorurados Sódicos muy cerca de las proporciones de agua de mar.

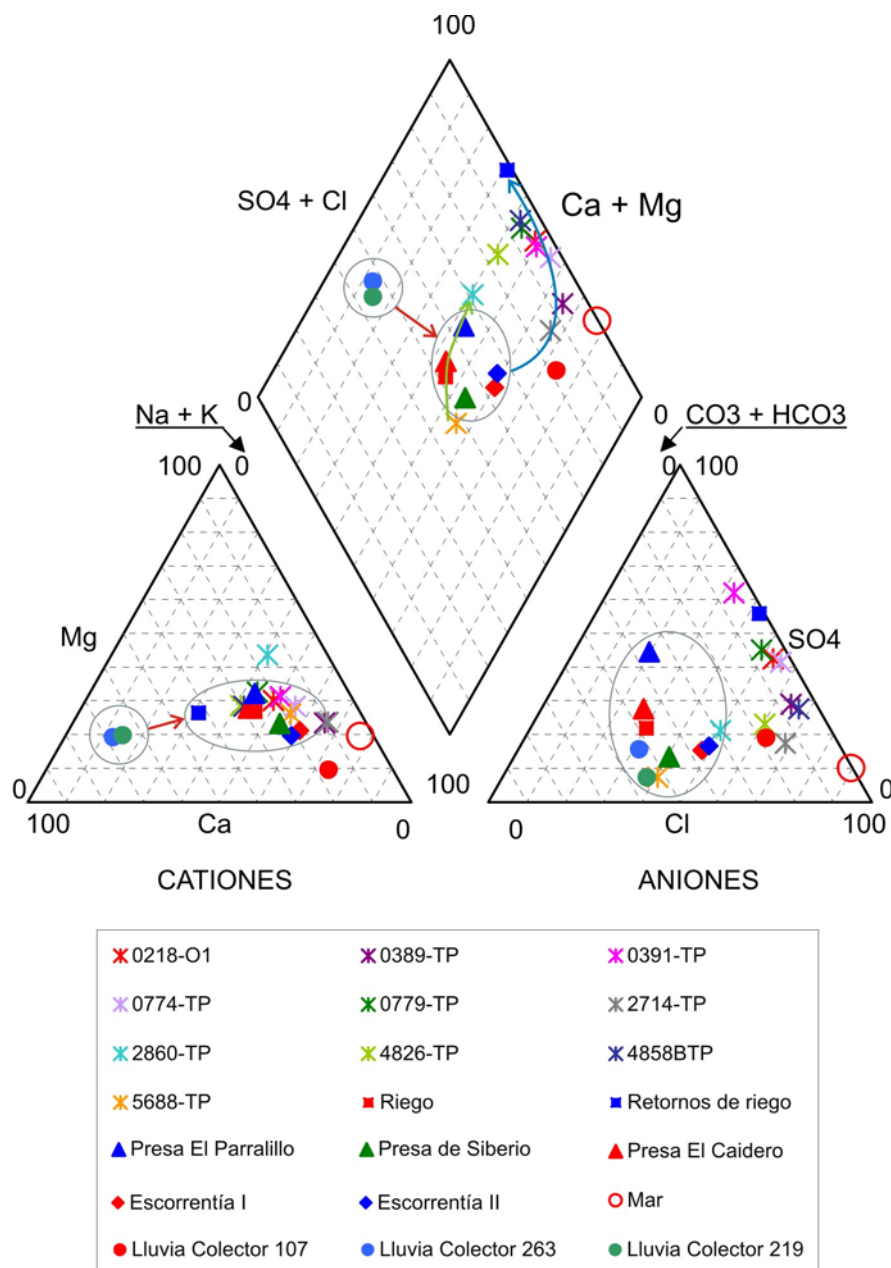


Figura 5.33. Diagrama de Piper - Hill - Langelier para los análisis del agua de lluvia (Colectores 107, 263 y 219), agua de riego, agua de retornos de riego, agua de escorrentía, agua de presa y aguas de pozos localizados en la línea de flujo del acuífero principal.

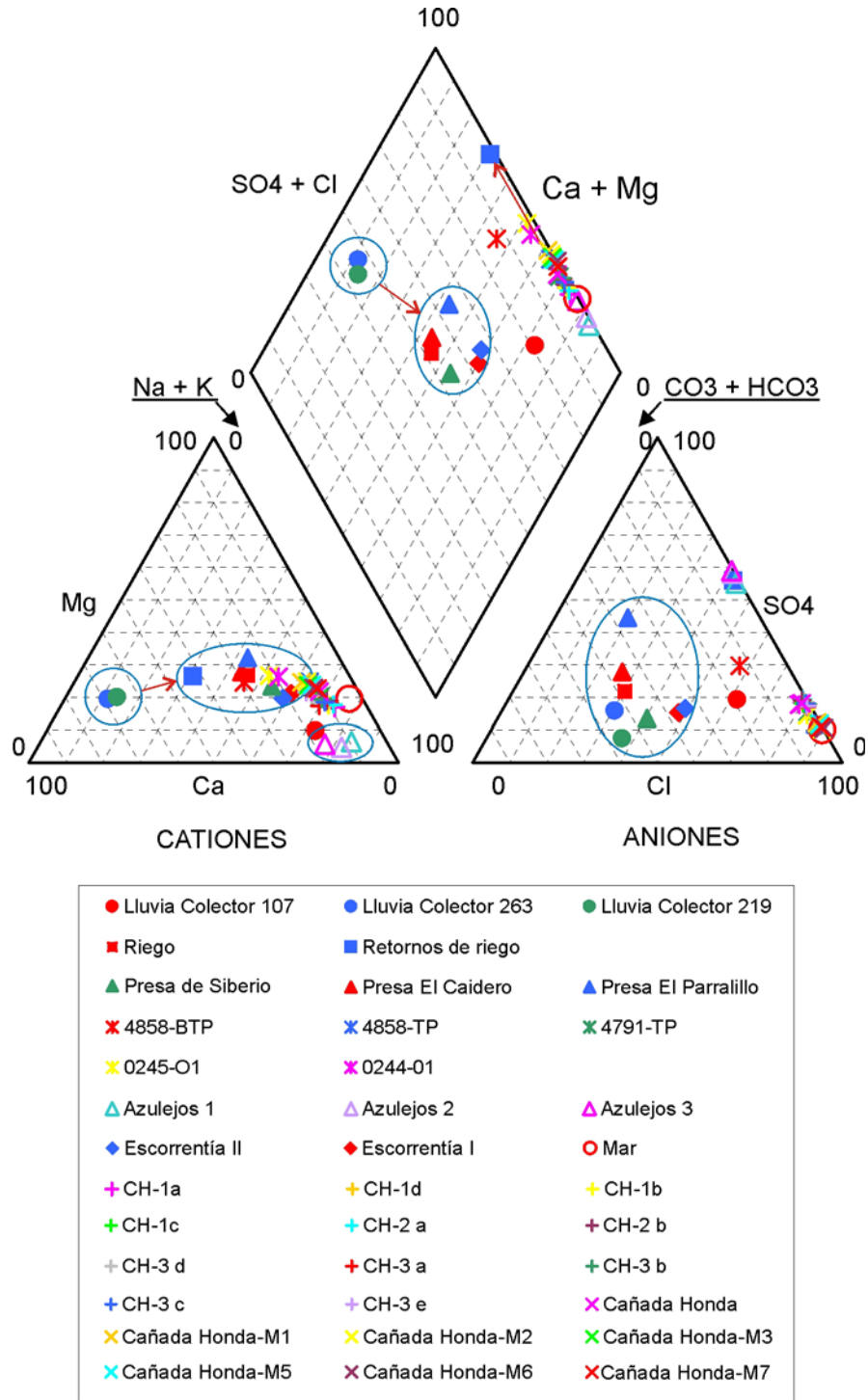


Figura 5.34. Diagrama de Piper - Hill - Langelier para los análisis del agua de lluvia (Colectores 107, 263 y 219), agua de riego, agua de retornos de riego, agua de escorrentía, agua de presa, agua obtenida en los ensayos Batch (Azulejos), la muestras de los rezumes localizados en Las Tabladas (CH y Cañada Honda) y aguas de pozos localizados al pie de Las Tabladas en el acuífero principal.

5.3.- CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS DE RECARGA

A partir de la caracterización precedente, se puede deducir que en la zona de estudio, el agua subterránea es producto de la mezcla de aguas con orígenes diferentes, cuyas características químicas se describen a continuación para poder llevar a cabo la modelación hidrogeoquímica del acuífero.

5.3.1.- Química del agua de lluvia

De media, un 25% de la recarga al acuífero se produce por la precipitación sobre el terreno, según se dedujo en el balance hídrico. Esta agua suele contener generalmente pocas sales disueltas, pero en áreas costeras y climas áridos su salinidad puede ser significativa respecto a la composición del agua subterránea, con una alta cantidad de sales disueltas principalmente en Cl⁻ y Na⁺. Por otro lado, muchas lluvias no llegan a superar la capacidad de retención del suelo y el agua infiltrada se evapotranspira dejando en la superficie las sales aportadas. Solo las lluvias más prolongadas producen infiltración profunda, llevando concentrada las sales aportadas por la propia lluvia, por lluvias anteriores y los aportes del terreno, lo que conlleva a una aridificación de la recarga. Esto introduce una marca climática en el agua de este tipo de acuíferos (Alcalá, 2005).

Muñoz (2005) realizó la caracterización química del agua de lluvia de la zona de estudio. El muestreo se desarrolló entre octubre del 2000 y abril del 2002 y las 23 muestras tomadas fueron analizadas dentro del Proyecto de Investigación "Salinización asociada a la precipitación y a las aguas subterráneas en distintas áreas del territorio español, continental e insular" (HID99-0205) llevado a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España y la Universidad Politécnica de Cataluña (Alcalá, 2005; Muñoz, 2005).

En la Figura 5.35 se puede observar la localización geográfica de los colectores de agua de lluvia dentro de la zona de estudio. El colector 107, está situado a 14 m de altitud, es el colector más cercano al mar, el colector 263, localizado a 188 m, se ubica en Las Tabladas y el colector 219, que se sitúa en el barranco de Tocodomán a 338 m, es el más alejado del mar.

Para interpretar los resultados obtenidos en los distintos análisis químicos realizados (Tabla 5.5) se debe tener en cuenta que el clima en la zona es semi-árido por lo que el volumen de agua obtenido para algunos análisis ha sido insuficiente. Por ello, no se han podido analizar todos los iones mayoritarios, lo que se ha solucionado realizando un promedio de los datos de los que se dispone como valor medio para cada estación (Tabla 5.6). El muestreo fue recogido mensualmente, por lo que las muestras no corresponden a eventos individuales sino a días de lluvia agrupados.

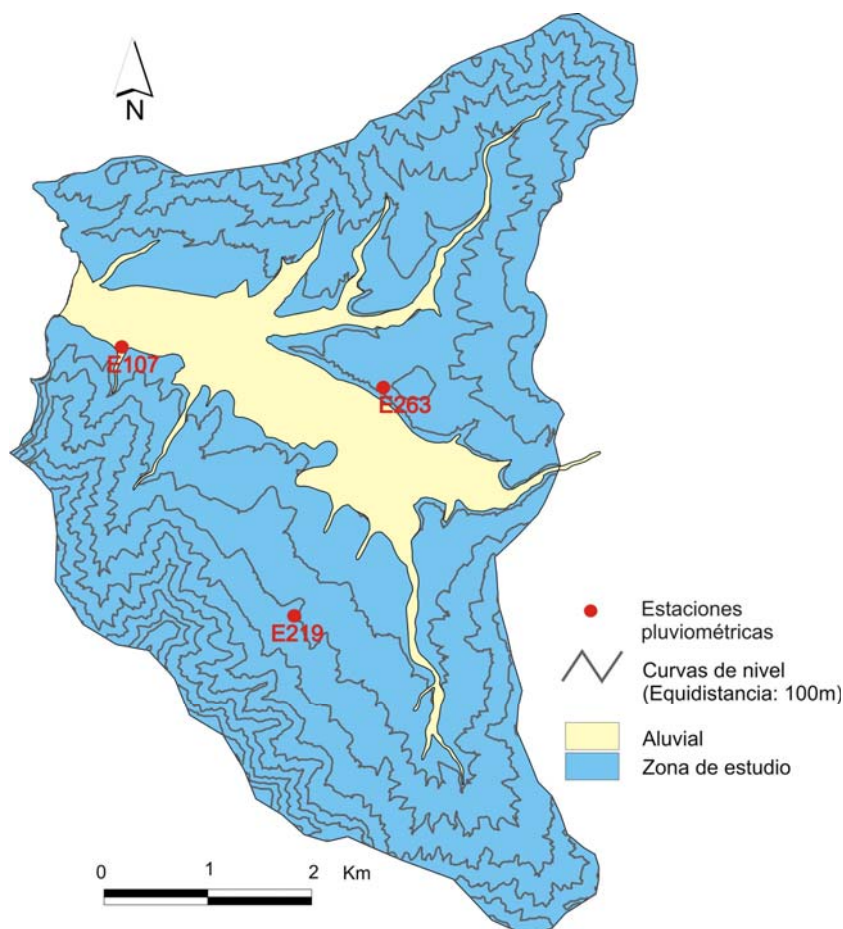


Figura 5.35. Localización de las estaciones pluviométricas donde están ubicados los colectores del agua de lluvia.

En una primera aproximación a las características químicas del agua de lluvia se ha representado la composición química media de cada uno de los colectores en un diagrama logarítmico vertical o de Schöeller-Berkaloff (Figura 5.36). Se observan dos pautas de comportamiento diferenciados, por un lado, el colector 107, más cercano al mar, cuyas aguas son Cloruras Sódicas, lo que indica una clara influencia del aerosol marino, y por el otro, los colectores 263 y 219 con aguas Bicarbonatadas Cálcidas con una menor influencia del mar debido a la altura en que se localizan. Se observan dos factores que influyen en la concentración de los iones disueltos en el agua de lluvia: la altura del colector y la distancia al mar (Muñoz, 2005).

Los iones que más varían su concentración son el Na^+ , Cl^- y SO_4^{-2} . El Na^+ y el Cl^- son los componentes mayoritarios en el agua de mar y los elementos que más aporta el aerosol marino. La baja concentración del SO_4^{-2} en algunas medidas del colector 219 puede ser debida a procesos de reducción de SO_4^{-2} por contaminación orgánica que produce valores bajos en las muestras (Muñoz, 2005).

Tabla 5.5. Valores de conductividad eléctrica y concentraciones de iones mayoritarios de agua de lluvia en la zona de estudio tomadas entre octubre de 2000 y abril de 2002. Los datos están en mg/l para los elementos químicos y $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la conductividad eléctrica (CE) (Muñoz, 2005).

Fecha	C.E.	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻
COLECTOR 107								
Oct-00	1620.0			79.0	28.0	255.0	193.0	300.0
Nov-00	1665.0			19.0	5.0	163.0	292.0	53.0
Dic-00	566.0			8.0	2.0	104.0	34.0	12.0
Mar-01	2503.0	333.0	27.0			481.0	96.0	
Abr-01	1770.0	288.0	25.0			398.0	111.0	
Nov-01	411.0	32.0	5.0			52.0	17.0	
Dic-01+Ene-02	473.0	42.0	4.0			67.0	28.0	
Feb+Mar-02	834.0	100.0	32.0			160.0	23.0	
Abr-02	1589.0	215.0	18.0			405.0	81.0	
COLECTOR 263								
Oct-00				80.0	20.0	186.0	90.0	490.0
Nov-00	434.0			91.0	12.0	61.0	48.0	101.0
Dic-00	486.0			59.0	7.0	64.0	84.0	150.0
Mar+Abr-01	310.0	15.0	22.0			17.0	7.0	
COLECTOR 219								
Oct-00	157.0			78.0	16.0	198.0	56.0	183.0
Nov-00	255.0			41.0	7.0	39.0	10.0	98.0
Dic-00	102.0			46.0	7.0	18.0	4.0	85.0
Abr-01	157.0	13.0	11.0			17.0	5.0	
Nov-01	254.0	13.0	14.0			17.0	0.1	
Dic-01+Ene-02	122.0	7.0	10.0			10.0	0.2	
Feb+Mar-02	463.0	21.0	63.0			52.0	22.0	
Abr-02	180.0	13.0	10.0			24.0	5.0	

Tabla 5.6. Valores estadísticos de conductividad eléctrica y concentraciones de iones mayoritarios de agua de lluvia en la zona de estudio tomadas entre octubre de 2000 y abril de 2002. Las unidades son mg/l para los elementos químicos y $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la conductividad eléctrica (CE).

	C.E.	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻
COLECTOR 107								
Número de datos	9	6	6	3	3	9	9	3
Media	1270.1	168.3	18.5	35.3	11.7	231.7	97.2	121.7
Mínimo	411.0	32.0	4.0	8.0	2.0	52.0	17.0	12.0
Máximo	2503.0	333.0	32.0	79.0	28.0	481.0	292.0	300.0
COLECTOR 263								
Número de datos	3	1	1	3	3	4	4	3
Media	410.0	15.0	22.0	76.7	13.0	82.0	57.3	247.0
Mínimo	310.0	15.0	22.0	59.0	7.0	17.0	7.0	101.0
Máximo	486.0	15.0	22.0	91.0	20.0	186.0	90.0	490.0
COLECTOR 219								
Número de datos	8	5	5	3	3	8	8	3
Media	211.3	13.4	21.6	55.0	10.0	46.9	12.8	122.0
Mínimo	102.0	7.0	10.0	41.0	7.0	10.0	0.1	85.0
Máximo	463.0	21.0	63.0	78.0	16.0	198.0	56.0	183.0

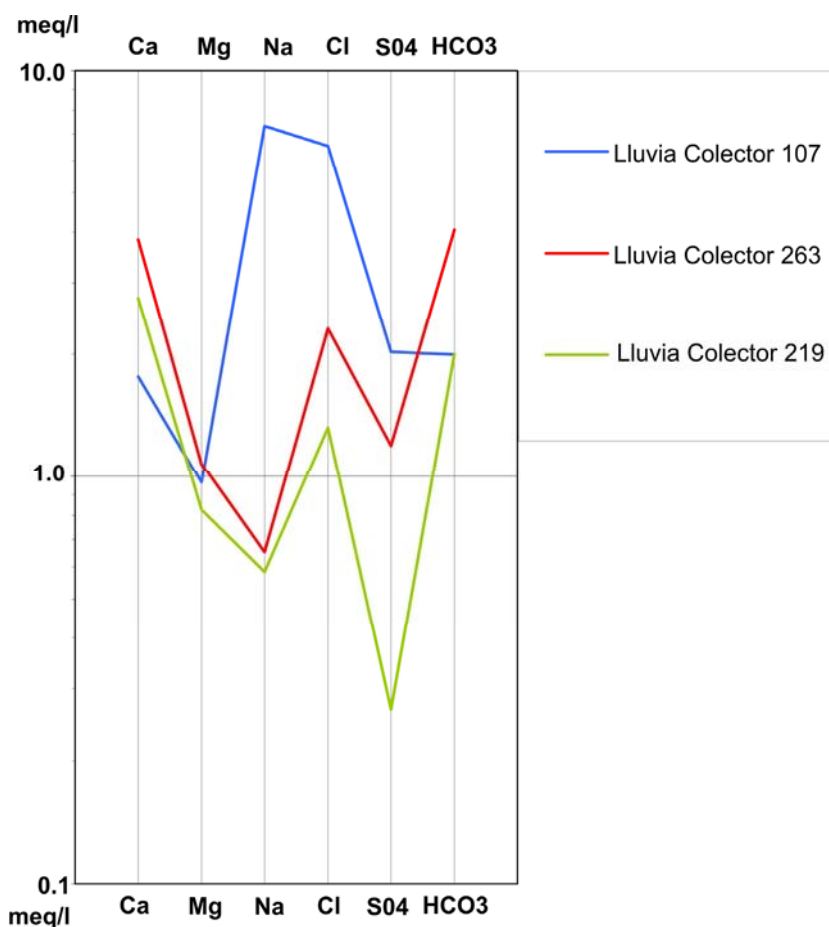


Figura 5.36. Diagrama de Schöeller-Berkaloff de las aguas de la lluvia media para los distintos colectores ubicados en la zona de estudio.

Los dos orígenes principales para los iones presentes en el agua de lluvia (además de otros menos importantes) son la aportación del mar como aerosol marino y el lavado de partículas procedentes del polvo sahariano. Ambos se depositan en el suelo o son disueltos por el agua durante la lluvia, por lo que se cuantifican a continuación:

5.3.1.1.- La influencia del aerosol marino

La contribución marina a la precipitación fue estudiada por Muñoz (2005) en su tesis doctoral. Suponiendo que el contenido del ión cloruro es conservativo y considerando que la única fuente de Cl⁻ para el agua de lluvia es el mar, calculó las aportaciones marinas para el resto de los iones y el aporte total de Cl⁻. Sus conclusiones fueron:

- la concentración de Na⁺ y Mg⁺² en la lluvia están muy influenciadas por el mar en un 88% y 70% respectivamente,

- la influencia sobre el SO_4^{-2} es del 40% aproximadamente,
- la influencia sobre Ca^{+2} y K^+ , es muy baja, por lo que su origen debe ser otro.

De forma general, en la isla de Gran Canaria se han obtenido valores de aporte de Cl^- de 4 a $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ en muestras de lluvia localizadas en los barrancos distribuidos al norte y al sur de la isla, llegando a alcanzar los $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ de Cl^- en las áreas de costa (Gasparini *et al.*, 1990; Custodio, 1993) por lo que el aporte de Cl^- y de otros elementos químicos localizados en el aerosol marino, va a jugar un papel muy importante en la salinización de las aguas subterráneas.

Los datos de deposición total atmosférica de Cl^- obtenidos para la zona de estudio son los siguientes (Muñoz, 2005; Alcalá, 2005):

- Estación 219, $3.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
- Estación 263, $4.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
- Estación 107, $21.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$

Suponiendo una tasa media de acumulación media de Cl^- en el suelo, calculada promediando las áreas de influencia de las distintas estaciones pluviométricas mediante las Isoyetas, de $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ se obtiene un volumen de acumulación de 220 Tn/año ($5 \text{ Tn}/\text{km}^2$ año).

5.3.1.2.- Las influencias del polvo sahariano

El Sahara produce más partículas en suspensión que cualquier otro desierto del mundo y éste tiene un importante impacto en procesos climáticos, ciclo de nutrientes en el océano, formación del suelo y ciclo de sedimentos. Por su localización, los episodios de llegada de polvo sahariano se repiten con relativa frecuencia a lo largo del año en las Islas Canarias (25% de los días del año según Dorta(1999)), siendo más numerosos en invierno y más escasos en primavera. Esta aparición produce un incremento de las temperaturas, un descenso de la humedad y una disminución de la visibilidad – a veces inferior a 200 m- debido a la presencia de las partículas de polvo proveniente del Sahara en el aire (Criado y Dorta, 2003).

Fernandopullé (1974) realizó análisis del agua de lavado de polvo procedente del continente africano en Canarias que indicaban, en todas las muestras, un dominio de Na^+ , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{-2} , representando este último entre el 20% y el 30% de las sales totales. Sus resultados concluyeron que la cantidad total de sólidos disueltos en el análisis de las aguas es insignificante, por lo que en las áreas costeras el arrastre de gotas de agua marina va a ser un factor de mineralización más importante que el polvo sahariano (SPA-15, 1975).

Menéndez *et al.* (2007) calcularon la tasa de acumulación de polvo sahariano en distintos suelos de la isla de Gran Canaria obteniendo valores medios de $5.4\pm 3.8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, en condiciones de calima y $4.3\pm 2.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ bajo condiciones sin calima, que varían según la altura de 9.1

$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ a 10 m y $2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ a 945 m. La distribución mineralógica del polvo sahariano para la isla de Gran Canaria es: 42 ± 22 % de cuarzo, 40 ± 32 % de carbonatos, 11 ± 8 % de feldspatos, 7 ± 8 % de magnetita, 1 ± 2 % de halita y menos de 0.5% de illita, kaolinita-clorita y palygorskita.

Suponiendo una tasa media de acumulación de polvo sahariano en el suelo en zonas costeras de $1.825 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ($5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), en una superficie de 44 km^2 se obtiene un volumen de polvo acumulado en la zona de estudio de 1.927 Tn/año ($44 \text{ Tn/km}^2 \text{ año}$), de los cuales sólo un 1% es de halita, o lo que es lo mismo, 20 Tn/año ($0.45 \text{ Tn/km}^2 \text{ año}$) son de halita. Por lo que la tasa media de acumulación de Cl es de $0.01825 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ que puede considerarse despreciable frente a la acumulación por aerosol marino.

5.3.2.- Química del agua de presa y la escorrentía

El 75% del agua usada para el riego proviene de tres presas situadas aguas arriba del barranco de La Aldea y según se concluyó en el balance hídrico (Capítulo 3) la recarga por retornos de riego constituye aproximadamente un 52% de la recarga total al acuífero.

En épocas muy lluviosas el agua corre desde la parte alta de la isla por los cauces de los barrancos desembocando en las presas próximas a la zona de estudio (Figura 3.8). Las primeras en llenarse son las presas de El Parralillo y Siberio que una vez llenas ceden agua a la presa de El Caidero de la Niña, la más cercana a la zona de estudio y de donde procede el agua de riego, por lo que esta última tiene un agua producto de la mezcla de las tres presas. En ciertos episodios de lluvia intensa, la presa de El Caidero de la Niña rebosa, produciendo escorrentía en el cauce del barranco principal de La Aldea que se une a la escorrentía producida dentro de la propia cuenca.

En la Tabla 5.7 se muestran los resultados de los análisis realizados al agua de las presas. La concentración de Cl en la presa del Siberio es de 24.8 mg/l , por debajo de la concentración del agua de lluvia en la estación pluviométrica 219, 46.9 mg/l , que es la más alejada del mar y la que tiene una influencia menor del aerosol marino, lo que confirma que esta estación tiene cierta influencia de aerosol marino.

Tabla 5.7. Valores de conductividad eléctrica y concentraciones de iones mayoritarios de agua de presa en la zona de estudio tomadas en el 2006. Los datos están en mg/l para los elementos químicos y $\mu\text{S/cm}$ para la conductividad eléctrica (CE).

Presa	C.E.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
El Caidero de la Niña	293	23.70	13.99	41.72	3.21	120.05	57.31	40.85	
El Parralillo	470	36.30	27.88	71.05	4.61	162.06	158.75	51.66	4.99
Siberio	134	7.9	4.92	21.71	1.91	48.78	11.18	24.82	4.99

En la Tabla 5.8 se recogen los resultados de los análisis realizados a aguas de escorrentía. Estos últimos fueron tomados en la parte superior del barranco principal de La Aldea (en la zona de San Clemente) justo después de unas lluvias importantes por su caudal en febrero de 2006.

Tabla 5.8. *Valores de conductividad eléctrica y concentraciones de iones mayoritarios de agua de escorrentía en la zona de estudio tomadas en el 2006. Las muestras de escorrentía I y II fueron tomadas en el barranco principal. Los datos están en mg/l para los elementos químicos y $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la conductividad eléctrica (CE).*

	C.E.	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
ESCORRENTÍA I	506	17.70	12.19	66.23	3.60	107.55	34.94	81.79	2.00
ESCORRENTÍA II	431	18.22	10.10	57.49	3.35	85.21	32.64	71.54	4.29

En general, las aguas de las presas poseen baja salinidad. El agua de la presa de El Caldero de la Niña y de Siberio es Bicarbonatadas Sódicas (Figura 5.37) con exceso de Na⁺, mientras que la presa de El Parralillo es Sulfatada Sódica. Como el agua de El Caldero de la Niña es mezcla de las otras dos, debe producirse un mayor aporte de El Parralillo a El Caldero de la Niña que de Siberio, según parece deducirse de la figura.

Se han muestreado también aguas de escorrentía, procedente de la que escurre lavando y arrastrando el terreno superficial. Esta agua proviene de la lluvia directa y del rebose del agua de presa, por lo que el agua de presa y la de escorrentía deben tener características químicas parecidas. El agua de escorrentía se caracteriza por una apreciable salinidad que aumenta a medida que se producen procesos de evaporación. El diagrama de Schöeller-Berkaloff (Figura 5.37) para la escorrentía muestra que son aguas Cloruradas Sódicas.

Comparando el agua de lluvia media de la estación 219 con el agua de presa de El Caldero se observa en esta última un aumento de la concentración de SO₄⁻² y Na⁺ y una disminución en la concentración de Ca⁺². Ello podría indicar un lavado del SO₄⁻² del suelo y un intercambio iónico. Si se realiza la misma comparación con el agua de escorrentía los resultados serían los mismos que con el agua de presa: aumento de la concentración de SO₄⁻² y Na⁺ y disminución de la concentración de Ca⁺², además de un aumento en la concentración de Cl⁻ y una disminución de HCO₃⁻. Esta salinización debe ser debida a un aporte del aerosol marino unido a un proceso de evaporación, y la disminución de HCO₃⁻ debe estar ligada a la precipitación de CaCO₃.

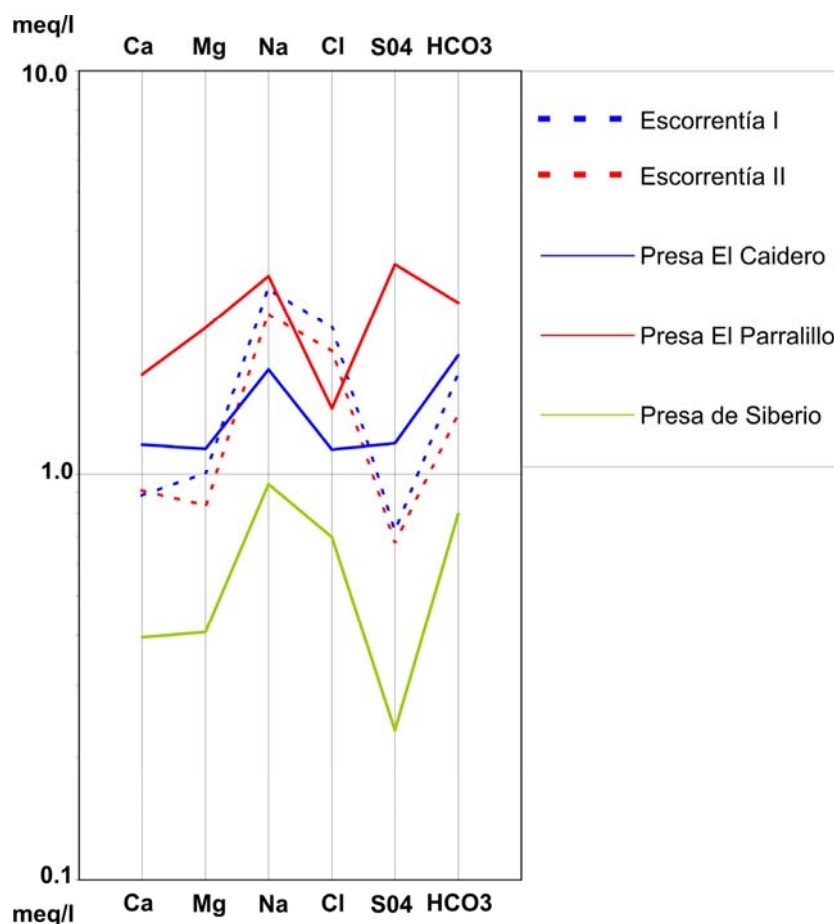


Figura 5.37. Diagrama de Schöeller-Berkaloff de las aguas de escorrentía tomadas en el barranco principal de La Aldea y de las tres presa ubicadas aguas arriba de la zona de estudio.

5.3.3.- Química del agua de riego y los retornos de riego

En periodos secos, cuando el agua de las presas no cubre todo el consumo agrícola, el agua de riego proviene únicamente de los pozos, cuyas aguas son tratadas en desaladoras para bajar su salinidad.

El agua de retorno de riego ha sido obtenida de un cultivo de tomate hidropónico. No se ha podido tomar muestra del retorno de cultivos en suelo, pese a ser el tipo de cultivo mayoritario, por no existir ningún lisímetro en la zona. El cultivo hidropónico solamente ocupa entre un 10% y un 15% de la superficie total cultivada en la zona de estudio y comenzó a utilizarse a partir del año 1997. Además hay que subrayar que los retornos de riego de la hidroponía suponen un menor impacto ambiental al acuífero ya que los aportes de agua y fertilizantes están sometidos a un estricto control evitando excesos innecesarios, por lo que los retornos de riego de los cultivos en suelo deben ser de concentraciones mayores y de peor calidad que los de hidroponía.

En la Tabla 5.9 se muestran los resultados de los análisis realizados al agua de riego y retornos de riego para los cultivos hidropónicos. Se observa un gran aumento de la conductividad

del agua de retornos de riego con respecto al agua de riego unido a un aumento de la concentración de Ca^{+2} , K^+ , SO_4^{-2} , Cl^- y especialmente de NO_3^- . Las aguas usadas para el riego son Bicarbonatadas Sódicas. La disminución de HCO_3^- en los retornos de riego es debido a que al pH del agua de los retornos de riego ($\text{pH}=5$) se encuentra en forma de H_2CO_3 (Figura 5.38).

Tabla 5.9. Valores de conductividad eléctrica y concentraciones de iones mayoritarios de agua de riego y de retornos de riego usadas en la zona de estudio tomadas en el 2006. Los datos están en mg/l para los elementos químicos y $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la conductividad eléctrica (CE).

	C.E.	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	HCO_3^-	SO_4^{-2}	Cl^-	NO_3^-
Agua para riego	530	27.60	16.46	53.36	7.39	148.80	53.28	54.32	3.72
Retornos de riego	2070	115.30	43.68	97.95	192.78	6.20	187.50	105.62	689.76

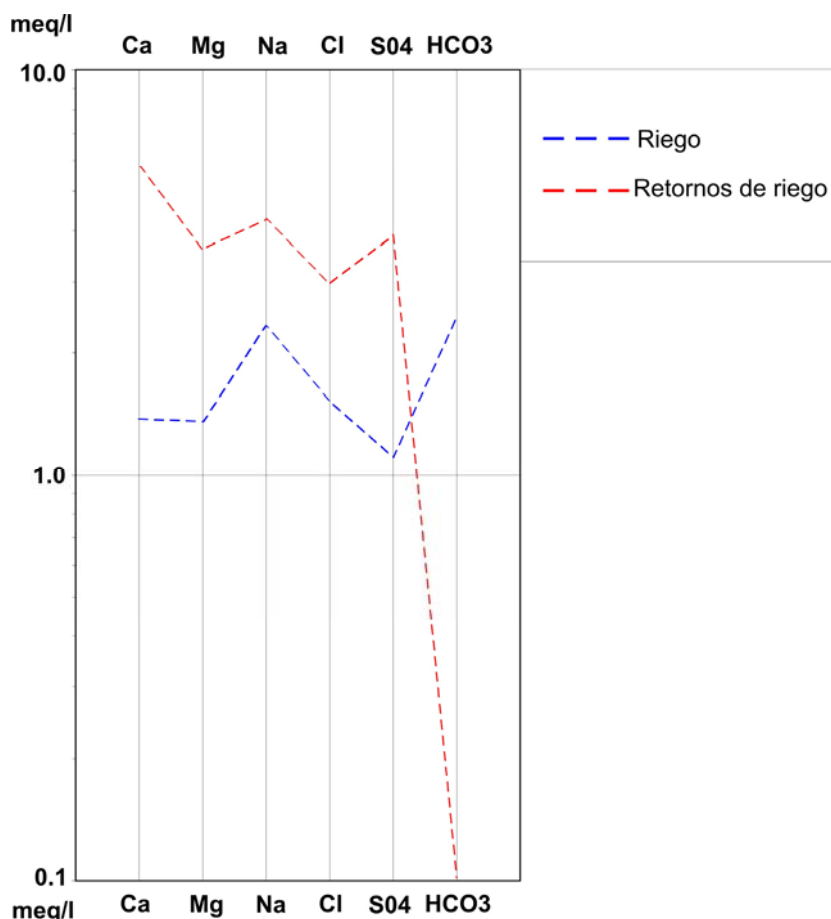


Figura 5.38. Diagrama de Schöeller-Berkaloff de las aguas de riego y retornos de riego tomadas en la zona de estudio en una explotación de tomates.

5.3.4.- Relación agua - roca. Influencia de basaltos y azulejos

La composición química del agua subterránea está en relación con la roca que la contiene y las rocas que va atravesando a través del acuífero, tendiendo al equilibrio químico en cada

momento (que logrará o no dependiendo del tiempo de contacto y de otros factores). Dada la localización de la zona de estudio en terreno volcánico y que las formaciones volcánicas apenas contienen sustancias aniónicas solubles, se puede esperar que se produzca la disolución de los cationes de la roca y que los aniones procedan de aportes externos (Custodio, 1978).

Los Basaltos Miocenos ocupan toda la superficie y pueden aportar al agua principalmente Ca^{+2} y Mg^{+2} . La Formación traquítico-riolíticas del Grupo Sáfico aportan Na^+ y K^+ . Esta última está localizada *in situ*, en el contacto de la zona de estudio con la zona intra-caldera y en las montañas de Horgazales y del Cedro, y deslizados, formando parte de los derrubios de ladera y del aluvial.

Los Azulejos en la zona de estudio no aparecen *in situ*, sino como Depósitos de Deslizamiento Gravitacionales y se emplazan en la zona de Las Tabladas. Delgado (1998), Cabrera *et al.* (2000), Cabrera *et al.* (2001), Muñoz *et al.* (2002), Muñoz (2005) y Cabrera *et al.* (2006) han identificado estos depósitos como fuente de la alta salinidad localizada en los pozos cercanos a Las Tabladas. Con el objetivo de estudiar la geoquímica de estos depósitos se llevó cabo (Muñoz, 2005) la producción sintética de agua a partir de un lavado con agua destilada de las muestras de roca tomadas en los Azulejos (Ensayos tipo Batch) (Muñoz, 2005; Cabrera *et al.*, 2006). Los resultados obtenidos (Tabla 5.10) fueron aguas Sulfatadas Sódicas con una baja concentración de Mg^{+2} y HCO_3^- . Además del aumento en las concentraciones de SO_4^{-2} y Na^+ , también se observa un aumento en las concentraciones de Ca^{+2} y Cl^- en las aguas de muestra. El aporte de SO_4^{-2} por los Azulejos podría explicar la alta concentración que se obtiene de este compuesto en los pozos cercanos a la zona de Las Tabladas cuya concentración es superior a la concentración obtenida en los pozos más alejados de esta y que se atribuye principalmente a los retornos de riego. Pérez Torrado (Comunicación Personal, 2007) afirma que se observaron picos de azufre en los análisis realizados a las muestras geológicas de los Azulejos deslizados de Las Tabladas, pero no se pudo atribuir a la presencia de un mineral concreto, por lo que este podría ser debido a la asimilación de sulfato de los retornos de riego de los invernaderos localizados en Las Tabladas por parte de las zeolitas y arcillas.

Tabla 5.10. Valores de conductividad eléctrica, sílice y concentraciones de iones mayoritarios de las muestras obtenidas en el ensayo Batch. Las unidades son mg/l para los elementos químicos y $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la conductividad eléctrica (CE).

Muestra	C.E.	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	HCO_3^-	SO_4^{-2}	Cl^-	NO_3^-
Saco 4 MA-132	6870	146.4	60.9	1499.8	25.8	57.6	2025.9	1190.0	78.4
Saco 4 MA-136	6860	212.0	46.0	1535.0	20.0	36.0	2213.5	1158.7	45.9

Existe una alineación de manantiales de Las Tabladas que surgieron en las épocas de mayor irrigación (entre 1987 y 1999), conocidos localmente como Choparrajana o Cañada Honda (CH). Se trata de una serie de rezumes que surgen en el contacto de Las Tabladas con el aluvial principal (Figura 5.10), cuya surgencia es variable con el tiempo y que están secos desde 1999. Estos presentan caudales de muy poca entidad, pero con cantidad suficiente para ser analizados. En la

Tabla 5.11 se presentan los resultados de los análisis donde se observa las altas conductividades de estas muestras así como la elevada concentración de NO_3^- lo que apunta a que el agua proviene de excedentes de riego.

Tabla 5.11. Valores de conductividad eléctrica y concentraciones de iones mayoritarios de las muestras de los rezumes localizados en Las Tabladas. Las unidades son mg/l para los elementos químicos y $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la conductividad eléctrica (CE) (Muñoz, 2005).

Muestra	Fecha	C.E.	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	HCO_3^-	SO_4^{-2}	Cl^-	NO_3^-
CH-1	09-jul-97	23800	527.40	562.17	4979.96	92.28	358.68	2336.21	8092.94	571.02
CH-1	29-ago-97	24700	605.00	574.51	4784.00	199.80	326.96	2367.12	8049.98	577.22
CH-1	07-nov-97	21900	545.00	574.63	4268.80	99.70	335.50	2088.48	7239.87	396.18
CH-1	24-sep-98	23900	635.00	629.20	4462.00	144.67	335.50	2324.16	8047.85	223.20
CH-1	03-mar-00	38730	42.00	23.96	792.35	12.51	292.19	411.36	8100.82	63.86
CH-2	09-jul-97	26300	565.60	626.78	5239.40	91.10	338.55	2755.54	8925.06	379.44
CH-2	07-nov-97	22400	552.40	574.63	4370.00	117.30	322.69	2240.40	7292.06	841.34
CH-3	17-may-97	22500	720.00	532.40	4379.89	80.15	275.11	2083.82	7805.03	546.84
CH-3	09-jul-97	23800	630.00	611.90	4439.92	80.15	287.92	2229.60	8049.98	252.96
CH-3	29-ago-97	25900	692.40	653.40	5089.90	212.31	280.60	2423.47	8575.03	835.45
CH-3	07-nov-97	22300	690.00	586.85	4439.00	112.22	280.60	2013.41	7687.88	658.44
CH-3	24-sep-98	25500	862.40	733.74	4418.30	152.49	289.75	2318.40	8609.81	331.08
Cañada Honda	20-may-98	17940	485.00	546.92	3438.50	44.96	340.99	1812.00	6254.75	148.80
Cañada Honda-M1	23-abr-87	25478	744.00	738.10	3686.90	37.54	209.84	1391.04	7984.66	62.00
Cañada Honda-M2	23-abr-87	29129	772.00	859.10	4374.60	44.96	183.00	1319.04	9396.85	62.00
Cañada Honda-M3	23-abr-87	28854	768.00	810.70	4374.60	39.88	192.76	1439.04	8930.03	93.00
Cañada Honda-M5	23-abr-87	30396	756.00	873.62	4749.50	40.66	190.32	1607.04	9631.15	186.00
Cañada Honda-M6	23-abr-87	31582	796.00	880.88	5060.00	43.01	97.60	1463.04	10226.13	279.00
Cañada Honda-M7	23-abr-87	30624	720.00	861.52	5060.00	43.01	200.08	1487.04	9840.60	49.60

En la Figura 5.39 se muestra un Diagrama de Schöeller- Berkaloff de los resultados de los ensayos Batch, los manantiales de Las Tabladas y los pozos cercanos a la zona de influencia de los Azulejos (Figura 5.10) junto a una muestra de agua de mar. Las aguas de los pozos son Cloruradas Sódicas con una alta salinidad y muestran un enriquecimiento en Cl^- , Ca^{+2} y Mg^{+2} y algo de HCO_3^- respecto a los resultados de los ensayos Batch, por lo que es de esperar que el agua de los pozos tengan un aporte de salinidad extra además de los azulejos que posiblemente sean los retornos de riego ya que el valor de SO_4^- es alto y el lavado de los basaltos de donde puede proceder el Mg^+ . Las muestras de los manantiales son también Cloruradas Sódicas, presentan unas proporciones muy parecidas al agua de mar con un enriquecimiento en Ca^{+2} y HCO_3^- que podría apuntar a la disolución de carbonatos (Muñoz, 2005) y un leve empobrecimiento en Mg^{+2} .

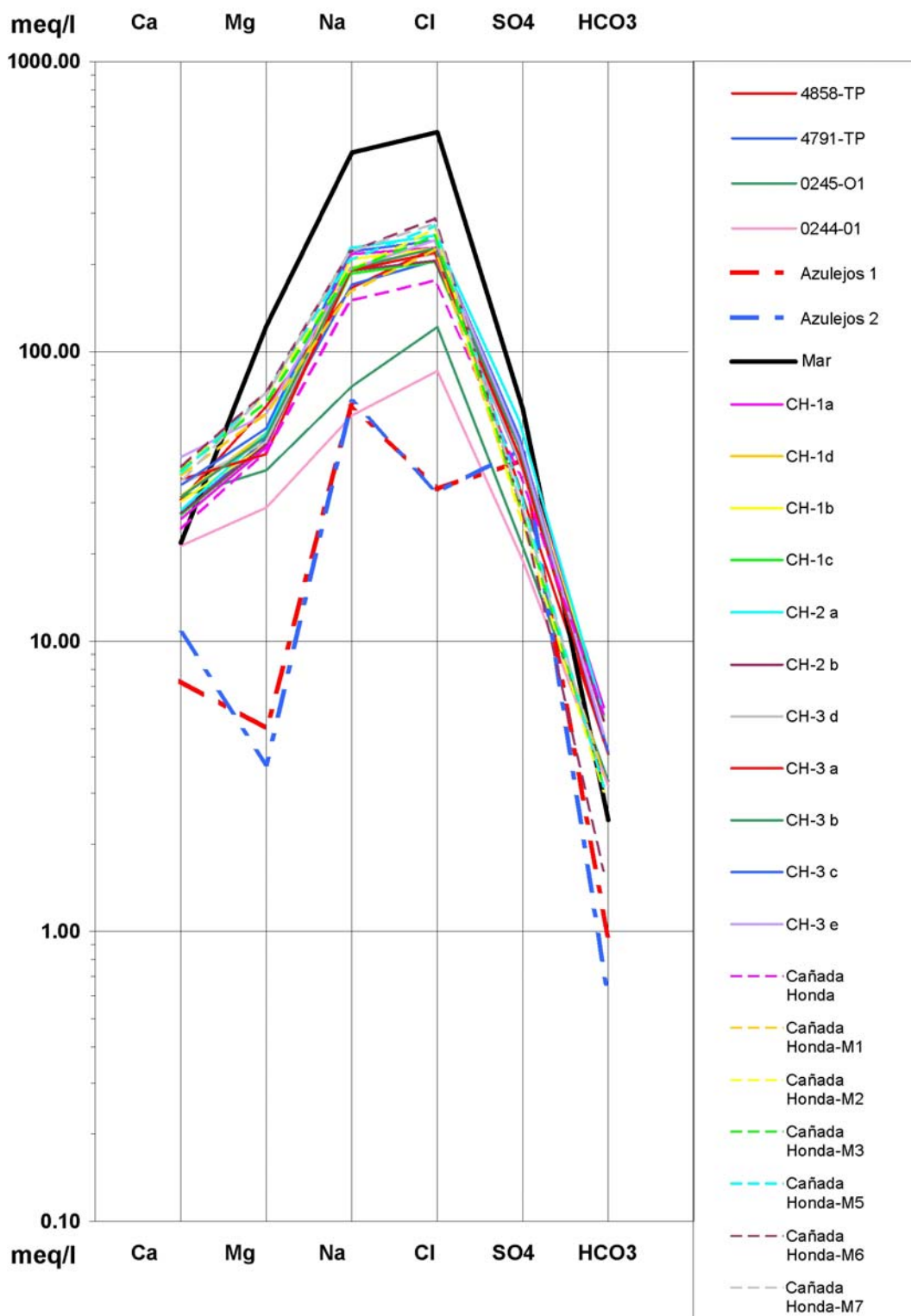


Figura 5.39. Diagrama de Schöeller- Berkaloff de las muestras de los ensayos Batch (Azulejos 1 y 2), manantiales de Las Tabladas (CH y Cañada Honda) y pozos influenciados por los azulejos (ubicación de los pozos en Figura 5.10).

5.4.- MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

Se ha empleado la modelación hidrogeoquímica para establecer los procesos de mezcla y la evolución de las reacciones químicas que tienen lugar en el acuífero y que determinan la composición química de las aguas subterráneas de la zona de estudio. Para ello se han analizado y simulado, por un lado, las reacciones que se producen durante la percolación del agua de lluvia hasta que alcanza la zona saturada, y por otro lado, las reacciones que se producen a lo largo de diferentes líneas de flujo.

Para el estudio de la evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas se ha empleado el programa PHREEQC (Appelo y Postman, 1993; Parkhurst y Appelo, 1999). Este programa permite la modelación hidrogeoquímica de un determinado sistema para la determinación del tipo y evolución de las reacciones químicas principales, así como las proporciones relativas de las fases que intervienen en dichas reacciones.

5.4.1.- Proceso de simulación

Las aguas subterráneas de la zona de estudio presentan una evolución química que podría dividirse en varias etapas, algunas naturales y otras antrópicas. Estas etapas son las siguientes:

- Proceso de evapotranspiración.
- Influencia de la deposición seca de aerosol marino y el polvo sahariano.
- Proceso de incorporación del CO₂ del suelo.
- Meteorización y proceso de disolución de los minerales silicatados.
- Aportes de los retornos de riego (origen antrópico).
- Aportes de las aguas procedentes de Las Tabladas (con influencia antrópica).

En la Figura 5.40 se muestra el proceso de mineralización de las aguas subterráneas en una parte del acuífero no influenciada por efectos antrópicos, sólo con agua de origen natural (con una baja concentración de nitratos).

Los datos utilizados en la modelación son los siguientes:

Evaporación

En el capítulo 3 apartado 3.2 de climatología se muestran los resultados del cálculo de la evapotranspiración mediante el balance diario de agua en el suelo. La evapotranspiración potencial en el área donde se localiza la estación 219 (ésta es la menos afectada por el aerosol marino ya que se localiza a mayor altura y es la más alejada de la costa) ha sido calculada por el método de Thornthwaite. La evapotranspiración real varía entre un 32 y 99% dependiendo de las

características pluviométricas de los distintos años con un valor para el periodo estudiado entre 60% y 70% de la precipitación.

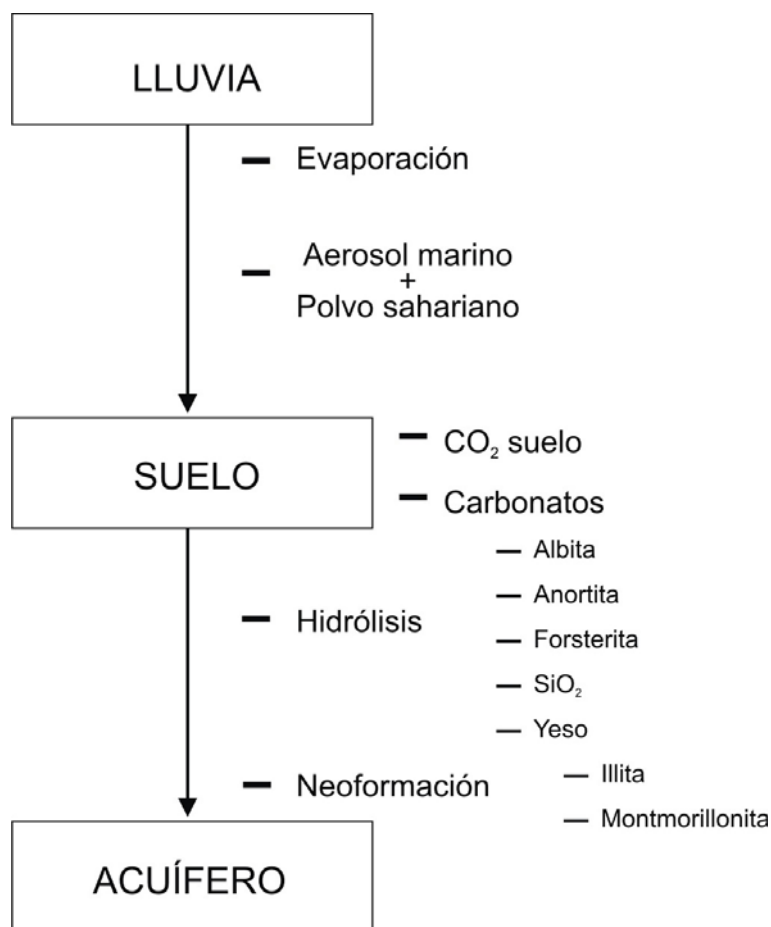


Figura 5.40. Modelo conceptual de la mineralización del agua en la zona no saturada en régimen natural.

Influencias de la deposición seca de aerosol marino y el polvo sahariano

La tasa media ponderada para el área de estudio de aporte de Cl⁻ en el suelo obtenida a partir de los datos obtenidos en Muñoz (2005), $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, está dentro de los rangos propuestos por Custodio (1993) para áreas de costa.

La tasa media de aporte de Cl⁻ de polvo sahariano en el suelo es de $0.01825 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ que puede considerarse despreciable frente a la acumulación por aerosol marino.

Procesos de CO₂ en el suelo

El cálculo de la presión parcial de CO₂ (PCO₂) en el suelo para establecer el equilibrio entre el agua de lluvia con el CO₂ del suelo ha sido realizado mediante la fórmula que propone Brook *et al.* (1983) que estudió la dependencia de la PCO₂ de las variables temperaturas, Precipitación,

evapotranspiración potencial y evapotranspiración real considerando la ETR (mm) la mejor variable para su cálculo mediante la relación siguiente:

$$\log(PCO_2) = -3.47 + 2.09(1 - e^{-0.00172ETR})$$

La ETR en el área de estudio para el período 1992-99 ha sido evaluada en 89 mm/año para una precipitación media de 144 mm/año, por lo que a partir de este método se obtuvo un valor orientativo para la presión parcial de CO₂ del suelo de 0.0007 atm pudiendo oscilar entre 0.0005 atm y 0.001 atm.

La meteorización y procesos de hidrólisis de minerales

Para este proceso se han considerado los siguientes minerales: albita, anortita, calcita, forsterita, SiO₂ y yeso. Los minerales de neoformación considerados fueron: Illita y Montmorillonita. Estos minerales y arcillas son comunes en las rocas volcánicas y suelos de la zona (Muñoz, 2005).

5.4.1.1.- Simulación para pozos no influenciados por aportes antropogénicos

Se ha simulado el agua de lluvia hasta las aguas subterráneas. Para ello se ha seleccionado la zona sur del acuífero: estación de lluvia 219 y pozo 4823 TP (localización de la estación Figura 5.35 y localización de pozo Figura 5.10), ambos localizados en la misma zona y sin influencia de los retornos de riego ya que no existen nitratos en el pozo.

Primero se establece el equilibrio entre el agua de lluvia y el CO₂ del suelo. Posteriormente se produce el proceso de evaporación donde se extrae un 72.4% del volumen de agua (40.22 mol H₂O) para obtener un contenido de cloruro similar a la de la muestra del pozo 4823-TP. Este porcentaje de evaporación está dentro del rango obtenido en el balance hídrico y próximo al valor medio de 69%.

A continuación se simula la alteración de 3.9 mmol/l de albita para alcanzar el contenido de sodio y 1.28 mmol/l de anortita para alcanzar el contenido de calcio y precipitan 5.9 mmol/l de calcita para alcanzar el contenido de bicarbonato, 0.126 mmol/l de yeso para alcanzar el contenido de azufre, 3.14 mmol/l de illita y 0.32 mmol/l de montmorillonita para alcanzar el contenido de magnesio y potasio. Como se observa en la Figura 5.41 esta reproducción obtiene un buen ajuste entre las concentraciones químicas calculadas y observadas para el pozo 4823-TP.

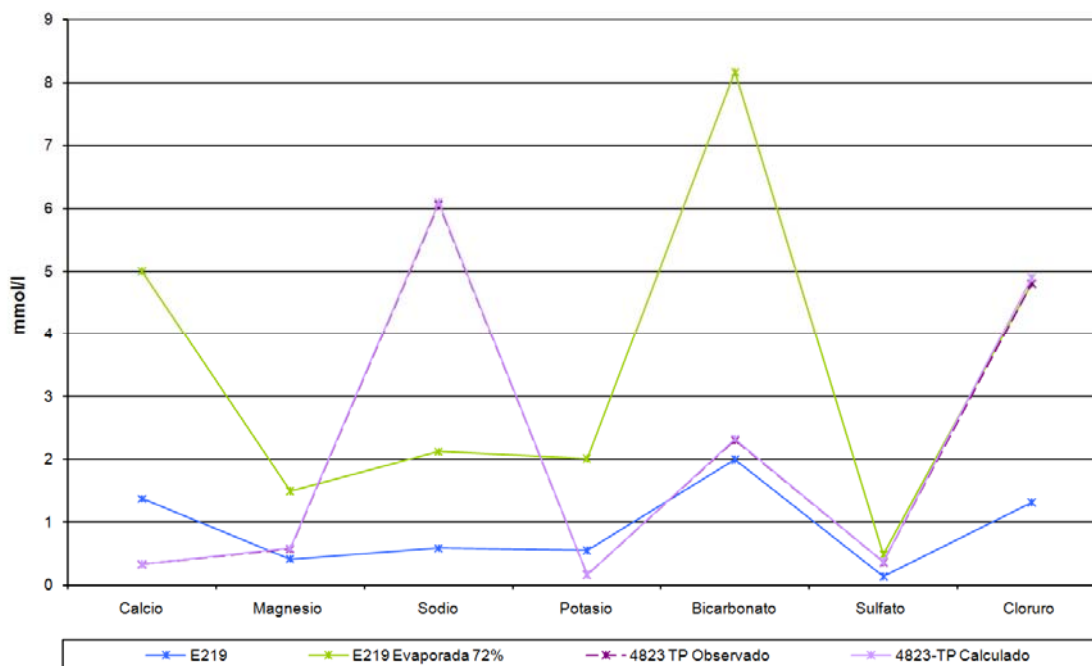


Figura 5.41. Representación de las muestras de lluvia media para la estación 219, el agua de lluvia evaporada y del pozo 4823-TP observado y calculado.

5.4.1.2.- Simulación de reacciones a lo largo de una línea de flujo

A partir del conocimiento de la litología y funcionamiento hidrológico del sistema y siguiendo la línea de flujo este-oeste, se ha reproducido la composición química de las muestras de agua obtenida en los pozos 0779-TP y 0218-O1 localizados en la parte intermedia y final del aluvial principal respectivamente a partir del agua del pozo 2714-TP localizado en la cabecera de este (Figura 5.10).

En la simulación de la composición química de las aguas del pozo 0779-TP (Figura 5.42) primero se ha mezclado el agua obtenida con 51% de agua procedente de los retornos de riego para simular la mezcla con los mismos como se ha evidenciado en los estudios hidrogeoquímicos anteriores. Posteriormente, se ha mezclado el agua resultante con un 2% de agua de mar que representa el aerosol marino alcanzando la concentración de cloruro y sodio existente en el pozo. En una etapa posterior, se considera la alteración de 1.98 mmol/l de calcita, 6.3 mmol/l de yeso, 33.1 mmol de SiO₂ (amorfa) y 6.9 mmol/l de forsterita para alcanzar el contenido de magnesio y se precipitan 4 mmol/l de illita y 25.5 mmol/l de montmorillonita. Como se observa en la Figura 5.42 esta reproducción obtiene un buen ajuste entre las concentraciones químicas calculadas y observadas para el pozo 0779-TP.

La composición química del agua del pozo 0218-O1 a partir de la composición química del agua del pozo 2714-TP (Figura 5.43) se obtiene de mezclar este último con un 89% de aguas de retornos de riego y un 4% de aerosol marino. A continuación se considera la alteración de 4

mmol/l de calcita, 7 mmol/l de yeso, 172.33 mmol de SiO₂ (amorfa), 4.5 mmol de albita y 10.3 mmol/l de forsterita y la formación de 6.98 mmol/l de illita y 43 mmol/l de montmorillonita.

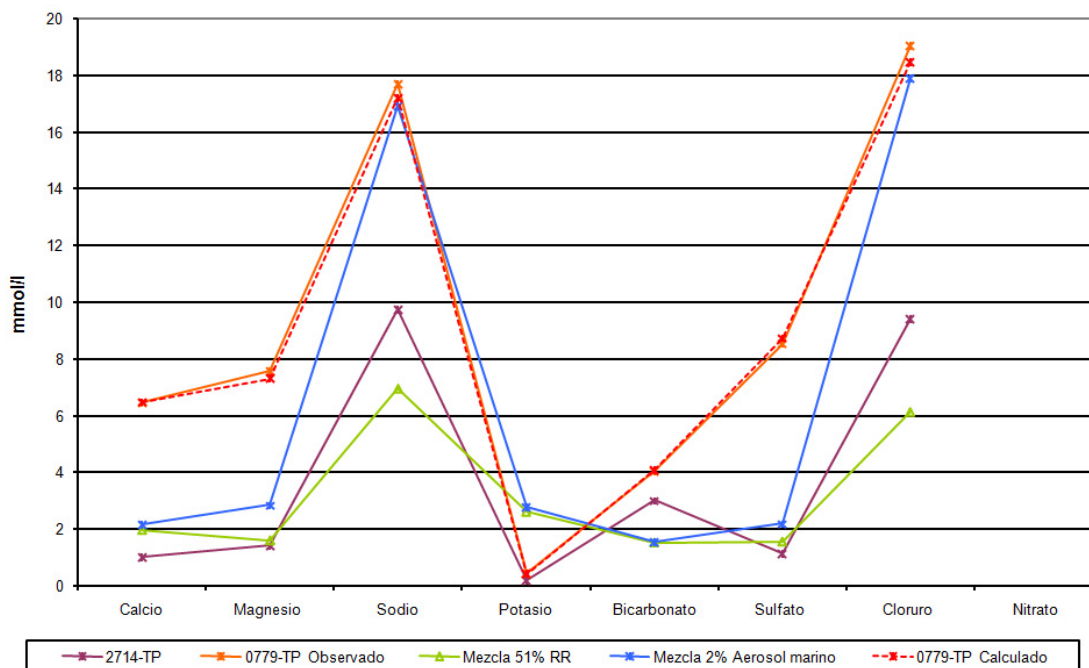


Figura 5.42. Representación de las muestras de los pozos 2714-TP, el resultado de la mezcla del agua del pozo 2714-TP con el agua de retornos de riego y el aerosol marino y del pozo 0779-TP observado y calculado.

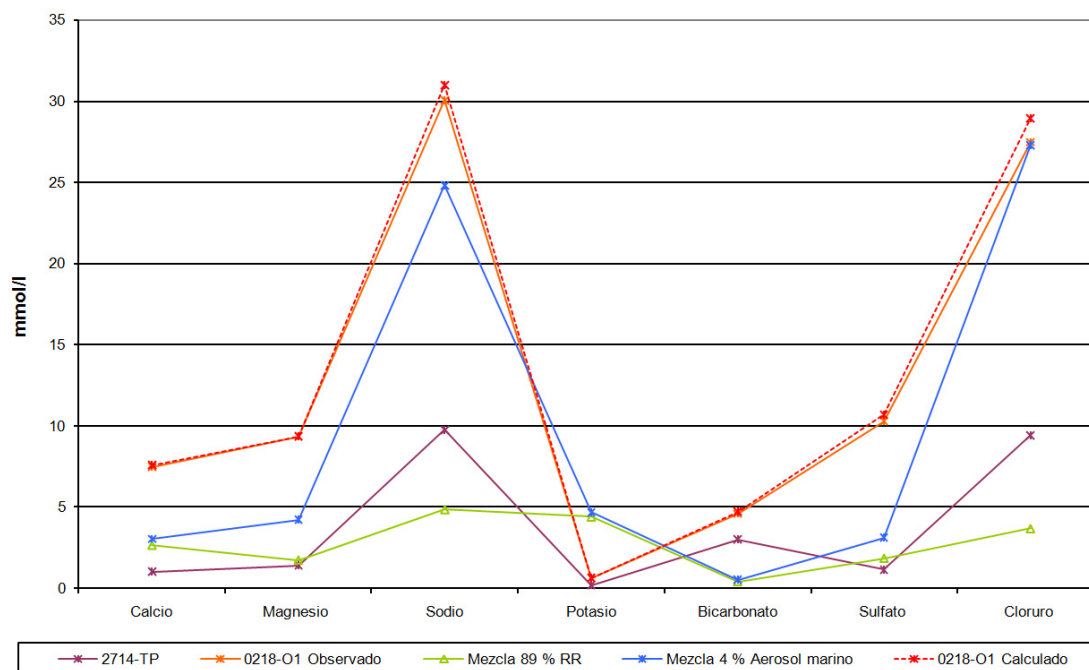


Figura 5.43. Representación de las muestras de los pozos 2714-TP, el resultado de la mezcla del agua del pozo 2714-TP con el agua de retornos de riego y el aerosol marino y del pozo 0218-O1 observado y calculado.



6.
MODELO DE TRANSPORTE DEL ACUÍFERO DE
LA ALDEA

Capítulo 6. - MODELO DE TRANSPORTE DE SOLUTOS DEL ACUÍFERO DE LA ALDEA

6.1.- INTRODUCCIÓN

El transporte de cualquier sustancia química en las aguas subterráneas depende de las propiedades físicas y químicas del compuesto y de la naturaleza del suelo y de la zona no saturada a través de los cuales se produce la migración de dicha sustancia. Las sustancias disueltas, contaminantes o no, una vez incorporadas al sistema de flujo del acuífero, pueden ser transportadas por el propio movimiento del agua (advección), por dispersión hidrodinámica o por difusión molecular. En una situación ideal, si el transporte fuera exclusivamente advectivo, tenderían a moverse en la dirección general del flujo y a una velocidad que es igual a la velocidad media del agua subterránea. Sin embargo, a causa de las tortuosidades del terreno, los solutos tienden a separarse de la trayectoria ideal del agua y a moverse con diferente velocidad. Esta desviación de la trayectoria ideal se denomina dispersión mecánica o hidráulica. Cuando la dispersión se produce, además, a consecuencia de una difusión molecular, simultánea al movimiento del agua, se denomina dispersión hidrodinámica (Carrera, 1985). Estos procesos causan una reducción en la concentración de una sustancia disuelta en las aguas subterráneas. El transporte en el que no existe pérdida de masa, se denomina transporte conservativo. En el caso de que haya pérdida de masa se habla de transporte no conservativo, ésta pérdida de masa podría ser debida a procesos de sorción, decaimiento, volatilización, entre los más relevantes.

Para el modelado del transporte de soluto en los acuíferos se requiere dos pasos. Una primera etapa consistente en calibrar el modelo de flujo según las condiciones hidráulicas del acuífero, y una segunda etapa posterior, en la que se realiza la calibración propiamente dicha del modelo de transporte de contaminantes. No obstante, debe observarse, que dada la complejidad del modelación del transporte, el proceso de calibración puede llevar a problemas de no unicidad en la solución, problema este que puede ser mitigado con una mejora del conocimiento del medio (Davis *et al.*, 1993). En el presente caso, en el modelo de flujo en régimen estacionario y transitorio han sido calibrados los parámetros de flujo y se parte de estos datos para realizar el modelo de transporte de soluto.

Los métodos numéricos utilizados para resolver la ecuación de transporte pueden ser clasificados en tres grupos: métodos de Euler, métodos de Lagrang y métodos mixtos Euler-Lagrang (Neuman, 1984).

En los métodos de Euler, la ecuación de transporte es resuelta empleando una técnica como las diferencias finitas estándar o elementos finitos. Estos métodos conservan el balance de materia, y pueden emplearse de forma efectiva en aquellos problemas donde predominen los términos de dispersión o reacción. Sin embargo, en los problemas donde predomina el término de la advección, como en este caso, los métodos de Euler pueden ser susceptibles de una excesiva dispersión numérica o de una oscilación artificial (Neuman, 1984).

Los métodos de Lagrang, basados en las técnicas del rastreo de partículas, se muestran muy eficientes en aquellos problemas en los que predomina la advección. Sin embargo, en algunos casos pueden dar problemas de estabilidad numérica y dificultades computacionales en medios heterogéneos con múltiples fuentes y sumideros y complejas condiciones de contorno (Yeh, 1990).

Los métodos mixtos Euler-Lagrang combinan las ventajas de ambas técnicas resolviendo el término advectivo con el método de Lagrang (rastreo de partículas) y el resto de términos de la ecuación de transporte con el método de Euler (diferencias finitas). No obstante algunos de los procedimientos mixtos Euler-Lagrang, como el método de las características, no garantizan la conservación de la masa (Neuman, 1984).

Dentro de los métodos de Euler se ha desarrollado una técnica de transporte conocida como TVD (Total-Variation-Diminishing) principalmente en el área de la dinámica de fluidos computacional. El término Total-Variation-Diminishing hace referencia al fundamento de este método en el que la suma de las diferencias entre las concentraciones de nodos adyacentes se disminuye en los sucesivos pasos de tiempo, una condición necesaria si la solución quiere permanecer libre de oscilaciones. El método TVD pertenece al grupo de los métodos de Euler, aunque comparado con los métodos estándar de diferencias finitas, se muestra en general más exacto en la resolución de problemas donde predomina la advección, aun a costa de una mayor necesidad computacional. Comparado con los métodos de Lagrang o métodos mixtos de Euler-Lagrang, el TVD no es tan eficaz en la eliminación de la dispersión numérica, sin embargo la conservación de la masa, los menores requerimientos de memoria y alguna ventaja adicional hacen que TVD suponga una buena solución de compromiso entre los métodos de diferencias finitas y los de rastreo de partículas (Harten, 1983; 1984). Este método ha sido usado para el desarrollo del modelo de transporte.

Generalmente resulta más difícil calibrar un modelo de transporte de solutos de un acuífero que calibrar el modelo de flujo subterráneo. El número de parámetros que se necesita para calcular la distribución de niveles del modelo de flujo es menor que el que se necesita para calcular las variaciones de la concentración de un modelo de transporte de solutos. Como la velocidad del flujo del agua subterránea se calcula a partir de la distribución de niveles, y como tanto el transporte advectivo como la dispersión hidrodinámica son funciones de la velocidad del flujo, siempre se debe calibrar el modelo de flujo subterráneo antes que el de transporte. De hecho, una

de las claves principales para entender un problema de transporte de solutos en el campo es desarrollar un modelo de flujo preciso (Konikow, 1996).

Las distintas campañas de campo y redes de control realizadas en la zona de estudio han aportado la información necesaria para abordar con garantías un modelo de transporte en el acuífero de La Aldea. El presente modelo se ha planteado como un primer paso hacia la modelación del transporte de solutos en la zona, tomando como base los cloruros, dadas sus características químicas y la importancia y problemática de este ión en la calidad de las aguas subterráneas del sistema.

Por otro lado, el ión cloruro, en general, es un ión conservativo que no se ve afectado por procesos modificadores, produciéndose su transporte solo por procesos de advección y dispersión hidrodinámica. Su origen está ligado estrechamente a las contribuciones de las distintas aguas que conforman la concentración final de un acuífero. Por ello, su concentración es una guía excelente para conocer el porcentaje de la mezcla de estas aguas y las concentraciones que deben tener los otros iones, si no intervienen otros procesos. En suma, el ión cloruro, es un indicador del proceso de mezcla por lo que este modelo de transporte va a permitir contrastar los resultados obtenidos tanto en el estudio hidroquímico, como en el modelo de flujo.

Todos los programas de transporte soportados por Visual MODFLOW son versiones mejoradas que han evolucionado de la versión inicial de MT3D (Mass Transport in 3 Dimension) desarrollado por Zheng (1990). Desde la primera publicación (1990) han aparecido numerosas versiones tanto de dominio público como privadas, que han perfeccionado las versiones iniciales y mejorado la eficacia numérica. El programa de transporte de masa que se ha utilizado para la modelización de los cloruros ha sido el MT3DMS. Se trata de un modelo de transporte modular tridimensional que es capaz de simular la advección, dispersión y reacción química de varias especies de contaminantes en el agua subterránea. Este modelo fue desarrollado por Zheng y Wang en 1999. Esta versión supone la inclusión de un esquema TVD (Total-Variation-Diminishing) de tercer orden para la resolución del término advectivo entre otras incorporaciones.

6.2.- INFORMACIÓN PREVIA DE PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS

Uno de los parámetros hidroquímicos fundamentales para el desarrollo del modelo de transporte es la dispersividad. Existen varios métodos para realizar una estimación de la dispersividad longitudinal α_L . Sin duda el método más fiable es realizar un ensayo en campo con trazadores. No obstante, el tiempo necesario, el coste de este ensayo y las dificultades de la zona de estudio hacen que la estimación a través de este método sea, en el acuífero de La Aldea, totalmente inviable. Por ello se suele recurrir a un método mucho más sencillo y económico que considera que la dispersión longitudinal es 0.1 veces la longitud de la pluma (Pickens y Grisak, 1981; Gelhar *et al.*, 1992; Spitz y Moreno, 1996). Esta aproximación asume que la dispersividad varía linealmente con la escala. No obstante, posteriormente Xu y Eckstein (1995) ajustaron los

mismos datos publicados por Gelhar *et al.* (1992), y obtuvieron la ecuación siguiente para estimar la dispersividad:

$$\alpha_L = 0.83(\text{Log}_{10} L_p)^{2.414}$$

donde L_p es la longitud de la pluma [L].

Si se aplica la ecuación de Xu y Eckstein en el acuífero de La Aldea a la pluma generada por los azulejos de Las Tabladas (Figura 6.1) en el aluvial principal considerando que dicha pluma se extiende desde Las Tabladas a lo largo del aluvial en la dirección del flujo con una longitud de la pluma de 2000 a 4000 m, la ecuación reporta un valor de dispersividad (α_L) para el aluvial principal entre 15 y 19 m.

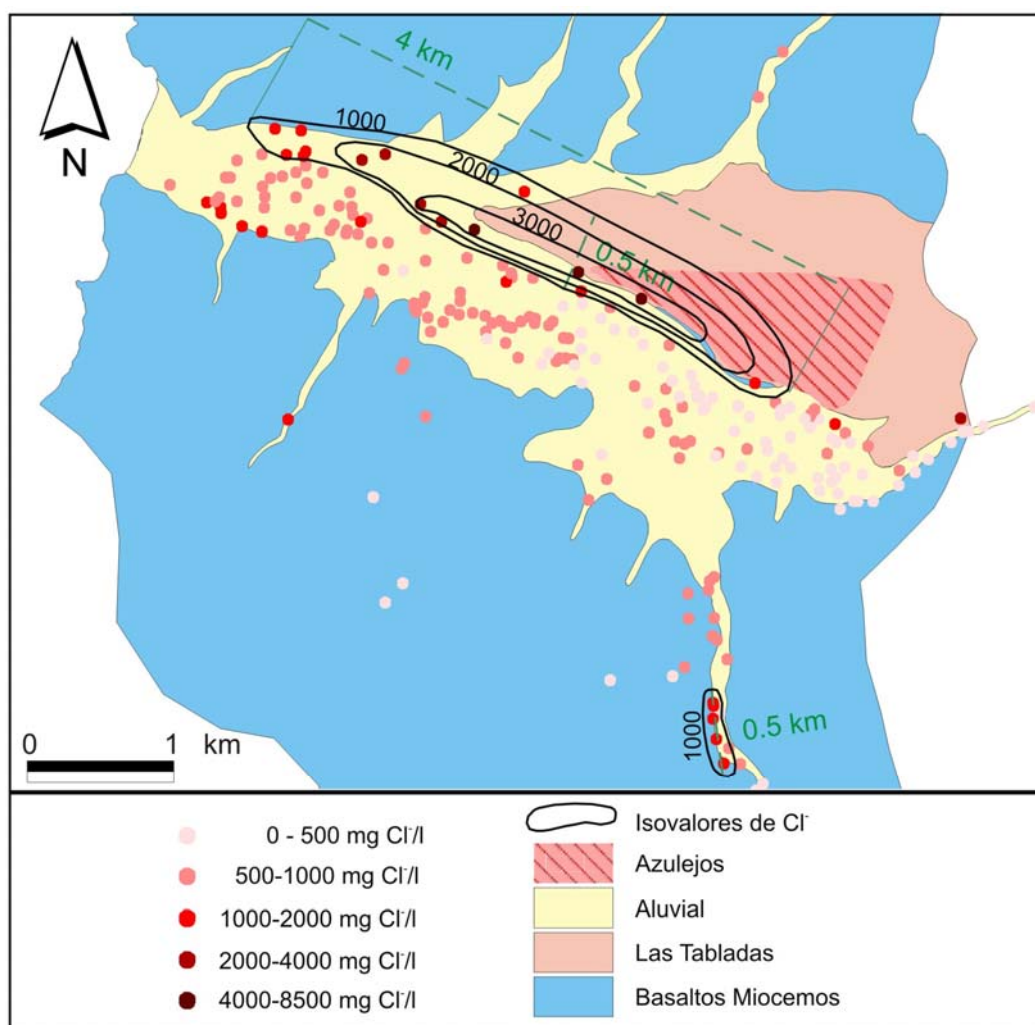


Figura 6.1. Pluma de cloruro generada por los azulejos de Las Tabladas.

Se han encontrado en la bibliografía distintos valores de dispersividad tanto para el aluvial y como para los basaltos (Tabla 6.1). Los valores de dispersividad varían entre 0.3 m y 61 m para el

aluvial y 0.6 m para los basaltos. Por lo que los valores obtenidos para la zona de estudio mediante la ecuación de Xu y Eckstein (1995) para el aluvial principal están dentro del rango que indica la bibliografía.

En cualquier caso, el parámetro de la dispersividad del aluvial va a ser muy variable dado el carácter heterogéneo del aluvial, el carácter empírico de su determinación y la imprecisión de la longitud de la pluma generada por los azulejos de Las Tabladas. Sin embargo, para el modelado matemático es necesario aportar una estimación inicial, y estas expresiones empíricas proporcionan, en general, buenos datos iniciales para la modelización que posteriormente van a ser calibrados.

Tabla 6.1. Valores de dispersividad para el aluvial y los basaltos localizados en la bibliografía.

Dispersividad (α_L)	Medio	Autor
10-20 m	Aluvial	Daniels (1982)
30.5 m ($\alpha_H=9.1$ m)	Aluvial	Konikow y Bredehoeft (1974)
0.3-1.5 m	Aluvial	New Zealand Ministry of Works and Development, Water and Soil Division (1977)
41 m ($\alpha_H=10$ m y $\alpha_V=0.07$ m)	Aluvial	New Zealand Ministry of Works and Development, Water and Soil Division (1977)
61 m ($\alpha_H=18$ m)	Aluvial	Robson (1974)
61 m ($\alpha_V=0.2$ m)	Aluvial	Robson (1978)
0.6 m	Basalto	Gelhar (1982)

Del mismo modo que con la dispersividad longitudinal, puede ser necesario estimar la dispersividad transversal horizontal (α_H) y vertical (α_V). Existen varias relaciones que estiman la dispersividad transversal horizontal y vertical a partir de la longitudinal. Para la dispersividad transversal se emplea usualmente la relación $\alpha_H = 0.1\alpha_L$ (Gelhar *et al.*, 1992) o $\alpha_H = 0.33\alpha_L$ (ASTM, 1995; USEPA, 1986). Por su parte la dispersividad vertical se estima como $\alpha_V = 0.05\alpha_L$ (ASTM, 1995) o bien como un valor entre $0.025\alpha_L$ y $0.1\alpha_L$ (USEPA, 1986).

La estrategia empleada en el modelado de acuíferos (Anderson, 1979) fue partir de un valor estimado de dispersividad a partir de las relaciones anteriores u obtenido en la literatura para acuíferos de similares características, y posteriormente calibrar el modelo ajustando la dispersividad (junto con otras variables de transporte) hasta que los valores observados y calculados alcancen una regresión aceptable. En la Figura 6.2 se muestra la distribución espacial de las zonas de dispersividad para la capa superficial, la dispersividad de las capas 2 y 3 del modelo coincide con la de los Basaltos Miocenos de la capa 1.

Otro parámetro necesario en el modelo de transporte es la porosidad eficaz, que determina la velocidad del flujo y por tanto el transporte advectivo. Este parámetro no ha sido calibrado en régimen transitorio donde se calibraron la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, por lo que será calibrado en el modelo de transporte. En la Figura 6.2 se muestra la distribución espacial de las zonas de porosidad eficaz para la capa superficial del modelo, la

porosidad eficaz de las capas 2 y 3 es la misma que la de los basaltos de la capa 1. Solo se disponen de datos obtenidos de la bibliografía para este parámetro. El rango de porosidad eficaz para el aluvial varía entre 3% y 35% (SPA-15, 1975; Custodio, 1978; Custodio y Llamas, 1996) y para los basaltos 0.1% y 1% (SPA-15, 1975; Custodio, 1978). Tanto la dispersividad como la porosidad eficaz se han zonificado basándose en criterios geológicos como litología, grado de alteración y espesor de las distintas unidades geológicas.

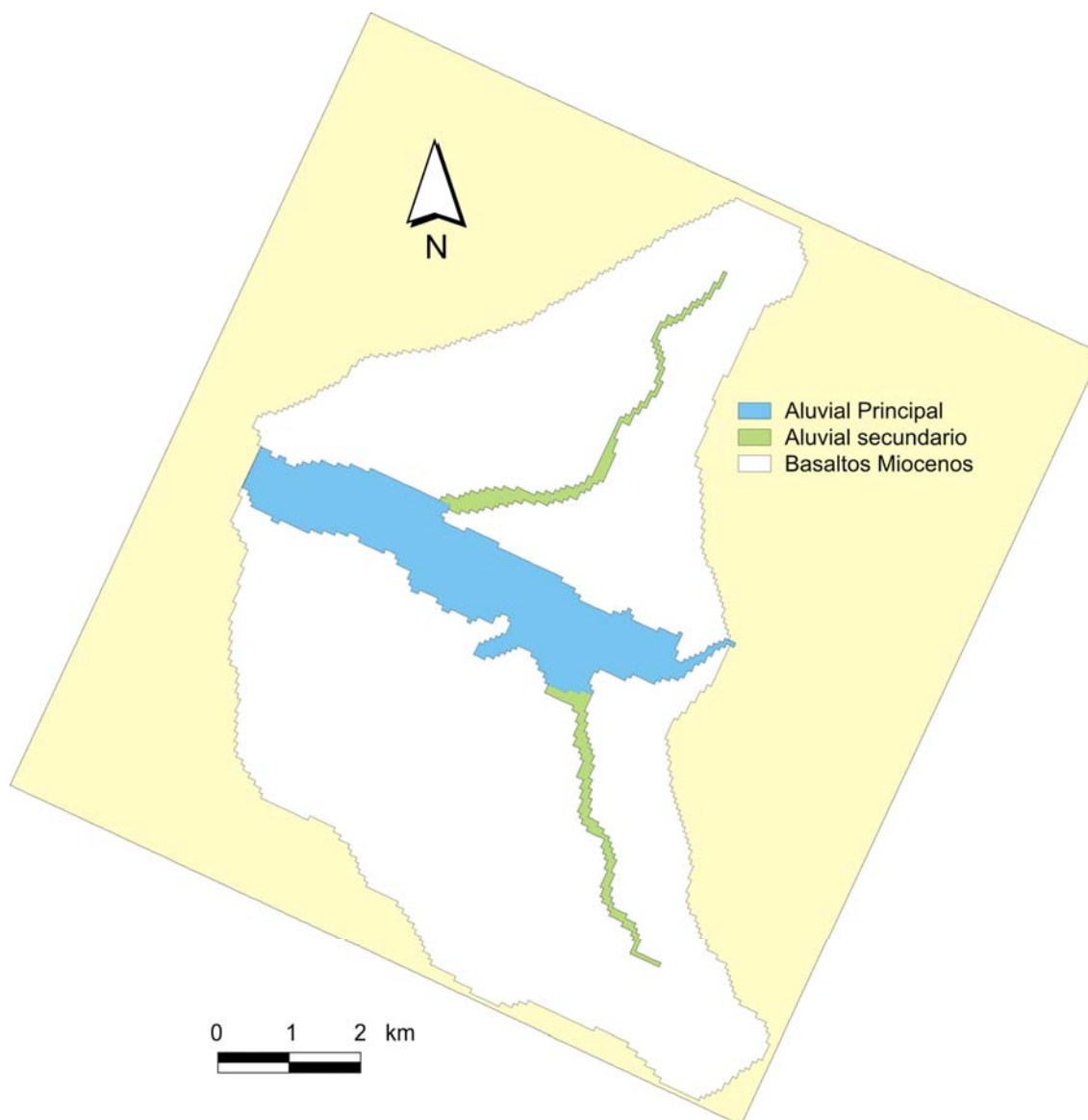


Figura 6.2. Distribución espacial de las zonas de dispersividad y porosidad eficaz para la capa superficial del modelo de transporte de soluto en régimen estacionario. La dispersividad y porosidad eficaz de las capas 2 y 3 es la misma que la de los Basaltos Miocenos de la capa 1.

El valor del coeficiente de difusión molecular del agua para medios porosos es 10^{-9} m²/d según la bibliografía (Schneider y Fein, 2004; Oude Essink *et al.*, 2004; Abarca *et al.*, 2007; Giambastiani *et al.*, 2007). Este parámetro, depende de las propiedades del contaminante y del gradiente de concentración, y no de las propiedades del terreno, por lo que no ha sido zonificado y

se ha considerado homogéneo para toda la zona de estudio. Solo se disponen de los datos obtenidos en la bibliografía para este parámetro.

A modo de resumen, a partir de la información bibliográfica se definió un rango de valores para los distintos parámetros de transporte de soluto (Tabla 6.2), algunos de los cuales durante el proceso de calibración han permanecido inalterados y otros han sido modificados. El rango de valores para los distintos parámetros son los siguientes: el valor de la dispersividad longitudinal varía entre 0.3 y 61 m según la bibliografía para el aluvial y entre 15 y 19 m si aplicamos la ecuación de Xu y Eckstein a la pluma generada por los azulejos de Las Tabladas y 0.6 m para los basaltos. La dispersividad transversal horizontal estimada varía entre 1.5 y 5.6 m y la vertical entre 0.4 y 1.7 m. El rango de porosidad eficaz para el aluvial varía entre 3% y 35% (SPA-15, 1975; Custodio, 1978; Custodio y Llamas, 1996) y para los basaltos 0.1% y 1% (SPA-15, 1975; Custodio, 1978). Estos parámetros han sido calibrados durante el modelo de transporte en régimen estacionario. El valor del coeficiente de difusión molecular del agua para medios porosos es 10^{-9} m²/d (Schneider y Fein, 2004; Oude Essink *et al.*, 2004; Abarca *et al.*, 2007; Giambastiani *et al.*, 2007), el cual no fue calibrado, porque el modelo resultó insensible a este parámetro.

Tabla 6.2. Rango de valores de los distintos parámetros obtenidos de la bibliografía para calibrar en el modelo de transporte en régimen estacionario.

PARÁMETROS		VALORES
POROSIDAD EFICAZ	ALUVIAL	3% - 35%
	BASALTO	0.1% - 1%
DISPERSIVIDAD LONGITUDINAL	ALUVIAL	0.3 - 61 m
	BASALTO	0.6 m
DISPERSIVIDAD TRANSVERSAL HORIZONTAL	ALUVIAL	1.5 - 5.6 m
	BASALTO	No hay datos
DISPERSIVIDAD TRANSVERSAL VERTICAL	ALUVIAL	0.4 - 1.7 m
	BASALTO	No hay datos

6.3.- CONDICIONES INICIALES

La condición de partida empleada en el modelo de transporte de cloruro ha sido el valor de la menor concentración de cloruro obtenida en la campaña de 1992, aproximadamente 100 mg/l, aunque el resultado final del modelo de transporte en régimen estacionario es independiente de las condiciones de partida de concentración impuestas.

6.4.- CONDICIONES DE CONTORNO

En el modelo de transporte se establecieron, de forma análoga al modelo de flujo, unas condiciones de contorno que fueron las de concentración constante y concentración de la recarga.

Primero se identificaron los potenciales focos de aporte de cloruro ya sea su origen natural o antrópico. Según se ha deducido del estudio hidrogeoquímico recogido en el Capítulo 5, en el caso del acuífero de La Aldea, los aportes naturales se producen por aridificación de la recarga, el aerosol marino y la lixiviación de los azulejos de Las Tabladas. Los aportes antrópicos son los producidos principalmente por los retornos de riego. La concentración de la recarga de las pérdidas en la red de abastecimiento, que es una de las entradas de agua al sistema, se ha considerado despreciable frente a la precipitación, porque no se observa una concentración distinta a la del acuífero en la zona afectada por esta recarga, por lo que no ha sido considerada en el modelo de transporte. Por otro lado, se desconoce si hay pérdidas en la red de saneamiento y la concentración de éstas, dado que no se observa un aumento de la concentración de Cl⁻ en las zonas urbanizadas por lo que se debe suponer que su proporción es despreciable. Esto es cierto en todo el valle excepto en el barranco de Tocodomán, donde este término podría explicar el aumento en la concentración de Cl⁻, como se discutirá con posterioridad. Todos estos aportes van a ser considerados en el modelo por medio de la concentración de cloruros en la recarga. En la Tabla 6.3 se muestra la concentración de cloruros de los distintos tipos de recarga introducidos en el modelo (cuyas cantidades se han obtenido a partir del modelo de flujo) mientras que la distribución espacial de esta recarga se puede ver en la Figura 6.3.

Tabla 6.3. Recarga introducida en el modelo de flujo en régimen estacionario calculadas a partir del balance hídrico para 1991/92. También se muestra el tipo de recarga, el área que ocupa y la concentración de cloruros de la recarga. Las zonificación coincide con la mostrada en la Figura 6.3.

ZONA	TIPO	RECARGA (mm/año)	Cl ⁻ (mg/l)
1	Precipitación área 1	11	843.5
2	Precipitación área 2	5.7	298.5
3	Precipitación área 3	16.2	170
4	Precipitación área 1 + retornos de riego	387	1443.5
5	Precipitación área 2 + retornos de riego	381.7	898.5
6	Precipitación área 3 + retornos de riego	392.2	770
7	Invernadero	376	600
8	Abastecimiento	86	Igual a la precipitación
9	Precipitación área 2 + intra-caldera	55.7	498.5
10	Precipitación área 3 + intra-caldera	66.2	370
11	Precipitación área 1 + escorrentía	1.1	843.5
12	Precipitación área 2 + escorrentía	1.81	298.5
	Las Tabladas	Dentro de precipitación y retornos de riego	8500

La concentración de la recarga del agua de lluvia en las distintas áreas se ha calculado a partir de la concentración de las muestras de lluvia de las distintas estaciones pluviométricas (Apartado 4.3.1 Capítulo 4), aplicándole una pérdida de agua del 72.4% que simula el proceso de evaporación (valor obtenido en el modelo hidrogeoquímico que recoge el capítulo 5.4). La concentración de las aguas de retorno de riego ha sido calibrada durante el proceso de modelación, partiendo de una concentración inicial de 350 mg/l obtenida a partir de la muestra de

retornos de riego en cultivo hidropónico evaporada en una proporción igual a la lluvia, para finalizar con una concentración de 600 mg/l con el que se consiguió una mejor calibración. Esto muestra que la contaminación producida por los retornos de riego es en general, mayor que la obtenida a partir de los retornos de riego por hidroponía, por lo que podría evidenciar que los retornos de riego producen una contaminación mayor al sistema. Hay que distinguir entre las aguas de retornos de riego bajo invernadero o no, ya que en estas últimas se la añade también la concentración de la recarga por lluvia.

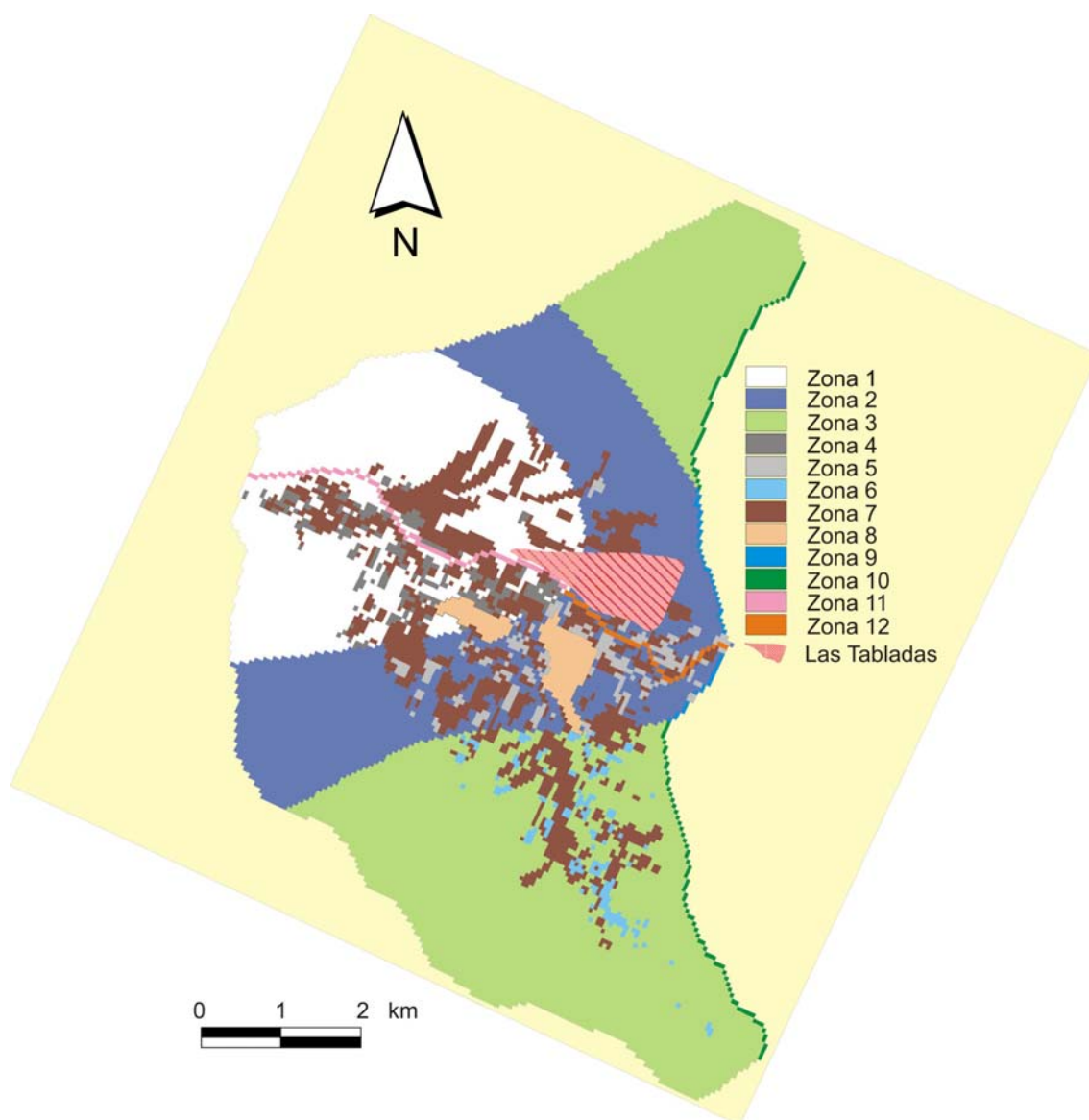


Figura 6.3. *Distribución espacial de los valores de concentración de Cloruro de la recarga para el modelo de transporte en régimen estacionario.*

También se ha impuesto como recarga la entrada a lo largo del límite de la zona intracaldera. Su concentración ha sido estimada en 200 mg/l a partir de dos análisis de pozos ubicados en esta zona. Esta concentración podría tener su origen en la aridificación de la recarga dada la baja permeabilidad de los materiales que facilitaría la evapotransporación en esta zona.

Por último, se ha impuesto una concentración a las aguas producto de la lixiviación en la zona de Las Tabladas de 8500 mg/l obtenida a partir de las muestras de manantiales localizados en las zonas bajas de la montaña de Las Tabladas (Apartado 4.3.4 Capítulo 4), supuestamente representativos del agua que lleva al aluvial desde esta zona, esta concentración se ha localizado en la zona sur de Las Tabladas donde afloran los depósitos ignimbríticos de deslizamientos gravitacionales donde se localizan los Azulejos (Figura 2.4).

La condición de contorno empleada en el contacto con el mar, al oeste, es una condición de concentración constante de 20270 mg/l, valor obtenido de la concentración de Cl⁻ del agua de mar en la zona de estudio en septiembre de 2006. La entrada por cabecera, al este, se cifra en 270 mg/l de Cl⁻, media de los valores obtenidos en los análisis de pozos ubicados en cabecera en las distintas campañas de campo (Figura 6.4).

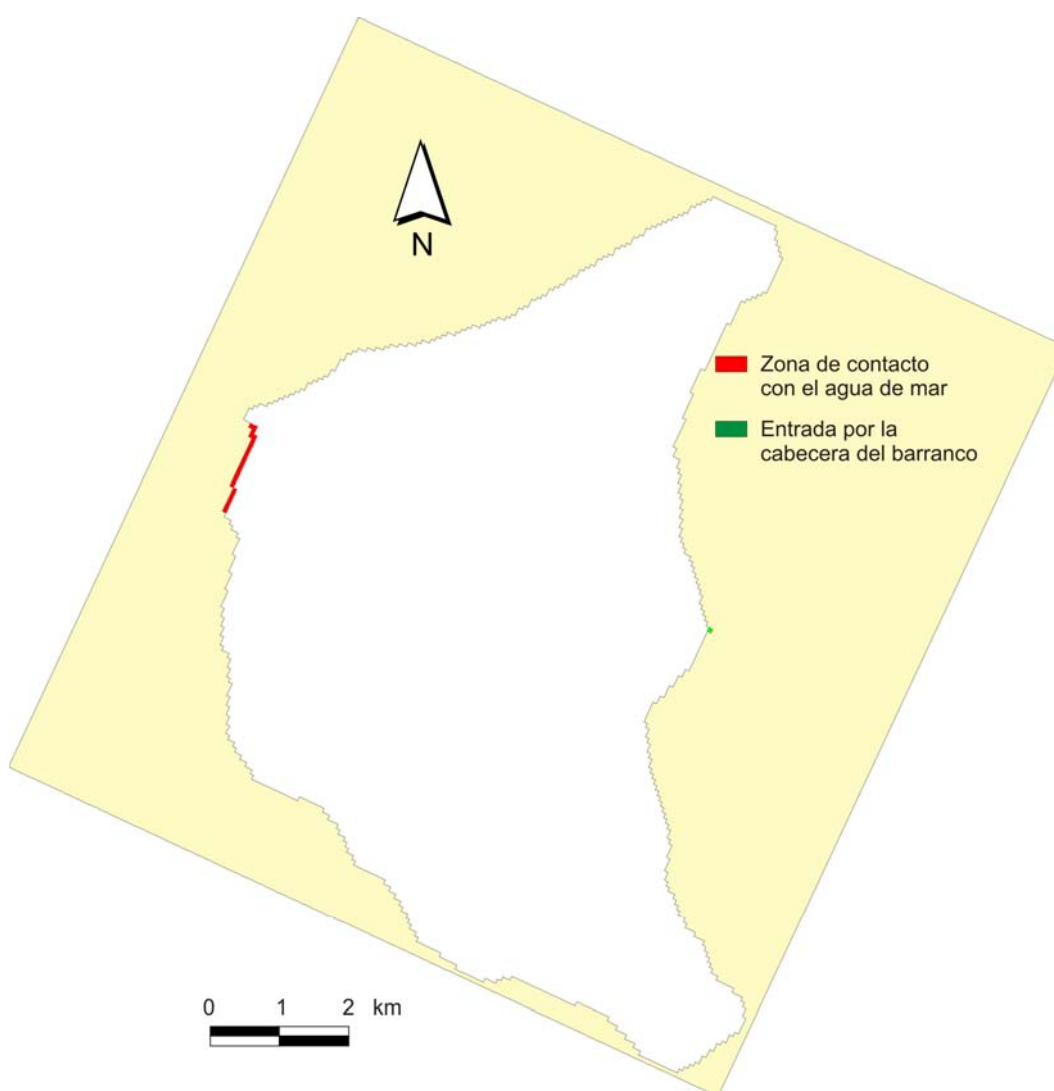


Figura 6.4. Localización de las condiciones de contorno empleadas en el contacto con el mar, al oeste, y por la cabecera, al este.

6.5.- PUNTOS DE OBSERVACIÓN

Una vez definidas las características del acuífero y los parámetros que afectan al transporte de cloruro, se han introducido en el modelo las concentraciones de cloruro obtenidas en la campaña de muestreo realizada en el año 1992. Para la calibración del modelo de transporte de soluto en régimen estacionario se han tomado 45 puntos de observación, seleccionando aquellos que estaban en explotación en el momento de la toma de muestra, para evitar el efecto de evaporación del agua en el mismo pozo. Los puntos seleccionados se encuentran fundamentalmente en el aluvial principal y el Barranco de Tocodomán, aunque también hay algunos puntos localizados en los derrubios de ladera, tal como se desprende de la figura 6.5. La distribución espacial de los puntos seleccionados se recoge en la figura 6.5.

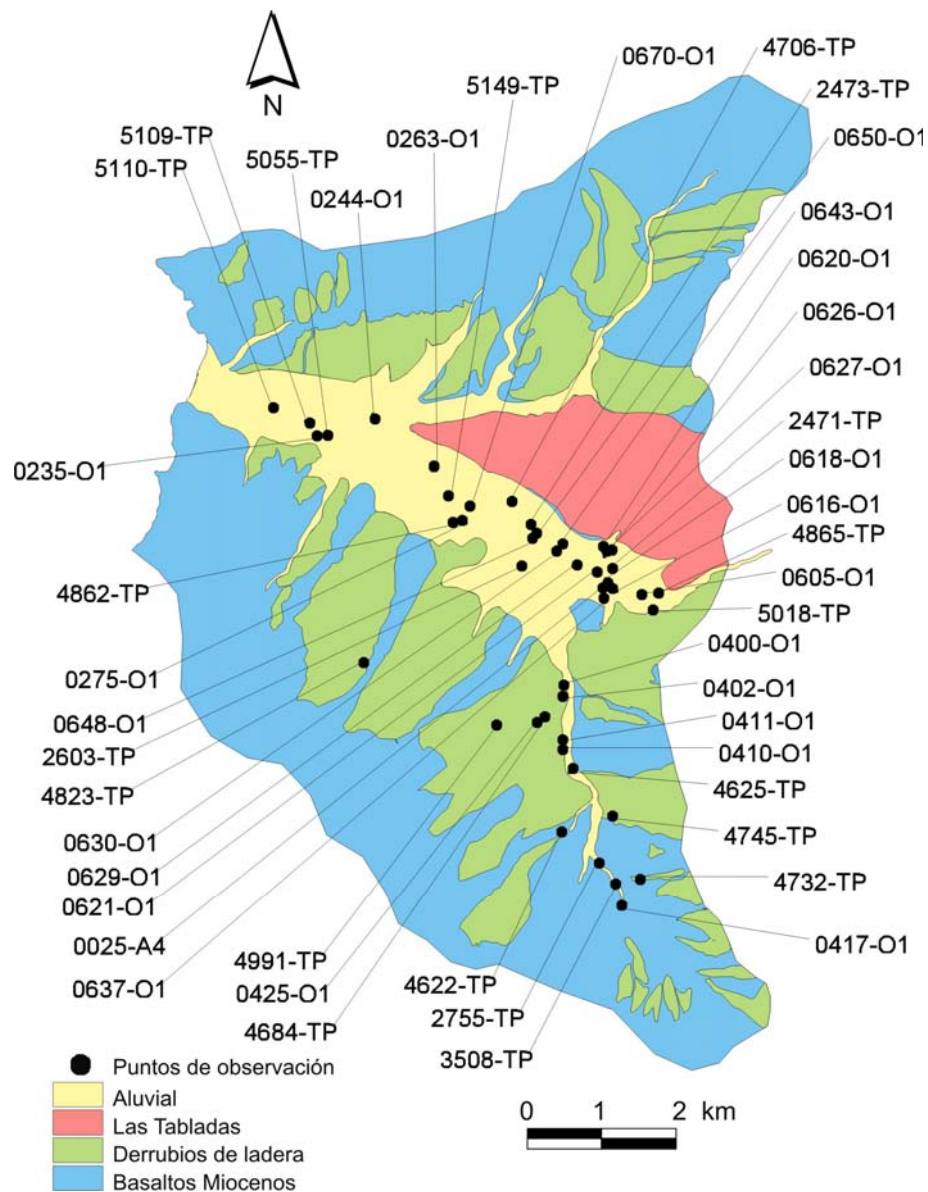


Figura 6.5. Localización de los puntos de observación para la calibración del modelo de transporte.

6.6.- SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE SOLUTO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO

Partiendo del modelo de flujo en régimen estacionario se inició el procedimiento de asignación de parámetros para el modelo de transporte de soluto. El escenario simulado para el modelo de transporte en régimen estacionario fue el obtenido en el modelo de flujo en régimen estacionario para el año hidrológico 1991/92.

Los valores iniciales de dispersividad inicial introducidos fueron:

Dispersividad longitudinal, $\alpha_L = 18$ m

Dispersividad horizontal, $\alpha_H/\alpha_L = 0.1 \alpha_L$

Dispersividad vertical, $\alpha_V/\alpha_L = 0.025 \alpha_L$

Se debe recordar que para la elaboración del modelo se ha realizado una distribución homogénea de las 3 capas en la discretización vertical correspondiéndole a cada capa un tercio del espesor total representado. Las capas 2 y 3 están formadas por los Basaltos Miocenos alterados y la capa 1 está formada por el aluvial, Las Tabladas, los Basaltos Miocenos muy alterados y los Basaltos Miocenos alterados que varían su espesor dependiendo del espesor del aluvial y los derrubios de ladera. La porosidad eficaz de partida para las distintas zonas se ha definido a partir de las porosidades eficaces medias obtenidas en la bibliografía (apartado 6.2), de las distintas unidades hidrológicas utilizando la potencia conocida de los diferentes materiales geológicos:

Aluvial principal = 15 %

Aluvial secundario = 7 %

Basaltos Miocenos = 3 %

El coeficiente de difusión molecular del agua asignado fue:

$$D = 10^{-9} \text{ m}^2/\text{d}$$

No se han observado problemas de intrusión marina en el modelo de flujo por lo que se ha desarrollado un modelo de transporte de densidad constante.

MT3DMS determina automáticamente el paso de tiempo del modelo de transporte de soluto a partir del número de Peclet como una función de la velocidad y del tamaño de la malla, minimizando la dispersión numérica y las oscilaciones (Zheng, 1990). Este paso de tiempo es constante a lo largo de toda la simulación y no puede ser incrementado o disminuido, de manera que en algunos casos puede dar lugar a tiempos de simulación excesivamente elevados. Para identificar el tiempo a modelar cuando el término advectivo llegara a una situación estacionaria y a partir del cual se lo considerase en régimen estacionario, se ha estudiado la evolución de la

desviación estándar de los residuos de la concentración en el tiempo, llegando a una situación estacionaria a los 29200 días (un período de 80 años).

6.6.1.- Ajuste, Calibración y Análisis de Sensibilidad

La bondad de la calibración se evaluó mediante distintos criterios estadísticos (máximo residual, media de los valores absolutos y la desviación estándar) sobre el conjunto de los residuos de concentraciones (esto es, la diferencia entre las concentraciones calculadas y observadas).

En el proceso de calibración de los parámetros del modelo se adoptaron como datos observados las concentraciones de cloruro medidas en la campaña de verano de 1992. Se procuró mejorar el ajuste de las concentraciones calculadas respecto a las observadas o, lo que es lo mismo, minimizar los residuos de concentraciones (diferencia entre las concentraciones calculadas y observadas). Los parámetros del modelo de transporte susceptibles de calibración fueron la porosidad eficaz, la dispersividad, el coeficiente de difusión molecular y la concentración de la recarga de los retornos de riego. De estas variables y durante la calibración se pudo comprobar que el modelo no era sensible a los cambios en el coeficiente de difusión molecular, por lo que se decidió mantenerlo fijo. El proceso de calibración obligó a modificar el modelo conceptual del sistema mediante la variación del número de zonas con diferentes porosidades eficaces, ya que en un principio, los Basaltos Miocenos estaban considerados en una única zona y fueron separados en dos zonas: la zona de los basaltos alterados (capa 1) y sin alterar (capa 2 y 3).

La representación gráfica de las concentraciones observadas y estimadas frente al tiempo para cada uno de los puntos de observación de la concentración se pueden observar en la Figura 6.6, para los 45 puntos de agua considerados. El coeficiente de correlación es 0.928, la desviación estándar es de 174.8 mg/l y el residuo máximo es de 805 mg/l. Se observa que el ajuste es bueno para la mayoría de los puntos de observación excepto para 4 pozos ubicados en el barranco secundario de Tocomodán. El ajuste de la zona del barranco de Tocomodán también presentó problemas en el modelo de flujo y en el de transporte ha quedado en evidencia que se desconocen aspectos importantes para tener un modelo conceptual coherente para esta zona. Alguno de los posibles orígenes de Cl⁻ en esta zona podrían ser: los retornos de riego, pozos negros, pérdidas en la red de saneamiento, sin embargo no se observa un aumento en la concentración de nitrato en esta zona por lo que existen dudas al respecto. La mayor concentración se obtiene en el punto afectado por la pluma generada por los azulejos, mientras que las menores, que tienen un buen ajuste, se obtienen en los puntos localizados en los derrubios de ladera que no se ven afectados por los retornos de riego, lo que muestra que las concentraciones de la recarga por lluvia están bien caracterizadas a partir de los resultados obtenidos en la modelación hidroquímica.

En la Figura 6.7 se muestra el ajuste de las concentraciones observadas frente a las calculadas sin los pozos del barranco secundario de Tocomodán. El número de puntos empleados

para la calibración es de 41. En este caso se consigue un mejor ajuste, con un coeficiente de correlación es 0.986, una desviación estándar de 73.5 mg/l y un residuo máximo de 168 mg/l.

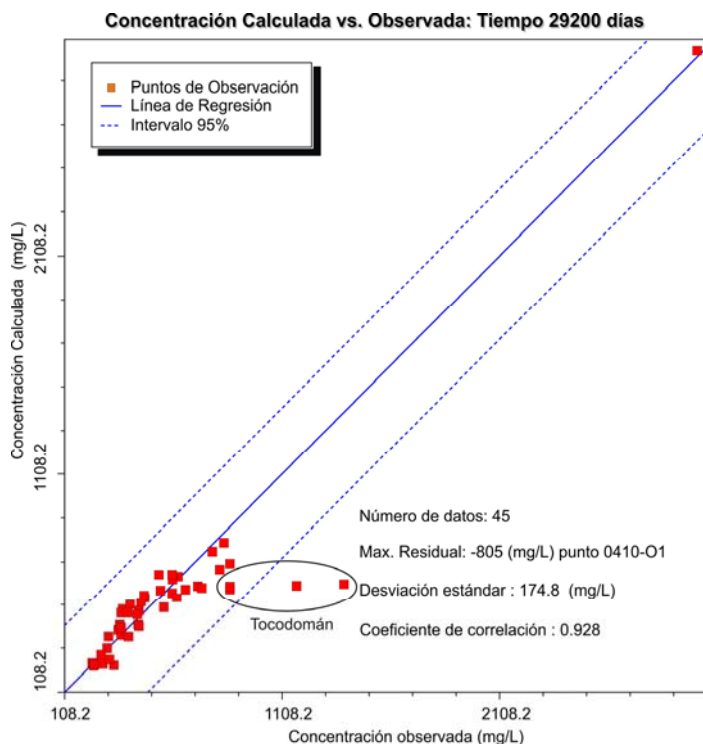


Figura 6.6. Concentraciones Observadas frente a concentraciones calculadas por el modelo de transporte en régimen estacionario con los pozos de Tocodomán.

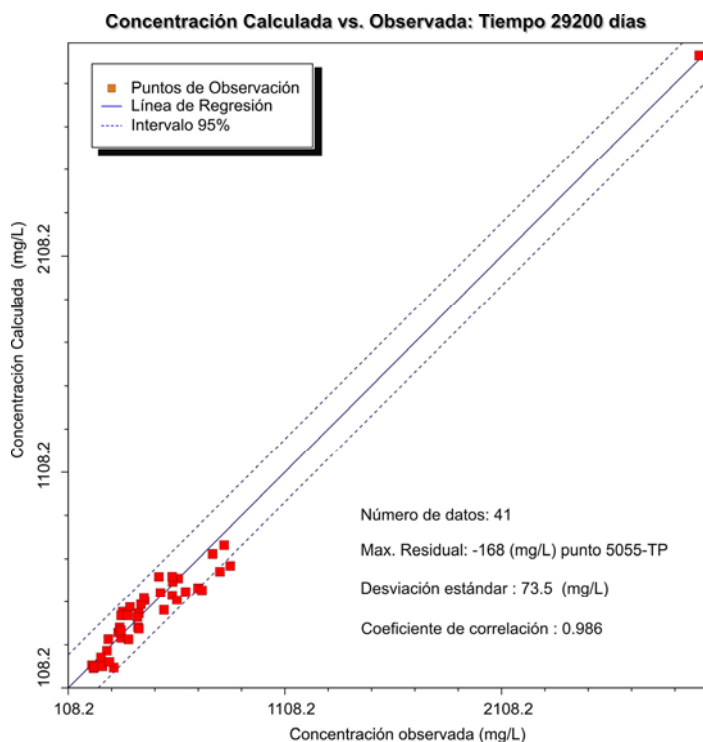


Figura 6.7. Concentraciones Observadas frente a concentraciones calculadas por el modelo de transporte en régimen estacionario sin los pozos de Tocodomán.

6.6.2.- Parámetros de Transporte

El primer parámetro calibrado ha sido la porosidad eficaz. Aunque el modelo no era muy sensible a las variaciones de la porosidad, el cambio en las mismas afectaba al tiempo de ejecución. Ello es debido a que afectan a la velocidad el flujo, por lo que se tuvieron en cuenta los mejores ajustes y unos tiempos de ejecución del modelo aceptables al calibrar este parámetro. El resultado de este proceso fue que variara el número de zonas en la zonificación de las porosidades eficaces del modelo, añadiéndose una zona a los Basaltos Miocenos al discriminar los alterados de los no alterados. Anteriormente estaban en una única zona de Basaltos Miocenos.

En la Tabla 6.4 se muestran los valores de porosidad eficaz obtenidos por el modelo para el aluvial principal, los aluviales secundarios y los basaltos alterados de la capa 1 y los basaltos sin alterar las capas 2 y 3 (Figura 6.8). Las porosidades eficaces resultantes del modelo de transporte fueron entre 8% y 9% para el aluvial que está dentro del rango de porosidad eficaz para el aluvial obtenido de la bibliografía que varía entre 3% y 35%. Para los basaltos sin alterar, afectados por presiones litostáticas, la porosidad eficaz resultante es 0.3% que también está dentro del rango de valores obtenido en la bibliografía, 0.1% y 1%. La porosidad obtenida para los basaltos alterados es de 8%, este valor es muy alto para los basaltos, pero hay que tener en cuenta que en esta zona también hay aluviales secundarios de menor entidad, derrubios de ladera, Basaltos Miocenos muy alterados y Basaltos Miocenos alterados que podría aumentar la porosidad.

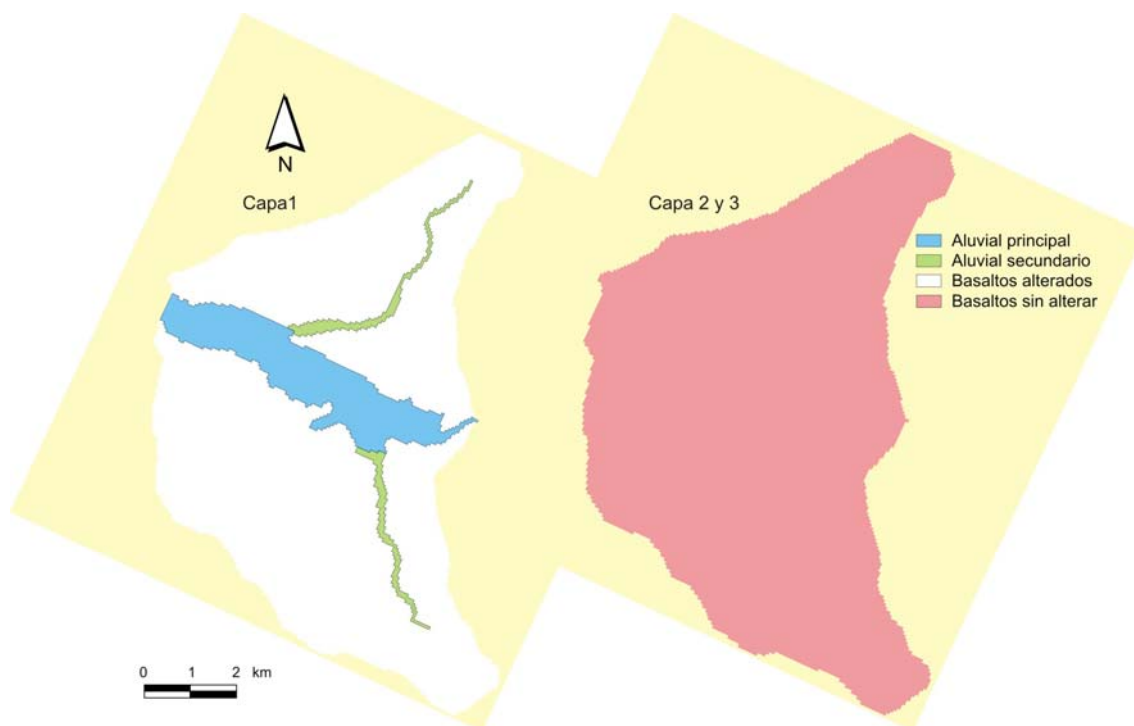


Figura 6.8. Distribución espacial de las zonas de porosidad eficaz para la capa superficial del modelo de transporte de soluto en régimen estacionario.

Tabla 6.4. Porosidad obtenida en la calibración del modelo de transporte en régimen estacionario.

Zona	Espesor medio de la capa (m)	Porosidad eficaz (%)	Espesor saturado medio aluvial (m)	Espesor medio basaltos (m)	Porosidad eficaz aluvial (%)	Porosidad eficaz Basaltos alterados *
Aluvial principal	40	10	15	25	9	8
Aluvial secundario	55	8	10	45	8	8
Basaltos alterados*		8				
Basaltos sin alterar		0.3				

* Incluyen los derrubios de ladera y los aluviales de los barrancos secundarios de menor entidad

Los valores de dispersividad también fueron calibrados en el modelo de transporte en régimen estacionario. La distribución espacial de las zonas de dispersividad para la capa superficial del modelo se puede observar en la Figura 6.2. Los valores de dispersividad longitudinal, dispersividad transversal horizontal y dispersividad transversal vertical resultantes calibrados en el aluvial principal son 1 m, 0.33 m y 0.05 m respectivamente, estos valores han sido extrapolados a todas las zonas del modelo ya que el modelo no es sensible a las variaciones de la dispersividad en las zonas de los basaltos, alterados o no, debido a la falta de datos. En la calibración de este parámetro tuvo un peso preponderante la pluma de de cloruros originada por la lixiviación de Las Tabladas. El modelo es muy sensible a las variaciones de la dispersividad en la zona del aluvial principal que es donde se localizan la mayoría de los datos y, principalmente, los localizados en la pluma formada por la lixiviación de Las Tabladas.

6.6.3.- Distribución calculada del ión Cloruro

El mapa de cloruros resultante de la calibración del modelo de transporte en régimen estacionario (Figura 6.9) muestra una representación coherente con el modelo conceptual de flujo y de transporte de la zona de estudio y, en línea general, con las observaciones realizadas, reproduciéndolas de forma satisfactoria.

Se observa que el flujo se produce de norte a sur en el área del barranco secundario de Furel y de sur a norte en el barranco secundario de Tocodomán. Las zonas altas aportan agua desde los basaltos a los barrancos secundarios de Furel y Tocodomán y al aluvial principal, donde el flujo va de este a oeste. También muestran las principales entradas de agua al sistema como la recarga por lluvia, los retornos de riego, la entrada desde la zona intra-caldera y por la cabecera del barranco.

Las concentraciones mínimas se localizan en los basaltos de las zonas altas de las montañas y cabecera de los barrancos secundarios de Furel y Tocodomán, donde el agua procede únicamente de la lluvia y está influenciada en menor medida por el aerosol marino (colores azules en la figura).

Se observa un importante aporte de cloruro al sistema que procede de los retornos de riego (zona de colores verdes en la figura), lo que se ve reflejado en el área central de la zona de estudio, donde se encuentran las zonas cultivadas (Zonas 4, 5, 6 y 7 de la Figura 6.3). La mayoría de las zonas de cultivo se ubican en los derrubios de ladera y el aluvial principal (Figura 6.9) que a su vez son unidades hidrológicas con una considerable permeabilidad como se ha demostrado en el modelo de flujo. Ello permite que estos aportes externos de cloruro por retornos de riego, alcancen de forma relativamente rápida el aluvial principal. Este hecho en particular, pone en evidencia la relevancia de los derrubios de ladera dentro del sistema hidrogeológico. Pues son vías preferentes de flujo que aceleran y facilitan la recarga del aluvial principal desde las laderas, disminuyendo las pérdidas por evapotranspiración y escorrentía superficial. Sin embargo, por ello mismo, facilitan el transporte de soluto hacia el aluvial aportando los cloruros de los retornos de riego procedentes de los cultivos situados sobre ellos.

El rasgo característico más notorio lo constituye el aporte de cloruros debido a la lixiviación de los Azulejos ubicados en la zona de Las Tabladas (zona de colores de roja a amarillo de la figura), que alcanzan concentraciones superiores a 8000 mg/l en la zona donde se localizan los manantiales de Choparrajana o Cañada Honda (Figura 6.9), y al cual el modelo representa fielmente. La localización de zonas de cultivo en la superficie donde se localizan los Azulejos, contribuye a un mayor aporte de cloruros, debido al aumento de la recarga. Los pozos afectados por esta pluma, han tenido un peso dominante en la calibración del modelo, en particular, el pozo 0244-O1 (Figura 6.5) donde se ha minimizado la diferencia entre la concentración calculada y observada.

En la desembocadura del barranco se ha impuesto una condición de contorno de concentración prefijada de 20270 mg/l que representa la concentración del agua de mar. Esta concentración se localiza únicamente en la zona donde se ha impuesto la condición de contorno, no observándose entrada de agua de mar al sistema. Se confirma así la hipótesis propuesta en el modelo conceptual que, igualmente, ha quedado corroborada en el modelo de flujo. Todo ello indicaría la inexistencia, o al menos la escasa relevancia, de la intrusión marina en el acuífero.

El modelo de transporte no reproduce bien la parte central del Barranco de Tocodomán donde la concentración calculada es inferior a la observada, como se ha visto en la Figura 6.6. Probablemente no estén bien definidas las condiciones de contorno de concentración de recarga en este sector. Ello puede deberse a una caracterización deficiente del medio, al no identificarse alguna fuente de cloruro que pudiera ser considerada en el modelo conceptual, pues se observa un mayor aporte de cloruro que lo presupuesto para la zona. En la cuenca del Furel, al igual que para el modelo de flujo, no hay datos que permitan contrastar si el modelo conceptual es correcto en la misma. Estos dos barrancos secundarios que aportan una cantidad considerable de agua al aluvial principal deberían ser estudiados con mayor detalle en trabajos futuros.

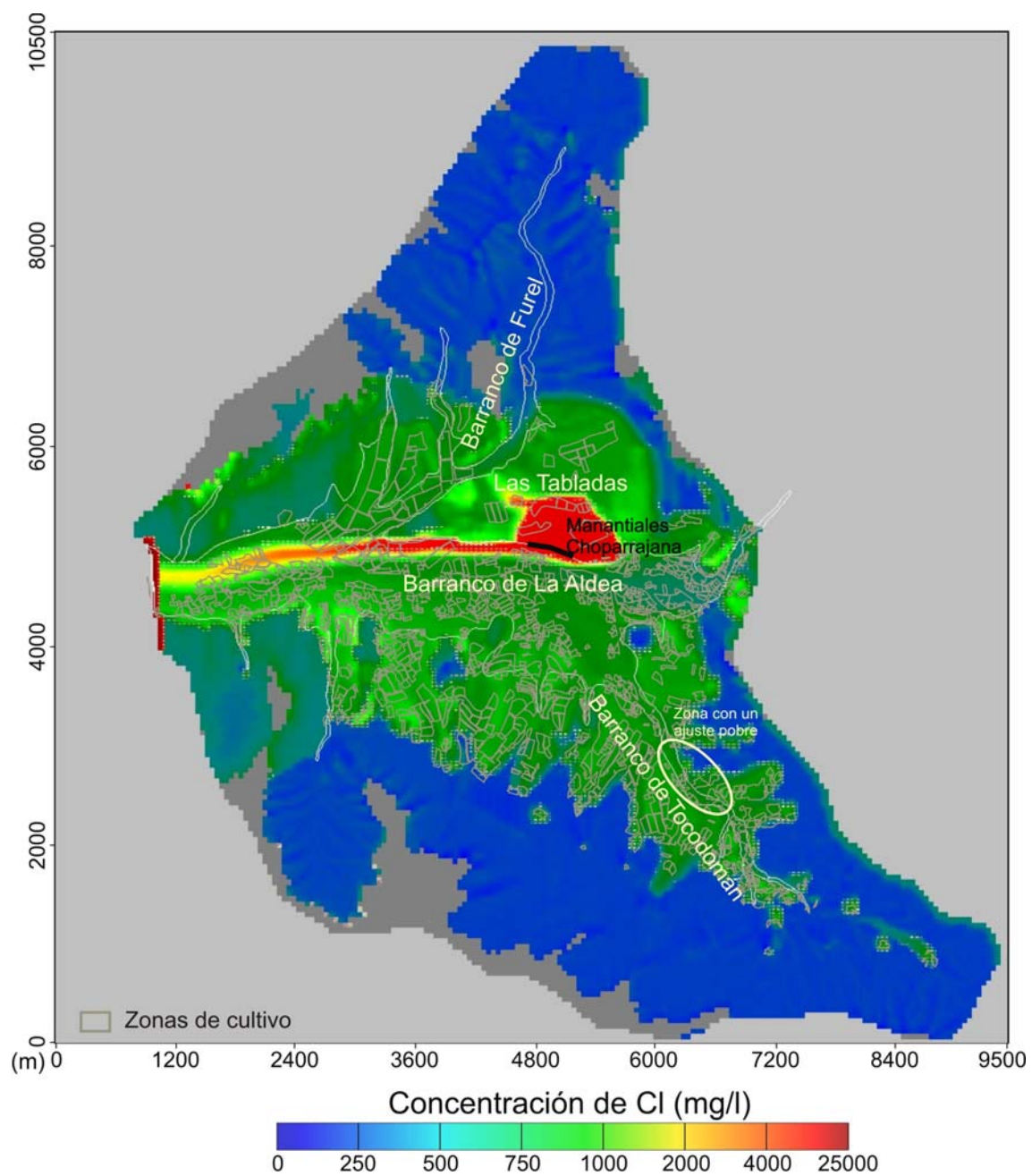


Figura 6.9. Mapa de distribución de cloruros en la zona de estudio obtenido en el modelo de transporte en régimen estacionario.

7.

DISCUSIÓN

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y MODELO DE FLUJO

Según se ha expuesto en los capítulos anteriores, el acuífero de La Aldea está conformado por dos unidades geológicas principales: una unidad volcánica y una unidad sedimentaria, que han sido consideradas como unidades hidrogeológicas. La unidad sedimentaria está constituida por los materiales aluviales del barranco principal de La Aldea y los secundarios de Tocodomán y Furel. También forman parte de la unidad sedimentaria los depósitos de deslizamientos gravitacionales o derrubios de ladera que están constituidos por material detrítico y cantos de traquitas-fonolitas, ignimbritas y en menor medida, basaltos, que se ubican principalmente en la ladera sur del barranco de La Aldea. Debajo de la unidad sedimentaria se localiza la unidad volcánica formada por Basaltos Miocenos que ocupa toda la superficie de la zona de estudio, con una permeabilidad mucho menor que la de los materiales aluviales y un espesor desconocido. Existe en la zona un relieve residual denominado Las Tabladas (situado al este de la zona de estudio entre los barrancos del Furel y el principal) que tiene como base los Basaltos Miocenos, cuya geología es compleja. El límite este de la zona de estudio está definido por la existencia de una caldera volcánica (Caldera de Tejeda) rellena por materiales de la Formación Intra-caldera del Grupo Sáfico.

En esta tesis han sido desarrollados sendos modelos numéricos de flujo y de transporte y un modelo de evolución hidrogeoquímica a partir del modelo hidrológico conceptual del acuífero de la Aldea (Gran Canaria). Estos modelos se consideran herramientas para avanzar en el conocimiento del sistema, con el fin de mejorar y darle mayor coherencia al modelo conceptual. Por todo ello, estos modelos si bien resultan una contribución específica de esta tesis, deben ser valorados por el aporte de sus resultados, tanto por la robustez como la incertidumbre de los mismos. Así, tanto las conclusiones novedosas como las incertidumbres que se evidencian son contribuciones en términos conceptuales. Acerca de estos tópicos tratará la discusión del presente capítulo.

El modelo conceptual presenta carencias e incertidumbres lógicas en el conocimiento del medio, que inciden en la modelación numérica. Debido a ello, sus resultados se muestran plenamente consistentes en las zonas donde se disponía de información suficiente como es la zona del aluvial, pero pierden consistencia y entran en el orden de lo plausible en la zona de los Basaltos Miocenos debido a la falta de datos. En el modelo se han impuesto una serie de condiciones de contorno que presentan distintos grados de incertidumbre. Algunas de estas condiciones de contorno, como el nivel prefijado en la línea de costa o el caudal prefijado de entrada en la cabecera del barranco, poseen una gran consistencia y son el resultado de observaciones de campo. Sin embargo hay otras condiciones de contorno que aun siendo plausibles poseen cierta incertidumbre. Es el caso de la divisoria de aguas superficiales que se hace coincidir con la de las aguas subterráneas, cuando la primera constituye una divisoria topográfica mientras que la segunda lo es hidrogeológica. Igualmente, el límite inferior impuesto del contacto entre los basaltos

alterados y sin alterar, en el que se asume que el flujo es prácticamente nulo, supone una hipótesis plausible pero no un conocimiento cierto. Por lo demás, su distribución espacial es supuesta, pues sólo existe un único sondeo en la zona que lo verifique. Pese a todas estas incertidumbres, el modelo desarrollado reproduce correctamente las observaciones del sistema obtenidas durante el periodo de tiempo simulado.

La discretización vertical en tres capas se realizó inicialmente procurando atender de la forma más fidedigna a consideraciones geológicas. Sin embargo, las grandes pendientes topográficas en los límites norte y sur del dominio del modelo contribuían a problemas de estabilidad numérica debido a los fuertes gradientes existentes entre celdas contiguas. Asimismo, estos altos gradientes piezométricos inducían al secado de un número suficiente de celdas que impedían la resolución del sistema de ecuaciones. Por ello se optó por una partición vertical homogénea para las tres capas, correspondiendo un espesor de 1/3 del espesor total a cada una de las celdas. Esta partición final supone que la capa 1 estaría formada por el aluvial, Las Tabladas, los derrubios de ladera, los Basaltos Miocenos muy alterados y los Basaltos Miocenos alterados infrayacentes inmediatos a estas litologías, y su espesor variaría desde los 50 m en la zona del aluvial (de los cuales como máximo 30 m son de aluvial) y los 550 m en las zonas montañosas. Las capas 2 y 3 estarían conformadas por los Basaltos Miocenos alterados. Si bien la discretización vertical realizada en el modelo no se ajusta de forma estricta a la caracterización geológica, ella no carece de sentido hidrogeológico. Este hecho se tuvo en cuenta al interpretar la conductividad hidráulica de la capa superior resultante de la calibración del modelo, al considerar las potencias de las diferentes unidades hidrogeológicas en el cálculo de sus respectivas permeabilidades.

La modelación del flujo en régimen estacionario representó el año medio hidrológico 1991/92. Su calibración tuvo como objetivo obtener un valor de conductividad hidráulica previo a abordar la calibración del transitorio y disponer de una piezometría inicial para este régimen. El ajuste obtenido en el modelo en régimen estacionario ha sido bueno, en particular, en la zona del aluvial principal, mientras que los mayores residuos piezométricos se sitúan en las zonas de contacto entre materiales con distintas conductividades hidráulicas, donde se abre la cabecera del barranco principal y en el barranco de Tocodomán. En la piezometría resultante del modelo en régimen estacionario, las mayores cotas piezométricas y gradientes se observan en los bordes norte y sur de la zona de estudio que incluyen los barrancos del Furel y Tocodomán. En la zona del aluvial principal los gradientes son suaves y los niveles se sitúan entre 0 y 100 m.s.n.m. El modelo reproduce notablemente la piezometría realizada a partir del inventario de 1992. El proceso de calibración puso en evidencia que un avance en la caracterización geológica era un requerimiento básico en la mejora del modelo.

El análisis de sensibilidad indica que el modelo es muy sensible a la variación de la conductividad hidráulica para todas las zonas, excepto la conductividad hidráulica para la zona de Las Tabladas, donde no hay puntos de observación, y la zona que representa el barranco de Furel, donde los puntos de observación son escasos. Principalmente es sensible a las variaciones de los

basaltos, el aluvial principal y Tocodomán, que son las zonas donde hay localizados más puntos de observación.

La modelación del flujo en régimen transitorio abarca una serie temporal de 8 años hidrológicos (1991/92 - 1998/99). Se calibró la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento. Los resultados obtenidos han sido buenos en la mayoría de los puntos de observación, reproduciéndose las oscilaciones estacionales por el bombeo de los pozos y la recarga por precipitación y retornos de riego. Se observa una disminución generalizada de los niveles en el período de estudio, debido a que es un período seco y a la disminución de los retornos de riego por reducción de la superficie y modificación de técnicas de cultivo. También hubo una dificultad lógica para reproducir la evolución piezométrica de los pozos de observación que a su vez eran pozos de bombeo, cuando el caudal extraído de estos supera los 200 m³/día.

Como era de esperar, el modelo presenta mayor sensibilidad respecto a aquellos parámetros soportados por mayor información piezométrica: las zonas del aluvial principal, el barranco secundario de Tocodomán y los basaltos alterados. También es sensible a la variación del coeficiente de almacenamiento del aluvial principal y los basaltos.

En la Tabla D.1 se muestran los resultados de los parámetros hidráulicos obtenidos en los modelos realizados para las distintas formaciones hidrogeológicas. Las permeabilidades resultantes de la calibración del modelo entran dentro de los rangos dados por Muñoz (2005) para el aluvial y es de un orden de magnitud inferior en los basaltos. Los valores de permeabilidad máximos y mínimos obtenidos en el aluvial están influenciados por las condiciones de contorno del modelo en la desembocadura y la cabecera de éste.

Tabla D.1. *Parámetros hidráulicos obtenidos en el modelo en régimen estacionario y transitorio. Comparación con los obtenidos por Muñoz (2005).*

	Permeabilidad (m/d)			Coeficiente de Almacenamiento	
	Estacionario	Transitorio	Muñoz (2005)	Transitorio	Muñoz (2005)
Aluvial	17-67	17-106	26-86	0.08	0.03-0.1
Basaltos Miocenos	0.0009	0.005	0.03	0.0002	0.005-0.01
Derrubios de Ladera	0.4-1.2	0.25-0.33			
Aluvial Secundario	5.5-22	5.5-22		0.03	

Según el modelo, los máximos valores de la permeabilidad del aluvial se localizan en la cabecera del barranco, lo cual puede ser debido a la granulometría esperable en los materiales aluviales, con una granoselección positiva de cabecera hacia la desembocadura que da lugar a una disminución de la porosidad (y por tanto, de permeabilidad). Además, esta zona se haya influenciada por la condición de contorno de flujo prefijado que representa la entrada de agua por la cabecera del barranco. La permeabilidad de la zona central del aluvial es de 17 m/d (valor relativamente bajo, aunque está cerca del rango propuesto por Muñoz, 2005). Este valor es menor

que la que se obtiene para la desembocadura del barranco de La Aldea, hecho que podría estar producido por el aporte de material fino en la desembocadura del Barranco de Todocomán.

La permeabilidad obtenida por el modelo para los Basaltos Miocenos, 0.0009-0.005 m/d es de 1 a 2 órdenes de magnitud inferior a los que propone Muñoz (2005). Esto se debe a que la permeabilidad resultante de la modelación corresponde a toda la columna de basaltos y el dato propuesto por Muñoz (2005), a partir de ensayos de bombeo, está calculado en los primeros metros de basaltos muy alterados, que son los que explotan los pozos en la zona. El modelo da información adicional de la permeabilidad para los derrubios de ladera y los aluviales secundarios: 0.25-1.2 m/d y 5.5 m/d respectivamente. Se debe observar que estas estimaciones podrían variar según las zonas si se dispusiera de un mayor conocimiento de las potencias, ya que para su cálculo se adoptó una potencia general estimada que se basó en las observaciones de campo.

Hay que hacer notar que no se han obtenido valores de permeabilidad de los materiales existentes en Las Tabladas a partir del modelo debido a que no hay pozos de observación en esta zona. Esto se ha subsanado ajustando un valor 0.009 m/d para Las Tabladas en su conjunto, obtenido a partir del mejor ajuste logrado en los puntos situados alrededor tanto para el régimen estacionario como para el transitorio. Por ello, su fiabilidad es cuestionable.

Los valores iniciales adoptados para el coeficiente de almacenamiento corresponden a los valores medios obtenidos de la bibliografía (SPA-15, 1975; INTECSA, 1981; Custodio, 1985; Muñoz, 2005). El coeficiente de almacenamiento para los basaltos y el aluvial obtenidos por el modelo está dentro de los rangos encontrados en la bibliografía. La zonificación de este parámetro no se definió para el resto de las unidades (barrancos secundarios de menor entidad y derrubios de ladera) por considerarse que la información piezométrica no permitía una calibración consistente del mismo debido a la falta de puntos de observación.

Los valores de la recarga han sido prefijados y no estuvieron sujetos a calibración durante las simulaciones, con la excepción de la entrada a lo largo del borde de la Caldera de Tejada. En una primera aproximación para el valor de la recarga se realizó el cálculo de la entrada por la Ley de Darcy en la zona de contacto, acorde a la expresión:

$$Q_{salida} = k * b * \frac{\Delta h}{\Delta l} * L$$

k: conductividad hidráulica (m/d)

b: espesor del aluvial (m)

Δh : diferencia de nivel (m)

Δl : distancia entre pozos (m)

L: ancho del aluvial (m)

La conductividad hidráulica usada para los cálculos es 0.0009 m/d para el basalto (obtenido en el modelo de flujo en régimen estacionario). Los puntos de observación de los niveles han sido los pozos 0414-O1 y 5024-TP, localizados en el barranco de Tocodomán, cerca de la zona de contacto con el borde de caldera (Figura D.1) y hay medidas del nivel piezométrico de ambos en fechas próximas. La distancia entre los pozos (Δl) considerados es de 275 m, la profundidad de los basaltos saturados en la capa 1 es de aproximadamente 100 m y el ancho es el de la línea de intracaldera (L), 12 km. Los pozos 0414-O1 y 5024-TP están a una cota de 280 y 375 m respectivamente. Los niveles piezométricos han sido obtenidos en la campaña de campo realizada en julio de 1992 (Tabla D.2). El gradiente hidráulico calculado es de 0.29, valor alto típico de medios de baja permeabilidad con grandes pendientes y es coherente con la topografía local. El caudal medio de entrada según Darcy se calculó en 0.11 hm³/año. Este parámetro ha sido calibrado en el modelo obteniéndose un caudal de entrada resultante de 0.03 hm³/año y, si bien este valor es notablemente más pequeño que el estimado inicialmente, el modelo es sensible a sus variaciones. Esta entrada de agua no pudo ser calibrada en el modelo de flujo en régimen transitorio porque no se disponía de puntos de observación en la zona después del año 1992.

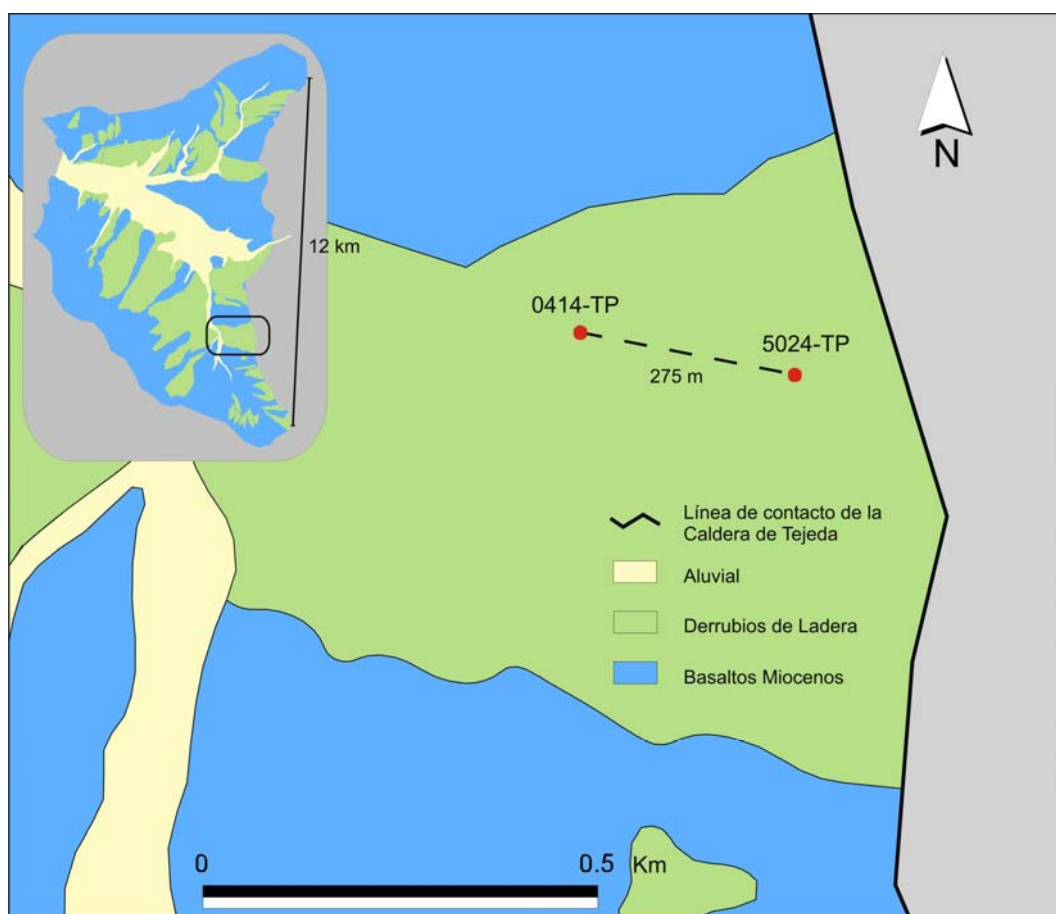


Figura D.1. Localización de los pozos donde se ha realizado en cálculo del caudal desde la zona intra-caldera (límite de la Caldera de Tejada) con datos de junio de 1992.

Tabla D.2. Cota de los niveles piezométricos para los pozos 0414-TP y 5024-TP localizados en el barranco de Tocodomán cerca de la zona de contacto con la intra-caldera en junio de 1992 para el cálculo del gradiente hidráulico (profundidades y cotas en m y caudal en hm³/año).

0414-O1		5024-TP		Δh	Gradiente hidráulico	Caudal de entrada
Profundidad del nivel	Cota del nivel	Profundidad del nivel	Cota del nivel			
16.27	263.73	31.72	343.28	79.55	0.29	0.11

La distribución espacial de la recarga (Figura 4.6) no se ve especialmente reflejada en la morfología de las isopiezas en el modelo de flujo en régimen estacionario (Figura 4.11), sino que la morfología de estas se hayan condicionadas principalmente al valor de los parámetros hidráulicos y la topografía en la zona. Esto es debido a que no existe ninguna recarga localizada con entidad suficiente para afectar a las isopiezas. Sin embargo, en el modelo de flujo en régimen transitorio, sí se observa un aumento en los niveles después de un periodo con una recarga mayor (Figuras 4.16 a 4.21).

Las extracciones de los pozos de bombeo no han sido objeto de calibración durante las distintas simulaciones, dado el modo en que fueron calculadas a partir de los inventarios de campo. La extracción de agua del acuífero tampoco afecta mucho a la distribución de las isopiezas en el modelo de flujo en régimen estacionario; sin embargo, en régimen transitorio se observan conos de bombeo alrededor de algunos pozos. También en el modelo de flujo en régimen transitorio los pozos de observación que son a la vez pozos de bombeo, como es de esperar, presentan un peor ajuste entre los valores de niveles calculados y observados. Debe observarse que la utilización de pozos de bombeo como pozos de observación, que no es en absoluto una práctica recomendable, se debió al escaso número de pozos que fueron exclusivamente de observación. Por lo demás, se usaron aquellos en los que se consideró que las extracciones eran lo suficientemente bajas como para que la influencia sobre los niveles calculados y observados también lo fuese, aunque no siempre fue posible.

La modelación del flujo en el acuífero de La Aldea ha supuesto una reflexión profunda sobre los cocimientos hidrogeológicos que se tenían de la zona de estudio, lo que permitió una sensible mejora de su modelo conceptual en dos aspectos principalmente:

- * En los primeros pasos de la modelación se hizo necesaria una actualización de las características geológicas del medio. En particular se realizó una campaña de campo para cartografiar los derrubios de ladera y aluviales secundarios de menor entidad, pues estos no habían sido considerados relevantes hasta el momento y la modelación mostró su importancia hidrogeológica. Así los derrubios de ladera y aluviales secundarios se evidenciaron como un factor fundamental para obtener un buen ajuste entre niveles observados y calculados, debido a que facilitan y contribuyen a la recarga del aluvial principal. La identificación de este rasgo ha redefinido su importancia en el modelo conceptual.

- * El contacto con el límite este de la zona, exceptuando el lecho del barranco, ha sido considerado impermeable en la bibliografía, debido a la existencia del borde de la Caldera de Tejada (Muñoz, 2005). Sin embargo el presente trabajo discute el papel que tiene este borde en el funcionamiento del acuífero. Asimismo, queda pendiente de confirmación la distribución de la recarga del borde de la caldera a la zona, dependiente posiblemente de la existencias de discontinuidades geológicas (diques, fallas, etc,...) que deben ser identificadas.

En general, los resultados obtenidos por el modelo indican la importancia de la topografía y la geología como condicionantes de la piezometría en la zona del estudio.

El desarrollo del modelo de flujo presentado confirma la potencia de esta herramienta para obtener un mejor conocimiento del funcionamiento hidrogeológico en el área de estudio. Asimismo, sienta la base necesaria para un posterior modelo de transporte. El proceso de validación fortalece la confianza en la capacidad predictiva del modelo, y con ello su potencial como herramienta de gestión, a pesar de la incertidumbre asociada. Finalmente, la bondad de los resultados del proceso de modelación valida un modelo conceptual que se revela robusto y coherente con el conocimiento que se tiene actualmente de este sistema hidrogeológico.

HIDROGEOQUÍMICA Y MODELO DE TRANSPORTE

Como se expuso en el Capítulo 5, la química de las aguas subterráneas de la zona de estudio responden a la mezcla de aguas con características químicas diferentes en distinta proporción según la zona del acuífero. Así, se puede pensar que la supuesta línea de flujo que representa el enriquecimiento químico del agua en el acuífero queda representada en la Figura D.2, que recoge también los pozos seleccionados para la modelación hidroquímica.

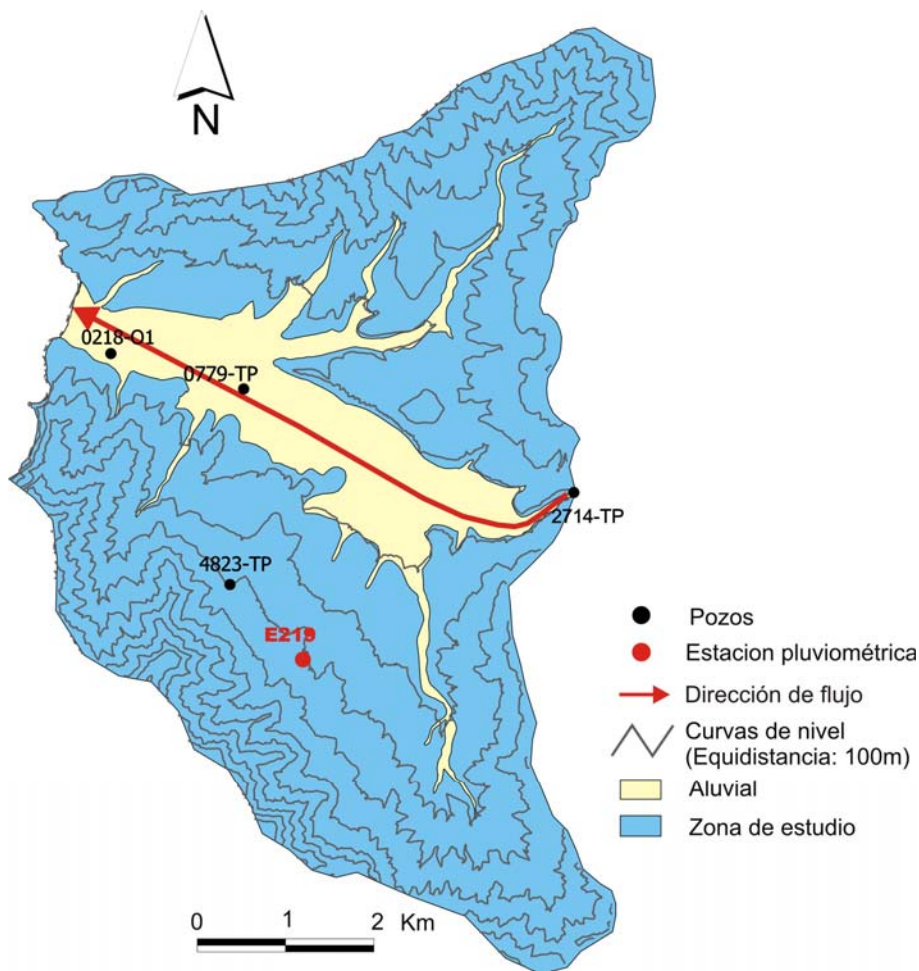


Figura D.2. Localización de los puntos de observación y estación pluviométrica para la modelación hidroquímica.

En la Tabla D.3 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la modelación hidrogeoquímica para la obtención del agua subterránea a partir del agua de lluvia (E219 al pozo 4823-TP) y la mezclas en la línea de flujo (2714-TP a 0779-TP y 2714-TP a 0218-O1) mediante la simulación de reacciones químicas con PHREEQC. El resultado de la modelación de la línea de flujo 2714-TP a 0218-O1 permite evaluar las mezclas producidas a lo largo del aluvial principal, desde la cabecera hasta la desembocadura, mientras que el estudio del flujo entre los pozos 2714-TP y

0779-TP permite obtener una distribución espacial de estas, haciendo referencia a lo que pasa en la zona media del acuífero aluvial.

Tabla D.3. Resumen de los resultados obtenidos en la modelación hidroquímica en condiciones naturales (desde el agua de lluvia a las aguas subterráneas) y en condiciones antrópicas (línea de flujo dentro del acuífero aluvial) (Localización de los pozos y estación pluviométrica Figura D.2) Unidades en mmol/l.

Proceso	Lluvia → aguas subterráneas E219 → 4823-TP	2714-TP → 0779-TP	2714-TP → 0218-O1
Evaporación	72.40%		
Mezcla aerosol		2%	4%
Mezcla retornos de riego		51%	89%
SiO₂	-0.9	33.1	172.33
Yeso	-0.126	6.3	7
Calcita	-5.9	1.98	4
Forsterita		6.9	10.3
Albita	3.9		4.5
Anortita	1.28		
Illita	-3.14	-4	-6.98
Montmorillonita	-0.32	-25.5	-43

En el primer caso (lluvia->aguas subterráneas) se supone un ambiente natural no influenciado por aguas antrópicas como los retornos de riego. El aporte de albita y anortita indica que el pozo se localiza en derrubios de ladera con influencia geológica de derrubios de ladera y basaltos. Según la simulación, precipitan yeso y calcita y se forma illita y montmorillonita, resultados coherentes con la geología de la zona. Para obtener el contenido de cloruros (ión conservativo) que hay en las aguas subterráneas, primero se debe producir un proceso de evaporación donde se extrae un 72.4% del volumen de agua de lluvia. Este porcentaje de evaporación está dentro del rango obtenido en el balance hídrico y próximo al valor medio de 69%.

En el estudio de la evolución química en una línea de flujo (2714-TP a 0779-TP y 2714-TP a 0218-O1), la mezcla con aerosol marino se ha realizado a partir de la concentración de cloruro de agua de mar (20275 mg/l) y se observa una mezcla del 2% en el pozo 0779-TP con respecto al pozo 2714-TP lo que supone una tasa de aporte de aerosol marino para esta zona de 0.5% por km en la línea de flujo. La mezcla en el pozo 0218-O1 con respecto al pozo 2714-TP es del 4% lo que da una tasa media de 0.7% de aporte de aerosol por km en la línea de flujo en el aluvial. Este aumento en la tasa de aporte del aerosol marino de 0.2 % en el pozo 0218-TP con respecto al pozo 0779-TP implica un aumento en el aporte a medida que nos acercamos a la costa, que también confirman los datos del agua de lluvia. La mezcla con retornos de riego es de 51% de retornos de riego en el pozo 0779-TP y un 89% en el pozo 0218-O1. Esto evidencia la importancia de los retornos de riego como entrada de agua al sistema y como fuente de contaminación de las aguas subterráneas y confirma que las aguas subterráneas se van enriqueciendo en retornos de

riego según avanza en la dirección del flujo. Según el modelo, en el interior del acuífero se disuelve SiO_2 , yeso, calcita, albita y forsterita (estos últimos son minerales característicos localizados en los derrubios de ladera y en los basaltos respectivamente) y se forman illita y montmorillonita.

A partir de los datos obtenidos en la caracterización y modelación hidrogeoquímica y del modelo de flujo se ha realizado un modelo de transporte de soluto en régimen estacionario. Para realizar este modelo se ha empleado el MT3DMS en su entorno gráfico Visual MODFLOW.

Para la calibración del modelo de transporte con densidad constante para el régimen estacionario (condiciones medias para el año 1992) se utilizaron 45 registros de concentración de cloruro distribuidos en el aluvial principal, el aluvial secundario de Tocodomán, los derrubios de ladera y los basaltos (Figura 6.5).

La concentración de la recarga del agua de lluvia introducida en el modelo para las distintas áreas de recarga se ha calculado a partir de la concentración de las muestras de lluvia de las distintas estaciones pluviométricas, con una evaporación del 72.4% obtenida en el modelo hidrogeoquímico. La concentración de las aguas de retorno de riego ha sido calibrada durante el proceso de modelación y se ha partido de una concentración inicial de 350 mg/l obtenida a partir de la muestra de retornos de riego en cultivo hidropónico evaporada al igual que la lluvia, para finalizar con una concentración de 600 mg/l con la que se consiguió la mejor calibración. Esto podría deberse a que la contaminación producida por los retornos de riego sin hidroponía, en general, es mayor que la obtenida a partir de los retornos de riego por hidroponía.

Se ha impuesto como recarga la entrada desde la zona intra-caldera, con una concentración que ha sido estimada a partir de los pozos ubicados en esta zona en 200 mg/l, que puede provenir de la aridificación de la recarga y el aerosol marino. La concentración de las aguas de recarga de la zona de Las Tabladas de 8500 mg/l se ha obtenido a partir de las muestras de nacientes localizados en las zonas bajas de la montaña de Las Tabladas, producto de la lixiviación de los Azulejos.

Los valores simulados de cloruro han presentado un buen ajuste para la mayoría de los puntos de observación (Figura 6.6). Los mejores ajustes se han obtenido en los pozos ubicados en los basaltos y los derrubios que no se ven afectados por los retornos de riego, lo que muestra que las concentraciones de la recarga por lluvia están bien caracterizadas a partir de los resultados obtenidos en la modelación hidroquímica. Sin embargo, el ajuste del modelo de transporte de soluto en la zona del barranco de Tocodomán ha presentado problemas (Figura 6.6), lo que indica que se desconocen ciertos aspectos de relevancia para tener una conceptualización coherente para el comportamiento de los cloruros en esta zona.

La zona del barranco de Tocodomán registra las concentraciones más altas de Cl^- (entre 1000 y 2000 mg/l) en 1992, aumentando ligeramente en 1999 sobrepasando los 2000 mg/l (Figura

D.3). La concentración máxima en el colector de lluvia de las zonas altas en Artejévez, se registró de forma excepcional en octubre de 2001 con 795 mg/l después de varios meses sin lluvia, encontrándose los contenidos habituales por debajo de 100 mg/l. Por tanto, parece que la lluvia en esta zona no debe contribuir de forma importante a la salinidad del agua subterránea, sino que debe existir otro origen de cloruro diferente. La unidad hidrogeológica explotada en la zona son los Basaltos Miocenos, que poseen un tiempo de renovación muy alto, debido a su baja permeabilidad (Muñoz, 2005); aunque existe cierto espesor de aluvial como se deduce de la existencia de vegetación y se observa en el campo. Para poder representar en el modelo de transporte lo observado en el campo, sería necesario definir un foco local de cloruros en la zona, independiente de los principales focos identificados causantes del aumento de la concentración de cloruro (lluvia, retornos de riego y los Azulejos de Las Tabladas). Sin embargo se desconoce el origen de este foco y su concentración inicial, que debe ser superior a 1000 mg/l. Un origen posible de Cl^- en esta zona podría ser los retornos de riego, pozos negros, pérdidas en la red de saneamiento, aunque no hay nitratos suficientes en el año 1992 y el aumento de nitratos de 1999 fue generalizado en todo el acuífero y no solo en esta zona.

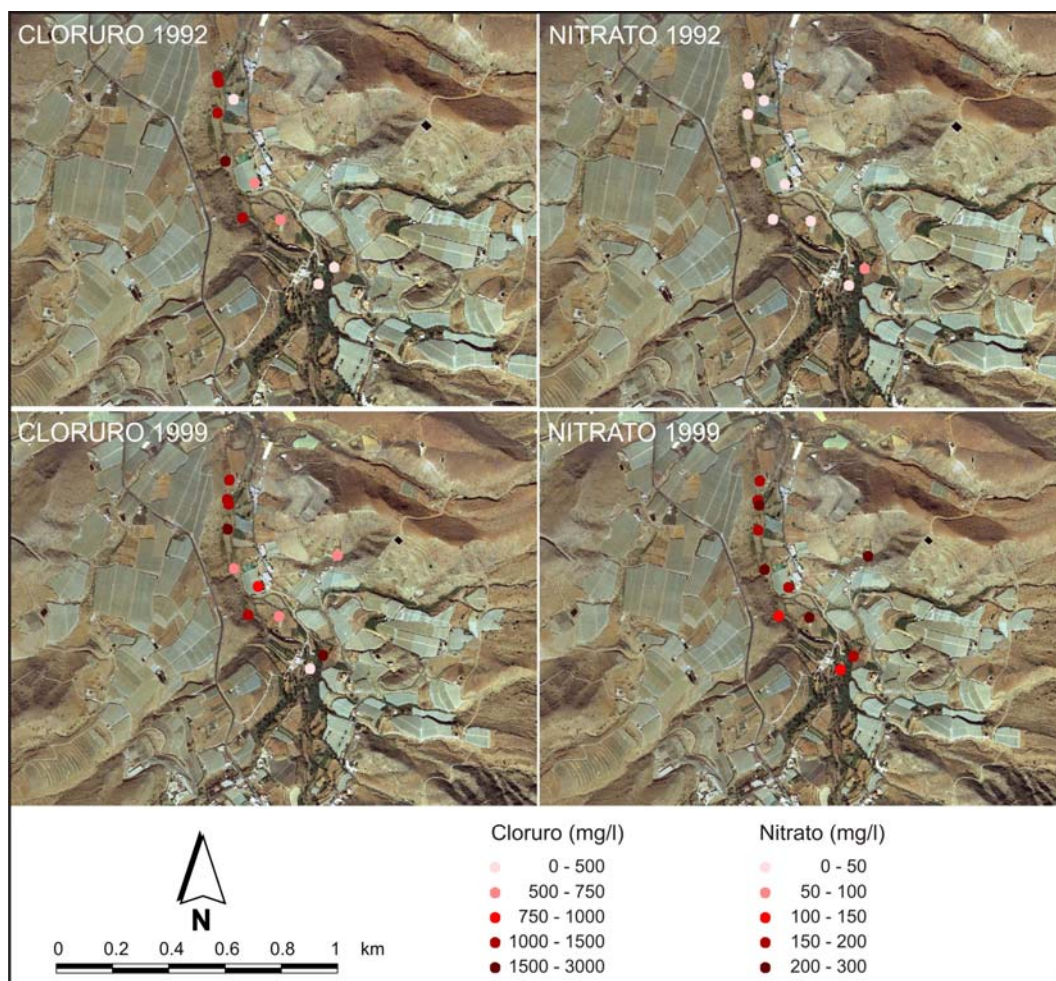


Figura D.3. Distribución espacial de Cl^- y NO_3^- en la zona del barranco de Tocomán para las campañas de campo de 1992 y 1999.

Los valores de dispersividad longitudinal, dispersividad transversal y dispersividad vertical obtenidos de la calibración del modelo de transporte de Cl⁻ para todas las capas del modelo son 1 m, 0.33 m y 0.05 m respectivamente. El modelo únicamente ha sido sensible a las variaciones de estos parámetros en la zona del aluvial principal, por lo que el resultado obtenido en el resto de las zonas debe ser tomado con reserva. Este valor de dispersividad longitudinal es bajo para el aluvial, pero está dentro de los valores considerados en el apartado 6.2 del capítulo 6 (obtenidos por diversos métodos).

Las porosidades eficaces resultantes del modelo de transporte fueron entre 8% y 9% para el aluvial que está dentro del rango de porosidad eficaz para el aluvial obtenido de la bibliografía (SPA-15, 1975; Custodio, 1978; Custodio y Llamas, 1996) que varía entre 3% y 35%. Para los basaltos sin alterar, la porosidad eficaz resultante es 0.3% que también está dentro del rango de valores 0.1% y 1% considerados en la bibliografía (SPA-15, 1975; Custodio, 1978; Custodio y Llamas, 1996). La porosidad obtenida para los basaltos alterados es de 8%, este valor es muy alto para los basaltos, pero hay que tener en cuenta que en esta zona también hay aluviales secundarios de menor entidad, derrubios de ladera, Basaltos Miocenos muy alterados y Basaltos Miocenos alterados que podría aumentar la porosidad.

Las concentraciones mínimas se localizan en los basaltos de las zonas altas de las montañas y cabecera de los barrancos secundarios de Furel y Tocodomán, donde el agua procede únicamente de la lluvia y está influenciada en menor medida por el aerosol marino. El aporte de cloruro de los retornos de riego se distribuye por el aluvial principal, los aluviales secundarios y las zonas más planas de las laderas que es donde se ubican las zonas de cultivo. El modelo de transporte de cloruro confirma la relevancia de los derrubios de ladera dentro del sistema hidrogeológico, ya que son vías de flujo preferente que aceleran y facilitan la recarga y también facilitan el transporte de soluto hacia el aluvial aportando los cloruros de los retornos de riego procedentes de los cultivos ubicados sobre ellos. La pluma generada por los Azulejos de Las Tabladas alcanza concentraciones superiores a 8000 mg/l y es vertida al mar, afectando exclusivamente a los pozos ubicados en este tramo (Figura 6.9).

BALANCE HÍDRICO

La presente tesis ha permitido la realización de un balance hídrico para el periodo comprendido entre 1992 y 1999 siguiendo el esquema definido en el modelo conceptual, que ha sido comparado con el balance de masas resultante de la aplicación de los modelos llevados a cabo.

La Figura D.4 refleja de forma resumida las cifras de cada uno de los términos. Según se muestra, la principal entrada de agua al acuífero se produce por retornos de riego que representa un 59% de la recarga total, seguida de la recarga por precipitación que representa un 28% y la entrada por cabecera que supone el 10% de la recarga total. La salida por explotación y la descarga el mar son las únicas salidas del sistema siendo la primera la más notable.

Si bien en el cálculo del balance hídrico se ha obrado con rigor, a los distintos términos del mismo le son inherentes incertidumbres. A continuación se describen algunas de estas incertidumbres y como se han procurado minimizar su incidencia en el balance hídrico.

La recarga por lluvia y por retornos de riego suponen entre 80% y 90% de la recarga total del acuífero por lo que es importante obtener una evaluación correcta y un conocimiento adecuado de la incertidumbre inherente a la información de partida y al proceso de cálculo.

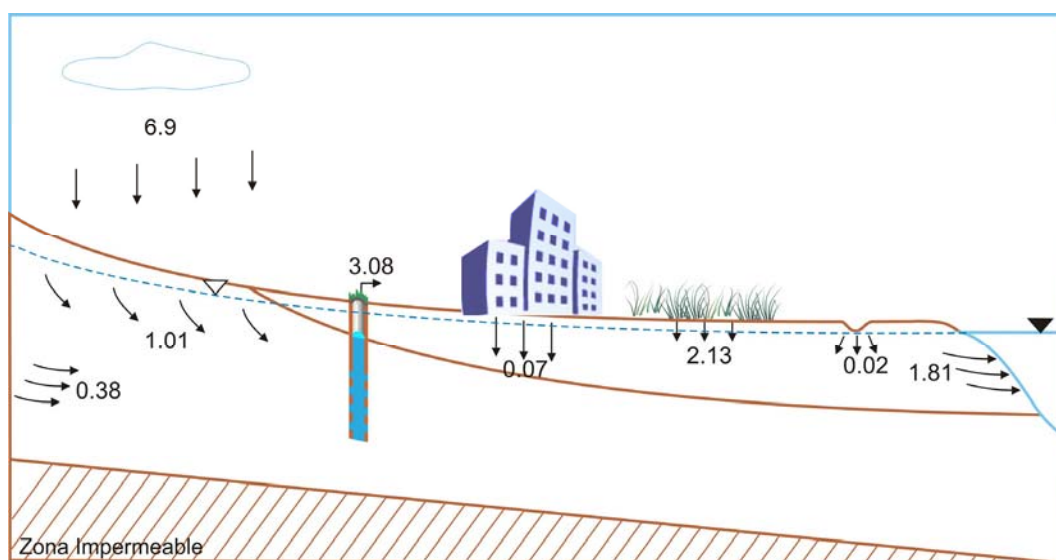


Figura D.4. *Bloque resumen de las entradas y salidas medias del flujo en el balance hídrico (Unidades en $hm^3/año$).*

La recarga del agua por la precipitación calculada por el balance diario de agua en el suelo mediante el programa Easy-bal depende de la cantidad de lluvia caída y la duración de la misma. Los datos de lluvias han sido suministrados por el Servicio Hidráulico del Gobierno de Canarias que

posee pluviómetros repartidos por toda la isla. Las series de datos de temperatura han sido extrapoladas de la estación meteorológica de Agaete, ya que no se disponía de estación en La Aldea para los años anteriores al 2000, con los errores que este proceso supone. Además de la incertidumbre en los datos de entrada para el cálculo de la recarga y la ETR, hay que añadirle las del método de cálculo de la ETP por Thornwaite, que no es el más adecuado para zonas áridas y semiáridas (Martin Smith, 1992). La justificación de su uso reside en su sencillez en cuanto a los parámetros requeridos. El cálculo de la incertidumbre de la recarga por lluvia se ha realizado según el método propuesto por Custodio (1997) para todo el periodo de estudio como se ha expuesto en el Apartado 3.4.1.1. Se obtuvo un error medio de recarga de $\pm 0.89 \text{ hm}^3/\text{año}$ siendo esta incertidumbre importante para el valor de la recarga ($1.01 \text{ hm}^3/\text{año}$).

Los cálculos del agua usada para el riego se han realizado a partir de datos de consumo teóricos para los distintos cultivos suministrados por la oficina de Extensión Agraria de La Aldea, que al igual las pérdidas en los retornos de riego, han sido evaluadas en 30% por la oficina de Extensión Agraria de La Aldea y las cooperativas de tomate. Posteriormente esta valoración del retorno de riego se hizo extensiva al resto de los cultivos. Estas pérdidas, promediadas en $2 \text{ hm}^3/\text{año}$, han podido ser verificadas para cultivos hidropónicos (Apartado 3.4.1.2), que ocupa un porcentaje muy bajo de superficie de cultivo con respecto al total, pero no para cultivos en suelo. El error en los retornos de riego ha sido evaluado en $\pm 0.3 \text{ hm}^3/\text{año}$, éste es un error aceptable para un dato tan notable como es la recarga por retornos de riego en el balance.

En la Tabla D.4 se muestra el porcentaje del agua extraída del acuífero que es usada para el riego, donde se observa que en la mayoría de los años hidrológicos oscila entre el 30% y 40%, llegando a alcanzar el 68% en el año 1998/99. Éste porcentaje es superior a la información facilitada por el personal de la Agencia de Extensión Agraria del La Aldea (Francisco Suárez Comunicación oral, 2004), que lo estima en un 25%. Esto es debido a que el periodo de estudio pertenece a un periodo de pocas lluvias o seco, en particular a partir de 1997 cuando disminuye de forma notable el aporte de agua a las presas y se instalan varias plantas desalinizadoras de agua de pozo que producen un aumento considerable de la explotación.

Tabla D.4. *Relación del volumen de agua usado para el riego y la explotación ($\text{hm}^3/\text{año}$).*

Año hidrológico	Riego ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Extracción ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Extracción/Riego (%)
1991/92	9.219	2.846	31
1992/93	8.834	2.866	32
1993/94	7.011	2.936	42
1994/95	7.858	2.965	38
1995/96	7.324	2.867	39
1996/97	5.266	2.933	56
1997/98	5.401	3.287	61
1998/99	5.776	3.925	68

La recarga por escorrentía ha sido calculada en un 6% de la escorrentía (SPA-15, 1975). La escorrentía ha sido evaluada por el método del Número de Curva por lo que los errores en este cálculo van a afectar al valor de la recarga por escorrentía. La escorrentía media ha sido evaluada en $0.33 \text{ hm}^3/\text{año}$, por lo que la recarga media por escorrentía es de $0.02 \text{ hm}^3/\text{año}$, este recarga no es significativa dentro del balance, por lo que su error tampoco será significativo en términos de balance.

Los datos de abastecimiento han sido suministrados por el ayuntamiento de La Aldea de San Nicolás. Según los responsables del ayuntamiento, las pérdidas de la red de abastecimiento se estima entre el 35% y 45%, pero no hay estudios al respecto. Esto proporciona un error de $\pm 0.009 \text{ hm}^3/\text{año}$, un error pequeño para los datos totales del balance.

Como caudal de entrada por la cabecera del barranco se ha optado por un promedio de los caudales calculados ya que la incertidumbre que encierran los cálculos de los caudales al dar valores de permeabilidades medias en el acuífero es grande de por sí, por ello carece de sentido trabajar con un grado de detalle superior, frente a hacerlo sólo con el promedio. El caudal de entrada es similar para las campañas de 1992 y 1999, 0.36 y $0.37 \text{ hm}^3/\text{año}$, respectivamente. Es interesante observar que ambas campañas fueron realizadas en periodo de verano pero estando 1992 precedido de años húmedo y 1999 de años secos. En la red de control actual establecida en 2005 y 2006 se puede observar una variación estacional, los valores de entradas más bajos se obtienen a finales de verano en el mes de septiembre ($0.27 \text{ hm}^3/\text{año}$) y los más altos después del periodo de lluvia de los meses de octubre a abril ($0.47 \text{ hm}^3/\text{año}$). El error es de $\pm 0.2 \text{ hm}^3/\text{año}$, este error es significativo si lo comparamos con los valores medios de entrada por cabecera, pero no es relevante en el marco del balance general ya que no es una de las entradas de agua al sistema más importantes.

Las series de datos de explotación han sido extrapolados para los años donde no se dispone de datos con los errores que ello conlleva. La extrapolación se ha realizado después de un análisis exhaustivo de los datos de la base de datos teniendo en cuenta las características de los pozos, el uso de agua y el tipo de cultivo que abastece, así como la cantidad y calidad de los datos disponibles. El error de la extrapolación ha sido evaluado teniendo en cuenta las explotaciones máximas y mínimas de los distintos pozos dando un error de $\pm 1 \text{ hm}^3/\text{año}$, este error es considerable y se ha tenido en cuenta a la hora de interpretar el balance.

La salida natural de agua hacia al mar se ha considerado constante en el periodo de estudio pero con un error evaluado en $\pm 0.98 \text{ hm}^3/\text{año}$. Este error es bastante alto en contraste con el valor medio de salida al mar calculado, aunque debe ser considerado al interpretar el balance. Igualmente, debe contemplarse de forma crítica la asunción de considerar la descarga al mar constante a causa de la falta de datos de niveles piezométricos en los pozos costeros para el

periodo del balance, pues el descenso general de niveles, anteriormente comentado, probablemente conllevaría una disminución en los aportes de agua al mar.

Con respecto a los errores (Tabla D.5), hay un mayor error en el cálculo de los términos de salida, en particular la evaluación de la explotación. Igualmente importantes son las incertidumbres obtenidas para la salida al mar y la recarga por lluvia.

Tabla D.5. Errores medios anuales del balance ($hm^3/año$).

	Min.	Máx.	Medio	Error
Entradas				
Lluvia	0.12	1.90	1.01	±0.89
Retornos de riego	1.77	2.40	2.09	±0.32
Cabecera	0.18	0.58	0.38	±0.2
Abastecimiento	0.06	0.08	0.07	±0.01
Escorrentía	0.02	0.02	0.02	
Total entradas	2.15	4.98	3.57	±1.42
Salidas				
Explotación	2.05	3.51	3.06	±1.01
Mar	0.85	2.79	1.81	±0.98
Total salidas	2.90	6.30	4.87	±1.99
Variación del almacenamiento	-0.85	-1.32	-1.30	

Uno de los resultados obtenidos con la simulación numérica de flujo fueron los balances hídricos. Cuando se dispone de información previa de estos balances obtenida mediante datos experimentales, ésta se emplea como un criterio añadido para la calibración del modelo. En la Tabla D.6 se comparan las distintas componentes del balance calculadas por el modelo de flujo en régimen estacionario y la información previa disponible para el año hidrológico 1991/92. Se observa que los términos del balance impuestos al modelo como la entrada por cabecera, la recarga total y la explotación son, lógicamente, coincidentes en su mayoría, la diferencia en la recarga es debida al error que produce la discretización espacial de las zonas de recarga de retornos de riego en el modelo con respecto a la superficie real de cultivo. La principal discrepancia se produce en el término de salida al mar, en el balance se ha calculado en $1.81 \text{ hm}^3/año$ y se ha supuesto constante para todo el periodo de cálculo, con un error estimado de $\pm 0.98 \text{ hm}^3/año$ sin embargo el modelo da una salida al mar de $0.87 \text{ hm}^3/año$, menor que el calculado y del orden del error estimado. Esto muestra que es muy importante tener en cuenta el error en el cálculo de las salidas al mar a la hora de interpretar el balance y en consecuencia las variaciones en el almacenamiento.

Tabla D.6. Comparación de las distintas componentes del balance calculadas por el modelo de flujo en régimen estacionario y la información previa disponible para el año hidrológico 1991/92.

		Información previa (Hm ³ /año)	Modelo calibrado (Hm ³ /año)
Entradas	Cabecera	0.38	0.40
	Recarga total	3.95	3.32
	Entrada total	4.31	3.72
Salidas	Al mar	1.81	0.87
	Explotación	2.88	2.84
	Salida total	4.69	3.72
E-S		-1.37	0.01

En la Figura D.5 se muestran algunos términos del balance calculados por el modelo de flujo en régimen transitorio para el periodo 1991/92- 1998/99. Se observa una disminución paulatina de la recarga en el tiempo debido a la disminución de la superficie de cultivo que va unida a una disminución de los retornos de riego. Los picos en la recarga son causados por la precipitación. Los descensos periódicos son debidos a que los retornos de riego son prácticamente nulos en la época en que termina la zafra (junio-julio). Los picos acusados por la precipitación son de menor entidad que los descensos en la recarga cuando no se producen retornos de riego, esta distribución de la recarga pone de manifiesto la importancia de la recarga por retornos de riego en la zona frente a la recarga por lluvia. Las extracciones tienden a aumentar en el tiempo y aunque se observa una disminución de éstas después de la zafra, no es tan significativo como el descenso que se produce en la recarga. Se observa un descenso en el almacenamiento que está relacionado con un descenso en la recarga, principalmente por la disminución de los retornos de riego debido a la reducción de la superficie de cultivo, y un aumento en la explotación debido al periodo de sequía. También se observa un descenso del caudal de salida al mar que pasa de aproximadamente 0.73 hm³/año a 0.37 hm³/año. Estos valores son inferiores de los calculados en el balance hídrico previo, lo que vuelve a evidenciar magnitud del error en el cálculo de este término.

Este balance de masas es complementario al balance hídrico previo realizado para el acuífero y en líneas generales constata los resultados obtenidos: los retornos de riego constituyen la principal recarga y condicionan fuertemente el sistema acuífero, tanto por la cantidad de agua que aporta al mismo como porque le aporta una fuerte componente estacional, que a su vez, está influenciada por la disponibilidad de agua (aporte de las presas aguas arriba o desalación de agua de mar y/o agua de pozo). Se trata, pues de un sistema muy vulnerable cuya planificación ha de ser cuidadosa para no comprometer el desarrollo económico-social del Valle de La Aldea. Por otro lado, las extracciones suponen la principal salida del sistema, muy influenciadas por la superficie cultivada en la misma.

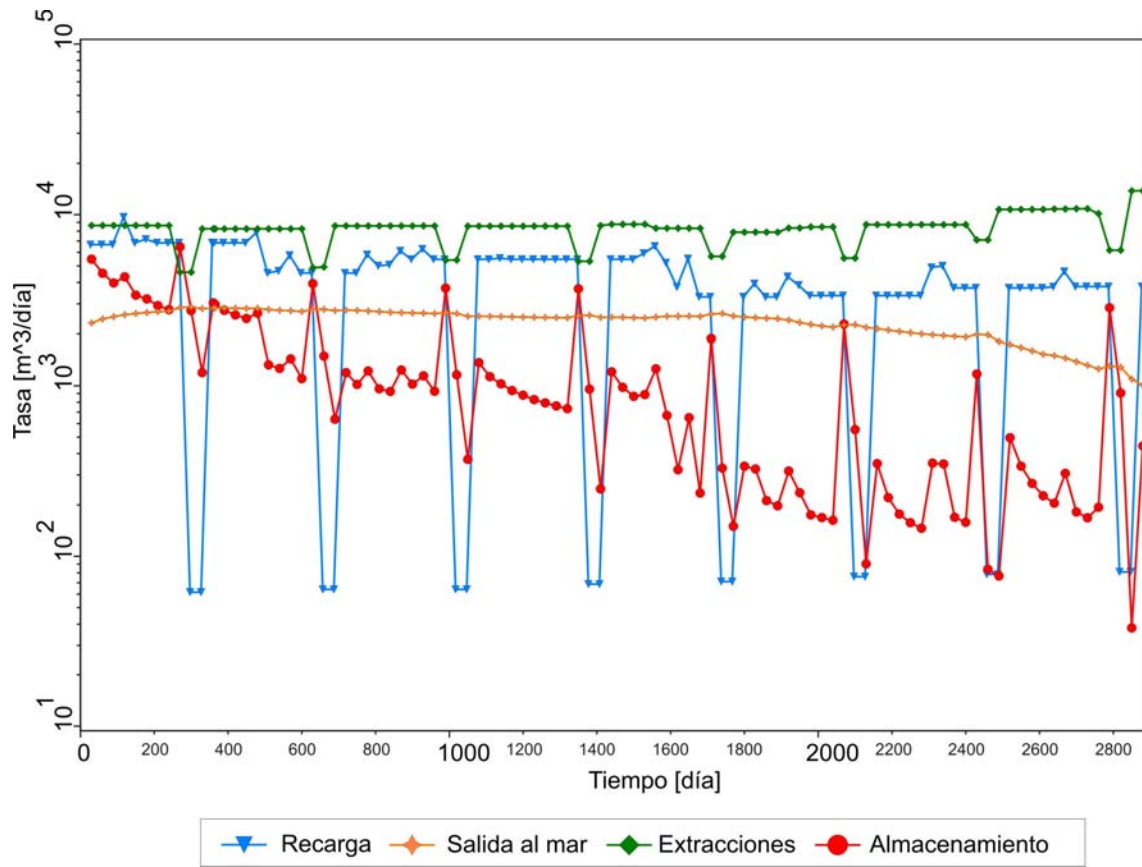


Figura D.5. Algunos caudales de entrada y salida de agua al sistema obtenidos en el modelo de flujo en régimen transitorio.

8.

CONCLUSIONES

El acuífero de La Aldea está conformado por dos unidades geológicas principales: una unidad volcánica y una unidad sedimentaria, que han sido consideradas como unidades hidrogeológicas. La unidad sedimentaria está constituida por los materiales aluviales del barranco principal de La Aldea, los secundarios de Tocodomán y Furel y otros barrancos secundarios de menor entidad. También forman parte de la unidad sedimentaria los depósitos de deslizamientos gravitacionales o derrubios de ladera que están constituidos por material detrítico y cantos de traquitas-fonolitas, ignimbritas y en menor medida, basaltos. Debajo de la unidad sedimentaria se localiza la unidad volcánica formada por Basaltos Miocenos que ocupa toda la superficie de la zona de estudio, con una permeabilidad mucho menor que la de los materiales aluviales y un espesor desconocido. Existe en la zona un relieve residual denominado Las Tabladas (situado al este de la zona de estudio entre los barrancos del Furel y el principal) que tiene como base los Basaltos Miocenos, cuya geología es compleja.

El agua se mueve fundamentalmente a través de los materiales aluviales existiendo un flujo preferente a lo largo del barranco principal de La Aldea. En el barranco de Tocodomán el flujo tiene lugar de sur a norte, en el barranco de Furel en flujo va de norte a sur y en las laderas del barranco de La Aldea el flujo va desde los Basaltos Miocenos a los materiales aluviales del lecho del barranco. Por lo anteriormente descrito, la zona de La Aldea constituye un área de descarga hacia el mar en la que la circulación se produce principalmente de este a oeste.

Los límites de la zona de estudio coinciden con los límites considerados en la modelación. Los conforman las divisorias de aguas, coincidentes con las cumbres de las montañas al norte y al sur, y el mar al oeste. El contacto con el límite este de la zona, exceptuando el lecho del barranco, ha sido considerado impermeable en la bibliografía, debido a la existencia del borde de la Caldera de Tejada (Muñoz, 2005). Sin embargo la entrada de un caudal por esta zona, que es una hipótesis hidrogeológica plausible, mejora considerablemente la calibración del modelo numérico de flujo. Se ha adoptado como límite inferior el contacto entre los basaltos alterados (más permeables) y los basaltos sin alterar (menos permeables), definido a partir de los datos de un sondeo de investigación situado en la zona de estudio. Se ha considerado para el resto de la superficie inferior de la zona de estudio una pendiente del 3% para los Basaltos Miocenos hacia la costa.

Existen en la zona más de 370 pozos de gran diámetro (2.5 y 3 m), con profundidades que oscilan entre los 4 y 240 m, con una profundidad media de 30 metros. Los pozos están situados principalmente en la parte central del acuífero y tienen un régimen de extracción variable.

Según se evidencia a partir del balance hidrológico previo y del balance obtenido en el modelo, las entradas de agua al acuífero están constituidas por la recarga a partir del agua de lluvia, la entrada de agua por la cabecera del barranco, los retornos de riego, pérdidas de la red de abastecimiento y la infiltración en la escorrentía. Las salidas del acuífero son la descarga al mar y las extracciones por bombeo para riego y en menor medida para abastecimiento urbano. La principal entrada de agua al acuífero se produce por retornos de riego que representa aproximadamente un

60% de la recarga total, seguida de la recarga por precipitación que representa un 28% y la entrada por cabecera que supone el 10% de la recarga total. Tanto la salida por explotación como la descarga al mar son importantes siendo la primera mayor.

La evapotranspiración real supone entre un 31% y un 95% de la precipitación con una media de 64%; la infiltración entre el 2% y el 17% de esta con un valor medio de 13% y la escorrentía superficial anual supone entre un 3% y un 56% de la precipitación. La recarga de la escorrentía es entre el 0.2% y el 3.5% de la precipitación.

El modelo matemático de flujo confirma que el patrón de flujo resultante del modelo conceptual, donde el agua es transferida de los diferentes dominios hidrogeológicos al aluvial principal y circula por el aluvial de este a oeste. La entrada de agua desde la zona de intra-caldera ha sido un factor importante para el ajuste modelo, a pesar de que esta entrada no tiene una gran magnitud.

Los resultados obtenidos por el modelo evidencian el condicionamiento que la topografía y la geología imponen a la piezometría en la zona del estudio. La consideración del dominio de los derrubios de ladera y aluviales secundarios, hasta ahora no tenidos en cuenta, ha llegado a ser un factor muy importante para obtener un buen ajuste entre niveles observados y calculados. Este hecho ha motivado que se redefina su importancia hidrogeológica en el modelo conceptual identificando a estos depósitos como grandes drenes que facilitan y contribuyen a la recarga del aluvial principal desde las laderas.

Han sido identificados distintos procesos hidrogeoquímicos que controlan la química de las aguas subterráneas: la principal fuente de recarga se debe al agua de lluvia que ya entra al acuífero con una salinización extra debido al aerosol marino y al polvo sahariano, aunque este último es menos importante en relación al primero y se puede considerar despreciable. A esta recarga se le une el aporte de retornos de riego que produce un aumento de la salinización y la lixiviación de los Azulejos de Las Tabladas.

El agua de lluvia de la zona de estudio es Bicarbonatada Cálcica en las zonas más alejadas del mar y Cloruradas Sódicas cerca de éste. Esta agua sufre un proceso de evaporación en el paso de agua de lluvia a agua de presa y de agua de lluvia a agua subterránea. También se observa el proceso de mezcla de la lluvia con el aerosol marino.

En los pozos se distingue un proceso de mezcla desde el agua de presa y escorrentía hacia el agua de mar y los retornos de riego a medida que se avanza en la dirección del flujo. Y otro proceso de la influencia de la marca geológica de los basaltos en los pozos ubicados en el barranco de Tocodomán. Las aguas subterráneas de la zona de estudio son principalmente Cloruradas Sódicas, esto muestra la importancia del aerosol marino en la zona. Donde la influencia del aerosol

marino es baja (zonas más altas de la zona de estudio y más alejadas del mar), las aguas son Cloruradas Bicarbonatadas Sódicas.

En los pozos donde el agua procede de los basaltos con tiempos de residencia suficientes, bien por su profundidad o porque están ubicados fuera del aluvial, se observa un aumento en la concentración de Mg^{+2} mostrando una clara marca geológica de los basaltos. También se observa la marca geológica de las rocas traquítico riolíticas en los pozos ubicados en los derrubios de ladera con un aumento en la concentración de Na^+ . La influencia de Las Tabladas se distingue por un importante aumento en la concentración del Cl^- , Na^+ y SO_4^{-2} y está muy localizada en los alrededores de esta. El dominio de los retornos de riego se observa en casi todos los pozos estudiados siendo mayor en el aluvial principal y el barranco de Tocodomán con un claro aumento en las concentraciones de SO_4^{-2} en estas muestras. Ca^{+2} y Mg^{+2} son aportados por los minerales que componen los basaltos como la anortita y la forsterita, Na^+ y K^+ por los minerales de las rocas traquítico riolíticas como la albita, el piroxeno y la sanidina. La calcita precipita o diluye aportando Ca^{+2} y HCO_3^- . Y por último, el yeso también precipita o diluye aportando Ca^{+2} y SO_4^{-2} .

Se ha empleado la modelación hidroquímica para establecer los procesos de mezcla y la evolución de las reacciones químicas que tienen lugar en el acuífero. Finalmente se ha plasmado los resultados de esta modelación en un modelo numérico de transporte de cloruro. Los valores simulados de cloruro han presentado un buen ajuste para la mayoría de los puntos de observación, excepto los pozos ubicados en el barranco de Tocodomán. El mapa de cloruros resultante de la calibración del modelo de transporte en régimen estacionario ha mostrado una representación coherente con el modelo conceptual de flujo y de transporte de la zona de estudio y, en línea general, con las observaciones realizadas, reproduciéndolas de forma satisfactoria. El rasgo característico más notorio lo constituye el aporte de cloruros debido a la lixiviación de los Azulejos ubicados en la zona de Las Tabladas, que alcanzan concentraciones superiores a 8000 mg/l y queda perfectamente simulado por el modelo. También el modelo de transporte pone en evidencia la relevancia de los derrubios de ladera dentro del sistema hidrogeológico, ya que son vías de flujo preferente que aceleran y facilitan la recarga del aluvial aportando los cloruros de los retornos de riego ubicados sobre ellos. Por otro lado, el modelo de transporte de cloruro ha dejado en evidencia que se desconocen aspectos importantes para tener un modelo conceptual coherente en los barrancos secundarios del Furel y Tocodomán ya sea por falta de información o porque ésta no esté bien definida.

Puede concluirse que esta tesis ha supuesto un avance en el conocimiento de las aguas subterráneas del acuífero de La Aldea (Gran Canaria) basado en la modelación numérica del flujo y el transporte y la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas. Este proceso de modelación ha permitido mejorar de forma notable el modelo conceptual previo que se tenía del sistema. El modelo de flujo a partir del nuevo modelo conceptual ha sido validado con un buen resultado. La realización de la modelación hidroquímica ha contribuido a desarrollar e interpretar los resultados

de un modelo de transporte, que reproduce correctamente la distribución espacial de las concentraciones de cloruro en la zona de estudio.

Un resultado colateral, de la tesis pero no por ello en absoluto desdeñable, es que los modelos resultantes, habida cuenta de la calidad de sus ajustes y validación, se presentan como potenciales herramientas de apoyo a la gestión hídrica en una zona donde este recurso es ambiental y socio-económicamente estratégico. No obstante, la utilización de los modelos para la gestión hídrica del acuífero, necesitaría de un aporte adicional de información piezométrica e hidroquímica en aquellas zonas donde no existen, para que la validación fuera más fiable, fundamentalmente en los barrancos secundarios de Tocodomán y Furel. La geometría y parámetros hidráulicos del acuífero se podrían conocer de un modo más profundo si se llevaran a cabo nuevos sondeos profundos y ensayos de bombeo, fundamentalmente fuera de la zona del aluvial principal. En cuanto a la hidrogeoquímica, el conocimiento de la calidad de los retornos de riego en las zonas donde no está instalada la hidroponía permitiría introducir datos reales en el modelo de transporte y por tanto reduciría la incertidumbre del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

ABARCA, E.; CARRERA, J.; SÁNCHEZ-VILA, X. and VOSS, C.I. (2007): Quasi-horizontal circulation cells in 3D seawater intrusion. *Journal of Hydrology*, 339(3-4):118-129.

ABDULLA, F.A.; AL-KHATIB M.A. and AL-GHAZZAWI, Z.D. (2000): *Development of groundwater modeling for the Azraq Basin, Jordan*. *Environmental Geology*, 40(1-2):11-18.

ALCALÁ, F.J. (2005): *Recarga de los acuíferos españoles mediante balance hidrogeoquímico*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 346 pp. + Anejos.

ANDERSON, M.P. (1979): *Using models to simulate the movement of contaminants through groundwater flow systems*. *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, 9:97-156.

ANDERSON, M.P. and WOESSNER, W.W. (2002): *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport*. Academia press. USA, 381 pp.

ANTÓN, A. (2002): *Volcanología y petrología de Los Azulejos y su relación con la química de las aguas subterráneas del valle de La Aldea (Gran Canaria)*. Trabajo de suficiencia investigadora. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Inédita.

APPELO, C.A.J. and POSTMAN, D. (1993): *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A. Balkema. Róterdam, 649 pp.

ASTM (1995): *Emergency standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites*. ASTM E-1739.

BALCELLS, R.; BARRERA, J.L.; GÓMEZ, J.A.; HERNÁN, F.; SCHMINCKE, H.U. y CUETO, L.A. (1992): *Proyecto MAGNA*. Memoria y mapa geológico de España a escala 1:100.000. Gran Canaria: hoja nº 21-21/21-22.

BARRERA, J.L. y GÓMEZ, J.A. (1990): *Proyecto MAGNA*. Memorias y mapas geológicos de España a escala 1:25.000. Isla de Gran Canaria: hojas nº 1108-I-II-III. IGME.

BEJARANO, C. (2002): *Elaboración de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación por nitratos mediante una metodología de acople SIG – Modelo de simulación. Aplicación al acuífero de La Aldea (Gran Canaria)*. Trabajo de suficiencia investigadora. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Inédita.

BEJARANO, C.; CABRERA, M.C. y CANDELA, L. (2002): *Elaboración de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación por nitratos en el acuífero de La Aldea (Gran Canaria)*. XXXII AIH & VI ALHSUD Congreso. Aguas Subterráneas y desarrollo humano. Mar del Plata, Argentina.

BEJARANO, C.; CABRERA, M.C.; CANDELA, L. Y PAZ, J. M. DE (2003): *Elaboración de un mapa de lixiviación de nitratos mediante una metodología de acople SIG-modelo de simulación. Aplicación al acuífero de La Aldea (Gran Canaria)*. Boletín Geológico y Minero de España, 114 (2): 213-224.

BROOK, G.A.; FOLKOFF, M.E and BOX, E.O. (1983): *A world model of soil carbon dioxide*. Earth surface processes and landforms, 8:79-88.

CABRERA, M.C. (1995): *Caracterización y funcionamiento hidrogeológico del acuífero costero de Telde*. Tesis doctoral. Universidad de Salamanca, 363 pp.

CABRERA, M.C. (2001): *Informe sobre las características del acuífero costero de La Aldea (Viabilidad de la construcción de nuevos pozos filtrantes de agua de mar en la zona)*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Informe interno, sin publicar.

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

CABRERA, M.C.; ANTÓN, A. y MUÑOZ, J. (2001): *Influencia de la instalación de desaladoras de agua de pozo en el acuífero de La Aldea (Gran Canaria)*. En Pulido A.; Vallejos, A. y Pulido, P. (Eds.): Los acuíferos costeros y las desaladoras. Ed. G.I. Recursos Hídricos y Geología Ambiental y Club del Agua Subterránea, 195-202.

CABRERA, M.C.; DELGADO MANGAS, F.; MUÑOZ SANZ, J.; PÉREZ TORRADO, F.J. y LA MONEDA, E. (2000): *Caracterización de las familias hidrogeoquímicas en el acuífero de La Aldea (Gran Canaria)*. Geotemas, 1(2):47-50.

CABRERA, M.C.; MUÑOZ, R.; PONCELA, R.; SOCORRO, A.R.; GONZALEZ, G. and HERNANDEZ, F. (1996): *Metodología para el estudio de la contaminación por pesticidas en la zona no saturada y el acuífero de Gran Canaria y Tenerife (Islas Canarias)*. Geogaceta, 20 (6):1288-1290.

CABRERA, M.C.; PÉREZ TORRADO, F.J., ANTÓN, A y MUÑOZ SANZ, J. (2006): *Volcanología de los Azulejos y su relación con las aguas subterráneas del Valle de La Aldea (Gran Canaria)*. Ed. Cabildo Insular de Gran Canaria, 153 pp.

CARRACEDO, J.C.; PÉREZ TORRADO, F.J.; ANCOCHEA, E.; MECO, J.; HERNÁN, F; CUBAS, C.R.; CASILLAS, R.; RODRIGUEZ BADDIOLA, E. y AHIJADO, A. (2002): *Cenozoic volcanism II: the Canary Islands*. En Gibbons, W. and Moreno, T. (eds.): The Geology of Spain. Ed. The Geological Society of London, 439-472.

- CARRERA, J. (1985): *La modelación del transporte de contaminantes en acuíferos. Métodos de análisis y proceso de estudio. Aplicación a un caso real*. Ponencia en la conferencia sobre Hidrología General aplicada. SMAGUA 85, 151-175
- CASTRO, A. (1999): *Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte-Marismas y su entorno*. Tesis de Master. Universidad Politécnica de Cataluña.
- CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE GRAN CANARIA (CIAGC) (2005): *Presas de Gran Canaria*. Ed. Cabildo de Gran Canaria.
- CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE TENERIFE (CIAT) (2002): *Revisión y actualización del modelo de simulación del flujo subterráneo en la isla de Tenerife*. Surge, S.A. Memoria.
- CRIADO C. and DORTA P. (2003): *An unusual "blood rain" over the Canary Islands (Spain): the store of January 1999*. Journal of arid Environments, 55:765-783.
- CUSTODIO, E. (1978): *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Ed. Instituto de Hidrología. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid, 303 pp.
- CUSTODIO, E. (1985): *Low permeability volcanics in the Canary Islands (Spain)*. Conference on Hydrology of rocks of low permeability. Tucson, 533-544.
- CUSTODIO, E. (1986): *Groundwater characteristics and problems in volcanic rock terrains*. En: Isotope Techniques in the Study of the Hydrology of Fractured and Fissured Rocks. International Atomic Energy Agency. Viena, 87-137.
- CUSTODIO, E. (1993): *Coastal aquifer salinization as a consequence of aridity: the case of Amurga phonolitic massif, Gran Canaria island*. En: Custodio, E. y Galofré, A. (eds.): Study and modelling of saltwater intrusion into aquifers, 81-98.
- CUSTODIO, E. (1997): *Recarga de acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre*. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica. Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español. Las Palmas de Gran Canaria, 19-39.
- CUSTODIO, E. (2004): *Hydrogeology of volcanic rocks. Groundwater Studies: An International Guide for Hydrogeological Investigations*. Ed. V.S. Kovalevsky; G.P. Kruseman; K.R. Rushton. UNESCO. Series on Groundwater, 3: 395-425.
- CUSTODIO, E. y CABRERA, M.C. (2002): *¿Cómo convivir con la escasez de agua? El caso de las Islas Canarias*. Boletín Geológico y Minero, 113(3): 243-258
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, R. (1996): *Hidrología Subterránea*. ED. Omega. Barcelona. II tomos. 2º Edición, 2359 pp.

CUSTODIO, E.; CUENA, J. y BAYÓ, A. (1971): *Planteamiento, ejecución y utilización de un modelo matemático de dos capas para los acuíferos del río Llobregat, Barcelona*. In Memorias, 1er Congreso Hispano-Luso Americano de Geología Económica. Madrid- Lisboa, vol. III:171–198.

DANIELS, W.R. (1982): *Laboratory field studies related to the radionuclide migration project (draft)*. Progress Rep. LA-9192-PR, Los Alamos Science Laboratory, Los Alamos, N.M.

DAVIS, R.K.; PEDERSON, D.T.; BLUM, D.A. and CARR, J.D. (1993): *Atrazine in a stream-aquifer system - estimation of aquifer properties from atrazine concentration profiles*. Ground water monitoring review, 134-141.

DELGADO, F. (1998): *Estudio hidrogeológico de los procesos de salinización en el acuífero de San Nicolás de Tolentino (Gran Canaria)*. XXXII Curso Internacional de Hidrología Subterránea (CIHS). Fundación CIHS. Barcelona.

Directiva 91/676/CEE (1991): *Relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura*.

DORTA, P. (1999): *Las invasiones de aire sahariano en Canarias*. Consejería de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de Canarias y La Caja Rural de Tenerife. Santa Cruz de Tenerife, 287 pp.

EL IDRYSY, H. and DE SMEDT, F. (2006): *Modelling groundwater flow of the Trifa aquifer, Morocco*. Hydrogeology Journal, 14:1265-1276.

FAO (1974): *Soil map of the world: Legend*. Paris, Vol. 1: 1-50.

FERNANDOPULLÉ, D. (1974): *Clasificación química del agua subterránea y factores que influyen hidroquímicamente en la isla de Gran Canaria*. Simposio Internacional de Hidrología en Terrenos Volcánicos. Lanzarote, 529-559.

FERRER, M.; RODRÍGUEZ, J. y ESTELA, T. (1995): *Generación automática del número de Curva con Sistema de Información Geográfica*. Ingeniería del Agua, 2(4):43-58.

GASPARINI, A.; CUSTODIO, E.; FONTES, J.CH.; JIMENEZ, J. Y NÚÑEZ, J.A. (1990): *Exemple d'étude géochimique et isotopique de circulations aquifères en terrain volcanique sous climat semi-aride (Amurga, Grande Canarie, Iles Canaries)*. Journal of Hydrology, 114:61-91.

GELHAR, L.W. (1982): *Analysis of two-well tracer tests with a pulse input*. Rep. RHO-BW-CR131 P, Rockwell Intl., Richland, Wash.

GELHAR, L.W.; WELTY, L. and REHFELDT, K.R. (1992): *A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers*. Water Resources Research, 28(7):1955-1974.

GIAMBASTIANI, B.M.S.; ANTONELLINI, M.; OUDE ESSINK, G.H.P. and STUURMAN, R.J. (2007): Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): A numerical model. *Journal of hydrology*, 340(1-2): 91-104.

GINGERICH S.B. and VOSS, C.I. (2005): *Three-dimensional variable-density flow simulation of a coastal aquifer in southern Oahu, Hawaii, USA*. *Hydrogeology Journal*, 13:436-450.

GRAFCAN (1998): *Mapas topográficos de Gran Canaria*, escala 1:5.000.

GUILLOU, H.; PÉREZ TORRADO, F.J.; HANSEN, A.R.; CARRACEDO, J.C. and GIMENO, D. (2004): *The Plio-Quaternary volcanic evolution of Gran Canaria based on new K-Ar ages and magnetostratigraphy*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135: 221-246.

HARBAUGH A.W. (2005): *MODFLOW-2005, U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process*. U.S. Geological Survey. Techniques and Methods 6-A16. Washington, D.C.

HARBAUGH, A.W., BANTA, E.R., HILL, M.C., and MCDONALD, M.G. (2000): *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process*. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92. U.S. Department of the Interior. Washington, D.C.

HARTEN, A. (1983): *High resolution schemes for hyperbolic conservation laws*. *Journal of Computational Physics*, 49:357-393.

HARTEN, A. (1984): *High resolution schemes for hyperbolic conservation laws*. *Journal of Computational Physics*, 21:955-958.

HEREDIA, J.; GARCÍA-ARÓSTEGUI, J. L.; MURILLO, J. M.; RUBIO-CAMPOS, J. C. y LÓPEZ-GETA J. A. (2002a): *Influencia antrópica en un acuífero costero. Consideraciones sobre la gestión hídrica del acuífero de Motril-Salobreña (España)*. XXXII AIH & VI ALHSUD Congreso. Aguas Subterráneas y desarrollo humano. Mar del Plata, Argentina.

HEREDIA, J.; GARCÍA-ARÓSTEGUI, J.L.; MURILLO, J.M.; RUBIO, J.C. y LOPEZ-GETA, J.A. (2002b): *Síntesis hidrogeológica y modelo de flujo del acuífero costero de Motril-Salobreña*. *Boletín Geológico y Minero*, 113(2):165-184

IGME (1976): *Informe preliminar sobre la realización y resultados del modelo matemático de Almonte-Marismas*. Madrid. Informe interno, sin publicar.

IGME (1982): *Actualización de los datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base, 1982: modelo matemático bidimensional del sistema acuífero núm. 27: unidad Almonte-Marismas*. Informe interno, sin publicar.

IGME (1985): *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España*. Informe de síntesis. Madrid, 385 pp.

IGME (1986): *Actualización de los datos hidrogeológicos de Almonte-Marismas: aplicación del modelo matemático bidimensional del Sistema Acuífero nº 27: procesamiento de datos de ordenador*. Madrid. Informe interno, sin publicar.

INTECSA (1981): *Informe sobre el modelo matemático de flujo subterráneo de Gran Canaria*. Excmo. Cabildo Insular de Gran Canaria. Informe interno, sin publicar.

IRIBAR, V.; CARRERA, J.; CUSTODIO, E. and MEDINA A. (1997): *Inverse modelling of sea water intrusion in the Llobregat delta deep aquifer*. Journal of Hydrology, 198(1-4):226-244.

IRYDA (1976): *Segundo informe sobre el modelo matemático de los acuíferos de Almonte-Marismas (Huelva-Sevilla)*. INTECSA, Madrid. Informe interno, sin publicar.

KONIKOW, L. F. (2002): *Uso de modelos numéricos para simular el flujo y el transporte subterráneo. Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones*. Serie: Guías y Manuales Nº 1. Ed. W.G. Mook. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

KONIKOW, L.F. (1996): *Numerical models of groundwater flow y transport*. In: Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrogeology, International Atomic Energy Agency Rept. IAEA-TECDOC-910. Vienna, 59-112.

KONIKOW, L.F. and BREDEHOEFT, J.D. (1974): *Modeling flow and chemical quality changes in an irrigated stream-aquifer system*. Water Resources Research, 10(3):546-562.

LOZANO, E. (2004): *Las aguas subterráneas en Los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 412 pp + Anejos.

LUCENA, C. y GARCÍA FERNÁNDEZ, E. (1978): *El modelo matemático del sistema acuífero Almonte-Marismas*. Boletín Geológico y Minero, 89(2): 151-163.

MAC-21 (1980): *Proyecto de Planificación y Explotación de los Recursos de agua en el Archipiélago Canario*. Comisión interministerial Coordinadora de las actuaciones del Estado en Materia de Agua en las Islas Canarias.

MARRERO, L.E. y MUÑOZ, J.R. (2001): *Apoyo topográfico e implementación de una Base Cartográfica Digital destinada al estudio hidrológico del barranco de La Aldea*. Proyecto fin de carrera de Ingeniería Técnica en Topografía. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

MARTÍN MACHUCA, M. y VIRGÓS SORIANO, L. I. (1995): *Modelo matemático del acuífero del Almonte-Marismas*. VI Simposio de Hidrogeología. Sevilla, XXI: 345-358.

MARTIN SMITH (1992): *Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements*. Land and Water Development Division. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, 60 pp.

MARTÍNEZ, S., SASTRE, A. y MARTIALAY. A. (1999): *Modelización hidrogeológica del Valle de Lerma*. II Congreso Argentino de Hidrogeología, Santa Fe, Argentina.

McCUEN, R.H. (1982): *A guide to Hydrologic Analysis using SCS Methods*. Prentice-Hall. New Jersey, 145 pp.

McDONALD, M.G. and HARBAUGH, A.W. (1988): *A modular three dimensional finite-difference groundwater flow model*. USGS Open-File Report 83-875. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.

MENÉNDEZ, I.; DÍAZ-HERNÁNDEZ, J.L.; MANGAS, J.; ALONSO, I. and SÁNCHEZ-SOTO P. L. (2007): *Airborne dust accumulation and soil development in the north-east sector of Gran Canaria (Canary Islands, Spain)*. Journal of arid environments, 71:57-81

MUÑOZ, J. (2005): *Funcionamiento hidrogeológico del acuífero de La Aldea (Gran Canaria)*. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 310 pp. + Anejos.

MUÑOZ, J.; CABRERA, M.C., ANTÓN, A. y PÉREZ-TORRADO, F.J. (2002): *Efectos del uso de aguas subterráneas para riego en el acuífero de La Aldea (Gran Canaria)*. XXXII AIH & VI ALHSUD Congreso. Aguas Subterráneas y desarrollo humano. Mar del Plata, Argentina.

MUÑOZ, R.; CABRERA, M.C.; HERNÁNDEZ, F. and SOCORRO, A.R. (1996): *Development of Analytical and Sampling Methods for Priority Pesticides and Relevant Transformation Products in Aquifers*. Final Project Report.

NEUMAN, S.P. (1984): *Adaptive Eulerian-Lagrangian finite element method for advection-dispersion*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 20:321-337.

NEW ZEALAND MINISTRY OF WORKS AND DEVELOPMENT, WATER AND SOIL DIVISION (1977): *Movement of contaminants into and through the Heretaunga Plains aquifer*.

OUDE ESSINK, G.H.P.; POST, V.E.A.; KUIJPER, M.J.M. and MINNEMA, B. (2004): Land subsidence and sea level rise threaten the coastal aquifer of Zuid-Holland, The Netherlands. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas N° 15. Ed. Araguás, Custodio y Manzano. 18 Salt Water Intrusion Meeting, 617-624.

PARKHURST, D. L. and APPELO, C. A. J. (1999): *User's guide PHREEQC (Version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. Water Resources Investigation Report 99-4259. Denver, Colorado.

PÉREZ TORRADO, F.J.; CABRERA, M.C.; ANTÓN, A. Y MUÑOZ, J. (2004): *Estratigrafía y petrología de los depósitos de "Azulejos" del borde de la Caldera de Tejada (Gran Canaria, Islas Canarias)*. Geotemas, 6(1): 159-162.

PICKENS, J.F. and GRISAK, G.E. (1981): *Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer*. Water Resources Research, 17(4):1191-1211.

PLAN HIDROLÓGICO DE GRAN CANARIA (PHGC) (1991): *Actualización al conocimiento hidrogeológico de Gran Canaria*. Consejo Insular de aguas de Gran Canaria. Informe interno, sin publicar.

PLAN HIDROLÓGICO DE GRAN CANARIA (PHGC) (1992): *Inventario de puntos de agua, zona Oeste*. Consejo Insular de aguas de Gran Canaria. Informe interno, sin publicar.

PLAN HIDROLÓGICO DE GRAN CANARIA (PHGC) (1998): *Memoria del Plan Hidrológico de Gran Canaria*. Consejo Insular de aguas de Gran Canaria. Informe interno, sin publicar.

PLAN HIDROLÓGICO DEL PIRINEO ORIENTAL (PHPO) (1985): *Modelo de simulación de los acuíferos del delta del Bajo Llobregat*. Plan Hidrológico Nacional, Confederación Hidrográfica del Pirineo Oriental, Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental.

ROBSON, S.G. (1974): *Feasibility of Digital water quality modeling illustrated by application of Barstow, California*. U.S. Geological Survey. Water Resources Investigations, 46-73.

ROBSON, S.G. (1978): *Application of digital profile modeling techniques to ground-water solute transport of Barstow, California*. U.S. Geological Survey. Water Supply Paper.

SÁNCHEZ, J. (1975): *Características y distribución de los suelos de la isla de Gran Canaria*. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna. Tenerife.

SCHNEIDER, A. and FEIN, E. (2004): *Modelling density-driven flow using d³f*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas Nº 15. Ed. Araguás, Custodio y Manzano. 18 Salt Water Intrusion Meeting, 127-138.

SPA-15 (1975): *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (SPA/69/515)*. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Obras Hídricas. UNESCO. Las Palmas de Gran Canaria.

SPITZ, K. and MORENO, J. (1996): *A practical guide to groundwater and solute transport modelling*. John Wiley & Sons. New York, 465 pp.

SUÁREZ MORENO, F. (1999): *La historia de La Aldea de San Nicolás*. Ed. Centro de cultura popular canaria.

SURGE, S.A. (1991): *Modelo de flujo del agua subterránea de la isla de Tenerife*. Informe interno, sin publicar.

TÉMEZ, J. R. (1978): *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. MOPU. Dirección General de Carreteras.

TÉMEZ, J. R. (1991): *Extended and Improved Rational Method*. Version of the Hyghaways Administration of Spain. XXIV Congress. Madrid, Vol. A:33-40.

TRICK, T.; CUSTODIO, E. y MANZANO, M. (1995): *Actualización del modelo hidrogeológico de la zona de El Abalarío (Huelva)*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Madrid, XIX: 661-677.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) (1986): *Background document for the ground-water screening procedure to support 40 CFR Part 269 - land disposal*. U.S. Environmental Protection Agency, 530-SW-86-047.

U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) (1964): *National engineering handbook*, Section 4, Hydrology. Department of Agriculture, Washington.

U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) (1972): *National engineering handbook*, Section 4, Hydrology. Department of Agriculture, Washington.

VÁZQUEZ-SUÑÉ, E.; ABARCA, E.; NOGUÉS, A.; CAPINO, B.; CASAMITJANA, A.; GÁMEZ D. and CARRERA J. (2005a): *Groundwater flow and saltwater intrusion modeling of the Low Valley and Llobregat Delta aquifers*. In Groundwater and saline intrusion. Selected papers from the 18th Salt Water Intrusion Meeting, edited by L. Araguás, E. Custodio, and M. Manzano, 693–705, IGME.

VÁZQUEZ-SUÑÉ, E.; ABARCA, E.; CARRERA, J.; CAPINO, B.; GÁMEZ, D.; POOL, M.; SIMÓ, T.; BATLLE, F.; NIÑEROLA, J. M. and IBÁÑEZ, X. (2005b): *Groundwater modelling as a tool for the European Water Framework Directive (WFD) application*. The Llobregat case. Physics and Chemistry of the Earth.

WATERLOO HYDROGEOLOGIC (2001): *Groundwater Software Bulletin*. Waterloo Hydrogeologic, Inc. 180 Columbia St. W. - Unit 1104. Waterloo, Ontario, Canada

WATERLOO HYDROGEOLOGIC (2005): *Visual MODFLOW User's Manual*. Waterloo Hydrogeologic, Inc. Canada.

WANG, H.F. y ANDERSON, M.P. (1982): *Introduction to groundwater modeling. Difference and finite element methods*. W.H. Freeman and Company. San Francisco.

XU, M. and ECKSTEIN, Y. (1995): *Use of least-square method in evaluation of the relationship between dispersivity and scale*. Ground Water, 33(6):905-908.

YEH, G. T. (1990): *A Lagrangian-Eulerian method with zoomable hidden finemesh approach to solving advection-dispersion equations*. Water Resources Research, 26(6):1133-1144.

ZHENG, C. (1990): *MT3D, A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems*. U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, Oklahoma, 219 pp.

ZHENG, C. and WANG, P.P. (1999): *MT3DMS, A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater system*. Documentation and User's Guide.

ANEJOS

ANEJO 1. DATOS ABASTECIMIENTO Y DOTACIONES DE RIEGO

Tabla A.1. Volumen de agua suministrado por el Ayuntamiento de La Aldea de San Nicolás para el abastecimiento usado como datos de abastecimiento para el cálculo de las pérdidas en la red en el balance hídrico.

Año	Volumen (m ³)	Habitantes	Dotación (l/hab.día)
1991	144000	7751	52
1992	156000	7751	56
1993	162000	7937	57
1994	162000	8049	56
1995	174000	8089	60
1996	180000	8082	62
1997	192000	8086	66
1998	198000	8091	68
1999	204000	8073	70
2000	210000	8070	72
2001	222000	8055	77
2002	234000	8063	81
2003	240000	8089	82

Tabla A.2. Datos de superficie de cultivo en hectáreas para los distintos cultivos que se desarrollan en el Término Municipal de La Aldea de San Nicolás cedidos por el Instituto de Estadística del Gobierno de Canarias.

TIPO DE CULTIVO	En producción	Cultivo protegido	Cultivo no protegido	Nº de árboles
1990				
Cítrico	19		19	8561
Plátano	8		8	
Frutales	23		23	19218
Papas	26		26	
Flores y plantas ornamentales	1		1	
Forrajero	253		253	
Tomate Hidroponía			0	
Tomate en suelo	520		520	
Otras hortalizas	138		138	
Total	988	0	988	27779
1991				
Cítrico	19		19	8775
Plátano	8		8	
Frutales	30		30	14660
Papas	23		23	
Flores y plantas ornamentales	1		1	
Forrajero	227		227	
Tomate Hidroponía			0	
Tomate en suelo	530		530	
Otras hortalizas	101		101	
Total	939	0	939	23435
1992				
Cítrico	24		24	11075

TIPO DE CULTIVO	En producción	Cultivo protegido	Cultivo no protegido	Nº de árboles
Plátano	8		8	
Frutales	59		59	63960
Papas	23		23	
Flores y plantas ornamentales	1		1	
Forrajero	227		227	
Tomate Hidroponía			0	
Tomate en suelo	530		530	
Otras hortalizas	97		97	
Total	969	0	969	75035
1993				
Cítrico	28		28	8860
Plátano	3		3	
Frutales	11		11	14300
Papas	20		20	
Flores y plantas ornamentales			0	
Forrajero	12		12	
Tomate Hidroponía			0	
Tomate en suelo	550		550	
Otras hortalizas	41		41	
Total	665	0	665	23160
1994				
Cítrico	32		32	9390
Plátano	3		3	
Frutales	12		12	10220
Papas	36		36	
Flores y plantas ornamentales	2		2	
Forrajero	11		11	
Tomate Hidroponía			0	
Tomate en suelo	610		610	
Otras hortalizas	64		64	
Total	770	0	770	19610
1995				
Cítrico	34		34	12600
Plátano	4		4	
Frutales	19		19	99400
Papas	18		18	
Flores y plantas ornamentales			0	
Forrajero	16		16	
Tomate Hidroponía	0		0	
Tomate en suelo	610		610	
Otras hortalizas	69		69	
Total	770	0	770	112000
1996				
Cítrico	24		24	7500
Plátano	6		6	

TIPO DE CULTIVO	En producción	Cultivo protegido	Cultivo no protegido	Nº de árboles
Frutales	66		66	88200
Papas	12		12	
Flores y plantas ornamentales	5		5	
Forrajero	12		12	
Tomate Hidroponía	0		0	
Tomate en suelo	370		370	
Otras hortalizas	46		46	
Total	541	0	541	95700
1997				
Cítrico	3		3	
Plátano	10		10	
Frutales	39		39	
Papas	8		8	
Flores y plantas ornamentales	16		16	
Forrajero	39		39	
Tomate Hidroponía	0		0	
Tomate en suelo	370		370	
Otras hortalizas	46		46	
Total	531	0	531	0
1998				
Cítrico	4		4	5400
Plátano	40	15	25	
Frutales	23	10	13	6000
Papas	6		6	
Flores y plantas ornamentales	12		12	
Forrajero	15		15	
Tomate Hidroponía	408	408	0	
Tomate en suelo	0		0	
Otras hortalizas	45	18	27	
Total	553	451	102	11400
1999				
Cítrico	4		4	2400
Plátano	40	30	10	
Frutales	37	10	27	6000
Papas	6		6	
Flores y plantas ornamentales	12	12	0	
Forrajero	15		15	
Tomate Hidroponía	408	408	0	
Tomate en suelo	0		0	
Otras hortalizas	45	24	21	
Total	567	484	83	8400
2000				
Cítrico	4		4	2400
Plátano	55		55	
Frutales	28	12	16	8000

TIPO DE CULTIVO	En producción	Cultivo protegido	Cultivo no protegido	Nº de árboles
Papas	6		6	
Flores y plantas ornamentales	14	13	1	
Forrajero	7		7	
Tomate Hidroponía	189	189	0	
Tomate en suelo	0		0	
Otras hortalizas	40	18	22	
Total	343	232	111	10400
2001				
Cítrico	6		6	1400
Plátano	33	20	13	
Frutales	29		29	1000
Papas	4		4	
Flores y plantas ornamentales	13	13	0	
Forrajero	7		7	
Tomate Hidroponía	254	220	34	
Tomate en suelo	0		0	
Otras hortalizas	40	30	10	
Total	386	283	103	2400
2002				
Cítrico	5		5	1800
Plátano	33	20	13	
Frutales	33	15	18	15400
Papas	7		7	
Flores y plantas ornamentales	13	3	10	
Forrajero	15		15	
Tomate Hidroponía	274	274	0	
Tomate en suelo	0		0	
Otras hortalizas	56	18	38	
Total	436	330	106	17200

Tabla A.3. Datos de riego y retorno de riego desde 1990 hasta 2003 para los distintos cultivos que se desarrollan en la zona usados como datos retornos de riego en el balance hídrico. Han sido calculados a partir de la Tabla A.2. y Tabla 3.7 (Capítulo 3).

TIPO DE CULTIVO	En producción (Ha)			Gasto (m ³ /año)			Retornos de riego (30%) (m ³ /año)		
	Min.	Máx.	Media	Min.	Máx.	Media	Min.	Máx.	Media
1990									
Cítrico	19	114000	142500	171000	142500	34200	51300	42750	
Plátano	8	96000	108000	120000	108000	28800	36000	32400	
Frutales	23	92000	126500	161000	126500	27600	48300	37950	
Papas	26	182000	234000	286000	234000	54600	85800	70200	
Flores y plantas ornamentales	1	9000	10500	12000	10500	2700	3600	3150	
Forrajero	253	1771000	2150500	2530000	2150500	531300	759000	645150	
Tomate Hidroponía		0	0	0	0	0	0	0	
Tomate en suelo	520	4680000	5460000	6240000	5460000	1404000	1872000	1638000	
Otras hortalizas	138	1242000	1449000	1656000	1449000	372600	496800	434700	
Total	988	8186000	9681000	11176000	9681000	2455800	3352800	2904300	
1991									
Cítrico	19	114000	142500	171000	142500	34200	51300	42750	
Plátano	8	96000	108000	120000	108000	28800	36000	32400	
Frutales	30	120000	165000	210000	165000	36000	63000	49500	
Papas	23	161000	207000	253000	207000	48300	75900	62100	
Flores y plantas ornamentales	1	9000	10500	12000	10500	2700	3600	3150	
Forrajero	227	1589000	1929500	2270000	1929500	476700	681000	578850	
Tomate Hidroponía		0	0	0	0	0	0	0	
Tomate en suelo	530	4770000	5560000	6360000	5560000	1431000	1908000	1669500	
Otras hortalizas	101	909000	1060500	1212000	1060500	272700	363600	318150	
Total	939	7768000	9188000	10608000	9188000	2330400	3182400	2756400	
1992									
Cítrico	24	144000	180000	216000	180000	43200	64800	54000	
Plátano	8	96000	108000	120000	108000	28800	36000	32400	
Frutales	59	236000	324500	413000	324500	70800	123900	97350	
Papas	23	161000	207000	253000	207000	48300	75900	62100	
Flores y plantas ornamentales	1	9000	10500	12000	10500	2700	3600	3150	

TIPO DE CULTIVO	En producción (Ha)			Gasto (m ³ /año)			Retornos de riego (30%) (m ³ /año)			
		Min.	Máx.	Media	Min.	Máx.	Media	Min.	Máx.	Media
Forrajero	227	1589000	2270000	1929500	476700	681000	578850			
Tomate Hidroponía		0	0	0	0	0	0			
Tomate en suelo	530	4770000	6360000	5565000	1431000	1908000	1669500			
Otras hortalizas	97	873000	1164000	1018500	261900	349200	305550			
Total	969	7878000	10808000	9343000	2363400	3242400	2802900			
1993										
Cítrico	28	168000	252000	210000	50400	75600	63000			
Plátano	3	36000	45000	40500	10800	13500	12150			
Frutales	11	44000	77000	60500	13200	23100	18150			
Papas	20	140000	220000	180000	42000	66000	54000			
Flores y plantas ornamentales		0	0	0	0	0	0			
Forrajero	12	84000	120000	102000	25200	36000	30600			
Tomate Hidroponía		0	0	0	0	0	0			
Tomate en suelo	550	4950000	6600000	5775000	1485000	1980000	1732500			
Otras hortalizas	41	369000	492000	430500	110700	147600	129150			
Total	665	5791000	7806000	6798500	1737300	2341800	2039550			
1994										
Cítrico	32	192000	288000	240000	57600	86400	72000			
Plátano	3	36000	45000	40500	10800	13500	12150			
Frutales	12	48000	84000	66000	14400	25200	19800			
Papas	36	252000	396000	324000	75600	118800	97200			
Flores y plantas ornamentales	2	18000	24000	21000	5400	7200	6300			
Forrajero	11	77000	110000	93500	23100	33000	28050			
Tomate Hidroponía		0	0	0	0	0	0			
Tomate en suelo	610	5490000	7320000	6405000	1647000	2196000	1921500			
Otras hortalizas	64	576000	768000	672000	172800	230400	201600			
Total	770	6689000	9035000	7862000	2006700	2710500	2358600			
1995										
Cítrico	34	204000	306000	255000	61200	91800	76500			
Plátano	4	48000	60000	54000	14400	18000	16200			

TIPO DE CULTIVO	En producción (Ha)			Gasto (m ³ /año)			Retornos de riego (30%) (m ³ /año)		
	Min.	Máx.	Media	Min.	Máx.	Media	Min.	Máx.	Media
Frutales	19	76000	104500	22800	39900	31350			
Papas	18	126000	162000	37800	59400	48600			
Flores y plantas ornamentales	0	0	0	0	0	0			
Forrajero	16	112000	136000	33600	48000	40800			
Tomate Hidroponía	0	0	0	0	0	0			
Tomate en suelo	610	5490000	6405000	1647000	2196000	1921500			
Otras hortalizas	69	621000	724500	186300	248400	217350			
Total	770	6677000	7841000	2003100	2701500	2352300			
1996									
Cítrico	24	144000	180000	43200	64800	54000			
Plátano	6	72000	81000	21600	27000	24300			
Frutales	66	264000	363000	79200	138600	108900			
Papas	12	84000	108000	25200	39600	32400			
Flores y plantas ornamentales	5	45000	52500	13500	18000	15750			
Forrajero	12	84000	102000	25200	36000	30600			
Tomate Hidroponía	0	0	0	0	0	0			
Tomate en suelo	370	3330000	3885000	999000	1332000	1165500			
Otras hortalizas	46	414000	483000	124200	165600	144900			
Total	541	4437000	5254500	1331100	1821600	1576350			
1997									
Cítrico	3	18000	22500	5400	8100	6750			
Plátano	10	120000	135000	36000	45000	40500			
Frutales	39	156000	214500	46800	81900	64350			
Papas	8	56000	72000	16800	26400	21600			
Flores y plantas ornamentales	16	144000	168000	43200	57600	50400			
Forrajero	39	273000	331500	81900	117000	99450			
Tomate Hidroponía	0	0	0	0	0	0			
Tomate en suelo	370	3330000	3885000	999000	1332000	1165500			
Otras hortalizas	46	414000	483000	124200	165600	144900			
Total	531	4511000	5311500	1353300	1833600	1593450			

TIPO DE CULTIVO	En producción (Ha)		Gasto (m ³ /año)			Retornos de riego (30%) (m ³ /año)		
	Min.	Máx.	Media	Min.	Máx.	Media	Min.	Máx.
1998								
Cítrico	4	24000	36000	7200	10800	9000		
Plátano	40	480000	600000	144000	180000	162000		
Frutales	23	92000	126500	27600	48300	37950		
Papas	6	42000	66000	12600	19800	16200		
Flores y plantas ornamentales	12	108000	144000	32400	43200	37800		
Forrajero	15	105000	150000	31500	45000	38250		
Tomate en suelo	408	3672000	4896000	1101600	1468800	1285200		
Tomate en hidroponía	0	0	0	0	0	0		
Otras hortalizas	45	405000	540000	121500	162000	141750		
Total	553	4928000	6593000	1478400	1977900	1728150		
1999								
Cítrico	4	24000	36000	7200	10800	9000		
Plátano	40	480000	600000	144000	180000	162000		
Frutales	37	148000	259000	44400	77700	61050		
Papas	6	42000	66000	12600	19800	16200		
Flores y plantas ornamentales	12	108000	144000	32400	43200	37800		
Forrajero	15	105000	150000	31500	45000	38250		
Tomate en suelo	408	3672000	4896000	1101600	1468800	1285200		
Tomate en hidroponía	0	0	0	0	0	0		
Otras hortalizas	45	405000	540000	121500	162000	141750		
Total	567	4984000	6691000	1495200	2007300	1751250		
2000								
Cítrico	4	24000	36000	7200	10800	9000		
Plátano	55	660000	825000	198000	247500	222750		
Frutales	28	112000	196000	33600	58800	46200		
Papas	6	42000	66000	12600	19800	16200		
Flores y plantas ornamentales	14	126000	168000	37800	50400	44100		
Forrajero	7	49000	70000	14700	21000	17850		
Tomate en suelo	162	1458000	1944000	437400	583200	510300		

TIPO DE CULTIVO	En producción (Ha)			Gasto (m ³ /año)			Retornos de riego (30%) (m ³ /año)		
	Min.	Máx.	Media	Min.	Máx.	Media	Min.	Máx.	Media
Tomate en hidroponía	27	243000	324000	405000	121500	97200			
Otras hortalizas	40	360000	420000	480000	144000	126000			
Total	343	3074000	3632000	4190000	1257000	1089600			
2001									
Cítrico	6	36000	45000	54000	16200	13500			
Plátano	33	396000	445500	495000	148500	133650			
Frutales	29	116000	159500	203000	60900	47850			
Papas	4	28000	36000	44000	13200	10800			
Flores y plantas ornamentales	13	117000	136500	156000	46800	40950			
Forrajero	7	49000	59500	70000	21000	17850			
Tomate en suelo	212	1908000	2226000	2544000	763200	667800			
Tomate en hidroponía	42	378000	504000	630000	189000	151200			
Otras hortalizas	40	360000	420000	480000	144000	126000			
Total	386	3388000	4032000	4676000	1402800	1209600			
2002									
Cítrico	5	30000	37500	45000	13500	11250			
Plátano	33	396000	445500	495000	148500	133650			
Frutales	33	132000	181500	231000	69300	54450			
Papas	7	49000	63000	77000	23100	18900			
Flores y plantas ornamentales	13	117000	136500	156000	46800	40950			
Forrajero	15	105000	127500	150000	45000	38250			
Tomate en suelo	219	1971000	2299500	2628000	788400	689850			
Tomate en hidroponía	55	495000	660000	825000	247500	198000			
Otras hortalizas	56	504000	588000	672000	201600	176400			
Total	436	3799000	4539000	5279000	1583700	1361700			
2003									
Cítrico	4	24000	30000	36000	10800	9000			
Plátano	33	396000	445500	495000	148500	133650			
Frutales	43	172000	236500	301000	90300	70950			
Papas	4	28000	36000	44000	13200	10800			

TIPO DE CULTIVO	En producción (Ha)	Gasto (m ³ /año)			Retornos de riego (30%) (m ³ /año)		
		Min.	Máx.	Media	Min.	Máx.	Media
Flores y plantas ornamentales	17	153000	204000	178500	45900	61200	53550
Forrajero	15	105000	150000	127500	31500	45000	38250
Tomate en suelo	300	2700000	3600000	3150000	810000	1080000	945000
Tomate en hidroponía	70	630000	1050000	840000	189000	315000	252000
Otras hortalizas	62	558000	744000	651000	167400	223200	195300
Total	548	4766000	6624000	5695000	1429800	1987200	1708500

ANEJO 2. CÁLCULO DEL NÚMERO DE CURVA

A.2.1. INTRODUCCIÓN

En la realización del balance hídrico del acuífero se han evaluado los distintos términos de entrada y salida de agua. Los términos de entrada principales son la precipitación y los retornos de riego aunque también existen otras entradas de caudal de menor magnitud como la producida por la cabecera del barranco, las pérdidas en la red de abastecimiento y la infiltración por escorrentía superficial. Las salidas de agua del sistema se producen exclusivamente a través de las extracciones en los pozos y la descarga al mar.

Para el desarrollo de dicho balance se ha hecho necesario establecer el umbral de escorrentía, cuyo cálculo se presenta en este trabajo. El umbral de escorrentía de la cuenca es el valor de lluvia a partir del cual se produce escorrentía, por lo que es necesario para el cálculo de la recarga.

El umbral de escorrentía de la cuenca de estudio, se ha obtenido a partir del cálculo del número de curva mediante la generación automática del número de curvas con un Sistema de Información Geográfica. El número de curva es el parámetro hidrológico que utiliza el método del US Soil Conservation Service para el cálculo de la escorrentía (McCuen, 1982), el valor de este parámetro depende del uso del suelo, las características hidrológicas, la pendiente del terreno y el tipo de suelo. La metodología seguida para su cálculo ha sido la que se muestra en Ferrer *et al.* (1995).

Los Sistema de Información Geográfica usados ha sido el Idrisi32 y el Arcview 3.2. El mapa de pendientes se ha obtenido a partir del Modelo Digital del Terreno, el mapa de tipos de suelos y el mapa de usos de suelo han sido cedidos por el Exmo. Cabildo Insular de Gran Canaria.

A.2.2. METODOLOGÍA

La Figura A.1 muestra un diagrama de flujo con la metodología seguida para el cálculo de la recarga por precipitación, la ETR y la escorrentía.

Desde el comienzo de la lluvia hasta que se inicia la circulación hídrica, el suelo absorbe la lluvia hasta un límite P_0 , denominado umbral de escorrentía. De las diferentes metodologías para cuantificar el umbral de escorrentía, se ha optado por la del U. S. Soil Conservation Service (SCS) (McCuen, 1982) adaptada a España por Témez (1978, 1991). Ésta contempla que el parámetro P_0 es función de cinco factores básicos: el uso del suelo, el tipo de práctica de cultivo, la pendiente del terreno, las características hidrológicas del suelo y las condiciones de humedad antecedente.

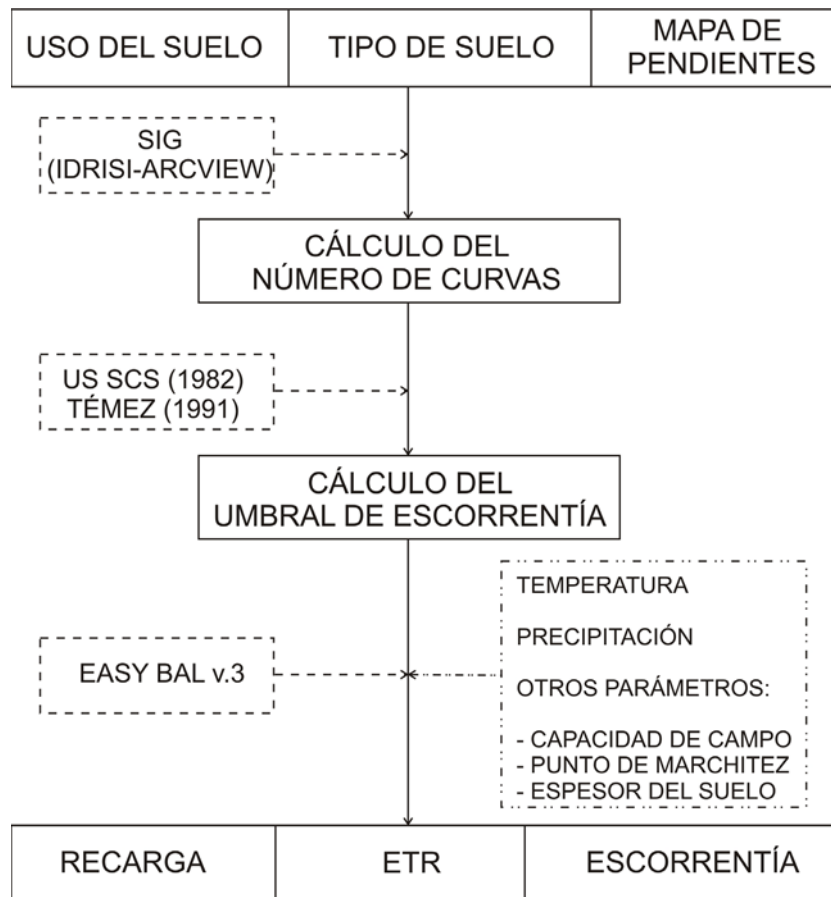


Figura A.1. Esquema metodológico.

Según el método propuesto, las variables se clasifican en las categorías que propone Témez (1991). A cada una de las categorías se les asigna un número primo (Tabla A.4). Los mapas de entrada se reclasifican con estos nuevos valores y operando entre sí mediante álgebra de mapas. Dada la singularidad de los números primos, el producto de ellos dará siempre un número diferente (Tabla A.5).

De este modo, acorde a la metodología seguida Ferrer *et al.* (1995), conociendo el resultado del producto se puede saber cuál es la combinación de variables (uso del suelo, tipo de suelo y pendiente) de partida y, por lo tanto, asignarle un número de curva (Tabla A.6) relacionado con el umbral de escorrentía correspondiente mediante la expresión (McCuen, 1982):

$$Po = 0.2 \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right) \quad (1)$$

Donde:

Po = escorrentía umbral (mm)

CN = número de curva

En el presente trabajo, la superposición de los distintos mapas se realizó de forma automática, mediante los Sistemas de Información Geográfica ArcView e IDRISI. En particular, el álgebra de mapas se realizó con este último SIG.

A.2.3. RESULTADOS

Según las categorías de Témez (1991), en la zona de estudio, la pendiente puede ser menor o mayor/igual a 3%; los tipos de suelo presentan cuatro clases en función de su facilidad de drenaje y los usos del suelo se dividen en 12 categorías de las que aparecen únicamente 7 en la zona de estudio.

La falta de información precisa ha llevado a asumir dos hipótesis: la primera, un estado de humedad antecedente del suelo de tipo medio, y la segunda, una explotación del terreno con cultivos que siguen la línea de máxima pendiente (la más habitual en la zona).

El mapa de pendientes para discriminar aquellas mayores o menores del 3% fue realizado con el programa IDRISI a partir del Modelo Digital del Terreno que se desarrolló aplicando un método de interpolación automática (krigreado) a partir de las coordenadas XYZ obtenidas sobre la base de la cartografía 1:5.000 de GRAFCAN (1996). En la zona de estudio el cauce discurre por un valle abierto de fondo plano rodeado por fuertes escarpes, por lo que las pendientes menores están localizadas en la zona ocupada por el aluvial en la parte central del barranco (Figura A.2).

Otra variable necesaria para determinar el número de curva es el mapa de tipos de suelo. Los datos fueron suministrados por el Excmo. Cabildo Insular de Gran Canaria según la clasificación de la FAO (1974) (Figura A.3) y se ha reclasificado en tipos de suelo A, B, C y D (Figura A.4) que establece el Soil Conservation Service (SCS). En los suelos de tipo A, el agua se infiltra rápidamente, aun cuando están muy húmedos y equivalen al suelo tipo Entisol. Los suelos de tipo B, tienen una capacidad de infiltración moderada cuando están húmedos y equivalen a los suelo de tipo Inceptisol. Los de tipo C presentan una infiltración lenta cuando están muy húmedos (suelos de tipo Alfisol). Y por último los suelos de tipo D permiten una infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Equivalen tipo Vertisol.

Los datos de usos del suelo (Figura A.5) también fueron suministrados por el Excmo. Cabildo Insular de Gran Canaria generándose, a partir de este, el mapa de usos del suelo con la leyenda del U.S. Soil Conservation Service (Figura A.6).

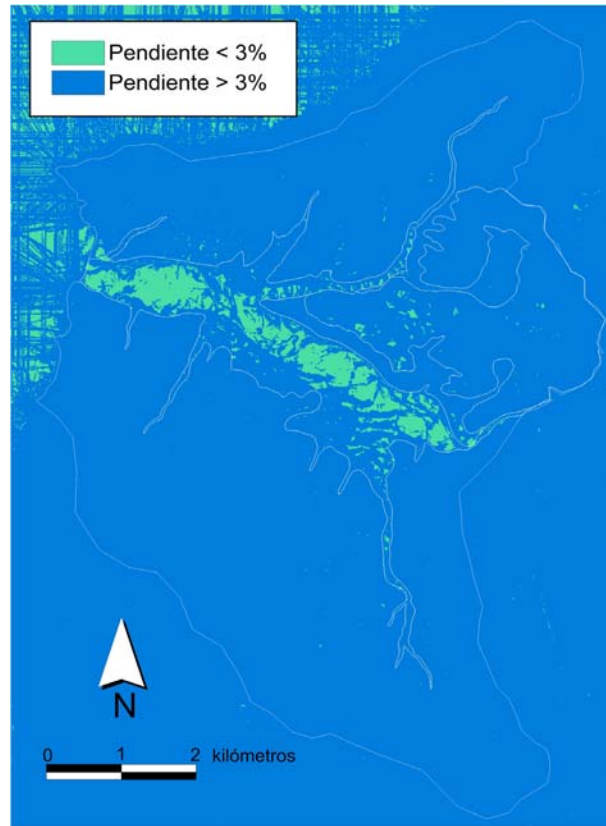


Figura A.2. Mapa de pendiente del terreno

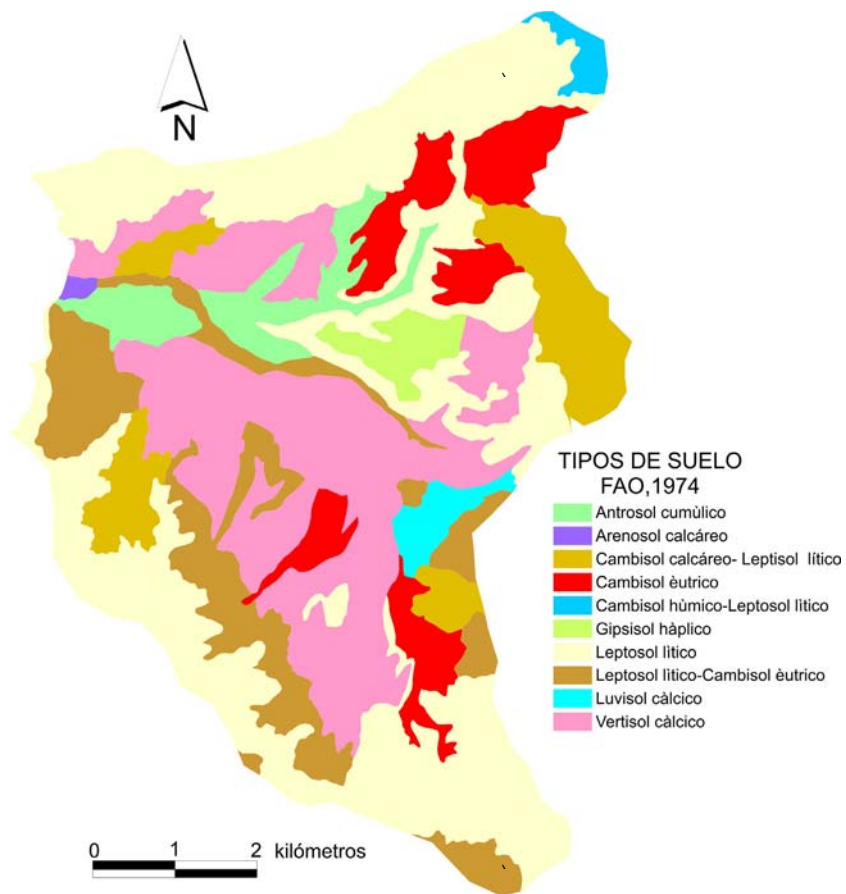


Figura A.3. Mapas de tipos de suelo según la clasificación de la FAO (1974)

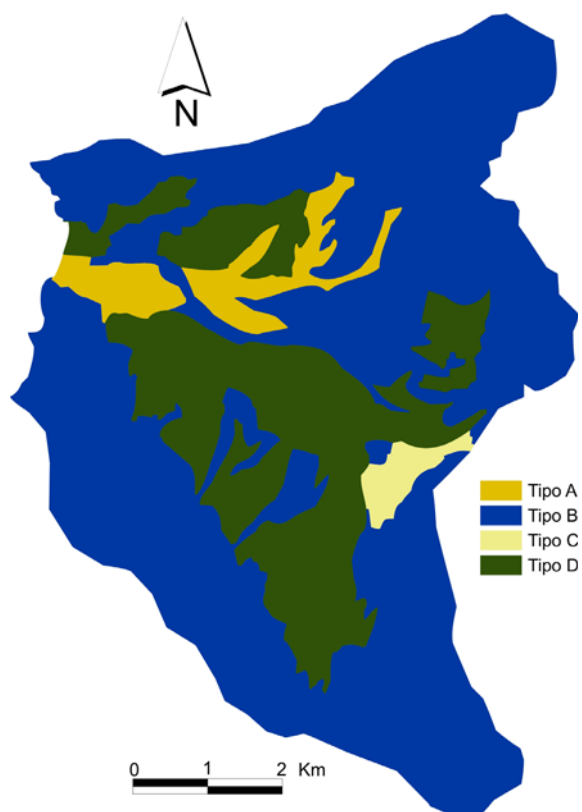


Figura A.4. Mapa de tipos de suelo según la clasificación del Soil Conservation Service (SCS).



Figura A.5. Mapa de usos del suelo obtenido a partir de la información suministrada por el Exmo. Cabildo Insular de Gran Canaria.

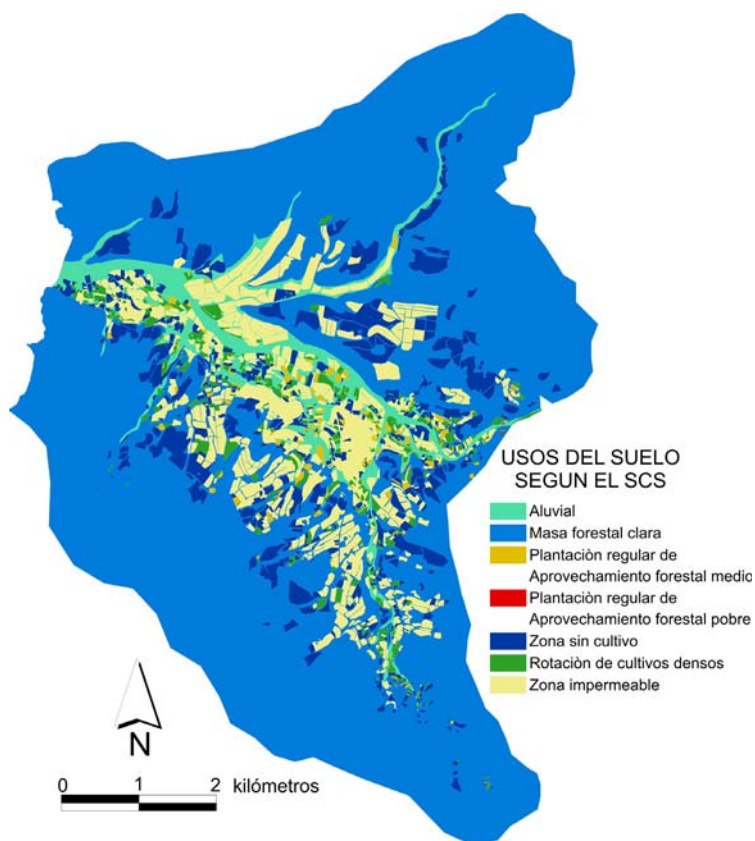


Figura A.6. Mapa de los usos del suelo según la clasificación del Soil Conservation Service (SCS).

Cada clase de las variables pendiente, usos y tipos de suelo, se reclasificó con una tabla de números primos (Tabla A.4) y se multiplicaron las tres capas (Tabla A.5 y Figura A.7). El mapa resultante se reclasificó según la correspondencia entre el producto de números primos y el valor del número de curva asociado, comparando la Tabla A.5 y Tabla A.6 y originando el mapa del número de curva que se muestra en la Figura A.8.

Tabla A.4. Números primos asignados a las diversas clases de pendientes, tipos de suelo y usos del suelo.

CARACTERÍSTICA	NÚMERO PRIMO
Pendiente < 3 %	1
Pendiente >= 3 %	2
Suelo tipo A	3
Suelo tipo B	5
Suelo tipo C	7
Suelo tipo D	11
Barbecho	13
Cultivo en hilera	17
Cereales de invierno	19
Rotación de cultivos pobres	23
Rotación de cultivos densos	29
Pradera pobre	31
Pradera media	37

CARACTERÍSTICA	NÚMERO PRIMO
Pradera buena	41
Pradera muy buena	43
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	47
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	53
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	59
Masa forestal muy clara	61
Masa forestal clara	67
Masa forestal media	71
Masa forestal espesa	73
Masa forestal muy espesa	79
Rocas permeables	83
Rocas impermeables	89

Tabla A.5. Valores resultantes del producto de números primos.

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE	A	B	C	D
Barbecho	≥ 3	78	130	182	286
Barbecho	< 3	39	65	91	143
Cultivo en hilera	≥ 3	102	170	238	374
Cultivo en hilera	< 3	51	85	119	187
Cereales de invierno	≥ 3	114	190	266	418
Cereales de invierno	< 3	57	95	133	209
Rotación de cultivos pobres	≥ 3	138	230	322	506
Rotación de cultivos pobres	< 3	69	115	161	253
Rotación de cultivos densos	≥ 3	174	290	406	638
Rotación de cultivos densos	< 3	87	145	203	319
Pradera pobre	≥ 3	186	310	434	682
Pradera media	≥ 3	222	370	518	814
Pradera buena	≥ 3	246	410	574	902
Pradera muy buena	≥ 3	258	430	602	946
Pradera pobre	< 3	93	155	217	341
Pradera media	< 3	111	185	259	407
Pradera buena	< 3	123	205	287	451
Pradera muy buena	< 3	129	215	301	473
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	≥ 3	282	470	658	1034
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	≥ 3	318	530	742	1166
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	≥ 3	354	590	826	1298
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	< 3	141	235	329	517
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	< 3	159	265	371	583
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	< 3	177	295	413	649
Masa forestal muy clara	≥ 3	366	610	854	1342
Masa forestal clara	≥ 3	402	670	938	1474
Masa forestal media	≥ 3	426	710	994	1562
Masa forestal espesa	≥ 3	438	730	1022	1606
Masa forestal muy espesa	≥ 3	474	790	1106	1738

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE	A	B	C	D
Masa forestal muy clara	<3	183	305	427	671
Masa forestal clara	<3	201	335	469	737
Masa forestal media	<3	213	355	497	781
Masa forestal espesa	<3	219	365	511	803
Masa forestal muy espesa	<3	237	395	553	869
Rocas permeables	>=3	498	830	1162	1826
Rocas permeables	<3	249	415	581	913
Rocas impermeables	>=3	534	890	1246	1958
Rocas impermeables	<3	267	445	623	979

Tabla A.6. *Número de curva*

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE	A	B	C	D
Barbecho	>=3	77	68	89	93
Barbecho	<3	74	82	86	89
Cultivo en hilera	>=3	71	78	82	86
Cultivo en hilera	<3	69	79	86	89
Cereales de invierno	>=3	67	76	82	86
Cereales de invierno	<3	64	73	78	82
Rotación de cultivos pobres	>=3	63	75	83	86
Rotación de cultivos pobres	<3	61	73	81	83
Rotación de cultivos densos	>=3	59	70	78	81
Rotación de cultivos densos	<3	66	77	85	89
Pradera pobre	>=3	64	75	82	86
Pradera media	>=3	63	73	79	83
Pradera buena	>=3	58	71	81	85
Pradera muy buena	>=3	54	69	78	82
Pradera pobre	<3	52	67	76	79
Pradera media	<3	68	78	86	89
Pradera buena	<3	49	69	78	85
Pradera muy buena	<3	42	60	74	79
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	>=3	39	55	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	>=3	46	67	81	88
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	>=3	39	59	75	83
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	<3	29	48	69	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	<3	17	33	67	76
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	<3	45	66	77	83
Masa forestal muy clara	>=3	39	60	73	78
Masa forestal clara	>=3	33	54	69	77
Masa forestal media	>=3	40	60	73	78
Masa forestal espesa	>=3	35	54	69	77
Masa forestal muy espesa	>=3	25	50	67	76
Masa forestal muy clara	<3	56	75	86	91
Masa forestal clara	<3	46	68	78	83
Masa forestal media	<3	40	60	69	76

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE	A	B	C	D
Masa forestal espesa	<3	36	52	62	69
Masa forestal muy espesa	<3	29	44	54	60
Rocas permeables	>=3	94	94	94	94
Rocas permeables	<3	91	91	91	91
Rocas impermeables	>=3	96	96	96	96
Rocas impermeables	<3	93	93	93	93

El umbral de escorrentía calculado oscila entre 2 y 94 mm. Los valores menores (≤ 5 mm o $NC \geq 90$) se localizan en las áreas urbanizadas y con cultivo bajo invernadero, zonas impermeables donde la infiltración es prácticamente nula. Los valores de Po más elevados (≥ 60 mm o $NC \leq 46$) se localizan en las zonas de cultivo (sin invernadero) donde hay una elevada capacidad de infiltración, sobre todo los localizados en la zona del aluvial donde las pendientes son menores.

El valor de Po en los Basaltos Miocenos es de 24 mm, un umbral de escorrentía medio-bajo que ocupa un 60.5% de toda la superficie de estudio en las partes altas de la zona.

Para introducir los resultados de Po en el programa utilizado para calcular la recarga (Easy-Bal, v 3.0; Universidad Politécnica de Cataluña, 1998) la zona se ha dividido en tres áreas según la distribución de las isoyetas (Figura A.8) y se ha calculado el número de curva medio para cada área según la expresión dada (1) (Tabla A.7). El umbral de escorrentía resultante varía de 15 a 20 mm con un valor medio de 17 mm. Estos valores indican un terreno con una media-baja capacidad de infiltración.

Tabla A.7. Valores del número de curva y umbral de Escorrentía obtenidos para toda la superficie de estudio y las distintas áreas.

	Número de curva	Umbral de Escorrentía (mm)
AREA 1	77	15.2
AREA 2	76	16
AREA 3	72	20
MEDIA	75	17

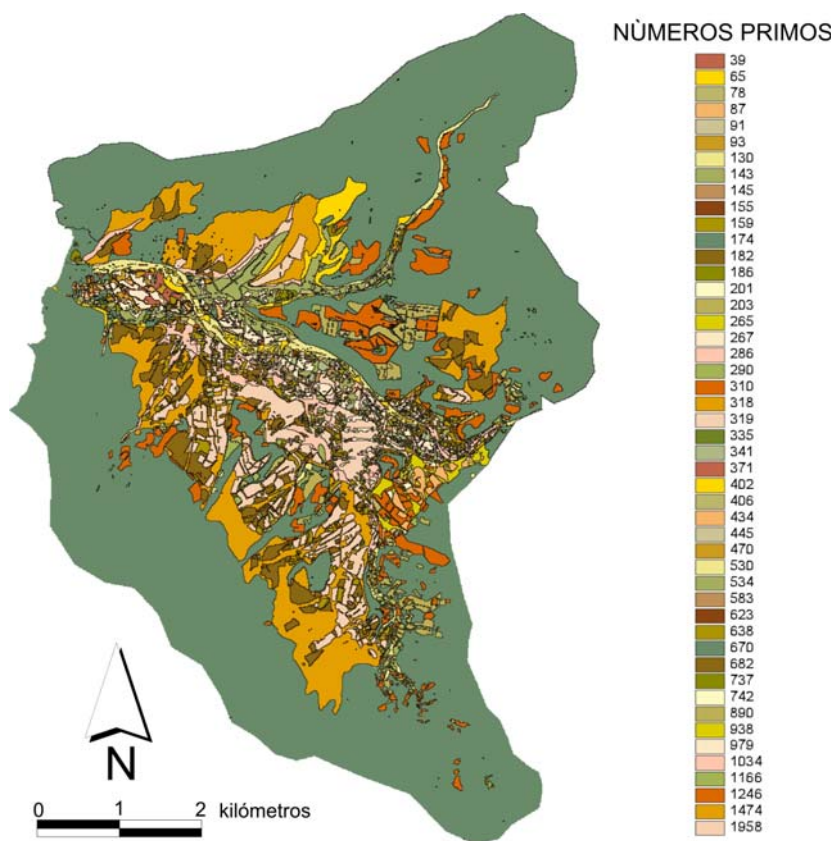


Figura A.7. Mapa de Números primos obtenidos.

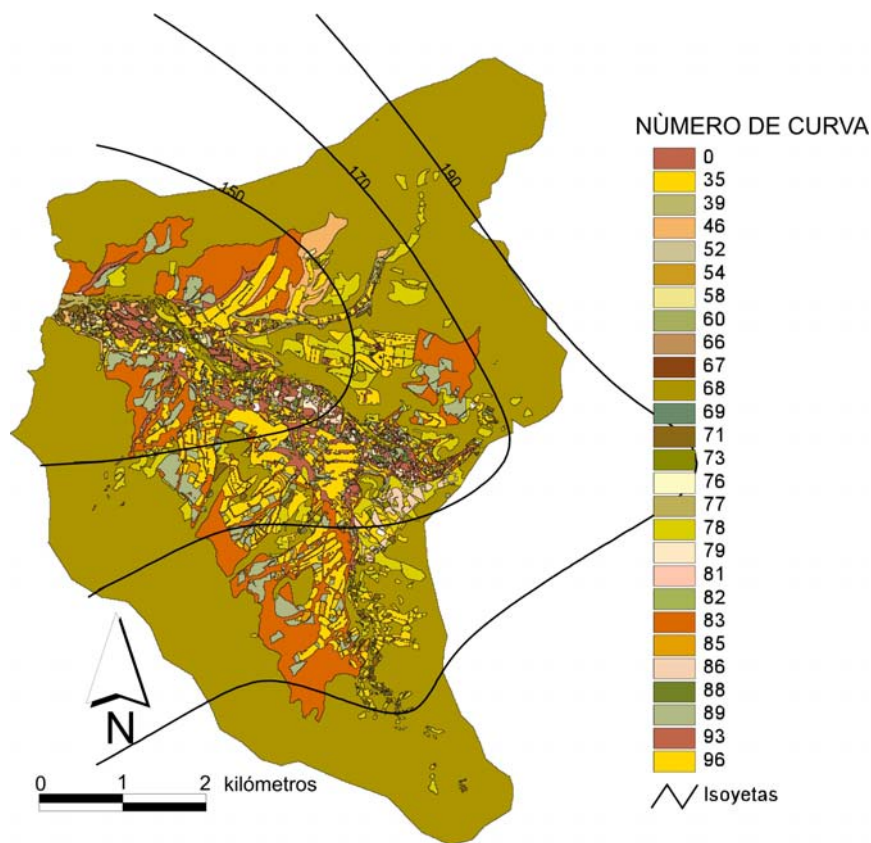


Figura A.8. Mapa de número de curva con la distribución de las isoyetas.

A.2.4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El umbral de escorrentía medio para la zona de estudio es de 17 mm, valor que apunta a un terreno con una media-baja capacidad de infiltración y una alta capacidad de escorrentía. Las principales áreas productoras de escorrentía son las zonas impermeables agrícolas y urbanas y las zonas con suelos de tipo D correspondientes a los Vertisoles. Hacia el aluvial, donde las pendientes disminuyen, hay más suelo cultivado (sin invernadero) y el terreno adquiere mayor capacidad de infiltración, el umbral de escorrentía se eleva.

En estudios anteriores (SPA-15, 1975) se estimó el valor de número de curva en 80 para la zona a partir de estudios de infiltración lo que supone un umbral de escorrentía de 12 mm, valor un poco más bajo que el valor medio obtenido para toda el área de estudio en este estudio. Sin embargo, hay que destacar que el cálculo del umbral de escorrentía teniendo en cuenta su distribución espacial permite hacer una aproximación mucho mejor a los valores reales que deben utilizarse posteriormente en los cálculos del balance.

Para los valores de umbral de escorrentía obtenidos en este trabajo los datos de recarga calculados varían entre el 10% y el 17% de la precipitación, obteniéndose valores máximos de recarga del 31% dependiendo de la pluviometría. En trabajos previos, la recarga se calculó mediante balance de cloruro, variando entre el 15% y el 18% de la precipitación, (Alcalá, 2005) y extrapolando el método del número de curvas calibrado a partir de mediciones de infiltración en el suelo, en esta caso la recarga variaba entre 17% y 28% de la precipitación (SPA-15, 1975). Los valores de recarga obtenidos en este trabajo coinciden con estas evaluaciones previas, lo que los dota de mayor consistencia, y ofreciendo, a su vez, un mayor detalle de su evolución temporal.

ANEJO 3. DATOS DE RECARGA

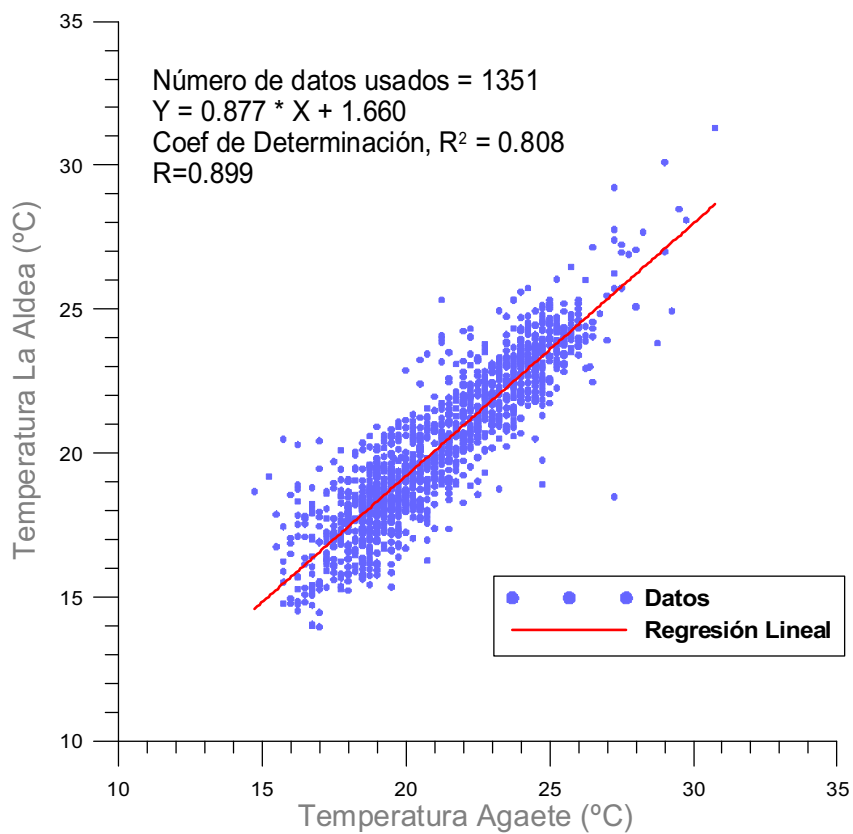


Figura A.9. Relación entre los datos de temperatura de la estación meteorológica de Agaete (619) y la estación Automática de La Aldea para introducir los datos de temperatura en el Easy bal para el cálculo de la recarga.

Tabla A.8. Datos de precipitación, recarga, ETR y escorrentia anuales estimados por el Easy_bal v3.0.

Año	mm/año				hm3/año			
	Precipitación	Recarga	ETR	Escorrentía	Precipitación	Recarga	ETR	Escorrentía
1980	173.97	20.63	107.53	6.35	7.77	0.95	4.73	0.30
1981	83.57	10.23	63.37	0.09	3.74	0.49	2.80	0.00
1982	156.63	22.03	91.67	5.19	7.15	1.08	4.04	0.25
1983	126.40	17.87	72.67	0.00	5.73	0.86	3.23	0.00
1984	296.67	36.97	139.20	4.33	13.28	1.71	6.14	0.19
1985	115.40	16.37	80.93	0.63	5.02	0.74	3.47	0.03
1986	101.57	18.30	77.57	1.14	4.41	0.79	3.39	0.05
1987	189.17	29.13	118.43	1.86	8.67	1.41	5.24	0.08
1988	207.30	54.77	112.00	2.52	9.45	2.57	5.02	0.12
1989	263.33	30.17	133.73	3.07	11.81	1.38	5.96	0.14
1990	138.80	25.60	97.57	0.00	6.15	1.14	4.26	0.00
1991	221.47	28.07	75.53	0.69	9.82	1.28	3.32	0.03
1992	88.43	10.97	63.07	0.00	3.96	0.51	2.84	0.00
1993	238.77	30.53	137.43	4.68	10.68	1.44	6.11	0.21
1994	100.03	13.23	85.30	0.06	4.46	0.60	3.80	0.00
1995	118.70	12.20	62.37	0.00	5.29	0.58	2.78	0.00
1996	299.83	58.97	150.50	12.17	13.43	2.68	6.67	0.55
1997	75.53	4.73	68.77	0.05	3.38	0.22	3.11	0.00
1998	123.20	21.87	67.13	3.21	5.63	1.03	2.98	0.15
1999	110.20	12.60	83.87	0.00	4.93	0.60	3.69	0.00
2000	91.70	5.73	75.27	0.38	4.15	0.24	3.43	0.01
2001	150.37	19.30	78.97	0.58	6.72	0.89	3.46	0.03
2002	185.83	19.80	90.77	0.00	8.34	0.93	4.06	0.00
2003	90.70	6.27	83.63	0.01	3.95	0.27	3.64	0.00
2004	219.77	22.40	95.93	5.38	9.66	1.01	4.25	0.24
2005	221.20	54.50	130.20	2.29	9.88	2.44	5.79	0.10
Promedio	154.66	21.67	90.39	1.84	6.90	0.99	4.01	0.08

ANEJO 4. DATOS DE ENTRADA AL MODELO

Tabla A.9. Datos de recargas introducidos en el Visual Modflow para el modelo en régimen transitorio.

Inicio	Fin	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9	Zona 10	Zona 11	Zona 12
0	30	0	0	0	79.45	369.74	0	0	369.74	369.74	369.74	50	50
30	60	0	0	0	79.45	369.74	0	0	369.74	369.74	369.74	50	50
60	90	10.8	23.3	34.2	79.45	369.74	16.33	30.46	380.54	393.04	403.94	84.2	73.3
90	120	0	0	0	86.07	375.98	0	0.01	375.98	375.98	375.98	50	50
120	150	0	2.4	5	86.07	375.98	0.17	3.05	375.98	378.38	380.98	55	52.4
150	180	0	0	0	86.07	375.98	0	0	375.98	375.98	375.98	50	50
180	210	0	0	0	86.07	375.98	0	0	375.98	375.98	375.98	50	50
210	240	0	0	0	86.07	375.98	0	0	375.98	375.98	375.98	50	50
240	270	0	0	0	86.07	0	0	0	0	0	0	50	50
270	300	0	0	0	86.07	0	0	0	0	0	0	50	50
300	330	0	0	0	86.07	375.98	0	0	375.98	375.98	375.98	50	50
330	360	0	0	0	86.07	375.98	0	0	375.98	375.98	375.98	50	50
360	390	0	0	0	86.07	375.98	0	0	375.98	375.98	375.98	50	50
390	420	0	0	0	86.07	375.98	0	0	375.98	375.98	375.98	50	50
420	450	11	3.3	11.2	86.07	375.98	11.92	4.45	386.98	379.28	387.18	61.2	53.3
450	480	0	0	0	89.38	273.58	0	0.26	273.58	273.58	273.58	50	50
480	510	0	4.5	0	89.38	273.58	0	4.5	273.58	278.08	273.58	50	54.5
510	540	11.2	8.2	13.9	89.38	273.58	11.42	9.98	284.78	281.78	287.48	63.9	58.2
540	570	0	0	0	89.38	273.58	0	0	273.58	273.58	273.58	50	50
570	600	0	0	0	89.38	273.58	0	0	273.58	273.58	273.58	50	50
600	630	0	0	0	89.38	0	0	0	0	0	0	50	50
630	660	0	0	0	89.38	0	0	0	0	0	0	50	50
660	690	0	0	0	89.38	273.58	0	0	273.58	273.58	273.58	50	50
690	720	0	0	0	89.38	273.58	0	0	273.58	273.58	273.58	50	50
720	750	1	5.3	22.3	89.38	273.58	4.03	9.07	274.58	278.88	295.88	72.3	55.3
750	780	0	4.9	6.7	89.38	273.58	0	4.9	273.58	278.48	280.28	56.7	54.9
780	810	2.2	4	7.5	89.38	273.58	2.49	4.35	275.78	277.58	281.08	57.5	54
810	840	1.8	5.5	8.6	89.38	316.38	1.8	5.84	318.18	321.88	324.98	58.6	55.5
840	870	0	0	0	89.38	316.38	0	0	316.38	316.38	316.38	50	50
870	900	4.5	8.5	8.3	89.38	316.38	4.5	8.51	320.88	324.88	324.68	58.3	58.5
900	930	0	0	0	89.38	316.38	0	0	316.38	316.38	316.38	50	50
930	960	0	0	0	89.38	316.38	0	0	316.38	316.38	316.38	50	50
960	990	0	0	0	89.38	0	0	0	0	0	0	50	50
990	1020	0	0	0	89.38	0	0	0	0	0	0	50	50
1020	1050	0	0	0	89.38	316.38	0	0	316.38	316.38	316.38	50	50
1050	1080	0	0	0	89.38	316.38	0	0	316.38	316.38	316.38	50	50
1080	1110	0.7	1.7	0	89.38	316.38	1.21	1.98	317.08	318.08	316.38	50	51.7
1110	1140	0	0	0	89.38	316.38	0	0	316.38	316.38	316.38	50	50
1140	1170	0	0	0	89.38	316.38	0	0	316.38	316.38	316.38	50	50
1170	1200	0	0	0	96	315.53	0	0	315.53	315.53	315.53	50	50
1200	1230	0	0	0	96	315.53	0	0	315.53	315.53	315.53	50	50
1230	1260	0	0	0	96	315.53	0	0	315.53	315.53	315.53	50	50
1260	1290	0	0	0	96	315.53	0	0	315.53	315.53	315.53	50	50
1290	1320	0	0	0	96	315.53	0	0	315.53	315.53	315.53	50	50
1320	1350	0	0	0	96	0	0	0	0	0	0	50	50
1350	1380	0	0	0	96	0	0	0	0	0	0	50	50
1380	1410	0	0	0	96	315.53	0	0	315.53	315.53	315.53	50	50
1410	1440	0	0	0	96	315.53	0.07	0	315.53	315.53	315.53	50	50

Inicio	Fin	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9	Zona 10	Zona 11	Zona 12
1440	1470	0	0	0	96	315.53	0	0	315.53	315.53	315.53	50	50
1470	1500	1.6	2.6	6.6	96	315.53	2.49	3.4	317.13	318.13	322.13	56.6	52.6
1500	1530	5	7.4	13.5	96	315.53	6.41	9.67	320.53	322.93	329.03	63.5	57.4
1530	1560	11.2	20.8	22.1	99.31	211.45	11.33	21.81	222.65	232.25	233.55	72.1	70.8
1560	1590	2.1	3.1	7.4	99.31	211.45	2.89	3.91	213.55	214.55	218.85	57.4	53.1
1590	1620	6.9	24.4	28.2	99.31	211.45	10.1	26.92	218.35	235.85	239.65	78.2	74.4
1620	1650	0	0	0	99.31	211.45	0	0	211.45	211.45	211.45	50	50
1650	1680	0	0	0	99.31	211.45	0	0	211.45	211.45	211.45	50	50
1680	1710	0	0	0	99.31	0	0	0	0	0	0	50	50
1710	1740	0	0	0	99.31	0	0	0	0	0	0	50	50
1740	1770	0	0	0	99.31	211.45	0	0	211.45	211.45	211.45	50	50
1770	1800	2.8	3.5	10.7	99.31	211.45	3.06	3.92	214.25	214.95	222.15	60.7	53.5
1800	1830	0	0	0	99.31	211.45	0	0	211.45	211.45	211.45	50	50
1830	1860	0	0	0	99.31	211.45	0	0	211.45	211.45	211.45	50	50
1860	1890	13.4	13.2	7.2	99.31	211.45	13.51	13.62	224.85	224.65	218.65	57.2	63.2
1890	1920	3.1	3.7	7.4	105.93	213.74	3.1	3.7	216.84	217.44	221.14	57.4	53.7
1920	1950	0	0	0	105.93	213.74	0	0	213.74	213.74	213.74	50	50
1950	1980	0	0	0	105.93	213.74	0	0	213.74	213.74	213.74	50	50
1980	2010	0	0	0	105.93	213.74	0	0	213.74	213.74	213.74	50	50
2010	2040	0	0	0	105.93	213.74	0	0	213.74	213.74	213.74	50	50
2040	2070	0	0	0	105.93	0	0	0	0	0	0	50	50
2070	2100	0	0	0	105.93	0	0	0	0	0	0	50	50
2100	2130	0	0	0	105.93	213.74	0	0	213.74	213.74	213.74	50	50
2130	2160	0	0	0	105.93	213.74	0	0	213.74	213.74	213.74	50	50
2160	2190	0	0	0	105.93	213.74	0	0	213.74	213.74	213.74	50	50
2190	2220	0	0	0	105.93	213.74	0	0	213.74	213.74	213.74	50	50
2220	2250	0	0	0	105.93	213.74	0.61	0.52	213.74	213.74	213.74	50	50
2250	2280	0	12.5	17.4	109.24	231.81	0	12.5	231.81	244.31	249.21	67.4	62.5
2280	2310	0.3	15.4	17.6	109.24	231.81	1.18	16.69	232.11	247.21	249.41	67.6	65.4
2310	2340	0	0	0	109.24	231.81	0	0	231.81	231.81	231.81	50	50
2340	2370	0	0	0	109.24	231.81	0	0	231.81	231.81	231.81	50	50
2370	2400	0	0	0	109.24	231.81	0	0	231.81	231.81	231.81	50	50
2400	2430	0	0	0	109.24	0	0	0	0	0	0	50	50
2430	2460	0	0	0	109.24	0	0	0	0	0	0	50	50
2460	2490	0	0	0	109.24	231.81	0	0	231.81	231.81	231.81	50	50
2490	2520	0	0	0	109.24	231.81	0	0	231.81	231.81	231.81	50	50
2520	2550	0	0	0	109.24	231.81	0	0	231.81	231.81	231.81	50	50
2550	2580	0	0	0	109.24	231.81	0	0	231.81	231.81	231.81	50	50
2580	2610	2.3	0	0	109.24	231.81	2.8	0.07	234.11	231.81	231.81	50	50
2610	2640	9.2	1.6	12.4	112.55	234.91	9.2	2.19	244.11	236.51	247.31	62.4	51.6
2640	2670	0	0	0	112.55	234.91	0	0	234.91	234.91	234.91	50	50
2670	2700	0	0	0	112.55	234.91	0	0	234.91	234.91	234.91	50	50
2700	2730	0	0	0	112.55	234.91	0	0	234.91	234.91	234.91	50	50
2730	2760	0	0	0	112.55	234.91	0	0	234.91	234.91	234.91	50	50
2760	2790	0	0	0	112.55	0	0	0	0	0	0	50	50
2790	2820	0	0	0	112.55	0	0	0	0	0	0	50	50
2820	2850	0	0	0	112.55	234.91	0	0	234.91	234.91	234.91	50	50
2850	2880	0	0	0	112.55	234.91	0	0	234.91	234.91	234.91	50	50

Tabla A.10. Pozos de observación en el modelo de flujo en régimen estacionario.

EXPEDIENTE	UTM-X	UTM-Y	Screen	Z _{pozo}	Tiempo	Z _{nivel piezométrico}
0201-O1	419799.8	3097791.6	1.0	9.2	0.0	0.6
0203-O1	419721.0	3097389.0	1.0	7.0	0.0	2.7
0204-O1	419542.0	3097352.0	1.0	8.0	0.0	2.0
0205-O1	419627.0	3097327.0	1.0	8.0	0.0	2.8
0206-O1	419815.0	3097305.0	1.0	8.0	0.0	0.0
0209-O1	419987.5	3097236.2	1.0	13.6	0.0	3.9
0211-O1	420240.0	3097746.0	1.0	11.0	0.0	4.9
0212-O1	419920.4	3097425.5	1.0	8.3	0.0	2.1
0213-O1	420230.0	3097136.0	1.0	19.0	0.0	9.5
0215-O1	420204.0	3097377.0	1.0	12.0	0.0	4.1
0217-O1	420233.0	3097475.0	1.0	13.0	0.0	5.7
0218-O1	419975.0	3097268.0	1.0	14.0	0.0	6.0
0219-O1	420065.0	3097239.0	1.0	17.0	0.0	3.3
0220-O1	420057.0	3097305.0	1.0	14.0	0.0	4.2
0221-O1	420032.0	3097278.0	1.0	15.0	0.0	4.6
0222-O1	420177.0	3097278.0	1.0	14.0	0.0	3.1
0223-O1	420300.0	3096925.0	1.0	30.0	0.0	6.2
0224-O1	420335.0	3097435.0	1.0	10.0	0.0	5.2
0225-O1	420348.0	3097246.0	1.0	17.0	0.0	6.4
0226-O1	420364.0	3097234.0	1.0	17.0	0.0	7.0
0227-O1	420610.0	3097037.0	1.0	26.0	0.0	8.0
0228-O1	420406.0	3097434.0	1.0	13.0	0.0	4.5
0230-O1	420657.0	3097273.0	1.0	17.0	0.0	5.6
0232-O1	420850.0	3096924.0	1.0	39.0	0.0	12.9
0233-O1	420924.0	3097057.0	1.0	30.0	0.0	12.6
0234-O1	421005.0	3097052.0	1.0	32.0	0.0	15.0
0238-O1	420896.0	3097246.0	1.0	23.0	0.0	13.0
0239-O1	420580.0	3097475.0	1.0	16.0	0.0	4.9
0240-O1	420515.0	3097594.0	1.0	16.0	0.0	6.2
0242-O1	421525.0	3096790.0	1.0	40.0	0.0	31.9
0243-O1	421260.0	3097278.0	1.0	24.0	0.0	16.6
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	0.0	24.4
0246-O1	422549.0	3097419.0	1.0	81.0	0.0	74.0
0247-O1	421574.9	3097139.5	1.0	30.3	0.0	20.1
0248-O1	420505.0	3097480.0	1.0	15.0	0.0	6.8
0249-O1	421190.1	3097597.6	1.0	28.8	0.0	11.8
0250-O1	420895.9	3096900.4	1.0	41.8	0.0	5.8
0252-O1	421313.0	3096804.0	1.0	47.0	0.0	29.0
0253-O1	421222.0	3096653.0	1.0	52.0	0.0	27.0
0255-O1	421404.0	3096520.0	1.0	48.0	0.0	27.1
0257-O1	421695.0	3096500.0	1.0	48.0	0.0	27.6
0258-O1	421785.9	3096512.4	1.0	45.3	0.0	28.5
0259-O1	421855.0	3096975.0	1.0	45.0	0.0	29.8
0260-O1	421919.0	3096445.0	1.0	45.0	0.0	29.9
0261-O1	421800.0	3096382.0	1.0	53.0	0.0	24.0
0262-O1	421874.9	3096385.0	1.0	49.2	0.0	28.8
0264-O1	422020.0	3096421.0	1.0	44.0	0.0	31.3

EXPEDIENTE	UTM-X	UTM-Y	Screen	Z _{pozo}	Tiempo	Z _{nivel piezométrico}
0265-O1	422055.0	3096411.0	1.0	45.0	0.0	33.1
0266-O1	422173.5	3096488.3	1.0	40.8	0.0	32.2
0267-O1	422212.3	3096473.7	1.0	42.0	0.0	32.8
0268-O1	421975.0	3096461.0	1.0	43.0	0.0	33.7
0269-O1	422304.7	3096427.8	1.0	43.5	0.0	35.3
0272-O1	421881.7	3096334.3	1.0	51.5	0.0	26.9
0273-O1	420646.4	3097520.7	1.0	16.3	0.0	6.2
0274-O1	420633.3	3097586.2	1.0	15.3	0.0	6.6
0277-O1	422530.0	3096037.0	1.0	59.0	0.0	44.6
0278-O1	422470.0	3096194.8	1.0	51.4	0.0	38.9
0279-O1	422480.0	3096158.0	1.0	58.0	0.0	42.6
0280-O1	422625.0	3096199.0	1.0	50.0	0.0	41.1
0309-TP	423712.8	3096032.3	1.0	63.4	0.0	54.4
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	0.0	34.7
0391-TP	421465.6	3095807.7	1.0	113.8	0.0	90.3
0392-TP	424690.9	3095339.1	1.0	85.2	0.0	66.2
0404-O1	423290.2	3094331.5	1.0	137.8	0.0	123.9
0405-O1	423404.0	3094685.0	1.0	105.0	0.0	96.0
0406-O1	423396.0	3094653.0	1.0	106.0	0.0	97.0
0407-O1	423396.0	3094622.0	1.0	109.0	0.0	103.0
0408-O1	423802.0	3094006.0	1.0	188.0	0.0	177.1
0409-O1	423474.0	3093783.0	1.0	150.0	0.0	145.9
0412-O1	423610.0	3093433.0	1.0	174.0	0.0	161.2
0414-O1	424278.0	3093374.0	1.0	280.0	0.0	263.7
0415-O1	424435.0	3091978.0	1.0	345.0	0.0	336.2
0423-O1	422177.0	3093168.0	1.0	395.0	0.0	381.3
0429-O1	423320.0	3094740.0	1.0	112.0	0.0	104.0
0600-O1	425048.0	3095633.0	1.0	95.0	0.0	88.5
0601-O1	424788.0	3095537.0	1.0	88.0	0.0	79.2
0602-O1	424806.0	3095430.0	1.0	88.0	0.0	79.7
0603-O1	424155.0	3095300.0	1.0	77.0	0.0	65.4
0604-O1	424277.0	3095282.0	1.0	79.0	0.0	65.8
0606-O1	424328.0	3095694.0	1.0	87.0	0.0	66.0
0607-O1	424267.0	3095635.0	1.0	80.0	0.0	69.0
0608-O1	424235.0	3095658.0	1.0	77.0	0.0	66.5
0609-O1	424146.4	3095791.1	1.0	73.8	0.0	60.1
0610-O1	424096.1	3095826.6	1.0	71.6	0.0	59.1
0611-O1	424086.0	3095810.0	1.0	72.0	0.0	60.3
0612-O1	424119.0	3095859.0	1.0	72.0	0.0	59.5
0613-O1	424260.0	3095756.0	1.0	84.0	0.0	68.7
0614-O1	424144.0	3095389.0	1.0	75.0	0.0	66.2
0617-O1	423798.0	3095578.1	1.0	70.3	0.0	56.6
0622-O1	424055.0	3095793.0	1.0	70.0	0.0	58.3
0623-O1	423982.2	3095941.3	1.0	68.7	0.0	59.0
0624-O1	423885.0	3095819.0	1.0	66.0	0.0	54.2
0625-O1	423889.0	3095851.0	1.0	67.0	0.0	54.6
0628-O1	423672.0	3095810.0	1.0	64.0	0.0	51.2
0631-O1	423375.0	3095869.0	1.0	62.0	0.0	51.5
0632-O1	423377.0	3095877.0	1.0	62.0	0.0	51.1
0635-O1	423614.0	3095469.0	1.0	75.0	0.0	58.0

EXPEDIENTE	UTM-X	UTM-Y	Screen	Z _{pozo}	Tiempo	Z _{nivel piezométrico}
0639-O1	423465.0	3095559.0	1.0	74.0	0.0	57.0
0641-O1	423325.0	3095943.0	1.0	60.0	0.0	49.4
0642-O1	423315.0	3095938.0	1.0	60.0	0.0	49.5
0645-O1	423298.0	3096017.0	1.0	61.0	0.0	51.0
0646-O1	422949.0	3096298.0	1.0	53.0	0.0	45.0
0651-O1	423215.8	3095874.4	1.0	60.5	0.0	50.2
0652-O1	423197.0	3095938.0	1.0	59.0	0.0	49.2
0654-O1	423196.4	3095525.3	1.0	74.9	0.0	55.9
0656-O1	422855.0	3095265.0	1.0	100.0	0.0	82.0
0657-O1	422665.0	3095547.0	1.0	83.0	0.0	63.0
0660-O1	424230.0	3095446.0	1.0	70.0	0.0	56.9
0661-O1	423447.0	3095539.0	1.0	73.0	0.0	54.7
0664-O1	422528.3	3096265.9	1.0	48.8	0.0	39.3
0665-O1	422899.0	3095802.0	1.0	67.0	0.0	50.2
0666-O1	422755.0	3096401.0	1.0	50.0	0.0	41.7
0667-O1	423200.0	3096235.0	1.0	55.0	0.0	47.2
0668-O1	423112.2	3095777.4	1.0	65.3	0.0	53.4
0669-O1	422335.0	3096456.0	1.0	47.0	0.0	39.0
0671-O1	422405.0	3096342.0	1.0	48.0	0.0	39.2
0672-O1	422662.0	3096475.0	1.0	48.0	0.0	40.1
0674-O1	421320.0	3096169.0	1.0	70.0	0.0	60.6
0675-O1	421303.0	3096135.0	1.0	70.0	0.0	63.0
0729-TP	421464.4	3097089.2	1.0	28.2	0.0	20.9
0774-TP	421031.3	3097559.5	1.0	19.3	0.0	10.4
0779-TP	421463.8	3096870.8	1.0	30.7	0.0	21.9
0894-TP	421700.0	3096653.0	1.0	34.0	0.0	27.0
1132-TP	420490.4	3097445.8	1.0	15.3	0.0	5.3
1622-TP	422524.8	3096376.4	1.0	45.3	0.0	39.2
1814-TP	421872.0	3096494.0	1.0	42.0	0.0	31.2
2030-TP	422893.4	3096015.2	1.0	55.5	0.0	46.9
2031-TP	423657.0	3095589.0	1.0	69.0	0.0	55.5
2034-TP	421209.0	3096993.0	1.0	28.0	0.0	18.9
2474-TP	422404.0	3096559.0	1.0	45.0	0.0	37.4
2475-TP	422196.0	3096755.0	1.0	42.0	0.0	33.6
2601-TP	423361.0	3094395.0	1.0	130.0	0.0	116.3
2601-TP	423361.0	3094395.0	1.0	130.0	0.0	115.4
2603-TP	422987.0	3095700.0	1.0	64.0	0.0	49.5
2604-TP	424236.0	3095361.0	1.0	76.0	0.0	59.1
2605-TP	423231.0	3095623.0	1.0	73.0	0.0	56.6
2606-TP	423420.0	3094554.0	1.0	114.0	0.0	108.4
2609-TP	423166.3	3095635.5	1.0	69.7	0.0	54.7
2655-TP	424412.0	3095229.0	1.0	85.0	0.0	79.7
2662-TP	423452.0	3094281.0	1.0	125.0	0.0	118.9
2714-TP	425168.4	3095707.4	1.0	93.7	0.0	87.7
2756-TP	420647.7	3097618.3	1.0	15.8	0.0	6.5
2757-TP	421447.0	3096582.0	1.0	45.0	0.0	26.0
2760-TP	423765.8	3093293.8	1.0	183.3	0.0	179.5
2762-TP	423449.9	3093602.9	1.0	156.9	0.0	151.4
2860-TP	423719.1	3092571.4	1.0	234.5	0.0	222.4
2863-TP	423433.3	3093919.0	1.0	141.2	0.0	137.6

EXPEDIENTE	UTM-X	UTM-Y	Screen	Z _{pozo}	Tiempo	Z _{nivel piezométrico}
2913-TP	422980.7	3095898.1	1.0	61.1	0.0	49.6
2959-TP	421145.0	3097101.0	1.0	26.0	0.0	18.0
3056-TP	423278.0	3096086.0	1.0	60.0	0.0	50.5
3286-TP	421081.0	3096648.0	1.0	61.0	0.0	39.3
3507-TP	424065.0	3092268.0	1.0	276.0	0.0	257.4
3649-TP	423587.8	3092528.6	1.0	245.7	0.0	225.1
3716-TP	420528.1	3095786.6	1.0	153.4	0.0	141.7
3812-TP	424520.0	3095231.0	1.0	80.0	0.0	68.7
3965-TP	422578.0	3095239.0	1.0	109.0	0.0	102.5
3972-TP	423596.0	3095876.0	1.0	63.0	0.0	52.0
3992-TP	423736.0	3097988.0	1.0	118.0	0.0	108.1
4627-TP	423293.0	3092704.0	1.0	285.0	0.0	263.7
4631-TP	423620.0	3093143.0	1.0	205.0	0.0	197.7
4655-TP	423269.0	3095643.0	1.0	73.0	0.0	57.1
4669-TP	423431.3	3093833.1	1.0	144.1	0.0	142.6
4694-TP	423904.0	3098300.0	1.0	132.0	0.0	125.9
4704-TP	423126.7	3096291.5	1.0	54.8	0.0	45.8
4721-TP	423807.0	3092972.0	1.0	213.0	0.0	200.5
4734-TP	425115.1	3095796.2	1.0	109.1	0.0	86.6
4739-TP	421482.0	3096482.0	1.0	48.0	0.0	26.5
4753-TP	423720.0	3093246.0	1.0	187.0	0.0	181.8
4764-TP	423595.0	3093061.0	1.0	220.0	0.0	216.3
4767-TP	424090.0	3095733.0	1.0	71.0	0.0	58.8
4791-TP	422937.0	3096609.0	1.0	51.0	0.0	46.1
4797-TP	420349.0	3097076.0	1.0	18.0	0.0	6.5
4825-TP	425131.6	3095705.0	1.0	92.8	0.0	86.8
4831-TP	423520.5	3094148.3	1.0	133.4	0.0	121.0
4832-TP	421320.0	3095905.0	1.0	90.0	0.0	83.2
4841-TP	423042.0	3093798.0	1.0	200.0	0.0	177.1
4844-TP	422010.0	3096308.0	1.0	53.0	0.0	33.3
4850-TP	422305.0	3096239.0	1.0	51.0	0.0	36.9
4851-TP	423737.0	3094082.0	1.0	173.0	0.0	161.0
4852-TP	423256.0	3094601.0	1.0	125.0	0.0	110.6
4853-TP	422379.0	3096204.0	1.0	53.0	0.0	40.1
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	0.0	34.6
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	0.0	37.0
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	0.0	34.9
4859-TP	421386.0	3096552.0	1.0	47.0	0.0	23.4
4860-TP	422725.8	3096552.2	1.0	47.2	0.0	38.0
4873-TP	422116.2	3096457.3	1.0	39.9	0.0	32.8
4877-TP	421076.0	3095329.0	1.0	211.0	0.0	186.1
4886-TP	425068.0	3091171.0	1.0	497.0	0.0	483.5
4894-TP	422505.0	3095478.0	1.0	98.0	0.0	74.2
4902-TP	423933.0	3092617.0	1.0	265.0	0.0	256.5
4903-TP	424104.0	3092736.0	1.0	280.0	0.0	276.6
4904-TP	420762.8	3097473.5	1.0	17.8	0.0	6.8
4907-TP	422469.0	3094927.0	1.0	144.0	0.0	136.9
4908-TP	420615.0	3097761.0	1.0	15.0	0.0	6.4
4914-TP	425270.0	3095741.0	1.0	98.0	0.0	91.7
4916-TP	421125.0	3097065.0	1.0	25.0	0.0	14.2

EXPEDIENTE	UTM-X	UTM-Y	Screen	Z _{pozo}	Tiempo	Z _{nivel piezométrico}
4932-TP	421992.0	3096837.0	1.0	38.0	0.0	28.3
4938-TP	423500.0	3093438.0	1.0	175.0	0.0	167.4
4940-TP	420950.1	3097337.0	1.0	21.1	0.0	11.3
4943-TP	423818.0	3093651.0	1.0	200.0	0.0	187.9
4946-TP	424365.0	3095631.0	1.0	89.0	0.0	71.3
4976-TP	424065.0	3092136.0	1.0	290.0	0.0	272.8
4996-TP	422051.0	3096786.0	1.0	39.0	0.0	29.5
5024-TP	424550.0	3093320.0	1.0	375.0	0.0	343.3
5057-TP	420252.0	3097057.0	1.0	26.0	0.0	7.0
5063-TP	421749.0	3096888.0	1.0	33.0	0.0	24.4
5064-TP	420318.0	3097042.0	1.0	25.0	0.0	9.2
5080-TP	420368.7	3097308.3	1.0	13.2	0.0	3.6
5083-TP	424324.0	3095464.0	1.0	75.0	0.0	65.8
5087-TP	420543.0	3097080.0	1.0	21.0	0.0	7.9
5088-TP	420070.5	3097195.9	1.0	20.4	0.0	2.4
5089-TP	423805.0	3095340.0	1.0	80.0	0.0	57.4
5090-TP	420750.0	3097032.0	1.0	29.0	0.0	10.6
5092-TP	424484.1	3095606.7	1.0	91.2	0.0	66.2
5093-TP	421587.0	3096451.0	1.0	52.0	0.0	27.3
5098-TP	420581.0	3097303.3	1.0	16.6	0.0	4.7
5100-TP	420960.0	3097239.0	1.0	21.0	0.0	11.5
5101-TP	421068.0	3097162.0	1.0	25.0	0.0	15.4
5102-TP	421025.0	3097138.0	1.0	24.0	0.0	14.0
5108-TP	425619.0	3095869.0	1.0	103.0	0.0	100.8
5118-TP	424893.9	3095516.4	1.0	87.3	0.0	79.3
5120-TP	424698.0	3095440.0	1.0	95.0	0.0	85.0
5130-TP	420876.0	3097246.0	1.0	23.0	0.0	13.8
5131-TP	423337.1	3095945.4	1.0	61.3	0.0	49.0
5132-TP	420655.0	3097401.0	1.0	18.0	0.0	8.7
5134-TP	420505.0	3096950.0	1.0	20.0	0.0	6.5
5137-TP	425068.0	3095687.0	1.0	87.0	0.0	81.2
5138-TP	420465.0	3097303.0	1.0	17.0	0.0	6.7
5162-TP	421389.0	3096581.0	1.0	46.0	0.0	23.7
5231-TP	420641.5	3097092.4	1.0	20.1	0.0	6.0
5233-TP	420575.0	3097005.0	1.0	26.0	0.0	7.2
5688-TP	424483.0	3091092.0	1.0	505.0	0.0	493.3

Tabla A.11. Pozos de observación en el modelo de flujo en régimen transitorio.

EXPEDIENTE	UTM-X	UTM-Y	Screen	Z _{pozo}	Tiempo	Z _{nivel piezométrico}
0218-O1	419975.0	3097268.0	1.0	14.0	291.0	6.0
0218-O1	419975.0	3097268.0	1.0	14.0	1293.0	4.6
0218-O1	419975.0	3097268.0	1.0	14.0	2389.0	4.2
0244-O1	421430.5	3097257.6	1.0	28.0	2026.0	17.2
0244-O1	421430.5	3097257.6	1.0	28.0	2078.0	17.2
0244-O1	421430.5	3097257.6	1.0	28.0	2128.0	17.1
0244-O1	421430.5	3097257.6	1.0	28.0	2196.0	19.5
0244-O1	421430.5	3097257.6	1.0	28.0	2297.0	17.8
0244-O1	421430.5	3097257.6	1.0	28.0	2334.0	17.4
0244-O1	421430.5	3097257.6	1.0	28.0	2389.0	17.2
0244-O1	421430.5	3097257.6	1.0	28.0	2728.0	15.5
0244-O1	421430.5	3097257.6	1.0	28.0	2811.0	15.7
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	298.0	24.4
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	2019.0	23.4
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	2078.0	25.2
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	2127.0	25.0
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	2196.0	24.8
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	2297.0	26.4
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	2334.0	26.4
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	2389.0	23.5
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	2414.0	24.9
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	2728.0	23.8
0245-O1	421799.1	3097081.6	1.0	34.6	2817.0	23.0
0247-O1	421574.9	3097139.5	1.0	30.3	299.0	20.1
0247-O1	421574.9	3097139.5	1.0	30.3	2078.0	20.3
0247-O1	421574.9	3097139.5	1.0	30.3	2816.0	18.7
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	298.0	34.7
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	2019.0	37.5
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	2078.0	37.0
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	2128.0	35.6
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	2196.0	34.7
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	2297.0	37.2
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	2334.0	35.4
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	2389.0	35.5
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	2414.0	34.1
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	2729.0	34.1
0389-TP	422138.4	3097342.0	1.0	47.0	2817.0	33.4
0411-O1	423425.7	3093850.3	1.0	144.4	2129.0	139.8
0411-O1	423425.7	3093850.3	1.0	144.4	2729.0	140.3
0411-O1	423425.7	3093850.3	1.0	144.4	2802.0	138.6
0623-O1	423982.2	3095941.3	1.0	68.7	297.0	59.0
0623-O1	423982.2	3095941.3	1.0	68.7	2079.0	58.5
0623-O1	423982.2	3095941.3	1.0	68.7	2128.0	57.7
0623-O1	423982.2	3095941.3	1.0	68.7	2197.0	57.4
0623-O1	423982.2	3095941.3	1.0	68.7	2298.0	60.8
0623-O1	423982.2	3095941.3	1.0	68.7	2334.0	59.5
0623-O1	423982.2	3095941.3	1.0	68.7	2389.0	57.5

EXPEDIENTE	UTM-X	UTM-Y	Screen	Z _{pozo}	Tiempo	Z _{nivel piezométrico}
0623-O1	423982.2	3095941.3	1.0	68.7	2729.0	57.1
0623-O1	423982.2	3095941.3	1.0	68.7	2812.0	57.6
0729-TP	421464.4	3097089.2	1.0	28.2	298.0	20.9
0729-TP	421464.4	3097089.2	1.0	28.2	2026.0	19.6
0779-TP	421463.8	3096870.8	1.0	30.7	299.0	21.9
0779-TP	421463.8	3096870.8	1.0	30.7	1404.0	12.3
1622-TP	422524.8	3096376.4	1.0	45.3	303.0	39.2
1622-TP	422524.8	3096376.4	1.0	45.3	1405.0	36.8
1622-TP	422524.8	3096376.4	1.0	45.3	2389.0	38.2
2471-TP	423951.6	3095669.6	1.0	70.4	2813.0	55.3
2601-TP	423361.0	3094395.0	1.0	130.0	0.0	114.9
2601-TP	423361.0	3094395.0	1.0	130.0	244.0	116.3
2601-TP	423361.0	3094395.0	1.0	130.0	292.0	115.4
2601-TP	423361.0	3094395.0	1.0	130.0	514.0	115.0
2601-TP	423361.0	3094395.0	1.0	130.0	2777.0	114.7
2603-TP	422987.0	3095700.0	1.0	64.0	0.0	48.3
2603-TP	422987.0	3095700.0	1.0	64.0	244.0	49.5
2603-TP	422987.0	3095700.0	1.0	64.0	514.0	49.3
2603-TP	422987.0	3095700.0	1.0	64.0	2870.0	39.8
2760-TP	423765.8	3093293.8	1.0	183.3	293.0	179.5
2760-TP	423765.8	3093293.8	1.0	183.3	2128.0	178.7
2760-TP	423765.8	3093293.8	1.0	183.3	2196.0	178.9
2760-TP	423765.8	3093293.8	1.0	183.3	2298.0	180.8
2760-TP	423765.8	3093293.8	1.0	183.3	2334.0	180.8
2760-TP	423765.8	3093293.8	1.0	183.3	2389.0	179.5
2760-TP	423765.8	3093293.8	1.0	183.3	2415.0	178.7
2760-TP	423765.8	3093293.8	1.0	183.3	2804.0	177.9
2762-TP	423449.9	3093602.9	1.0	156.9	293.0	151.4
2762-TP	423449.9	3093602.9	1.0	156.9	2197.0	150.4
2762-TP	423449.9	3093602.9	1.0	156.9	2298.0	154.5
4669-TP	423431.3	3093833.1	1.0	144.1	292.0	142.6
4669-TP	423431.3	3093833.1	1.0	144.1	2298.0	143.3
4669-TP	423431.3	3093833.1	1.0	144.1	2334.0	143.3
4669-TP	423431.3	3093833.1	1.0	144.1	2389.0	142.9
4826-TP	424205.0	3095557.0	1.0	76.0	2390.0	59.6
4826-TP	424205.0	3095557.0	1.0	76.0	2795.0	61.1
4834-TP	422015.6	3096727.5	1.0	36.7	1405.0	25.8
4834-TP	422015.6	3096727.5	1.0	36.7	2129.0	27.7
4834-TP	422015.6	3096727.5	1.0	36.7	2196.0	26.9
4834-TP	422015.6	3096727.5	1.0	36.7	2298.0	29.0
4834-TP	422015.6	3096727.5	1.0	36.7	2334.0	28.8
4834-TP	422015.6	3096727.5	1.0	36.7	2389.0	27.5
4834-TP	422015.6	3096727.5	1.0	36.7	2797.0	23.8
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	303.0	34.6
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	2018.0	34.3
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	2078.0	34.6
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	2128.0	34.7
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	2196.0	34.5
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	2297.0	36.4
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	2334.0	35.1

EXPEDIENTE	UTM-X	UTM-Y	Screen	Z _{pozo}	Tiempo	Z _{nivel piezométrico}
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	2389.0	34.4
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	2414.0	34.5
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	2722.0	31.7
4858ATP	422526.5	3096659.5	1.0	43.5	2789.0	33.1
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	303.0	37.0
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	2025.0	37.4
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	2078.0	37.4
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	2128.0	37.5
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	2196.0	37.1
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	2297.0	40.6
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	2334.0	37.6
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	2389.0	36.5
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	2414.0	37.2
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	2722.0	33.2
4858BTP	422533.6	3096575.0	1.0	46.0	2789.0	33.9
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	303.0	34.9
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	2018.0	34.5
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	2079.0	35.2
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	2127.0	35.0
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	2196.0	34.7
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	2297.0	35.3
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	2334.0	34.9
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	2389.0	34.5
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	2414.0	34.8
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	2722.0	34.0
4858-TP	422505.6	3096793.9	1.0	44.1	2789.0	34.0
4859-TP	421386.0	3096552.0	1.0	47.0	299.0	23.4
4859-TP	421386.0	3096552.0	1.0	47.0	2778.0	14.4
4860-TP	422725.8	3096552.2	1.0	47.2	304.0	38.0
4860-TP	422725.8	3096552.2	1.0	47.2	2019.0	38.3
4860-TP	422725.8	3096552.2	1.0	47.2	2230.0	38.2
4860-TP	422725.8	3096552.2	1.0	47.2	2298.0	40.7
4860-TP	422725.8	3096552.2	1.0	47.2	2414.0	38.2
4904-TP	420762.8	3097473.5	1.0	17.8	297.0	6.8
4940-TP	420950.1	3097337.0	1.0	21.1	294.0	11.3
4940-TP	420950.1	3097337.0	1.0	21.1	2789.0	7.7
5107-TP	424492.0	3095739.0	1.0	93.0	2079.0	70.0
5107-TP	424492.0	3095739.0	1.0	93.0	2129.0	69.3
5107-TP	424492.0	3095739.0	1.0	93.0	2197.0	68.2
5107-TP	424492.0	3095739.0	1.0	93.0	2334.0	69.9
5107-TP	424492.0	3095739.0	1.0	93.0	2389.0	70.2
5107-TP	424492.0	3095739.0	1.0	93.0	2812.0	68.5

Tabla A.12. Datos de explotación media (l/s) para los distintos pozos de la zona de estudio calculados a partir de la base de datos.

Expediente	UTM-X	UTM-Y	Z (m)	Z fondo (m)	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Media por pozo
0001-O2	422991	3095398	83	45	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
0004-O2	423384	3095162	89	61	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
0005-O2	423486	3095742	64	29.67	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	1.67	0.84	0.84	1.88
0007-O2	423450	3095401	81	55.8	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0008-O2	423853	3095852	63	44.9	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
0013-O2	422565	3095746	73	42	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0014-O2	422695	3095702	73	44.6	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.09	0.07	0.07	0.07	0.07
0015-O2	424125	3095510	75	56.7	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
0016-O2	420825	3097150	24	-11.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.69	0.00	0.07
0017-O2	423783	3095464	71	38.3	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
0018-O2	423350	3095359	81	53.9	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0022-O2	422755	3095877	66	31.3	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
0023-O2	422894	3095696	73	36	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.20	0.49	0.42	0.58	0.16
0025-A4	423857	3095465	71	36.75	0.69	0.60	0.46	0.46	0.46	0.34	0.25	0.25	0.07	0.06	0.06	0.34
0027-O2	423320	3095160	88	57	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
0030-O2	423131	3096032	56	28	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
0090-BSI	420686	3097746	15	-197	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84	1.44	1.44	0.34
0201-O1	419806	3097792	9	-0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.68	0.68	0.68	0.22
0203-O1	419721	3097389	7	1	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
0205-O1	419627	3097327	8	2.1	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
0206-O1	419815	3097305	8	-3	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
0210-O1	419899	3097733	6	-3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.26	4.66	0.00	1.36
0211-O1	420240	3097746	11	3.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.81	1.43	0.35	0.33
0218-O1	419975	3097268	14	2.77	0.52	0.46	0.35	0.51	0.66	0.66	1.14	0.82	0.59	0.10	0.00	0.53
0222-O1	420177	3097278	14	-0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0225-O1	420348	3097246	17	-3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0227-O1	420610	3097037	26	-12.87	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74
0228-O1	420406	3097434	13	-9.59	0.69	1.45	1.38	1.38	1.38	1.38	0.69	1.13	3.05	2.31	2.31	1.56
0231-O1	420669	3097204	22	-9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.65	0.78	0.73	0.23
0234-O1	421005	3097052	32	6.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01

Expediente	UTM-X	UTM-Y	Z (m)	Z fondo (m)	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Media por pozo
0235-O1	420815	3097076	26	-13.47	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.18	0.22	2.64	7.37	3.46	4.24	1.72
0236-O1	420849	3097116	23	-16.11	0.20	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.34	0.42	0.42	0.42	0.42	0.33
0238-O1	420896	3097246	23	-4.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0241-O1	420555	3097608	16	-12.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.78	1.35	1.35	0.41
0242-O1	421525	3096790	40	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.21
0245-O1	421803	3097081	33	12.9	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.09	0.01	0.08	0.03
0247-O1	421555	3097125	30	-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.70	0.00	0.00	0.00	0.15
0251-O1	421179	3096807	47	5	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02
0254-O1	421460	3096623	41	-6.2	0.42	1.32	1.97	1.97	1.97	1.97	2.85	2.42	1.58	1.46	1.47	1.76
0256-O1	421631	3096534	47	8	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
0258-O1	421790	3096512	45	6.45	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.93
0260-O1	421919	3096445	45	12.58	0.00	0.00	0.35	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.55
0262-O1	421873	3096387	49	16	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
0263-O1	422055	3096757	38	13	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06
0264-O1	422020	3096421	44	15.1	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16
0267-O1	422209	3096485	41	11	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.95	1.34	0.68	0.73	0.01	0.65
0268-O1	421975	3096461	43	18	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
0269-O1	422305	3096426	43	11.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.49	0.83	0.58	0.39	0.39	0.25
0270-O1	421499	3096384	53	15	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
0273-O1	420645	3097520	15	-17.15	0.00	0.00	3.11	5.33	0.00	5.33	5.33	5.33	2.62	0.76	0.96	2.62
0275-O1	422356	3096183	53	16.2	0.42	0.37	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.29	0.25	0.25	0.25	0.32
0276-O1	422421	3096204	53	17	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
0278-O1	422470	3096200	50	17	0.03	0.03	0.58	1.13	1.13	1.13	1.13	1.71	0.09	0.21	0.21	0.67
0279-O1	422480	3096158	58	26.1	0.06	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
0280-O1	422625	3096199	50	28.25	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
0389-TP	422138	3097345	46	17.7	0.83	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	1.42	0.66	0.66	0.44
0392-TP	424720	3095332	83	62.02	0.42	0.78	0.68	0.42	0.78	0.68	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
0401-O1	423337	3094535	122	102	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
0402-O1	423422	3094310	128	109.7	0.46	0.43	0.42	0.42	0.42	0.42	0.38	0.35	0.35	0.35	0.35	0.40
0404-O1	423298	3094330	136	108.71	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20
0405-O1	423404	3094685	105	83.54	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
0406-O1	423396	3094653	106	85	0.00	0.10	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.20

Expediente	UTM-X	UTM-Y	Z (m)	Z fondo (m)	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Media por pozo
0407-O1	423396	3094622	109	95.7	0.00	0.00	0.02	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04
0410-O1	423427	3093744	150	136.03	0.34	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.12	0.04	0.04	0.04	0.04	0.16
0411-O1	423422	3093853	144	123.09	0.21	0.18	0.15	0.15	0.12	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
0414-O1	424278	3093374	280	259.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
0417-O1	424051	3092070	293	271.39	0.13	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.07
0425-O1	423150	3094032	169	130.68	0.11	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06
0601-O1	424788	3095537	88	75.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.22	0.22	0.22	0.22	0.09
0603-O1	424155	3095300	77	59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01
0605-O1	424265	3095392	75	54.61	0.00	0.00	0.40	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.62
0608-O1	424235	3095658	77	53	0.03	0.06	0.06	0.06	0.10	0.13	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08
0614-O1	424144	3095389	75	58.7	0.00	0.03	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06
0615-O1	424450	3095060	70	39.27	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
0616-O1	423965	3095455	72	45.46	0.09	0.14	0.14	0.14	0.14	0.18	0.16	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
0617-O1	423798	3095576	69	36.24	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
0618-O1	423904	3095520	71	36.4	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
0620-O1	423860	3095923	67	49.2	1.25	1.02	0.85	0.85	0.85	0.85	0.61	0.44	0.44	0.44	0.44	0.73
0621-O1	423763	3095682	70	40.9	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06
0622-O1	424055	3095793	70	47.2	0.18	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.09	0.08	0.08	0.08	0.13
0625-O1	423889	3095851	67	43.53	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
0626-O1	423897	3095857	68	49.53	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0628-O1	423672	3095810	64	34.8	0.63	0.64	0.57	0.57	0.57	0.50	0.41	0.26	0.26	0.26	0.26	0.45
0629-O1	423575	3095712	68	42	0.16	0.16	0.16	0.16	0.12	0.10	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09
0630-O1	423360	3095860	62	31	0.29	0.38	0.44	0.44	0.50	0.58	0.58	0.49	0.49	0.49	0.49	0.47
0634-O1	423788	3095736	68	40.25	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
0635-O1	423614	3095469	75	46.42	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
0636-O1	423725	3095397	75	44.5	0.33	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.50
0637-O1	423860	3095357	75	43	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
0639-O1	423465	3095559	74	34	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
0641-O1	423325	3095943	60	30.1	0.17	0.17	0.17	0.17	0.09	0.09	0.17	0.16	0.17	0.17	0.17	0.16
0643-O1	423423	3095935	61	32	0.43	0.41	0.39	0.39	0.37	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.38
0645-O1	423298	3096017	61	25.7	0.56	0.54	0.54	0.54	0.52	0.60	0.85	1.00	1.00	1.00	1.00	0.74
0648-O1	423101	3096002	57	26.6	1.00	0.80	0.66	0.66	0.48	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.52

Expediente	UTM-X	UTM-Y	Z (m)	Z fondo (m)	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Media por pozo
0650-O1	423146	3096047	55	25.7	0.21	0.28	0.33	0.33	0.41	0.46	0.40	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
0651-O1	423215	3095877	59	22	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
0654-O1	423192	3095526	74	39.25	0.00	0.05	0.13	0.13	0.13	0.13	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25	0.16
0655-O1	423207	3095347	83	52.5	0.00	0.06	0.14	0.14	0.14	0.14	0.21	0.27	0.27	0.27	0.27	0.17
0656-O1	422855	3095265	100	71.5	0.00	0.10	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.18
0661-O1	423447	3095539	73	33.8	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19
0662-O1	423096	3095826	54		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0664-O1	422521	3096268	47	24.75	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	1.74	0.22	0.31	0.29	1.95
0665-O1	422899	3095802	67	30	0.03	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.13	0.53	0.37	0.27	0.08	0.16
0668-O1	423122	3095781	65	33.08	0.00	0.09	0.21	0.21	0.21	0.21	0.34	0.59	0.40	0.06	0.06	0.22
0669-O1	422335	3096456	47	17.85	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
0670-O1	422441	3096339	48	13.44	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
0671-O1	422405	3096342	48	14.3	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.27	0.32	0.38	0.38	0.38	0.26
0672-O1	422662	3096475	48	23.12	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.49	0.39	0.35	0.00	0.49
0674-O1	421320	3096169	70	43.2	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0675-O1	421303	3096135	70	52	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0729-TP	421455	3097086	27	-3.89	0.00	0.00	0.00	0.19	0.46	2.75	3.43	1.73	0.35	0.00	0.00	0.81
0774-TP	421032	3097562	17	-6.5	0.35	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	1.18	1.52	2.37	1.37	3.34	1.30
0779-TP	421465	3096869	29	-6	21.36	17.71	14.07	10.42	12.50	10.83	11.96	10.48	6.84	7.47	11.98	12.33
0894-TP	421700	3096653	34	-5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.78	3.03	0.37	0.47	0.61
0939-TP	420100	3094420	385		0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
1132-TP	420488	3097448	14	-11.58	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.09	0.13	0.13	0.13	0.13	0.08
1355-TP	421385	3097118	26	-15	0.58	0.58	0.58	0.58	0.34	0.00	0.29	0.81	1.03	0.74	0.64	0.56
1622-TP	422522	3096377	46	18.3	1.65	1.85	1.99	1.52	0.88	1.10	0.72	0.28	0.16	0.02	0.04	0.93
2030-TP	422905	3096007	56	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	4.92	2.93	1.16	1.01
2031-TP	423657	3095589	69	29	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.16	0.19	0.19	0.19	0.19
2034-TP	421209	3096993	28	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	5.43	2.03	1.62	2.89	1.19
2471-TP	423945	3095672	70	34.85	2.67	1.70	1.70	1.70	0.71	0.00	0.00	0.18	0.21	0.00	0.00	0.80
2473-TP	423085	3096140	54	24.37	0.15	0.16	0.16	0.16	0.18	0.19	0.43	0.68	0.68	0.68	0.68	0.38
2506-TP	423261	3094429	135	97.84	0.62	0.62	0.62	0.62	0.53	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.55
2603-TP	422987	3095700	64	20.7	0.26	0.48	0.73	0.73	0.73	0.73	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
2604-TP	424236	3095361	76	54.5	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39

Expediente	UTM-X	UTM-Y	Z (m)	Z fondo (m)	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Media por pozo
2606-TP	423420	3094554	114	98	0.64	0.72	0.96	0.96	0.96	0.96	0.92	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92
2627-TP	421811	3097339	37	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45	1.16	0.74	2.51	0.53
2662-TP	423452	3094281	125	109.15	0.08	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.21	0.25	0.25	0.25	0.17
2714-TP	425165	3095714	94	67.2	1.28	0.96	0.76	0.94	1.27	1.61	1.02	0.17	0.70	0.46	0.46	0.88
2755-TP	423814	3092533	241	218.96	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
2756-TP	420654	3097622	14	-20	1.11	2.66	2.66	2.66	2.66	2.66	4.21	5.32	3.94	0.78	0.34	2.64
2757-TP	421447	3096582	45	-0.3	0.35	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
2760-TP	423762	3093295	183	159.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.08	0.01
2762-TP	423447	3093604	157	128.13	0.00	0.05	0.08	0.08	0.12	0.96	1.42	0.25	0.00	0.00	0.00	0.27
2860-TP	423715	3092568	234	190.59	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
2863-TP	423437	3093927	139	107.5	0.01	0.03	0.03	0.05	0.06	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
2913-TP	422980	3095901	61	27.9	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
2931-TP	423993	3095361	74	38.5	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	3.79	9.07	9.07	9.07	2.82
3286-TP	421081	3096648	61	24.96	0.01	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.12	0.12	0.12	0.12	0.08
3507-TP	424065	3092268	276	253.44	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3508-TP	423967	3092317	268	230.84	0.21	0.18	0.16	0.16	0.16	0.16	0.14	0.12	0.12	0.12	0.12	0.15
3649-TP	423576	3092527	245	212.66	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02
3716-TP	420525	3095791	153	133.72	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
3812-TP	424520	3095231	80	52.96	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
3972-TP	423596	3095876	63	32.6	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.32	0.23	0.11	0.02	0.02	0.02	0.27
4622-TP	423409	3092865	253	216.18	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
4625-TP	423535	3093540	157	134.73	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
4631-TP	423620	3093143	205	193.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
4655-TP	423269	3095643	73	41	3.83	2.97	2.97	2.97	2.04	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	2.13
4669-TP	423425	3093832	144	127.54	0.04	0.10	0.10	0.10	0.10	0.14	0.33	0.64	0.47	0.09	0.02	0.19
4684-TP	423233	3094094	162	128.35	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.90	1.26	1.26	1.26	1.26	0.71
4704-TP	423127	3096293	54	10	0.00	1.13	2.41	2.41	2.41	1.35	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.96
4706-TP	422883	3096386	52	34	0.22	0.32	0.39	0.45	0.54	0.41	0.18	0.09	0.09	0.09	0.09	0.26
4708-TP	423745	3092906	209	192.1	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.19	0.03	0.03	0.03	0.03	0.26
4721-TP	423807	3092972	213	191.97	0.15	0.17	0.17	0.17	0.19	0.21	0.19	0.21	0.21	0.21	0.21	0.19
4732-TP	424245	3092360	305	291.1	0.25	0.19	0.14	0.14	0.14	0.14	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04	0.11
4739-TP	421482	3096482	48	-3.41	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	4.43	8.92	8.92	8.92	8.92	3.88

Expediente	UTM-X	UTM-Y	Z (m)	Z fondo (m)	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Media por pozo
4745-TP	423953	3093036	226	208.48	0.04	0.06	0.07	0.07	0.08	0.10	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06
4753-TP	423720	3093246	187	173.44	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02
4764-TP	423595	3093061	220	213.06	0.01	0.03	0.04	0.04	0.05	0.08	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
4767-TP	424090	3095733	71	43.3	0.09	0.25	0.37	0.37	0.37	0.37	0.52	0.64	0.64	0.64	0.64	0.44
4812-TP	421145	3095990	90	71	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
4823-TP	421311	3094670	302	274.14	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
4826-TP	424205	3095557	76	41	0.94	1.00	1.00	1.05	0.87	0.87	2.38	1.67	0.68	0.68	2.01	1.19
4831-TP	423530	3094143	133	107.13	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89
4834-TP	422020	3096722	36	-19	0.59	1.11	1.11	1.48	1.89	1.62	4.78	6.00	3.87	1.00	1.16	2.24
4837-TP	421192	3094536	346	311.09	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
4841-TP	423042	3093798	200	168.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.89	0.63	0.39	0.39	0.39	0.39	0.31
4845-TP	422095	3096207	61	10.61	4.39	3.87	3.34	3.34	3.34	3.34	2.82	2.30	2.30	2.30	2.30	3.06
4850-TP	422305	3096239	51	16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.67	2.68	1.74	1.74	1.74	0.87
4853-TP	422379	3096204	53	25	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
4858BTP	422541	3096575	45	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
4860-TP	422730	3096549	47	23.75	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.08	0.78	1.25	0.99	0.43	0.09	0.33
4862-TP	422257	3096167	57	15	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	1.06	1.17	0.70	0.14	0.70
4865-TP	424444	3095411	80	56.5	0.14	0.26	0.43	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.45
4881-TP	424477	3095320	81	61	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
4886-TP	425068	3091171	497	471.14	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
4894-TP	422505	3095478	98	64.8	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
4908-TP	420615	3097761	15	-9.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	1.25	1.25	1.25	0.37
4932-TP	421992	3096837	38	13.66	0.70	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.33
4940-TP	420945	3097337	19	-15.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.50	0.21	0.02	0.09
4943-TP	423818	3093651	200	183.5	0.00	0.04	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.14	0.17	0.17	0.17	0.11
4946-TP	424365	3095631	89	44.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
4976-TP	424065	3092136	290	267.29	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
4991-TP	422723	3094006	215	194	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
4996-TP	422051	3096786	39	15.85	0.16	0.56	0.96	0.96	1.35	1.74	0.97	0.21	0.21	0.21	0.21	0.69
5018-TP	424386	3095230	85	63.25	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
5055-TP	420929	3097081	26	-3.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.89	0.63	0.39	0.39	0.39	0.39	0.31
5057-TP	420252	3097057	26	-4	4.39	3.87	3.34	3.34	3.34	3.34	2.82	2.30	2.30	2.30	2.30	3.06

Expediente	UTM-X	UTM-Y	Z (m)	Z fondo (m)	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Media por pozo
5063-TP	421749	3096888	33	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.67	2.68	1.74	1.74	1.74	0.87
5082-TP	420214	3097106	25	-6	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
5087-TP	420543	3097080	21	-8.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
5088-TP	420067	3097190	18	-8.26	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.08	0.78	1.25	0.99	0.43	0.09	0.33
5092-TP	424480	3095608	91	39.3	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	1.06	1.17	0.70	0.14	0.70
5093-TP	421587	3096451	52	12.5	0.14	0.26	0.43	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.45
5098-TP	420586	3097296	16	-12.25	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
5100-TP	420960	3097239	21	-12.33	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
5101-TP	421068	3097162	25	-14.11	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
5102-TP	421025	3097138	24	-22.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	1.25	1.25	1.25	0.37
5109-TP	420736	3097221	19	-9.49	0.70	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.33
5110-TP	420356	3097380	12	-14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.50	0.21	0.02	0.09
5118-TP	424893	3095517	87	72.96	0.00	0.04	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.14	0.17	0.17	0.17	0.11
5130-TP	420876	3097246	23	-8.46	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
5132-TP	420655	3097401	18	-9.3	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
5149-TP	422209	3096444	43	11.77	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
5208-TP	421098	3096993	34	1.2	0.16	0.56	0.96	0.96	1.35	1.74	0.97	0.21	0.21	0.21	0.21	0.69
Media anual por pozo (l/s)					0.42	0.42	0.44	0.44	0.42	0.45	0.53	0.64	0.68	0.54	0.54	0.50
Total anual (l/s)					86.71	87.78	90.59	90.97	87.95	93.81	108.68	133.04	141.68	111.25	111.23	103.94

ANEJO 5. DATOS DE HIDROQUÍMICA

Tabla A.13. Datos químicos red de control actual usados para los distintos diagramas (conductividad hidráulica en μScm).

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ₂ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (me/l)	Mg ⁺⁺ (me/l)	Na ⁺ (me/l)	K ⁺ (me/l)	CO ₃ ⁻ (me/l)	HCO ₃ ⁻ (me/l)	SO ₄ ⁻ (me/l)	Cl ⁻ (me/l)	NO ₃ ⁻ (me/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	CO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
0218 O1	21-jul-92	7.7	5760	45.47	14.47	17.55	28.91	0.60	0.00	4.84	22.54	33.00	1.56	289.40	212.36	664.93	23.50	0.00	295.24	1081.92	1171.50	96.72
0218 O1	03-may-95	7.2	5170	57.70	11.80	19.40	31.30	0.61		6.00	19.00	31.80	5.90	236.00	234.74	719.90	23.85	0.00	366.00	912.00	1128.90	365.80
0218 O1	21-feb-97	7.5	5060	59.40	11.50	11.82	31.52	0.59		5.72	18.67	27.24	3.79	230.00	143.02	724.96	23.23	0.00	348.92	896.21	967.02	234.79
0218 O1	27-ago-97	8.1	4610	43.40	11.34	12.69	28.50	0.55		5.55	18.68	27.49	3.14	226.80	153.55	655.50	21.51	0.00	338.55	896.69	975.90	194.68
0218 O1	06-nov-97	7.8	4890	54.90	11.12	13.35	31.41	0.66		7.29	18.16	27.60	2.33	222.40	161.54	722.43	25.81	0.00	444.69	871.87	979.80	144.46
0218 O1	17-feb-98	8	4640	51.90	11.00	12.90	31.74	0.75		5.59	18.01	29.18	2.74	220.00	156.09	730.02	29.33	0.00	340.99	864.48	1035.89	169.88
0218 O1	25-mar-98	7.9	4610	56.60	10.70	13.10	30.87	0.69		5.11	18.27	27.12	3.58	214.00	158.51	710.01	26.98	0.00	311.71	876.96	962.76	221.96
0218 O1	19-may-98	7.8	4570	56.40	11.28	13.56	29.14	0.77		5.75	18.60	27.21	3.54	225.60	164.08	670.22	30.11	0.00	350.75	892.80	965.96	219.48
0218 O1	24-sep-98	8.1	4660	61.80	13.34	12.33	28.58	0.73	0.00	5.47	17.75	27.46	2.82	266.80	149.19	657.34	28.54	0.00	333.67	852.00	974.83	174.84
0218 O1	28-abr-99	7.4	4500	58.90	10.25	12.03	26.00	0.64		5.19	16.43	26.73	2.60	205.00	145.56	598.00	25.02	0.00	316.59	788.64	948.92	161.20
0218 O1	16-jul-99	8.3	4680	57.20	9.70	11.56	28.26	0.75	0.26	5.57	16.54	26.76	0.11	194.00	139.88	649.98	29.33	7.80	339.77	793.92	949.98	6.82
0218 O1	08-nov-99	8.4	3860	49.90	7.86	10.02	25.50	0.60	0.63	3.85	15.35	22.05	2.95	157.20	121.24	586.50	23.46	18.90	234.85	736.80	782.78	182.90
0218 O1	19-sep-00	8.0	4210	7.28	6.53	8.15	11.89	0.50	0.15	7.35	36.75	25.00	1.28	130.64	98.56	273.40	19.37	4.50	448.35	1764.00	887.50	79.38
0218 O1	19-sep-00	8.0	3450		6.12	11.15	27.29	0.53	0.60	4.18	17.32	22.19	1.06	122.40	134.85	627.56	20.53	18.03	254.98	831.22	787.71	65.97
0218 O1	14-feb-02	8.0	4080	378.96	5.43	6.53	36.40	0.52		2.36	13.74	41.24	5.92	108.60	79.01	837.20	20.33	0.00	143.96	659.52	1464.02	367.04
0218 O1	14-feb-02	8.4	4420		11.13	14.48	32.30	0.58	1.04	2.08	18.96	33.33	1.35	222.56	175.18	742.85	22.80	31.23	126.88	910.08	1183.32	83.58
0218 O1	07-mar-03	7.9	4140		9.06	11.70	28.12	0.56	1.20	3.34	15.63	28.86	2.52	181.26	141.59	646.81	21.82	36.00	203.74	750.34	1024.35	156.18
0218 O1	08-may-03	7.7	4510		10.16	13.72	29.61	0.57	0.48	3.76	16.11	32.24	1.24	203.12	166.06	681.08	22.13	14.40	229.36	773.09	1144.45	77.00
0218 O1	16-jul-03	7.1	5250		11.21	17.09	33.41	0.64	0.00	4.54	16.62	38.94	1.70	224.12	206.76	768.34	24.98	0.00	276.94	797.81	1382.26	105.59
0218 O1	25-ago-05	7.2	6500	59.45	15.49	22.20	36.18	0.81	0.00	3.01	27.72	34.55	10.53	309.80	268.65	832.22	31.53	0.00	183.57	1330.67	1226.55	652.82
0218 O1	02-feb-06	8.2	5850	58.89	14.92	18.71	33.76	0.73	0.18	4.66	23.68	31.19	8.03	298.40	226.38	776.39	28.63	5.49	284.01	1136.48	1107.32	498.10
0218 O1	06-abr-06	8.1	5580	58.06	14.92	18.71	29.95	0.61	0.00	4.55	20.50	27.35	9.79	298.40	226.38	688.74	23.92	0.00	277.31	984.12	971.07	606.91
0218 O1	08-jun-06	7.7	5620	55.01	14.11	17.19	29.32	0.57	0.00	4.76	21.92	28.07	8.77	282.20	207.99	674.44	22.32	0.00	290.52	1052.31	996.60	544.02
0218 O1	14-sep-06	7.3	5029	54.07	13.99	17.60	31.76	0.57	0.00	5.50	20.96	28.79	8.57	279.80	212.98	730.37	22.42	0.00	335.63	1006.19	1022.12	531.04
0389 TP	28-jul-92	7.7	7490	50.82	9.83	15.74	49.56	0.90	0.00	5.40	16.48	53.36	0.75	196.60	190.45	1139.88	34.99	0.00	329.40	790.90	1894.28	46.50
0389 TP	08-jul-97	7.6	6210	60.50	11.93	16.65	45.87	0.97		6.06	19.43	46.81	3.46	238.60	201.47	1055.01	37.73	0.00	369.66	932.59	1661.76	214.52
0389 TP	28-ago-97	7.6	5860	62.80	10.00	16.90	52.00	0.69		5.88	20.06	47.32	3.93	200.00	204.49	1196.00	26.98	0.00	358.68	962.69	1679.86	243.35
0389 TP	06-nov-97	8	6960	60.50	16.66	20.40	47.60	0.64		5.86	19.54	50.22	9.25	333.20	246.84	1094.80	25.02	0.00	357.46	937.97	1782.81	573.19

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ₂ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (me/l)	Mg ⁺⁺ (me/l)	Na ⁺ (me/l)	K ⁺ (me/l)	CO ₃ ⁻ (me/l)	HCO ₃ ⁻ (me/l)	SO ₄ ⁻ (me/l)	Cl ⁻ (me/l)	NO ₃ ⁻ (me/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	CO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
0389 TP	24-sep-98	8.3	8420	57.60	13.12	18.70	51.52	0.81	0.46	4.95	22.57	51.46	5.15	262.40	226.27	1184.96	31.67	13.80	301.95	1083.36	1826.83	319.30
0389 TP	28-abr-99	7.5	7280	54.33	12.81	20.55	44.34	0.65	0.00	5.44	22.00	53.43	4.33	256.20	248.66	1019.82	25.42	0.00	331.84	1056.00	1896.77	268.46
0389 TP	27-jul-99	7.9	7230	53.40	11.06	18.17	50.28	0.36	0.00	4.72	20.60	52.03	5.30	221.20	219.86	1156.44	14.19	0.00	287.92	988.80	1847.07	328.60
0389 TP	05-nov-99	8.1	7120	42.60	12.00	18.80	50.76	0.65	0.00	3.54	22.54	52.53	4.00	240.00	227.48	1167.48	25.42	0.00	215.94	1081.92	1864.82	248.00
0389 TP	02-mar-00	7.9	7990	72.56	10.17	17.56	49.83	0.52	0.36	5.58	27.15	53.60	5.04	203.40	212.45	1146.00	20.25	10.80	340.38	1303.00	1902.80	312.20
0389 TP	26-may-00			56.19	15.29	28.32	54.96	0.55			26.64	54.48		305.88	342.73	1263.97	21.50	0.00	0.00	1278.92	1934.20	0.00
0389 TP	26-may-00	7.6	9090	62.80	15.12	27.10	55.00	0.37	0.12	6.00	26.90	54.80	4.20	302.50	327.87	1265.00	14.50	3.60	366.00	1291.20	1945.40	260.40
0389 TP	12-sep-00	8.2	7880	5.10	9.12	16.74	40.74	0.52	0.75	4.35	21.75	48.00	1.87	182.34	202.50	937.00	20.39	22.50	265.35	1044.00	1704.00	115.92
0389 TP	06-dic-00	8.3	7840	11.28	12.35	22.77	61.43	0.48	0.45	4.35	21.75	53.00	2.65	246.91	275.53	1413.00	18.90	13.50	265.35	1044.00	1881.50	164.22
0389 TP	02-abr-01	8.1	10250	51.37	11.98	19.43	44.92	0.50		3.12	24.78	48.01	12.10	239.62	235.11	1033.08	19.70	0.00	190.32	1189.29	1704.33	750.13
0389 TP	12-nov-01	8.2	5830	146.74	17.50	29.23	59.66	0.35		2.36	25.32	51.05	4.28	350.00	353.68	1372.18	13.69	0.00	143.96	1215.36	1812.28	265.36
0389 TP	13-feb-02	8	8073		12.50	18.17	51.82	0.46		5.90	19.22	50.20	5.96	250.00	219.88	1191.80	18.12	0.00	360.14	922.52	1781.96	369.33
0389 TP	13-feb-02	8.6	5690	352.97	19.36	32.56	62.32	0.25		2.95	21.78	52.23	5.00	387.20	393.98	1433.36	9.78	0.00	179.95	1045.44	1854.17	310.00
0389 TP	25-ago-05	8.2	6280	63.32	7.10	15.23	42.63	0.46	0.00	3.84	16.62	38.63	5.86	141.90	184.30	980.49	17.82	0.00	234.19	797.52	1371.41	363.34
0389 TP	03-feb-06	8.3	6230	62.32	8.19	14.76	42.19	0.44	0.23	5.14	16.37	36.71	6.47	163.80	178.60	970.28	17.32	6.99	313.33	785.94	1303.23	401.28
0389 TP	07-abr-06	8.2	5850	60.52	7.36	13.38	39.96	0.42	0.08	5.16	15.73	34.07	6.47	147.10	161.91	919.06	16.42	2.40	314.83	755.19	1209.53	401.28
0389 TP	09-jun-06	7.7	5950	83.83	12.03	21.12	35.01	0.53	0.00	4.25	38.36	21.79	6.78	240.61	255.53	805.29	20.69	0.00	259.35	1841.05	773.72	420.24
0389 TP	15-sep-06	7.5	5585	55.31	8.55	15.38	42.62	0.41	0.00	5.35	16.51	39.35	6.67	170.90	186.10	980.19	16.22	0.00	326.53	792.33	1396.93	413.25
0391 TP	05-ago-92	7.9	2850	64.20	5.40	9.59	23.63	0.33	0.00	3.16	18.77	14.70	1.08	108.00	116.04	543.49	12.98	0.00	192.76	900.96	521.85	66.65
0391 TP	27-jul-99	7.9	5750	75.50	11.24	19.70	37.00	0.30	0.00	3.62	33.53	26.76	7.05	224.80	238.37	851.00	11.73	0.00	220.82	1609.44	949.98	437.10
0391 TP	25-ago-05	8.5	6140	91.93	13.74	23.18	37.36	0.70	0.54	3.50	43.24	22.99	6.44	274.80	280.45	859.33	27.23	16.18	213.59	2075.67	816.30	399.28
0391 TP	03-feb-06	8.2	6020	88.98	12.40	22.23	36.87	0.67	0.12	4.19	41.31	22.79	3.64	248.00	268.95	847.92	26.02	3.50	255.50	1982.82	809.19	225.59
0391 TP	07-abr-06	8.3	6010	86.20	12.13	21.66	37.28	0.63	0.30	3.84	37.81	23.51	7.49	242.50	262.06	857.53	24.82	8.99	234.29	1814.69	834.72	464.16
0391 TP	09-jun-06	7.8	5680	54.94	7.19	12.62	38.54	0.38	0.00	5.30	15.17	34.59	5.80	143.82	152.72	886.48	14.85	0.00	323.12	728.13	1228.01	359.35
0391 TP	15-sep-06	7.5	5275	84.73	12.09	21.89	37.21	0.56	0.00	5.05	32.61	27.59	7.63	241.80	264.86	855.83	22.02	0.00	308.22	1565.49	979.58	473.15
0774 TP	23-abr-99	7.4	7700	50.10	23.50	29.30	43.91	0.68	0.00	4.80	34.91	51.46	6.68	470.00	354.53	1009.93	26.59	0.00	292.80	1675.68	1826.83	414.16
0774 TP	27-jul-99	8.0	7770	48.80	19.84	27.82	46.84	0.42	0.00	4.18	36.02	48.31	9.04	396.80	336.62	1077.32	16.42	0.00	254.98	1728.96	1715.01	560.48
0774 TP	10-nov-99	7.8	7360	47.72	17.60	28.30	49.40	0.74		2.36	38.58	48.56	7.00	352.00	342.43	1136.20	28.93	0.00	143.96	1851.84	1723.88	434.00
0774 TP	01-mar-00	7.9	7920	134.30	17.14	23.73	35.06	0.52	0.54	4.56	23.79	53.20	1.30	342.72	287.07	806.38	20.41	16.20	278.16	1142.00	1888.60	80.60

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ₂ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (me/l)	Mg ⁺⁺ (me/l)	Na ⁺ (me/l)	K ⁺ (me/l)	CO ₃ ⁻ (me/l)	HCO ₃ ⁻ (me/l)	SO ₄ ⁻ (me/l)	Cl ⁻ (me/l)	NO ₃ ⁻ (me/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	CO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
0774 TP	24-may-00	7.3	6090	104.60	8.75	16.39	38.20	0.55	0.00	5.04	25.23	40.00	1.70	174.96	198.32	878.51	21.58	0.00	307.44	1211.00	1420.00	105.40
0774 TP	13-sep-00	7.6	7780	2.91	12.86	19.71	31.57	0.13	0.00	4.50	22.50	50.00	1.95	257.29	238.52	726.00	4.94	0.00	274.50	1080.00	1775.00	120.75
0774 TP	06-dic-00	7.8	7910	7.28	15.72	25.90	53.09	0.51	0.00	5.40	27.00	53.00	3.14	314.47	313.35	1221.00	20.01	0.00	329.40	1296.00	1881.50	194.53
0774 TP	31-mar-01	7.7	9690	32.33	14.79	23.97	45.80	0.56		3.24	36.50	88.81	9.36	295.71	290.06	1053.51	21.96	0.00	197.64	1751.79	3152.69	580.51
0774 TP	13-nov-01	8.4	5320	240.63	10.36	19.48	53.46	0.67		3.24	20.48	45.30	4.34	207.20	235.71	1229.58	26.20	0.00	197.64	983.04	1608.15	269.08
0774 TP	12-feb-02	7.6	8593		16.40	21.15	50.68	0.52		5.90	22.88	50.48	6.28	328.00	255.86	1165.58	20.42	0.00	360.14	1098.24	1791.97	389.30
0774 TP	12-feb-02	8.1	5850	344.48	9.84	18.75	27.89	0.04		2.47	31.81	50.92	2.42	196.80	226.88	641.47	1.56	0.00	150.67	1526.88	1807.66	150.04
0774 TP	25-ago-05	8.1	7040	53.47	12.79	22.62	44.37	0.66	0.00	2.22	30.19	40.31	8.10	255.80	273.65	1020.41	25.72	0.00	135.65	1449.18	1431.07	502.09
0774 TP	06-abr-06	8.1	4080	39.82	6.88	8.72	25.00	0.43	0.00	3.26	10.74	24.24	3.33	137.60	105.54	575.09	16.82	0.00	198.68	515.47	860.35	206.63
0774 TP	08-jun-06	7.6	4870	36.11	9.64	11.86	27.88	0.42	0.00	3.30	14.02	29.59	3.53	192.87	143.46	641.18	16.40	0.00	201.35	672.92	1050.55	218.61
0774 TP	14-sep-06	7.4	6160	38.08	16.24	21.01	39.78	0.54	0.00	4.27	22.47	42.95	7.16	324.70	254.26	914.86	21.22	0.00	260.60	1078.37	1524.68	444.20
0779 TP	29-jul-92	7.8	4440	50.29	11.57	15.65	19.80	0.41	0.00	5.36	18.40	20.16	3.25	231.40	189.37	455.40	16.03	0.00	326.96	883.20	715.68	201.50
0779 TP	09-mar-95	8.1	4410	62.00	11.55	15.70	24.82	0.52		5.04	19.20	25.35	3.90	231.00	189.97	570.86	20.14	0.00	307.44	921.60	899.93	241.80
0779 TP	03-may-95	7.5	4730	64.20	13.20	24.80	22.04	0.36		5.00	19.32	28.83	5.95	264.00	300.08	506.92	14.08	0.00	305.00	927.36	1023.47	368.90
0779 TP	24-ago-95	7.9	4760	72.00	11.60	16.50	22.00	0.34		5.19	18.00	24.66	2.09	232.00	199.65	506.00	13.37	0.00	316.59	864.00	875.43	129.58
0779 TP	07-nov-95	7.4	4690	68.00	12.25	22.69	18.59	0.15		4.63	18.90	28.24	2.95	245.00	274.55	427.57	5.87	0.00	282.43	907.20	1002.52	182.90
0779 TP	21-feb-97	7.7	4470	63.90	13.10	14.75	22.70	0.37		5.72	18.65	21.94	4.13	262.00	178.48	522.10	14.47	0.00	348.92	894.96	778.87	256.06
0779 TP	08-may-97	7.7	4220	53.00	11.62	16.29	21.08	0.34		5.03	19.52	22.53	3.70	232.40	197.11	484.84	13.29	0.00	306.83	936.91	799.82	229.40
0779 TP	27-ago-97	8.1	4390	51.35	13.56	18.09	21.11	0.35		3.19	18.63	26.81	2.42	271.20	218.89	485.53	13.49	0.00	194.59	894.00	951.76	150.04
0779 TP	06-nov-97	8.0	4420	25.60	15.09	18.00	22.71	0.50		5.26	19.78	24.73	4.72	301.80	217.80	522.33	19.55	0.00	320.86	949.49	877.92	292.64
0779 TP	17-feb-98	8.2	3810	56.70	11.50	17.01	19.80	0.50		4.86	18.34	21.04	3.20	230.00	205.82	455.40	19.55	0.00	296.46	880.32	746.92	198.40
0779 TP	25-mar-98	8.1	3880	58.30	11.32	16.20	20.70	0.42		5.00	18.22	21.26	3.33	226.40	196.02	476.10	16.23	0.00	305.00	874.56	754.73	206.46
0779 TP	20-may-98	8.2	3390	47.35	10.72	15.00	16.96	0.14		4.80	17.25	18.31	2.68	214.40	181.50	390.08	5.47	0.00	292.80	828.00	650.01	166.16
0779 TP	24-sep-98	8.0	4190	67.70	14.43	16.39	20.00	0.47	0.00	5.14	19.74	21.52	4.14	288.60	198.32	460.00	18.38	0.00	313.54	947.52	763.96	256.68
0779 TP	23-abr-99	7.8	4770	59.90	14.03	19.53	19.67	0.42	0.00	4.39	18.28	29.69	3.48	280.60	236.31	452.41	16.42	0.00	267.79	877.44	1054.00	215.76
0779 TP	27-jul-99	7.9	4450	54.80	13.60	19.20	19.60	0.42	0.00	3.85	18.08	27.74	4.66	272.00	232.32	450.80	16.42	0.00	234.85	867.84	984.77	288.92
0779 TP	10-nov-99	8.3	4940	55.42	15.75	22.50	22.28	0.47	0.31	2.75	20.33	33.69	3.45	315.00	272.25	512.44	18.38	9.30	167.75	975.84	1196.00	213.90
0779 TP	01-mar-00	7.7	5860	128.90	15.19	22.41	19.07	0.32	0.36	4.20	25.17	41.60	1.70	303.80	271.16	438.61	12.59	10.80	256.20	1208.00	1476.80	105.40
0779 TP	23-may-00	7.6	6180	138.85	16.06	21.83	20.69	0.32	0.30	3.90	19.10	39.40	1.91	321.16	264.19	475.90	12.37	9.00	237.90	916.80	1398.70	118.13

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ₂ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (meq/l)	Mg ⁺⁺ (meq/l)	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺ (meq/l)	CO ₃ ⁻ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	SO ₄ ⁻ (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	NO ₃ ⁻ (meq/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	CO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
0779 TP	23-may-00			56.27	17.84	24.16	23.68	0.34			17.69	36.09		356.83	292.28	544.59	13.27	0.00	0.00	849.12	1281.25	0.00
0779 TP	15-sep-00	7.9	5220		15.71	24.95	26.00	0.37	0.56	1.94	18.12	46.77	1.42	314.12	301.86	598.05	14.51	16.83	118.34	869.66	1660.16	87.98
0779 TP	06-dic-00	7.6	6470	8.37	20.38	29.75	24.57	0.31	0.00	4.20	21.00	40.00	1.36	407.68	359.92	565.20	12.20	0.00	256.20	1008.00	1420.00	84.21
0779 TP	06-dic-00	7.8	5430		17.93	27.72	23.72	0.37	0.28	1.78	21.50	46.87	1.70	358.54	335.45	545.51	14.58	8.40	108.58	1032.14	1663.71	105.59
0779 TP	31-mar-01	7.7	8840	61.24	16.23	22.77	20.03	0.36		2.49	22.17	72.04	6.68	324.55	275.52	460.77	14.01	0.00	151.89	1064.29	2557.24	414.10
0779 TP	31-mar-01	8.1	5380		14.20	24.14	22.51	0.34	0.20	0.92	17.15	41.39	0.14	283.94	292.14	517.75	13.22	6.00	56.12	823.15	1469.42	8.80
0779 TP	13-nov-01	7.9	6110		15.39	23.90	18.62	0.30	0.00		15.27	43.78	0.14	307.88	289.17	428.21	11.53	0.00	0.00	732.82	1554.19	8.37
0779 TP	13-nov-01	8.1	5450	286.13	13.50	14.61	30.29	0.02		2.06	10.11	54.06	3.39	270.00	176.78	696.67	0.78	0.00	125.66	485.28	1919.13	210.18
0779 TP	12-feb-02	8.1	4990	380.83	21.50	21.92	34.40	0.18		2.38	21.64	49.48	4.19	430.00	265.23	791.20	7.04	0.00	145.18	1038.72	1756.54	259.78
0779 TP	12-nov-02	7.8	6600		21.35	30.85	22.87	0.39	0.20	1.04	16.66	56.72	0.16	426.96	373.32	526.01	15.37	6.00	63.44	799.68	2013.38	10.11
0779 TP	12-nov-02	9.0	7080	246.45	18.33	26.86	16.00	0.61	0.00	2.67	28.14	43.46	1.77	366.60	325.01	368.00	23.85	0.00	162.87	1350.72	1542.83	109.74
0779 TP	11-ene-03	8.1	5570		15.47	24.54	24.26	0.38	0.76	2.84	19.44	43.28	1.92	309.32	296.87	558.03	14.90	22.80	173.24	932.93	1536.55	118.79
0779 TP	07-mar-03	7.8	5420		14.61	23.87	25.92	0.40	0.88	3.64	18.72	40.60	3.05	292.18	288.83	596.05	15.60	26.40	222.04	898.51	1441.16	189.16
0779 TP	08-may-03	7.8	4430		12.59	17.67	22.69	0.38	1.04	2.19	17.15	32.34	3.26	251.88	213.76	521.76	14.86	31.20	133.71	823.39	1148.00	202.37
0779 TP	16-jul-03	7.1	4330		11.95	17.85	22.44	0.42	0.00	3.18	16.77	27.07	4.36	238.92	215.94	516.12	16.38	0.00	193.98	805.15	960.91	270.57
0779 TP	25-ago-05	8.1	4460	54.28	11.90	16.35	21.88	0.44	0.00	2.80	20.38	22.07	5.91	238.00	197.89	503.35	17.32	0.00	170.97	978.43	783.66	366.34
0779 TP	03-feb-06	8.1	1758	39.54	3.90	4.70	8.40	0.22	0.00	2.74	5.46	7.90	1.69	77.90	56.87	193.30	8.61	0.00	166.97	261.88	280.41	104.81
0779 TP	06-abr-06	8.3	4010	47.97	12.88	15.16	17.62	0.43	0.30	4.02	17.00	18.96	5.73	257.60	183.40	405.20	16.92	9.09	245.30	815.99	672.94	355.36
0779 TP	08-jun-06	7.7	4360	46.65	13.26	15.90	20.19	0.39	0.00	5.03	21.49	19.00	5.99	265.23	192.40	464.43	15.07	0.00	306.70	1031.65	674.34	371.33
0779 TP	14-sep-06	7.5	3894	47.82	12.50	15.35	21.23	0.38	0.00	5.41	19.45	18.48	6.25	250.00	185.70	488.24	14.91	0.00	330.13	933.80	655.92	387.30
2714 TP	21-jul-92	7.9	1750	24.61	3.85	4.52	11.35	0.25	0.00	3.44	2.03	14.06	0.05	77.00	54.69	261.05	9.78	0.00	209.84	97.44	499.13	3.10
2714 TP	03-may-95	7.7	3390	36.30	6.20	12.60	12.82	0.36		3.83	5.71	21.87	0.45	124.00	152.46	294.86	14.08	0.00	233.63	274.08	776.39	28.02
2714 TP	21-feb-97	7.7	3260	37.30	5.72	6.90	18.66	0.47		3.80	5.10	22.34	0.55	114.40	83.49	429.18	18.38	0.00	231.80	244.85	793.07	34.10
2714 TP	09-jul-97	7.8	3450	32.90	7.15	10.44	21.09	0.49		3.70	7.06	28.08	0.52	143.00	126.32	485.07	19.16	0.00	225.70	338.69	996.84	32.24
2714 TP	27-ago-97	8.2	2340	28.90	5.32	5.46	15.30	0.35		5.05	3.82	16.45	0.33	106.40	66.07	351.90	13.69	0.00	308.05	183.41	583.98	20.46
2714 TP	06-nov-97	7.9	3780	33.80	7.28	9.90	20.10	0.43		3.57	6.69	27.35	0.46	145.60	119.79	462.30	16.97	0.00	217.77	321.17	970.93	28.52
2714 TP	17-feb-98	8.3	3010	34.80	6.26	8.76	18.00	0.67	0.80	3.14	5.58	23.74	0.41	125.20	106.00	414.00	26.20	24.00	191.54	267.84	842.77	25.67
2714 TP	24-mar-98	8.3	2510	33.50	4.75	6.60	16.26	0.47	1.03	2.83	4.87	18.90	1.11	95.00	79.86	373.98	18.38	30.90	172.63	233.76	670.95	68.70
2714 TP	19-may-98	8.2	2310	29.60	4.40	6.19	14.21	0.36		4.08	4.07	16.93	0.21	88.00	74.90	326.83	14.08	0.00	248.88	195.36	601.02	13.02

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ₂ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (meq/l)	Mg ⁺⁺ (meq/l)	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺ (meq/l)	CO ₃ ⁻ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	SO ₄ ⁻ (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	NO ₃ ⁻ (meq/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	CO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
2714 TP	24-sep-98	8.3	3650	37.94	7.65	9.70	18.25	0.56	0.30	3.50	6.22	25.91	0.61	153.00	117.37	419.75	21.70	9.00	213.50	298.56	919.81	37.63
2714 TP	23-abr-99	7.7	2760	34.20	5.45	6.82	15.74	0.43	0.00	4.59	4.26	20.28	0.19	109.00	82.52	362.02	16.81	0.00	279.99	204.48	719.94	11.78
2714 TP	20-jul-99	8.2	2250	29.75	4.38	6.04	13.12	0.31	0.13	3.14	3.02	16.73		87.60	73.08	301.76	12.12	3.90	191.54	144.96	593.92	0.00
2714 TP	04-nov-99	8.2	3310	30.65	5.74	8.80	20.30	0.39	0.13	3.26	6.39	24.67	0.40	114.80	106.48	466.90	15.25	3.90	198.86	306.72	875.79	24.80
2714 TP	01-mar-00	8.2	3120	137.00	4.26	6.48	16.60	0.24	0.24	4.56	1.08	22.40	1.60	85.10	78.44	381.80	9.46	7.20	278.16	52.00	795.20	99.20
2714 TP	16-may-00	8	3760	89.90	5.58	9.08	21.54	0.30	0.54	3.30	5.80	23.20	1.50	111.68	109.86	495.40	11.87	16.20	201.30	278.40	823.60	93.00
2714 TP	16-may-00			34.38	6.25	9.62	21.28	0.33			6.64	23.46		124.99	116.43	489.45	13.09	0.00	0.00	318.51	832.76	0.00
2714 TP	20-sep-00	7.5	4590	10.19	8.51	14.68	27.58	0.41	0.60	5.10	25.50	31.00	0.29	170.26	177.62	634.30	16.12	18.00	311.10	1224.00	1100.50	18.02
2714 TP	20-sep-00	8.0	3920		6.72	13.21	26.23	0.40	0.40	2.54	8.33	35.32	0.71	134.46	159.85	603.29	15.68	12.00	154.94	399.65	1253.97	44.02
2714 TP	10-dic-00	8.0	3700		6.12	11.81	24.66	0.39	0.44	2.56	7.64	32.54	0.50	122.40	142.95	567.27	15.05	13.20	156.16	366.82	1155.06	30.81
2714 TP	10-dic-00	8	4270	14.56	6.37	10.72	19.11	0.22	0.00	4.20	21.00	34.00	0.36	127.45	129.66	439.50	8.62	0.00	256.20	1008.00	1207.00	22.12
2714 TP	04-abr-01	8.0	5810	40.80	4.91	7.86	17.47	0.26		2.34	5.62	50.17	2.53	98.10	95.16	401.88	10.32	0.00	142.74	269.64	1780.99	156.90
2714 TP	04-abr-01	8.2	3050		3.23	9.57	22.20	0.36	0.48	1.56	6.35	26.87	0.71	64.50	115.76	510.62	13.96	14.43	95.16	304.75	953.71	44.02
2714 TP	16-nov-01	8.3	3480	254.57	15.60	21.92	34.38	0.13		2.24	5.99	41.24	0.92	312.00	265.23	790.74	5.08	0.00	136.64	287.52	1464.02	57.04
2714 TP	16-nov-01	8.2	3650		4.92	11.78	23.34	0.41	0.00		8.17	32.84	0.99	98.30	142.59	536.80	15.99	0.00	0.00	392.21	1165.64	61.63
2714 TP	15-feb-02	8.1	1882	310.89	21.56	34.10	18.18	0.00		2.65	0.91	18.73	0.23	431.20	412.61	418.14	0.00	0.00	161.65	43.68	664.92	14.26
2714 TP	15-feb-02	8.5	2010		1.70	5.34	14.43	0.26	0.68	2.40	3.67	15.42	0.50	33.90	64.55	331.84	10.13	20.43	146.28	176.26	547.52	30.81
2714 TP	12-nov-02	9.2	3680	104.51	5.09	8.40	14.10	0.49	0.00	3.55	10.76	43.46	1.75	101.80	101.64	324.30	19.16	0.00	216.55	516.48	1542.83	108.50
2714 TP	11-ene-03	8.1	1940		3.64	4.64	13.93	0.23	1.00	3.60	4.26	13.43	0.27	72.76	56.10	320.41	9.15	30.00	219.60	204.58	476.87	16.74
2714 TP	07-mar-03	7.6	3160		3.80	5.03	14.01	0.23	1.24	3.92	4.28	13.43	0.08	76.04	60.86	322.16	8.99	37.20	239.12	205.54	476.87	4.84
2714 TP	08-may-03	7.9	2410		4.08	6.33	16.04	0.26	0.84	4.08	5.86	17.21	0.20	81.68	76.64	368.92	10.28	25.20	248.88	281.47	611.10	12.34
2714 TP	16-jul-03	7.4	2600		4.19	7.14	17.90	0.29	0.00	4.38	5.14	19.39	0.22	83.70	86.36	411.59	11.22	0.00	267.18	246.77	688.42	13.64
2714 TP	25-ago-05	8.3	2330	37.56	2.18	5.15	14.46	0.28	0.14	3.03	3.80	15.00	0.21	43.50	62.37	332.67	10.91	4.10	184.87	182.61	532.38	12.98
2714 TP	02-feb-06	8.3	2170	36.04	3.28	4.41	12.98	0.26	0.21	3.59	3.41	13.82	0.21	65.60	53.37	298.55	10.31	6.19	219.09	163.54	490.64	12.98
2714 TP	06-abr-06	8.5	1613	34.74	2.04	2.82	9.74	0.19	0.23	3.00	2.30	9.40	0.14	40.70	34.08	224.11	7.31	6.89	183.07	110.42	333.67	8.98
2714 TP	08-jun-06	7.8	2170	33.16	3.20	4.50	12.93	0.23	0.00	4.25	3.31	13.53	0.32	64.08	54.48	297.32	9.17	0.00	259.27	158.80	480.42	19.64
2714 TP	14-sep-06	7.8	2460	33.33	4.24	6.53	15.98	0.27	0.00	4.51	3.87	17.99	0.34	84.70	78.96	367.58	10.71	0.00	275.21	185.90	638.80	20.96
2860 TP	28-jul-92	8.1	1253	37.45	3.27	6.62	5.56	0.07	0.00	5.80	2.70	6.43	0.10	65.40	80.10	127.88	2.78	0.00	353.80	129.60	228.27	6.20
2860 TP	14-jun-99	8.3	1587	56.80	3.53	7.70	7.21	0.12	0.70	5.54	4.23	6.81	0.78	70.60	93.17	165.83	4.61	21.00	337.94	203.04	241.76	48.42

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ₂ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (me/l)	Mg ⁺⁺ (me/l)	Na ⁺ (me/l)	K ⁺ (me/l)	CO ₃ ⁻ (me/l)	HCO ₃ ⁻ (me/l)	SO ₄ ⁻ (me/l)	Cl ⁻ (me/l)	NO ₃ ⁻ (me/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	CO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
2860 TP	25-ago-05	8.4	1611	71.65	2.52	7.03	6.56	0.09	0.31	4.32	3.18	7.49	1.18	50.40	85.05	150.98	3.60	9.39	263.31	152.76	265.79	72.87
2860 TP	03-feb-06	8.2	1734	72.11	3.89	7.29	6.56	0.08	0.11	6.24	3.72	7.00	1.16	77.70	88.15	150.88	3.30	3.20	380.65	178.61	248.47	71.87
2860 TP	07-abr-06	8.6	1715	71.23	3.78	7.05	6.43	0.08	1.56	4.69	3.38	7.00	0.97	75.60	85.25	147.97	3.10	46.75	286.21	162.44	248.47	59.89
2860 TP	09-jun-06	8.1	11370	58.73	24.00	41.95	53.53	1.29	0.00	8.08	13.06	103.18	0.93	479.91	507.55	1231.28	50.26	0.00	493.17	626.80	3662.74	57.96
2860 TP	15-sep-06	7.6	1349	36.11	3.14	6.02	5.81	0.07	0.00	5.93	2.29	6.24	0.87	62.70	72.86	133.57	2.70	0.00	361.84	109.82	221.44	53.90
4823 TP	29-jul-92	8.5	1130	74.36	0.64	1.36	10.37	0.13	0.16	5.20	1.19	6.14	0.05	12.80	16.46	238.51	5.04	4.80	317.20	57.12	217.97	3.10
4823 TP	06-sep-99	8.3	1183	75.00	0.62	1.20	10.00	0.14	0.60	3.70	1.53	5.83	0.33	12.40	14.52	230.00	5.47	18.00	225.70	73.44	206.97	20.46
4823 TP	02-feb-06	8.1	886	81.25	0.66	1.16	6.06	0.16	0.00	2.30	0.73	4.80	0.27	13.10	13.99	139.37	6.41	0.00	140.16	34.94	170.39	16.97
4823 TP	06-abr-06	8.5	1171	87.59	0.76	1.44	8.30	0.15	0.22	2.69	1.05	6.60	0.31	15.10	17.39	190.90	6.01	6.59	164.17	50.42	234.26	18.97
4823 TP	08-jun-06	8.7	1182	81.96	0.58	1.08	8.91	0.10	0.36	3.15	0.96	6.24	0.35	11.60	13.07	205.01	3.99	10.78	192.23	45.93	221.46	21.92
4823 TP	14-sep-06	8.0	1159	80.19	0.76	1.42	9.85	0.12	0.00	4.39	1.44	6.24	0.35	15.20	17.19	226.51	4.60	0.00	267.91	69.09	221.44	21.96
4826 TP	23-jul-92	7.9	2800	34.24	7.75	11.90	18.41	0.20	0.00	3.60	10.23	23.32	0.40	155.00	143.99	423.43	7.98	0.00	219.60	491.04	827.86	24.80
4826 TP	09-mar-95	8.2	5450	51.00	9.50	16.86	36.00	0.57		4.56	16.36	40.77	1.50	190.00	204.01	828.00	22.17	0.00	278.16	785.28	1447.34	93.00
4826 TP	04-may-95	7.5	4620	49.20	8.80	16.20	13.91	0.46		4.33	13.51	18.39	2.50	176.00	196.02	319.93	17.99	0.00	264.13	648.48	652.85	155.00
4826 TP	21-feb-97	7.5	1820	39.70	4.97	3.86	9.00	0.29		3.11	3.06	11.18	0.64	99.40	46.71	207.00	11.34	0.00	189.71	146.78	396.89	39.49
4826 TP	09-jul-97	7.9	2520	37.50	6.40	7.46	12.69	0.33		3.44	6.73	16.00	0.67	128.00	90.27	291.87	12.98	0.00	209.84	322.99	568.00	41.54
4826 TP	29-ago-97	8.0	5740	43.70	12.00	18.91	30.93	0.64		4.41	15.94	39.91	0.92	240.00	228.81	711.39	25.02	0.00	269.01	764.88	1416.81	57.04
4826 TP	06-nov-97	7.9	4280	38.80	8.50	13.90	29.24	0.45		3.95	12.08	34.00	1.58	170.00	168.19	672.52	17.48	0.00	240.95	579.89	1207.00	98.15
4826 TP	17-feb-98	8.2	1777	35.80	5.68	5.26	7.60	0.34		2.72	4.19	11.38	0.64	113.60	63.65	174.80	13.29	0.00	165.92	201.12	403.99	39.68
4826 TP	25-mar-98	8.2	2550	46.20	7.18	8.65	12.17	0.42		3.27	6.67	17.80	0.70	143.60	104.67	279.91	16.42	0.00	199.47	320.16	631.90	43.59
4826 TP	20-may-98	8.1	4710	44.10	10.00	16.70	27.71	0.48		4.39	13.83	35.63	3.10	200.00	202.07	637.33	18.77	0.00	267.79	663.84	1264.87	192.20
4826 TP	24-sep-98	8.3	4810	44.40	11.12	14.54	21.50	0.56	0.40	3.50	12.16	30.19	1.33	222.40	175.93	494.50	21.70	12.00	213.50	583.68	1071.75	82.46
4826 TP	23-abr-99	7.6	4870	47.50	11.90	17.47	24.67	0.54	0.00	6.29	14.28	35.38	1.35	238.00	211.39	567.41	21.11	0.00	383.69	685.44	1255.99	83.70
4826 TP	05-jul-99	8.1	2530	39.60	8.43	9.16	10.39	0.36	0.00	2.60	7.48	17.05	1.13	168.60	110.84	238.97	14.08	0.00	158.60	359.04	605.28	70.06
4826 TP	09-nov-99	8.1	4790	40.50	10.91	18.22	26.76	0.50	0.00	2.91	16.86	34.67	2.14	218.20	220.46	615.48	19.55	0.00	177.51	809.28	1230.79	132.68
4826 TP	01-mar-00	7.9	5230	104.60	9.08	15.75	19.80	0.30	0.42	4.20	20.63	35.60	0.90	181.64	190.55	455.40	11.89	12.60	256.20	990.00	1263.80	55.80
4826 TP	16-may-00			42.30	11.64	17.95	26.92	0.36			15.17	31.71		232.83	217.21	619.19	14.07	0.00	0.00	728.37	1125.85	0.00
4826 TP	16-may-00	7.8	5370	45.60	10.56	17.23	27.17	0.21	0.96	2.64	16.80	34.20	1.30	211.18	208.47	624.90	8.38	28.80	161.04	806.40	1214.10	80.60
4826 TP	20-sep-00	7.9	5370		11.47	23.09	34.39	0.45	0.56	0.64	22.32	47.26	0.07	229.30	279.44	790.88	17.40	16.83	39.04	1071.46	1677.84	4.40

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ₂ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (me/l)	Mg ⁺⁺ (me/l)	Na ⁺ (me/l)	K ⁺ (me/l)	CO ₃ ⁻ (me/l)	HCO ₃ ⁻ (me/l)	SO ₄ ⁻ (me/l)	Cl ⁻ (me/l)	NO ₃ ⁻ (me/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	CO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
4826 TP	20-sep-00	7.9	6260	7.28	10.30	19.42	32.00	0.43	0.60	4.35	21.75	44.00	6.24	205.99	235.03	736.10	16.71	18.00	265.35	1044.00	1562.00	387.10
4826 TP	11-dic-00	8.2	6760	16.02	13.16	23.61	35.67	0.31	0.45	3.75	18.75	43.00	1.38	263.17	285.68	820.30	11.94	13.50	228.75	900.00	1526.50	85.54
4826 TP	11-dic-00	7.9	5590		10.90	45.25	30.11	0.44	0.48	1.08	30.56	14.26	0.15	218.06	547.46	692.58	17.13	14.43	65.88	1467.02	506.34	9.24
4826 TP	04-abr-01	8.0	5700		10.11	46.11	29.91	0.16	0.48	1.12	20.55	48.76	0.99	202.10	557.92	687.84	6.30	14.43	68.32	986.40	1730.80	61.63
4826 TP	04-abr-01	7.9	8840	62.83	12.38	20.97	38.44	0.37		2.73	24.40	64.29	4.24	247.51	253.73	884.03	14.30	0.00	166.53	1171.43	2282.38	262.90
4826 TP	15-nov-01	8.1	4570	348.48	13.32	9.74	41.54	0.00		1.41	17.81	47.52	1.78	266.40	117.85	955.42	0.00	0.00	86.01	854.88	1686.96	110.36
4826 TP	12-feb-02	8.1	1904	324.12	11.90	19.48	13.64	0.13		1.77	4.93	14.94	0.74	238.00	235.71	313.72	5.08	0.00	107.97	236.64	530.37	45.88
4826 TP	12-feb-02	8.1	1960		5.00	14.60	9.30	0.30	4.81	1.02	4.93	17.41	0.09	99.92	176.64	213.85	11.69	144.15	62.22	236.69	618.16	5.70
4826 TP	11-ene-03	7.8	2080		6.89	6.11	10.65	0.29	0.40	2.02	5.56	14.03	1.55	137.88	73.94	244.86	11.26	12.00	123.22	266.64	498.07	96.35
4826 TP	07-mar-03	7.8	4530		9.61	16.82	28.32	0.37	0.45	3.74	14.78	33.83	1.33	192.18	203.56	651.31	14.58	13.44	227.90	709.20	1200.97	82.71
4826 TP	08-may-03	7.7	2870		9.10	10.22	13.47	0.31	0.52	2.82	9.45	19.90	1.49	181.92	123.67	309.81	12.20	15.60	172.02	453.60	706.45	92.38
4826 TP	16-jul-03	7.1	4030		9.29	14.42	23.09	0.36	0.00	4.00	12.79	28.68	0.89	185.74	174.46	531.00	14.19	0.00	244.00	614.06	1018.28	55.43
4826 TP	25-ago-05	7.7	1969	40.64	5.86	5.57	8.05	0.27	0.00	3.01	4.24	11.13	1.11	117.20	67.36	185.09	10.61	0.00	183.47	203.47	395.23	68.88
4826 TP	02-feb-06	8.3	743	32.39	1.42	1.41	4.22	0.13	0.08	2.25	1.21	3.55	0.21	28.30	17.09	97.15	5.20	2.50	137.15	58.21	126.04	12.98
4826 TP	07-abr-06	8.4	869	34.78	1.82	1.65	4.52	0.15	0.13	2.46	1.59	3.80	0.29	36.40	19.99	104.05	5.71	4.00	149.86	76.18	134.85	17.97
4826 TP	09-jun-06	8.4	1364	36.36	3.54	3.24	5.85	0.19	0.18	2.64	2.91	7.01	0.53	70.84	39.25	134.65	7.53	5.43	160.92	139.78	248.72	32.84
4826 TP	14-sep-06	7.2	2027	42.67	6.35	7.01	8.71	0.25	0.00	3.11	4.80	13.05	1.32	127.00	84.85	200.30	9.81	0.00	189.78	230.63	463.41	81.85
48588TP	03-ago-92	7.7	2000	32.10	7.33	6.06	11.37	0.26	0.00	3.04	7.00	13.52	1.17	146.60	73.33	261.51	10.32	0.00	185.44	336.00	479.96	72.66
48588TP	08-jul-97	7.6	2920	38.00	8.82	8.59	16.63	0.47		3.54	8.69	20.20	1.91	176.40	103.94	382.49	18.38	0.00	215.94	416.93	717.10	118.42
48588TP	28-ago-97	7.5	2740	35.30	8.62	8.18	17.12	0.84		3.36	9.17	20.70	1.44	172.40	98.98	393.76	32.84	0.00	204.96	440.11	734.85	88.97
48588TP	06-nov-97	8.0	3750	43.00	11.95	11.06	18.70	0.54		4.78	9.25	26.98	1.46	239.00	133.83	430.10	21.11	0.00	291.58	443.86	957.79	90.64
48588TP	24-sep-98	8.0	4710	39.73	16.78	15.52	23.00	0.64	0.00	3.11	11.08	38.11	1.47	335.60	187.79	529.00	25.02	0.00	189.71	531.84	1352.91	91.14
48588TP	22-abr-99	7.1	7840	44.00	28.25	26.31	33.04	0.98	0.00	3.68	15.20	69.29	0.56	565.00	318.35	759.92	38.12	0.00	224.48	729.60	2459.80	34.72
48588TP	29-jun-99	8.9	6490	17.26	22.12	20.76	30.87	0.74	1.50	1.32	12.81	60.00	1.05	442.40	251.20	710.01	28.74	45.00	80.52	614.88	2130.00	65.10
48588TP	08-nov-99	7.9	13930	30.00	52.18	53.19	68.80	1.32	0.00	2.36	30.09	138.76	3.67	1043.60	643.60	1582.40	51.61	0.00	143.96	1444.32	4925.98	227.54
48588TP	28-feb-00	7.6	15490	83.00	38.73	48.13	71.87	0.93	0.30	4.68	29.52	141.60	1.20	774.66	582.41	1653.01	36.32	9.00	285.48	1417.00	5026.80	74.40
48588TP	24-may-00	7.7	15100	63.31	47.43	49.81	81.48	0.82	0.00	4.14	28.80	14.19	1.69	948.60	602.71	1874.00	32.00	0.00	252.54	1382.40	503.75	104.59
48588TP	24-may-00			36.85	47.27	49.72	79.64	1.00			30.05	124.74		945.49	601.64	1831.70	39.14	0.00	0.00	1442.55	4428.10	0.00
48588TP	12-sep-00	7.8	15150	5.10	39.19	45.43	55.26	1.06	0.30	3.45	17.25	138.00	1.56	783.73	549.67	1271.00	41.27	9.00	210.45	828.00	4899.00	96.60

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ₂ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (me/l)	Mg ⁺⁺ (me/l)	Na ⁺ (me/l)	K ⁺ (me/l)	CO ₃ ⁻ (me/l)	HCO ₃ ⁻ (me/l)	SO ₄ ⁻ (me/l)	Cl ⁻ (me/l)	NO ₃ ⁻ (me/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	CO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
4858BTP	09-dic-00	7.7	15280	12.01	47.29	56.92	166.00	0.53	0.00	4.20	21.00	134.00	1.59	945.71	688.69	3818.00	20.64	0.00	256.20	1008.00	4757.00	98.70
4858BTP	04-abr-01	7.4	17360	66.45	34.31	38.72	97.06	0.85		2.34	31.85	214.51	4.46	686.23	468.53	2232.29	33.22	0.00	142.74	1528.57	7615.27	276.53
4858BTP	16-nov-01	8.0	5540	187.92	37.66	39.63	46.67	0.40		1.29	34.23	57.86	4.00	753.20	479.52	1073.41	15.64	0.00	78.69	1643.04	2054.03	248.00
4858BTP	11-feb-02	7.4	15073		40.50	39.65	67.25	0.98		3.61	21.84	113.93	3.38	810.00	479.74	1546.77	38.34	0.00	220.09	1048.32	4044.44	209.62
4858BTP	11-feb-02	7.3	9830	351.29	35.60	40.32	85.48	0.89		2.00	30.70	77.36	3.58	712.00	487.87	1966.04	34.80	0.00	122.00	1473.60	2746.28	221.96
4858BTP	24-ago-05	8.3	5350	35.58	17.26	16.64	24.83	0.60	0.26	2.92	14.86	36.23	4.25	345.20	201.39	570.99	23.42	7.79	177.87	713.26	1286.21	263.52
4858BTP	02-feb-06	7.8	3380	39.23	11.00	9.33	14.49	0.47	0.00	2.76	9.09	18.72	4.04	219.90	112.94	333.27	18.32	0.00	168.47	436.40	664.43	250.55
4858BTP	08-jun-06	8.2	3550	36.30	11.74	10.49	13.84	0.38	0.15	2.94	10.87	20.54	3.25	234.88	126.88	318.25	14.81	4.60	179.50	521.96	729.00	201.74
4886 TP	24-jul-92	8.2	770	31.56	1.55	2.24	3.90	0.10	0.00	4.40	0.27	3.86	0.05	31.00	27.10	89.70	3.95	0.00	268.40	12.96	137.03	3.10
4886 TP	15-jul-99	8.4	872	66.93	1.31	2.75	4.50	0.12	0.76	3.32	0.33	3.94	0.14	26.20	33.28	103.50	4.81	22.80	202.52	15.94	139.87	8.68
4886 TP	03-feb-06	7.8	666	59.99	0.91	1.77	3.63	0.08	0.00	2.74	0.40	3.07	0.10	18.10	21.39	83.44	3.10	0.00	167.37	19.17	109.02	5.99
4886 TP	07-abr-06	8.4	737	67.15	1.20	2.23	3.72	0.07	0.22	3.35	0.46	3.16	0.08	23.90	26.99	85.64	2.80	6.69	204.18	22.26	112.12	4.99
4886 TP	09-jun-06	8.7	837	63.55	1.40	2.55	3.84	0.07	0.41	3.40	0.52	3.65	0.15	28.05	30.86	88.38	2.69	12.28	207.48	25.12	129.47	9.44
4886 TP	15-sep-06	7.4	818	70.34	1.57	3.08	4.38	0.07	0.00	4.45	0.61	3.84	0.21	31.30	37.28	100.85	2.90	0.00	271.61	29.35	136.25	12.98

Tabla A.14. Datos y estadísticos de los distintos parámetros químicos obtenidos en los análisis de laboratorio para los pozos de la zona de estudio en las distintas campañas realizadas en la red de control actual. Datos en mg/l excepto la conductividad hidráulica en $\mu S/cm$.

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
48588TP	24-ago-05	8.3	5350	35.58	345.20	201.39	570.99	23.42	177.87	713.26	1286.21	263.52
0218 O1	25-ago-05	7.2	6500	59.45	309.80	268.65	832.22	31.53	183.57	1330.67	1226.55	652.82
0389 TP	25-ago-05	8.2	6280	63.32	141.90	184.30	980.49	17.82	234.19	797.52	1371.41	363.34
0391 TP	25-ago-05	8.5	6140	91.93	274.80	280.45	859.33	27.23	213.59	2075.67	816.30	399.28
0774 TP	25-ago-05	8.1	7040	53.47	255.80	273.65	1020.41	25.72	135.65	1449.18	1431.07	502.09
0779 TP	25-ago-05	8.1	4460	54.28	238.00	197.89	503.35	17.32	170.97	978.43	783.66	366.34
2714 TP	25-ago-05	8.3	2330	37.56	43.50	62.37	332.67	10.91	184.87	182.61	532.38	12.98
2860 TP	25-ago-05	8.4	1611	71.65	50.40	85.05	150.98	3.60	263.31	152.76	265.79	72.87
4826 TP	25-ago-05	7.7	1969	40.64	117.20	67.36	185.09	10.61	183.47	203.47	395.23	68.88
Agosto 2005	Media	8.1	4631	56.43	197.40	180.12	603.95	18.68	194.17	875.95	900.96	300.24
0218 O1	02-feb-06	8.2	5850	58.89	298.40	226.38	776.39	28.63	284.01	1136.48	1107.32	498.10
2714 TP	02-feb-06	8.3	2170	36.04	65.60	53.37	298.55	10.31	219.09	163.54	490.64	12.98
4823 TP	02-feb-06	8.1	886	81.25	13.10	13.99	139.37	6.41	140.16	34.94	170.39	16.97
4826 TP	02-feb-06	8.3	743	32.39	28.30	17.09	97.15	5.20	137.15	58.21	126.04	12.98
48588TP	02-feb-06	7.8	3380	39.23	219.90	112.94	333.27	18.32	168.47	436.40	664.43	250.55
0389 TP	03-feb-06	8.3	6230	62.32	163.80	178.60	970.28	17.32	313.33	785.94	1303.23	401.28
0391 TP	03-feb-06	8.2	6020	88.98	248.00	268.95	847.92	26.02	255.50	1982.82	809.19	225.59
0779 TP	03-feb-06	8.1	1758	39.54	77.90	56.87	193.30	8.61	166.97	261.88	280.41	104.81
2860 TP	03-feb-06	8.2	1734	72.11	77.70	88.15	150.88	3.30	380.65	178.61	248.47	71.87
4886 TP	03-feb-06	7.8	666	59.99	18.10	21.39	83.44	3.10	167.37	19.17	109.02	5.99
Febrero 2006	Media	8.1	2944	57.07	121.08	103.77	389.05	12.72	223.27	505.80	530.91	160.11
0218 O1	06-abr-06	8.1	5580	58.06	298.40	226.38	688.74	23.92	277.31	984.12	971.07	606.91
0774 TP	06-abr-06	8.1	4080	39.82	137.60	105.54	575.09	16.82	198.68	515.47	860.35	206.63
0779 TP	06-abr-06	8.3	4010	47.97	257.60	183.40	405.20	16.92	245.30	815.99	672.94	355.36
2714 TP	06-abr-06	8.5	1613	34.74	40.70	34.08	224.11	7.31	183.07	110.42	333.67	8.98
4823 TP	06-abr-06	8.5	1171	87.59	15.10	17.39	190.90	6.01	164.17	50.42	234.26	18.97
0389 TP	07-abr-06	8.2	5850	60.52	147.10	161.91	919.06	16.42	314.83	755.19	1209.53	401.28
0391 TP	07-abr-06	8.3	6010	86.20	242.50	262.06	857.53	24.82	234.29	1814.69	834.72	464.16
2860 TP	07-abr-06	8.6	1715	71.23	75.60	85.25	147.97	3.10	286.21	162.44	248.47	59.89

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
4826 TP	07-abr-06	8.4	869	34.78	36.40	19.99	104.05	5.71	149.86	76.18	134.85	17.97
4886 TP	07-abr-06	8.4	737	67.15	23.90	26.99	85.64	2.80	204.18	22.26	112.12	4.99
Abril 2006	Media	8.3	3164	58.81	127.49	112.30	419.83	12.38	225.79	530.72	561.20	214.51
0218 O1	08-jun-06	7.7	5620	55.01	282.20	207.99	674.44	22.32	290.52	1052.31	996.60	544.02
0774 TP	08-jun-06	7.6	4870	36.11	192.87	143.46	641.18	16.40	201.35	672.92	1050.55	218.61
0779 TP	08-jun-06	7.8	4360	46.65	265.23	192.40	464.43	15.07	306.70	1031.65	674.34	371.33
2714 TP	08-jun-06	7.9	2170	33.16	64.08	54.48	297.32	9.17	259.27	158.80	480.42	19.64
4823 TP	08-jun-06	8.7	1182	81.96	11.60	13.07	205.01	3.99	192.23	45.93	221.46	21.92
48588TP	08-jun-06	8.3	3550	36.30	234.88	126.88	318.25	14.81	179.50	521.96	729.00	201.74
0389 TP	09-jun-06	7.7	5950	83.83	240.61	255.53	805.29	20.69	259.35	1841.05	773.72	420.24
0391 TP	09-jun-06	7.8	5680	54.94	143.82	152.72	886.48	14.85	323.12	728.13	1228.01	359.35
2860 TP	09-jun-06	8.1	11370	58.73	479.91	507.55	1231.28	50.26	493.17	626.80	3662.74	57.96
4826 TP	09-jun-06	8.4	1364	36.36	70.84	39.25	134.65	7.53	160.92	139.78	248.72	32.84
4886 TP	09-jun-06	8.7	837	63.55	28.05	30.86	88.38	2.69	207.48	25.12	129.47	9.44
Junio 2006	Media	8.1	4268	53.33	183.10	156.74	522.43	16.16	261.24	622.22	926.82	205.19
0218 O1	14-sep-06	7.4	5029	54.07	279.80	212.98	730.37	22.42	335.63	1006.19	1022.12	531.04
0774 TP	14-sep-06	7.4	6160	38.08	324.70	254.26	914.86	21.22	260.60	1078.37	1524.68	444.20
0779 TP	14-sep-06	7.6	3894	47.82	250.00	185.70	488.24	14.91	330.13	933.80	655.92	387.30
2714 TP	14-sep-06	7.9	2460	33.33	84.70	78.96	367.58	10.71	275.21	185.90	638.80	20.96
4823 TP	14-sep-06	8.1	1159	80.19	15.20	17.19	226.51	4.60	267.91	69.09	221.44	21.96
4826 TP	14-sep-06	7.3	2027	42.67	127.00	84.85	200.30	9.81	189.78	230.63	463.41	81.85
0389 TP	15-sep-06	7.6	5585	55.31	170.90	186.10	980.19	16.22	326.53	792.33	1396.93	413.25
0391 TP	15-sep-06	7.5	5275	84.73	241.80	264.86	855.83	22.02	308.22	1565.49	979.58	473.15
2860 TP	15-sep-06	7.7	1349	36.11	62.70	72.86	133.57	2.70	361.84	109.82	221.44	53.90
4886 TP	15-sep-06	7.4	818	70.34	31.30	37.28	100.85	2.90	271.61	29.35	136.25	12.98
Septiembre 2006	Media	7.6	3376	54.27	158.81	139.50	499.83	12.75	292.75	600.10	726.06	244.06

Tabla A. 15. Datos y estadísticos de los distintos parámetros químicos obtenidos en los análisis de laboratorio para los distintos pozos de red de control actual. Datos en mg/l excepto la conductividad hidráulica en $\mu S/cm$.

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
0218-O1	25-ago-05	7.2	6500	59.45	309.80	268.65	832.22	31.53	183.57	1330.67	1226.55	652.82
	02-feb-06	8.2	5850	58.89	298.40	226.38	776.39	28.63	284.01	1136.48	1107.32	498.10
	06-abr-06	8.1	5580	58.06	298.40	226.38	688.74	23.92	277.31	984.12	971.07	606.91
	08-jun-06	7.7	5620	55.01	282.20	207.99	674.44	22.32	290.52	1052.31	996.60	544.02
	14-sep-06	7.4	5029	54.07	279.80	212.98	730.37	22.42	335.63	1006.19	1022.12	531.04
	Media	7.7	5716	57.10	293.72	228.48	740.43	25.76	274.21	1101.95	1064.73	566.58
0389-TP	25-ago-05	8.2	6280	63.32	141.90	184.30	980.49	17.82	234.19	797.52	1371.41	363.34
	03-feb-06	8.3	6230	62.32	163.80	178.60	970.28	17.32	313.33	785.94	1303.23	401.28
	07-abr-06	8.2	5850	60.52	147.10	161.91	919.06	16.42	314.83	755.19	1209.53	401.28
	09-jun-06	7.7	5950	83.83	240.61	255.53	805.29	20.69	259.35	1841.05	773.72	420.24
	15-sep-06	7.6	5585	55.31	170.90	186.10	980.19	16.22	326.53	792.33	1396.93	413.25
	Media	8.0	5979	65.06	172.86	193.29	931.06	17.69	289.65	994.41	1210.96	399.88
0391-TP	25-ago-05	8.5	6140	91.93	274.80	280.45	859.33	27.23	213.59	2075.67	816.30	399.28
	03-feb-06	8.2	6020	88.98	248.00	268.95	847.92	26.02	255.50	1982.82	809.19	225.59
	07-abr-06	8.3	6010	86.20	242.50	262.06	857.53	24.82	234.29	1814.69	834.72	464.16
	09-jun-06	7.8	5680	54.94	143.82	152.72	886.48	14.85	323.12	728.13	1228.01	359.35
	15-sep-06	7.5	5275	84.73	241.80	264.86	855.83	22.02	308.22	1565.49	979.58	473.15
	Media	8.1	5825	81.36	230.18	245.81	861.42	22.99	266.94	1633.36	933.56	384.31
0774 TP	25-ago-05	8.1	7040	53.47	255.80	273.65	1020.41	25.72	135.65	1449.18	1431.07	502.09
	06-abr-06	8.1	4080	39.82	137.60	105.54	575.09	16.82	198.68	515.47	860.35	206.63
	08-jun-06	7.6	4870	36.11	192.87	143.46	641.18	16.40	201.35	672.92	1050.55	218.61
	14-sep-06	7.4	6160	38.08	324.70	254.26	914.86	21.22	260.60	1078.37	1524.68	444.20
	Media	7.8	5538	41.87	227.74	194.23	787.88	20.04	199.07	928.99	1216.66	342.88
0779 TP	25-ago-05	8.1	4460	54.28	238.00	197.89	503.35	17.32	170.97	978.43	783.66	366.34
	03-feb-06	8.1	1758	39.54	77.90	56.87	193.30	8.61	166.97	261.88	280.41	104.81

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ²	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
	06-abr-06	8.3	4010	47.97	257.60	183.40	405.20	16.92	245.30	815.99	672.94	355.36
	08-jun-06	7.8	4360	46.65	265.23	192.40	464.43	15.07	306.70	1031.65	674.34	371.33
	14-sep-06	7.6	3894	47.82	250.00	185.70	488.24	14.91	330.13	933.80	655.92	387.30
	Media	8.0	3696	47.25	217.75	163.25	410.91	14.57	244.01	804.35	613.45	317.03
	25-ago-05	8.3	2330	37.56	43.50	62.37	332.67	10.91	184.87	182.61	532.38	12.98
	02-feb-06	8.3	2170	36.04	65.60	53.37	298.55	10.31	219.09	163.54	490.64	12.98
	06-abr-06	8.5	1613	34.74	40.70	34.08	224.11	7.31	183.07	110.42	333.67	8.98
	08-jun-06	7.9	2170	33.16	64.08	54.48	297.32	9.17	259.27	158.80	480.42	19.64
	14-sep-06	7.9	2460	33.33	84.70	78.96	367.58	10.71	275.21	185.90	638.80	20.96
	Media	8.2	2149	34.97	59.72	56.65	304.05	9.68	224.30	160.25	495.18	15.11
	25-ago-05	8.4	1611	71.65	50.40	85.05	150.98	3.60	263.31	152.76	265.79	72.87
	03-feb-06	8.2	1734	72.11	77.70	88.15	150.88	3.30	380.65	178.61	248.47	71.87
	07-abr-06	8.6	1715	71.23	75.60	85.25	147.97	3.10	286.21	162.44	248.47	59.89
	09-jun-06	8.1	11370	58.73	479.91	507.55	1231.28	50.26	493.17	626.80	3662.74	57.96
	15-sep-06	7.7	1349	36.11	62.70	72.86	133.57	2.70	361.84	109.82	221.44	53.90
	Media	8.2	3556	61.97	149.26	167.77	362.93	12.59	357.04	246.09	929.39	63.30
	02-feb-06	8.1	886	81.25	13.10	13.99	139.37	6.41	140.16	34.94	170.39	16.97
	06-abr-06	8.5	1171	87.59	15.10	17.39	190.90	6.01	164.17	50.42	234.26	18.97
	08-jun-06	8.7	1182	81.96	11.60	13.07	205.01	3.99	192.23	45.93	221.46	21.92
	14-sep-06	8.1	1159	80.19	15.20	17.19	226.51	4.60	267.91	69.09	221.44	21.96
	Media	8.3	1100	82.75	13.75	15.41	190.45	5.25	191.11	50.09	211.89	19.95
	25-ago-05	7.7	1969	40.64	117.20	67.36	185.09	10.61	183.47	203.47	395.23	68.88
	02-feb-06	8.3	743	32.39	28.30	17.09	97.15	5.20	137.15	58.21	126.04	12.98
	07-abr-06	8.4	869	34.78	36.40	19.99	104.05	5.71	149.86	76.18	134.85	17.97
	09-jun-06	8.4	1364	36.36	70.84	39.25	134.65	7.53	160.92	139.78	248.72	32.84
	14-sep-06	7.3	2027	42.67	127.00	84.85	200.30	9.81	189.78	230.63	463.41	81.85
	Media	8.0	1394	37.37	75.95	45.71	144.25	7.77	164.24	141.65	273.65	42.90
	24-ago-05	8.3	5350	35.58	345.20	201.39	570.99	23.42	177.87	713.26	1286.21	263.52
	02-feb-06	7.8	3380	39.23	219.90	112.94	333.27	18.32	168.47	436.40	664.43	250.55

Expediente	Fecha	pH	C.E.	SiO ²	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
	08-jun-06	8.3	3550	36.30	234.88	126.88	318.25	14.81	179.50	521.96	729.00	201.74
	Media	8.1	4093	37.04	266.66	147.07	407.50	18.85	175.28	557.21	893.21	238.60
	03-feb-06	7.8	666	59.99	18.10	21.39	83.44	3.10	167.37	19.17	109.02	5.99
	07-abr-06	8.4	737	67.15	23.90	26.99	85.64	2.80	204.18	22.26	112.12	4.99
4886 TP	09-jun-06	8.7	837	63.55	28.05	30.86	88.38	2.69	207.48	25.12	129.47	9.44
	15-sep-06	7.4	818	70.34	31.30	37.28	100.85	2.90	271.61	29.35	136.25	12.98
	Media	8.1	765	65.26	25.34	29.13	89.58	2.88	212.66	23.98	121.72	8.35

