

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

Departamento de Geodinámica



**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE
PERÍMETROS DE PROTECCIÓN EN AUÍFEROS DETRÍTICOS Y
SU IMPLEMENTACIÓN EN EL TERRITORIO ESPAÑOL:
APLICACIÓN A LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO
URBANO DE VILLACASTÍN (SEGOVIA)**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Carlos Martínez Navarrete

Bajo la dirección del doctor

Pedro Emilio Martínez Alfaro

Madrid, 2002

ISBN: 84-669-1782-9



**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE
PERÍMETROS DE PROTECCIÓN EN ACUÍFEROS DETRÍTICOS Y SU
IMPLEMENTACIÓN EN EL TERRITORIO ESPAÑOL. APLICACIÓN A LAS
CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO DE VILLACASTÍN
(SEGOVIA).**

Memoria presentada por:
D. Carlos Martínez Navarrete
para optar al grado de DOCTOR por la Universidad Complutense
bajo la dirección del Dr. D. Pedro Emilio Martínez Alfaro
Madrid, 2002

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE
PERÍMETROS DE PROTECCIÓN EN ACUÍFEROS DETRÍTICOS
Y SU IMPLEMENTACIÓN EN EL TERRITORIO ESPAÑOL.
APLICACIÓN A LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO
URBANO DE VILLACASTÍN (SEGOVIA).**

Tesis presentada en el Departamento de Geodinámica por D. Carlos Martínez Navarrete para la obtención del Grado de Doctor por la Universidad Complutense de Madrid.

Esta Tesis ha sido dirigida por el Doctor D. Pedro Emilio Martínez Alfaro, Catedrático de Hidrogeología del Departamento de Geodinámica de la Universidad Complutense de Madrid.

Vº Bº Director:

Doctor D. Pedro Emilio Martínez Alfaro.
Director

A toda mi familia, por animarme a realizar la Tesis Doctoral y en especial a mis hijas, Carmen e Isabel, por entender la dedicación exclusiva, en un ambiente de trabajo silencioso, que ha requerido, colaborando al mismo.

AGRADECIMIENTOS

La realización de una Tesis Doctoral representa el trabajo de investigación más personal que se puede llegar a efectuar. Sin embargo incluso esta requiere ayuda de alguna clase y debo dejar constancia de mi agradecimiento a las personas e instituciones que me ayudaron durante su elaboración, en especial:

Al Dr. Pedro Emilio Martínez Alfaro, director de esta Tesis Doctoral, por su apoyo, consejos y correcciones.

Al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), por las facilidades dadas para la realización de la presente Tesis poniendo a mi disposición su fondo documental y a los miembros de la Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas, especialmente a su director Juan Antonio López Geta, por su colaboración.

A José Antonio Fernández Sánchez, por su ayuda y asesoramiento en todos los aspectos legales relativos a los perímetros de protección de captaciones, así como por sus ideas y supervisión en los trabajos sobre perímetros de protección, de los que fue responsable, que supusieron el inicio de esta Tesis Doctoral.

A Silvino Castaño Castaño, por sus continuos consejos, ayudas y sugerencias durante todas las etapas de la elaboración de la Tesis, que resultaron especialmente decisivos en la modelización matemática efectuada.

A Álvaro García García, por sus ayudas y sugerencias para la elaboración de numerosas figuras y mapas, así como en la obtención de antecedentes.

A José María Martínez Montijano, por su colaboración en la edición de esta memoria.

ÍNDICE

1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	7
2. <u>ANTECEDENTES</u>	9
3. <u>OBJETIVOS</u>	14
4. <u>METODOLOGÍA</u>	16
5. <u>ANÁLISIS DEL MARCO LEGAL REFERENTE A LA DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN</u>	23
5.1. Los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano en la legislación	23
5.2. Efectividad de la regulación de actividades en el ámbito del perímetro de protección	29
5.3. Análisis crítico del encuadre legal de los perímetros de protección “de la cantidad” en las captaciones de abastecimiento urbano	30
6. <u>APROXIMACIONES MATEMÁTICAS PARA DEFINIR EL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y EL TRANSPORTE DE SOLUTOS EMPLEADAS PARA DELIMITAR PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO</u>	32
7. <u>ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN REQUERIDA PARA DELIMITAR PERÍMETROS DE PROTECCIÓN A LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO. APLICACIÓN AL CASO DE LA LOCALIDAD DE VILLACASTÍN (SEGOVIA)</u>	37
7.1. Situación geográfica	37
7.2. Marco geológico	38
7.2.1. Litoestratigrafía	38
7.2.2. Tectónica	42
7.3. Socioeconomía	43
7.3.1. Población	43
7.3.2. Actividad socioeconómica del municipio	44
7.4. Marco hidrogeológico	44
7.5. Hidrogeología del entorno de Villacastín	49
7.5.1. Acuífero del Terciario detrítico	49
7.5.2. Captaciones en materiales graníticos	60
7.6. Problemática del abastecimiento a la población	71
7.6.1. Infraestructura del abastecimiento	71
7.6.1.1. Captaciones de abastecimiento urbano	71
7.6.1.2. Depósitos de almacenamiento y redes de distribución	77
7.6.1.3. Red de alcantarillado y estaciones depuradoras	77
7.6.2. Necesidades de agua para abastecimiento	78

7.7.	<u>Vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación</u>	79
7.7.1.	Inventario de focos potenciales de contaminación.....	79
7.7.1.1.	Focos potenciales de contaminación agrícolas.....	80
7.7.1.2.	Focos potenciales de contaminación ganaderos.....	81
7.7.1.3.	Focos potenciales de contaminación industriales.....	87
7.7.1.4.	Focos potenciales de contaminación urbanos.....	88
7.7.2.	Vulnerabilidad de las diferentes zonas	90
7.8.	<u>Planeamiento urbanístico</u>	93
8.	<u>ZONACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN</u>	96
9.	<u>MÉTODOS APLICADOS PARA LA DELIMITACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DE LOS SONDEOS DE ABASTECIMIENTO URBANO DE VILLACASTÍN QUE CAPTAN EL ACUÍFERO DETRÍTICO DEL TERCIARIO</u>	99
9.1.	Métodos hidrogeológicos	99
9.2.	Método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito	103
9.3.	Métodos del radio fijo calculado: ecuación volumétrica y método de la recarga	106
9.4.	Método del radio fijo calculado. Función del descenso	110
9.5.	Método de Wyssling.....	113
9.6.	Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme.....	122
9.7.	Método de Jacobs y Bear.....	126
9.8.	Método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte	130
9.9.	Método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira.....	133
9.10.	Método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales.....	139
9.11.	Modelos matemáticos. Aplicación de los programas Visual Modflow y Visual Modpath.....	143
10.	<u>COMPARACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD OBTENIDOS APLICANDO DIFERENTES MÉTODOS</u>	149
11.	<u>PROPUESTA FINAL DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DE LOS SONDEOS DE ABASTECIMIENTO DE VILLACASTÍN QUE CAPTAN EL ACUÍFERO DEL TERCIARIO DETRÍTICO</u>	169
12.	<u>ANÁLISIS METODOLÓGICO PARA LA PROTECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN CANTIDAD EN LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO EN MATERIALES DETRÍTICOS</u>	177
13.	<u>PROTECCIÓN DE LA CANTIDAD EN LOS SONDEOS DE ABASTECIMIENTO DE VILLACASTÍN QUE CAPTAN EL ACUÍFERO DETRÍTICO DEL TERCIARIO</u>	185

14. <u>RESULTADOS. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</u>	198
15. <u>PROPUESTA DE MODIFICACIONES LEGALES RELATIVAS A LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD Y A LA PROTECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN CANTIDAD EN LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO</u>	212
15.1. Propuesta de contenido de una norma parcial para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento	212
15.2. Propuesta de modificaciones legales relativas a los perímetros de protección de la calidad	215
16. <u>PROPUESTA METODOLÓGICA BÁSICA</u>	217
17. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	230
 <u>ANEXOS</u>	239
 ANEXO 1.- APLICACIÓN DEL PROGRAMA VISUAL MODFLOW AL ACUÍFERO DEL TERCIARIO DETRÍTICO EXISTENTE EN EL ENTORNO DE VILLACASTÍN	242
1.- Entradas al modelo realizado.....	242
2.- Calibraciones efectuadas en régimen permanente.....	245
3.- Simulación del flujo en régimen permanente	253
 ANEXO 2.- APLICACIÓN DEL PROGRAMA VISUAL MODPATH AL ACUÍFERO DEL TERCIARIO DETRÍTICO EXISTENTE EN EL ENTORNO DE VILLACASTÍN	258
1. Simulación en régimen permanente de los perímetros de protección obtenidos para diferentes tiempos de tránsito con bombeo continuo exclusivo en los cuatro sondeos de abastecimiento.	258
2. Simulación en régimen permanente de los perímetros de protección obtenidos para diferentes tiempos de tránsito con bombeo continuo en los cuatro sondeos de abastecimiento y en otras captaciones.....	258

1.- INTRODUCCIÓN

Los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano pueden definirse como un área en torno a una captación en la cual, de forma graduada, se restringen o prohíben las actividades o instalaciones susceptibles de contaminar las aguas subterráneas o que afecten al caudal realmente aprovechado para el abastecimiento a la población (Moreno Merino *et al.*, 1991).

Los resultados obtenidos tras delimitar perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano durante décadas en numerosos países (Alemania, Francia, Reino Unido, Holanda, Dinamarca, Estados Unidos y Australia entre otros muchos), indican que constituyen un sistema eficaz para encontrar un compromiso entre una protección adecuada y suficiente del recurso y el respeto, en la medida de lo posible, de la actividad socioeconómica de la región circundante.

La gran superficie que abarcan en su conjunto los perímetros de protección en los países con mayor tradición en su aplicación, en Alemania, pionera en este campo, suponen el 20% de la extensión total del país (Vorreger, 1998), contrasta con la situación existente en nuestro país.

En España la aprobación final por la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca de los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano propuestos desde 1985, su inclusión en los Planes Hidrológicos de cuenca y la implantación real en el terreno de las restricciones a la calidad así como las referentes a la cantidad del recurso que conllevan, es muy reducida (Martínez Navarrete y López Geta, 2001).

Hay que resaltar, no obstante, que los perímetros de protección de las aguas minerales y termales si tienen una implementación en el territorio notable, si bien su delimitación no siempre es la adecuada, debido tanto a la normativa como al estado del conocimiento hidrogeológico de la época en que fueron establecidos muchos de ellos.

Estos perímetros se regulan por una legislación específica y presentan una problemática y metodología propia, que no es objeto de esta Tesis Doctoral.

Los motivos de la escasa implantación en nuestro país de los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano son variados. Entre otros cabe destacar su impreciso tratamiento legal, los conflictos competenciales entre las diferentes administraciones (estatal, autonómica y local) involucradas, y las consecuencias socioeconómicas de su aplicación a los municipios afectados.

A estos factores hay que añadir una falta de coordinación y armonización de los sistemas de delimitación, al no existir una metodología que trate conjuntamente todos los aspectos legales, técnicos, y sociales involucrados, que unifique criterios y subsane las deficiencias detectadas. Por último, pero no menos importante, cabe destacar la escasa concienciación pública ante los problemas de contaminación, al ser relativamente reciente el interés de la sociedad española por el medio ambiente.

El análisis de esta problemática, con las consecuentes propuestas para incrementar la implantación efectiva de perímetros de protección, tiene una gran importancia en un país como España en el cual el abastecimiento procede de agua subterránea en un 19 % de las poblaciones mayores de 20.000 habitantes y de un 70 % en las menores de 20.000 habitantes (Ministerio de Medio Ambiente, MIMAM, 2000).

El análisis metodológico a efectuar para la delimitación de perímetros de protección es diferente según las características del material captado (poroso, o asimilable en su funcionamiento al mismo, kárstico o fisurado). No es objeto de esta Tesis Doctoral la problemática inherente a los perímetros de protección en medios karsticos ni en los fisurados, como es el caso de las captaciones existentes, entre otras, en materiales graníticos, en los que no son aplicables los métodos desarrollados para medios porosos y requieren el empleo de una metodología específica.

La amplia extensión que tienen en España los acuíferos porosos que constituyen los materiales de carácter detrítico no consolidado (como los que rellenan las grandes fosas tectónicas continentales de los ríos Duero y Tajo entre otros), sus características, que los hacen especialmente indicados para la delimitación de perímetros de protección y las numerosas poblaciones ubicadas en los mismos, supone que sea prioritario definir una metodología integral para la implantación de dichos perímetros que pueda ayudar además a la ordenación del territorio en el ámbito local, autonómico y de las cuencas hidrográficas.

En este contexto la solicitud efectuada al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), por parte del Ayuntamiento de Villacastín (Segovia) en 1999, de un estudio de protección de sus captaciones de abastecimiento en un acuífero detrítico en la cuenca del río Duero, que presentaba características y problemáticas adecuadas a su generalización a otras zonas, hizo posible que el doctorando iniciase en dicha localidad los trabajos de investigación que, con un planteamiento metodológico más amplio de todos los factores a considerar en la delimitación de perímetros de protección de captaciones de abastecimiento en medios detríticos, y su aplicación a modo de ejemplo en dicha localidad, ha desembocado en el extenso trabajo desarrollado en la presente Tesis Doctoral.

Cabe por último indicar que está previsto utilizar el contenido de esta Tesis como parte de una guía relativa a la delimitación de perímetros de protección en los diferentes materiales a editar por el IGME.

2.- ANTECEDENTES

Los antecedentes de los estudios y análisis efectuados en esta Tesis Doctoral se han agrupado en tres categorías:

Marco legal existente en España respecto a la delimitación e implementación en el territorio de los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano

El primer estudio que trata globalmente el marco legal aplicable en España a la delimitación de perímetros de protección de captaciones de abastecimiento, y las regulaciones que conllevan, tras la inclusión de este figura de protección en la Ley de Aguas de 1985 (BOE, 1985) y los reglamentos que la desarrollan, R.D.P.H. de 1986 (BOE, 1986) y R.A.P.A.P.H. de 1988 (BOE, 1988), es el trabajo efectuado por Moreno Merino *et al.*, (1991).

Posteriormente los trabajos de Santafé Martínez *et al.*, (1992) y Álvarez-Campana *et al.*, (1992) analizan también el marco legal, proponen posibilidades de zonación de los perímetros y de aplicación de restricciones en los mismos. Un detallado análisis de la Ley de Aguas de 1985, si bien con el objetivo de analizar su repercusión en la protección de humedales y la sobreexplotación, es el realizado por González Monterrubio (1992).

La escasa implantación en el territorio de los perímetros de protección de abastecimiento, el análisis de la legislación aplicable por la administración hidráulica para proteger en calidad y en cantidad, así como los problemas relativos a las competencias de diferentes administraciones (locales, autonómica, central) al aplicar las restricciones que conllevan, por su implicación en la ordenación urbanística, es desarrollado en los trabajos de Santafé Martínez (1994), Sánchez González (1994) y López-Camacho y Camacho (1995).

La modificación del marco legal que supuso la nueva Ley sobre régimen de suelo y valoraciones de 1998 (BOE, 1998 a), el tratamiento otorgado a los perímetros de protección en los Planes Hidrogeológicos de cuenca, aprobados en 1988, y especialmente la modificación de la Ley de Aguas, en diciembre de 1999 (BOE, 1999 b) son ampliamente analizados en MIMAM (2000).

Los mismos aspectos, pero incidiendo en la escasa implantación de los perímetros, las posibilidades de actuación de la Administración Central para remediarlo, la concurrencia de competencias, proponiendo la necesidad de normativa adicional, centra el trabajo de Sánchez González (2000), Fernández Sánchez (2001) y Samper Calvete (2001).

También Martínez Navarrete y López Geta (2001) analizan esos aspectos, así como el tratamiento de los perímetros de protección en la Directiva Europea de Aguas y la necesidad de unificar criterios respecto a los perímetros de protección en el Plan Hidrológico Nacional.

Metodología para la delimitación de perímetros de protección. Zonas en los mismos, métodos para su delimitación e implementación en el territorio en diversos países del mundo

Son numerosos los trabajos que proponen métodos específicos para delimitar perímetros de protección, destacando los de Bear, Jacob (1965), Albinet (1972), Hoffman y Lillich (1973), Rehse (1977), Wyssling (1979), Horsley (1983), así como el empleo de formulaciones genéricas, Theis (1935), Todd (1980), aplicadas a la metodología de delimitación de perímetros. El trabajo de Villanueva Martínez e Iglesias López (1984) analiza los requisitos y uso de esas fórmulas con el objetivo de definir técnicas de evaluación de acuíferos mediante ensayos de bombeo.

El tratamiento metodológico integrado de todos los aspectos que intervienen en la zonación, delimitación e implantación de los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento, es objeto de diversos trabajos. El primero de estos USEPA (1987) considera extensamente los criterios que pueden emplearse al delimitar perímetros, sus ventajas e inconvenientes, describiendo de los métodos que selecciona (no muy numerosos), sus características y requisitos, apuntando aspectos relativos a su precisión y al coste de implementar los perímetros de protección.

El estudio de Lallemand-Barrès, Roux (1989) aborda la misma problemática, centrándose en el análisis de las zonas de los perímetros de protección establecidos en la legislación de diversos países y en el desarrollo de un amplio número de métodos analíticos, así como del empleo de modelos matemáticos para delimitarlas.

Moreno Merino *et al.*, (1991), basándose en los análisis precedentes y las experiencias obtenidas al aplicar esas metodologías a diversos estudios de delimitación de perímetros de protección en España, efectúan un desarrollo metodológico que incluye el análisis de la información requerida para delimitar los perímetros, criterios y zonas a establecer, sintetizando los métodos existentes.

Posteriormente el trabajo de USEPA (1991 a) analiza la metodología específica para la delimitación de perímetros de protección en medios fracturados y USEPA (1991 b) la aplicable a los acuíferos confinados.

La estrategia de implementación regional de los perímetros, definiendo las etapas en su elaboración, incidiendo específicamente en los aspectos relativos a la participación ciudadana, y las experiencias obtenidas tras su aplicación en diversas zonas es tratada en los trabajos de USEPA (1992 y 1993 b).

El análisis de los criterios de delimitación, formulaciones aplicables y el desarrollo de un método semianalítico la refleja el trabajo de USEPA, 2000. López Geta *et al.*, (1996 b) analizan la metodología aplicada a la elaboración de perímetros de protección de las aguas minerales y termales, siendo los métodos de delimitación descritos aplicables también a captaciones de abastecimiento.

Lallemand-Barrès, Roux (1999) actualizan su anterior guía metodológica, aunque realmente las modificaciones se limitan al tratamiento legal y zonas a establecer en los perímetros de protección en diversos países del mundo.

El trabajo de Hirata y Reboucas (1999) desarrolla una visión integrada de la protección de los recursos hídricos que combina la vulnerabilidad de acuíferos y la delimitación de perímetros de protección de captaciones, efectúa una selección de diversos métodos para delimitar perímetros de protección y analiza las características, datos requeridos, ventajas e inconvenientes de los mismos.

La metodología específica para la delimitación de perímetros de protección en medios kársticos es tratada por SAEFL (1998), desarrollando el método EPIK, y la referente a medios fisurados por Petit (1998) y OFEFP (2002) con el método DISCO.

La utilización de trazadores, especialmente útiles en la definición de perímetros de protección en estos medios kársticos y fisurados, la contempla Käss (1998).

La utilización de los métodos de Theis y Jacob para evaluar descensos y delimitar conos de depresión con el objetivo de proteger en cantidad las captaciones de abastecimiento es propuesto por Villarroya Gil *et al.*, (1992), que la aplican a la delimitación de perímetros de protección de captaciones de abastecimiento en diversas poblaciones.

La protección de la cantidad es también el objetivo de los trabajos de Phillips (2001), que analiza el equilibrio entre las necesidades de extracción con las medioambientales, Preene (2001) desarrollando el impacto de la obra civil en dicha protección, y Fletcher (2001) que evalúa el tratamiento otorgado a la protección del recurso en cantidad en la Directiva Europea de Aguas (Unión Europea, 2000).

El análisis de las consideraciones a efectuar en la selección de las diferentes aproximaciones matemáticas que mejor se adapten al modelo conceptual y definición del sistema para la simulación de flujo y transporte, métodos analíticos, de parámetros agregados, modelos matemáticos, es efectuado por Konikow (1986), y California Environmental Protection Agency (2002).

El desarrollo de modelos matemáticos para la delimitación de perímetros de protección, y las características de estos, son tratados por Mc Donal y Harbough (1988), Pollock (1994), USGS (1997), Wen-Hsing y Kinzelbach (1998).

Los trabajos de Reilly (2001) y Environment Agency (2001) desarrollan los requerimientos para poder aplicar un modelo matemático, detallando las etapas a seguir en la utilización de modelos matemáticos desde su fase inicial de elaboración del modelo conceptual, su calibración, y la simulación de diversas hipótesis.

Los resultados obtenidos al utilizar los diferentes modelos matemáticos para la delimitación de perímetros de protección son detallados por Madsen *et al.*, (1998), Sorensen y Refsgaard (2001), empleando el programa Mike She para efectuar una gestión a nivel nacional de los recursos hidráulicos y delimitar perímetros de protección en Dinamarca, y para delimitar perímetros de protección en materiales carbonatados por Rayne (2001).

La síntesis de la metodología empleada en la delimitación de los perímetros de protección, indicando el marco legal, la justificación de las zonas en que los dividen, métodos más utilizados en su delimitación, regulaciones y restricciones que se aplican en las mismas, junto con los procedimientos para facilitar su implementación en cada país, es analizada en los trabajos de diversos autores Morris (1994), Foster (1994), Southern Water Authority (1985) y Environment Agency (1998) la detallan para el Reino Unido. Aker (1994) en la referente a Holanda. Madsen (1994) a la de Dinamarca.

Vorreyer (1998), Gramel y Urban (2001), además de los anteriores aspectos desarrollan los acuerdos entre agricultores y entidades suministradoras de agua en Alemania, para reducir el uso de nitratos y pesticidas en el entorno de las captaciones de abastecimiento, analizando detalladamente sus costes y beneficios.

Daly y Misstear (2001) detallan los planes de protección definidos en cada condado de Irlanda para proteger sus recursos de agua, y específicamente al entorno de las captaciones, definiendo la regulación que se aplica a cada actividad en las diferentes zonas en que dividen los perímetros de protección, en función del grado de vulnerabilidad del acuífero explotado para abastecimiento.

El análisis de la legislación existente en Portugal, las zonas que considera y los métodos para delimitarlas, según las características del acuífero captado, se detalla en el trabajo de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira (2001), junto con la propuesta de un nuevo método analítico aplicable para tiempos de tránsito de 50 días, desarrollado con el objetivo de delimitar áreas de protección similares a las obtenidas empleando modelos matemáticos.

En los trabajos de Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand (1995) y Laws (2001) se contempla la propia de Australia. La aplicación de las áreas de protección establecidas en torno a las captaciones de abastecimiento y las

regulaciones contempladas para diferentes actividades en los planes de protección de dichas captaciones en Australia aparece detallado en los trabajos de Water and River Commission (1999 y 2000).

La metodología empleada para delimitar perímetros de protección en España aparece en los trabajos de Santafé Martínez *et al.*, (1992) Martínez Navarrete *et al.*, (1997), que inciden en los criterios para establecer un orden de prioridad en su implantación regional, López Geta *et al.*, (2001) que la abordan de un modo sintético, Martínez Navarrete (2002).

Pernía Llera *et al.*, (2001) proponen una metodología para establecer prioridades en la implantación de perímetros de protección en las captaciones de abastecimiento, aplicándola a una región española (la Comunidad Valenciana).

Antecedentes de estudios en la zona de Villacastín

La geología de la zona ha sido estudiada por Bellido *et al.* (1981), realizando una revisión esquemática del conocimiento geológico del Sistema Central español. El trabajo de Villaseca (1985) revisa los estudios referentes a granitos en la sierra de Guadarrama. La base del estudio de los materiales cretácicos en la zona estudiada se encuentra en Alonso (1981).

Por su parte Portero *et al.*, (1984) estudian los materiales terciarios del Sistema Central y cuencas limítrofes. Los trabajos de Capote *et al.*, (1982) y Capote (1985) analizan de un modo general la tectónica de la zona.

El estudio geológico del entorno de la localidad de Villacastín es abordado por IGME (1982) y detalladamente por Pérez González *et al.*, (1990), al elaborar la hoja geológica MAGNA de El Espinar, en cuya zona noroeste se ubica la localidad de Villacastín.

El estudio hidrogeológico de esta zona de la cuenca del Duero se inicia de una manera generalizada y sistemática con los trabajos desarrollados por el IGME (1979, 1980) en los denominados sistemas 8 y 12 en el proyecto para la investigación hidrogeológica de la cuenca del Duero, incluido en el Plan Nacional de Investigación de las aguas subterráneas (PIAS). Así como los efectuados en el mismo marco en el denominado Sistema 11 por IGME (1982 a), en la zona comprendida entre los ríos Voltoya y Trabancos en la cuenca del Duero (al oeste de la localidad de Villacastín) por IGME (1982 b). En dichos trabajos se efectúa una cartografía hidrogeológica, definiéndose los límites y características de los acuíferos, analizando el régimen de flujo, los parámetros hidráulicos del acuífero y el balance de entradas y salidas entre otros aspectos.

Las características de las aguas subterráneas en la provincia de Segovia son también analizadas globalmente en el trabajo de SGOP (1980).

Posteriormente cabe destacar la elaboración de cartografía hidrogeológica en la zona reflejada en los trabajos de IGME (1991) y Junta de Castilla y León (1995).

La caracterización hidrogeológica del entorno de las captaciones de abastecimiento a Villacastín se realiza en los trabajos de Martínez Navarrete y Fernández Sánchez (2000), Martínez Navarrete y García García (2001 a) y Sondagua (1993).

Martínez Alfaro *et al.*, (1986) realizan un modelo matemático de la zona de la Moraña. Este trabajo incluye un análisis estadístico de los parámetros hidráulicos en estos materiales basado en los trabajos de López-Camacho y Camacho (1976), López-Camacho y Camacho y Martínez Alfaro (1979), Martínez Alfaro (1979 y 1980), obteniéndose una correlación entre los valores de caudal específico y los de transmisividad.

El trabajo de DGOH (1993) efectúa una caracterización hidrogeológica detallada y un modelo de la unidad hidrogeológica 02.17, Región de los Arenales estableciendo un balance hídrico de la misma.

En el entorno de las captaciones de abastecimiento a Villacastín se efectúan modelos preliminares para definir el régimen de flujo y simular el transporte de solutos hacia las captaciones en los trabajos de Martínez Navarrete y Fernández Sánchez (2000), y Martínez Navarrete (2002).

La calidad del agua en la cuenca del Duero es analizada por IGME (1982 c), y la correspondiente a las aguas subterráneas en los acuíferos terciarios detríticos de la cuenca por IGME (1987), desarrollando López Geta *et al.*, (1996 a) un estudio específico de la calidad química y contaminación de las diferentes unidades hidrogeológicas existentes en la cuenca del Duero, que incluye la unidad hidrogeológica 02.17, Región de los Arenales, en la que se ubica la localidad de Villacastín y sus captaciones de abastecimiento.

La diversa información existente sobre la unidad hidrogeológica 02.17 es recopilada en el trabajo de IGME (2000).

La infraestructura del abastecimiento a la población de Villacastín es analizada por Martínez Navarrete y Fernández Sánchez (2000), reflejándose la evolución de su población en los trabajos de INE (2002).

El análisis de diversos focos potenciales de contaminación en el término municipal de Villacastín, existentes o previstos, es tratado en los trabajos de González Manso y Giráldez Cebollos-Escalera (1998 a y 1998 b) referentes a la evaluación de impacto ambiental de unas granjas de cerdos previstas, Martínez Navarrete y Fernández Sánchez (1999 y 2000) así como Martínez Navarrete y García García (2001 a).

Por último el análisis del planeamiento urbanístico del municipio lo desarrollan Martínez Navarrete y Fernández Sánchez (2000).

3.- OBJETIVOS

El objetivo fundamental de esta Tesis Doctoral es elaborar una propuesta metodológica para la delimitación de perímetros de protección de la calidad en las captaciones de abastecimiento urbano en acuíferos detríticos, la protección del recurso hídrico en cantidad en dichas captaciones, y su implementación en el territorio español, que contemple íntegramente todos los aspectos involucrados.

Para la consecución de este objetivo principal se ha tenido que considerar una serie de objetivos secundarios. Son los siguientes:

- Definir procedimientos legales con el fin de incrementar la efectividad de la regulación de actividades en las zonas en que se subdividen los perímetros de protección “de la calidad”, consecuencia del análisis del marco legal aplicable a los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento urbano.
- Proponer un nuevo encuadre legal de los perímetros de protección de la cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano, que subsane las incertidumbres existentes respecto a los mismos en la legislación vigente, que han supuesto las modificaciones introducidas en la Ley de Aguas sin elaborar los Reglamentos que la desarrollan, ni modificar los ya existentes.
- Seleccionar, del conjunto de métodos utilizados en diversos materiales en la delimitación de perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano en otros países, del contexto socioeconómico español, aquellos que resulten más apropiados para aplicar en acuíferos detríticos, definiendo los requisitos, limitaciones y formulación empleada.
- Comprobar la validez de utilización de diferentes métodos en las captaciones de abastecimiento urbano, en un acuífero detrítico, de una población del territorio español, aplicándose en las de Villacastín, en la provincia de Segovia, con un tamaño de población y una actividad, principalmente agrícola y ganadera, de carácter medio, que facilite la extrapolación de resultados a otras poblaciones de características similares.
- Mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico del acuífero detrítico empleado para abastecimiento urbano de la localidad de Villacastín, y los impactos antrópicos sobre el mismo, en el entorno de sus captaciones de abastecimiento, que colabore a mejorar la gestión y protección de los recursos hídricos del acuífero captado.
- Evaluar la precisión obtenida al aplicar los diferentes métodos seleccionados a las cuatro captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, con diferentes situaciones de flujo en su entorno, para diferentes tiempos de tránsito, comparando estos resultados con los proporcionados por los métodos que emplean otros criterios, como el poder autodepurador del terreno y los criterios hidrogeológicos entre otros.
- Establecer recomendaciones sobre los mejores métodos aplicables, para cada zona del perímetro, en función del tiempo de tránsito o criterio alternativo empleado, en acuíferos detríticos de características semejantes, para facilitar la definición, con la máxima precisión posible, de perímetros de protección a establecer por diferentes autores en próximos trabajos.

- Definir una propuesta de perímetros de protección de la calidad de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín y las restricciones a imponer a diversas actividades o instalaciones en las diferentes zonas en que se subdividen.
- Definir la protección de la cantidad de los sondeos de abastecimiento de Villacastín que captan el acuífero detrítico del Terciario empleando la simulación matemática como complemento al empleo de métodos hidrogeológicos y métodos analíticos.

Un objetivo adicional o complementario es divulgar la metodología propuesta para la delimitación de perímetros de protección de la calidad en las captaciones de abastecimiento urbano en acuíferos detríticos, la protección del recurso hídrico en cantidad en dichas captaciones, y su implementación en el territorio español, para colaborar a incrementar su implantación en acuíferos de características semejantes al analizado.

4.- METODOLOGÍA

Para la consecución de los objetivos establecidos anteriormente ha sido necesario el desarrollo de una metodología de trabajo que a continuación se pasa a desarrollar:

1. Recopilación de la información existente

Se ha efectuado una amplia recopilación de diversos documentos e información en diversas bibliotecas y bases documentales de diferentes organismos, así como empleando Internet, especialmente útil para la consulta y descarga de archivos relativos a aspectos legales así como metodologías de delimitación de perímetros de protección aplicadas en otros países.

La búsqueda de información se ha centrado en los siguientes aspectos:

- **Problemática legal**

Legislación y documentación, referente a la delimitación de perímetros de protección de calidad y cantidad en Europa y en España, tratamiento legal de los perímetros de protección en los diferentes Planes hidrológicos de cuenca en nuestro país, normativa existente y prevista para regular la coordinación de los diferentes perímetros de protección, relativa al análisis de los conflictos competenciales entre las diferentes administraciones involucradas en España y en otros países, así como legislación y documentación que contempla las regulaciones relativas al traslado a la ordenación del territorio de las restricciones que conllevan los perímetros de protección.

- **Metodología de delimitación de perímetros de protección**

Aproximaciones metodológicas desarrolladas en diferentes países, y su evolución en el tiempo, información referente a los métodos aplicadas en diferentes materiales, sus condicionamientos y limitaciones, estudios relativos a la delimitación de perímetros de protección de captaciones en diferentes poblaciones.

- **Estudios relativos a la zona de Villacastín**

Estudios geológicos e hidrogeológicos regionales y específicos del acuífero captado; análisis socioeconómicos; informes y estudios geológicos e hidrogeológicos del entorno del municipio de Villacastín; información relativa a la infraestructura del abastecimiento y tendente a evaluar las necesidades de agua para abastecimiento; estudios referentes a diversas actividades antrópicas en el municipio y de evaluación de focos potenciales de contaminación; así como referente al Planeamiento Urbanístico del municipio.

- **Consultas a bases de datos**

Se ha consultado la información existente referente a la calidad y piezometría de los puntos de agua inventariados por diversos organismos en la zona estudiada.

2. Síntesis y análisis crítico de la legislación comunitaria y española referente a la delimitación e implementación en el territorio de perímetros de protección

Se efectuó una síntesis de la legislación y un análisis crítico centrado en los siguientes aspectos:

- Síntesis de la legislación aplicable a la delimitación de perímetros de protección de calidad y cantidad de captaciones de abastecimiento urbano en Europa y en España.
 - Análisis crítico de las repercusiones que ha supuesto la reciente modificación de la Ley de Aguas en el establecimiento de perímetros de protección de la calidad y cantidad, así como la problemática planteada por su falta de desarrollo reglamentario.
 - Síntesis y posterior análisis del diferente tratamiento legal otorgado a la protección de las captaciones de abastecimiento urbano en los diferentes Planes Hidrológicos de las cuencas españolas y a las previsiones de su implantación en el futuro.
 - Síntesis y análisis crítico del tratamiento legal referente a la necesidad de establecer criterios de coordinación de los diferentes tipos de perímetros de protección y previsión de elaboración de nueva normativa.
 - Síntesis de la legislación relativa a la ordenación del territorio y planificación urbanística relacionada con la implantación de perímetros de protección.
 - Análisis de los conflictos competenciales entre las diferentes administraciones públicas involucradas en la delimitación de perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano.
 - Análisis y reflexión sobre la necesidad de impulsar procedimientos de participación y coordinación de las diferentes administraciones afectadas que permita incrementar la efectividad de la regulación de actividades en las zonas en que se subdividen los perímetros de protección de la calidad de las captaciones de abastecimiento urbano.
 - Análisis y reflexión sobre la indefinición y carencias del marco legal aplicable a la delimitación de perímetros de protección de la cantidad y la necesidad de establecer modificaciones legales que subsanen dichas deficiencias.
3. Síntesis de los diferentes métodos de estimación de las áreas en que se subdividen los perímetros de protección de la calidad y de protección en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano empleados en diversos países

Se efectuó una síntesis de las aproximaciones matemáticas que permiten simular el flujo de aguas subterráneas y el transporte de solutos empleados en la delimitación de perímetros de protección. Se analizó los diferentes métodos existentes, englobados básicamente en tres tipos de modelos (analíticos, de parámetros agregados y modelos numéricos, empleándose también habitualmente para estos últimos la denominación de modelos matemáticos), sintetizando sus características, procesos hidrogeológicos que contemplan, requisitos, datos necesarios, materiales en los que son aplicables y formulación matemática que emplean.

Este análisis se complementó con el referente al grado de utilización de los mismos para delimitar las áreas en que se subdividen los perímetros de protección de la calidad y proteger en cantidad las captaciones de abastecimiento en los estudios efectuados en diferentes países del mundo.

La síntesis comprendió también de modo complementario el empleo que se realiza de métodos hidrogeológicos. Este se centró no solo en su utilización para proporcionar los diversos datos y el esquema de funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos requeridos por los diversos métodos matemáticos, sino que también abarcó específicamente su utilización independiente como método de delimitación de perímetros de protección, si bien en este caso sin establecer una zonación del mismo.

4. Selección de una zona en un acuífero detrítico en la que se aplicarían distintos métodos de delimitación de perímetros de protección de la calidad y de protección del recurso hídrico en cantidad en sus captaciones de abastecimiento urbano

La elección de un acuífero detrítico, con la amplia extensión que tienen en nuestro país, y sus características, que los hacen especialmente indicados para la delimitación de perímetros de protección, así como de una población de rasgos y problemática extrapolables a los de otras localidades, son idóneos para aplicar diferentes métodos de salvaguarda de sus captaciones de abastecimiento.

Es necesario obtener los datos requeridos para la utilización de los diversos métodos que serán empleados, incluido el uso como método más completo, o de comparación, de un modelo matemático, alcanzar un preciso conocimiento del funcionamiento hidrogeológico del acuífero y disponer de la información necesaria para la implementación de los métodos en el territorio.

Para efectuar un análisis de la información requerida para delimitar los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento urbano de la localidad elegida, Villacastín, en la provincia de Segovia, ha sido necesario complementar la recopilación de la información existente con la realización de trabajos de campo, encuestas a diversas instituciones y la elaboración en gabinete de los siguientes aspectos:

➤ Trabajo de campo.

Estos contemplan:

- Evaluación de la cartografía geológica existente.
- Elaboración de cartografía hidrogeológica.
- Identificar zonas con flujo local de descarga a los arroyos.
- Análisis de las características del lecho de los arroyos y evaluación de su caudal.
- Inventario de puntos de agua (sondeos, pozos y manantiales) en el acuífero del Terciario detrítico y de los existentes en materiales graníticos con medidas de la profundidad del nivel piezométrico.
- Toma de muestras de agua.
- Análisis litoestratigráfico de los diversos materiales aflorantes y de columnas litológicas de los sondeos.
- Análisis de los elementos que componen la infraestructura del abastecimiento a la población, situación y características de las captaciones y sus sistemas de protección, funcionamiento de la estación depuradora.
- Inventario de focos potenciales de contaminación agrícolas, efectuando una cartografía de cultivos e identificación de prácticas de abonado.
- Inventario de focos potenciales de contaminaciones ganaderos, reconociendo las granjas para evaluar las principales características de las explotaciones, el estiércol producido y sus sistemas de recogida y almacenamiento.
- Inventario de focos potenciales de contaminación industriales, evaluando, según el tipo de actividad, sus posibles efectos en el medio ambiente.

- Inventario de focos potenciales de contaminación urbanos, identificando el estado de la red de alcantarillado, estaciones depuradoras, uso y distribución de fosas sépticas y vertederos de residuos sólidos.
- Encuestas al Ayuntamiento, empresas e Instituciones relacionadas con el abastecimiento a la población.
- En ellas se analizaron entre otros, los siguientes aspectos:
- Actividad socioeconómica del municipio: población y principales actividades en el municipio.
 - Infraestructura del abastecimiento a la población: captaciones, depósitos, redes de distribución, redes de alcantarillado, estaciones depuradoras.
 - Necesidad de agua para abastecimiento: control de volúmenes bombeados y consumidos, dotación, periodo en que no se cubra la demanda.
 - Características de instalaciones agrícolas, ganaderas, industriales y urbanas del municipio e incidencias relativas a las mismas.
 - Planeamiento urbanístico y perspectivas de modificaciones al mismo.
- Elaboración en gabinete de los datos de campo y encuestas efectuadas.
- El análisis de la información obtenida en el trabajo de campo y de las encuestas realizadas comprendió:
- Socioeconomía del municipio.
 - Análisis hidrogeológico detallado del acuífero captado, que contempla entre otros los siguientes aspectos: definición del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero en materiales del Terciario detrítico: parámetros hidráulicos del acuífero y su tratamiento estadístico; régimen de flujo e identificación de zonas de recarga, descarga y divisoras hidrogeológicas; relación río-acuífero; hidroquímica y calidad.
- El análisis efectuado de las captaciones en materiales graníticos, de carácter fisurado, se realiza exclusivamente para definir su relación con el acuífero detrítico del Terciario, y su empleo para el abastecimiento urbano, al no ser la problemática de dichos materiales objeto de esta Tesis Doctoral.
- Problemática del abastecimiento a la población, infraestructura del abastecimiento y necesidades de agua.
 - Análisis de los focos potenciales de contaminación del municipio y de la vulnerabilidad de las diferentes zonas.
 - Planeamiento urbanístico en el entorno de las captaciones de abastecimiento y de su área de alimentación.

5. Selección y aplicación de diferentes métodos a la zona elegida para delimitar perímetros de protección de la calidad

Se analizó y seleccionó del conjunto de métodos empleados en los diferentes países del mundo para la delimitación de perímetros de protección, en diversos materiales, los que resulten más apropiados para aplicar en acuíferos detríticos. En los métodos seleccionados se definió sus requisitos, limitaciones, datos necesarios y formulación empleada, incluyéndose esta en hojas de cálculo para facilitar su aplicación.

Los métodos finalmente elegidos se aplicaron en la delimitación de los perímetros de protección de la calidad en las cuatro captaciones de abastecimiento de Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico, con diferentes situaciones de flujo en su entorno.

Hay que señalar que no se aplicaron los métodos a las 3 captaciones de abastecimiento existentes en materiales graníticos, en las que debe emplearse otra metodología, la propia de los acuíferos fisurados, que no es objeto de esta Tesis Doctoral.

Los métodos finalmente seleccionados son los siguientes:

- Métodos hidrogeológicos
- Análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito.
- Radio fijo calculado: Ecuación volumétrica, método de la recarga y la función del descenso.
- Método de Wysling.
- Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme.
- Método de Jacobs y Bear.
- Solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte.
- Método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira.
- Método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales
- Modelo matemático: Visual Modflow y Visual Modpath.

Para la utilización del modelo matemático como método de referencia, dada su mayor precisión al definir el área de alimentación de las captaciones para diferentes tiempos de tránsito, es preciso analizar previamente los resultados de otras modelizaciones efectuadas en los materiales captados de la cuenca del río Duero, y los tanteos previos del doctorando en estudios precedentes en la zona objeto de estudio, que, junto con los nuevos trabajos desarrollados en esta Tesis Doctoral, permitirán definir el modelo conceptual, límites del área modelada y valores iniciales de entrada al modelo en cada celda.

Se empleó una valoración estadística de las diferentes calibraciones efectuadas en régimen permanente, complementada con una valoración cualitativa al comparar con los valores obtenidos en campo, analizándose entre otros aspectos la sensibilidad del modelo ante cambios en diferentes parámetros.

La calibración del modelo permite efectuar diferentes simulaciones de bombeos en la zona analizada y simular para los mismos en régimen permanente los perímetros de protección obtenidos en base a la trayectoria de partículas para diferentes tiempos de tránsito.

6. Comparación de los distintos resultados obtenidos aplicando cada método para los diferentes tiempos de tránsito, que definen las zonas de los perímetros de protección, en cada captación. Discusión de los mismos

Se comparó las diferencias obtenidas en el área delimitada al aplicar los diversos métodos, para una misma captación e igual tiempo de tránsito, entre sí y con los resultados del modelo matemático, empleado como método de referencia al proporcionar los resultados más precisos.

Se analizó las diferencias de estos resultados entre las distintas captaciones, para el mismo tiempo de tránsito, evaluando si pueden estar relacionadas con las diferentes condiciones del flujo en su entorno, su distancia a los diferentes arroyos y el efecto de bombeos en otras captaciones, entre otros factores.

Estos resultados se compararon también con los obtenidos al emplear métodos que emplean otros criterios alternativos no dependientes del tiempo, como el poder autodepurador del terreno e hidrogeológico entre otros.

Se contemplan por último posibles modificaciones de los métodos para minimizar las diferencias entre sus resultados con los obtenidos con el método de referencia.

7. Análisis metodológico para la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento en materiales detríticos, selección de métodos y aplicación a la zona elegida

Se analizó la secuencia de estudio a elaborar, definiendo el tipo y característica de los mismos, el desarrollo que requieren, y los métodos aplicables para proteger el recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento.

El análisis metodológico combina los mecanismos de evaluación de la información sobre la unidad hidrogeológica y del acuífero captado para abastecimiento, sus normas de explotación y demandas ambientales con la definición de los métodos analíticos aplicables en la zona a proteger, así como los mecanismos para evaluar si es factible la utilización de modelos matemáticos.

El desarrollo metodológico precisa qué factores y actividades deben ser regulados en la zona de protección de la cantidad que se delimita para garantizar el caudal utilizado para el abastecimiento y el destinado a otros usos contemplados.

Al definir la protección de la cantidad en los sondeos de abastecimiento de Villacastín que captan al acuífero del Terciario detrítico se empleó el modelo matemático Visual Modflow complementado con el uso de su módulo "Zone Budget".

Se definirá y justificará las zonas seleccionadas para efectuar un balance con dicho módulo, analizándose los resultados de entradas y salidas, desglosándose por su procedencia y destino, así como el balance de masas para la totalidad del área simulada.

Estos balances permitirán evaluar si se cumplen los requisitos a garantizar analizándose la extensión final del área destinada a proteger en cantidad el recurso y establecer las regulaciones a imponer en la misma.

8. Propuesta de modificación de las legislaciones que intervienen en la protección de captaciones

Se han establecido propuestas de modificaciones legales, destinadas a regular la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano, así como a establecer mecanismos para incrementar la efectividad de la regulación de actividades en el ámbito del perímetro de protección, que reflejen los resultados del análisis referente a estos aspectos efectuado en esta Tesis Doctoral.

9. Propuesta metodológica básica a utilizar en la delimitación de perímetros de protección de la calidad, y protección del recurso hídrico en cantidad, en las captaciones de abastecimiento urbano en materiales detríticos en el Estado español

Se establece una propuesta metodológica, que refleja el resultado del análisis efectuado en esta Tesis Doctoral, de todos los aspectos relativos a la protección de las captaciones de abastecimiento urbano.

Esta trata de una manera integrada los perímetros de protección de la calidad, la protección del recurso en cantidad, y la implantación en el territorio de ambas.

Define los procedimientos legales, estudios a efectuar para obtener la información requerida para su aplicación a una localidad, orientará sobre la zonación al establecer en el perímetro de protección y los mejores métodos aplicables para su delimitación en función de las características del acuífero captado. Concreta las etapas y procedimientos a seguir en su delimitación, así como los mecanismos para una eficaz implantación en el territorio de las medidas destinadas a salvaguardar, en calidad y cantidad adecuada, el agua captada para abastecimiento a la población en el territorio español.

5.- ANÁLISIS DEL MARCO LEGAL REFERENTE A LA DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN

En este capítulo se analizará la legislación referente a la delimitación de perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento urbano y su problemática.

La delimitación de perímetros de protección en las captaciones de aguas minerales y termales no se considerará en el mismo, al no ser su problemática objeto de esta Tesis Doctoral, y estar reguladas por una legislación específica, como indica el artículo 1.4 del texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 b).

5.1.- Los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano en la legislación

El perímetro de protección de captaciones de agua para abastecimiento público es una figura contemplada en la Directiva Marco del Agua (D.M.A.), (Unión Europea, 2000), que está prevista en la legislación española de aguas: art. 42, 56 y 97 c del Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 b), art. 172 y 173 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, (R.D.P.H), aprobado por R.D. 849/1986, de 11 de abril (BOE, 1986); art. 82 del Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, (R.A.P.A.P.H.), aprobado por R.D. 927/1988, de 29 de julio (BOE, 1988), y la Reglamentación Técnico Sanitaria de aguas de consumo público, (R.T.S.), art. 4 y 22.1.1, aprobada por R.D. 1138/1990, de 14 de septiembre, (BOE, 1990).

La planificación hidrológica en España contempla los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento en el Plan Hidrológico Nacional, (P.H.N.) (BOE, 2001 a), así como en los Planes Hidrológicos de cuenca, aprobados mediante el R.D. 1664/1998 de 24 de julio (BOE, 1998 b), incluyéndose en la zona estudiada, Villacastín, ubicada en la cuenca del Duero, en la Norma G.3 (Ministerio de Medio Ambiente, MIMAM, 1997) del Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero, (BOE, 1999 a).

Puede asimismo apoyarse en la legislación del suelo: art. 9 de la Ley 6/1998 , de 13 de abril, sobre régimen del suelo y valoraciones (BOE, 1998 a), de ámbito estatal y, en el caso de la localidad de Villacastín, en la provincia de Segovia, en el art. 15 de la Ley 5/1999, de 8 de abril, de urbanismo de Castilla y León (BOCYL, 1999).

Estos perímetros *“tienen por finalidad la protección de captaciones de agua para el abastecimiento a poblaciones o de zonas de especial interés ecológico, paisajístico, cultural o económico”* (artículo 173.2 del R.D.P.H.).

La legislación estatal prevé dos posibilidades a la hora de determinación del perímetro, ya sea a través de los planes hidrológicos (artículo 42 del texto refundido de la Ley de Aguas) o en su ausencia o para completar sus determinaciones por el Organismo de cuenca (artículo 56.3 del texto refundido de la Ley de Aguas y artículo 173 del R.D.P.H.).

El procedimiento se iniciará (artículo 173.3 del R.D.P.H.):

- *“De oficio en las áreas de actuación del Organismo de cuenca.*

- *A solicitud de la autoridad medioambiental.*
- *A solicitud de la autoridad municipal.*
- *A solicitud de cualquiera otra autoridad sobre la que recaigan competencias sobre la materia”.*

La delimitación del perímetro corresponde a la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca (artículo 28 del texto refundido de la Ley de Aguas).

Las actividades que pueden ser restringidas o prohibidas en el área definida por el perímetro de protección están indicadas en el artículo 173.6 del R.D.P.H.

“Éstas son:

- a) *Obras de infraestructuras: minas, canteras, extracción de áridos.*
- b) *Actividades urbanas: fosas sépticas, cementerios, almacenamiento, transporte y tratamiento de residuos sólidos o aguas residuales.*
- c) *Actividades agrícolas y ganaderas. Depósito y distribución de fertilizantes y plaguicidas, riego con aguas residuales y granjas.*
- d) *Actividades industriales: almacenamiento, transporte y tratamiento de hidrocarburos líquidos o gaseosos, productos químicos, farmacéuticos y radiactivos, industrias alimentarias y mataderos.*
- e) *Actividades recreativas, camping, zonas de baños”.*

Como puede apreciarse, el alcance, extensión e importancia de las restricciones llegaría a impedir prácticamente el desarrollo de cualquier actividad si se aplicase a toda la extensión del perímetro. No obstante, el artículo 173.5 del R.D.P.H. señala respecto a las actividades ya indicadas: “*Podrán imponerse condicionamientos en el ámbito del perímetro a ciertas actividades o instalaciones que puedan afectar a la cantidad o la calidad de las aguas subterráneas. Dichas actividades o instalaciones se relacionarán en el documento de delimitación del perímetro”.*

Estos condicionamientos no tienen por qué ser similares en toda la extensión del perímetro de protección, por lo que, aunque no define qué zonas deben considerarse ni en base a qué criterios, sí se admite en la práctica la zonación.

El sistema más frecuentemente empleado (Martínez Navarrete y López Geta, 2001) consiste en dividir el perímetro en diversas zonas alrededor de la captación, graduadas de mayor a menor importancia en cuanto a las restricciones de actividad impuesta sobre ellas.

En la inmensa mayoría de los estudios de perímetros de protección elaborados entre 1985 y diciembre de 1999 se establecía como referencia legal para la protección de la calidad y la cantidad el artículo 54.3 de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de aguas (BOE, 1985). Este artículo se desarrollaba en el artículo 173 del R.D.P.H. de 1986.

La modificación de la Ley de Aguas (BOE, 1999 b) recogida en el texto refundido de la misma (BOE, 2001 b) en su artículo 56.3 (que corresponde al antiguo 54.3) contempla únicamente la determinación de perímetros de protección para preservar las aguas subterráneas frente a la contaminación. En este sentido es más restrictivo que el artículo 173.5 del R.D.P.H., que preveía la imposición de condicionamientos en el ámbito del perímetro a actividades o instalaciones que pueden afectar tanto a la calidad como a la cantidad de las aguas subterráneas. La modificación establecida en la ley sin que se modificasen ni derogasen los Reglamentos existentes (R.D.P.H., 1986 y R.A.P.A.P.H.,

1988), que desarrollaban la Ley de 1985, plantea alguna incertidumbre sobre el marco legal aplicable a los perímetros de protección que tienen como objetivo salvaguardar la cantidad, como se analizará con mayor detalle en el capítulo 5.3.

Hay que resaltar además que la planificación hidrológica en España se establece empleando dos instrumentos: El Plan Hidrológico Nacional y los Planes Hidrológicos de cuenca, con su lógica repercusión en el establecimiento de los perímetros de protección.

El tratamiento de los perímetros de protección y otros mecanismos de protección de las captaciones de abastecimiento urbano en los diversos Planes Hidrológicos de cuenca, aprobados mediante el R.D. 1664/1998 de 24 de julio (BOE, 1998 b), aparece sintetizado en las Tablas 1 y 2.

El análisis de las mismas indica:

- Solamente aparecen definidos los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano indicados en los Planes Hidrológicos de las cuencas del Tajo y del Guadalquivir. La metodología empleada en la delimitación de muchos de ellos plantea además incertidumbres sobre una adecuada salvaguarda del recurso hídrico.
- No se han incluido numerosos perímetros de protección elaborados por las Confederaciones Hidrográficas, el IGME y otros organismos e instituciones desde 1985.
- Se contempla la obligatoriedad de elaborar perímetros de protección en las nuevas captaciones de abastecimiento únicamente en los Planes Hidrológicos de las cuencas del Tajo, Guadalquivir y Júcar cuando hubiera sido un mecanismo eficaz de impulsar la implantación de los mismos en todas las cuencas.
- En la mayoría de los Planes se incluyen previsiones de perímetros de protección a elaborar en el primer y segundo horizonte del Plan, si bien basados mayoritariamente únicamente en función del tamaño de la población, sin considerar otra serie de criterios para establecer un orden de prioridad en su implantación, como el análisis de la situación actual del abastecimiento, las características hidrogeológicas de los acuíferos captados, la importancia de la actividad potencialmente contaminante, vulnerabilidad frente a la contaminación y el riesgo de contaminación existente entre otros (Martínez Navarrete *et al.*, 1997, y Martínez Navarrete y López Geta, 2001).
- La protección del recurso en las áreas con problemas de sobreexplotación definidas en diferentes Planes puede ser eficaz para la salvaguarda de la cantidad, pero no sustituye la protección de la calidad frente a actividades potencialmente contaminantes existentes.
- El tratamiento de los perímetros de protección en la cuenca del Duero, a la que pertenece la localidad de Villacastín, se contempla en la Norma G3, perímetros de protección en aguas subterráneas, (MIMAM, 1997) del Plan Hidrológico de la cuenca del Duero (BOE, 1999 a). Esta indica que “*se elaborará una relación de los acuíferos o zonas de los mismos que puedan ser declarados de protección especial, de acuerdo a la legislación ambiental y de regulación de la naturaleza y el artículo 89 de la Ley de Aguas. Una vez definidas se delimitarán en cada caso particular los correspondientes perímetros de protección que permitan garantizar la calidad química del agua en función de la normativa vigente así como la explotación racional de los mismos. Las zonas de los acuíferos a proteger preferentemente serán las relacionadas con los abastecimientos a poblaciones*”.

TABLA 1.- PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO EN LOS PLANES HIDROLÓGICOS.

CUENCA HIDROGRÁFICA	NUEVAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO	PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DEFINIDOS	PP A ELABORAR EN EL PRIMER HORIZONTE DEL PLAN (2008)	PP A ELABORAR EN EL SEGUNDO HORIZONTE DEL PLAN (2018)
NORTE (01)	-----	-----	-----	-----
DUERO (02)	-----	-----	Se establecerá PP (Art. 173 RDPH) para proteger la calidad: 1ª fase: Inventario de captaciones de abastecimiento definiendo zonas de influencia y focos potenciales de contaminación. 2ª fase: Estimar el grado de vulnerabilidad de las captaciones, seleccionar las que precisen PP y elaborar estos.	
TAJO (03)	Obligatorio elaborar Perímetros de protección (Art. 173 RDPH y RTS) con zonificación. Con las limitaciones establecidas en Art 89 de la LA.	Perímetros de protección (Art. 173 RDPH) con recursos reservados para usos urbanos en 1 UH (Madrid-Talavera).	Establecer PP (Art. 173 RDPH y RTS) para captaciones de abastecimiento del Canal de Isabel II, diversas poblaciones y mancomunidades > 15.000 hab de UH 05 con limitaciones del Art. 89 LA.	Perímetros de protección (Art. 173 RDPH y RTS) de las captaciones de abastecimiento de 25 poblaciones de > 2.000 hab de diferentes UH.
GUADIANA (04)	-----	-----	PP poblaciones >15.000 hab	PP poblaciones 2000-15.000 hab
GUADALQUIVIR (05)	Obligatorio elaborar perímetros de protección con zonificación.	- Establece 246 PP (Art. 173 RDPH y RTS) en 45 UH para captaciones de abastecimiento, definiendo 243 mediante radio fijo 1-2 Km limitando nuevas concesiones con regulaciones del Art. 173.6 RDPH. - Define perímetros de protección (Art. 173 RDPH) en 3 UH con limitaciones al otorgamiento de nuevas concesiones de agua y autorizaciones de vertido. - Define perímetros de protección (Art. 173 RDPH) en 35 UH con limitaciones a las actividades o instalaciones del apartado 173.6 del RDPH para proteger la calidad.	-----	-----
SUR (06)	-----	-----	Se establecerán de oficio PP de cantidad y calidad de las captaciones de abastecimiento urbano. Prioridad: 1) >15.000 hab 2) 2000 a 15.000 hab 3) < 2.000 hab.	
SEGURA (07)	-----	-----	PP (Art. 173 RDPH) Calidad y cantidad captaciones abastecimiento >5.000 hab	PP (Art. 173 RDPH) Calidad y cantidad captaciones abastecimiento >500 hab
JÚCAR (08)	Obligatorio elaborar perímetros de protección con zonificación.	-----	Todas las captaciones de abastecimiento público deberán disponer de PP durante la vigencia del Plan. Prioridad en función del riesgo de contaminación y población abastecida. Considera: 1) >15.000 hab 2) 2.000 a 15.000 hab 3) < 2.000 hab.	
EBRO (09)	-----	-----	Se definirán los perímetros de protección (Art. 173 RDPH) de captaciones de abastecimiento a poblaciones >15.000 hab Se iniciará en 22 captaciones.	Se definirán los perímetros de protección (Art 173 RDPH) de captaciones de abastecimiento a poblaciones >2.000 hab Se iniciará en 31 captaciones.
CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA	-----	-----	-----	-----

NOTA: El Consejo de Ministros acordó aprobar los Planes Hidrológicos de cuenca mediante el RD 1664/1998 de 24 de julio (BOE, 1998 b). Entre agosto y septiembre de 1999 se publicaron en el BOE sucesivos ordenes con los textos normativos de los diferentes Planes Hidrológicos. La Normativa contenida en los Planes Hidrológicos de cuenca no ha sido publicada.

ABREVIATURAS EMPLEADAS:

LA: Ley de Aguas.

RTS: Reglamentación Técnico Sanitaria de Aguas de consumo público.

UH: Unidades Hidrogeológicas.

RDPH: Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

PP: Perímetros de protección.

hab: Habitantes Art.: Artículo.

TABLA 2.- OTROS MECANISMOS DE PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO CONTEMPLADOS EN LOS PLANES HIDROLÓGICOS.

CUENCA HIDROGRÁFICA	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS CON PROBLEMAS DE SOBREEXPLOTACIÓN Y PROTECCIÓN SIN INDICAR SOBRE LA BASE DE QUÉ ARTÍCULO.	ARTÍCULO 89 LA (Ley 46/1999)	ARTÍCULO 172 RDPH
NORTE (01)	Áreas a proteger en 21 UH requieren medidas de protección respecto niveles o caudales. Se establecen normas para proteger calidad y cantidad en 3 UH (Norte I), 12 UH (Norte II) y 6 UH (Norte III).	Áreas objeto de especial protección: Incluyen entre otras los acuíferos destinados a abastecimiento a poblaciones	-----
DUERO (02)	Medidas de protección para limitar las extracciones y proteger frente a la contaminación, especialmente en los empleados para abastecimiento a poblaciones en 4 UH.	Relación de acuíferos que puedan ser declaradas de protección especial. Una vez definidos se delimitaran en cada caso los PP.	-----
TAJO (03)	-----	-----	-----
GUADIANA (04)	Declaración definitiva de sobreexplotación en 2 UH. (Guadiana I) Declaración de sobreexplotación en una parte de un acuífero. (Guadiana II)	-----	-----
GUADALQUIVIR (05)	Aplicación del artículo 171 del RDPH a 16 UH. Se definen PP en 12 UH con limitaciones a nuevas captaciones y limitaciones a los vertidos para protección de tramos fluviales.	-----	Define perímetros (Art. 172 RDPH) en los que no se otorgará concesión a menos que los titulares estén constituidos en Comunidades de usuarios en 8 UH.
SUR (06)	Identifica 6 UH con problemas graves de sobreexplotación, 7 UH con sobreexplotación local o zonal y 8 UH con indicios de intrusión.	-----	-----
SEGURA (07)	-----	-----	-----
JÚCAR (08)	-----	Normas de explotación y PP en entornos de especial protección de acuíferos destinados a abastecimiento.	-----
EBRO (09)	Estudiar si existe algún acuífero o UH sobre la que proceda la declaración provisional de acuífero sobreexplotado, en riesgo de estarlo o bien el establecimiento de un perímetro de protección, iniciándose en 5 UH.	-----	Estudiar si hay UH en que proceda definir PP (Art. 172 RDPH) en los que no se otorgará concesión sin constituir Comunidades de usuarios.
CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA	Se establecen: Planes zonales, Planes sectoriales y Normas de explotación de los acuíferos clasificados (Decreto 328/1988 Dpto. de Política Territorial y Obras Públicas de la Generalidad de Cataluña) y de los no clasificados.	-----	-----

NOTA: El Consejo de Ministros acordó aprobar los Planes Hidrológicos de cuenca mediante el RD 1664/1998 de 24 de julio (BOE, 1998 b). Entre agosto y septiembre de 1999 se publicaron en el BOE sucesivos ordenes con los textos normativos de los diferentes Planes Hidrológicos. La Normativa contenida en los Planes Hidrológicos de cuenca no ha sido publicada.

ABREVIATURAS EMPLEADAS:

LA: Ley de Aguas.

RTS: Reglamentación Técnico Sanitaria de Aguas de consumo público.

UH: Unidades Hidrogeológicas.

RDPH: Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

PP: Perímetros de protección.

hab: Habitantes Art.: Artículo.

Indica también dicha norma que con el objetivo de preservar la calidad del agua subterránea en zonas de especial interés ecológico, paisajístico, cultural o económico se establecerán perímetros de protección (según la regulación establecida en el artículo 173 R.D.P.H.) en los que se limitará o prohibirá el desarrollo de actividades contaminantes. Para ello se establecerá una zonificación del área de recarga o de protección. En una primera fase se contempla la elaboración de un inventario específico de captaciones de agua subterránea que se empleen total o parcialmente para el abastecimiento a poblaciones. En una segunda fase, empleando los datos obtenidos en la fase previa, se estimará el grado de vulnerabilidad de las captaciones y su estado actual y se seleccionarán aquellas que precisen elaborar un perímetro de protección.

La insuficiente atención, la diversidad de criterios y de detalle con que han sido contemplados los perímetros de protección en los Planes Hidrológicos de cuenca, junto con la repercusión que respecta a las mismas ha supuesto la modificación de la Ley de Aguas, con posterioridad a su aprobación, hace necesario establecer su coordinación.

Los criterios de coordinación de los Planes Hidrológicos de cuenca se reflejan en el artículo 6 del Plan Hidrológico Nacional, P.H.N. (BOE, 2001 a), indicando que *“el Consejo de Ministros, previo informe del Consejo Nacional del Agua y de las Administraciones Hidráulicas autonómicas de las cuencas intracomunitarias, regulará, mediante Real Decreto, en el plazo máximo de 2 años desde la entrada en vigor de esta Ley los criterios de coordinación relativos a aspectos técnicos y metodológicos, que deberán tenerse en cuenta en la revisión de los Planes Hidrológicos de cuenca”*. El apartado c de este artículo contempla la *“delimitación de los perímetros de protección tanto de aquellos en los que se prohíba el ejercicio de actividades que pudieran constituir un peligro de contaminación y degradación del dominio público hidráulico, como los perímetros de protección de acuíferos definidos en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico y otros de carácter facultativo. Se determinará igualmente la relación de dichos perímetros con otras figuras de protección”* (artículo 6 c del P.H.N.).

El artículo 6 de la Ley del P.H.N. no clarifica por tanto los criterios de coordinación para la delimitación de perímetros de protección, indicando únicamente que se regularán mediante Real Decreto en el plazo máximo de 2 años, quedando hasta ese momento pendiente de aclarar la normativa legal aplicable.

Por último cabe indicar que los perímetros de protección están expresamente contemplados en la Directiva Marco del Agua, D.M.A. (Unión Europea, 2000), que indica en sus artículos 6 y 7 la necesidad de establecer en el plazo de 4 años desde su entrada en vigor (que se produjo el día de su publicación en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas, el 22 de diciembre de 2000), un registro de todas las zonas incluidas en cada demarcación hidrográfica que hayan sido declaradas objeto de una protección especial relativa a sus aguas superficiales o subterráneas o a la conservación de los hábitats. Entre esas zonas se incluyen específicamente todas las masas de agua, superficiales o subterráneas (entendiendo, según define la Directiva, estas últimas como un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos), utilizadas para la captación de agua destinada al consumo humano que proporcionen un promedio de más de 10 m³ diarios o que abastezcan a más de 50 personas, y todas las masas de agua destinadas al consumo humano en el futuro.

Contempla que los Estados miembros velarán por la necesaria protección de las masas de agua especificadas con objeto de evitar el deterioro de su calidad y podrán establecer perímetros de protección para las mismas.

Se establecerán además programas de seguimiento del estado de las aguas, que en el caso de las aguas subterráneas incluye su estado químico y su estado cuantitativo, alcanzando mayor precisión en el caso de las zonas protegidas. Los programas serán operativos dentro del plazo de seis años contados a partir de la entrada en vigor de la Directiva.

5.2.- Efectividad de la regulación de actividades en el ámbito del perímetro de protección

Para que los perímetros de protección frente a la contaminación sean realmente útiles es imprescindible garantizar la efectividad de la regulación de actividades contempladas para el ámbito del perímetro de protección en el documento de propuesta de delimitación del mismo. En esta se indica, en una tabla específica para cada captación, los condicionamientos y prohibiciones a los que deben someterse las actividades urbanas, agrícolas, ganaderas, industriales, recreativas y las obras de infraestructura en las diferentes zonas en que se subdivide el área definida por el perímetro, graduadas de mayor a menor importancia en cuanto a las restricciones de actividad impuestas sobre ellas, si bien cabe reseñar que la determinación final del perímetro corresponde a la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca (artículo 28 del texto refundido de la Ley de Aguas).

Para conseguir la protección efectiva del recurso hídrico esta debe efectuarse en coordinación con una adecuada gestión y ordenación del territorio. En este sentido la propia Ley de Aguas señala en el artículo 20.1 del texto refundido (BOE, 2001 b) que *“El Consejo Nacional del Agua informará preceptivamente: [...] d) los planes y proyectos de interés general de ordenación agraria, urbana, industrial y de aprovechamientos energéticos o de ordenación del territorio en tanto afecten sustancialmente a la planificación hidrológica o a los usos del agua”*. Además en el artículo 43.3 del texto refundido de la Ley de Aguas dispone respecto a las zonas de protección especial de cuencas o acuíferos establecidas en los Planes Hidrológicos de cuenca que las previsiones respecto a las mismas *“deberán ser respetadas en los diferentes instrumentos de ordenación urbanística del territorio”*.

No obstante, esta coordinación es en la práctica complicada en España debido a la concurrencia de competencias de diferentes Administraciones, estatal, autonómica y local (Fernández Sánchez, 2001), lo que ha dado lugar a diferentes recursos sobre aspectos legales resueltos finalmente por el Tribunal Constitucional (Tribunal Constitucional, 1988).

Ateniéndose a la doctrina del Tribunal Constitucional, el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 b) establece en su artículo 128 que *“La Administración General del Estado, las Confederaciones Hidrográficas, las Comunidades Autónomas y las entidades locales tienen los deberes de recíproca coordinación de sus competencias concurrentes sobre el medio hídrico con incidencia en el modelo de ordenación territorial, en la disponibilidad, calidad y protección de las aguas y, en general, del dominio público hidráulico, así como los deberes de información y colaboración mutua en relación con las iniciativas o proyectos que promuevan”*. (artículo 128.1 del texto refundido de la Ley de Aguas) [...] *“Esta coordinación y cooperación se efectuará a través de los procedimientos establecidos en la Ley 12/1983, de 14 de octubre, del Proceso Autonómico, en la ley 7/1985, de 2 de abril, reguladora de las Bases del Régimen Local, y en la Ley 30/1992, de 26 de noviembre de régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del procedimiento administrativo común, así como de las específicas que se hayan previsto en los Convenios celebrados entre las Administraciones afectadas”* (artículo 128.2 del texto refundido de la

Ley de Aguas).

Además en la disposición adicional quinta del texto refundido de la Ley de Aguas indica: [...] *“las posibles limitaciones en el uso del suelo y reservas de terreno previstas en los artículos [...], 20, 43 [...] de esta Ley se aplicarán sin menoscabo de las competencias que las Comunidades Autónomas puedan ejercer en materia de ordenación del territorio”*.

Para garantizar la implantación real en el terreno de los perímetros de protección propuestos es necesario por tanto implicar a las Comunidades Autónomas y a los Ayuntamientos en la protección de sus captaciones de abastecimiento, trasladando así las restricciones indicadas para las diferentes zonas que componen el perímetro de protección al planeamiento urbanístico del término municipal. En este sentido cabe indicar que la Ley sobre régimen del suelo y valoraciones (BOE, 1998 a) clasifica el suelo en urbano, urbanizable y no urbanizable, siendo necesario para su catalogación como no urbanizable que esté sometido a algún régimen especial de protección incompatible con su transformación de acuerdo con los planes de ordenación territorial. La consideración de especial protección para las áreas incluidas en los perímetros de protección queda plenamente justificado ante la necesidad de proteger el dominio público hidráulico.

5.3.- Análisis crítico del encuadre legal de los perímetros de protección “de la cantidad” en las captaciones de abastecimiento urbano

La Directiva Marco del Agua, D.M.A. (Unión Europea, 2000), indica en sus artículos 6 y 7 la necesidad de establecer en el plazo de 4 años, desde su entrada en vigor, un registro de todas las zonas incluidas en cada demarcación hidrográfica que hayan sido declaradas objeto de una protección especial relativa a sus aguas superficiales o subterráneas o a la conservación de los hábitats. Entre esas zonas se incluyen específicamente todas las masas de agua, superficiales o subterráneas, utilizadas para la captación de agua destinada al consumo humano, que proporcionen un promedio de más de 10 m³ diarios o que abastezcan a más de 50 personas, y todas las masas de agua destinadas al consumo humano en el futuro.

Se establecerán además programas de seguimiento del estado de las aguas que, en el caso de las aguas subterráneas, incluye su estado químico y su estado cuantitativo, alcanzando mayor precisión en el caso de las zonas protegidas. Los programas serán operativos dentro del plazo de seis años contados a partir de la entrada en vigor de la Directiva.

En la legislación española de aguas el artículo 56.3 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 b) contempla únicamente la determinación de perímetros de protección *“a fin de proteger las aguas subterráneas frente a los riesgos de contaminación”* en lugar de la imposición de *“condicionamientos en el ámbito del perímetro a ciertas actividades o instalaciones que puedan afectar a la cantidad o la calidad de las aguas subterráneas”* que contempla el R.D.P.H. en su artículo 173 (BOE, 1986).

La modificación establecida en la ley sin que se modificasen ni derogasen los Reglamentos existentes (R.D.P.H, 1986 y R.A.P.A.P.H., 1988), que desarrollaban la Ley de Aguas de 1985 (BOE, 1985), plantea alguna incertidumbre sobre el marco legal aplicable a los perímetros de protección que tienen como objetivo salvaguardar la cantidad que, junto al diferente tratamiento otorgado a los perímetros de protección en los Planes Hidrológicos, debía ser analizada en el Plan Hidrológico Nacional.

Pero lamentablemente los criterios de coordinación de los Planes Hidrológicos de cuenca solo han sido reflejados en el artículo 6 del Plan Hidrológico Nacional (BOE, 2001 a) y dicho artículo no ha aclarado los criterios de coordinación para la delimitación de perímetros de protección, indicando únicamente que se regularán mediante Real Decreto en el plazo máximo de 2 años.

La cuestión que se plantea ahora, de cara a la modificación, se supone que inminente, del R.D.P.H. de 1986, es si conviene reservar la denominación de “perímetro de protección” exclusivamente para los delimitados con objeto de proteger las aguas subterráneas frente a la contaminación, tal como hace, deliberada o inadvertidamente, la modificación de la Ley de Aguas (BOE, 2001 b), o si, por el contrario, sería mejor mantener en el Reglamento la posibilidad de que tales perímetros contemplen también la protección cuantitativa del recurso.

A favor de la primera opción puede argumentarse, además de su propia presencia en el texto legal vigente, y la dificultad de ampliar el concepto reglamentariamente, lo siguiente:

- Por lo general, no son coincidentes los ámbitos territoriales de los perímetros de protección de la calidad y de la cantidad para una misma captación, como también son diferentes los criterios y metodologías para la determinación de ambos tipos de perímetros. En consecuencia, induce a confusión emplear la misma denominación (perímetro de protección) para dos ámbitos territoriales distintos.
- Existe una marcada diferencia en cuanto a Administraciones competentes para aplicar las limitaciones estipuladas en ambos tipos de perímetros. Mientras que en los de protección de la calidad las Administraciones con más amplia competencia son la Municipal y la Autonómica, en los de protección de la cantidad la competencia es casi exclusivamente de la Confederación Hidrográfica, en cuanto que la mayor parte de las limitaciones a imponer se refieren al otorgamiento de concesiones o autorizaciones de extracción de agua.

En consecuencia, parece interesante explorar la posibilidad de un nuevo tratamiento que incremente la eficacia de la protección cuantitativa de las captaciones de abastecimiento y subsane los actuales problemas respecto al marco legal aplicable. Según este, en toda captación a proteger se delimitaría, por una parte, un perímetro de protección frente a la contaminación con limitaciones a determinadas actividades.

Por otra parte, se establecería otro mecanismo que permita contemplar regulaciones en un área en torno de la captación, delimitada con una metodología adecuada, en la que se definiría el volumen global máximo de extracción en el entorno delimitado, la cuantía máxima de extracción para captaciones distintas de la que es objeto de protección, los usos del agua admisibles, profundidades de sondeos y de instalación de bombas, distancias mínimas a la captación protegida entre otras, a precisar por un análisis metodológico específico.

6.- APROXIMACIONES MATEMÁTICAS PARA DEFINIR EL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y EL TRANSPORTE DE SOLUTOS EMPLEADAS PARA DELIMITAR PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO

Los modelos matemáticos de sistemas de aguas subterráneas son representaciones matemáticas de los mismos que incluyen asunciones y simplificaciones, por lo que la validez de sus resultados está directamente relacionada con la efectividad con la que el modelo representa dichos sistemas (California Environmental Protection Agency, 2002). Para analizar esta en la figura 1 se esquematizan los aspectos a considerar en la aplicación de un modelo, tanto en el proceso de diseño del *software* como en su aplicación para un propósito específico.

El desarrollo del modelo requiere (California Environmental Protection Agency, 2002), en primer lugar, analizar los procesos hidrogeológicos que afectan al flujo de agua subterránea y al transporte de contaminantes en la misma (Figura 2).

En segundo lugar, hay que determinar qué leyes y formulaciones pueden representar matemáticamente un fenómeno hidrogeológico. Así expresiones generales como la Ley de Darcy para flujo laminar de agua subterránea o las leyes de Fick para transporte dispersivo y las funciones de Monod para transformación de contaminantes por biodegradación, permiten representar un área infinitesimal de un sistema dado bajo condiciones ideales.

La aplicación de esas leyes a escala real requiere su conversión a ecuaciones diferenciales para poder considerar variaciones espaciales y temporales, que deben ser resueltas o aproximadas matemáticamente para convertirlas en fórmulas que puedan ser empleadas para cálculos hidrogeológicos.

En la mayoría de los casos la solución exacta de una ecuación diferencial representando un fenómeno hidrogeológico no es factible y es mejor obtener una solución aproximada efectuando nuevas asunciones y simplificaciones.

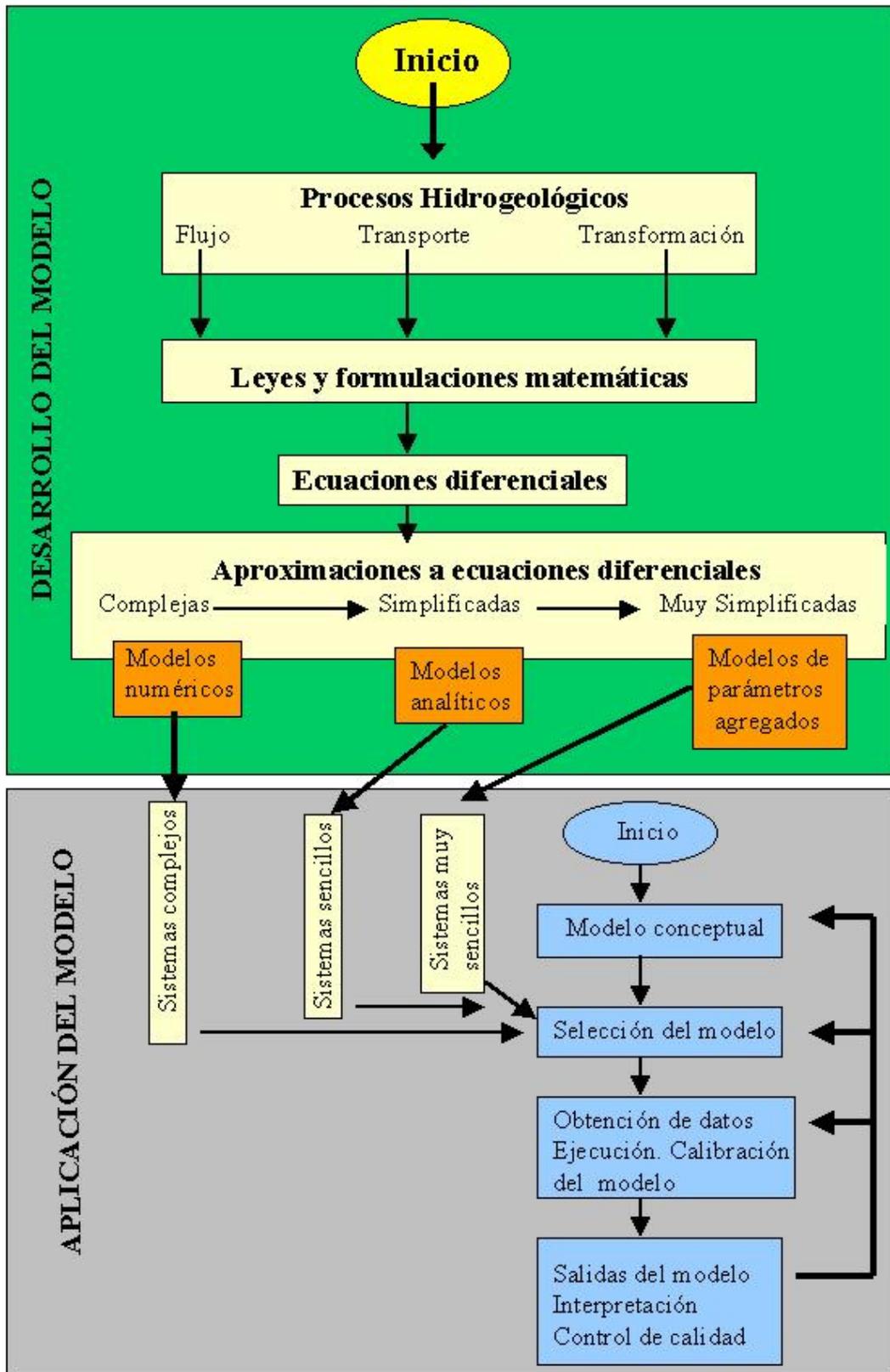
El grado de simplificación depende de la complejidad con que se quiera que el modelo represente el sistema lo que da lugar a tres tipos de modelos (numéricos, analíticos y de parámetros agregados), cuyas principales características son:

- Modelos numéricos:

Permiten aproximaciones complejas a las ecuaciones diferenciales. Estas hacen posible, por ejemplo, modelar variaciones espaciales del sistema (heterogeneidades y anisotropía) así como variaciones temporales (régimen transitorio).

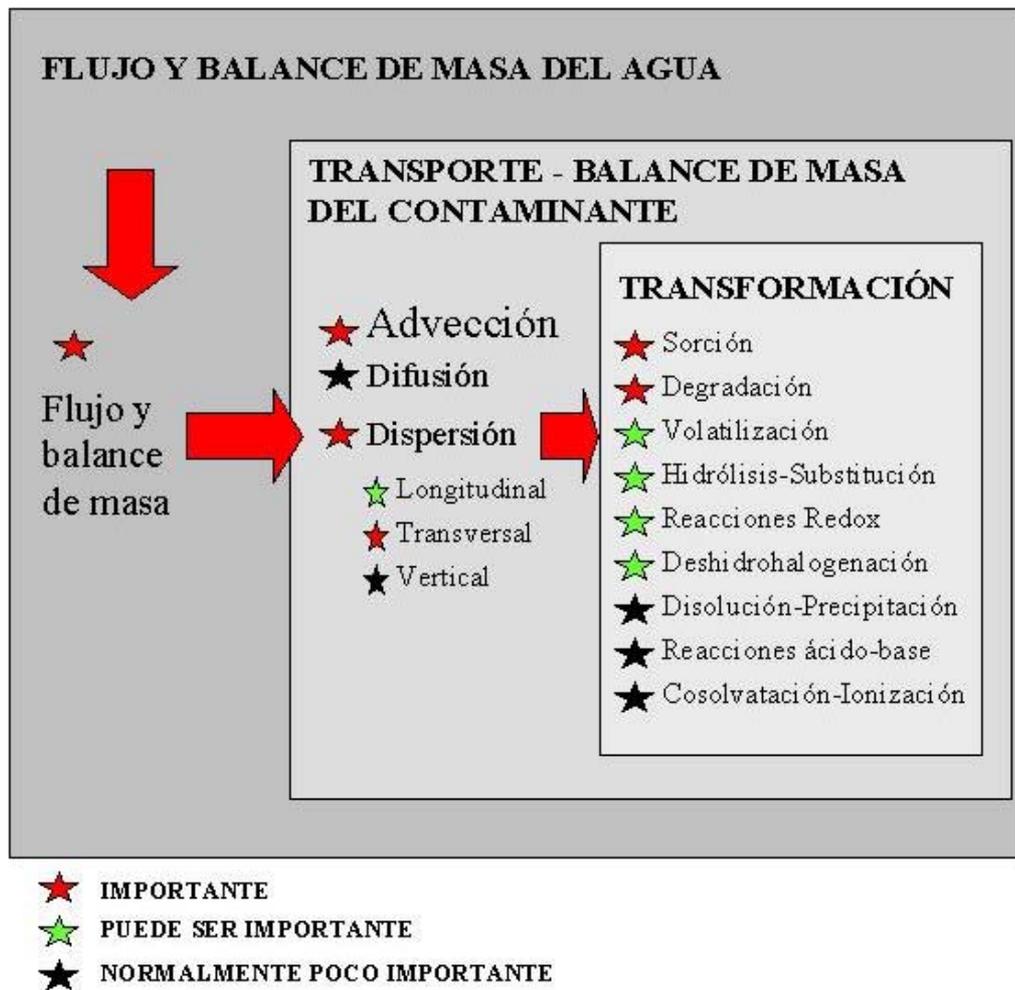
Los modelos numéricos dividen el sistema de agua subterránea en unidades más pequeñas, hidrogeológicamente representables, efectuando una discretización espacial en bloques u otras unidades geométricas, asignando un nodo a cada una de ellas. Cada uno de esos nodos se considera como un subsistema separado, lo que permite incorporar variabilidad espacial de los parámetros contemplados en el modelo. También dividen el periodo de tiempo simulado en segmentos más pequeños, lo que permite simular régimen permanente y régimen transitorio en diferentes pasos de tiempo.

Los modelos numéricos requieren asignar valores de los parámetros específicos para cada unidad geométrica (celda) requiriéndose una elevada cantidad de datos.



Modificada de California Environmental Protection Agency, 2002.

Figura 1: Aspectos a considerar en la aplicación de un modelo matemático a sistemas de aguas subterráneas.



Modificada de California Environmental Protection Agency, 2002.

Figura 2: Procesos hidrogeológicos que afectan al flujo de agua subterránea y al transporte de contaminantes.

- Modelos analíticos:

Son apropiados para aproximaciones simplificadas a las ecuaciones diferenciales, para efectuar simulaciones de sistemas simples, sin complejidad espacial ni temporal.

Estos modelos resuelven analíticamente las ecuaciones diferenciales para obtener ecuaciones simples para el flujo y el transporte de contaminantes, proporcionando soluciones exactas a las mismas para lo que requieren que se asuman diversas simplificaciones. Entre estas cabe citar por ejemplo que los límites del sistema de agua subterránea estén localizados en zonas infinitamente lejanas y que el sistema sea homogéneo e isótropo.

Los modelos analíticos simples consideran todo el sistema como una única unidad y todo el periodo de tiempo simulado como un único paso de tiempo. Los modelos de elementos analíticos y modelos semianalíticos dividen el sistema en unidades hidrogeológicas y permiten considerar diferentes pasos de tiempo.

Aunque estos modelos requieren una cantidad de datos variable, dependiendo del modelo elegido, son mucho más simplistas que los modelos numéricos.

- Modelos de parámetros agregados:

Consideran que el sistema a simular está compuesto por diversos elementos. Cada uno, incluyendo el agua subterránea existente en el mismo, se considera que es homogéneo e isótropo y puede simularse mediante una ecuación simple. Las variaciones temporales pueden simularse solamente entre compartimentos, no dentro de ellos.

Permiten simular por ejemplo las condiciones transitorias que ocurren en el límite entre la zona vadosa y la zona saturada pero no pueden simularse las condiciones transitorias dentro de cada una de esas zonas. Requieren pocos datos reales usando datos genéricos proporcionados por el modelo.

Una vez adoptada la aproximación seleccionada se convierten las fórmulas resultantes en los códigos informáticos que constituyen el “*software*”.

La aplicación del modelo a un sistema de agua subterránea específico requiere, en primer lugar, desarrollar un modelo conceptual. La formulación de un modelo conceptual aceptable y realista es la etapa más importante en la aplicación de un modelo. Debe incluir, además de las simplificaciones del medio físico y condiciones de contorno, el objetivo del modelo y como alcanzarlo.

La siguiente etapa consiste en seleccionar de los diferentes modelos existentes, públicos y comerciales (numéricos, analíticos o de parámetros agregados), cuyas principales características han sido descritas previamente, el que se ajuste mejor al modelo conceptual y complejidad del sistema en lugar de seleccionarlo en base a la disponibilidad de datos (Konikow, 1986).

Así por ejemplo si un sistema es un acuífero homogéneo e isótropo de flujo predominantemente horizontal y se prevé que funcione en régimen estacionario para el periodo de tiempo simulado puede emplearse un modelo analítico simple para simular una pluma de contaminante que afecte a la zona superior del acuífero.

Si por el contrario cabe esperar régimen transitorio con cambio en la dirección de flujo se requiere emplear modelos semianalíticos, modelos analíticos o modelos numéricos.

En el caso de sistemas complejos en los que deba considerarse heterogeneidad, anisotropía, flujos tridimensionales y régimen transitorio solamente pueden emplearse modelos numéricos.

Después de seleccionar el modelo se debe proceder a la obtención de los datos requeridos por éste, ejecutar el modelo y proceder a calibrarlo e interpretar los resultados, elaborando posteriormente auditorías o controles de calidad del mismo que deberían incluir, entre otros, análisis de sensibilidad y de incertidumbre.

En los modelos analíticos se efectúa, como ha sido previamente detallado, una simplificación de las características hidrogeológicas del acuífero y de las condiciones de explotación siendo necesario introducir condiciones muy estrictas (pozos totalmente penetrantes, acuífero de extensión infinita...) que pueden alejarse sensiblemente de la realidad, por lo que para la delimitación de las zonas de restricciones que afectan a zonas más alejadas de la captación, resulta más conveniente la utilización de modelos numéricos (empleándose también habitualmente para estos la denominación de modelos matemáticos), cuando se dispone de información adecuada para su ejecución y calibrado, ya que estos permiten tener en cuenta variaciones en los principales parámetros hidráulicos, heterogeneidades del acuífero, influencia de bombeos y otros factores, por lo que ofrecen resultados más similares al funcionamiento real del acuífero, lo cual facilita su traslado a la regulación urbanística, al eliminar problemas de sobreprotección que podrían causar pleitos con actividades restringidas indebidamente en el ámbito del perímetro.

Estas ventajas han llevado a que sean empleados cada vez con mayor frecuencia. Así el 80% de los aproximadamente 800 perímetros de protección definidos en Inglaterra hasta 1994 se delimitaron empleando modelos numéricos bidimensionales en régimen estacionario (Foster, 1994).

En Dinamarca, cuyo abastecimiento se basa en un 99% en aguas subterráneas (Madsen, 1994), se ha desarrollado y aplicado un modelo matemático que abarca toda la extensión del país, empleando el programa *Mike She*, que es un modelo de agua subterránea tridimensional, utilizando una malla de 1 km² y una discretización vertical en 7 a 9 capas (Madsen *et al.*, 1998), empleándose desde entonces como herramienta básica para la delimitación de los perímetros de protección.

En Estados Unidos los organismos *United States Geological Survey* (USGS) y *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) emplean como modelos estándar para delimitar perímetros de protección los programas MODFLOW y MODPATH. Estos programas son también ampliamente utilizados por diferentes organismos en otros países.

7.- ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN REQUERIDA PARA DELIMITAR PERÍMETROS DE PROTECCIÓN A LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO. APLICACIÓN AL CASO DE LA LOCALIDAD DE VILLACASTÍN (SEGOVIA)

La elección de la localidad de Villacastín, en la provincia de Segovia, para delimitar los perímetros de protección en sus captaciones de abastecimiento, se ha considerado idónea tras el análisis de sus características y problemática, que la hacen extrapolable a otras localidades, entre las que cabe destacar las siguientes:

- Capta un acuífero detrítico de la cuenca del río Duero, con la amplia extensión que tienen dichos materiales en España, con características, que los hacen especialmente indicados para la delimitación de perímetros de protección.
- Tiene una población, en torno a 1500 habitantes en el año 2001 (INE, 2002), y una actividad socioeconómica, agrícola, ganadera e industrial, de carácter medio.
- La infraestructura del abastecimiento a la población y las necesidades de agua para el mismo permiten analizar suficientemente los aspectos a considerar de un modo genérico en la problemática del abastecimiento a poblaciones.
- Los focos potenciales de contaminación en el término municipal son de diverso tipo: agrícola (básicamente cultivos de secano de cereales), ganadero (explotaciones extensiva e intensivas), urbanos e industriales.
- Los estudios precedentes efectuados en la zona (Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 1999 y 2000; Martínez Navarrete y García García, 2001 a y 2001 b), han puesto de relieve el interés del Ayuntamiento de Villacastín en garantizar la protección de sus captaciones de abastecimiento, y permitido disponer de una información de partida referente a los aspectos a considerar en la delimitación de perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano.

El análisis efectuado comprende los siguientes aspectos:

7.1.- Situación geográfica

La localidad de Villacastín (Segovia) está ubicada en el extremo sureste de la cuenca del río Duero, en el noroeste de la península (Figura, 3).



Figura 3: Situación geográfica de la localidad de Villacastín (Segovia) en la cuenca del río Duero.

7.2.- Marco geológico

La zona existente en el entorno del municipio de Villacastín, seleccionado en esta Tesis Doctoral para la delimitación de perímetros de protección de sus captaciones de abastecimiento, está ubicada en el extremo sureste de la Cuenca del Duero, en una fosa tectónica que paralela a la sierra de Guadarrama y Somosierra se extiende en dirección SO-NE. Sus límites sur y este lo forman materiales plutónicos y metamórficos del Sistema Central. El norte lo constituyen los materiales paleozoicos, triásicos, jurásicos y cretácicos que forman la Sierra de Pradales. Por último un macizo alargado constituido por afloramientos de rocas plutónicas y metamórficas con la misma dirección del Sistema Central (Figura 4) constituye el límite oeste y noroeste.

Entre estos últimos afloramientos y el Sistema Central hay una fosa tectónica de unos 30 km de ancho rellena de materiales cretácicos, terciarios y cuaternarios.

7.2.1.- Litoestratigrafía

Las características generales del análisis litoestratigráfico efectuado en esta Tesis Doctoral, en el área previamente indicada, están basadas en IGME, 1982 a y Pérez González *et al.*, 1990 y se pueden resumir como:

A.- Paleozoico-metamórfico

Está constituido fundamentalmente por granitos y gneises y en menor proporción por pizarras y cuarcitas.

El granito está atravesado por numerosos diques de pórfido, aplitas y pegmatitas, así como diques de cuarzo, y en general presenta una red de pequeñas fracturas. Las pizarras se presentan en paquetes de poco espesor (0,5 m a 3 m) con distinto grado de metamorfismo y están fuertemente tectonizadas.

B.- Mesozoico

Sobre el Paleozoico y discordante con él se dispone el Mesozoico, que aflora a lo largo de toda la fosa tectónica, delimitando sus bordes sur y norte, así como en algunos afloramientos cretácicos en las proximidades de los ríos Eresma y Pirón. En el resto de la fosa está recubierto por materiales terciarios.

B.1.- Triásico

Sobre el Paleozoico se apoyan materiales triásicos, en la zona de la Sierra de Pradales, con facies germánica. El Buntsandstein lo componen una serie de conglomerados y areniscas con abundante estratificación cruzada. En las proximidades de Torreadrada, en la Sierra de Pradales, afloran unas calizas compactas en bancos de 1 m a 0,5 m que probablemente correspondan al Muschelkalk.

Por último el Keuper está representado por areniscas verdes y calizas margosas, alternantes con unas margas abigarradas.

La potencia total del Trías es de unos 150 m.

B.2.- Jurásico

Los materiales jurásicos, concordantes con la serie triásica, están representados por unas calizas dolomíticas muy irregularmente erosionadas.

Esta serie jurásica constituye un gran anticlinal que se encuentra fallado en su núcleo, presentando buzamientos suaves hacia el norte y noroeste introduciéndose bajo materiales terciarios en las inmediaciones del denominado páramo del Duratón. La potencia total del Jurásico se estima en unos 100 a 120 metros.

B.3.- Cretácico

En el Cretácico, discordante sobre las demás formaciones, paleozoicas, triásicas o jurásicas, se han diferenciado en función de la litología diversos tramos, todos ellos concordantes entre sí con vergencia hacia el interior de la cubeta, que descritos de muro a techo son:

- Facies Utrillas: Alternancia de arcillas versicolores y arenas de colores blanco a ocre muy heterométricas con frecuentes cambios laterales. El conjunto tiene una potencia variable entre 20 y 70 metros.
- Tramo margo-calizo-dolomítico y de materiales areniscosos: Sobre el tramo anterior se encuentran unas margas de colores marrones y verdosos, con algunos niveles de calizas margosas intercalados, terminando en un paquete calizo-dolomítico. Sobre ellas aparece una formación detrítica constituída por materiales areniscosos, con gravillas de color pardo.

localidad de Madrona (ubicada a unos 7 kilómetros al suroeste de Segovia capital) los 20 a 30 metros. Con la formación margo-calizo-dolomítica sucede al revés, es decir sus mayores espesores (30 a 40 metros) se producen en el norte.

- Tramo dolomítico: Serie de dolomías frecuentemente karstificadas en bancos potentes (30 a 40 m). En el río Riaza, al norte de Somosierra, en el extremo noreste, la serie, que tiene alguna intercalación margosa, alcanza espesores de 150 metros hasta el recubrimiento por el Terciario. Hacia el sur los espesores son menores, llegando a tener 40 a 50 m en Madrona.
- Tramo margo-dolomítico: Conjunto de calizas blanquecinas y dolomías margosas y bancos de margas amarillentas compactas, más o menos arcillosas. El tramo tiene una potencia aproximada de unos 50 m y localmente los niveles margo-dolomíticos contienen yesos. Únicamente se presentan en la zona norte.

C. Terciario

Son materiales que se han depositado en régimen continental con sedimentación fluvial, discordantes sobre las anteriores formaciones y cubriendo indistintamente a cualquiera de ellas.

Los materiales terciarios del borde de la formación están constituidos mayoritariamente por una serie de brechas de cantos calizos empastados en un cemento calcáreo. Esta brecha caliza sufre variaciones en cuanto a su composición mediante el aporte del material detrítico del Albiense, Buntsandstein, y Paleozoico, originando una brecha poligénica calizo-silícea que engloba cantos de pizarra y gneis entre otros.

Estos materiales son los que posteriormente, por simple cambio lateral de facies, pasan a formar los niveles típicos del Mioceno Superior Castellano. (Pérez González *et al.*, 1990).

La potencia aproximada que llegan a tener estos sedimentos es del orden de 30 m.

Al aumentar la distancia respecto a los afloramientos Mesozoicos aparece un terciario formado por potentes paquetes arcillo-margo-arenosos de distintos colores, así como niveles de conglomerados escasamente cementados y niveles de arena de potencia variable. También existen, hacia el interior de la cubeta niveles poco potentes de calizas margosas de génesis lagunar.

La potencia de este Terciario varía según las zonas de acuerdo con la disposición del zócalo. Existen sondeos en los que la potencia supera los 400 m, como sucede al norte de la localidad de Aldeavieja (ubicada siete kilómetros al oeste de Villacastín). Mientras que en algunas zonas en las que el zócalo está próximo a la superficie, como sucede al norte de Segovia capital, las potencias apenas alcanzan los 50 m (IGME, 1982 a).

Los niveles de arenas que constituyen las formaciones más permeables, están dispuestos en general en forma de lentejones de dimensiones variables, tanto horizontal como verticalmente.

D.- Cuaternario

Está representado por depósitos del Pleistoceno y Holoceno constituidos básicamente por aluviales, terrazas, arenales y rañas.

La naturaleza de los aluviales está en función del aporte producido desde el área madre y su distancia. Están constituidos principalmente por arenas y limos arcillosos con gravas y cantos de litologías bastante heterogéneas con un espesor que no suele superar los 2 metros.

Aunque con desigual entidad, todos los cursos fluviales tienen un sistema de terrazas asociado. El gran desarrollo de terrazas al norte de Villacastín contrasta con la escasa entidad que tiene actualmente el Arroyo de los Prados al que se asocian. Constituidas por cantos rodados y bloques de granito, gneis y cuarzo con matriz arcósica tiene un aspecto litoestratigráfico muy semejante al del sustrato terciario con el que es muy fácil de confundir (Pérez González *et al.*, 1990).

Los arenales constituyen extensos depósitos de arenas de origen eólico, que recubren a las formaciones arcillo-arenosas del Mioceno. Su espesor oscila entre 2 y 20 m.

Por último las rañas son depósitos de cantos y bolos casi exclusivamente de cuarcita con matriz arcillosa arenosa, rojiza. Morfológicamente presentan superficies planas y ligeramente inclinadas. Pueden llegar a tener una potencia de 15 m.

7.2.2. -Tectónica

La tectónica de la zona de estudio (IGME, 1982 a; Pérez González *et al.*, 1990) se encuentra íntimamente relacionada con la del Sistema Central. Al final del Oligoceno se produce un abombamiento del zócalo y cobertera mesozoica cuyo eje coincide sensiblemente con la divisoria hidrológica actual entre el Tajo y el Duero, con lo que la cobertera adquiere un ligero buzamiento hacia el centro de las cuencas respectivas. Posteriormente se producen fallas longitudinales que separan ambas mesetas y levantan el bloque central, donde actúa la erosión y produce su desmantelamiento.

La alineación existente al noroeste de la fosa tectónica que corre en dirección noreste – suroeste a una distancia aproximada de 15 a 25 km de la Sierra del Guadarrama descrita en el capítulo 7.2.1. tiene importancia desde el punto de vista tectónico y está emergida probablemente desde antes del Mioceno y rejuvenecida posteriormente.

A lo largo de esta alineación pueden descubrirse diversos movimientos en el transcurso del tiempo. El primer movimiento importante de ascenso de la alineación Santa María de Nieva-Fuentidueña es postcretácico, constituyéndose como un umbral que aísla una prefosa miocena de la gran fosa terciaria. El Cretácico queda adosado al borde suroeste del zócalo, amoldándose al movimiento.

La sedimentación del Mioceno detrítico adquiere gran importancia y desarrollo, haciéndose transgresiva, tanto sobre los materiales precretácicos como sobre los mesozoicos.

Posteriormente a la sedimentación miocena, vuelve a rejuvenecerse el movimiento ascendente, produciéndose al mismo tiempo una fuerte denudación de los materiales, tanto miocenos como anteriores, y así todos los afloramientos forman, en general, la topografía suave uniforme de la meseta.

7.3.- Socioeconomía

7.3.1.- Población

El municipio de Villacastín tiene una población de 1514 personas según los datos del censo del Instituto Nacional de Estadística (INE) correspondientes al año 2001 (INE, 2002). Según información del Ayuntamiento esta población prácticamente se duplica en la temporada estival.

La evolución de la población de Villacastín según la información disponible en el INE (INE, 2002), se indica en la Tabla 3.

TABLA 3.- EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN DE DERECHO Y DE HECHO EN VILLACASTÍN (SEGOVIA)

AÑO	POBLACIÓN DE DERECHO (Hab)	POBLACIÓN DE HECHO (Hab)
1900	---	1416
1910	---	1467
1920	---	1347
1930	---	1394
1940	---	1466
1950	---	1577
1960	---	1608
1970	---	1734
1981	---	1579
1985	1611	---
1986	1658	---
1987	1667	---
1988	1635	---
1989	1643	---
1990	1631	---
1991	1617	1600
1992	1627	
1993	1610	
1994	1568	
1995	1571	
1996	1540	
1997	---	
1998	1538	
1999	1537	
2000	1506	
2001	1514	

La población creció fuertemente desde el año 1900 (en que había 1416 habitantes) hasta

1970, año en que se alcanzó un máximo histórico de 1734 habitantes.

En la década de los setenta se produjo un acusado descenso demográfico llegando a 1579 habitantes en el año 1981, incrementándose posteriormente hasta alcanzar 1667 habitantes en el año 1987.

Desde el año 1987 hasta el año 2000 la población ha decrecido un 9,6 % alcanzándose los 1506 hab en el año 2000, observándose en el último año un ligero incremento del 0,5 % de la población.

Esta tendencia a la baja se produce en la mayoría de los municipios de la provincia, cuya población tiende a concentrarse en Segovia capital, que ha duplicado sus habitantes de derecho desde 1950 hasta la actualidad.

Con estos datos, y de mantenerse un ritmo de evolución semejante, no cabe esperar incrementos de la población de derecho de Villacastín en los próximos años, si bien podría existir un incremento de la población que acude al municipio en la temporada estival, difícil de cuantificar.

7.3.2.- Actividad socioeconómico del municipio

La actividad socioeconómica del municipio de Villacastín se centra en la agricultura de secano de cereales (trigo y cebada), en una amplia ganadería, con aproximadamente 40 explotaciones, intensivas y extensivas, repartidas por el término municipal, limitándose la industria a dos fábricas (de embutidos y de harina), a un aserradero y a diversas canteras, si bien la importancia de estas se ha visto reducida notablemente en los últimos años.

La construcción presenta un crecimiento notable ligado en gran medida a la rehabilitación de vivienda y la construcción de nuevas casas empleadas básicamente en la temporada estival.

El sector de servicios, con una amplia tradición en Villacastín como cruce de caminos, cuenta con diversos hostales y restaurantes, ubicados junto a las carreteras, si bien está en declive desde que la construcción de la autopista A-6 evitó el tránsito por la población.

7.4.- Marco hidrogeológico

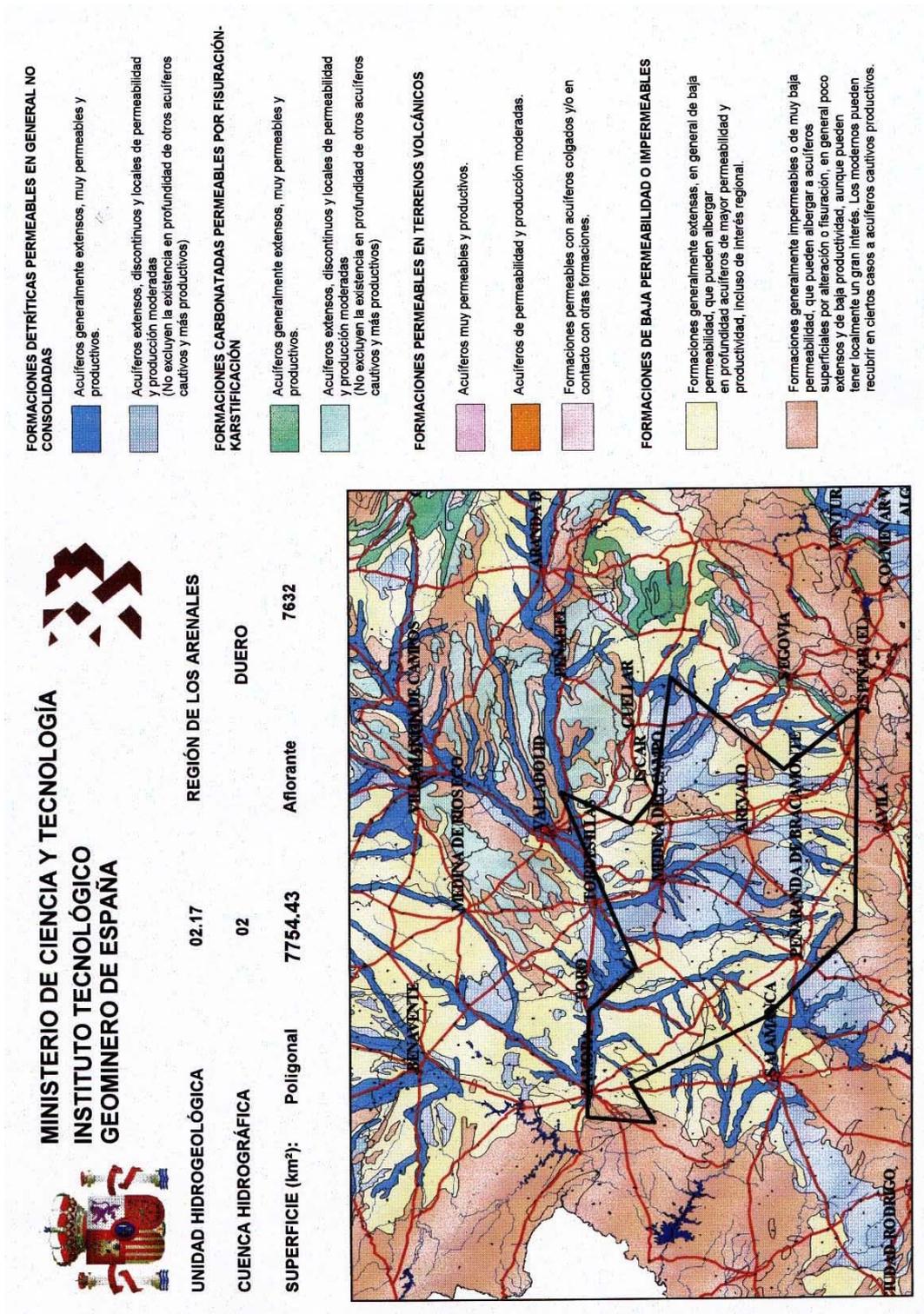
La zona estudiada está ubicada en el borde sureste de la cuenca del Duero en la unidad hidrogeológica 02.17 (DGOH e ITGE, 1988) Región de los Arenales (Figura 5 y Figura 6).

Esta unidad hidrogeológica, con una extensión de 7754 km², abarca parte de las provincias de Salamanca, Valladolid, Segovia, Ávila y Zamora (IGME, 2000).

En esta unidad (López Geta *et al.*, 1996 a) quedan representados dos tipos de acuíferos detríticos:

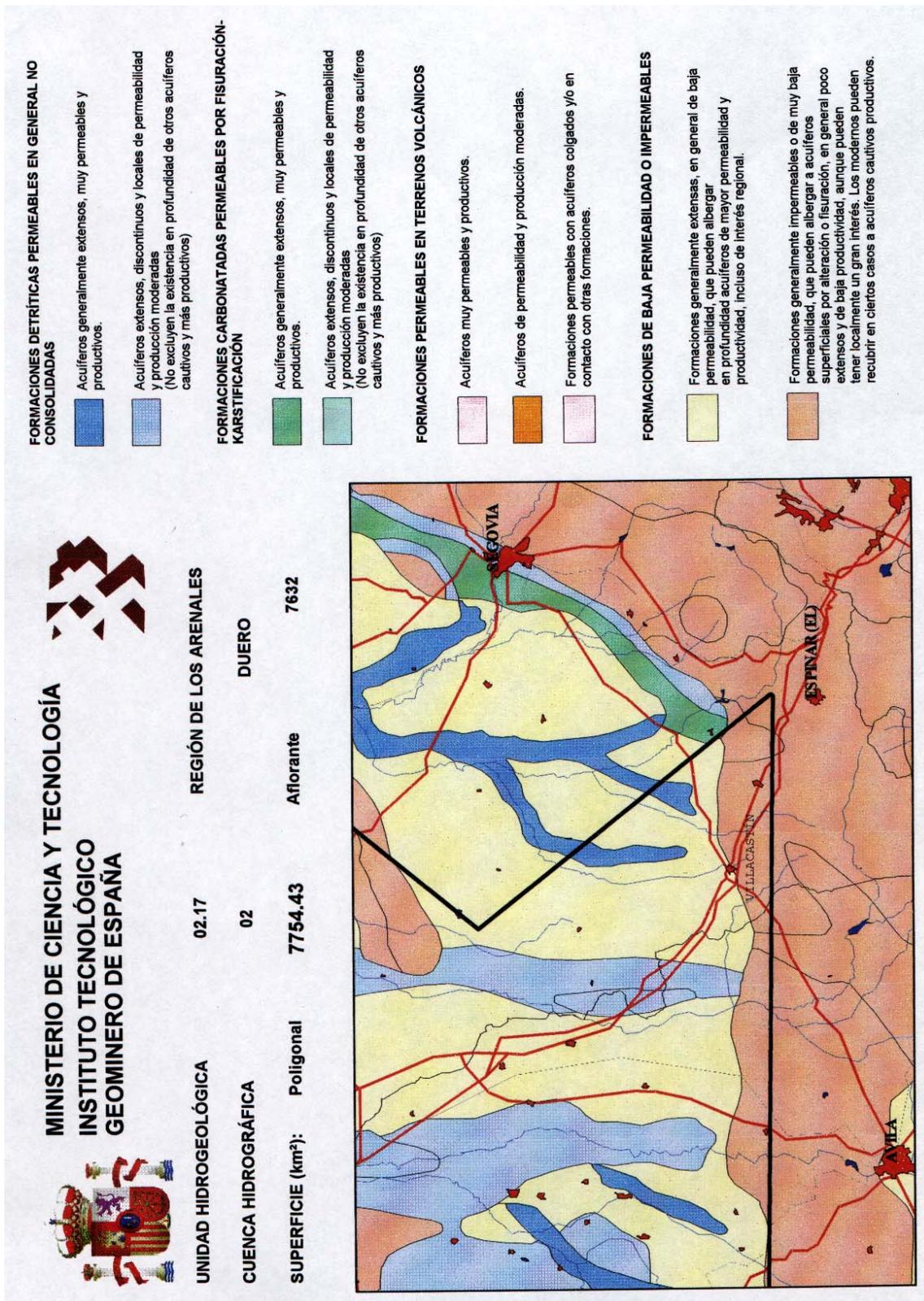
Acuíferos superficiales: Se encuentran en el sector comprendido entre Tormo, Cuéllar, Nava de Arévalo y Peñaranda de Bracamonte. Se trata de extensos depósitos de arenas y limos cuaternarios o pliocuaternarios con un espesor medio de 15 a 20 metros. Forman acuíferos libres heterogéneos, con una transmisividad que oscila entre 10 y 100 m²/día

aportando caudales entre 1 a 20 L/s con un rápido agotamiento (6 a 8 horas), sin gran interés para su explotación, si bien constituyen el principal elemento regulador de los acuíferos profundos a los que recargan.



Fuente: IGME, 2000.

Figura 5: Unidad Hidrogeológica 02.17. Región de los Arenales.



Fuente: IGME, 2000.

Figura 6: Unidad Hidrogeológica 02.17 Región de los Arenales en el entorno de Villacastín.

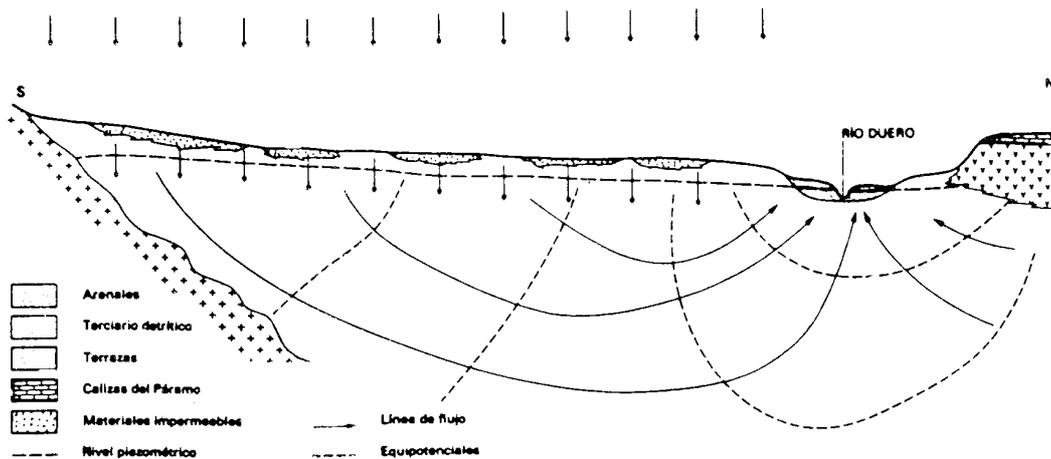
- **Acuíferos profundos:** Formados por capas lenticulares de materiales detríticos (arenas y gravas) en una matriz arcillo-limo-arenosa semipermeable. Los límites de la Región de los Arenales (al norte el Duero y la zona de los Páramos, al sur el Sistema Central, al oeste los granitos de tierras de Sayago y la región del Tormes y al este la unidad de Segovia) se comportan como si fueran impermeables a excepción del río Duero que es una vía de drenaje. Son acuíferos heterogéneos y anisótropos confinados o semiconfinados según las zonas. Los caudales extraídos son muy variables oscilando entre 10 y 30 L/s y los caudales específicos son del orden de 1 m/L/s.

El esquema de flujo regional se dirige desde los bordes de la cuenca hacia el Duero, que es la vía de drenaje más importante (Figura 7).

El balance de la Unidad Hidrogeológica (DGOH, 1993) es:

Entradas(hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)		Usos del agua (hm ³ /año)	
Lluvia:	100-290	Ríos:	50-65	Abastecimiento urbano:	14,8
Entradas laterales: (Región suroeste o del Tormes)	10-15	Bombeos:	187	Agrícola:	170
Retornos:	48			Industrial:	0,5
				Otros:	1,7
Total:	158-353	Total:	237-252	Total:	187

Las aguas subterráneas de la unidad (López Geta *et al.*, 1996 a) son bicarbonatadas cálcico-magnésicas, que predominan en la mayor parte de la unidad, y bicarbonatadas sódicas, existiendo en algunos puntos aguas sulfatadas -cloruradas cálcico-magnésicas y bicarbonatadas cloruradas. En el sector norte y en las proximidades del río Duero, en la zona de descarga las aguas, son bicarbonatadas cloruradas sódicas; también lo son en Madrigal de las Altas Torres y en la zona de Arévalo. Son aguas de dureza media (200-300 mg/L CO₃Ca) y mineralización notable (700-1000 μS/cm) en la mayoría de la unidad.



Fuente: López Geta *et al.*, 1996 a.

Figura 7: Esquema de flujo de la Unidad Hidrogeológica 02.17. Región de los Arenales.

La zona objeto de análisis en esta Tesis Doctoral está situada (como se indicó en el capítulo 7.2.) en una fosa tectónica rellena de materiales cretácicos, terciarios y cuaternarios, limitada por los materiales que constituyen la Sierra de Pradales al norte, un macizo alargado de rocas plutónicas y metamórficas con la misma dirección del Sistema Central al oeste y noroeste y los materiales plutónicos y metamórficos del Sistema Central al sur, y este. Esta fosa, que constituía el denominado anteriormente sistema acuífero número 11 (IGME, 1982 a), ha sido incluida parcialmente en la Unidad Hidrogeológica 02.17 (en su extremo sureste), cuyas características generales han sido ya descritas.

Los materiales mesozoicos, cuyas características litoestratigráficas han sido ya descritas en el capítulo 7.2.1. de esta Tesis Doctoral, afloran en el borde sur y norte de dicha fosa y, recubiertos por materiales terciarios en el resto de la fosa, constituyen acuíferos de interés, especialmente los materiales Jurásicos que descargan hacia el norte fuera de esta área, y el tramo dolomítico, diferenciado en el Cretácico cuando está saturado. En menor medida puede considerarse de interés el tramo calizo-dolomítico y de materiales arenosos cretácico, de comportamiento hidrogeológico irregular, dependiendo de su espesor en cada zona, y el tramo margo dolomítico que, aunque tiene poca permeabilidad, ocasionalmente da lugar a manantiales que pueden resolver problemas locales. Las Facies Utrillas del Cretácico y los materiales triásicos carecen de interés en la zona por su baja permeabilidad.

Los materiales del Terciario, discordantes sobre las formaciones inferiores, cubriendo indistintamente a cualquiera de ellas, constituyen un acuífero de gran interés.

El Terciario está constituido por conglomerados de borde y materiales arcillo arenosos del Mioceno. Presenta una serie de lentejones arenosos de extensión variable incluidos dentro de una matriz areno-limo-arcillosa de naturaleza semipermeable, a través de la cual se relacionan hidráulicamente, funcionando el conjunto como un acuífero único muy heterogéneo y anisótropo (IGME, 1982 a).

Los niveles de arenas, que constituyen las formaciones más permeables, están dispuestos lantejonarmente en la serie arcillo-margo-arenosa, con dimensiones variables tanto horizontal como verticalmente. La potencia del Terciario es variable según las zonas de acuerdo con la disposición del zócalo, pudiendo variar entre los más de 400 m que presenta al norte de la localidad de Aldeavieja (ubicada a unos 7 km al oeste de Villacastín) y apenas 50 m al norte de Segovia capital (IGME, 1982 a).

El Terciario esta parcialmente recubierto por materiales cuaternarios (aluviales, arenales y rañas), estando ambos conjuntos conectados hidráulicamente. Los arenales, que alcanzan su mayor desarrollo en la zona norte, constituyen un acuífero libre cuya mayor importancia reside en el papel que juega de regulador de la recarga del terciario detrítico sobre el que se apoya directamente.

Por último en los materiales plutónicos y metamórficos del Sistema Central, aflorantes al sur de la fosa antes indicada, constituidos fundamentalmente por granitos fracturados con diques de cuarzo, pórfido, aplita y pegmatitas así como gneises, pizarras y cuarcitas, aunque sin importancia hidrogeológica a nivel regional, presentan manantiales y captaciones que permiten resolver demandas locales. Este es el caso del área situada al sur del casco urbano de Villacastín, donde diferentes pozos perforados en estos materiales son empleados para el abastecimiento de esta población.

7.5.- Hidrogeología del entorno de Villacastín

El abastecimiento a la población de Villacastín se efectúa empleando los recursos del acuífero Terciario detrítico, que es captado por cuatro sondeos, y las captaciones existentes en materiales graníticos al sur del casco urbano (Mapa 1), mediante el bombeo de tres pozos.

Estas siete captaciones están ubicadas dentro del término municipal de Villacastín.

En el plano y los cortes hidrogeológicos incluidos en la Figura 8, realizados con el apoyo de columnas litológicas de los sondeos allí referenciados, se muestra como los materiales mesozoicos se acuña hacia el extremo suroeste de la cubeta que constituía el anteriormente denominado sistema 11, tienen aún cierta entidad en el corte número 2 y desaparecen por completo en el corte número 1, realizado en dirección sur-norte desde la localidad de Aldeavieja, muy próxima a Villacastín, por lo que no cabe esperar acuíferos mesozoicos en el área donde se ubican las captaciones de abastecimiento de este municipio. La misma conclusión se obtiene de los estudios geofísicos realizados por la empresa Sondagua para el Ayuntamiento de Villacastín (Sondagua, 1993), en el área donde se ubican las captaciones (consistentes en nueve sondeos eléctricos verticales y su interpretación en tres cortes), que asigna todos los materiales hasta la profundidad máxima alcanzada de 300 m como pertenecientes al Terciario y Cuaternario.

Las principales características de los acuíferos captados para el abastecimiento de Villacastín, son:

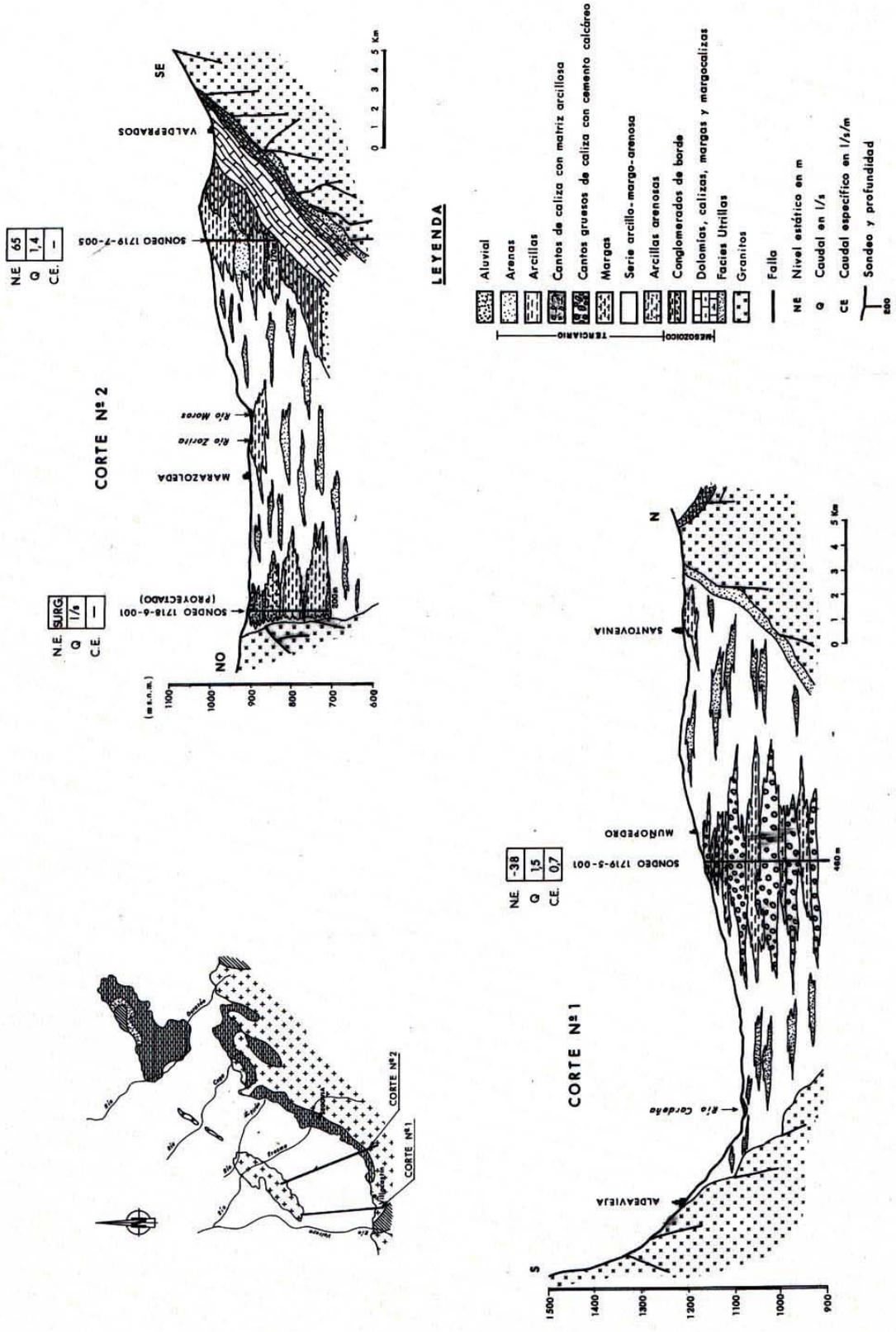
7.5.1.- Acuífero del Terciario detrítico

- Naturaleza

Los materiales detríticos del Terciario, captados por los sondeos de abastecimiento de Villacastín, están constituidos por una serie de lentejones de materiales permeables (arenas y gravas) de extensión variable, incluidos dentro de una matriz areno-limo-arcillosa, de naturaleza semipermeable, a través de la cuál están relacionados hidráulicamente. Están parcialmente recubiertos por materiales cuaternarios, estando ambos conjuntos conectados hidráulicamente, funcionando regionalmente como un acuífero único, libre, heterogéneo y anisótropo. A escala local su funcionamiento se ajusta más al de un acuífero multicapa con una serie de niveles arenosos, acuíferos, separados entre sí por niveles arcillosos, acuitardos (Martínez Navarrete y García García, 2001 a).

- Características de las captaciones

Las principales características de los puntos de agua inventariados en esta Tesis Doctoral, en el área analizada del acuífero del Terciario detrítico, en la que se ubican las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín (Mapa 1), se muestran en la Tabla 4.



Fuente: IGME, 1982.

Figura 8: Cortes hidrogeológicos en el área objeto de estudio.

TABLA 4.- PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE AGUA INVENTARIADOS EN EL ACUÍFERO DEL TERCIARIO DETRÍTICO EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE VILLACASTÍN.

NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE	TIPO DE CAPTACIÓN, PROFUNDIDAD Y DIÁMETRO	UTILIZACIÓN, BOMBA Y CAUDAL DE EXPLOTACIÓN	PROFUNDIDAD Y COTA DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO	OBSERVACIONES
172010002 Pozo de la Gasolinera	Pozo, 4.8 m Pozo de gran diámetro (4-5m)	Abastecimiento de dos gasolineras y un restaurante	CERRADO. No se puede medir (07-10-2001)	
172010003 Sondeo de la Gasolinera	Sondeo, 120 m 300 mm de diámetro	Abastecimiento de dos gasolineras y un restaurante. Bomba a 70 m de profundidad. Bombeos intermitentes con depósito regulador. Q = 3 L/s durante 2 horas al día. Volumen diario 21,6 m ³	CERRADO. No se puede medir (07-10-2001) Nivel piezométrico= 1070 m s.n.m. (7-10-2001)	Información del propietario
172010004 Fuente año 1956	Manantial	Ganadería (abrevadero) Q < 0,1 L/s (Octubre 2001)	Cota = 1055 m (07-10-2001)	
172010005 Sondeo de las Fresas	Sondeo, 100 m 300 mm de diámetro	Agricultura. Riego de 4 ha de fresas con aspersores. Bomba sumergible 4 CV.	Prof = 0,34 m Nivel piezométrico = 1029 m s.n.m. (6-10-2001)	
172010006 Sondeo Fly Trap	Sondeo, 100 m 300 mm de diámetro	Abastecimiento hotel	CERRADO. No se puede medir	
172020001 Puente Alzado (88043604 C.H. Duero)	Sondeo, 100 m (actualmente 90 m) 300 mm de diámetro	Abastecimiento Villacastín. Bomba de 20 CV a 82 m de profundidad. Q = 3-5 L/s	Surgente (6-10-2001) Cota > 1035 m (Cota de la boca del sondeo surgente)	Actualmente no se bombea. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento. Descarga por "Fuente Alamo". Tiene caseta y valla metálica alrededor. Datos de análisis químicos
172020002 Fuente Alamo	Manantial	Ganadería (Abrevadero)	Cota = 1035 m (7-10-2001)	Esta conectada al sondeo Puente Alzado (surgente) por una tubería.

TABLA 4 (CONTINUACIÓN). - PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE AGUA INVENTARIADOS EN EL ACUÍFERO DEL TERCIARIO DETRÍTICO EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE VILLACASTÍN.

NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE	TIPO DE CAPTACIÓN, PROFUNDIDAD Y DIÁMETRO	UTILIZACIÓN, BOMBA Y CAUDAL DE EXPLOTACIÓN	PROFUNDIDAD Y COTA DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO	OBSERVACIONES
172020003 Cañada del Abad	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	Abastecimiento a Villacastín. Bomba de 40 CV a 75 m de profundidad. Q = 3 L/s Abril a sept = 14 horas. Resto año = 8 horas	Prof = 14,5 m Nivel piezométrico > 1025 m s.n.m. (07-10-2001) Nivel dinámico en recuperación, sin bombear en 1 hora.	Tiene caseta, no tiene valla metálica alrededor.
172020004 San Bartolomé (88043604 C.H. Duero)	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	Abastecimiento a Villacastín. Bomba de 20 CV a 80 m de profundidad. Q = 3-5 L/s	Prof = 3,23 m Nivel piezométrico: 1050,97 m s.n.m. (6-10-2001) Nivel estático (sin bombear en meses)	Actualmente no se bombea. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento sustituyendo la tubería y bomba actuales.
172020005 Camino del Valle	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	Abastecimiento a Villacastín. Bomba de 40 CV a 75 m de profundidad. Q = 3 L/s Abril a sept = 14 horas. Resto año = 8 horas	Prof = 10,0 m Nivel piezométrico > 1045 m s.n.m. (07-10-2001) Nivel dinámico en recuperación, sin bombear en 48 horas.	Tiene caseta. No tiene valla metálica.
172020006 Sondeo Granja de huevos Velasco	Sondeo, 104 m 300 mm de diámetro	Ganadería. Granja de gallinas ponedoras. Bomba de 5 CV. Depósito de 1000 litros. Volumen diario bombeado= 25 m ³ /día	Prof = 7,31 m Nivel piezométrico: 1057,0 m s.n.m. (6-10-2001) Nivel estático.	
172020007 Fuente del km 86	Manantial	Ganadería (abrevadero) Q = 0,3 L/s (7-10-2001)	Manantial con agua Cota = 1075	
172020008	Pozo, 6 m Pozo de gran diámetro (4-5m)	Agricultura	Prof = 0,63 m Nivel piezométrico: 1099,0 m s.n.m. (6-10-2001)	
172020016 Fuente del Espino	Manantial	Ganadería Q < 0,1 L/s (7-10-2001)	Manantial con agua Cota = 1040 m s.n.m. (7-10-2001)	

- Recarga-Descarga

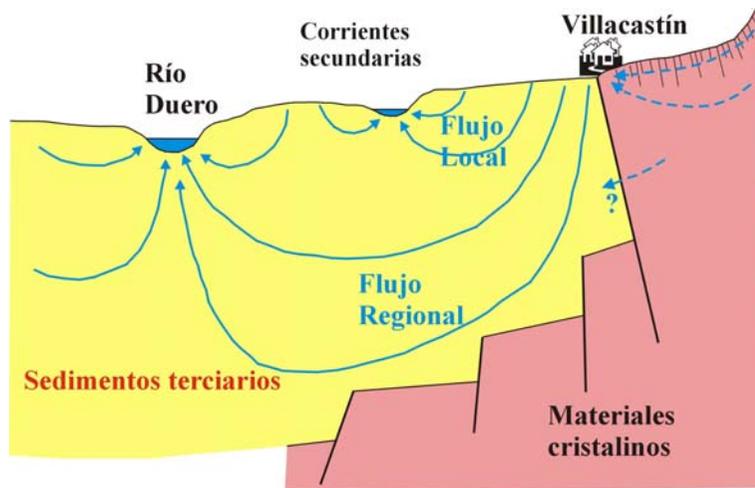
El funcionamiento hidrogeológico del acuífero del Terciario detrítico en el entorno de Villacastín (Figura 9), obtenido del análisis del mapa hidrogeológico elaborado en esta Tesis Doctoral (Mapa 1), indica que las zonas de recarga corresponden a los interfluvios, descargándose en los diferentes arroyos, entre los que destaca el de los Prados (junto al que se ubican las captaciones de abastecimiento), que discurren de sur a norte, y mediante bombeos, existiendo un flujo regional de toda el área hacia el río Duero, al norte del área analizada.

El límite sur del acuífero, constituido por el contacto con los materiales graníticos, es considerado regionalmente como límite impermeable, si bien podría existir, localmente, un flujo y aportación lateral de escasa entidad desde los materiales graníticos.

La recarga de los acuíferos Terciario y Cuaternario, en el área analizada, procede de la infiltración del agua de lluvia, que se ha evaluado en $1,02 \cdot 10^{-4}$ m/día. Esta se ha obtenido en base al análisis de la precipitación media anual en Villacastín, que supone 750 mm/m²/año, y a los resultados de la campaña de aforos realizada en la zona, que ha permitido estimar valores de escorrentía total de 15% de la precipitación y de infiltración del orden del 5% de la pluviometría (IGME, 1982 a; González Manso *et al.*, 1998 a).

La descarga del acuífero en el área analizada, se produce por bombeos, para ganadería y el abastecimiento urbano de la localidad de Villacastín, limitándose el regadío a una pequeña zona con cultivo de fresas, y por drenaje a los arroyos y hacia el río Duero como ha sido ya indicado.

Los arroyos en la zona son ganadores, como indican los aforos realizados en la misma (IGME, 1982 a) y las estimaciones efectuadas en esta Tesis en los arroyos de la Asperilla y de los Prados, que atraviesa el término municipal de Villacastín de sur a norte.



Flujo local de descarga a los arroyos



Arroyos en la cuenca Terciaria



Cuenca sedimentaria Terciaria



Figura 9: Esquema de funcionamiento hidrogeológico del acuífero en materiales del Terciario detrítico y su manifestación física en el entorno de Villacastín.

- Parámetros hidráulicos

Se dispone de 51 datos de caudal específico (IGME, 1982 a) de los sondeos que explotan este acuífero. Su análisis estadístico indica:

Nº de datos:	51
Valor máximo:	3,5 L/s/m
Valor mínimo:	0,01 L/s/m
Valor medio:	0,37 L/s/m
Valor mediano:	0,49 L/s/m

Para el análisis de las transmisividades del acuífero terciario y cuaternario, se dispone de información completa de dos ensayos de bombeo realizados en las localidades de Carbonero el Mayor y Cantalejo, ubicadas 24 km al noroeste y 39 km al noreste respectivamente de la ciudad de Segovia en materiales de características semejantes a los captados para el abastecimiento a la localidad de Villacastín. Los resultados de los ensayos fueron los siguientes:

	Número de identificación del inventario de puntos acuíferos del IGME	
	18174003	17184022
Profundidad (m)	180	180
Nivel estático (m)	23,93	41,20
Caudal de bombeo (L/s)	12	5
Duración del ensayo (min)	1440	960
Nivel dinámico al finalizar (m)	96,34	87,10
Tiempo de recuperación (min)	---	540
Nivel al finalizar recuperación (min)	---	44,55
Transmisividad en bombeo (m ² /día)	12	5
Transmisividad en recuperación (m ² /día)	---	10

El mecanismo de depósito de los materiales de este acuífero se adapta al de los abanicos aluviales, lo que produce una distribución aleatoria tanto en vertical como en horizontal de canales más arenosos englobados en una matriz de naturaleza más arcillosa, lo que da lugar a un acuífero heterogéneo y anisótropo. El grado medio de anisotropía (K_H/K_V) de estos materiales en la cuenca del Duero es del orden de 100 (IGME, 1979).

Al analizar el tratamiento de los parámetros hidráulicos se emplearon los trabajos estadísticos de López-Camacho y Camacho (1976), López-Camacho y Camacho y Martínez Alfaro (1979) y Martínez Alfaro (1979 y 1980) en acuíferos correspondientes a materiales terciarios de carácter detrítico no consolidados que rellenan las grandes fosas tectónicas continentales, como las del Duero y del Tajo, de carácter heterogéneo y anisótropo. Estos han permitido determinar que la estructura de este tipo de acuíferos no es caótica y sus parámetros y características (caudal específico de los pozos, transmisividad y distribución de tramos productivos) siguen leyes estadísticas de distribución de tipo log-normal, es decir siguen una ley de efectos multiplicativos.

Al ser muy escasos los datos de transmisividad en la zona estudiada es necesario estimar este parámetro a partir de los caudales específicos ya que entre ambos existe una relación lineal (López-Camacho y Camacho y Martínez Alfaro, 1979).

Para obtener esta se ha empleado la correlación obtenida en una zona más amplia, la correspondiente a toda la cuenca detrítica sur del Duero (Martínez Alfaro *et al.*, 1986), de características iguales a la de la zona a modelar, con 169 datos de caudal específico y 35 de transmisividad que indicó que la ecuación de correlación es:

$$T [\text{m}^2/\text{día}] = 100,13 q_e [\text{L/s/m}] - 5,44$$

Su aplicación a la zona de estudio proporciona valores de transmisividad medios en el acuífero de 31 m²/día y un valor mediano de 43 m²/día.

Los valores de Transmisividad estimados por este procedimiento para las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín son del orden de los 30 m²/día.

No se dispone de valores de coeficiente de almacenamiento, habiéndose estudiado este en estudios precedentes en estos materiales (IGME, 1982 a) con un valor de $2 \cdot 10^{-3}$.

- Hidroquímica y calidad

En la Tabla 5, se muestran los resultados de los análisis químicos efectuados en esta Tesis Doctoral de los sondeos de abastecimiento urbano Puente Alzado (172020001), Cañada del Abad (172020003) y Camino del Valle (172020005) que captan el acuífero del Terciario detrítico.

Son aguas bicarbonatadas cálcicas, con dureza media y mineralización ligera (449 μS/cm) a notable (533 μS/cm y 563 μS/cm). Su composición química es muy parecida, como se observa en su representación porcentual empleada el diagrama de Piper-Hill-Langelier correspondiendo las 3 muestras a un mismo grupo de aguas (Figura 10) y de los valores correspondientes en el diagrama de Schöeller-Berkaloff (Figura 11).

La distribución espacial de estas aguas y sus características puede observarse en el Mapa 1 en el cual se ha incluido su representación empleando el diagrama de Stiff modificado.

En ninguno de los análisis químicos efectuados en estas captaciones (Tabla 5), se supera los valores de concentración máxima admisible, indicados en la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público (BOE, 1990).

El contenido de nitratos que presentan (de 14 a 36 mg/L) debe estar relacionada con la actividad antrópica, siendo su fuente más probable el abonado y las explotaciones ganaderas existentes en sus inmediaciones.

No se han detectado en los análisis efectuados contenido de nitritos ni amonio, cuya presencia podría indicar una contaminación reciente.

Por último cabe indicar que en los análisis bacteriológicos efectuados periódicamente por los responsables del abastecimiento municipal no se ha detectado ningún indicio de contaminación bacteriológica según la información proporcionada por el Ayuntamiento de Villacastín.

TABLA 5.-ANÁLISIS QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO EN MATERIALES DETRÍTICOS DE VILLACASTÍN.

Número de identificación del inventario de puntos acuíferos del IGME y nombre de la captación	Fecha del análisis (Toma de muestras)	DQO	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ⁼ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	CO ₃ ⁼ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Na ⁺ mg/L	Mg ⁺⁺ mg/L	Ca ⁺⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	pH	Conduct μS/cm	Residuo Seco 110°C	NO ₂ ⁻ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	P ₂ O ₅ mg/L	Si O ₂ mg/L
172020001 Puente Alzado	06-10-01	2,0	16	12	260	0	14	19	12	72	1	7,6	449	299	0	0	0	36,3
172020003 Cañada del Abad	07-10-01	1,1	18	25	298	0	36	38	14	76	2	7,8	563	382	0	0	0	32,1
172020005 Camino del Valle	07-10-01	1,0	18	12	261	0	26	33	12	64	2	7,6	533	363	0	0	0	32,6

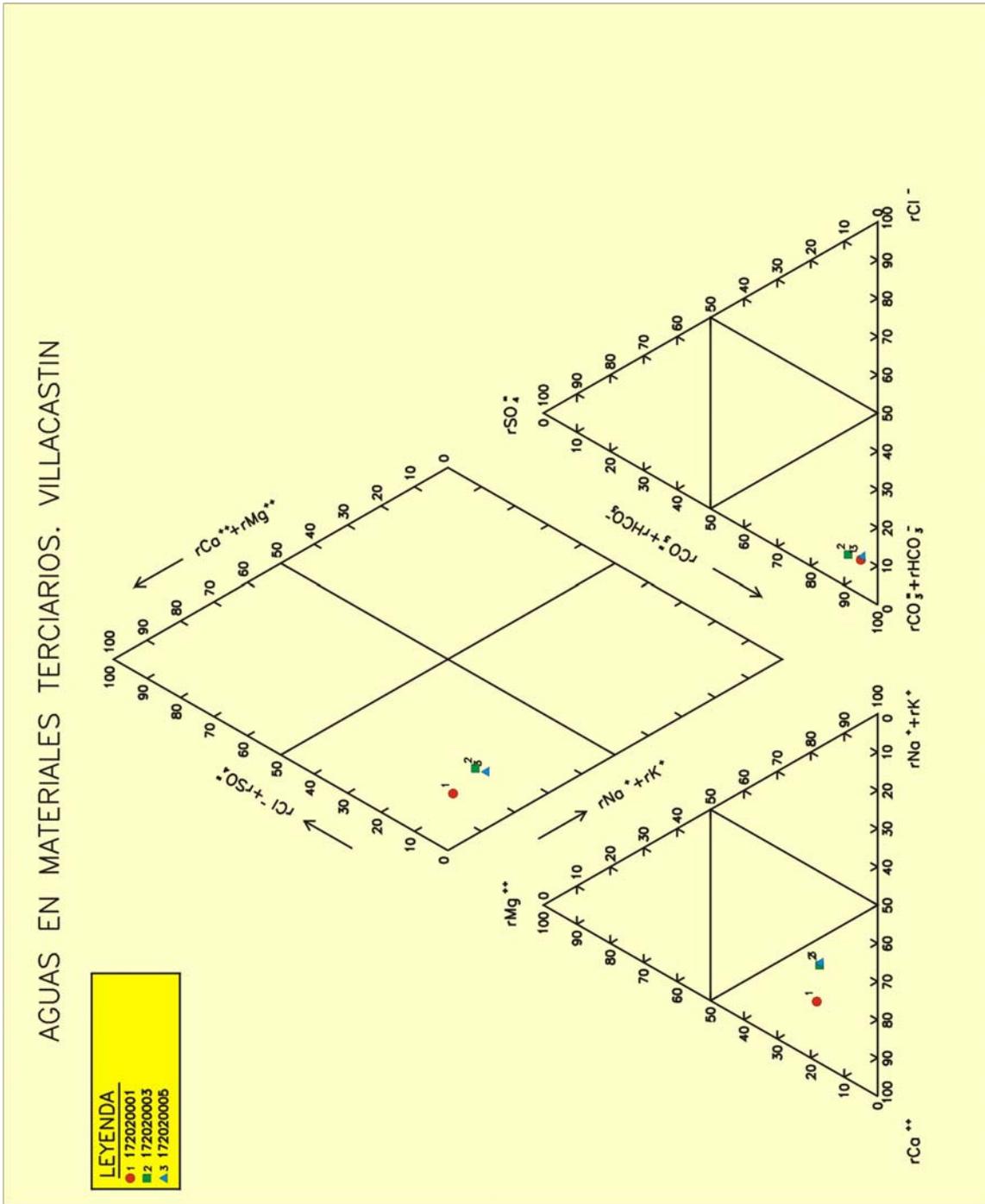


Figura 10: Diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de las captaciones del acuífero del Terciario detrítico.

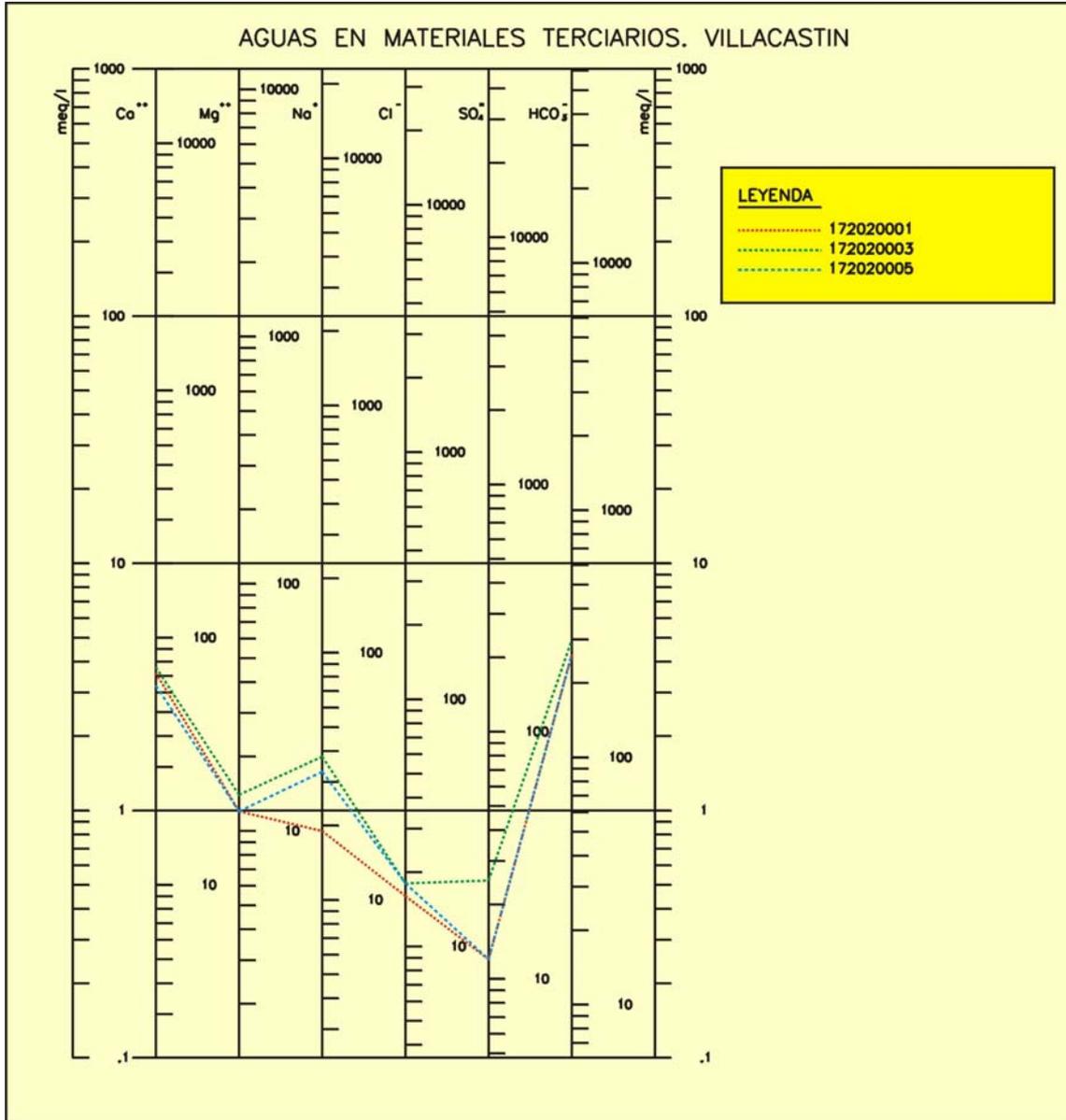


Figura 11: Diagrama de Schöeller-Berkaloff de las muestras de las captaciones del acuífero del Terciario detrítico.

7.5.2.- Captaciones en materiales graníticos

Los granitos existentes en el área de estudio, al sur de la localidad de Villacastín (Mapa 1), están fracturados y atravesados por numerosos diques de cuarzo, pórfido, apilitas y pegmatitas.

En estos materiales, sin importancia hidrogeológica regional, existen pequeños manantiales y pozos que permiten resolver demanda locales, captando el agua que circula a través de la red de fracturas y diques, así como los materiales de alteración de los granitos, de escasa potencia en la zona.

En la Tabla 6 se indican las principales características de los puntos de agua inventariados en esta Tesis Doctoral en dichos materiales.

La mayoría son manantiales de pequeño caudal, y pozos de gran diámetro y escasa profundidad (menor de 10 metros) como los 3 pozos empleados para el abastecimiento de Villacastín, de los que no se tiene ningún dato de columna litológica, ni de sus parámetros hidráulicos.

La excepción lo constituye el sondeo 172010001 (de 68 metros de profundidad), realizado por el IGME para abastecimiento a la localidad de Blascoeles (situada a unos 8 km al suroeste de Villacastín y de sus pozos de abastecimiento en estos materiales). En dicho sondeo el IGME realizó en 1993 un ensayo de bombeo, reflejado en la base de datos de puntos de agua del organismo, a caudal crítico de 23 horas, con un caudal de 0,75 L/s, obteniéndose un valor de transmisividad de 1,1 m²/día, reflejándose su columna litológica en la Tabla 6.

Los recursos de estos materiales, que proceden exclusivamente de la infiltración del agua de lluvia, sobre las rocas cristalinas, son descargados básicamente a través de escorrentías superficiales a diversos arroyos que surcan la zona (Mapa 1), pequeños manantiales empleados para abrevar al ganado, y bombeo, principalmente de los 3 pozos empleados para abastecimiento de la localidad de Villacastín y casas aisladas, existiendo muy probablemente un grado de desconexión elevado entre las diferentes áreas de alimentación de las captaciones difícil de precisar con la información disponible.

TABLA 6.- PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE AGUA INVENTARIADOS EN LOS MATERIALES GRANÍTICOS EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE VILLACASTÍN.

NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE	TIPO DE CAPTACIÓN, PROFUNDIDAD Y DIÁMETRO	UTILIZACIÓN, Y CAUDAL DE EXPLOTACIÓN	PROFUNDIDAD Y COTA DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO	OBSERVACIONES
172010001	Sondeo, 68 m 0-30 m: 350 mm de diámetro 30-68 m: 220mm de diámetro Tubería 180 mm ranurada de 6-68 m	Abastecimiento de la localidad de Blascoeles. Q = 0,25-0,75 L/s	Prof = 1,71 m Nivel piezométrico= 1113,29 m s.n.m. (13-10-2001)	Sondeo realizado por el IGME para abastecimiento a la localidad de Blascoeles. La columna litológica es: 0-6 m: Arcilla arenosa. 6-10 m: Granitos poco fracturados. 10-30 m: Granitos muy fracturados y diaclasados. 30-68 m: Granitos rosas inalterados
172020009 Manantial de la Ermita del Cristo del Valle	Manantial	No se utiliza actualmente Q < 0,1 L/s (13-10-2001)	Manantial con agua Cota = 1105 m	
172020010 Pozo Estacio	Pozo de gran diámetro (4-5 metros) 8-10 m de profundidad	Abastecimiento a Villacastín Q < 1 L/s	Prof = 1,67 m Nivel piezométrico= 1118,3 m s.n.m. (13-10-2001)	Actualmente no se bombea. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento. Tiene caseta y valla metálica alrededor. Datos de análisis químicos
172020011 Pozo de la Rejilla	Pozo de gran diámetro (4-5 metros) 8-10 m de profundidad	Abastecimiento a Villacastín Q < 1 L/s. Se bombea varias veces a la semana	Prof = 0,4 m Nivel piezométrico= 1099,6 m s.n.m. (13-10-2001)	Tiene caseta y valla metálica alrededor.
172020012	Pozo de gran diámetro (4 metros) 11 m de profundidad	Abastecimiento de 8 viviendas	Prof = 3,41 m Nivel piezométrico= 1151 m s.n.m. (13-10-2001)	
172020013 Fuente Raena	Manantial	Ganadería Q < 0,1 L/s (13-10-2001)	Manantial con agua Cota = 1165 m	
172020014 Pozo de los Lavaderos	Pozo de gran diámetro (4-5 metros) 8-10 m de profundidad	Abastecimiento a Villacastín Q = 1-1,5 L/s. Se bombea 1 día a la semana	Prof = 1,3 m Nivel piezométrico= 1128,7 m s.n.m. (13-10-2001)	Tiene caseta y valla metálica alrededor. Tiene conexión hidráulica directa con el arroyo del Lavadero que está a unos 3 metros de distancia.
172020015	Manantial	Ganadería (Abrevadero) Q = 0,03 L/s (13-10-2001)	Manantial con agua Cota = 1140 m	

TABLA 6 (CONTINUACIÓN).- PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE AGUA INVENTARIADOS EN LOS MATERIALES GRANÍTICOS EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE VILLACASTÍN.

NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE	TIPO DE CAPTACIÓN	UTILIZACIÓN, Y CAUDAL DE EXPLOTACIÓN	PROFUNDIDAD Y COTA DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO	OBSERVACIONES
172060001 Manantial de los Alijares	Manantial	Ganadería Q < 0,05 L/s	Manantial con agua Cota = 1250 m	
172060002 Fuente Taberna	Manantial	Ganadería Q < 0,05 L/s	Manantial con agua Cota = 1280 m	
172060003 Fuente Tordeveguas	Manantial	Ganadería Q < 0,05 L/s	Manantial con agua Cota = 1305 m	

En la Tabla 7 se muestran los datos hidroquímicos disponibles en estos materiales en la zona estudiada, correspondiente a los pozos de abastecimiento urbano de Villacastín: Estacio (172020010), de la Rejilla (172020011) y de los Lavaderos (172020014), así como al sondeo 172010001.

En las Figuras 12 y 13 se muestra su representación gráfica empleando los diagramas de Piper-Hill-Langelier y Schöeller-Berkaloff respectivamente.

La distribución espacial de estas aguas y sus características puede observarse también en su representación mediante el diagrama de Stiff modificado incluido en el Mapa 1.

En la Figura 14 se refleja la representación gráfica de las muestras de las captaciones del acuífero del Terciario detrítico y de las captaciones en materiales graníticos empleando el diagrama de Piper-Hill-Langelier.

Su análisis indica que puede distinguirse dos grupos de aguas: Las aguas son cloruradas cálcicas en los pozos Estacio (172020010) y de la Rejilla (172020011), con una mineralización notable siendo aguas de dureza media (231 mg/L de $\text{CO}_3 \text{ Ca}$) en el pozo de la Rejilla y duras (374 mg/L de $\text{CO}_3 \text{ Ca}$) en el pozo Estacio.

En el segundo grupo, compuesto por el pozo de los Lavaderos (172020014) y el sondeo de Blascoeles (172010001), las aguas son bicarbonatadas cálcicas, presentando diferencias en su mineralización que es débil en el pozo de los Lavaderos y notable en el sondeo de Blascoeles, así como en su dureza siendo aguas blandas (84 mg/L de $\text{CO}_3 \text{ Ca}$) en el pozo de los Lavaderos y media (271 mg/L de $\text{CO}_3 \text{ Ca}$) en el sondeo de Blascoeles.

Existen no obstante notables diferencias en las características químicas de las captaciones de cada uno de esos grupos, que son claramente observables en su representación en los diagramas de Schöeller-Berkaloff (Figura 13) y de Stiff modificado (Mapa 1).

Estas son especialmente notorias entre el pozo de los Lavaderos (172020014) y el de Blascoeles (172010001).

TABLA 7.- ANÁLISIS QUÍMICOS DE LAS CAPTACIONES EN MATERIALES GRANÍTICOS.

Número de registro Nombre de la captación	Fecha del análisis (Toma de muestras)	DQO	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ⁼ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	CO ₃ ⁼ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Na ⁺ mg/L	Mg ⁺⁺ mg/L	Ca ⁺⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	pH	Conduct. μS/cm	R-S 110°C	NO ₂ ⁻ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	P ₂ O ₅ mg/L	Si O ₂ mg/L
172020010 Estacio	13-10-01	1,8	179	58	126	0	33	37	28	103	4	7,2	836	636	0,08	0	0	26
172020011 De la rejilla	13-10-01	3,8	302	50	190	0	15	39	54	125	4	7,0	1222	912	0	0	0,05	25,2
172020014 De los lavaderos	13-10-01	4,5	4	10	112	0	0	11	7	22	1	7,5	186	140	0	0	0	28,8
172010001 Blascoeles Muestra 1: Min. 200 bombeo	27-09-93	---	27	35	360	0	66	44	28	76	2	7,8	711	675 (Sólid. Dto.)	0,37	0	<0,05 (PO ₄)	36,6
172010001 Blascoeles Muestra 2: Min. 1400 bombeo	27-09-93	---	23	25	347	0	52	42	25	67	1	7,8	665	620 (Sólid. Dto.)	0,12	0	<0,05 (PO ₄)	37,8

AGUAS EN MATERIALES CRISTALINOS. VILACASTIN

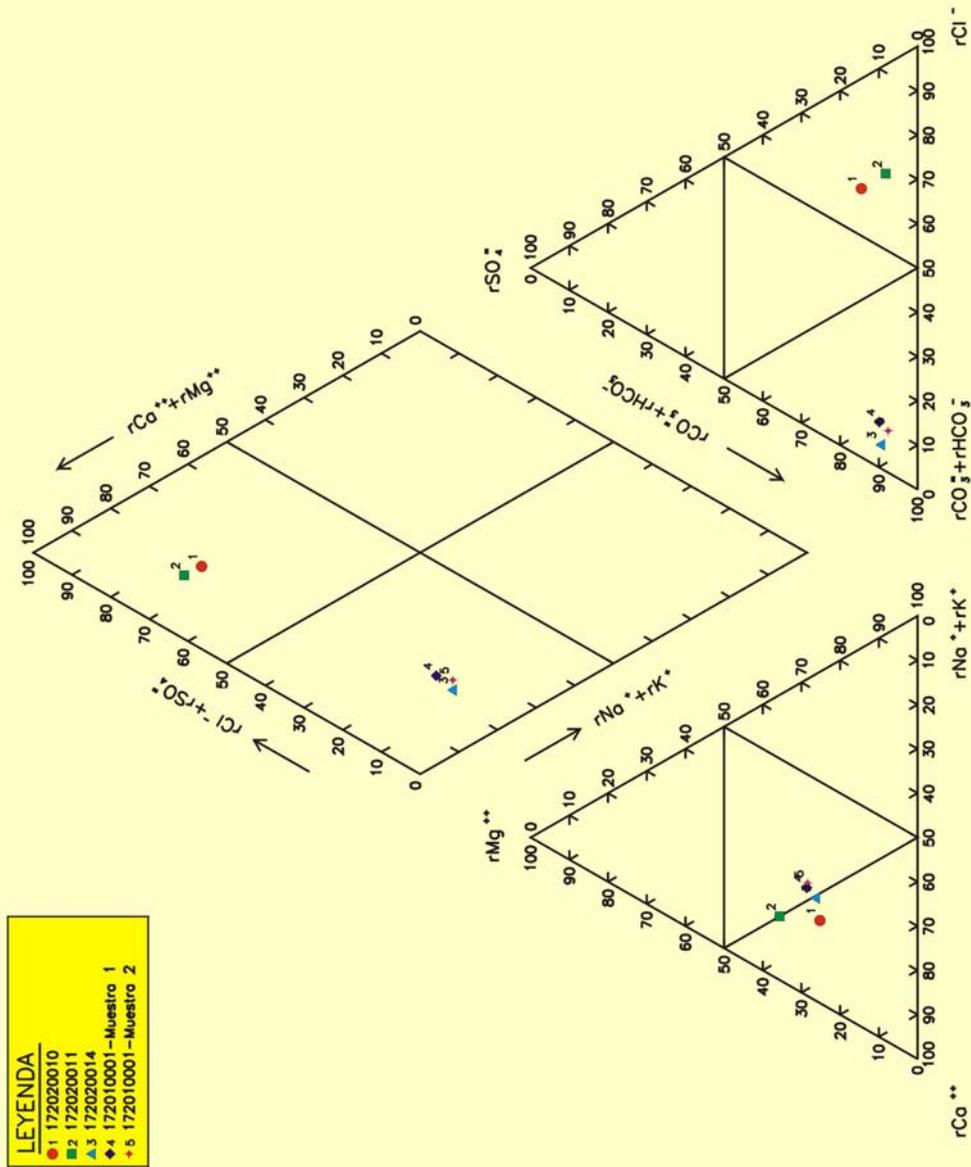


Figura 12: Diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de las captaciones de abastecimiento en materiales graníticos.

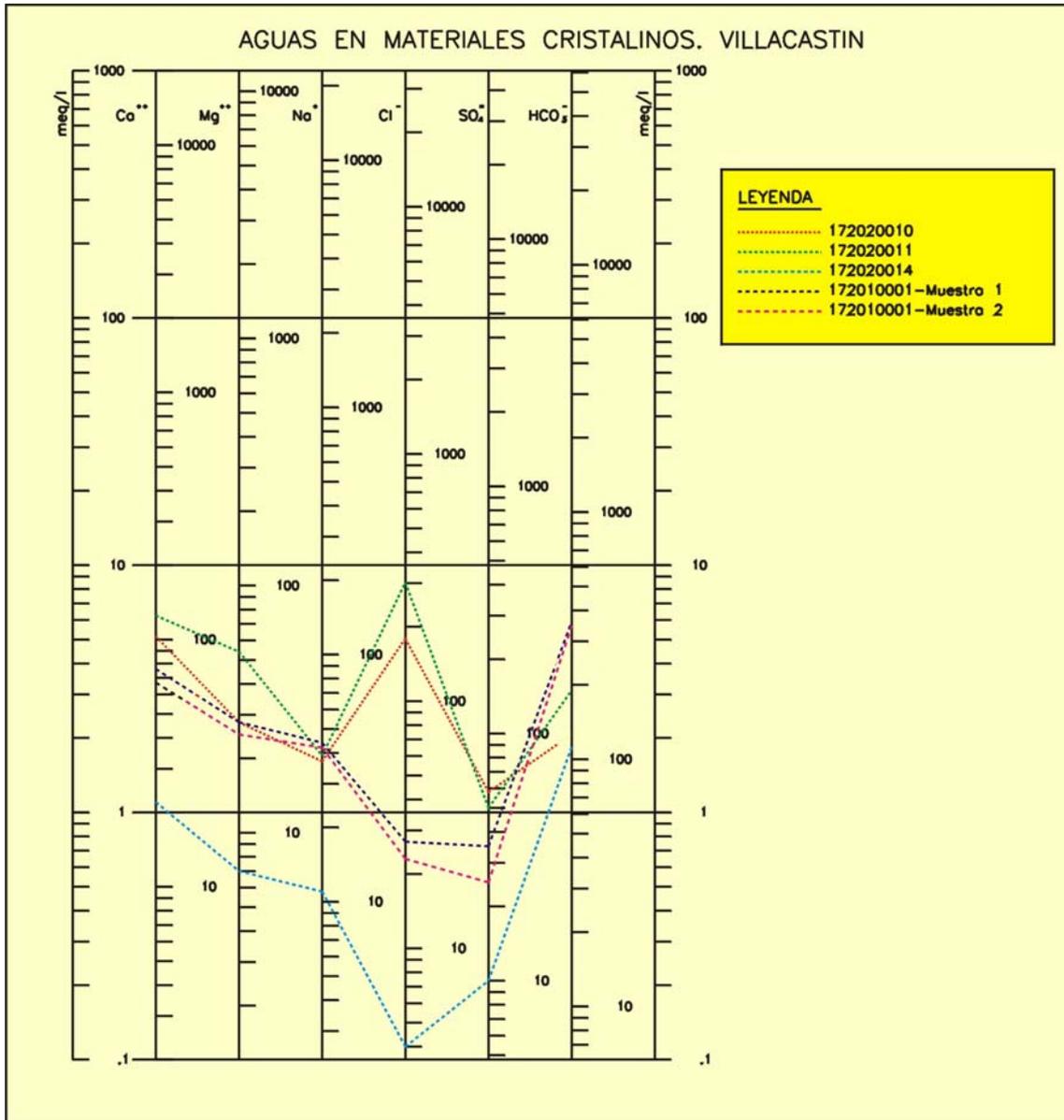


Figura 13: Diagrama de Schöeller-Berkaloff de las muestras de las captaciones en materiales graníticos.

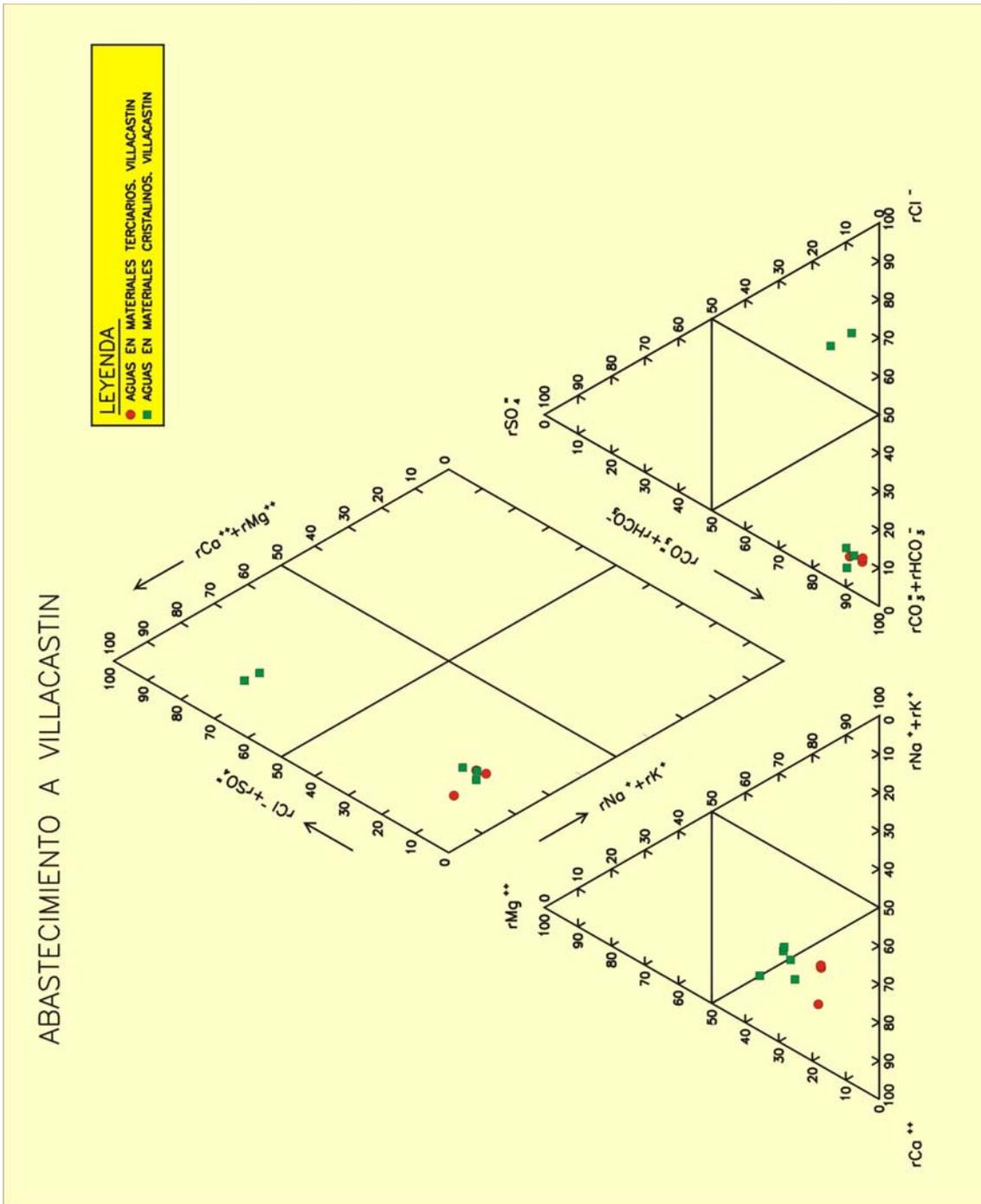


Figura 14: Diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de las captaciones del acuífero del terciario detrítico y de las captaciones en materiales graníticos.

En los análisis químicos efectuados en estas captaciones (Tabla 7), se supera los valores de concentración máxima admisible, indicada en la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público (BOE, 1990), respecto al contenido en nitratos en el sondeo de Blascoeles (con valores de 66 y 52 mg/L, siendo el máximo valor admisible de 50 mg/L) y de nitritos (con valores de 0,37 y 0,12 superando los 0,10 de la Reglamentación), así como en el pozo de la Rejilla de abastecimiento a Villacastín (superando el contenido en magnesio, 54 mg/L, el límite legal de 50 mg/L).

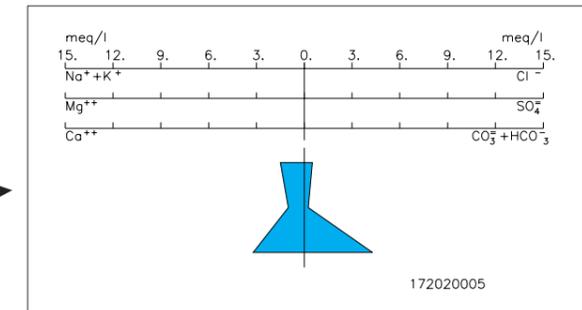
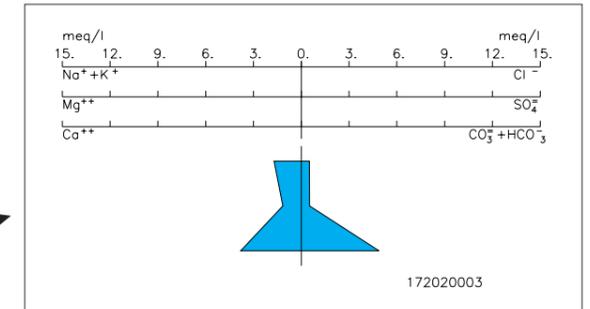
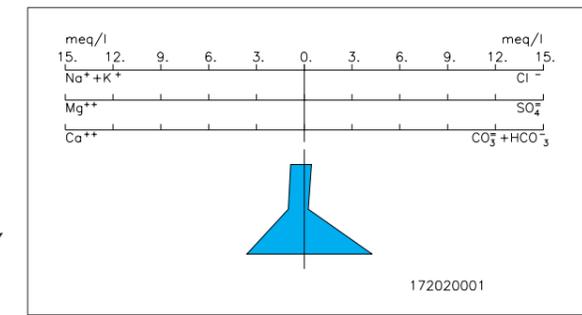
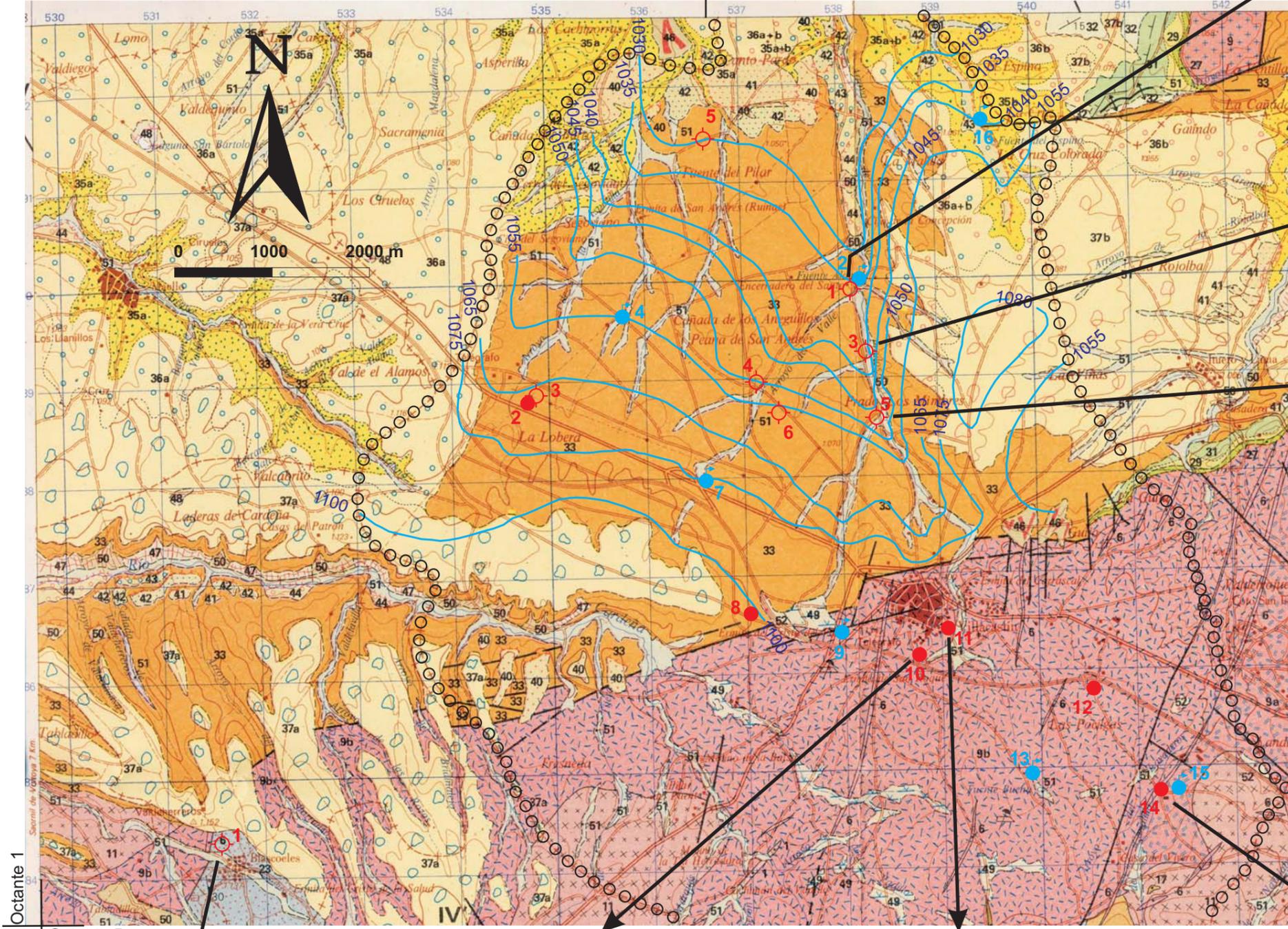
En los otros pozos de abastecimiento de Villacastín, pozos Estacio y de los Lavaderos, no se supera ninguno de los valores indicados en la citada Reglamentación.

Hay que reseñar además los altos valores de conductividad, y cloruros existentes en los pozos Estacio y de la Rejilla, correspondiendo el análisis químico de las muestras efectuadas a aguas cloruradas calcicas, así como el valor de nitratos y nitritos en el pozo Estacio, que podrían atribuirse a la posible existencia de focos de contaminación en su área de alimentación. Estos valores aconsejan efectuar un análisis de posibles focos de contaminación en la zona y un seguimiento de la calidad de dichos pozos, efectuando nuevos análisis químicos y bacteriológicos.

Mapa 1: Mapa hidrogeológico en el entorno de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín.

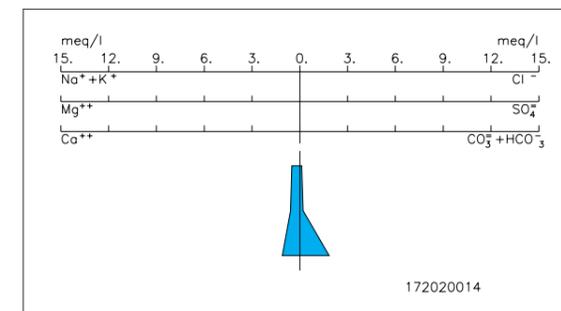
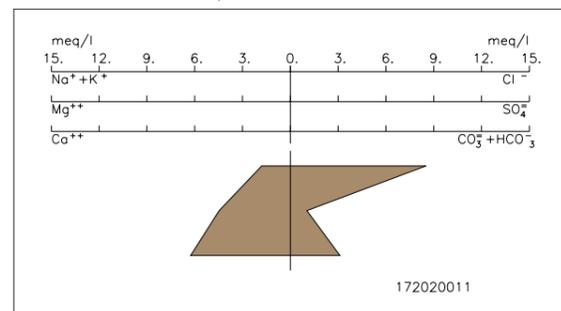
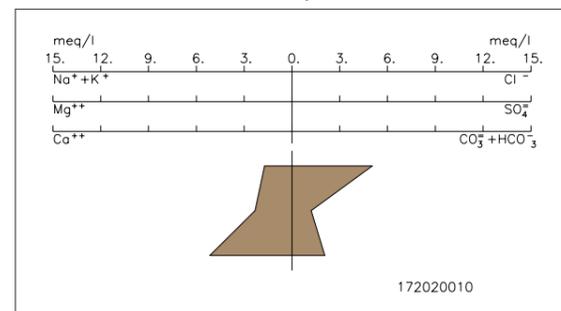
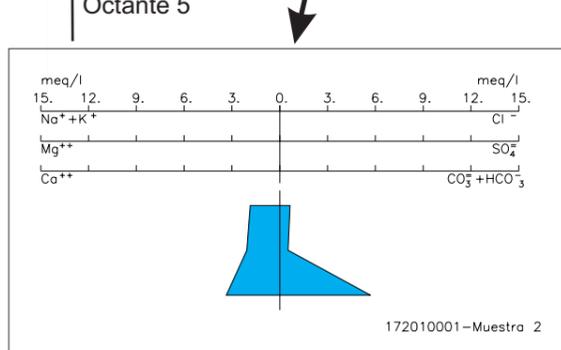
Cartografía geológica tomada de Pérez González et al., 1990.

Hoja 17-20, Octante 1 | Hoja 17-20, Octante 2

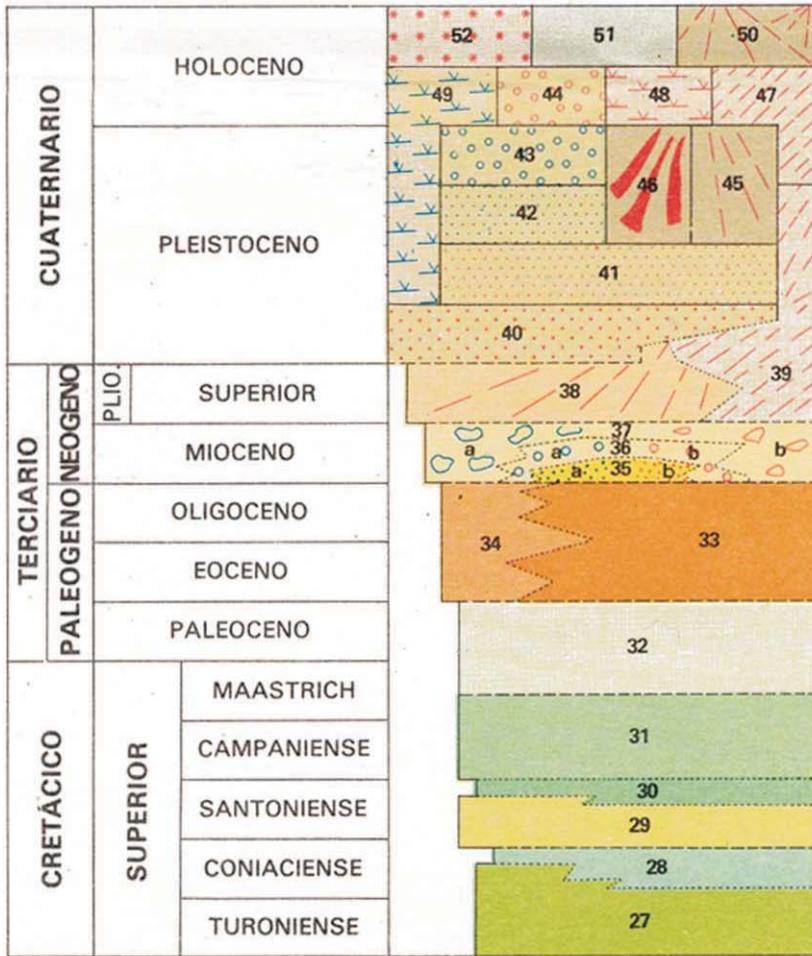


SIMBOLOGÍA

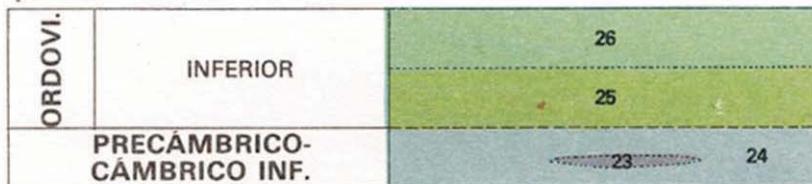
-  **5** Sondeo y número de identificación.
-  **12** Pozo y número de identificación.
-  **15** Manantial y número de identificación.
-  **1055** Isopiezas acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario m s.n.m. (Octubre 2001).
-  Límite del término municipal de Villacastín.
-  Aguas bicarbonatadas cálcicas.
-  Aguas cloruradas cálcicas.



LEYENDA GEOLÓGICA DEL MAPA 1



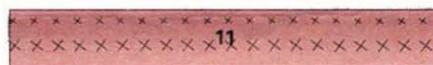
AFLORAMIENTO DE OJOS ALBOS



ROCAS IGNEAS PREHERCÍNICAS



ROCAS GRANÍTICAS HERCÍNICAS



- 52 Materiales antrópicos.
- 51 Arenas, limos, gravas y cantos (Aluviales. Fondos de valle).
- 50 Cantos, bloques y arenas (Conos de deyección).
- 49 Limos, arenas y turberas (Fondos de navas).
- 48 Limos orgánicos (Fondos de charcas).
- 47 Cantos, bloques y arenas (Coluviones y pedrizas).
- 46 Arenas limosas con cantos dispersos (Glacis).
- 45 Bloques y cantos (Conos de deyección).
- 44
- 44a Cantos y arenas (Terrazas).
- 40
- 39 Bloques, cantos y limos amarillentos (Coluviones con matriz).
- 38 Cantos y bloques con limos arenosos amarillentos.
- 37 Bloques y cantos.
- 36 Cantos y arenas.
- 35 Arenas a) Litoareníticas (área fuente de metasedimentos de bajo grado) b) Arcósicas (área fuente de materiales ígneos y metamórficos).
- 34 Bloques y cantos "Serie Arcósica".
- 33 Gravas y arenas "Serie Arcósica".
- 32 Arenas, gravas silíceas y arcillas.
- 31 Dolomías y margas. Formación "Dolomías y margas VALLE DE TABLADILLO".
- 30 Margas, dolomías y areniscas. Miembro "Dolomías de MONTEJO". Formación Calizas y dolomías de CASTROJIMENO.
- 29 Areniscas dolomíticas. Miembro "Areniscas dolomíticas de HONTORIA". Formación Calizas y dolomías de CASTROJIMENO.
- 28 Margas y dolomías. Formación "Dolomías tableadas de CABALLAR".
- 27 Arenas, arcillas y conglomerados. Formación "Arenas y arcillas de SEGOVIA".
- 26 Cuarzitas masivas. CUARCITA ARMORICANA.
- 25 Cuarzitas, metaconglomerados, filitas y pizarras. CAPAS DEL VOLTOYA.
- 24 Filitas y pizarras con laminaciones arenosas. CAPAS DEL MEDIANA.
- 23 Calizas
- 17 Ortoneises glandulares.
- 11 Adamellitas - granitos de grano fino medio. Tipo NAVALDRINAL.
- 9 Adamellitas con abundantes enclaves microgranulares. Tipo EL ESPINAR.
 - a) Porfídica. b) Con anfíbol.
- 6 Cuarzo.
- 5 Lamprófidos camptoníticos.

7.6.- Problemática del abastecimiento a la población

7.6.1. - Infraestructura del abastecimiento

En la Figura 15 se indica la localización de los elementos que componen la infraestructura de abastecimiento a la población. Sus características principales son las siguientes:

7.6.1.1.- Captaciones de abastecimiento urbano

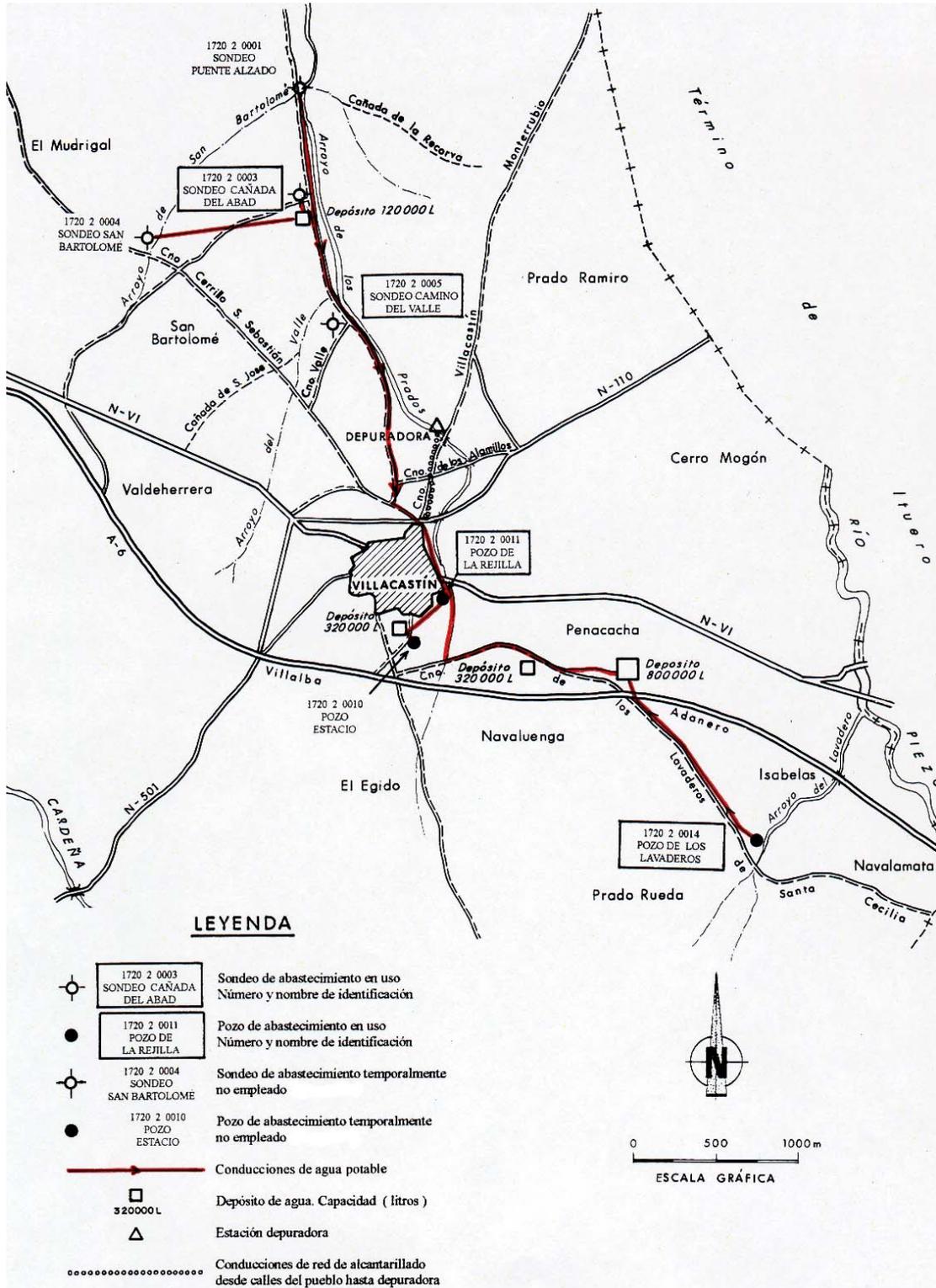
El abastecimiento actual de la población de Villacastín se efectúa exclusivamente en base a la explotación de siete captaciones de aguas subterráneas ubicadas en el término municipal. Se bombean 4 sondeos que captan el acuífero detrítico terciario y cuaternario al norte del casco urbano, denominados sondeos de Puente Alzado, San Bartolomé, Cañada del Abad y Camino del Valle (Fotografías 1 a 4), y tres pozos que captan los materiales graníticos al sur del caso urbano, llamados Pozo Estacio, de la Rejilla y de los Lavaderos, (Fotografías 5 a 7).

Las características principales de dichas captaciones se indican en la Tabla 8 y 9 respectivamente.

En cuanto a los sondeos (Tabla 8), hay que reseñar que se emplean exclusivamente para abastecimiento sí bien no de un modo continuo. Los sondeos de Puente Alzado y de San Bartolomé no se bombean desde hace meses (noviembre 2001), pero está previsto volver a utilizarlos con este fin una vez que se sustituyan las tuberías y la bomba que están inservibles actualmente. El resto se bombea con un caudal de 3-5 L/s de 8 a 14 horas al día, si bien no de un modo continuo, distribuyéndose durante el mismo, el periodo de bombeo.

En ninguno de los análisis químicos disponibles de las muestras de agua de los sondeos de abastecimiento urbano Puente Alzado (172020001), Cañada del Abad (172020003) y Camino del Valle (172020005) se supera los valores de concentración máxima admisible indicados en la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público (BOE, 1990), como ha sido ya indicado en el capítulo 7.5.1.

En la Tabla 9 se indican las características de los pozos existentes en materiales graníticos. Todos se emplean exclusivamente para abastecimiento sí bien no de un modo continuo, así por ejemplo el Pozo Estacio ha estado fuera de servicio durante varios meses (noviembre, 2001), pero está previsto emplearlo otra vez para abastecimiento en fechas próximas.



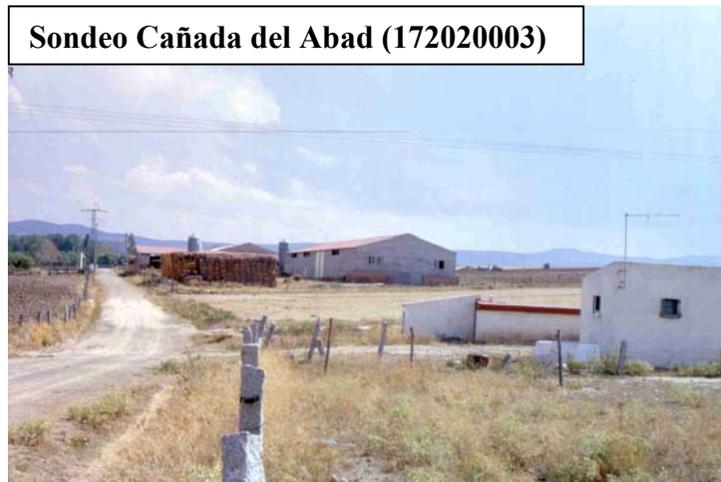
Fuente: Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 2000.

Figura 15: Situación actual del abastecimiento y red de saneamiento.

Sondeo Camino del Valle (172020005)



Sondeo Cañada del Abad (172020003)

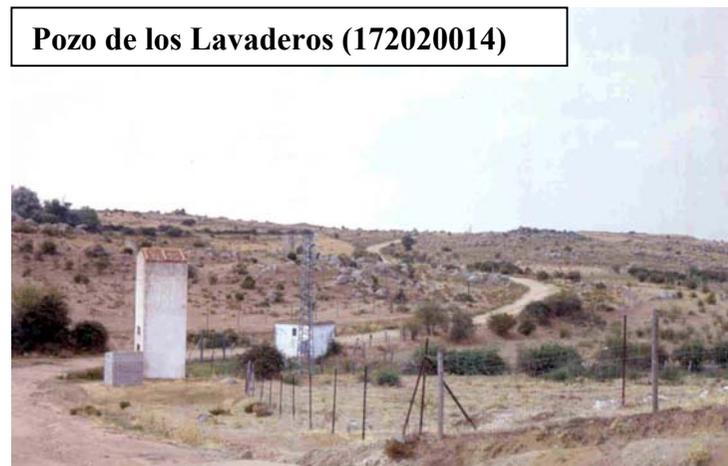


Sondeo Puente Alzado (172020001)



Sondeo San Bartolomé (172020004)

Fotografías 1-2-3-4: Sondeos de abastecimiento de Villacastín que captan el acuífero en materiales detríticos del Terciario y Cuaternario.



Fotografías 5-6-7: Pozos de abastecimiento de Villacastín que captan los materiales graníticos.

TABLA 8.- PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO DE VILLACASTÍN EN EL ACUÍFERO DE MATERIALES DETRÍTICOS TERCIARIOS Y CUATERNARIOS.

Nombre y número de identificación del inventario de puntos acuíferos del IGME	Tipo de captación, profundidad y diámetro	Año y sistema de perforación	Bomba instalada Caudal de explotación	Cota del terreno en la embocadura Profundidad del nivel piezométrico Cota del nivel piezométrico (fecha) Tipo de nivel	Instalaciones de protección de la captación y equipos	Observaciones
Puente Alzado (172020001)	Sondeo, 100 m (actualmente 90 m) 300 mm de diámetro	1982 Percusión	Grundfos SP-1629, 20 CV, sumergible, situada a 82 m de profundidad. Q = 3-5 L/s	Cota= 1035 Sondeo surgente N.P > 1035 m s.n.m. (6-10-2001) Nivel estático. Sin bombear en meses	Tiene caseta. Tiene valla metálica que delimita un área de 17 x 17 metros cuadrados.	Actualmente no se bombea. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento. Una tubería en superficie le conecta con "Fuente Alamo" por donde descarga actualmente. Datos de análisis químicos.
Cañada del Abad (172020003)	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	1993 Percusión	Grundfos, SP-2736, 40 CV, sumergible, situada a 75 m de profundidad. Q = 3 L/s abril a sept. = 14 h Resto año = 8 h	Cota= 1039,5 Profundidad= 14,5 m N.P > 1025 m s.n.m. (7-10-2001) Nivel dinámico en recuperación, sin bombear en 1 hora	Tiene caseta No tiene valla metálica.	Datos de análisis químicos.
San Bartolomé (172020004)	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	1984 Percusión	Bomba 20 CV, sumergible, situada a 80 m de profundidad. Q = 3-5 L/s	Cota= 1054,2 Profundidad= 3,23 m NP = 1050.97 m s.n.m. (6-10-2001) Nivel estático. Sin bombear en meses	Tiene caseta. Tiene valla metálica que delimita un área de 18 x 9 metros cuadrados.	Actualmente no se bombea. Tiene tuberías rotas y no está conectada a la Red. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento sustituyendo las tuberías y la bomba actual.
Camino del Valle (172020005)	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	1992 Percusión	Grundfos, SP-2736 40 CV, sumergible, situada a 75 m de profundidad. Q = 3 L/s abril a sept = 14 h Resto año = 8 h.	Cota= 1055 Profundidad= 10,0 m N.P > 1045 m s.n.m. (7-10-2001) Nivel dinámico en recuperación, sin bombear en 48 horas	Tiene caseta. No tiene valla metálica.	No es posible tomar muestras a pie de sondeo, sí a la entrada al depósito de agua. Datos de análisis químicos.

Modificado de Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 2000.

TABLA 9.- PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO DE VILLACASTÍN EN MATERIALES GRANÍTICOS.

Nombre y número de identificación del inventario de puntos acuíferos del IGME	Tipo de captación, profundidad y diámetro	Sistema de perforación	Régimen de explotación	Cota del terreno en la embocadura Profundidad del nivel piezométrico Cota del nivel piezométrico (fecha) Tipo de nivel	Instalaciones de protección de la captación	Observaciones
Pozo Estacio (172020010)	Pozo de gran diámetro (varios metros), 8-10 m de profundidad.	Excavado a mano.	Actualmente no se bombea.	Cota= 1120 Profundidad= 1,67 m N.P = 1118,3 m s.n.m. (13-10-2001) Nivel estático. Sin bombear en meses	Tiene caseta. Tiene valla metálica. Delimita un área de 16 x 16 m ²	Actualmente no se bombea. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento. Datos de análisis químicos.
Pozo de la Rejilla (172020011)	Pozo de gran diámetro (varios metros), 8-10 m de profundidad.	Excavado a mano.	Q = 1 L/s Se bombea varias veces a la semana.	Cota= 1100 Profundidad= 0,4 m N.P = 1099,6 m s.n.m. (13-10-2001) Nivel estático.	Tiene caseta. No tiene valla metálica.	Está en el casco urbano. La pared de la caseta es el límite de una calle. Datos de análisis químicos.
Pozo de los Lavaderos (172020014)	Pozo de gran diámetro (varios metros), 8-10 m de profundidad.	Excavado a mano.	Q = 1 – 1,5 L/s Se bombea 1 día a la semana.	Cota= 1130 Profundidad= 1,3 m N.P = 1128,7 m s.n.m. (13-10-2001) Nivel estático.	Tiene caseta. Tiene valla metálica. Delimita un área de 12 x 14 m ²	Conexión hidráulica directa con el arroyo del lavadero que está a unos 3 m de distancia. Datos de análisis químicos.

Modificado de Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 2000.

En los análisis químicos disponibles de las muestras de agua de los pozos de abastecimiento Estacio (172020010), de la Rejilla (172020011) y de los Lavaderos (172020014) únicamente en el análisis correspondiente al pozo de la Rejilla se han detectado valores de magnesio, de 54 mg/L, que superan los valores de concentración máxima admisible (50 mg/l) no existiendo problemas en ninguno de los otros parámetros respecto a la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público (BOE, 1990) como se indica en el capítulo 7.5.2.

7.6.1.2.- Depósitos de almacenamiento y redes de distribución

En la Figura 15 se indica el trazado de las conducciones de agua potable, y la ubicación de los depósitos.

Básicamente consta (Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 2000) de una conducción de fibrocemento de 150 mm de diámetro, que discurre junto al arroyo de los Prados desde el sondeo Puente Alzado hasta las inmediaciones del casco urbano, a la que se conectan los sondeos de Puente Alzado, Cañada del Abad, Camino del Valle y, tras las reparaciones previstas, San Bartolomé, y otras conducciones desde el pozo de los Lavaderos, de la Rejilla y Estacio bombeándose el agua hasta los depósitos.

Existen tres depósitos de regulación, dos de ellos de 320.000 litros y el tercero de 800.000 litros, ubicados en la zona sur del pueblo y a mayor cota que este, distribuyéndose a los domicilios por gravedad.

Hay además un aljibe de 120.000 litros junto al sondeo Cañada del Abad desde el que está previsto impulsar el agua procedente de los sondeos de Puente Alzado, San Bartolomé y Cañada del Abad hasta los depósitos de abastecimiento mediante una bomba aún no instalada.

7.6.1.3.- Red de alcantarillado y estaciones depuradoras

La Red de alcantarillado inicial de casco urbano se construyó en 1942 y ha sido ampliada en fechas posteriores a las nuevas calles incorporadas al mismo.

Cubre la mayor parte de la población al no existir urbanizaciones en el término municipal, por lo que solo quedan fuera del casco urbano algunas casas y restaurantes que disponen de fosas sépticas.

En la Figura 15 se muestra la localización de la conducción que comunica la red de alcantarillado del casco urbano con la estación depuradora.

La depuradora de tratamiento secundario existente fue construida en una 1ª fase en 1982 y terminada en 1992. Desde abril de 1999 está funcionando en pruebas, no encontrándose aún operativa en octubre de 2001.

7.6.2.- Necesidades de agua para abastecimiento

La Red de distribución de agua potable del municipio cuenta con contadores generales y en los domicilios. El volumen anual facturado medio de 5 años (período 1996-2000) junto con las pérdidas en la red, según información del Ayuntamiento, es de 120.000 m³ anuales, con el siguiente desglose por trimestres:

1 ^{er} Trimestre enero-marzo:	20.000 m ³
2 ^o Trimestre abril-junio:	40.000 m ³
3 ^{er} Trimestre julio-septiembre:	40.000 m ³
4 ^o Trimestre octubre-diciembre:	20.000 m ³

TOTAL ANUAL ...	120.000 m ³

Estos datos suponen, considerando la población de 1514 habitantes del año 2001 (INE, 2002), una dotación media de 217 L/hab/día que incluye las pérdidas en la red.

La dotación en el primer y cuarto trimestre es de 147 L/hab/día y de 294 L/hab/día en el segundo y tercer trimestre, lo que parece confirmar que la población prácticamente se duplica en las estaciones de primavera y verano.

El Plan Director de Infraestructura Hidráulica Urbana de la Junta de Castilla y León (BOCYL, 1994), establece una clasificación en la que a las poblaciones con menos de 4000 habitantes, como es el caso de Villacastín, les corresponde una dotación de 150 L/hab/día, inferior por tanto a la suministrada realmente en el municipio.

Por su parte el Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero (BOE, 1999 a) indica que la dotación para los municipios de menos de 10.000 habitantes es la siguiente:

HORIZONTE 2002			HORIZONTE 2012		
Actividad industrial y comercial			Actividad industrial y comercial		
Alta	Media	Baja	Alta	Media	Baja
270	240	210	280	250	220
L/hab/día	L/hab/día	L/hab/día	L/hab/día	L/hab/día	L/hab/día

El Plan Hidrológico de la cuenca del Duero indica que esta dotación es una estimación teórica, por lo que debe comprobarse su validez comparando la cifra obtenida con la que se pueda obtener de los datos de uso real del agua que puedan conseguirse en poblaciones que dispongan de un sistema correcto de control del agua servida y facturada. Se analizarán las posibles discrepancias que aparezcan entre ambas cifras y en caso necesario se modificará la estimación de la dotación (BOE, 1999 a).

En el caso de la población de Villacastín, con una actividad industrial y comercial baja, le corresponde en el año 2002 una dotación de 210 L/hab/día que se incrementan hasta los 220 L/hab/día en el año 2012, cifras que coinciden sensiblemente con los 217 L/hab/día obtenidos previamente en base a la información proporcionada por el Ayuntamiento.

Para obtener los volúmenes consumidos en Villacastín con garantía es necesario bombear en los dos sondeos (Cañada del Abad y Camino del Valle) y dos pozos (de la Rejilla y de los Lavaderos) empleados durante todo el año y bombear en las otras tres captaciones (pozo Estacio y sondeos de Puente Alzado y San Bartolomé), especialmente en los meses de abril a septiembre, indicándose su distribución en la Tabla 10.

TABLA 10.- DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN BOMBEADO EN LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO DE VILLACASTÍN.

Captación	Caudal	Tiempo de bombeo	Volumen bombeado diariamente	Volumen bombeado en 6 meses	Volumen bombeado en 1 año
Sondeo Cañada del Abad.	3 L/s	Abr-Sept. 14h Oct-Mar. 8 h.	151,2 m ³ 86,4 m ³	27.594 m ³ 15.768 m ³	86.724 m ³
Sondeo Camino del Valle	3 L/s	Abr-Sept. 14h Oct-Mar. 8 h.	151,2 m ³ 86,4 m ³	27.594 m ³ 15.768 m ³	
Pozo de la Rejilla	(2,1 L/s 12 h. todo el año)				33.276 m ³
Pozo de las Lavaderos					
Pozo Estacio					
				Volumen anual bombeado	120.000 m ³

7.7.- Vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación

7.7.1.- Inventario de focos potenciales de contaminación

Se ha realizado un inventario de focos potenciales de contaminación existentes en el término municipal de Villacastín, que se ha representado en el Mapa nº 2. Estos se han agrupado en cuatro tipos según su origen (agrícola, ganadero, industrial y urbano) cuyas características son:

7.7.1.1. Focos potenciales de contaminación agrícolas

Los cultivos existentes en el término municipal de Villacastín se indican en el Mapa nº 2. El cultivo de regadío se limita exclusivamente a una finca de 4 ha de fresas, existente en el extremo noroeste del área estudiada, mientras que el cultivo de secano de cereales (trigo y cebada) ocupa unas 2200 ha, ubicadas al norte y noroeste de la población (Martínez Navarrete y García García, 2001 a).

En estos cultivos se emplean plaguicidas y fertilizantes. Se abona dos veces al año, requiriéndose unos 116 kg de N₂ por hectárea y año (cabe recordar que el límite exigido por la CEE es de 170 kg de N₂ por hectárea y año para zonas vulnerables), 72 kg de P₂O₅ y 100 kg de K₂O. Por lo tanto la cantidad de abonos empleada es de:

	kg (año) en las 2200 ha de Cultivos de secano (cereales)
N ₂	255200 kg
P ₂ O ₅	158400 kg
K ₂ O	220000 kg

El abono se acumula en determinados puntos previamente a su distribución por la superficie (Fotografía 8), práctica que incrementa su potencial contaminante.



Fotografía 8: Abono (estiércol) para los cultivos de secano acumulado previamente a su distribución.

El resto del término municipal carece de cultivos estando ocupado por montes y prados además de por los terrenos urbanos.

7.7.1.2. Focos potenciales de contaminación ganaderos

En el municipio de Villacastín la actividad ganadera tiene un gran desarrollo, reflejándose su distribución en el Mapa nº 2, habiéndose sintetizado las principales características así como la evaluación del potencial contaminante de todas las actividades ganaderas del municipio en la Tabla 11.

Se analizarán además detalladamente las principales características de las instalaciones ganaderas, existentes y potenciales, de mayor entidad en el municipio, ubicadas en el área donde se agrupan la mayoría de las captaciones de abastecimiento a Villacastín.

- *Explotación Avícola Velasco, S.L. (Número 10 del Mapa nº 2 y Tabla 11).*

La explotación (Fotografía 9) ocupa una superficie de 50.000 m², de suelo calificado en las normas subsidiarias de Villacastín como no urbanizable de interés agrario general. Se accede a la misma por el camino del cerrillo de San Bartolomé.

Las instalaciones permiten la explotación de 60.000 gallinas destinadas a la producción de huevos, con un sistema totalmente mecanizado, reponiéndose el 60-70% de las gallinas cada año, efectuándose antes de cada nueva ocupación la limpieza y desinfección de las instalaciones.

Las aves se alojan en baterías de jaulas de 4 pisos. La alimentación es automática, existiendo en el exterior de la nave dos silos metálicos de almacenamiento de pienso de 15 t cada uno.

La evacuación de las deyecciones se realiza mediante cintas transportadoras que discurren bajo las baterías de jaulas, que vierten sobre otra cinta transversal en cuyo extremo son recogidas.

La red de saneamiento consiste en una tubería axial que recorre la nave y una fosa de purines. Esta es vaciada mediante camiones cisterna fuera del término municipal. Los residuos sólidos son recogidos con un camión y vertidos también fuera del término municipal según la información proporcionada por el encargado de la explotación.



Fotografía 9: Granja Avícola Velasco. En primer plano el sondeo de abastecimiento San Bartolomé.

TABLA 11.- CARACTERÍSTICAS Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL CONTAMINANTE DE LAS ACTIVIDADES GANADERAS EXISTENTES EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE VILLACASTÍN.

Número de referencia (Mapa 2)	Tipo de Ganado	Clase de explotación	Número de cabezas	Estiércol producido (t)	Composición del estiércol			DBO ₅ (kg/año)	Población equivalente (hab)	Observaciones Otros datos
					N (kg)	P ₂ O ₅ (kg)	K ₂ O (kg)			
1	Ovejas	Extensiva	600	288	2362	605	2390	15000	548	
2	Ovejas	Extensiva	600	288	2362	605	2390	15000	548	
3	Ovejas	Extensiva	600	288	2362	605	2390	15000	548	
4	Caballos	Intensiva	10-20	96	643	221	691	4000	146	Encerradero de El Santo.
5	Cerdos	Intensiva	400 reproductoras lechones hasta 6 kg	3650 m ³ purines (Inf.Proyecto)	N, 7610 kg Inf.Proyecto N orgánico=2283 kg N amoniacal=5327 kg	8030 kg Inf. Proyecto	10220 Inf. Proyecto	18000	658	Solicitud explotación (Sociedad Cañada del Abad). Fase 1. No está en funcionamiento (nov 2001). Los edificios si están construidos
6	Ovejas	Extensiva	800	384	3149	806	3187	20000	731	
7	Chotos	Intensiva	300-400	2660	9044	3458	9576	128000	4676	
8	Yeguada	Intensiva	30-40 madres	192	1286	442	1382	8000	292	
9	Matadero	Intensiva	----	----	----	----	----	----	----	Matadero municipal de Villacastín.
10	Gallinas	Intensiva	60.000	2400	48000	55200	28800	96000	3507	Explotación avícola Velasco S.L.
11	Cerdos	Intensiva	3600: 400 lechones 800 recría 2400cebo	6570 m ³ purines (Inf.Proyecto)	N, 24185 kg Inf.Proyecto N orgánico=7256 kg N amoniacal=16930 Kg	14454 kg Inf. Proyecto	18396 Inf. Proyecto	162000	5918	Solicitud explotación (Sociedad Cañada del Abad). Recría y cebo. Fase 2 y 3. No está en funcionamiento (nov 2001) ni hay edificios
12	Cerdos	Intensiva	140	22994 m ³	85080	50588	64386	6300	230	Solicitud de puesta en explotación. No hay instalaciones ni ganado (Noviembre 2001)
13	Vacas	Extensiva	10-20	133	452	173	479	6400	234	
	Cabras		450	216	1771	454	1793	13500	493	
14	Ovejas	Extensiva	100	48	394	101	398	2500	91	Es parte de las instalaciones del aeródromo particular de 6 pistas.
	Gallinas	Intensiva	20	0,8	16	18	9,6	32	1	

TABLA 11 (CONTINUACIÓN).- CARACTERÍSTICAS Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL CONTAMINANTE DE LAS ACTIVIDADES GANADERAS EXISTENTES EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE VILLACASTÍN.

Número de Referencia (Mapa 2)	Tipo de ganado	Clase de explotación	Número de cabezas	Estiércol producido (t)	Composición del estiércol			DBO ₅ (kg/año)	Población equivalente (hab)	Observaciones otros datos
					N (kg)	P ₂ O ₅ (kg)	K ₂ O (kg)			
15	Ovejas	Extensiva	400	192	1574	403	1594	10000	365	
16	Chotos	Extensiva	40-50	332	170	432	1195	16000	584	
17	Chotos	Extensiva	150	997	510	1296	3589	48000	1753	
18	Chotos	Extensiva	150	997	510	1296	3589	48000	1753	
19	Ovejas	Extensiva	450	216	1771	454	1793	11250	411	
	Chotos		30	199	102	259	716	9600	351	
20	Vacas	Extensiva	150	997	3390	195	3589	48000	1753	
21	Vacas	Extensiva	150	997	3390	195	3589	48000	1753	
22	Gallinas	Intensiva	10000	400	8000	9200	4800	16000	584	Naves.
23	Ovejas	Extensiva	200	96	787	202	797	5000	183	
	Vacas		30-40	266	136	346	958	12800	468	
24	Cerdos	Intensiva	70 madres	11497 m ³	42540	25294	32193	3150	115	Única en activo en el término municipal en noviembre de 2001.
25	Vaca lechera	Extensiva	80	532	272	692	1915	25600	935	Son tres explotaciones en el casco urbano muy próximas. Son 80 vacas entre las tres.
26	Ovejas	Extensiva	300	144	1181	302	1195	7500	274	
42	Criadero de perros de presa	Intensiva	25-50	---	---	---	---	---	---	No ha sido posible acceder a las instalaciones

Modificado de Martínez Navarrete y García García, 2001 b.

- *Propuesta de instalación de dos explotaciones porcinas (número 5 y 11 del Mapa nº 2 y Tabla 11)*

La Sociedad Cañada del Abad, S.L. solicitó en 1997 autorización para la instalación de dos explotaciones porcinas en dos parcelas del término municipal de Villacastín. Sus expedientes de Actividades Clasificadas (3/97: I.A.-20-SG/98 y 4/97: I.A.-21-SG/98) se encuentran en tramitación y estudio por la Comisión Provincial de Actividades Clasificadas.

Para analizar el riesgo potencial de contaminación o afección a las aguas subterráneas que supondría la puesta en explotación de estas dos granjas porcinas es necesario analizar los siguientes aspectos: tratamiento y almacenamiento de los purines en las instalaciones de cada granja, empleo de los purines para abono en agricultura en parcelas próximas a las captaciones de abastecimiento urbano, y afecciones al caudal de estos sondeos por las extracciones de agua para las necesidades de las granjas (Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 1999).

A.- Tratamiento y almacenamiento de los purines en las instalaciones de cada granja.

En la granja, identificada con el número 5 en el Mapa nº 2 y en la Tabla 11, con capacidad para 400 hembras reproductoras para la producción de lechones de destete con un peso de 5-6 kg, se construirá, además de la nave ya existente, una nave de gestación y otra de partos que, en proyecto, tienen un foso de deyecciones central que se dispone longitudinalmente y con inclinación con el objetivo de recoger las deyecciones sólidas y líquidas. La capacidad de almacenamiento temporal en estos fosos de deyecciones interiores se complementa con un foso de almacenamiento de estiércoles fluidos externo a las naves, que tiene una capacidad de almacenamiento de 400 m³. La producción de purines prevista es de 10 m³/día, lo que supone una capacidad de almacenamiento de 40 días, en lugar de los 120 días que se indican en el informe de evaluación de impacto ambiental (González Manso y Giraldez Cebollos- Escalera, 1998 a). Esa capacidad sería suficiente si se cumpliesen las previsiones sobre calendario de abonado indicadas en el informe, lo cual no depende del titular de las explotaciones porcinas.

Cualquier fuga o rebose en dichas fosas, pese a las medidas contempladas para su construcción en el proyecto, probablemente producirá una contaminación del acuífero que podría afectar al sondeo de abastecimiento denominado Puente Alzado (172020001), ubicado a sólo 100 metros de la granja (Fotografía 10), lo cual se comprobará al aplicar los distintos métodos que se emplean para definir los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento urbano.

En la granja identificada con el número 11 en el Mapa nº 2 y en la Tabla 11, ubicada en la parcela 28b del polígono 14 del término municipal de Villacastín, destinada a recría y cebo de ganado porcino, se prevé la construcción de cuatro naves.

La primera de las naves, destinada a la recepción de los lechones procedentes de la granja de producción antes analizada, tendría una capacidad para 400 cabezas hasta que alcancen los 10-12 kg. La segunda, nave de recría, con capacidad para 800 cabezas hasta alcanzar los 45 kg de peso. La tercera y cuarta se destinarían al engorde, con capacidad de 1200 plazas en cada una. En estas últimas, se completará el proceso de engorde del ganado hasta los 95-100 kg/cabeza.



Fotografía 10: Sondeo de abastecimiento Puente Alzado, al fondo explotación porcina.

El sistema de recogida y almacenamiento de estiércoles es similar al indicado en la otra granja, es decir fosos interiores en cada nave con el objetivo de recoger las deyecciones sólidas y líquidas. La capacidad de almacenamiento temporal en esos fosos interiores se complementa con un foso de almacenamiento de estiércoles fluidos externo a las naves, de sección circular, que tiene una capacidad de almacenamiento de 962 m^3 . La producción de purines prevista es de $18 \text{ m}^3/\text{día}$, lo que supone una capacidad de almacenamiento de 53 días, en lugar de los 140 días que indican en el informe de evaluación de impacto ambiental (González Manso y Giráldez Cebollos- Escalera, 1998 b). Igual que se indicó antes, esa capacidad sería suficiente si se cumpliesen las previsiones sobre calendario de abonado, pero ello no depende del titular de las explotaciones porcinas.

Como en el caso anterior cualquier fuga o rebose en dichas fosas, pese a las medidas proyectadas para su construcción, probablemente produciría una contaminación del acuífero que podría afectar al sondeo de abastecimiento denominado San Bartolomé (17202004), al estar la explotación porcina a sólo 100 metros, y al sondeo Puente Alzado situado 1400 m, debiéndose analizar esta posibilidad al aplicar los distintos métodos que se emplearán para definir los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento urbano.

B.- Transporte y empleo de los purines para abono en agricultura en parcelas próximas a las captaciones.

En los informes de evaluación de impacto ambiental elaborados por la Sociedad Cañada del Abad, S.L. para las dos explotaciones porcinas (González Manso y Giraldez Cebollos-Escalera, 1998 a y 1998 b) se detallan las parcelas en las que se emplearían como abono agrícola los purines almacenados en las instalaciones antes indicadas (Mapa nº 3). El purín empleado en las parcelas seleccionadas de los polígonos 14 y 16, y en menor medida en los

19, 20 y 21, suponen un riesgo de contaminación del acuífero del terciario detrítico agravado por el hecho de que no se efectúe un tratamiento de esterilización del mismo, que podría afectar a tres captaciones de abastecimiento urbano, sondeos Puente Alzado (172020001), San Bartolomé (172020004) y Cañada del Abad (172020003), a lo que hay que añadir el riesgo puntual existente en las operaciones de vaciado de las fosas de purines y durante el transporte a las parcelas todos los meses del año empleando la cuba distribuidora.

Por su parte las explotaciones existentes en granitos podrían verse también afectadas por el empleo de purines en el polígono 562 y en menor medida en el polígono 552.

C.- Afección al caudal de los sondeos de abastecimiento urbano.

En los informes de evaluación de impacto ambiental elaborados por la Sociedad Cañada del Abad, S.L. (González Manso y Giráldez Cebollos-Escalera, 1998 a; 1998 b) para las dos explotaciones porcinas (5 y 11 del Mapa nº 2) no se indica el volumen de agua necesario para su puesta en explotación ni su procedencia. Debería conocerse si va a realizarse en base a alguna captación de aguas subterráneas, y en este caso sus características y régimen de explotación previsto. Este aspecto puede tener influencia, puesto que su proximidad a las captaciones de abastecimiento urbano hace necesario comprobar si existiría afección a los caudales aprovechados en éstas, puesto que captarían el mismo acuífero.

- *Granja de ovejas (número 6 del Mapa nº 2 y Tabla 11) y Granja de Chotos (número 7 del Mapa nº 2 y Tabla 11).*

Estas granjas ubicadas una junto a la otra (Fotografía 2) presentan un elevado riesgo de contaminación al haberse estimado (como se detalla en la Tabla 11) que supondrían una población equivalente de 731 y 4676 habitantes respectivamente y estar ubicadas a tan solo 250 metros al sur del sondeo Cañada del Abad (172020003) de abastecimiento a Villacastín.

- *Criadero de perros de presa (número 42 del Mapa nº 2 y Tabla 11) y parcelas con abrevadero y gran acumulación de estiércol (Mapa nº 2).*

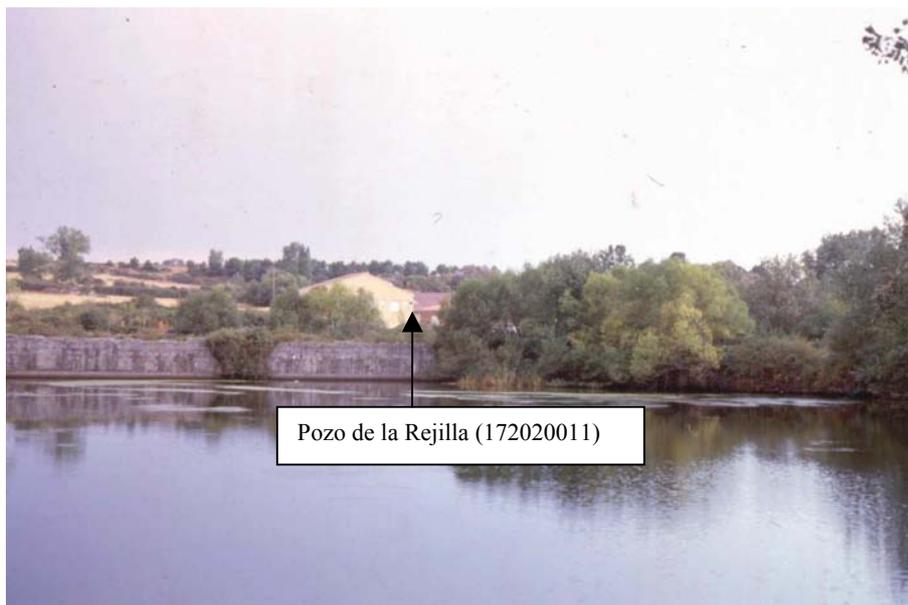
Estos focos de contaminación se analizan conjuntamente dada su interrelación y proximidad.

No ha sido posible contactar con los responsables del criadero de perros ni acceder, por la peligrosidad de estos animales, algunos sueltos, a sus instalaciones. Entre el límite de estas y a lo largo de los escasos 150 m del camino que con dirección noroeste conduce directamente al Pozo de la Rejilla se suceden diferentes focos potenciales de contaminación. Estos son: parcela con gran acumulación de estiércol que rodea un pequeño lago (Fotografía 11). Un abrevadero, también con gran acumulación de estiércol a su alrededor, y por último otros dos lagos contiguos que se prolongan varias decenas de metros ya al noreste de la captación (Fotografía 12). Los lagos recogerían los lixiviados de todo este conjunto que constituye un posible origen de la contaminación detectada en el pozo de la Rejilla de abastecimiento al municipio de Villacastín.

En este, como se indicó en el capítulo 7.5.2., se sobrepasa los valores de concentración máxima admisible, indicada en la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público (1990), respecto al contenido en magnesio (con valores de 54 mg/L siendo el máximo valor admisible de 50 mg/L), presentando además altos valores de conductividad y cloruros.



Fotografía 11: Parcela con gran acumulación de estiércol y un lago (entre los arboles). Al fondo (norte) ubicación del pozo de abastecimiento de la Rejilla.



Fotografía 12: Vista del Lago desde su extremo norte. Al fondo (sur) ubicación del pozo de abastecimiento de la Rejilla.

7.7.1.3. Focos potenciales de contaminación industriales

Los focos potenciales de contaminación industriales en el término municipal están constituidos, como se indica en el Mapa nº 2, por las siguientes actividades:

- *Estaciones de servicio:*

Existen cinco gasolineras, tres en la N-VI, en las inmediaciones de la localidad de Villacastín (números 27, 28 y 29, en el Mapa nº 2), y dos en el área de servicio de la autopista A-6 (números 30 y 31, en el Mapa nº 2).

- *Industrias:*

Unicamente existen dos fábricas, que están ubicadas en el centro del casco urbano. Son la "Fábrica de embutidos y carnes la Mari Antonia" y la "Fábrica de harina Santa Margarita" (identificadas con los números 32 y 33 respectivamente en el Mapa nº 2).

- *Almacén de materiales:*

Hay un almacén de materiales de construcción (número 34 en el mapa nº 2) ubicado en una amplia explanada en el límite oeste del casco urbano, en el cual se depositan materiales inertes, por lo que carece de elementos para la recogida de lixiviados.

- *Aserradero de granitos y mármoles:*

Sólo hay un aserradero en la localidad, "Granitos y mármoles Prados Quemada" (número 35 en el Mapa nº 2), ubicado en suelo no urbanizable y declarado fuera de ordenación, pero en el que se permite llevar a cabo obras de consolidación, aumento de volumen y modernización.

- *Canteras:*

En la localidad de Villacastín las canteras graníticas tienen gran tradición. En el paraje conocido como El Vadillo (número 36 en el Mapa nº 2) se localiza un área de aproximadamente 22,8 km², con una roca de buena calidad a pocos metros de la superficie, con unas reservas grandes sobre las que se localizan dos canteras activas y varias inactivas o abandonadas. Se trata (Pérez González *et al.*, 1990) de explotaciones sobre adamellitas biotíticas de color gris, tamaños de grano medio y textura granuda. La meteorización afecta sólo a los primeros centímetros, dando un aspecto muy sano a la roca. El diaclasado es escaso y ortogonal, lo que permite la extracción de bloques de gran tamaño, de unos 3 x 2 x 2 m³ de media.

7.7.1.4. Focos potenciales de contaminación urbanos

Los focos potenciales de contaminación urbanos (Martínez Navarrete y García García, 2001 a), cuya ubicación se indica en el Mapa nº 2, son los siguientes:

- *Vertedero de residuos sólidos urbanos.*

Hay un vertedero a unos 2 km al este del casco urbano en el límite del término municipal (número 37 en el Mapa nº 2). Está ubicado en granitos, en él se vierten exclusivamente las basuras generadas en la localidad de Villacastín. Los vertidos se realizan sin clasificar, quemándose la basura. No dispone de ningún sistema de recogida de efluentes y carece de vallas y de sistemas que limiten el acceso al mismo.

El volumen de residuos sólidos urbanos puede estimarse, para poblaciones con menos de 20.000 habitantes, en 0,55 a 0,6 kg/hab/día (Fernández Ruiz *et al.*, 1990). En el caso de Villacastín con una población de derecho de 1514 habitantes, que se estima puede duplicarse en el período estival, esto supondría del orden de 375 toneladas al año. De ellas puede suponerse que 202 t corresponden a materia orgánica, 74 t a papel-cartón, 22 t a

vidrio, 21 t a plásticos, 21 t a escombros y cenizas, 12 t a metales, 10 t a madera y 12 t a textiles.

- *Almacén de contenedores de basura*

En el límite sureste del casco urbano en la parcela colindante con el pozo de la Rejilla, de abastecimiento a la población, se almacenan los contenedores de basura de la localidad sin existir ninguna medida de protección y siendo frecuente restos de basura a su alrededor.

- *Vertedero de escombros.*

Ubicado (número 38 en el Mapa nº 2) junto al vertedero de residuos sólidos urbanos, también en granitos. No está vallado ni dispone de ninguna medida ni sistema de control del tipo de escombros vertidos.

- *Cementerio.*

La localidad dispone de un cementerio (número 39 en el Mapa nº 2) ubicado en el límite noreste de la población, que permite cubrir las necesidades de enterramiento para su población que, como se detalló anteriormente, es en el año 2001 de 1514 habitantes y alcanzó un máximo de 1734 habitantes en 1970 (INE, 2002), predominando el enterramiento en fosas.

- *Depuradora (número 40 del Mapa nº 2).*

La depuradora existente (Fotografía 13), construida en una primera fase en 1982 y terminada en 1992 es de tratamiento secundario. Desde abril de 1999 está funcionando en pruebas, no encontrándose aún operativa en octubre de 2001, como demuestra el que persisten los malos olores en el arroyo de los Prados al que se vierten sus efluentes.



Fotografía 13: Depuradora de Villacastín.

- *Red de alcantarillado.*

La red de alcantarillado, construida en 1942 y ampliada en fechas posteriores para extenderla a las nuevas calles incorporadas al casco urbano, cubre la mayor parte de la

población al no existir urbanizaciones en el término municipal, por lo que sólo quedan fuera del casco urbano, y por tanto fuera de la red de alcantarillado, algunas casas y restaurantes que disponen de fosas sépticas.

- *Fosas sépticas.*

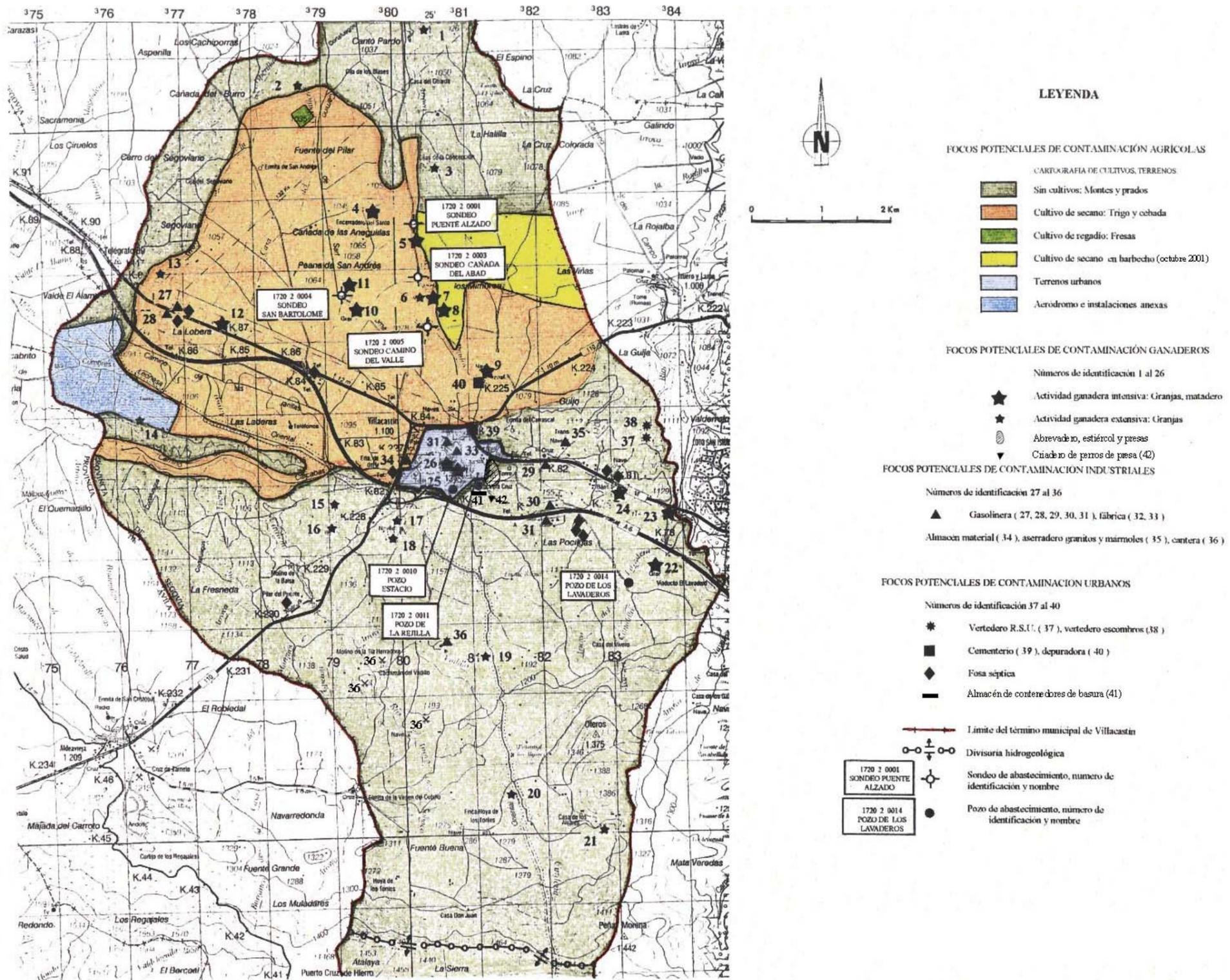
En el Mapa nº 2 se indica la ubicación de las fosas sépticas que corresponden a casas aisladas y a pequeños hostales o restaurantes ubicados junto a las carreteras.

7.7.2. Vulnerabilidad de las diferentes zonas

El acuífero del terciario detrítico, constituido por una serie de lentejones de arenas y gravas de extensión variable incluidos en una matriz areno-limo-arcilloso de naturaleza semipermeable que relaciona hidráulicamente dichos lentejones, presenta una alta vulnerabilidad frente a la contaminación.

Estos materiales ocupan toda la extensión del término municipal al norte de la población y son captados por cuatro sondeos como ha sido detallado en apartados precedentes. La influencia de las actividades agrícolas existentes en el entorno de los sondeos, especialmente el efecto del abonado de los cultivos, en estos materiales de alta vulnerabilidad frente a la contaminación se pone de manifiesto en los contenidos de nitratos detectados en los sondeos de abastecimiento con concentraciones de 14, 26 y 36 mg/l en los últimos análisis químicos disponibles.

En el resto del término municipal, al sur de la población, hay materiales graníticos atravesados por numerosos diques de cuarzo, pórfidos, aplitas y pegmatitas y presentan una red de pequeñas fracturas. En estos materiales hay diversos pozos de gran diámetro y escasa profundidad que captan los aportes procedentes de la red de fracturas existentes y el material de alteración de los granitos, de escasa potencia en la zona, presentando una vulnerabilidad frente a la contaminación alta que junto a la existencia de actividades contaminantes en dichos materiales ha producido la contaminación detectada en el Pozo de la Rejilla.

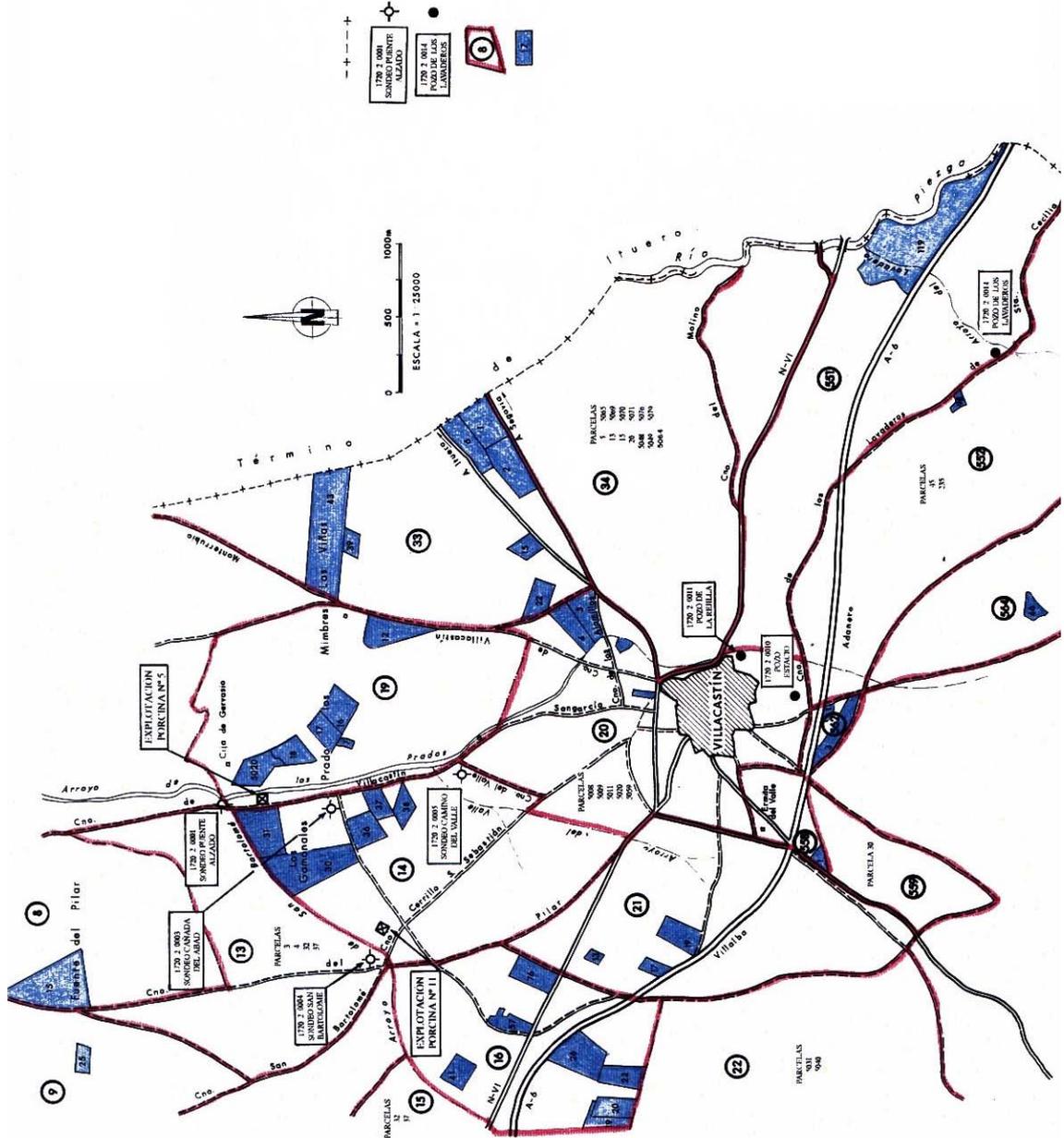


Modificado de Martínez Navarrete y García García, 2001 a.

Mapa 2: Mapa de focos potenciales de contaminación: agrícolas, ganaderos, industriales y urbanos.

LEYENDA:

Límite del término municipal
 Captaciones de abastecimiento
 Polígono y parcelas en las que se emplearían purines



Modificado de Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 2000.

Mapa 3: Mapa de las parcelas del entorno de las captaciones en las que se emplearían purines procedentes de dos explotaciones porcinas (números de identificación 5 y 11 del Mapa 2 y Tabla 11).

7.8.- Planeamiento urbanístico

Para el análisis de la ordenación del territorio en el municipio efectuado en este trabajo se empleará la revisión de las normas subsidiarias de Villacastín, que habían sido aprobadas por la Comisión Provincial de Urbanismo de Segovia. Dicha revisión recibió diligencia de acuerdo de aprobación provisional el 1 de septiembre de 1994 si bien en la fecha de realización de esta Tesis Doctoral está aún pendiente de su adaptación a la Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre régimen de suelo y valoraciones (BOE, 1998 a) de ámbito estatal y a la Ley 5/1999, de 8 de abril, de urbanismo de Castilla y León (BOCYL, 1999).

En la Figura 16 se muestra la distribución del suelo según las calificaciones reflejadas en los artículos 19 y 78 de las normas urbanísticas.

Estas contemplan los siguientes tipos de suelo:

- “a) Suelo urbano, es aquel suelo consolidado por su urbanización y/o edificación, que, de conformidad la Ley del Suelo, se delimita en los planos respectivos.*
- b) Suelo apto para la urbanización, o urbanizable, es aquel suelo apto para su transformación en suelo urbano mediante la previa formulación y ejecución de los correspondientes Planes Parciales y Proyectos de Urbanización, según las especificaciones de las presentes Normas.*
- c) Suelo no urbanizable, es aquel que se declara no apto para la urbanización o con limitaciones, y que no se halla incluido en ninguno de los dos supuestos anteriores.”*

Se distinguirán dos clases de suelo no urbanizable (artículo 78 de las normas urbanísticas):

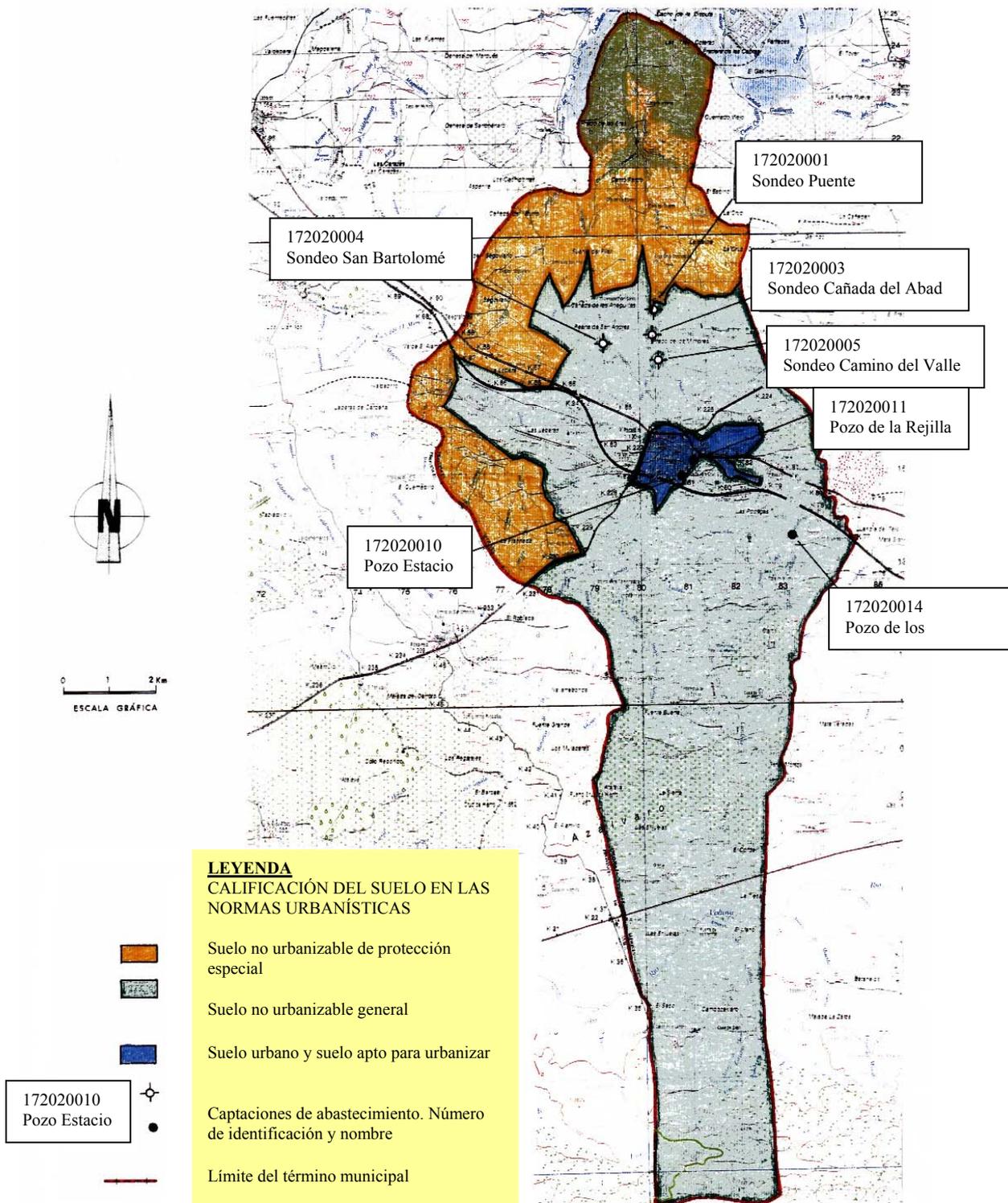
- No urbanizable general.
- No urbanizable de protección especial.

Las siete captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín están ubicadas en suelo calificado como “no urbanizable general” y aunque en el caso del sondeo Puente Alzado se esté en el límite con zonas de “suelo no urbanizable de protección especial” el área de alimentación, de los cuatro sondeos existentes en el acuífero en materiales detríticos del Terciario y Cuaternario, objeto de análisis en esta Tesis Doctoral, está en su totalidad incluida en “suelo no urbanizable general”.

Es decir, las limitaciones que se impongan en el área definida por los perímetros de protección en los cuatro sondeos de abastecimiento urbano Puente Alzado, San Bartolomé, Cañada del Abad y Camino del Valle lo serían en suelo que tienen una calificación de “suelo no urbanizable general”.

No obstante, y a la vista de las modificaciones introducidas en la clasificación del suelo por la Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre Régimen del Suelo y Valoraciones (BOE, 1998 a), el mantenimiento como “suelo no urbanizable” del área definida por los perímetros de protección requeriría dotarlos de un régimen especial de protección (art. 9 de la Ley), lo que vendría justificado por la necesidad de establecer limitaciones para la protección del dominio público hidráulico (Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 2000).

Por su interés en las diferentes etapas de delimitación del perímetro de protección se reseñan o continuarán algunos artículos de las normas subsidiarias: incluidas en el Tomo I, Normas urbanísticas (Ayuntamiento de Villacastín, 1994).



Modificado de Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 2000.

Figura 16: Normas subsidiarias de Villacastín.

“TÍTULO I. Normas urbanísticas generales

- Artículo 2. Vigencia y revisión: La vigencia de estas Normas se extinguirá cuando así sea exigido por la legislación aplicable, o si son revisadas. Su revisión será obligatoria si es necesaria para la adaptación a los planes de ordenación de rango superior que las afecten, y procedente cuando su pérdida de funcionalidad sea manifiesta o lo estimen pertinente las entidades u organismos competentes.

- Artículo 3. Modificaciones: Estas Normas se modificarán, cuando así sea exigido por la legislación aplicable, o estimado así o pertinente por las entidades u organismos que tengan potestad para ordenarlo, los cambios a introducir sean tales que no hagan aconsejable su revisión.

TÍTULO II. Normas urbanísticas y de la calificación en suelo urbano

- Artículo 38.6: Las explotaciones ganaderas, que impliquen la estabulación de animales, no se permitirán en suelo urbano o apto para la urbanización. Las existentes en esas áreas, actualmente quedan fuera de ordenación. Sólo se permitirán en suelo no urbanizable.

- Artículo 49. Condiciones higiénicas de las industrias: Todas las industrias que utilicen el agua en sus procesos fabriles deberán contar con adecuados sistemas de depuración, de forma que sus vertidos no incorporen colorantes, partículas sólidas en suspensión ni alteren sensiblemente el pH y las demás condiciones físico-químicas del agua.

En las explotaciones agropecuarias será asimismo obligatoria la instalación de cámaras de decantación y depuración antes de incorporar las aguas residuales al colector general.

TÍTULO IV. Normas en suelo no urbanizable

- Artículo 79.3: h) Condiciones higiénicas: Toda edificación que produzca aguas residuales deberá contar con el adecuado sistema de depuración individual o por sectores si esto fuera posible, de manera que los vertidos no contengan materias en suspensión, más de 1% de materia orgánica, ni su pH esté sensiblemente alterado.

Cualquier sistema de depuración que se utilice deberá llevarse a cabo en cámaras impermeables de forma que no se produzcan filtraciones contaminantes en los terrenos adyacentes.

- Artículo 79.4: Las distancias de las explotaciones ganaderas respecto de los núcleos urbanos las decidirá la Comisión Provincial de Saneamiento.

- Artículo 83. Instalaciones empresariales o fabriles en Suelo No Urbanizable: En las instalaciones empresariales o fabriles en Suelo No Urbanizable actualmente en funcionamiento, como el Matadero La Prudencia y la Fábrica de Granito “Granitos Hnos. Prados Quemada, S.A que han de declararse fuera de ordenación en conformidad con el artículo 16 de la Ley del Suelo, podrá, sin embargo, llevarse a cabo obras de consolidación, aumento de volumen y modernización además de las pequeñas obras que exigiere la higiene, ornato y conservación del inmueble, de acuerdo con las excepciones que posibilita el art. 137.2 de la Ley del Suelo en aras de la conservación de aquellas instalaciones, y por tanto de los puestos de trabajo, con las condiciones reflejadas en este artículo”.

8.- ZONACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN

La división de los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano en diversas zonas, con diferentes regulaciones a las actividades o instalaciones contempladas en las mismas, es una práctica generalizada en la mayoría de los países del mundo, especialmente en aquellos con mayor tradición en su definición e implementación en el territorio.

Este sistema de zonación permite encontrar un compromiso entre una protección adecuada y suficiente del recurso y el respeto, en la medida de lo posible, de la actividad socioeconómica de la región circundante.

La zonación y restricciones que se establecen son diferentes no obstante en cada país, definiéndose habitualmente en función de la naturaleza de los materiales captados (medios porosos o asimilables en su funcionamiento a los mismos, kársticos y fisurados), los parámetros hidráulicos de los acuíferos y las características socioeconómicas.

Estas zonaciones han sido habitualmente modificadas a lo largo del tiempo, para adecuarlas al grado de desarrollo metodológico alcanzado en su delimitación, la realidad socioeconómica y las experiencias resultantes de su aplicación al territorio, que han permitido evaluar su eficacia.

En la legislación de Estados Unidos, Canadá y numerosos países europeos (Alemania, Suiza, Bélgica, Holanda, Reino Unido, Portugal e Italia entre otros), se especifica en cuantas zonas deben subdividirse los perímetros de protección y, con mayor o menor precisión en cada país, con qué criterios delimitarlos y las restricciones a imponer a diversas actividades en las mismas (Lallemand-Barrès, Roux, 1989 y 1999).

A pesar de las diferentes regulaciones sí que existe no obstante una serie de similitudes en muchas de ellas. Así, es mayoritaria la división de los perímetros de protección en tres zonas, para proteger frente a la contaminación, si bien con denominaciones distintas en cada país.

La primera de ellas, la más cercana a la captación a proteger, suele definirse en función de una distancia fija, que varía normalmente entre 10 a 60 metros, o un tiempo de tránsito de 1 día.

La segunda zona, destinada a proteger contra la contaminación bacteriológica, se delimita mayoritariamente con un tiempo de tránsito de 50 ó 60 días (si bien en la legislación canadiense específica de la provincia de Quebec ésta se incrementa hasta los 200 días para la protección bacteriológica y 550 días para la protección virológica), o una distancia, que depende, entre otros factores, del tipo de material acuífero captado.

La tercera zona se define considerando el tipo de material acuífero y, en algún país, como es el caso de Alemania, considerando además su velocidad y la existencia o no de materiales de baja permeabilidad recubriéndolos. Se delimita en función del área de alimentación de la captación, distancias fijas, definidas según las diferentes características del acuífero, o un tiempo de tránsito. En los países en que se utiliza un tiempo de tránsito, éste varía de 1 a 25 años.

Así por ejemplo el empleado en Portugal es de 10 años, de 10 a 25 años en Holanda y de 15 a 20 años en Estados Unidos.

Además de estas zonas se consideran en algún país zonas especiales, como las

definidas en Portugal en zonas kársticas o fisuradas y frente a la intrusión marina.

En la legislación española, como ha sido analizado detalladamente en el capítulo 5 de esta Tesis Doctoral, se ha definido un perímetro de protección único, en cuyo ámbito pueden imponerse limitaciones al otorgamiento de nuevas concesiones de agua y autorizaciones de vertido, así como condicionamientos a diversas actividades que puedan afectar a la cantidad o calidad de las aguas. Éstas deben detallarse en el documento de delimitación del perímetro, correspondiendo a la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca su aprobación, como se indica en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico de 1986 (BOE, 1986) y en el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 b).

La regulación no tiene por qué ser similar en toda su extensión, por lo que si se puede admitir en la práctica el dividir el perímetro en diversas zonas alrededor de la captación, graduadas de mayor a menor importancia en cuanto a las restricciones de actividad impuestas sobre ellas, si bien debe definirse en cada estudio las zonas a delimitar, sobre la base de qué criterios efectuarlo, y las restricciones a imponer a las mismas.

La zonificación empleada con mayor frecuencia para la protección de la calidad en las propuestas de perímetros de protección en medios porosos o asimilables (Martínez Navarrete *et al.*, 1997), como se esquematiza en la figura 17, es la siguiente:

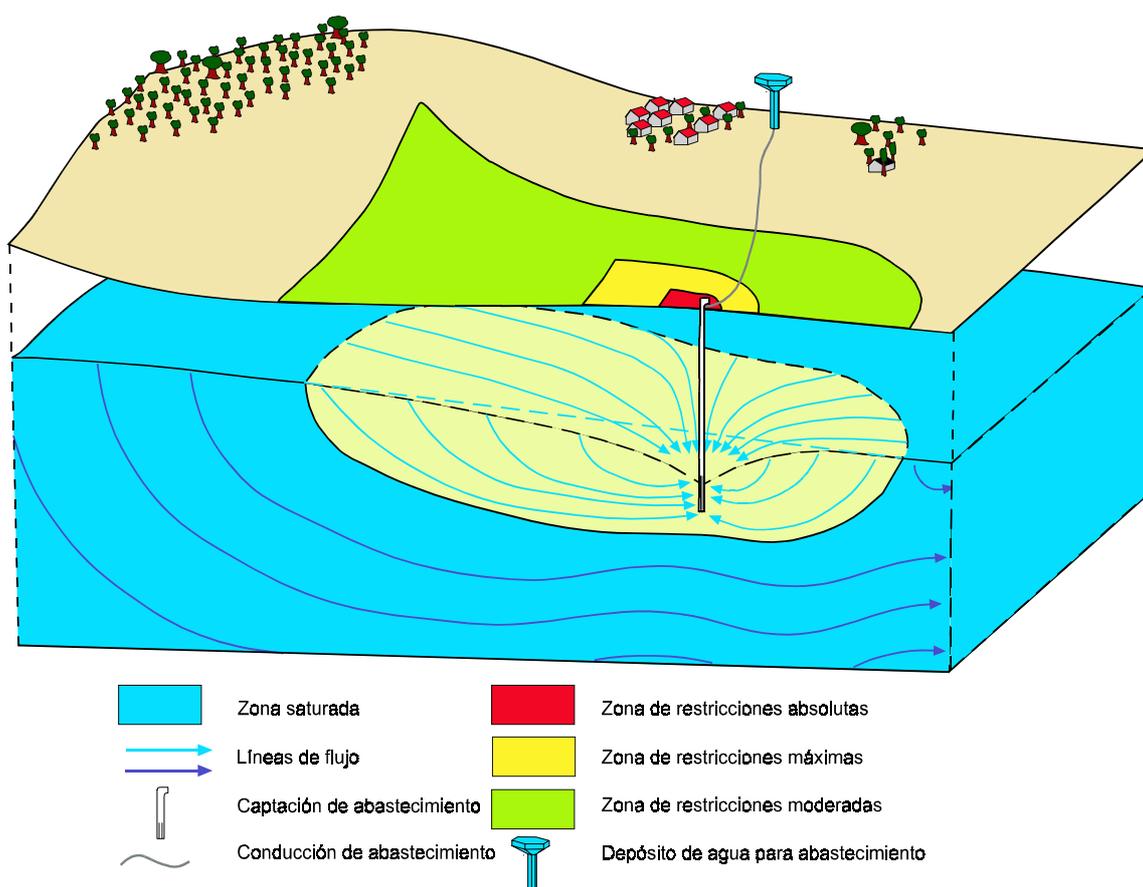


Figura 17: Zonas a establecer en los perímetros de protección de la calidad para captaciones de abastecimiento urbano.

- **Zona inmediata o de restricciones absolutas:** el criterio de delimitación suele ser un tiempo de tránsito de 1 día o un área fijada de forma arbitraria de pequeña extensión

(100 a 400 m²). Estará vallada para impedir el acceso de personal no autorizado a las captaciones.

- **Zona próxima o de restricciones máximas:** se dimensiona generalmente en función de un tiempo de tránsito de 50 días, que permite proteger contra la contaminación microbiológica, utilizando también criterios hidrogeológicos. En algunos estudios no obstante se ha delimitado también empleando un criterio de descenso o de poder autodepurador del terreno.
- **Zona alejada o de restricciones moderadas:** el criterio más utilizado para su dimensionado es un tiempo de tránsito de varios años, criterios de tipo hidrogeológico o una combinación de ambos. Su objetivo es proteger la captación frente a contaminantes de larga persistencia. El tiempo de tránsito empleado en esta zona de restricciones moderadas se ha definido frecuentemente en función de los focos potenciales de contaminación existentes en el entorno de la captación, y de las características hidrogeológicas del acuífero captado, empleándose valores muy dispares en el estudio.

En algunos estudios de delimitación de perímetros de protección de captaciones de abastecimiento en medios kársticos y fisurados se define además una “zona satélite de protección”. Ésta delimita superficies alejadas de la captación, y situadas fuera del recinto de protección, pero en conexión hidráulica directa o preferente con él, a través de conductos o fisuras, de un modo semejante a las “zonas especiales”, definidas en la legislación portuguesa para acuíferos kársticos, o las “zonas satélite de riesgo” que contempla la legislación alemana.

En la presente Tesis Doctoral no serán consideradas, al centrarse en los criterios útiles para los acuíferos detríticos, no siendo objeto de la misma la problemática inherente a los perímetros de protección en medios kársticos ni en los fisurados.

La protección de la cantidad ha sido abordada en gran parte de los estudios de perímetros de protección efectuados en España que la contemplan (Martínez Navarrete y López Geta, 2001) definiéndose una “zona de protección de la cantidad”, con el fin de preservar los caudales que realmente son empleados para abastecer a la población.

En esas zonas, delimitadas con una metodología diferente a la empleada para la calidad, se indicaban las limitaciones que se proponían a otras captaciones en el acuífero para garantizar esos caudales, empleándose normalmente como fundamentos el descenso del nivel piezométrico, criterios hidrogeológicos y frecuentemente una combinación de ambos.

Respecto a la protección de la cantidad en España hay que reseñar además que la modificación establecida en la Ley de Aguas, recogida en el artículo 56.3 de su texto refundido (BOE, 2001 b), contemplando únicamente la determinación de perímetros de protección para proteger las aguas subterráneas frente a los riesgos de la contaminación, sin modificar ni derogar los reglamentos existentes, R.D.P.H. de 1986 (BOE, 1986) y R.A.P.A.P.H. de 1988 (BOE, 1988), que desarrollaban la Ley de Aguas de 1985 (BOE, 1985), plantea además alguna incertidumbre sobre los perímetros de protección que tienen como objetivo salvaguardar la cantidad (como se analizó detalladamente en el capítulo 5.3).

En este sentido, cabe considerar la reflexión indicada en dicho capítulo de establecer otro mecanismo que permitiera contemplar regulaciones en un área en torno de la captación, definiendo integradamente el volumen global máximo de extracción en el entorno delimitado para los diferentes usos.

9.- MÉTODOS APLICADOS PARA LA DELIMITACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DE LOS SONDEOS DE ABASTECIMIENTO URBANO DE VILLACASTÍN QUE CAPTAN EL ACUÍFERO DETRÍTICO DEL TERCIARIO

El análisis efectuado en esta Tesis Doctoral de los diversos métodos empleados, a nivel mundial, para delimitar perímetros de protección de la calidad de captaciones en diferentes materiales, y de las experiencias resultantes de su aplicación, ha permitido seleccionar los métodos más apropiados para su utilización en acuíferos detríticos.

Los métodos finalmente elegidos se utilizarán para delimitar las zonas de restricciones obtenidas para diferentes tiempos de tránsito, o mediante otros criterios, de los perímetros de protección de la calidad en los 4 sondeos de abastecimiento urbano de Villacastín que captan el acuífero del Terciario detrítico. Son los siguientes:

- Métodos hidrogeológicos.
- Análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito.
- Radio fijo calculado: ecuación volumétrica, método de la recarga y función del descenso.
- Método de Wyssling.
- Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme.
- Método de Jacobs y Bear.
- Solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte.
- Método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira.
- Método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales.
- Modelo matemático: Visual Modflow y Visual Modpath.

En los siguientes apartados se incluye, para cada uno de esos métodos, una síntesis de sus requisitos, limitaciones, datos necesarios, formulaciones matemáticas que emplean, incluyéndose éstas en hojas de cálculo para facilitar su utilización, los datos empleados en cada captación (procedentes del análisis efectuado en el capítulo 7 de esta Tesis Doctoral) y los resultados obtenidos para diferentes tiempos de tránsito (excepto en los métodos que no emplean éste como criterio de delimitación).

Los métodos no serán aplicados a las captaciones existentes en materiales graníticos, en los que debe emplearse una metodología propia de acuíferos fisurados, no siendo su desarrollo objeto de esta Tesis Doctoral.

9.1.- Métodos hidrogeológicos

La delimitación de perímetros de protección empleando métodos hidrogeológicos exclusivamente se basa en el análisis de los límites del acuífero captado, cartografía hidrogeológica en el entorno de las captaciones, análisis de las isopiezas y direcciones de flujo, relación entre el acuífero y los ríos y arroyos que lo surcan, zonas de emergencia del agua subterránea, entre otros factores.

Los perímetros de protección de los sondeos de abastecimiento urbano de Villacastín que captan el acuífero detrítico del terciario y cuaternario, cuyos resultados se muestran en la figura 18, se han delimitado considerando los siguientes factores:

- El límite sur del acuífero, constituido por el contacto con las rocas graníticas hercínicas se ha considerado como límite impermeable y por tanto límite sur de los perímetros de protección, aunque podría existir localmente un flujo y aportación lateral de escasa entidad desde el granito hacia el acuífero captado.
- El análisis de las isopiezas, elaboradas en base a los valores de piezometría en los puntos de agua inventariados en esta Tesis Doctoral, permite definir las direcciones de flujo en el acuífero y por tanto el área de alimentación de las captaciones. Al este del arroyo de los Prados se ha considerado que existe una divisoria piezométrica que limita los perímetros por el este.
- El arroyo Cardeña drena hacia el oeste los materiales de su entorno, por lo que estos no han sido incluidos en el ámbito de los perímetros de protección.

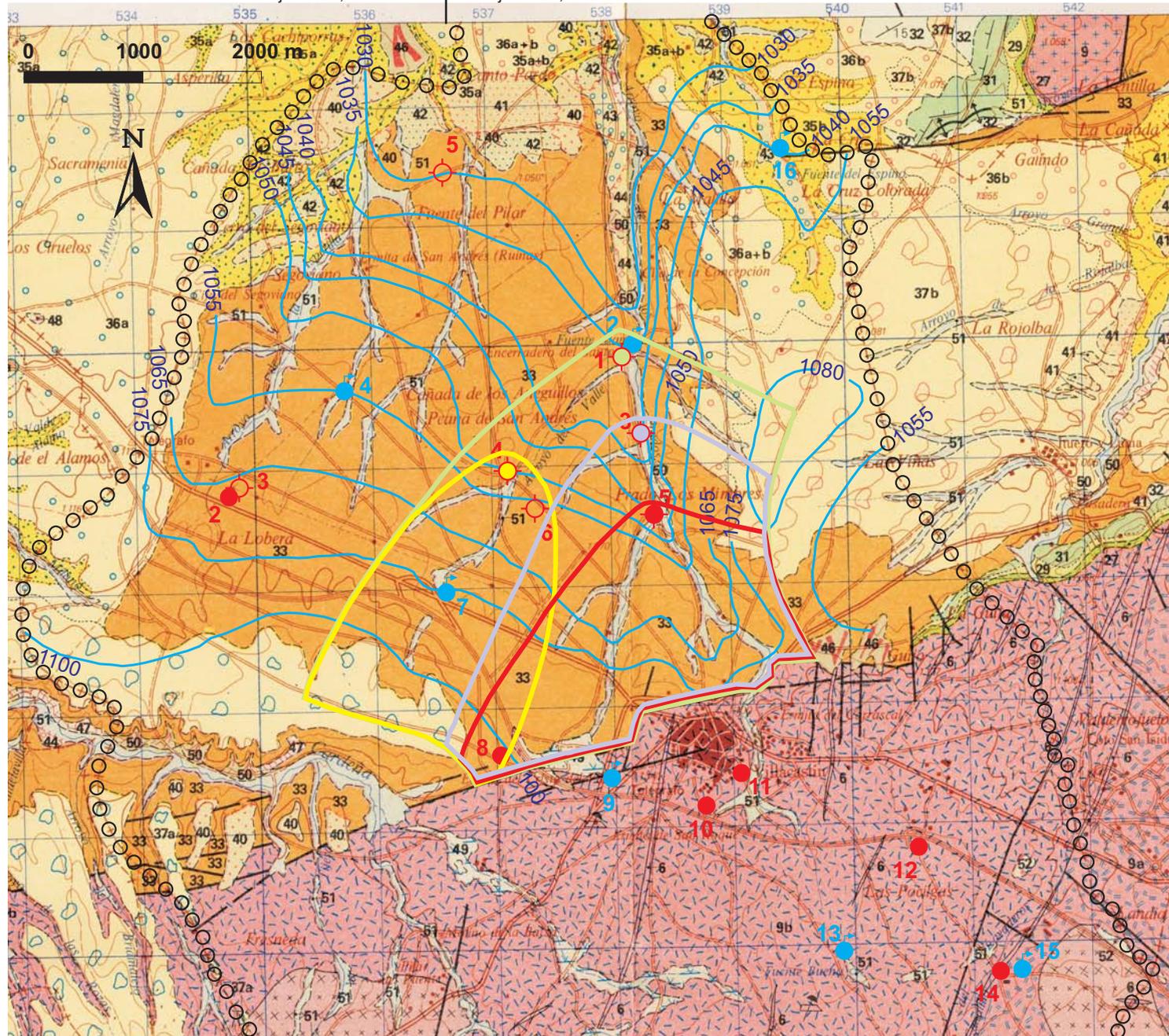
Hay que destacar que se ha incluido en los perímetros de protección la zona ubicada entre el arroyo de los Prados y la divisoria piezométrica existente al este de dicho arroyo antes indicada.

Se ha aplicado este criterio conservativo, que probablemente sobreprotege dicha zona, pese a que el arroyo de los Prados es ganador, como indica el análisis de las isopiezas y las observaciones de campo efectuadas en diferentes fechas en el mismo, por lo que es poco probable que una contaminación en esta zona alcanzara las captaciones ubicadas al otro lado de este eje de descarga del acuífero.

La contaminación sí se produciría en el caso de que los bombeos en esa zona provoquen descensos del nivel piezométrico tales que el río pasase a ser perdedor, o también si los bombeos alterasen el régimen de flujo en profundidad, permitiendo flujo profundo desde la zona este del arroyo de los Prados hacia las captaciones de abastecimiento.

La aplicación de métodos hidrogeológicos, exclusivamente, delimita el área de alimentación de cada captación, pero no permite su subdivisión en diferentes zonas, como si posibilita el empleo de métodos que consideran el tiempo de tránsito.

Hay que reseñar finalmente que el análisis hidrogeológico de detalle del acuífero captado es, en todo caso, imprescindible para la obtención de diversos parámetros requeridos para los demás métodos, y como complemento a los mismos para definir los perímetros de protección.



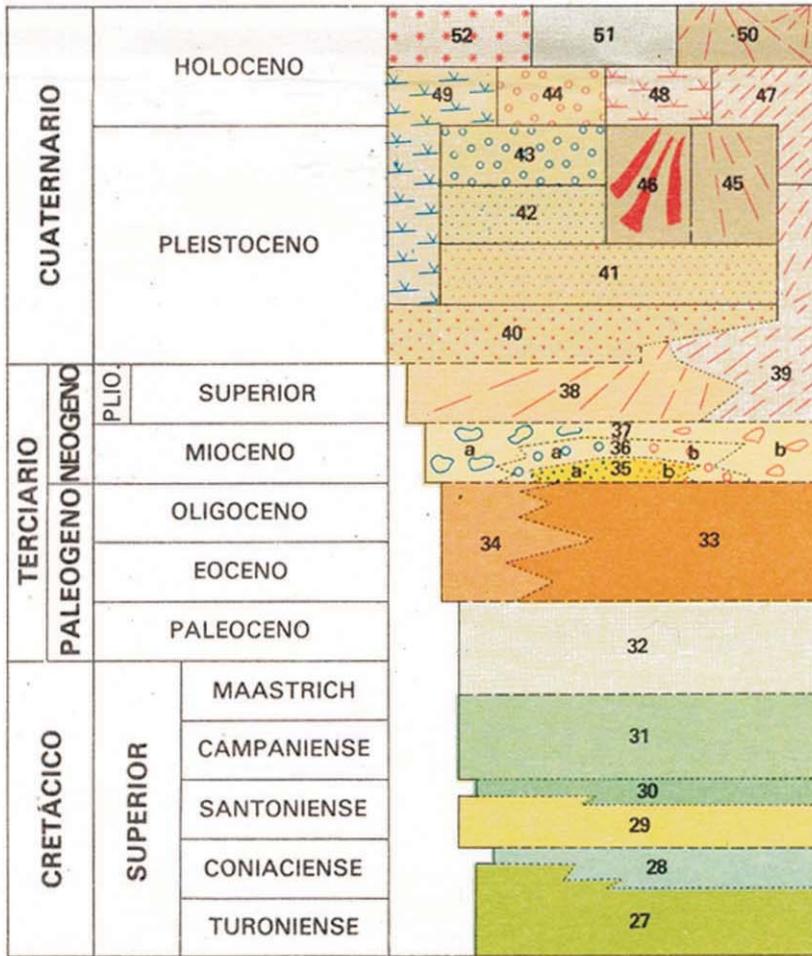
SIMBOLOGÍA

-  **5** Sondeo y número de identificación.
-  **12** Pozo y número de identificación.
-  **15** Manantial y número de identificación.
-  **1055** Isopiezas acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario m s.n.m. (Octubre 2001).
-  Limite del término municipal de Villacastín.
-  **1** Perímetro de protección del sondeo Puente Alzado.
-  **3** Perímetro de protección del sondeo Cañada del Abad.
-  **5** Perímetro de protección del sondeo San Bartolomé.
-  **4** Perímetro de protección del sondeo San Bartolomé.

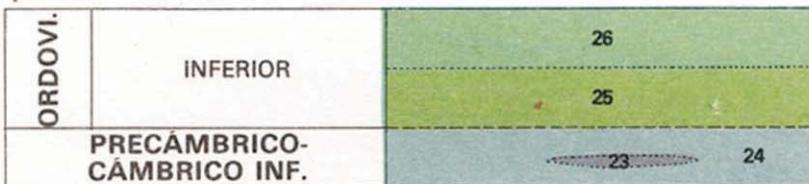
Base cartográfica tomada de Pérez González *et al.*, 1990.

Figura 18: Delimitación de perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico empleando métodos hidrogeológicos.

LEYENDA GEOLÓGICA DE LA FIGURA 18



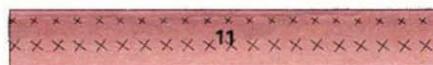
AFLORAMIENTO DE OJOS ALBOS



ROCAS IGNEAS PREHERCÍNICAS



ROCAS GRANÍTICAS HERCÍNICAS



- 52 Materiales antrópicos.
- 51 Arenas, limos, gravas y cantos (Aluviales. Fondos de valle).
- 50 Cantos, bloques y arenas (Conos de deyección).
- 49 Limos, arenas y turberas (Fondos de navas).
- 48 Limos orgánicos (Fondos de charcas).
- 47 Cantos, bloques y arenas (Coluviones y pedrizas).
- 46 Arenas limosas con cantos dispersos (Glacis).
- 45 Bloques y cantos (Conos de deyección).
- 44
- 44a Cantos y arenas (Terrazas).
- 40
- 39 Bloques, cantos y limos amarillentos (Coluviones con matriz).
- 38 Cantos y bloques con limos arenosos amarillentos.
- 37 Bloques y cantos.
- 36 Cantos y arenas.
- 35 Arenas a) Litoareníticas (área fuente de metasedimentos de bajo grado) b) Arcóscicas (área fuente de materiales ígneos y metamórficos).
- 34 Bloques y cantos "Serie Arcóscica".
- 33 Gravas y arenas "Serie Arcóscica".
- 32 Arenas, gravas silíceas y arcillas.
- 31 Dolomías y margas. Formación "Dolomías y margas VALLE DE TABLADILLO".
- 30 Margas, dolomías y areniscas. Miembro "Dolomías de MONTEJO". Formación Calizas y dolomías de CASTROJIMENO.
- 29 Areniscas dolomíticas. Miembro "Areniscas dolomíticas de HONTORIA". Formación Calizas y dolomías de CASTROJIMENO.
- 28 Margas y dolomías. Formación "Dolomías tableadas de CABALLAR".
- 27 Arenas, arcillas y conglomerados. Formación "Arenas y arcillas de SEGOVIA".
- 26 Cuarzitas masivas. CUARCITA ARMORICANA.
- 25 Cuarzitas, metaconglomerados, filitas y pizarras. CAPAS DEL VOLTOYA.
- 24 Filitas y pizarras con laminaciones arenosas. CAPAS DEL MEDIANA.
- 23 Calizas
- 17 Ortoneises glandulares.
- 11 Adamellitas - granitos de grano fino medio. Tipo NAVALDRINAL.
- 9 Adamellitas con abundantes enclaves microgranulares. Tipo EL ESPINAR.
 - a) Porfídica. b) Con anfíbol.
- 6 Cuarzo.
- 5 Lamprófidos camptoníticos.

9.2- Método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito

En este método se asume un acuífero con flujo bidimensional en medio poroso o asimilable, sin discontinuidades, en el que los contaminantes se mueven en el agua subterránea con su misma dirección y velocidad (United States Environmental Protection Agency, USEPA, 1991 a). Al aplicarlo se delimita en primer lugar el área de alimentación a la captación (área desde esta hasta la divisoria hidrogeológica en la cual toda partícula en ella ubicada alcanzará el pozo de bombeo con independencia del tiempo de tránsito requerido para ello). Ésta se calcula en base al análisis del mapa de isopiezas, las correspondientes líneas de flujo trazadas hasta la captación y la ley de Darcy.

Al delimitar el área de alimentación en diversos estudios de perímetros de protección en USA (USEPA, 1991 a) se propuso iniciar el trazado de las líneas de flujo arbitrariamente a 150 o 300 metros a cada lado de la captación y, para evitar definir un área excesivamente estrecha y como medida de seguridad, se planteó incluir a sus lados una zona “buffer” (con anchura cero a la altura de la captación y que iría abriéndose con un ancho de 75 metros cada 300 metros de distancia a la captación), trazándose las líneas de flujo hasta la divisoria hidrogeológica. En el caso de existir varios acuíferos superpuestos se efectúa independientemente para cada uno hasta alcanzar la divisoria hidrogeológica que les corresponda, que puede ser diferente. El área de alimentación final se obtendrá superponiendo las correspondientes a los distintos acuíferos así como aquellas zonas en que el flujo obtenido de las isopiezas indique que una partícula sobre ellas alcanzará lateralmente el área de alimentación de los acuíferos profundos, ya que de esta iría hasta la captación.

Una vez definida el área de alimentación se determinará la distancia aguas arriba de la captación correspondiente a diferentes tiempos de tránsito mediante el empleo de las siguientes ecuaciones:

$$d = V_e \cdot t \qquad V_e = \frac{K \cdot i}{m_e}$$

Donde:

- V_e : Velocidad lineal media
- K : Conductividad hidráulica
- i : Gradiente hidráulico
- m_e : Porosidad eficaz
- t : Tiempo de tránsito
- d : Distancia aguas arriba de la captación hasta la línea de tiempo de tránsito

Esta distancia se traza como el radio de un círculo definiéndose el perímetro de protección para cada tiempo de tránsito como la parte de ese círculo incluido en el área de alimentación definida por el análisis de isopiezas y líneas de flujo.

Los tiempos de tránsito se definen hasta llegar a la divisoria hidrogeológica y dependen de las circunstancias de cada estudio. A modo de ejemplo en algunos casos se consideró tiempos de tránsito de 1, 4, 13 años y de 1-10-30-50-80-100 años (USEPA, 1991 a).

Los resultados obtenidos al aplicar este método se indican en las tablas 12 y 13.

Tabla 12: Resultados obtenidos aplicando el método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

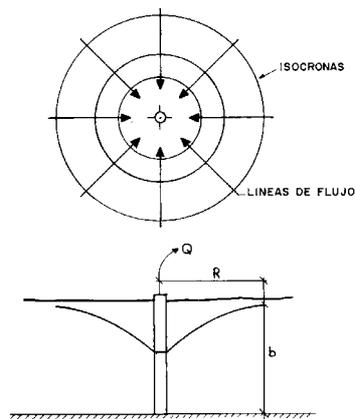
	Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	$K = T/b$ (m/día)	0,32	0,33	0,36	0,34
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	m_e	0,002	0,002	0,002	0,002
	V_e (m/día)	4	1,815	3,6	6,8
Resultados de las Fórmulas	t_1 día	1	1	1	1
	d_1 día (m)	4	2	4	7
	t_{50} días	50	50	50	50
	d_{50} días (m)	200	91	180	340
	t_4 años	1460	1460	1460	1460
	d_4 años (m)	5840	2650	5256	9928
	t_{25} años	9125	9125	9125	9125
	d_{25} años (m)	36500	16562	32850	62050

Tabla 13: Desarrollo del cálculo, por el método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento a Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO "SAN BARTOLOMÉ"</u>				
<u>Datos de partida:</u>		<u>Resultados:</u>		
		Días	Días	Días
		1	50	1460
Conductividad hidráulica:	K= 0,32 m/día	Tiempo:		9125
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002	d=	4	200
Gradiente hidráulico:	i = 0,025		5840	36500
Velocidad:	V = 4 m/día			
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO "PUENTE ALZADO"</u>				
<u>Datos de partida:</u>		<u>Resultados:</u>		
		Días	Días	Días
		1	50	1460
Conductividad hidráulica:	K= 0,33 m/día	Tiempo:		9125
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002	d=	2	91
Gradiente hidráulico:	i = 0,011		2650	16562
Velocidad:	V = 1,815 m/día			
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO "CAÑADA DEL ABAD"</u>				
<u>Datos de partida:</u>		<u>Resultados:</u>		
		Días	Días	Días
		1	50	1460
Conductividad hidráulica:	K= 0,36 m/día	Tiempo:		9125
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002	d=	4	180
Gradiente hidráulico:	i = 0,020		5256	32850
Velocidad:	V = 3,6 m/día			
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO "CAMINO DEL VALLE"</u>				
<u>Datos de partida:</u>		<u>Resultados:</u>		
		Días	Días	Días
		1	50	1460
Conductividad hidráulica:	K= 0,34 m/día	Tiempo:		9125
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002	d=	7	340
Gradiente hidráulico:	i = 0,040		9928	62050
Velocidad:	V = 6,8 m/día			

9.3.- Método del radio fijo calculado: Ecuación volumétrica y Método de la recarga

El método se basa en un análisis bidimensional del balance de agua asumiendo un flujo ambiental (flujo direccional en el acuífero) despreciable (Figura 19). Si se asume un flujo radial hacia el pozo en un acuífero con espesor saturado (b) constante, el cilindro que corresponde a una isocrona de tiempo de tránsito (t) tiene un radio fijo (R) tal que cualquier partícula que entre en ese cilindro, o ya este dentro, tardará un máximo de t días antes de ser bombeada en el pozo.



Fuente: Moreno Merino *et. al.*, 1991.

Figura 19: Radio fijo calculado. Líneas de flujo e isocronas.

El balance de agua para el periodo t es (USEPA, 2000):

$$N \cdot \pi \cdot R^2 \cdot t + m_e \cdot \pi \cdot R^2 \cdot b = Q \cdot t$$

Donde:

N : Recarga procedente de infiltración de la precipitación (m/día)

R : Radio del perímetro de protección a calcular (m)

t : Tiempo de tránsito hasta la captación (día)

m_e : Porosidad eficaz del acuífero

b : Espesor saturado (m)

Q : Caudal bombeado en la captación (m^3 /día)

El primer término de esa ecuación representa la entrada al acuífero debido a la recarga.

El segundo término representa el agua contenida dentro del cilindro.

El término de la derecha de la igualdad representa la cantidad total de agua extraída del pozo durante el periodo de bombeo.

El radio puede expresarse como:

$$R = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{(N \cdot \pi \cdot t) + (m_e \cdot \pi \cdot b)}}$$

Se pueden tener dos casos simplificados:

Método del radio fijo calculado. Ecuación volumétrica

En el método volumétrico (USEPA, 1993 a) se considera que el término $(N \cdot \pi \cdot t)$ es muy pequeño debido a pequeños valores de tiempo o de recarga o de ambos.

Por lo tanto:

$$R = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{m_e \cdot \pi \cdot b}}$$

Método del radio fijo calculado. Método de la recarga

En el método de la recarga (USEPA, 1993 a) cuando el tiempo alcanza valores muy grandes se considera exclusivamente el primer término de la ecuación, correspondiente a la recarga y despejando se obtiene la zona de captura que viene dada por la ecuación:

$$R = \sqrt{\frac{Q}{N \cdot \pi}}$$

Todas estas ecuaciones sólo se aplican si se cumple la suposición de Dupuit, es decir flujo horizontal somero. Si la zona de captura o el radio de la isocrona es menor que dos veces el espesor saturado del acuífero y el pozo no es totalmente penetrante, los efectos tridimensionales pueden llegar a ser importantes y la aproximación podría conducir a subestimar el radio de la isocrona de la zona de captura (R). Esto se puede evitar sustituyendo el espesor saturado del acuífero por la longitud de rejilla en el pozo.

La isocrona radial simétrica sólo será válida si no hay flujo ambiental o el pozo domina el flujo dentro del área correspondiente a esa isocrona.

Para una isocrona de 1 o 2 años y un pozo con alta capacidad de bombeo la ecuación de flujo radial es frecuentemente asumible. Sin embargo un pozo con poca capacidad de bombeo en un área con fuerte flujo ambiental tendrá una isocrona alargada que se extenderá aguas arriba en la dirección del flujo que no se ajustará a las isocronas circulares.

El asumir un espesor saturado constante es cierto en acuíferos confinados cuyo espesor no varíe, pero en acuíferos libres, incluso asumiendo flujo horizontal, el espesor saturado no es constante debido a los descensos por bombeos del nivel piezométrico. Usando el espesor saturado más pequeño en la ecuación del método volumétrico se obtendrá una zona de captura conservativa (protectiva).

Una modificación del método de la recarga se emplea también para determinar el área de alimentación de una captación delineándose esta, en lugar de mediante un radio fijo, con

una forma obtenida del análisis piezométrico y otros criterios hidrogeológicos Morris, 1994; Environment Agency, 1998).

Así Morris (1994) emplea el balance del agua:

$$R^2 \cdot \pi = \frac{Q}{N}$$

$$A = \frac{Q}{N}$$

Donde:

A: Área de alimentación (m²)

Q: Caudal anual medio de explotación (m³/año)

N: Recarga anual media a largo plazo (m/año)

Los resultados obtenidos al aplicar estos métodos se indican en las tablas 14, 15 y 16.

Tabla 14: Resultados obtenidos aplicando el método del radio fijo calculado. Ecuación volumétrica a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

		Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario detrítico			
		Parámetros	Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)
Datos de Partida	Q (m ³ /día)	151,2	151,2	151,2	151,2
	b (m)	93	90	82	86
	m _e	0,002	0,002	0,002	0,002
Resultados de las Fórmulas	t _{1 día}	1	1	1	1
	R _{1 día (m)}	16	16	17	17
	t _{50 días}	50	50	50	50
	R _{50 días (m)}	114	116	121	118
	t _{4 años}	1460	1460	1460	1460
	R _{4 años (m)}	615	625	655	639
	t _{25 años}	9125	9125	9125	9125
	R _{25 años (m)}	1537	1562	1636	1598

Tabla 15: Desarrollo del cálculo por el método del radio filo calculado, ecuación volumétrica, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento a Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "SAN BARTOLOMÉ"									
Datos de partida:				Resultados:					
				Días	Días	Días	Días	Días	Días
			Tiempo:	1	50	1460	9125		
Caudal:	Q =	151,2 m ³ /día		258,755133	12937,75666	377782,4946	2E+06		
Porosidad eficaz:	m_e =	0,002	R=	16	114	615	1537		
π:	π=	3,141,5927							
Espesor saturado:	b =	93 m							
APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "PUENTE ALZADO"									
Datos de partida:				Resultados:					
				Días	Días	Días	Días	Días	Días
			Tiempo:	1	50	1460	9125		
Caudal:	Q =	151,2 m ³ /día		267,380304	13369,01522	390375,2444	2E+06		
Porosidad eficaz:	m_e =	0,002	R=	16	116	625	1562		
π:	π=	3,141,5927							
Espesor saturado:	b =	90 m							
APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "CAÑADA DEL ABAD"									
Datos de partida:				Resultados:					
				Días	Días	Días	Días	Días	Días
			Tiempo:	1	50	1460	9125		
Caudal:	Q =	151,2 m ³ /día		293,466188	14673,30939	428460,6341	3E+06		
Porosidad eficaz:	m_e =	0,002	R=	17	121	655	1636		
π:	π=	3,141,5927							
Espesor saturado:	b =	82 m							
APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "CAMINO DEL VALLE"									
Datos de partida:				Resultados:					
				Días	Días	Días	Días	Días	Días
			Tiempo:	1	50	1460	9125		
Caudal:	Q =	151,2 m ³ /día		279,816598	13990,82988	408532,2325	3E+06		
Porosidad eficaz:	m_e =	0,002	R=	17	118	639	1598		
π:	π=	3,141,5927							
Espesor saturado:	b =	86 m							

Tabla 16: Resultados obtenidos aplicando el método del radio fijo calculado. Método de la recarga a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

		Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /día)	118,8	118,8	118,8	118,8
	N (m/día)	1,02·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻⁴
Resultados de las Fórmulas	t _{1 día}	NO ES ADECUADO EMPLEAR EL MÉTODO PARA VALORES PEQUEÑOS DE TIEMPO (1 DÍA Y 50 DÍAS) YA QUE PROPORCIONA UN ÚNICO VALOR PARA TIEMPOS MUY GRANDES (4 AÑOS O 25 AÑOS EN ESTE CASO)			
	R _{1 día} (m)				
	t _{50 días}				
	R _{50 días} (m)				
	t _{4 años}	1460	1460	1460	1460
	R _{4 años} (m)	609	609	609	609
	t _{25 años}	9125	9125	9125	9125
R _{25 años} (m)	609	609	609	609	

La recarga (N) se obtiene considerando que la infiltración supone un 5% de la precipitación:

$$N = \frac{750 \text{ mm} / \text{m}^2 / \text{año}}{1000 \cdot 365} \cdot 0,05 = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{día} = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ m} / \text{día}$$

Se emplea el caudal anual medio de explotación en cada captación.

9.4.- Método del radio fijo calculado. Función del descenso

Este método define la zona a proteger como el área en la cual se produce un descenso determinado del nivel piezométrico. Este se calcula empleando la ecuación de Theis (Theis, 1935) para el régimen transitorio, por lo que la precisión será mayor cuanto más se asemeje la realidad del acuífero a las condiciones matemáticas o condiciones de contorno impuestas para su resolución. Estas (Villanueva Martínez e Iglesias López, 1984) son:

- Acuífero de extensión infinita homogéneo e isótropo en cuanto a su conductividad hidráulica
- La captación atraviesa completamente la formación permeable
- El flujo de agua hacia la captación es radial y sin componente vertical
- El caudal de bombeo es constante
- El pozo de bombeo es de diámetro cero

- No existe recarga al acuífero

La ecuación de Theis es:

$$d = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} \cdot du$$

En la cual u es una función auxiliar cuyo valor es:

$$u = \frac{R^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

Donde:

- d : Descenso en un punto situado a la distancia R del pozo de bombeo
- Q : Caudal de bombeo constante
- k : Transmisividad del acuífero
- R : Distancia a la captación
- S : Coeficiente de almacenamiento
- t : Tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo, consideradas inicialmente condiciones de reposo.

Se define una función de pozo $W(u)$ que corresponde a la integral de la citada fórmula.

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} \cdot du$$

Esta integral no tiene solución analítica y se ha resuelto por métodos aproximados. Se muestran de un modo resumido en la Tabla 17 los valores de $W(u)$ y u .

Al aplicar este método se calcula en primer lugar $W(u)$:

$$d = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u)$$

$$W(u) = \frac{d \cdot 4 \cdot \pi \cdot T}{Q}$$

Se obtiene el valor de u de la tabla de la función de pozo (Tabla 17). Para obtener la distancia a la captación (R) en la que se produce un descenso (d) fijado como criterio para delimitar el perímetro de protección se emplean las ecuaciones siguientes:

$$u = \frac{R^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

$$R = \sqrt{\frac{u \cdot 4 \cdot T \cdot t}{S}}$$

Tabla 17: Función de pozo $W(u)$ (resumida)

	$k \times 10^{-14}$	$k \times 10^{-12}$	$k \times 10^{-10}$	$k \times 10^{-8}$	$k \times 10^{-6}$	$k \times 10^{-4}$	$k \times 10^{-2}$	$\frac{k}{k \times 10^0}$
1,0	31,6590	27,0538	22,4486	17,8435	13,2383	8,6332	<u>4,0379</u>	<u>0,2194</u>
1,5	31,2535	26,6483	22,0432	17,4380	12,8328	8,2278	3,6374	,1000
2,0	30,9658	26,3607	21,7555	17,1503	12,5451	<u>7,9402</u>	3,3547	<u>,04890</u>
2,5	30,7427	26,1375	21,5323	16,9272	12,3220	7,7172	3,1365	,02491
3,0	30,5604	25,9552	21,3500	16,7449	12,1397	7,5348	2,9591	,01305
3,5	30,4062	25,8010	21,1959	16,5907	11,9855	7,3807	2,8099	,006970
4,0	30,2727	25,6675	21,0623	16,4572	11,8520	7,2472	2,6813	,003779
4,5	30,1549	25,5497	20,9446	16,3394	11,7342	7,1295	2,5684	,002073
5,0	30,0495	25,4444	20,8392	16,2340	11,6289	7,0242	2,4679	,001148
5,5	29,9542	25,3491	20,7439	16,1387	11,5336	6,9289	2,3775	,0006409
6,0	29,8672	25,2620	20,6569	16,0517	11,4465	6,8420	2,2953	0,0003601
6,5	29,7872	25,1820	20,5768	15,9717	11,3665	6,7620	2,2201	,0002034
7,0	29,7131	25,1079	20,5027	15,8976	11,2924	6,6879	2,1508	,0001155
7,5	29,6441	25,0389	20,4337	15,8286	11,2234	6,6190	2,0867	,00006583
8,0	29,5795	24,9744	20,3692	15,7640	11,1589	6,5545	2,0269	,00003767
8,5	29,5189	24,9137	20,3086	15,7034	11,0982	6,4939	1,9711	,00002162
9,0	29,4618	24,8566	20,2514	15,6462	11,0411	6,4368	1,9187	,00001245
9,5	29,4077	24,8025	20,1973	15,5922	10,9870	6,3828	1,8695	0,000007185

Ejemplos de utilización de la tabla:

$W(u)=0,04 \quad u=2,0 \cdot 10^0 = 2,0$

$W(u)=0,21 \quad u=1,0 \cdot 10^0 = 1,0$

$W(u)=7,94 \quad u=2,0 \cdot 10^{-4}$

$W(u)=4,03 \quad u=1,0 \cdot 10^{-2}$

Modificada de Villanueva e Iglesias, 1984.

Los resultados obtenidos al aplicar este método a las captaciones de abastecimiento a Villacastín se indican en la Tabla 18:

Tabla 18: Resultados obtenidos aplicando el método del radio fijo calculado. Función del descenso a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

		Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /día)	151,2	151,2	151,2	151,2
	T(m ² /día)	30	30	30	30
	S	0,002	0,002	0,002	0,002
Resultados de las Fórmulas	W(u)	0,037	0,037	0,037	0,037
	Formula				
	u Tabla	2,25	2,25	2,25	2,25
	t ₁ día	1	1	1	1
	R ₁ día (m)	367	367	367	367
	t ₅₀ días	50	50	50	50
	R ₅₀ días (m)	2598	2598	2598	2598
	t ₄ años	1460	1460	1460	1460
	R ₄ años (m)	14039	14039	14039	14039
	t ₂₅ años	9125	9125	9125	9125
R ₂₅ años (m)	35098	35098	35098	35098	

Se ha considerado como límite de descenso 15 mm (0,015 m) al emplearse éste en diversos estudios de delimitación de perímetros de protección realizados en Estados Unidos (USEPA, 1987).

9.5.- Método de Wyssling

El método de Wyssling (Wyssling, 1979 en Lallemand- Barrès, Roux, 1989) consiste en el cálculo de la zona de llamada de una captación (Figura 20), es decir, de la parte del área de alimentación en la cual puede apreciarse un descenso piezométrico consecuencia del bombeo y las líneas de corriente se dirigen a la captación, y la búsqueda posterior del tiempo de tránsito deseado.

Fue diseñado para el dimensionamiento de perímetros de protección en acuíferos porosos y homogéneos pero presenta el inconveniente de no tener en cuenta las heterogeneidades del acuífero por lo que es menos preciso para las zonas más alejadas de la captación.

La resolución del método (Wyssling, 1979, en Moreno Merino *et al.*, 1991) precisa conocer el valor de los siguientes parámetros hidráulicos:

- i : Gradiente hidráulico. Obtenido a partir de las isopiezas trazadas
- Q : Caudal real bombeado
- K : Conductividad hidráulica
- m_e : Porosidad eficaz
- b : Espesor saturado del acuífero

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

a) Se calcula en primer lugar la zona de llamada.

En un acuífero libre, si B (Figura 20) es la anchura del frente de llamada:

$$Q = K \cdot B \cdot b \cdot i \qquad B = \frac{Q}{K \cdot b \cdot i}$$

b) El radio de llamada puede obtenerse de la ecuación:

$$X_o = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}$$

y el ancho del frente de llamada a la altura de la captación:

$$B' = \frac{B}{2} = \frac{Q}{2 \cdot K \cdot b \cdot i}$$

c) La velocidad eficaz V_e se calcula como:

$$V_e = \frac{K \cdot i}{m_e}$$

d) Una vez determinada la zona de llamada ha de buscarse en la dirección del flujo la distancia correspondiente al tiempo de tránsito deseado (isocronas).

Se emplean las ecuaciones:

$$S_o = \frac{+l + \sqrt{l \cdot (l + 8 \cdot X_o)}}{2}$$

$$S_u = \frac{-l + \sqrt{l \cdot (l + 8 \cdot X_o)}}{2}$$

Donde:

$$l = V_e \cdot t$$

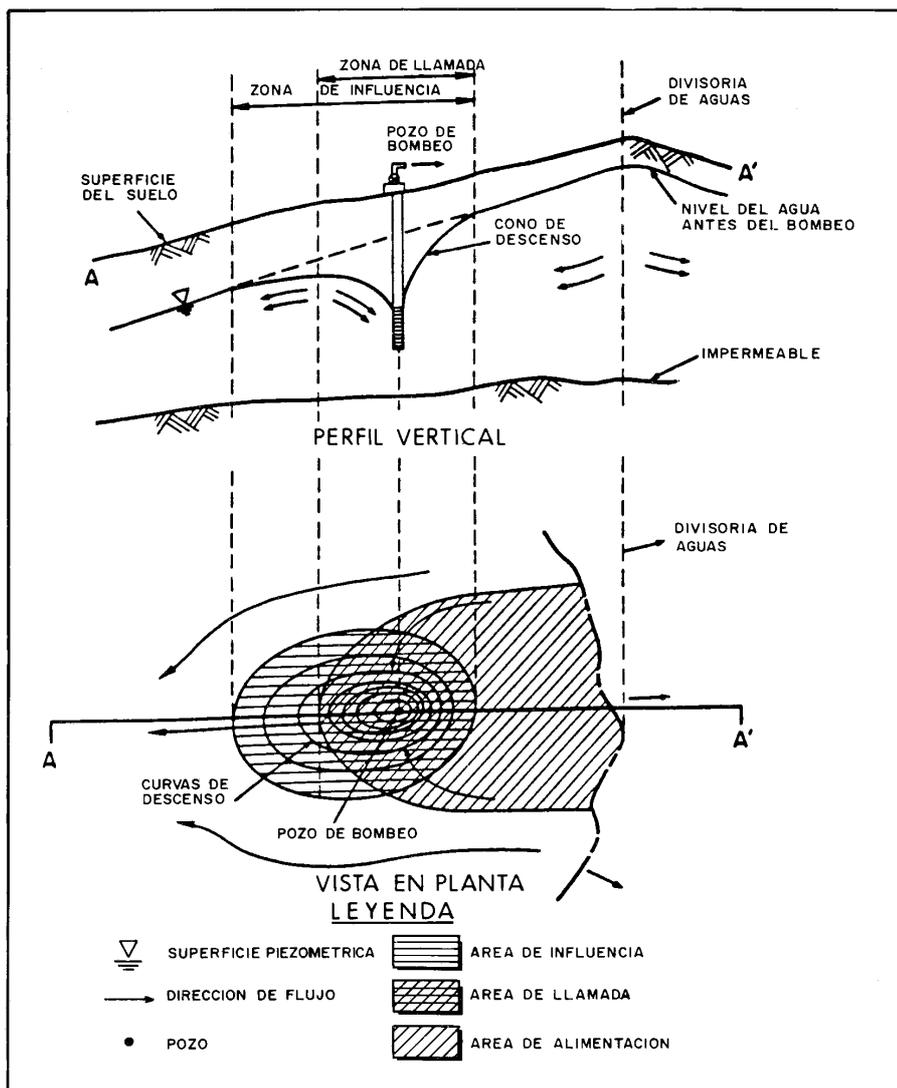
t : Tiempo de tránsito

V_e : Velocidad eficaz

S_o : Distancia aguas arriba en la dirección del flujo correspondiente a un tiempo de tránsito t

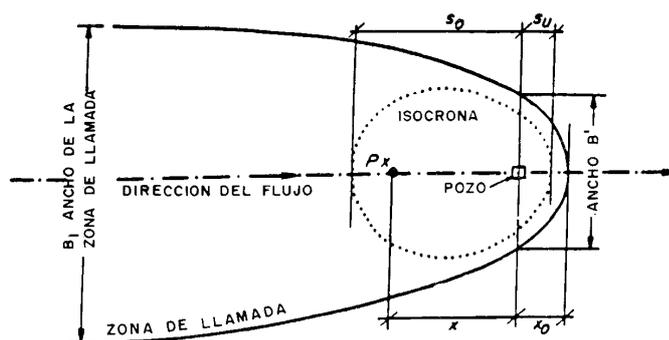
S_u : Distancia aguas abajo en la dirección del flujo correspondiente a un tiempo de tránsito t .

Los resultados obtenidos al aplicar este método se indican en las tablas 19, 20, 21, 22 y 23.



Fuente: A. LALLEMAND, J-C ROUX, 1989

ESQUEMA DE UN BOMBEO EN MEDIO POROSO



Fuente: A. LALLEMAND, J-C ROUX, 1989

DETERMINACION DE ISOCRONAS (METODO DE WYSSLING)

Figura 20: Cálculo de perímetros de protección mediante la aplicación del método de Wyssling (Tomado de Moreno Merino *et al.*, 1991).

Tabla 19: Resultados obtenidos aplicando el método de Wyssling a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

		Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario Detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /s)	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	T= 30 m ² /día = 3,4 10 ⁻⁴ m ² /s	3,4 10 ⁻⁴	3,4 10 ⁻⁴	3,4 10 ⁻⁴	3,4 10 ⁻⁴
	K=T/b (m/s)	3,7·10 ⁻⁶	3,8·10 ⁻⁶	4,2·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁶
Resultados de las Fórmulas	b (m)	93	90	82	86
	m _e	0,002	0,002	0,002	0,002
	B (m)	349	797	436	218
	B' (m)	174	399	218	109
	X ₀ (m)	55	127	69	35
	V _e (m/s)	4,63·10 ⁻⁵	2,09·10 ⁻⁵	4,2·10 ⁻⁵	8·10 ⁻⁵
	l _{1 día} (m)	4	2	4	7
	S _{o-1 día} (m)	23	22	24	26
	S _{u-1 día} (m)	19	21	21	19
	l _{50 días} (m)	200	90	181	346
	S _{o-50 días} (m)	279	203	273	405
	S _{u-50 día} (m)	79	113	92	59
	l _{4 años} (m)	5834	2636	5298	10091
	S _{o-4 años} (m)	5943	2870	5433	10160
	S _{u-4 años} (m)	109	233	135	69
	l _{25 años} (m)	36463	16478	33113	63072
	S _{o-25 años} (m)	36574	16728	33251	63141
S _{u-25 años} (m)	111	250	138	69	

Tabla 20: Desarrollo del cálculo, por el método de Wyssling, de las zonas de restricciones del perímetro de protección del sondeo de abastecimiento a Villacastín “San Bartolomé”, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

Datos de partida:																		
Caudal:	Q =	3 L/s =	0.003 m ³ /s															
Gradiente hidráulico:	i =	0.025																
Conductividad hidráulica	K=	0.0000037 m/s																
Espesor saturado:	b =	93 m																
Porosidad eficaz:	m_e =	0.2 % =	0.002															
Radio de llamada:																		
	X₀ = Q/(2·π·K·b·i) =		55.5 m															
Velocidad eficaz:																		
	V_e = K/i/m_e =		4.625E-05 m/s															
Ancho del frente de llamada:																		
	B = Q/K·b·i =		349 m															
Ancho del frente de llamada a la altura de la captación:																		
	B' = B/2 =		174 m															
Parámetro l:																		
	l_{1 día} =		4.0 m															
	l_{50 días} =		199.8 m															
	l_{4 años} =		5834.2 m															
	l_{25 años} =		36463.5 m															
Distancias So y Su:																		
	So = $\frac{+l + (l \cdot (l+8 \cdot X_0))^{1/2}}{2}$																	
	Su = $\frac{-l + (l \cdot (l+8 \cdot X_0))^{1/2}}{2}$																	
	So_{1 día} =	23	Su_{1 día} = 19															
	So_{50 días} =	279	Su_{50 días} = 79															
	So_{4 años} =	5943	Su_{4 años} = 109															
	So_{25 años} =	36574	Su_{25 años} = 111															
ZONAS DE RESTRICCIONES DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TIEMPO DE TRÁNSITO</th> <th>AGUAS ARRIBA (So)</th> <th>AGUAS ABAJO (Su)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Día</td> <td>23</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>50 Días</td> <td>279</td> <td>79</td> </tr> <tr> <td>4 Años</td> <td>5943</td> <td>109</td> </tr> <tr> <td>25 Años</td> <td>36574</td> <td>111</td> </tr> </tbody> </table>				TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)	1 Día	23	19	50 Días	279	79	4 Años	5943	109	25 Años	36574	111
TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)																
1 Día	23	19																
50 Días	279	79																
4 Años	5943	109																
25 Años	36574	111																

Tabla 21: Desarrollo del cálculo, por el método de Wyssling, de las zonas de restricciones del perímetro de protección del sondeo de abastecimiento a Villacastín “Puente Alzado”, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

<u>Datos de partida:</u>																		
Caudal:	Q =	3 L/s =	0,003 m ³ /s															
Gradiente hidráulico:	i =	0,011																
Conductividad hidráulica	K =	0,0000038 m/s																
Espesor saturado:	b =	90 m																
Porosidad eficaz:	m_e =	0,2 % =	0,002															
<u>Radio de llamada:</u>																		
	X₀ = Q/(2·π·K·b·i) =	126,9 m																
<u>Velocidad eficaz:</u>																		
	V_e = K/i/m_e =	0,0000209 m/s																
<u>Ancho del frente de llamada:</u>																		
	B = Q/K·b·i =	797 m																
<u>Ancho del frente de llamada a la altura de la captación:</u>																		
	B' = B/2 =	399 m																
<u>Parámetro l:</u>																		
	l_{1 día} =	1,8 m																
	l_{50 días} =	90,3 m																
	l_{4 años} =	2636,4 m																
	l_{25 años} =	16477,6 m																
<u>Distancias So y Su:</u>																		
	So = $\frac{+l + (l + 8 \cdot X_0)}{2}$																	
	Su = $\frac{-l + (l + 8 \cdot X_0)}{2}$																	
	So_{1 día} =	22	Su_{1 día} = 21															
	So_{50 días} =	203	Su_{50 días} = 113															
	So_{4 años} =	2870	Su_{4 años} = 233															
	So_{25 años} =	16728	Su_{25 años} = 250															
<u>ZONAS DE RESTRICCIONES DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN</u>																		
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>TIEMPO DE TRÁNSITO</th> <th>AGUAS ARRIBA (So)</th> <th>AGUAS ABAJO (Su)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Día</td> <td>22</td> <td>21</td> </tr> <tr> <td>50 Días</td> <td>203</td> <td>113</td> </tr> <tr> <td>4 Años</td> <td>2870</td> <td>233</td> </tr> <tr> <td>25 Años</td> <td>16728</td> <td>250</td> </tr> </tbody> </table>			TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)	1 Día	22	21	50 Días	203	113	4 Años	2870	233	25 Años	16728	250
TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)																
1 Día	22	21																
50 Días	203	113																
4 Años	2870	233																
25 Años	16728	250																

Tabla 22: Desarrollo del cálculo, por el método de Wyssling, de las zonas de restricciones del perímetro de protección del sondeo de abastecimiento a Villacastín “Cañada del Abad”, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

Datos de partida:																		
Caudal:	Q =	3 L/s =	0,003 m ³ /s															
Gradiente hidráulico:	i =	0,02																
Conductividad hidráulica:	K =	0,0000042 m/s																
Espesor saturado:	b =	82 m																
Porosidad eficaz:	m_e =	0,2 % =	0,002															
Radio de llamada:																		
	X₀ = Q/(2·π·K·b·i) =	69,3 m																
Velocidad eficaz:																		
	V_e = K·i/m_e =	0,000042 m/s																
Ancho del frente de llamada:																		
	B = Q/K·b·i =	436 m																
Ancho del frente de llamada a la altura de la captación:																		
	B' = B/2 =	218 m																
Parámetro l:																		
	l_{1 día} =	3,6 m																
	l_{50 días} =	181,4 m																
	l_{4 años} =	5298,0 m																
	l_{25 años} =	33112,8 m																
Distancias So y Su:																		
	So = $\frac{-l + (l + (l + 8 \cdot X_0))^{1/2}}{2}$																	
	Su = $\frac{-l + (l + (l + 8 \cdot X_0))^{1/2}}{2}$																	
	So_{1 día} =	24	Su_{1 día} = 21															
	So_{50 días} =	273	Su_{50 días} = 92															
	So_{4 años} =	5433	Su_{4 años} = 135															
	So_{25 años} =	33251	Su_{25 años} = 138															
ZONAS DE RESTRICCIONES DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TIEMPO DE TRÁNSITO</th> <th>AGUAS ARRIBA (So)</th> <th>AGUAS ABAJO (Su)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Día</td> <td>24</td> <td>21</td> </tr> <tr> <td>50 Días</td> <td>273</td> <td>92</td> </tr> <tr> <td>4 Años</td> <td>5433</td> <td>135</td> </tr> <tr> <td>25 Años</td> <td>33251</td> <td>138</td> </tr> </tbody> </table>				TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)	1 Día	24	21	50 Días	273	92	4 Años	5433	135	25 Años	33251	138
TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)																
1 Día	24	21																
50 Días	273	92																
4 Años	5433	135																
25 Años	33251	138																

Tabla 23: Desarrollo del cálculo, por el método de Wyssling, de las zonas de restricciones del perímetro de protección del sondeo de abastecimiento a Villacastín “Camino del Valle”, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

Datos de partida:																		
Caudal:	Q =	3 L/s =	0,003 m ³ /s															
Gradiente hidráulico:	i =	0,04																
Conductividad hidráulica:	K =	4E-06 m/s																
Espesor saturado:	b =	86 m																
Porosidad eficaz:	m_e =	0,2 % =	0,002															
Radio de llamada:																		
	X₀ = Q/(2·π·K·b·i) =		34,7 m															
Velocidad eficaz:																		
	V_e = K·i/m_e =		0,00008 m/s															
Ancho del frente de llamada:																		
	B = Q/K·b·i =		218 m															
Ancho del frente de llamada a la altura de la captación:																		
	B' = B/2 =		109 m															
Parámetro l:																		
	l_{1 día} =		6,9 m															
	l_{50 días} =		345,6 m															
	l_{4 años} =		10091,5 m															
	l_{25 años} =		63072,0 m															
Distancias So y Su:																		
	So = $\frac{+l + (l + 8 \cdot X_0)}{2}$																	
	Su = $\frac{-l + (l + 8 \cdot X_0)}{2}$																	
	So_{1 día} =	26	Su_{1 día} = 19															
	So_{50 días} =	405	Su_{50 días} = 59															
	So_{4 años} =	10160	Su_{4 años} = 68,9															
	So_{25 años} =	63141	Su_{25 años} = 69,3															
ZONAS DE RESTRICCIONES DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TIEMPO DE TRÁNSITO</th> <th>AGUAS ARRIBA (So)</th> <th>AGUAS ABAJO (Su)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Día</td> <td>26</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>50 Días</td> <td>405</td> <td>59</td> </tr> <tr> <td>4 Años</td> <td>10160</td> <td>69</td> </tr> <tr> <td>25 Años</td> <td>63141</td> <td>69</td> </tr> </tbody> </table>				TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)	1 Día	26	19	50 Días	405	59	4 Años	10160	69	25 Años	63141	69
TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)																
1 Día	26	19																
50 Días	405	59																
4 Años	10160	69																
25 Años	63141	69																

9.6.- Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme

El método asume un acuífero con flujo bidimensional uniforme, en medio poroso o asimilable. Al aplicarlo se efectúa previamente un análisis de las isopiezas y líneas de flujo para determinar la divisoria hidrogeológica y el trazado de las líneas de flujo hacia la captación, empleándose la ecuación de flujo uniforme (Todd, 1980) para completar la definición del área de contribución a la captación, concretamente su ancho en la divisoria hidrogeológica y su distancia aguas abajo en el sentido del flujo (Figura 21).

La expresión de la ecuación de flujo uniforme (USEPA, 1991 a) es:

$$-\frac{Y}{X} = \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q} Y\right)$$

Desde esta ecuación se obtienen dos ecuaciones (USEPA, 1991 a) para delimitar el área de contribución a la captación:

$$X_L = -\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}$$

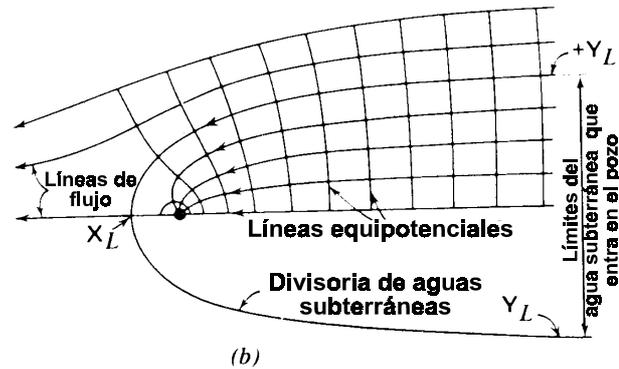
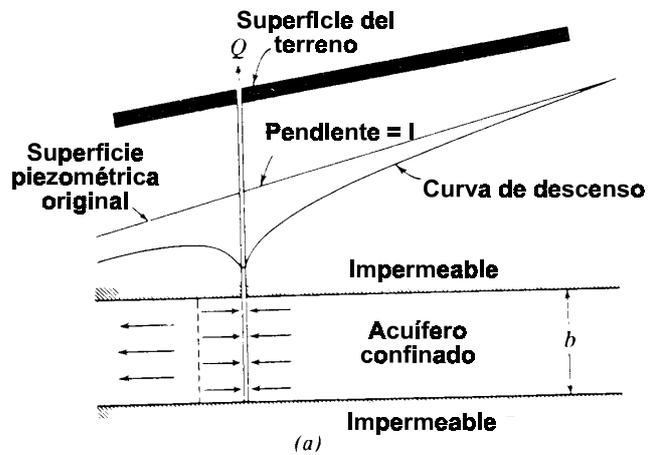
$$Y_L = \pm \frac{Q}{2 \cdot K \cdot b \cdot i}$$

Donde:

- Y: Anchura del perímetro de protección a la altura de la divisoria hidrogeológica paralela a las isopiezas existentes antes de bombear.
- X: Distancia al punto de gradiente nulo o de estancamiento (“*downgradient null point*”) aguas abajo de la captación, en el sentido del flujo perpendicular a las isopiezas previas al bombeo.
- K: Conductividad hidráulica
- b: Espesor saturado del acuífero
- i: Gradiente hidráulico sin bombeo
- Q: Caudal de bombeo
- X_L: Distancia desde la captación al punto de gradiente nulo o estancamiento previo al bombeo aguas abajo de la captación.
- Y_L: Distancia al límite lateral de la zona a proteger a la altura de la divisoria hidrogeológica desde su eje de simetría.

En este método no se considera el efecto de los límites hidrogeológicos (excepto la divisoria piezométrica), heterogeneidades del acuífero ni recarga no uniforme. Da lugar a

perímetros de protección muy grandes si el pozo está muy lejos de la divisoria piezométrica.



$$-\frac{Y}{X} = \tan\left(\frac{2\pi Kbi}{Q} Y\right)$$

ECUACIÓN DE FLUJO UNIFORME

$$X_L = -\frac{Q}{2\pi Kbi}$$

DISTANCIA DESDE LA CAPTACIÓN AL PUNTO DE GRADIENTE NULO O ESTANCAMIENTO

$$Y_L = \pm \frac{Q}{2Kbi}$$

DISTANCIA AL LÍMITE LATERAL DE LA ZONA A PROTEGER A LA ALTURA DE LA DIVISORIA HIDROGEOLÓGICA

LEYENDA

- Pozo de bombeo

Donde:

Q = Caudal de bombeo
K = Conductividad hidráulica
b = Espesor saturado del acuífero
i = Gradiente hidráulico
 $\pi = 3,1416$

Modificado de USEPA, 1991 a

Figura 21: Aplicación de la ecuación de flujo uniforme.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 24 y 25.

Tabla 24: Resultados obtenidos aplicando el método de análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

		Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario Detrítico				
		Parámetros	Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /s)		3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³
	i		0,025	0,011	0,02	0,04
	K (m/s)		3,7·10 ⁻⁶	3,8·10 ⁻⁶	4,2·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁶
	b (m)		93	90	82	86
Resultados de las Fórmulas	NO DEPENDE DEL TIEMPO DE TRÁNSITO. ES LA MISMA PARA 1 DÍA, 50 DÍAS, 4 AÑOS Y 25 AÑOS					
	X _L (m)		-56	-127	-69	-35
	Y _L (m)		+ 174	+ 399	+ 218	+ 109
			- 174	- 399	- 218	- 109

Tabla 25: Desarrollo del cálculo, por el método de flujo uniforme, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento a Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "SAN BARTOLOMÉ"</u>			
<u>Datos de partida:</u>			
Caudal:	Q = 3	L/s = 0,003	m ³ /s
Gradiente hidráulico:	i = 0,025		
Conductividad hidráulica:	K= 0,0000037	m/s	
Espesor saturado:	b = 93	m	
<u>Resultados:</u>			
$X_L = Q/(2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$	X_L = 56	m	
$Y_L = Q/(2 \cdot K \cdot b \cdot i) =$	Y_L = 174	m	
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "PUENTE ALZADO"</u>			
<u>Datos de partida:</u>			
Caudal:	Q = 3	L/s = 0,003	m ³ /s
Gradiente hidráulico:	i = 0,011		
Conductividad hidráulica:	K= 0,0000038	m/s	
Espesor saturado:	b = 90	m	
<u>Resultados:</u>			
$X_L = Q/(2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$	X_L = 127	m	
$Y_L = Q/(2 \cdot K \cdot b \cdot i) =$	Y_L = 399	m	
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "CAÑADA DEL ABAD"</u>			
<u>Datos de partida:</u>			
Caudal:	Q = 3	L/s = 0,003	m ³ /s
Gradiente hidráulico:	i = 0,02		
Conductividad hidráulica:	K= 0,0000042	m/s	
Espesor saturado:	b = 82	m	
<u>Resultados:</u>			
$X_L = Q/(2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$	X_L = 69	m	
$Y_L = Q/(2 \cdot K \cdot b \cdot i) =$	Y_L = 218	m	
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "CAMINO DEL VALLE"</u>			
<u>Datos de partida:</u>			
Caudal:	Q = 3	L/s = 0,003	m ³ /s
Gradiente hidráulico:	i = 0,04		
Conductividad hidráulica:	K= 0,000004	m/s	
Espesor saturado:	b = 86	m	
<u>Resultados:</u>			
$X_L = Q/(2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$	X_L = 35	m	
$Y_L = Q/(2 \cdot K \cdot b \cdot i) =$	Y_L = 109	m	

9.7.- Método de Jacobs y Bear

El método de Jacobs y Bear (Bear, 1979, en Lallemand-Barrès y Roux, 1989) requiere acuíferos homogéneos, isótropos y de extensión infinita, sometidos a un gradiente regional uniforme y un único pozo. Las líneas de corriente y las equipotenciales características se reflejan en la figura 22.

Las isocronas tienen por expresión, en función de variables *reducidas*:

$$t_R = \frac{X_R}{10} - \frac{l}{\pi} L_N \left(\cos \pi \frac{Y_R}{10} + \frac{X_R}{Y_R} \operatorname{sen} \pi \frac{Y_R}{10} \right)$$

Donde:

$$X_R = \frac{20 \cdot V \cdot b}{Q} x$$

$$Y_R = \frac{20 \cdot V \cdot b}{Q} y$$

$$t_R = \frac{2 \cdot T^2 \cdot i^2 \cdot t}{m_e \cdot Q \cdot b}$$

- V : Velocidad de Darcy
- Q : Caudal de bombeo ficticio continuo
- m_e : Porosidad eficaz
- b : Espesor saturado del acuífero
- T : Transmisividad
- i : Gradiente hidráulico
- Y_R, X_R, t_R : Variables *reducidas*
- t : Tiempo. Isocrona que se quiere calcular

Jacobs y Bear construyeron, a partir de esa fórmula, un ábaco consistente en una colección de curvas, correspondiendo cada una al tiempo de tránsito para el cual se han resuelto las ecuaciones, cuyo eje de simetría coincide con el del flujo de agua subterránea.

La resolución del método precisa conocer el valor de los siguientes parámetros hidráulicos:

- i : Gradiente hidráulico (adimensional). Obtenido a partir de las isopiezas conocidas
- Q : Caudal de bombeo ficticio continuo, las 24 horas del día (m^3/h)
- m_e : Porosidad eficaz (adimensional)
- T : Transmisividad (m^2/h)
- b : Espesor saturado del acuífero (m)
- t : Isocrona que se quiere calcular (horas)

Se calcula, en primer lugar, el *tiempo reducido* empleando la ecuación:

$$t_R = \frac{2 \cdot T^2 \cdot i^2 \cdot t}{m_e \cdot Q \cdot b}$$

Sobre el ábaco se busca la curva correspondiente al tiempo t_R y si no coincide con ninguna de las dibujadas se determina por interpolación entre las dos más próximas, obteniéndose los puntos donde se corta a los ejes de coordenadas (Figura 23).

Se calculan las coordenadas reales de los puntos mediante las fórmulas de transformación:

$$X(m) = \frac{Q}{20 \cdot T \cdot i} \cdot X_R$$

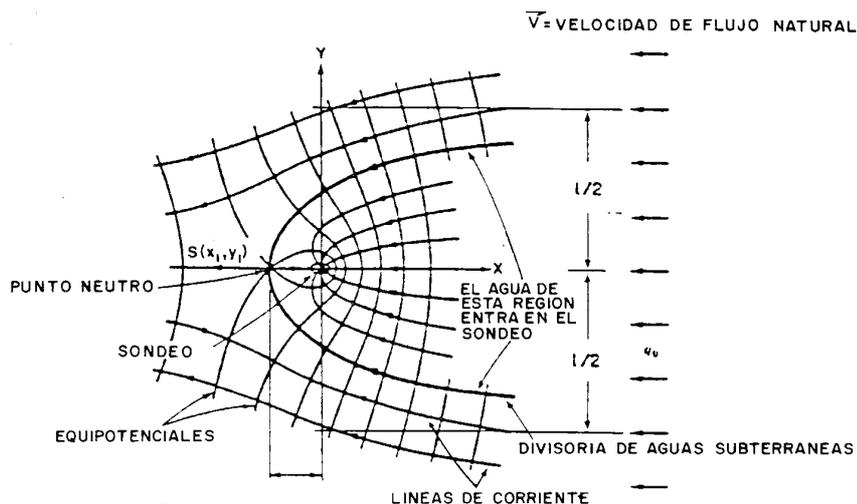
$$Y(m) = \frac{Q}{20 \cdot T \cdot i} \cdot Y_R$$

Donde:

X, Y : Distancia real en metros

X_R, Y_R : Distancia de las *variables reducidas* en *unidades gráficas* en el ábaco

Finalmente, sobre el plano de trabajo, se traza un eje paralelo a la dirección de flujo que pase por la captación, así como un eje perpendicular a este, trasladándose las distancias obtenidas y completándose el trazado de la curva a mano alzada.

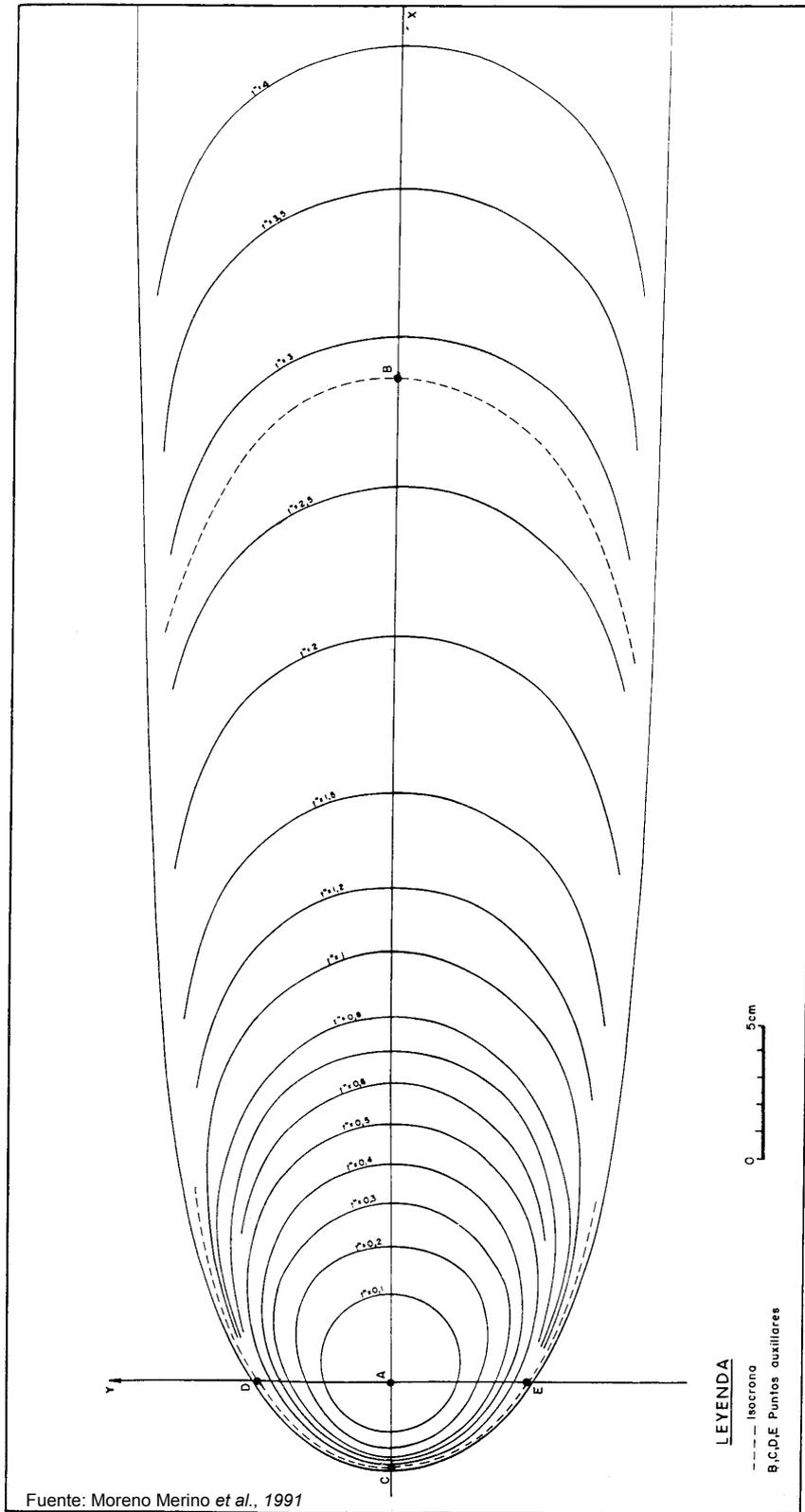


Modificado de Bear, 1979, en
Lallemand-Barrès y Roux, 1989

LÍNEAS DE CORRIENTE ENTORNO A LA CAPTACION

Figura 22: Aplicación del método de Jacobs y Bear. Líneas de corriente en el entorno de la captación.

En la Tabla 26 aparecen los valores utilizados para el método de Jacobs y Bear y los resultados obtenidos para los sondeos de abastecimiento a Villacastín.



EJEMPLO DE APLICACION DEL METODO DE JACOBS Y BEAR

Figura 23: Ejemplo de uso de ábacos del método de Jacobs y Bear.

Tabla 26: Datos empleados y resultados obtenidos aplicando el método de Jacobs y Bear a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

	Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q _{FIC} (m ³ /h) (**)	6,3	6,3	6,3	6,3
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	T (m ² /h)	1,25	1,25	1,25	1,25
	m _c	0,002	0,002	0,002	0,002
	b	93	90	82	86
Resultados de las Fórmulas	t _{R-1 día-24 horas}	0,040	8,0·10 ⁻³	0,029	0,11
	X _{R-1 día-AB} (u.g)	1,08	0,16	0,81	3,26
	X _{R-1 día-AC} (u.g)	0,65	0,09	0,46	1,84
	Y _{R-1 día-AD} (u.g)	0,79	0,12	0,59	2,4
	Y _{R-1 día-AE} (u.g)	0,79	0,12	0,59	2,4
	X _{1 día-AB} (m)	11	4	10	21
	X _{1 día-AC} (m)	7	2	6	12
	Y _{1 día-AD} (m)	8	3	7	15
	Y _{1 día-AE} (m)	8	3	7	15
	t _{R-50 días}	2,0	0,4	1,45	5,53
	X _{R-50 días-AB} (u.g)	27,39	7,82	21	65
	X _{R-50 días-AC} (u.g)	3,2	2,82	3,2	3,2
	Y _{R-50 días-AD} (u.g)	5	4,1	5	5
	Y _{R-50 días-AE} (u.g)	5	4,1	5	5
	X _{50- días-AB} (m)	276	179	265	410
	X _{50- días-AC} (m)	32	65	40	20
	Y _{50 días-AD} (m)	50	94	63	32
	Y _{50 días-AE} (m)	50	94	63	32
	t _{R-4 años}	58,4	11,6	42,3	161,6
	X _{R-4 años-AB} (u.g)	682	140	423	1778
	X _{R-4 años-AC} (u.g)	3,2	3,2	3,2	3,2
	Y _{R-4 años-AD} (u.g)	5	5	5	5
	Y _{R-4 años-AE} (u.g)	5	5	5	5
	X _{4 años-AB} (m)	6875	3207	5330	11201
	X _{4 años-AC} (m)	32	73	40	20
	Y _{4 años-AD} (m)	50	115	63	32
	Y _{4 años-AE} (m)	50	115	63	32
	t _{R-25 años}	365,0	73,0	264,9	1010,5
	X _{R-25 años-AB} (u.g)	4224	837	3018	11488
	X _{R-25 años-AC} (u.g)	3,2	3,2	3,2	3,2
	Y _{R-25 años-AD} (u.g)	5	5	5	5
	Y _{R-25 años-AE} (u.g)	5	5	5	5
	X _{25 años-AB} (m)	42578	19175	38027	72374
	X _{25 años-AC} (m)	32	73	40	20
	Y _{25 años-AD} (m)	50	115	63	32
	Y _{25 años-AE} (m)	50	115	63	32

(**) El caudal de bombeo es de 3 L/s 14 horas al día: El caudal ficticio de bombeo continuo las 24 horas es 6.3 m³/h.

9.8.- Método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte

En este método (USEPA, 1991 b) el tiempo de tránsito para que una partícula se mueva en la dirección del flujo desde un punto hasta la captación en la que se bombea se puede calcular mediante la siguiente ecuación (modificación de la propuesta por Bear y Jacob, 1965):

$$T_X = \frac{m_e}{K \cdot i} \left[X_L - \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q} \cdot X_L \right) \right]$$

Donde:

T_x : Tiempo de tránsito desde un punto X al pozo de bombeo

m_e : Porosidad eficaz

X_L : Distancia desde el pozo de bombeo hasta un punto X recorrida en un tiempo T_x . Esta distancia es positiva o negativa dependiendo de si el punto X está aguas arriba (valor positivo) o aguas abajo (valor negativo) del pozo de bombeo.

Q : Caudal de bombeo

K : Conductividad hidráulica

b : Espesor saturado del acuífero

i : Gradiente hidráulico

Esta ecuación, que es similar a la empleada por la *Southern Water Authority* (1985), permite el cálculo del tiempo de tránsito desde un punto determinado hasta el pozo de bombeo.

El método resuelve el cálculo de distancias para tiempos de tránsito determinados por el sistema de prueba y error (USEPA, 1991 b) por lo que es conveniente introducir la fórmula en una hoja de cálculo.

El método puede ser aplicado en acuíferos libres y confinados (USEPA, 1991 b), pero no se considera recarga vertical procedente de un acuitardo superior si el acuífero es confinado, por lo que, en el caso de existir esa recarga, el perímetro de protección definido por este método estaría sobredimensionado.

La proporción de la distancia para tiempo de tránsito aguas abajo respecto a la obtenida aguas arriba para el mismo tiempo de tránsito indica el grado de elongación que corresponderá al perímetro de protección. Si se aproximase a un círculo indicaría que la influencia del gradiente hidráulico regional en el tiempo de tránsito sería insignificante.

Al aplicar este método se obtienen los resultados que se indican en las tablas 27 y 28.

Tabla 27: Resultados obtenidos aplicando el método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

	Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /día)	151,2	151,2	151,2	151,2
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	K (m/día)	0,32	0,33	0,36	0,34
	m _e	0,002	0,002	0,002	0,002
	b (m)	93	90	82	86
	Resultados de las Fórmulas	T _{x-1 día}	1	1	1
X _{L-1 día (m)}		20	20	20	20
T _{x-50 días}		50	50	50	50
X _{L-50 días (m)}		272	182	260	400
T _{x-4 años}		1460	1460	1460	1460
X _{L-4 años (m)}		6010	2923	5455	10055
T _{x-25 años}		9125	9125	9125	9125
X _{L-25 años (m)}		36727	16962	33122	62215

$$Q_f = 10,8 \cdot \frac{14}{24} = 6,3 m^3 / h$$

(**) El caudal de bombeo es de 3 L/s 14 horas al día: El caudal ficticio de bombeo continuo las 24 horas:

Tabla 28: Desarrollo del cálculo, por el método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección correspondientes a un tiempo de tránsito de 25 años, de las captaciones de abastecimiento a Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 25 AÑOS EN EL SONDEO "SAN BARTOLOMÉ".</u>				
Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día		
Gradiente hidráulico:	i = 0,025			
Conductividad hidráulica:	K= 0,32	m/día		
Porosidad eficaz:	m_e= 0,002			
Espesor saturado:	b = 93	m		
X _L :	X_L= 36727	m		
<u>Resultados:</u>			1136,464757	7,035677633
T _x	T_x= 9125	días		
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 25 AÑOS EN EL SONDEO "PUENTE ALZADO".</u>				
<u>Datos de partida:</u>				
Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día		
Gradiente hidráulico:	i = 0,011			
Conductividad hidráulica:	K= 0,33	m/día		
Porosidad eficaz:	m_e= 0,002			
Espesor saturado:	b = 90	m		
X _L :	X_L= 16962	m		
<u>Resultados:</u>			231,27217	5,443595
T _x	T_x= 9125	días		
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 25 AÑOS EN EL SONDEO "CAÑADA DEL ABAD".</u>				
<u>Datos de partida:</u>				
Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día		
Gradiente hidráulico:	i = 0,02			
Conductividad hidráulica:	K= 0,36	m/día		
Porosidad eficaz:	m_e= 0,002			
Espesor saturado:	b = 82	m		
X _L :	X_L= 33122	m		
<u>Resultados:</u>			813,60253	6,70147
T _x	T_x= 9125	días		
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 25 AÑOS EN EL SONDEO "CAMINO DEL VALLE".</u>				
<u>Datos de partida:</u>				
Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día		
Gradiente hidráulico:	i = 0,04			
Conductividad hidráulica:	K= 0,34	m/día		
Porosidad eficaz:	m_e= 0,002			
Espesor saturado:	b = 86	m		
X _L :	X_L= 62215	m		
<u>Resultados:</u>			3024,76290	8,01459
T _x	T_x= 9125	días		

Para el cálculo correspondiente a los otros tiempos de tránsito, 1 día, 50 días y 1460 días (4 años), sólo es necesario tantear en esta hoja de cálculo Microsoft Excel el valor de X_L hasta obtener el T_x, al ser el resto de datos comunes. Los resultados se muestran en la Tabla 27.

9.9.- Método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira

El método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira (Bas Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001), desarrolla un procedimiento analítico para la delimitación de perímetros de protección para un tiempo de tránsito de 50 días.

Para optimizar los resultados obtenidos emplearon como referencia de máxima precisión los resultados derivados de la utilización del modelo matemático Visual MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic, 1995), en supuestos teóricos de gabinete, con diferentes rangos de los valores que se contemplan en dicho modelo, aplicándose el método propuesto a esos mismos valores.

Los rangos de variación usados para estas variables (Bas Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001) fueron:

Porosidad eficaz (m_e):	0,1-0,5
Conductividad hidráulica (K):	1-60 m/d
Gradiente hidráulico (i):	0-0,05
Caudal de bombeo (Q):	100-5000 m ³ /d
Espesor saturado del acuífero (b):	10-80 m

La Solución analítica del problema propuesto parte de una modificación de la fórmula de Bear y Jacob (1965). Ésta no se puede resolver más que mediante aproximación por series de Taylor, con un programa informático que invierte la función, el cual conduce a una función:

$$x = \sqrt{2 \cdot (y - \ln(1 + y))} \quad x = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}} \quad F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$$

Esta al ser invertida da valores aproximados de y mediante una función compleja, y comparando gráficamente los valores se determina el intervalo para el que la aproximación es válida, siendo éste de hasta $x= 5,5$ lo que es inaceptable para estimar la zona de tiempo de tránsito de 50 días, ya que utilizando Visual MODFLOW se llegó hasta valores de $x=18$ (Bas Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001).

Los autores proponen ajustar una línea a los resultados del modelo obtenidos a partir de los valores de m_e , K, i, Q y b ya que el objetivo es simular los valores ofrecidos por éste. De esta manera se deriva una *solución empírica*.

Esta indica una función entre valores de $-7 < x < 18$ ya que los valores superiores e inferiores dan errores.

Consideran preferible el considerar dos líneas de tendencia debido la complejidad de la ecuación que resultaría de una sola (6° orden). De éstas una será para la zona aguas abajo y la otra aguas arriba.

Distancia de protección aguas arriba:

Se puede obtener una tendencia polinómica que de manera simplificada pero suficientemente precisa (Bas Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001) es:

$$r = \frac{(0,00002x^5 - 0,0009x^4 + 0,15x^3 + 0,37x^2 + x)}{F}$$

Donde:

$$x = 2 \cdot K \cdot i \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}} \quad F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$$

Los errores cometidos se calculan tomando como *valor real* el obtenido mediante la utilización del programa Visual MODFLOW, y se obtienen valores no superiores a un 4% en el intervalo $0 < x < 18$, por lo que se considera que la fórmula obtenida es aceptable para el cálculo de la zona de protección aguas arriba.

Para evaluar los errores obtenidos, especialmente al utilizar valores elevados o muy bajos de los parámetros considerados, los autores efectuaron diversas pruebas (Bas Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001) obteniéndose los siguientes resultados:

- Gradiente hidráulico: Es previsible un descenso de la distancia calculada con una menor pendiente. Se puede llegar a un círculo perfecto cuando se aproxima a cero, que se puede calcular mediante el método del radio fijo.
- Caudal extraído: Se espera una disminución de la distancia con la disminución de caudal extraído, lo que se comprueba tanto con caudales muy altos o bajos.
- Conductividad hidráulica: Se espera un descenso del radio calculado al disminuir la K.
- Espesor saturado: Con la disminución del espesor del acuífero se puede esperar un incremento del radio calculado.
- Porosidad eficaz: Mediante una disminución de la porosidad efectiva se producirá un aumento de la distancia. Se observa para todo el rango de porosidades.

Los autores concluyen que no existen limitaciones en los rangos de utilización de los parámetros y dado que esta ecuación se ha desarrollado para valores entre $0 < x < 18$ se desaconseja su uso fuera de este rango.

Distancia de protección aguas abajo.

Si existe un gradiente la zona de protección de 50 días tiene forma elipsoidal.

Si se usa la ecuación obtenida anteriormente con x negativo se producen grandes errores. Se realiza una aproximación similar a la realizada en el caso anterior con los valores obtenidos empleando el programa Visual MODFLOW en el intervalo $0 > x > -3,5$ dentro del que se sigue una tendencia que se pierde después y se producen mayores errores.

Para alcanzar una función se hace un gráfico $F \cdot r/x$ en el intervalo y del cual se extrae una línea de tendencia que de manera simplificada viene dada (Bas Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001) por la ecuación:

$$r = (0,042x^3 + 0,37x^2 + 1,04x) / F$$

El porcentaje de error, al igual que en el caso anterior, resulta ser de menos de un 4%.

Se desaconseja el uso de esta ecuación para valores fuera del rango $-3.5 < x < 0$.

Los autores efectúan como en el caso anterior una evaluación de los errores obtenidos en función del rango de valores empleados y concluyen que el valor de la porosidad eficaz debe ser mayor de 0.1, produciéndose anomalías para valores inferiores, y que no existen límites superiores o inferiores para los parámetros i , Q , k y b .

Distancia de protección perpendicular a la dirección de flujo

Esta es la anchura de la elipse de protección, *radio perpendicular*, que se encuentra entre los valores de r_{max} y r_{min} . A menor gradiente la elipse será más circular.

Debido a que ésta es perpendicular al gradiente se puede utilizar la ecuación del *radio fijo calculado* para 50 días:

$$r = 4 \sqrt{\frac{Q}{m_e \cdot b}}$$

Esta calcula el máximo valor de r_p por lo que siempre sobreprotegerá la zona. Los mayores errores se producen debido a la introducción de gradientes hidráulicos elevados.

Si la distancia aguas arriba no es cuatro veces mayor que aguas abajo el error será menor del 15%, lo que es aún aceptable, en el resto de casos se aplicará únicamente una sobreprotección (Bas Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001).

Ajuste final del área de protección

La desprotección que se produce aguas arriba viene dada por no ser la zona *real* de protección para 50 días una elipse exacta, su anchura máxima no está en el centro de la elipse. Esto se puede corregir modificándola y haciéndola más redondeada en la zona aguas arriba, dibujando para ello un círculo con el radio conocido en el borde de esta zona, lo que mejora la precisión, especialmente para valores de gradiente hidráulico elevados (Bas Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001).

Los resultados obtenidos al aplicar este método se indican en las tablas 29, 30 y 31.

Tabla 29: Resultados obtenidos aplicando el Método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

	Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario Detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /día)	151,2	151,2	151,2	151,2
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	K (m/día)	0,32	0,33	0,36	0,34
	m _e	0,002	0,002	0,002	0,002
	b	93	90	82	86
Resultados de las Fórmulas	X _{50 días}	3,51	1,56	2,971	5,748
	F _{50 días}	0,03	0,01	0,024	0,04
	R _{Aguas arriba-50 días (m)}	469	225	412	939
	R _{Aguas abajo50 días (m)}	325	199	304	539
	R _{Perpendicular al flujo-50 días (m)}	114	116	121	119
NO APLICABLE PARA TIEMPOS DE TRÁNSITO DE 1 DÍA, 4 AÑOS Y 25 AÑOS					

Tabla 30: Desarrollo del cálculo, por el método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección de los sondeos de abastecimiento a Villacastín “San Bartolomé” y “Puente Alzado” en el acuífero del terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO "SAN BARTOLOMÉ"

Datos de partida:

Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día
Gradiente hidráulico:	i = 0,025	
Conductividad hidráulica:	K= 0,32	m/día
Porosidad eficaz:	m _e = 0,002	
Espesor saturado:	b = 93	m
Tiempo:	t = 50	días

Resultados:

$X = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}}$	X= 3,51667	48308
$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$	F = 0,03092	

Perímetro de protección:

R AGUAS ARRIBA	R_{ARRIBA} = 469	
R AGUAS ABAJO	R_{ABAJO} = 325	
R PERPENDICULAR AL FLUJO	R_{PERP} = 114	812,9

APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO PUENTE ALZADO

Datos de partida:

Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día
Gradiente hidráulico:	i = 0,011	
Conductividad hidráulica:	K= 0,33	m/día
Porosidad eficaz:	m _e = 0,002	
Espesor saturado:	b = 90	m
Tiempo:	t = 50	días

Resultados:

$X = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}}$	X= 1,56974	46750
$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$	F = 0,01358	

Perímetro de protección:

R AGUAS ARRIBA	R_{ARRIBA} = 225	
R AGUAS ABAJO	R_{ABAJO} = 199	
R PERPENDICULAR AL FLUJO	R_{PERP} = 116	840

RANGOS DE VALIDEZ (BAS KRIJGSMAN Y LOBO FERREIRA, 2001):		
R AGUAS ARRIBA:	0 < X < 18	
R AGUAS ABAJO	-3.5 < X < 0	m _e > 0.1 (10%)
R PERPENDICULAR AL FLUJO	R AGUAS ARRIBA < 4 x R AGUAS ABAJO (Error <15%)	

Tabla 31: Desarrollo del cálculo, por el método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección de los sondeos de abastecimiento a Villacastín “Cañada del Abad” y “Camino del Valle” en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO CAÑADA DEL ABAD (172020003):

Datos de partida:	Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día
	Gradiente hidráulico:	i = 0,02	
	Conductividad hidráulica:	K= 0,36	m/día
	Porosidad eficaz:	m _e = 0,002	
	Espesor saturado:	b = 82	m
	Tiempo:	t = 50	días

Resultados:	$X = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}}$	X= 2,97193	42594,44
	$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$	F = 0,02453	

<u>Perímetro de protección:</u>	R AGUAS ARRIBA	RARRIBA/ 412	921,9512
	R AGUAS ABAJO	RABAJO 304	
	R PERPENDICULAR AL FLUJO	RPERP : 121	

APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO CAMINO DEL VALLE

Datos de partida:	Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día
	Gradiente hidráulico:	i = 0,04	
	Conductividad hidráulica:	K= 0,34	m/día
	Porosidad eficaz:	m _e = 0,002	
	Espesor saturado:	b = 86	m
	Tiempo:	t = 50	días

Resultados:	$X = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}}$	X= 5,74894	44672,22
	$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$	F = 0,0486	

<u>Perímetro de protección:</u>	R AGUAS ARRIBA	RARRIBA/ 939	879,0698
	R AGUAS ABAJO	RABAJO 539	
	R PERPENDICULAR AL FLUJO	RPERP : 119	

RANGOS DE VALIDEZ (BAS KRIJGSMAN Y LOBO FERREIRA, 2001)		
R AGUAS ARRIBA:	0 < X < 18	
R AGUAS ABAJO	-3.5 < X < 0	m _e > 0.1 (10%)
R PERPENDICULAR AL FLUJO	R AGUAS ARRIBA < 4 x R AGUAS ABAJO (Error < 15%)	

9.10.- Método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales

Rehse propone un método empírico para cuantificar el poder depurador de los materiales en la zona no saturada y en la zona saturada, ante los efluentes contaminantes que pudieran atravesarlos.

Para su cálculo (Rehse, 1977 en Lallemand-Barrès y Roux, 1989) se apoya en varias tablas que relacionan el tipo de material y su poder depurador tanto en la zona saturada como en la no saturada.

El poder depurador (Lallemand-Barrès y Roux, 1989) vendrá dado por:

$$M_X = M_A + M_R$$

Donde:

M_X : Poder depurador sobre la totalidad del transporte

M_R : Poder depurador en el trayecto vertical (zona no saturada).

M_A : Poder depurador en el trayecto horizontal (zona saturada).

La depuración es completa cuando: M_X sea mayor o igual a 1.

- La depuración en la zona no saturada:

$$M_R = \sum_{i=n}^{i=1} h_i \cdot Ir_i$$

Donde:

h_i = Espesor vertical de los materiales en la zona no saturada

Ir_i = Índices de depuración para esos materiales en la zona no saturada (Tabla 32)

Cuando $M_R \geq 1$ la depuración en la zona no saturada es completa y según Rehse no sería necesario determinar ningún perímetro de protección.

Cuando $M_R < 1$ la depuración no es completa y el agua contaminada alcanzaría la zona saturada.

Tabla 32: Poder depurador del suelo en el recubrimiento (Suelo y zona no saturada).

M	Descripción del material	H (m)	$I_R = 1/H$
1	Humus, 5-10 % humus, 5-10% arcilla	1,2	0,8
2	Arcilla sin grietas de desecación, limo-arcilloso. Arena muy arcillosa	2	0,5
3	Limo arcilloso a limo	2,5	0,4
4	Limo, arena poco limosa, arena limosa	3-4,5	0,33-0,22
5	Arena fina a media	6	0,17
6	Arena media a gruesa	10	0,1
7	Arena gruesa	15	0,07
8	Grava con abundante matriz arenosa y limo arcillosa	8	0,13
9	Grava con abundante matriz arenosa y escasamente limosa	12	0,08
10	Grava fina a media, rica en arena	25	0,04
11	Grava media a gruesa con poca arena	35	0,03
12	Gravas, guijarros	50	0,02

M = Número de clasificación granulométrica

Arena: Diámetro de grano 2 – 0,063 mm

H = Espesor de la capa necesario para la depuración

Limo: Diámetro de grano 0,063 – 0,005 mm

I_R = Índice de depuración en la zona no saturada

Arcilla: Diámetro de grano < 0,005 mm

Modificado de Rehse, 1977.

- La depuración en la zona saturada:

Si $M_X = 1$, es decir existe una depuración completa antes de que el agua llegue a la captación, entonces el poder depurador de la zona saturada será:

$$M_A = 1 - M_R$$

La distancia L que como mínimo es necesario recorrer para alcanzar una depuración total, será:

$$L = \frac{M_A}{I_A}$$

Donde:

I_A : Índice de depuración de la zona saturada correspondiente al material acuífero (Tabla 33)

L = Longitud atravesada de la zona saturada.

Tabla 33: Poder depurador del suelo en la zona saturada.

M	Descripción del material	L (m)	$I_A = 1/L$
9	Grava con abundante matriz arenosa y escasamente limosa	a) 100	0,01
		b) 150	0,007
		c) 170	0,006
		d) 200	0,005
10	Grava fina a media, rica en arena	a) 150	0,07
		b) 200	0,005
		c) 220	0,0045
		d) 250	0,004
11	Grava media a gruesa con poca arena	a) 200	0,05
		b) 250	0,004
		c) 270	0,0037
		d) 300	0,0033
12	Gravas, guijarros	a) 300	0,0033
		b) 340	0,0029
		c) 360	0,0058
		d) 400	0,0025

L = Distancia horizontal necesaria para la depuración (m)

- a) Velocidad eficaz < 3 m/día
- b) Velocidad eficaz comprendida entre 3 y 20 m/día
- c) Velocidad eficaz comprendida entre 20 y 50 m/día
- d) Velocidad eficaz > 50 m/día

I_A = Índice de depuración en el acuífero

Modificado de Rehse, 1977.

Al aplicar este método al sondeo San Bartolomé, como ejemplo para ilustrar el desarrollo que se sigue en su utilización, se obtienen los siguientes resultados:

1.- Depuración en la zona no saturada (se emplea la Tabla 32).

$$M_R = \sum_{i=n}^{i=1} h_i \cdot I r_i$$

$h = 3,2$ m (Espesor vertical de materiales en la zona no saturada en el sondeo).

I_R = Los materiales del acuífero detrítico del Terciario (arenas y gravas en una matriz arcillo-limo-arenosa) corresponderían al material que Rehse define como “M-9: Grava con abundante matriz arenosa y escasamente limosa” al cual le corresponde un valor del índice $I_R = 0,08$ (Tabla 32).

$$M_R = 3,2 \cdot 0,08 = 0,25$$

2.- Depuración en la zona saturada (se emplea la Tabla 33)

$$M_A = 1 - M_R = 1 - 0,25 = 0,75$$

En este caso, el valor del índice I_A es de 0,007 ya que los materiales que Rehse define como “M-9: Grava con abundante matriz arenosa y escasamente limosa” son los que más se asemejan a los correspondientes al acuífero detrítico del Terciario, que tienen además una velocidad eficaz de: $V_e = 4,0$ m/día (por tanto comprendida entre 3 y 20).

Por tanto la distancia L , que como mínimo es necesario recorrer para alcanzar una depuración total es:

$$L = \frac{M_A}{I_A} = \frac{0,75}{0,007} = 107 \text{ m}$$

El perímetro de protección para esta captación se define por tanto como un círculo con centro en la captación y radio de 100 metros. Los resultados obtenidos al aplicar este método se indican en la Tabla 34.

Tabla 34: Resultados obtenidos aplicando el método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario Detrítico				
	Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)	
Datos de Partida	h (m)	3,2	0,1	14,5	10
	K (m/día)	0,32	0,33	0,36	0,34
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	m_e	0,002	0,002	0,002	0,002
	V_e (m/día)	4,0	1,81	3,6	6,8
Resultados de las Fórmulas	I_R Tablas	0,08	0,08	0,08	0,08
	M_R	0,25	0,008	1,16 Depuración completa	0,8
	M_A	0,75	0,99	---	0,2
	I_A Tablas	0,007	0,01	---	0,007
	L (m)	107	99	0	29

9.11.- Modelos matemáticos. Aplicación de los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH

El programa MODFLOW es un modelo tridimensional de aguas subterráneas de diferencias finitas desarrollado por Michael McDonald y Arlen Harbaugh (United States Geological Survey, USGS) que apareció por primera vez en 1983, publicándose su documentación final en 1988 (McDonald y Harbaugh, 1988), y ha sido modificado numerosas veces. El programa ha sido diseñado (USGS, 1997) para simular sistemas acuíferos en los cuales se cumple:

- El flujo se produce en la zona saturada
- Se puede aplicar la Ley de Darcy. Medio poroso.
- La densidad y temperatura del agua subterránea son constantes
- Las direcciones principales de conductividad hidráulica horizontal o transmisividad no varían dentro del sistema.

MODFLOW no resuelve flujo dependiente de la densidad (por ejemplo intrusión de agua salada), ni medio fracturado (a menos que se asuma medio poroso equivalente).

En los sistemas acuíferos que cumplen estas condiciones, MODFLOW permite simular flujo en régimen permanente y transitorio en acuíferos libres o confinados, unidades confinantes, contemplando una gran variedad de rasgos y procesos como embalses, ríos, arroyos estacionales, drenajes, fuentes, pozos, evapotranspiración, recarga procedente de precipitación y de retornos de riego, fallas y otras barreras. Permite al menos cuatro métodos de solución para resolver las ecuaciones de diferencias finitas empleadas.

Utiliza el método de diferencias finitas, que divide la zona a modelar en bloques rectangulares (celdas) mediante un mallado, organizándose estas por filas, columnas y capas.

Para cada celda hay que especificar las propiedades del acuífero. Además se introduce la información sobre pozos, ríos y los demás rasgos de flujo de entrada o de salida al sistema que se considere.

MODFLOW resuelve las ecuaciones que definen el flujo en el acuífero modelado y proporciona como salidas el nivel del agua en cada celda en diferentes pasos de tiempo.

El error cometido se evalúa comparando los niveles simulados con los niveles medidos en campo lo que permite calibrar el modelo.

Su módulo “*Zone Budget*” proporciona además un balance de entradas y salidas al acuífero, así como el flujo para cada celda.

El programa MODPATH, fue desarrollado por David Pollock (USGS) en 1990, saliendo su última versión (v 3.0) en 1994 (Pollock, 1994). Es un modelo que utiliza los resultados de la simulación obtenidos con MODFLOW y simula la componente de advección del transporte de solutos.

Este programa permite calcular y dibujar el recorrido de partículas aisladas, tiempos de tránsito en el sentido de flujo o aguas arriba, zonas de captura de contaminantes y perímetros de protección, para lo cual se rodea el pozo de bombeo con partículas y se simula el recorrido de estas aguas arriba para diferentes pasos de tiempo, para régimen estacionario y transitorio.

A partir de los programas MODFLOW y MODPATH se han elaborado diferentes

programas que facilitan el pre-proceso y post-proceso de los datos como Processing Modflow y Pmpath (Wen-Hsing y Kinzelbach, 1988) y Visual MODFLOW y Visual MODPATH creados por Nilson Guiguer, y Thomas Franz (Waterloo Hydrogeologic, 1995).

En la simulación de los perímetros de protección de los cuatro sondeos de abastecimiento de Villacastín que captan el acuífero detrítico del Terciario se emplearán los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH.

Se empleará además el módulo “*Zone Budget*” del programa Visual MODFLOW como herramienta para definir la protección de la cantidad.

En los Anexos 1 y 2 se detallan los datos empleados como entradas al modelo, las calibraciones realizadas y las diferentes simulaciones efectuadas, exponiéndose a continuación, de una manera muy resumida, en qué ha consistido la simulación y los resultados obtenidos.

Se han considerado los siguientes límites para la zona a modelar:

- Límite sur: El contacto con los materiales graníticos (límite impermeable), definido mediante la cartografía hidrogeológica (Mapa 1).
- Límites este y oeste: Los definen las divisorias hidrogeológicas obtenidas en base al análisis de la piezometría (Mapa 1).
- Límite norte: Es el límite de la zona estudiada con el resto del acuífero del Terciario detrítico.

En el modelo se han considerado dos capas en los materiales detríticos del Terciario y Cuaternario. La primera capa corresponde a un acuífero libre cuyo muro está a cota 935 metros y su techo en la superficie del terreno. Su potencia en el área donde se ubican las 4 captaciones de abastecimiento es de 100 metros. La segunda capa, de 300 metros de potencia, corresponde a un acuífero confinado en los mismos materiales.

El establecer dos capas en el modelo permite simular ríos o drenes que afecten solo a la primera capa (en lugar de a los 400 metros de potencia del acuífero) y poder considerar que los bombeos afectan solo a los niveles más someros del acuífero, es decir a cota superior a 935 metros, como ocurre en la realidad en todas las captaciones del área modelada.

Se ha establecido una malla cuadrada con celdas de 500 metros de longitud que ha sido georeferenciada (coordenadas UTM) empleándose como base el mapa topográfico a escala 1:50.000 de dicha zona (Servicio Geográfico del Ejército, 1998).

El modelo requiere asignar a cada celda valor de diferentes parámetros, obtenidos en base al análisis efectuado en el capítulo 7.5. Estos son: Conductividad hidráulica en tres direcciones del espacio (K_x , K_y , K_z), porosidad eficaz, porosidad total, coeficiente de almacenamiento en acuífero libre (S_y), coeficiente de almacenamiento en acuífero confinado (S_s), si bien el modelo asigna en cada momento a cada capa el valor que le corresponde (S_s o S_y) dependiendo de la situación del nivel piezométrico.

El modelo requiere además introducir los valores de las condiciones de contorno.

En los materiales detríticos del norte de Villacastín se han considerado la recarga por infiltración de la precipitación (que se efectúa sólo en la capa superior), celdas de nivel constante, en las cuales el nivel piezométrico no varía en la simulación (para lo cual el modelo les asigna un valor de almacenamiento infinito, aunque físicamente el almacenamiento no puede ser mayor que 1), y celdas con drenes.

Las celdas de nivel constante se emplean exclusivamente en el límite norte de la zona estudiada con el resto del acuífero del Terciario detrítico, en las dos capas del modelo, para que no se produzcan cambios en las líneas de flujo de esta zona, simulando que el flujo continúa hacia el resto del acuífero del Terciario detrítico

Para simular los arroyos que surcan el área modelada se ha considerado más adecuado a su escasa entidad y tipo de funcionamiento considerarlos como drenes. En estos si el nivel piezométrico es superior a la cota del dren el agua se evacua del modelo (desaparece) y si el nivel piezométrico es inferior a la cota del dren no actúa.

Se procede entonces a ejecutar el modelo en régimen permanente sin bombeos.

El modelo genera valores de piezometría que son comparados con los niveles de piezometría reales medidos en campo. Para facilitar esta labor el programa considera la posibilidad de definir puntos de observación lo que permite emplear, además de la valoración cualitativa efectuada directamente por el modelador, las herramientas estadísticas que incorpora el programa para evaluar la calibración obtenida.

Este proceso se ha repetido modificando, donde era necesario y asumible en base a los datos hidrogeológicos disponibles, los valores iniciales de entrada hasta concluir la calibración, es decir hasta obtener una diferencia entre los valores reales medidos y los simulados considerada aceptable.

Una vez concluida la calibración en régimen permanente se ha procedido a simular dos hipótesis. En primer lugar simular en régimen permanente los niveles obtenidos con un bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento en el acuífero del terciario detrítico. Una segunda hipótesis que contempla además de esos bombeos el existente en otras dos captaciones del acuífero (sondeos 172020006 y 172010003) también de un modo continuo, en régimen permanente.

Por último, partiendo de los resultados de la simulación obtenidos con Visual MODFLOW con las dos opciones de bombeos antes indicados en régimen permanente, se ha utilizado el programa Visual MODPATH para simular el área de procedencia de las partículas que alcanzarían las captaciones en diferentes tiempos de tránsito.

Para ello se rodea cada captación de abastecimiento con partículas, empleándose en la simulación efectuada un círculo de 100 metros de radio, y se simula el recorrido de esta agua arriba para los tiempos de tránsito de 50 días, 4 años y 25 años.

El empleo de las dos hipótesis indicadas permite evaluar la repercusión que tiene, en el tamaño y forma de las zonas de alimentación de las captaciones de abastecimiento urbano a Villacastín, que existan o no bombeos en esos dos sondeos, destinados a abastecer una granja (172020006), así como a un restaurante y dos gasolineras (172010003), proporcionando así una información adicional para delimitar los perímetros de protección.

En las figuras 24, 25 y 26 se muestran los resultados proporcionados por la simulación efectuada empleando el modelo para las zonas de alimentación de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín, para diferentes tiempos de tránsito, que permiten definir el perímetro de protección correspondiente a cada captación, considerando la opción seleccionada. Ésta ha sido la más conservadora o protectora, es decir, un bombeo continuo en las cuatro captaciones de abastecimiento urbano y considerar que continuará el bombeo indefinidamente en los otros dos sondeos antes indicados.

En el anexo 2 se refleja por su parte las zonas de alimentación que se obtendrían, considerando solamente el bombeo en la cuatro captaciones de abastecimiento, para los tiempos de tránsito indicados.

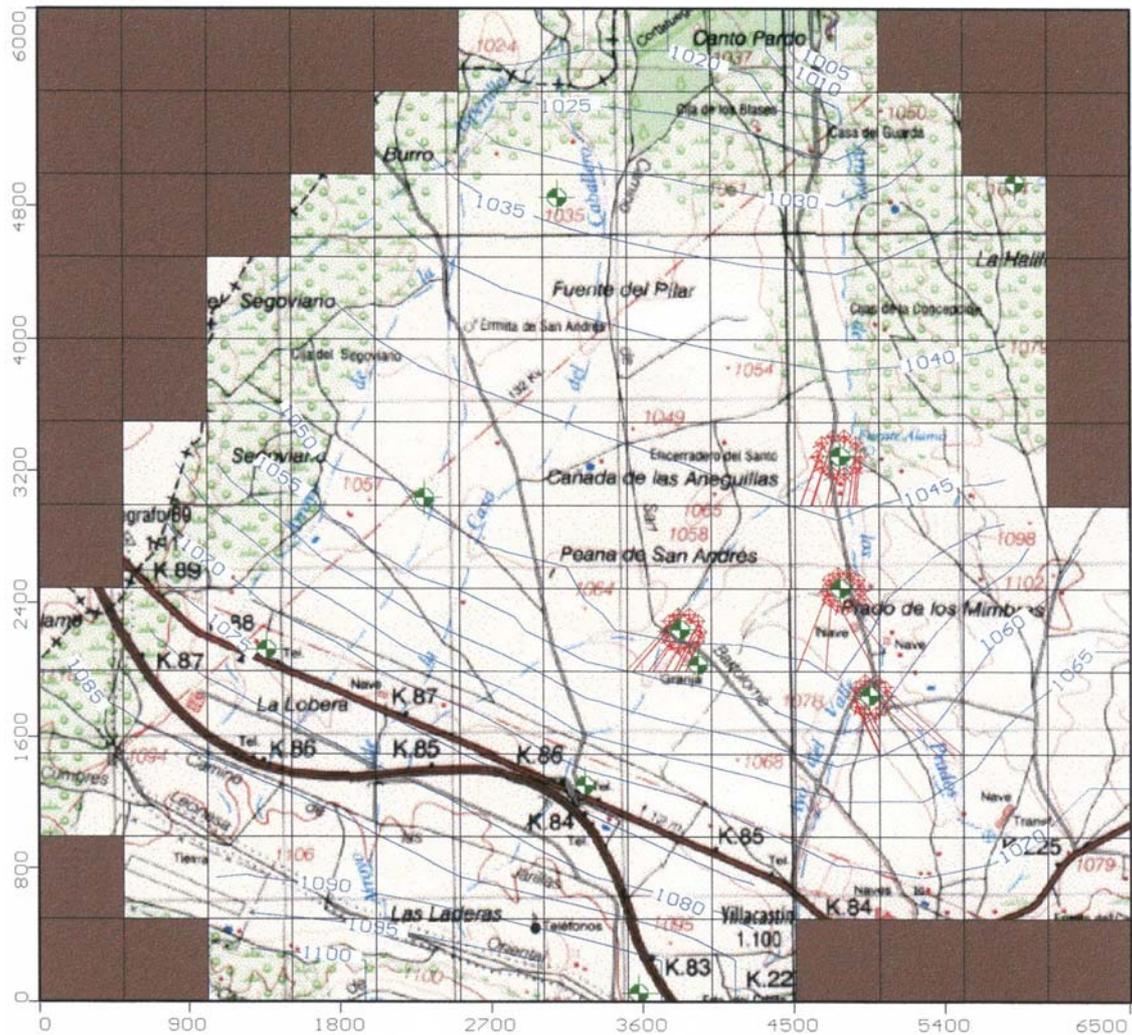


Figura 24: Zonas de alimentación para un tiempo de tránsito de 50 días, con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente, que definen la zona del perímetro de protección correspondiente a ese tiempo.

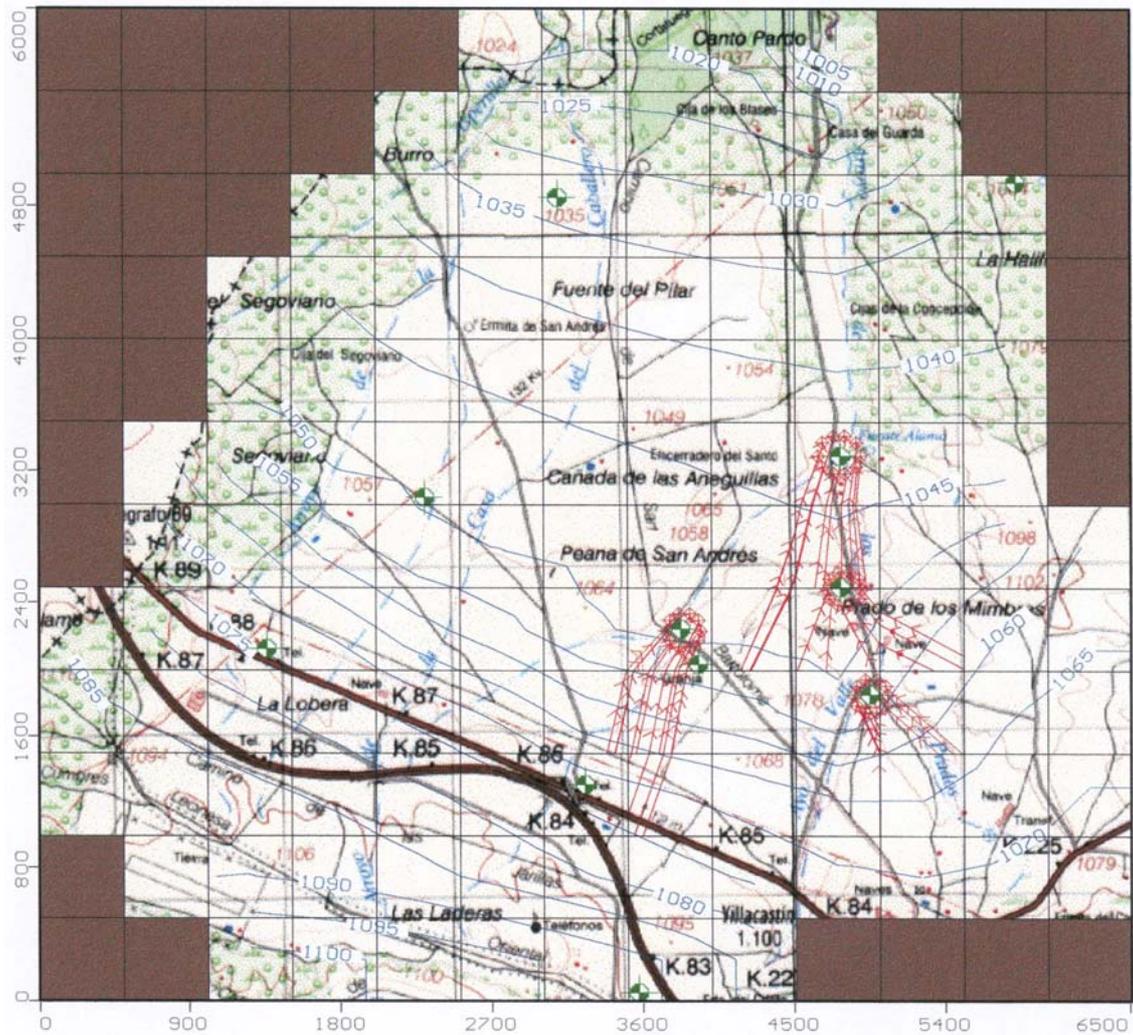


Figura 25: Zonas de alimentación para un tiempo de tránsito de 4 años con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente, que definen la zona del perímetro de protección correspondiente a ese tiempo.

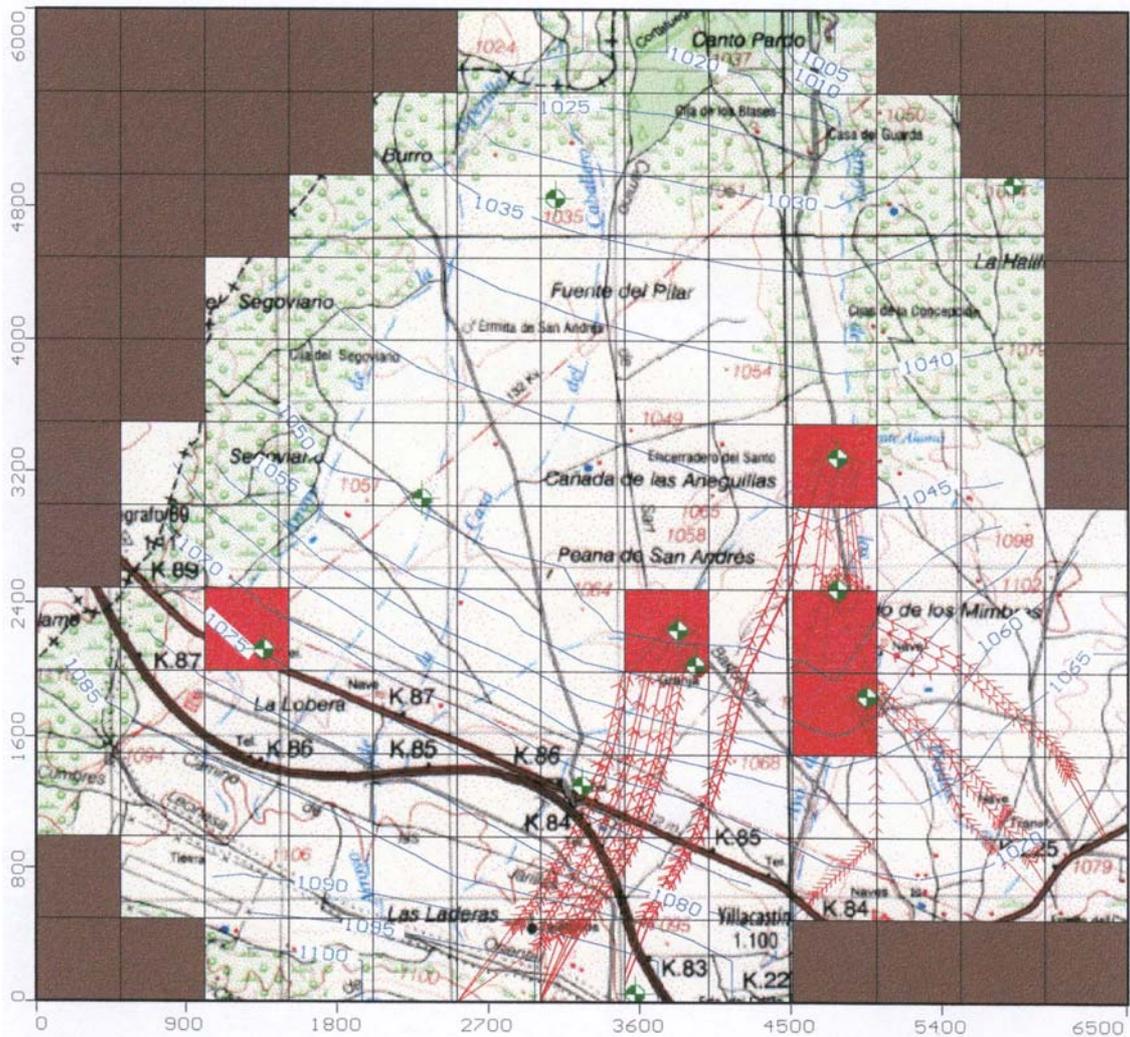


Figura 26: Zonas de alimentación para un tiempo de tránsito de 25 años con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente, que definen la zona del perímetro de protección correspondiente a ese tiempo.

10. COMPARACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD OBTENIDOS APLICANDO DIFERENTES MÉTODOS

Para evaluar la exactitud obtenida al emplear diversos métodos, cuyas principales características se sintetizan en la tabla 35, al delimitar las zonas de los perímetros de protección de la calidad de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, cuyo desarrollo y resultados se detallaron en el capítulo 9 de esta Tesis Doctoral, se compararán los resultados obtenidos en cada método con los proporcionados por la simulación efectuada mediante un modelo matemático.

La utilización de modelos matemáticos (modelos numéricos), cuando se dispone de información adecuada para su ejecución y calibrado, permite considerar flujo tridimensional, distribución espacial de los parámetros hidráulicos, heterogeneidades del acuífero, influencia de ríos o drenes y efecto de los bombeos, entre otros factores, por lo que proporcionan resultados que se ajustan más a la realidad que los obtenidos al aplicar otros métodos. Así en los métodos analíticos es necesario efectuar una gran simplificación de las características hidrogeológicas del acuífero, y de las condiciones de explotación, siendo necesario introducir condiciones muy estrictas (pozos totalmente penetrantes, acuíferos de extensión infinita...) que pueden alejarse sensiblemente de la realidad, como ha sido indicado en capítulos precedentes.

Al aplicar métodos hidrogeológicos como único criterio de delimitación se obtiene un perímetro único, que corresponde a todo el área de alimentación posible de la captación, bidimensionalmente, lo que da lugar a perímetros innecesariamente extensos, no siendo posible subdividirlos en zonas en las que aplicar diferentes grados de restricciones.

Estas ventajas han hecho que los modelos matemáticos sean cada vez más utilizados como método estándar para definirlos, como se analizó en el capítulo 6 respecto a los estudios sobre perímetros de protección efectuados en el reino Unido, Dinamarca, Estados Unidos y otros países.

En esta Tesis Doctoral la comparación se realiza tomando como referencia los resultados de las simulaciones efectuadas para delimitar los perímetros de protección de la calidad, de las captaciones de abastecimiento de Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, detalladas en el capítulo 9.11, empleando los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH (Waterloo Hydrogeologic, 1995).

El conocer la exactitud es importante para poder preseleccionar los métodos más adecuados a las condiciones de las captaciones analizadas, especialmente cuando no sea posible emplear en modelo matemático, que será la opción preferente.

La comparación de los resultados de los diferentes métodos se realiza empleando como elemento aglutinador el tiempo de tránsito, al ser el criterio más utilizado para delimitar perímetros de protección en materiales porosos o asimilables en su funcionamiento a los mismos. Ésta se efectúa de modo independiente para los tiempos de tránsito de 1 día, 50 días, 4 años y 25 años, habitualmente empleados para definir las zonas en que se subdividen los perímetros cuando se emplea este criterio.

En el análisis correspondiente a cada tiempo de tránsito se incluyen también los resultados obtenidos aplicando métodos que emplean otros criterios alternativos, como el poder autodepurador del terreno o hidrogeológicos.

La inclusión de métodos que no emplean el tiempo de tránsito como criterio, ni este influye

al obtener las distancias que definen las zonas, y proporcionan un perímetro único, sin subdividir, se realiza para disponer de una referencia de la extensión de los perímetros aplicando otros criterios alternativos, que pueden también emplearse para delimitar la zona en que imponer restricciones a diferentes actividades, si bien lógicamente esa área será siempre la misma en esos métodos que no dependen del tiempo.

Cabe recordar además que en España debe seleccionarse en cada estudio cuantas zonas hay que establecer en el perímetro de protección, con qué criterio, y en su caso, que tiempos de tránsito emplear (como se analizó en los capítulos 5 y 8 de esta Tesis Doctoral), por lo que un planteamiento amplio de la comparación entre métodos, como el efectuado, proporciona una herramienta útil para su aplicación según los criterios de los técnicos encargados de delimitar los perímetros de protección de cada captación.

TABLA 35: PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS EMPLEADOS PARA DELIMITAR LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD EN LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO DE VILLACASTÍN EN EL ACUÍFERO DEL TERCIARIO DETRÍTICO.

Nombre del método (Capítulo en el que se analiza)	Tipo de acuífero	Limitaciones	Datos necesarios										Metodología	Definición del área de protección		
			Q	i	K	b	m _e	S	N	T	V _e	Otros datos				
Métodos hidrogeológicos (9.1)	P K F	Proporciona un área única para el perímetro de protección. Esta no depende del tiempo de tránsito.												Límites acuífero captado. Cartografía hidrogeológica del acuífero. Isopiezas y dirección del flujo. Relación río acuífero	Análisis hidrogeológico del acuífero captado	Área de alimentación de la captación
Análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito (9.2)	P	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable. Pozo con alta capacidad de bombeo		i	K		m _e						V _e	Isopiezas y dirección de flujo. Divisorias hidrogeológicas	Delimita el área de alimentación mediante el análisis de isopiezas y divisorias hidrogeológicas. Se obtiene la distancia aguas arriba para diferentes tiempos de tránsito a medir como un radio dentro del área de alimentación	Radio que define la zona del área de alimentación correspondiente a diferentes tiempos de tránsito
Radio Fijo calculado. Ecuación Volumétrica (9.3)	P	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable. Pozo con alta capacidad de bombeo	Q			b	m _e								Delimita el área de cilindro de acuífero necesario para proporcionar el caudal bombeado considerando que procede del agua almacenada, definida por el volumen del cilindro y la porosidad eficaz, considerando la recarga despreciable	Radio de un cilindro para que cualquier partícula dentro de él tarde un tiempo de tránsito fijado en alcanzar la captación, efectuándose para diferentes tiempos de tránsito
Radio Fijo calculado. Método de la recarga (9.3)	P	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable. Pozo con alta capacidad de bombeo. Proporciona un área única. Solo válida para valores de tiempo muy grandes	Q							N					Delimita el área necesaria para proporcionar el caudal bombeado para valores de tiempo muy grandes considerando que el agua procede exclusivamente de entradas al acuífero debidas a recarga	Radio del cilindro que define el perímetro de protección para valores de tiempo muy grandes
Radio Fijo calculado. Función del descenso (9.4)	P	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable	Q					S		T					Delimita la zona en la que se produce un descenso determinado del nivel piezométrico con el caudal bombeado empleando la ecuación de Theis para régimen transitorio.	Radio a la captación para el cual se produce un descenso determinado del nivel piezométrico para diferentes valores de tiempo
Método de Wyssling (9.5)	P	Acuífero homogéneo en las proximidades de la captación. Gradiente regional uniforme	Q	i	K	b	m _e						V _e	Isopiezas y dirección de flujo	Calcula la zona de llamada de la captación (hay descenso piezométrico y el flujo se dirige a la captación) y define posteriormente la distancia en la dirección de flujo correspondiente al tiempo de tránsito deseado	Ancho del frente de llamada. Radio de llamada. Ancho del frente de llamada a la altura de la captación. Distancia aguas abajo y aguas arriba del flujo para diferentes tiempos de tránsito
Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme (9.6)	P	Proporciona un área única para el perímetro de protección. Esta no depende del tiempo de tránsito. Flujo bidimensional. No considera el tiempo de tránsito.	Q	i	K	b								Isopiezas y dirección de flujo. Divisoria hidrogeológica	Delimita la divisoria hidrogeológica mediante el análisis de las isopiezas y líneas de flujo. Emplea la ecuación de flujo uniforme para definir el ancho del área de alimentación en la divisoria hidrogeológica y su distancia aguas abajo	Área de alimentación de la captación indicando su ancho a la altura de la divisoria hidrogeológica y su distancia aguas abajo
Método de Jacobs y Bear (9.7)	P	Acuífero homogéneo en las proximidades de la captación. Gradiente regional uniforme	Q	i		b	m _e			T				Isopiezas y dirección de flujo	Se calcula mediante una fórmula un "tiempo reducido", buscándose en la colección de curvas de tiempo definidas por los autores sus puntos de corte con los ejes de ordenadas y se transforma mediante ecuaciones esa distancia gráfica a distancia en metros.	Distancia aguas arriba, distancia aguas abajo, distancia lateral a ambos lados para cada tiempo de tránsito
Solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte (9.8)	P	Acuífero homogéneo en las proximidades de la captación	Q	i	K	b	m _e							Isopiezas y dirección de flujo	Ecuación que define el tiempo de tránsito necesario para que una partícula se mueva en la dirección del flujo desde un punto a una distancia conocida de la captación aguas arriba o aguas abajo hasta alcanzarla	Distancia aguas arriba y distancia aguas abajo para tiempos de tránsito determinados mediante el método de tanteo empleando una ecuación.
Método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira (9.9)	P	Solo aplicable a tiempos de tránsito de 50 días con valores 0 < x < 18 aguas arriba y -3.3 < x < 0 y m _e > 0.1 (10%) aguas abajo (1)	Q	i	K	b	m _e							Isopiezas y dirección de flujo	Ecuaciones obtenidas mediante una solución empírica que minimiza las diferencias entre la fórmula de Bear y Jacob y los resultados obtenidos con el programa Visual Modflow para un tiempo de tránsito de 50 días	Distancia de una elipse aguas arriba, aguas abajo, perpendicular a la dirección de flujo y forma final redondeada de la elipse
Método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales (9.10)	P	Proporciona un área única para el perímetro de protección. Esta no depende del tiempo de tránsito.		i	K		m _e						V _e	Descripción litológica y longitud de recorrido de los diferentes materiales en la zona no saturada y en la zona saturada	Método empírico que cuantifica el poder depurador de los materiales en la zona no saturada y saturada ante efluentes contaminantes (sin especificar), que pudieran atravesarla, obteniendo los valores requeridos de tablas	Depuración en la zona no saturada y distancia que como mínimo es necesario recorrer en la zona saturada para alcanzar una depuración total
Modelos matemáticos: Visual MODFLOW y Visual MODPATH (9.11)	P	Considera la componente de advección del transporte de solutos pero no considera la difusión ni la dispersión	Límites hidrogeológicos del área a modelar. Condiciones de contorno (Recarga, celdas de nivel constante, características ríos y drenes). Capas (geometría y tipo de acuífero). Valores de piezometría Valores de parámetros hidráulicos en cada celda (kx, Ky, Kz, S, m _e) caudal y régimen de bombeo en cada captación										Modflow es un modelo tridimensional en diferencias finitas que resuelve las ecuaciones que definen el flujo considerando valores de las propiedades del acuífero específicas en cada celda, y proporciona el potencial hidráulico del agua en las mismas para régimen permanente y transitorio. Modpath usa los resultados de flujo de Modflow y calcula el recorrido de partículas considerando la componente de advección en el transporte de solutos	Delimita con precisión el área correspondiente al perímetro de protección para diferentes tiempos de tránsito en planta y perfil para diferentes hipótesis de bombeos		

LEYENDA:

Tipo de acuífero: P: Poroso o asimilable
K: Kárstico
F: Fisurado.

Datos necesarios: Q: Caudal bombeado
i: Gradiente hidráulico
K: Conductividad hidráulica
b: Espesor saturado
m_e: Porosidad eficaz
S: Coeficiente de almacenamiento
N: Recarga
T: Transmisividad
V_e: Velocidad eficaz

(1) Limitaciones al método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira:

$$x = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}}$$

ZONA DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DEFINIDA EMPLEANDO UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 1 DÍA Y LA OBTENIDA MEDIANTE OTROS CRITERIOS ALTERNATIVOS

En la tabla 36 se analiza la idoneidad de aplicar cada uno de los doce métodos contemplados, para delimitar la zona del perímetro de protección de la calidad, de las captaciones de abastecimiento de Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, para un tiempo de tránsito de 1 día o mediante criterios alternativos y los resultados obtenidos.

No ha sido posible efectuar una simulación empleando el modelo matemático para el tiempo de tránsito de 1 día, por las dimensiones de las celdas, que han sido adoptadas en función de la información disponible, por lo que este no puede emplearse como referencia para evaluar la precisión de los mismos.

Los métodos que no emplean el tiempo para definir los perímetros de protección, empleando otros criterios, como el poder autodepurador del terreno o los criterios hidrogeológicos, definen un área única en el ámbito del perímetro, de dimensiones a priori demasiado grandes para ser asumibles en esta zona, en la que se aplicarán las restricciones más intensas a las diversas actividades reguladas.

Es el caso de los métodos hidrogeológicos (Capítulo 9.1) y del Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme (Capítulo 9.6).

El método de Rehse también proporciona un área única, con un radio del orden de 100 m (107 y 99 m) en dos captaciones, estimando que no es necesaria en un sondeo, proporcionando por último un valor del área a proteger con un radio de 29 m en el sondeo “Camino del Valle”(172020005).

No es adecuado el método de la recarga del radio fijo calculado (Capítulo 9.3) al proporcionar un solo valor, aplicable para tiempos grandes, no siendo lógico considerar como tal 1 día.

La función del descenso del radio fijo calculado (Capítulo 9.4) proporciona para 1 día una zona con radio de 367 m.

Los 5 métodos restantes (análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo de tiempo de tránsito, ecuación volumétrica del radio fijo calculado, método de Wyssling, método de Jacobs y Bear, método de solución analítica simple para aproximación a isocronas que definen zonas de transporte) proporcionan valores del mismo orden de magnitud, como se muestra en la tabla 36.

El Análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito de 1 día da los valores más pequeños (2 a 7 m aguas arriba en el sentido de flujo), el método de Jacobs y Bear de 4 a 21 m aguas arriba en el sentido del flujo, el Radio fijo calculado (ecuación volumétrica) de 16 a 17 m de radio con centro en la captación, el método de solución analítica simple para la aproximación isocronas que definen zonas de transporte da distancias de 20 m aguas arriba y el método de Wyssling de 22 a 26 m aguas arriba, indicándose en la Tabla 36 y en la descripción de cada método la magnitud y orientación del resto de las distancias.

Tabla 36: Comparación de los perímetros de protección de la calidad obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 1 día o mediante criterios alternativos en las captaciones de abastecimiento de Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

MÉTODOS EMPLEADOS (Capítulo en el que se analiza)	Sondeo San Bartolomé (172020004) Distancias en metros	Sondeo Puente Alzado (172020001) Distancias en metros	Sondeo Cañada del Abad (172020003) Distancias en metros	Sondeo Camino del Valle (172020005) Distancias en metros
Método hidrogeológico (9.1) (*)	Delimita una única zona que es independiente del tiempo. (ver Figura 28)			
Análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito (9.2).	d=4	d=2	d=4	d=7
Radio fijo calculado. Ecuación volumétrica (9.3)	R=16	R=16	R=17	R=17
Radio Fijo calculado: Método de la recarga (9.3) (*)	No emplea el tiempo. Da un único valor para tiempos grandes Ej: 4 años. (Ver Figura 29 a)			
Radio fijo calculado: Función del descenso (9.4)	R=367	R=367	R=367	R=367
Método de Wyssling (9.5)	So= 23 (Aguas arriba) Su=19 (Aguas abajo)	So= 22 (Aguas arriba) Su=21 (Aguas abajo)	So= 24 (Aguas arriba) Su=21 (Aguas abajo)	So= 26 (Aguas arriba) Su=19 (Aguas abajo)
Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme (9.6) (*)	Delimita una única zona que es independiente del tiempo. (ver Figura 28)			
Método de Jacobs y Bear (9.7)	Xa-b= 11 (Aguas arriba) Xa-c= 7 (Aguas abajo) Xa-d= 8 (Lateral) Xa-e= 8 (Lateral)	Xa-b= 4 (Aguas arriba) Xa-c= 2 (Aguas abajo) Xa-d= 3 (Lateral) Xa-e= 3 (Lateral)	Xa-b= 10 (Aguas arriba) Xa-c= 6 (Aguas abajo) Xa-d= 7 (Lateral) Xa-e= 7 (Lateral)	Xa-b= 21 (Aguas arriba) Xa-c= 12 (Aguas abajo) Xa-d= 15 (Lateral) Xa-e = 15 (Lateral)
Método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte (9.8)	X _t = 20	X _t = 20	X _t = 20	X _t = 20
Método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira (9.9)	Método desarrollado para tiempo de tránsito de 50 días (ver figura 27 d)			
Método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales (9. 10) (*)	No depende del tiempo L=107	No depende del tiempo L=99	No depende del tiempo L=0	No depende del tiempo L=29
Modelos matemáticos. Programas Visual MODFLOW y VisualMODPATH (9.11)	No se ha efectuado simulación para 1 día al ser demasiado pequeño para el tamaño del mallado establecido.			

(*) Estos métodos no emplean como criterio el tiempo de tránsito. Se incluyen como referencia de la extensión del perímetro de protección obtenido empleando estos criterios. Proporcionan una única zona independiente del tiempo.

ZONA DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DEFINIDA EMPLEANDO UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 50 DÍAS Y LA OBTENIDA MEDIANTE OTROS CRITERIOS ALTERNATIVOS

Se han comparado los resultados obtenidos al aplicar 10 métodos con los que proporciona la simulación del modelo matemático antes indicado, efectuada empleando los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH, tomada como referencia.

Métodos que emplean el tiempo de tránsito como criterio o en los que el tiempo influye en las distancias obtenidas

De los 7 métodos que emplean el tiempo los resultados más precisos se obtienen con los métodos de Wyssling (Capítulo 9.5), Jacobs y Bear (Capítulo 9.7) y método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte (Capítulo 9.8).

Con esos tres métodos los resultados son prácticamente idénticos (Figuras 27 a y 27 b) por lo que respecta a la longitud aguas arriba y aguas abajo de esta zona del perímetro y suelen indicar un área a proteger algo inferior a la requerida según el modelo matemático. Existe en todos ellos cierto grado de subjetividad, al tener que definir una única dirección principal del flujo en base a los valores de piezometría conocidos, lo que puede producir un error al orientar el perímetro en algunas captaciones, como puede ocurrir en el sondeo 5.

A pesar de esta similitud respecto a la longitud, el método de Wyssling delimita, no obstante, perímetros de protección más anchos, siendo el método que proporciona resultados más parecidos a los obtenidos con el modelo en los sondeos 1 y 4, si bien infraprotege en los sondeos 3 y 5 (Figura 27 b).

El método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira (Capítulo 9.9) proporciona perímetros de protección similares a los anteriores (Figura 27 c), especialmente en el sondeo 4, pero aumenta las áreas sobreprotegidas aguas arriba y abajo.

El método del Radio fijo calculado: ecuación volumétrica (Capítulo 9.3) proporciona zonas del perímetro muy pequeñas que infraprotegen aguas arriba en el sentido de flujo (Figura 27 d).

En el extremo opuesto el Radio fijo calculado, función del descenso, considerando un descenso de 15 mm (Capítulo 9.4) proporciona una zona extraordinariamente grande (Figura 27 d) que incluye toda la zona que indica el modelo pero sobreprotege amplísimas zonas alrededor de las captaciones.

Por último el método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito (Figura 27 d) proporciona unas zonas más próximas a los resultados requeridos pero menos precisas que las obtenidas mediante los métodos de Wyssling, Jacobs y Bear, solución analítica simple y método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira.

Métodos en los que el tiempo no influye al definir el perímetro de protección

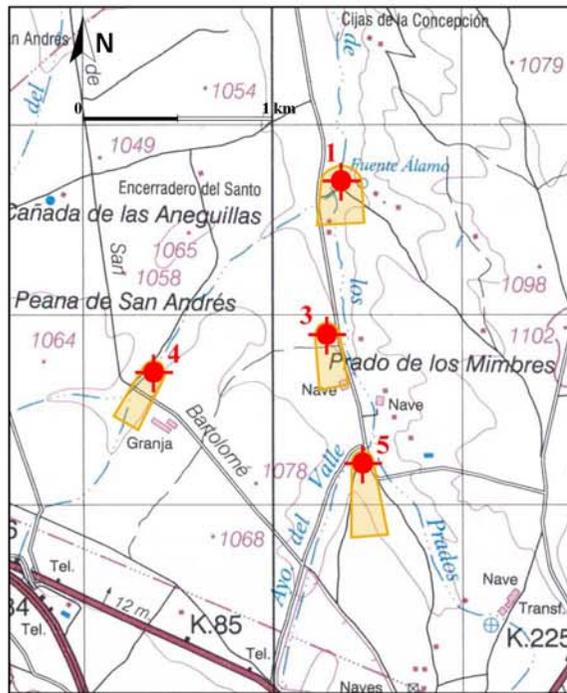
Definen una única zona independiente del tiempo incluyéndose en este análisis para poder comparar con el tamaño del perímetro de protección obtenido empleando métodos que utilizan otros criterios.

El método de Rehse (Capítulo 9.10) proporciona perímetros muy pequeños e incluso la necesidad de establecerlos como ocurre en el sondeo 3 (Figura 28).

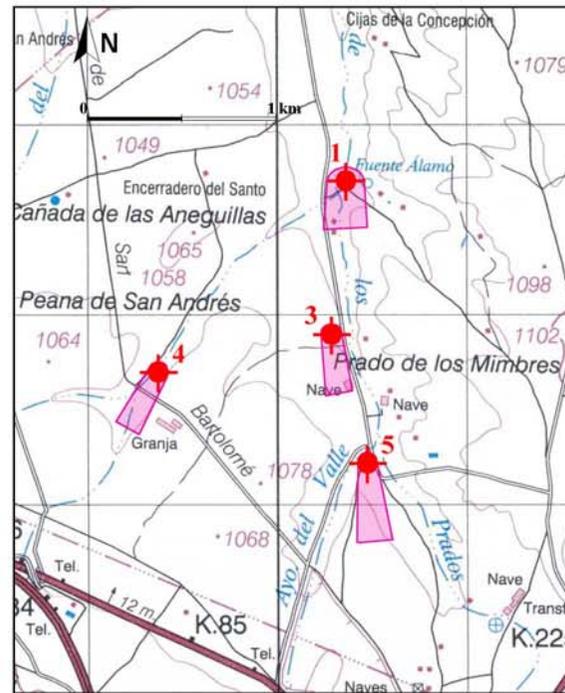
Los perímetros de protección definidos empleando métodos hidrogeológicos

exclusivamente cubren toda el área a proteger pero delimitan una zona única de gran tamaño, muy superior a la definida por el modelo para el tiempo de tránsito de 50 días con el que se comparan (Figura 28).

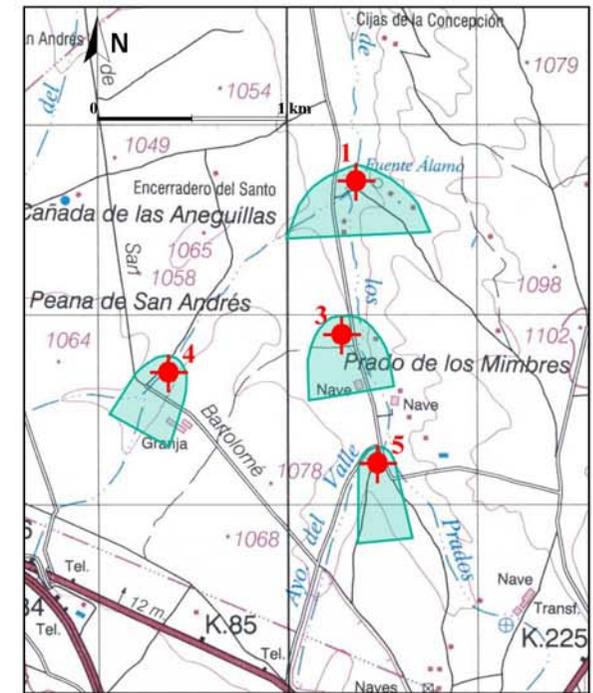
La aplicación del análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme disminuye enormemente la extensión de la zona delimitadas pero infraprotege en parte, principalmente en los sondeos 1, 3 y 5, por lo que dejaría fuera del perímetro de protección zonas en las cuales una eventual contaminación afectaría a la captación de abastecimiento en un tiempo inferior a 50 días según los resultados del modelo (Figura 28).



Solución Analítica Simple.

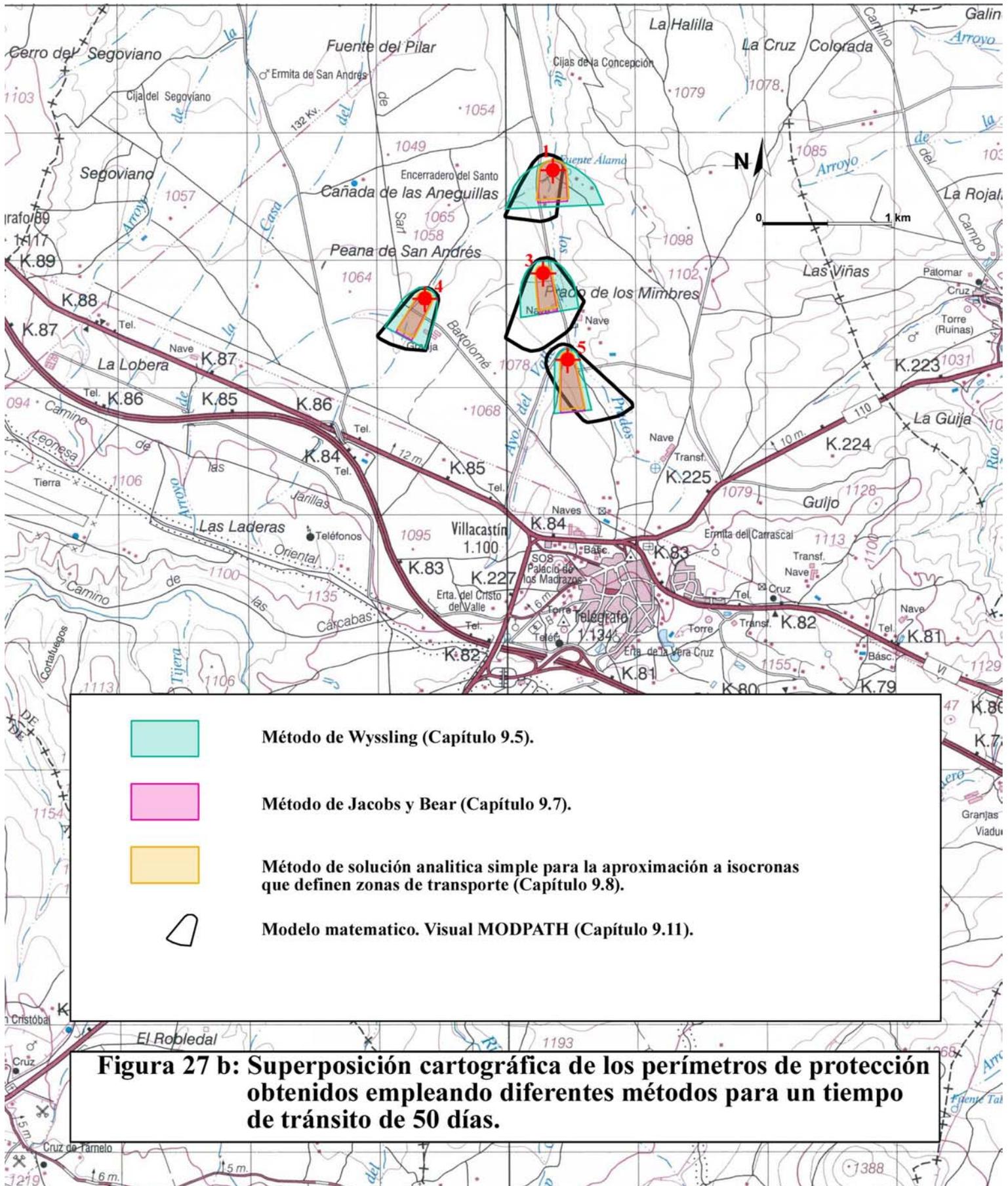


Método de Jacobs y Bear.



Método de Wyssing.

Figura 27 a: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 50 días.



Método de Wyssling (Capítulo 9.5).



Método de Jacobs y Bear (Capítulo 9.7).

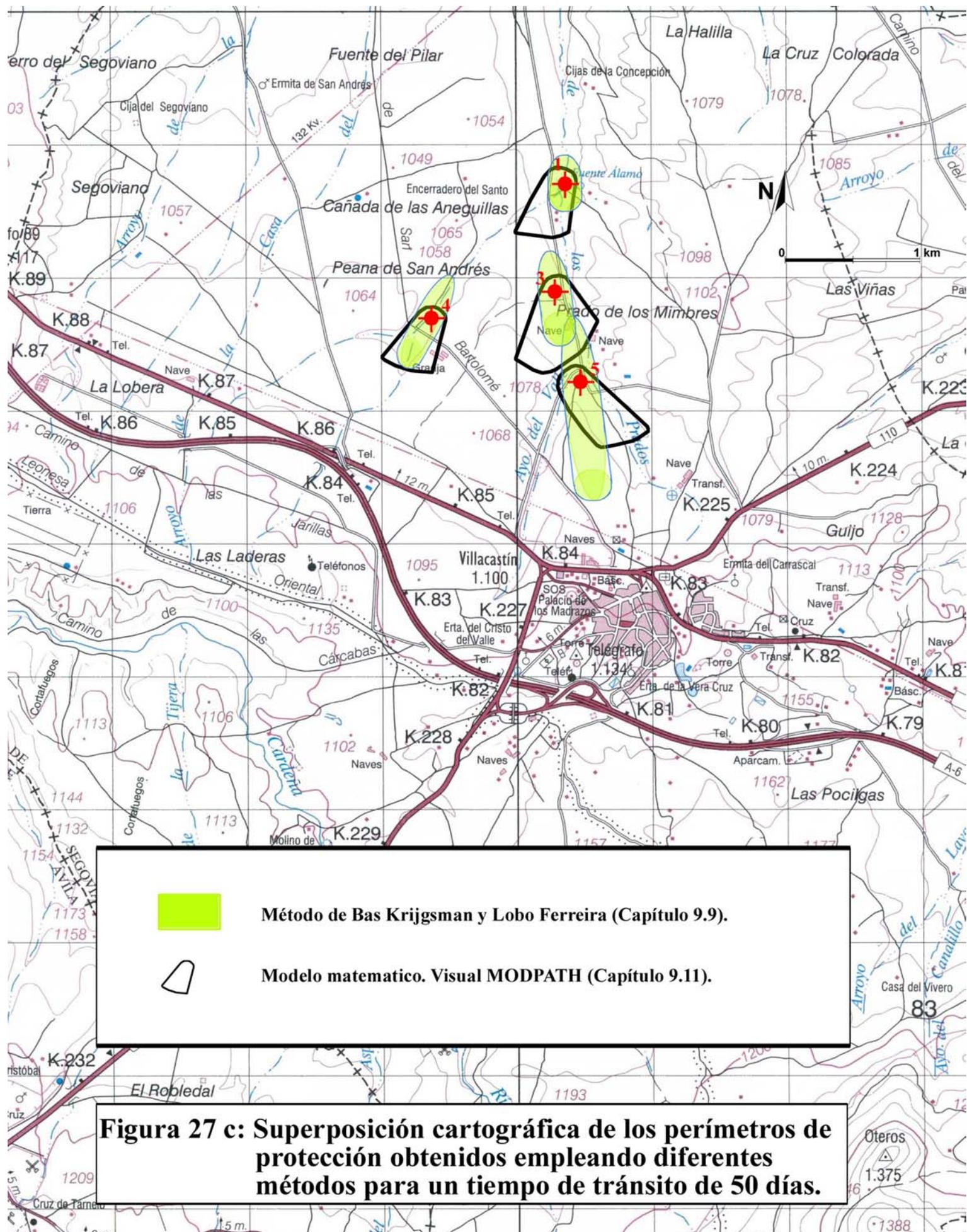


Método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte (Capítulo 9.8).



Modelo matemático. Visual MODPATH (Capítulo 9.11).

Figura 27 b: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 50 días.



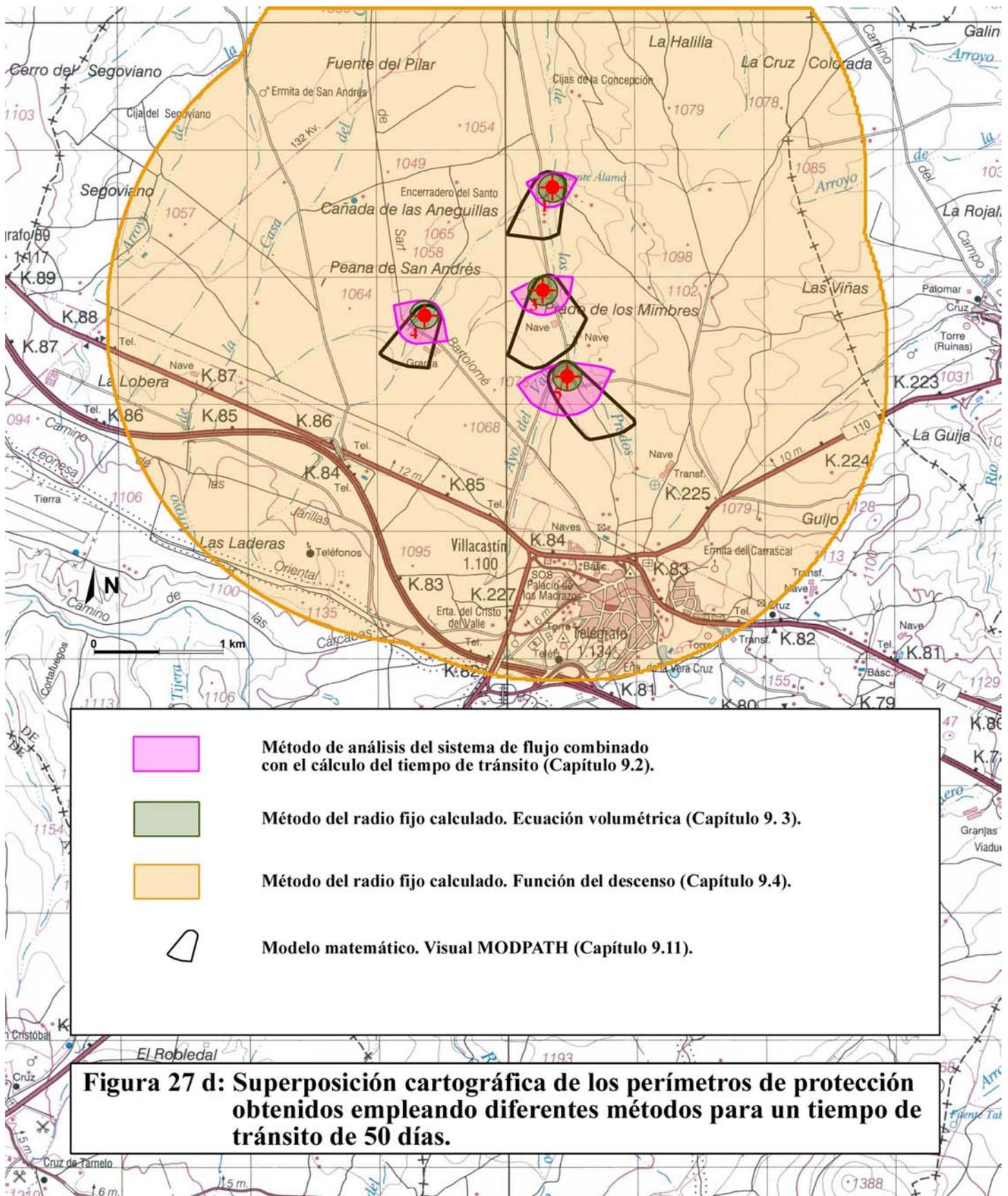
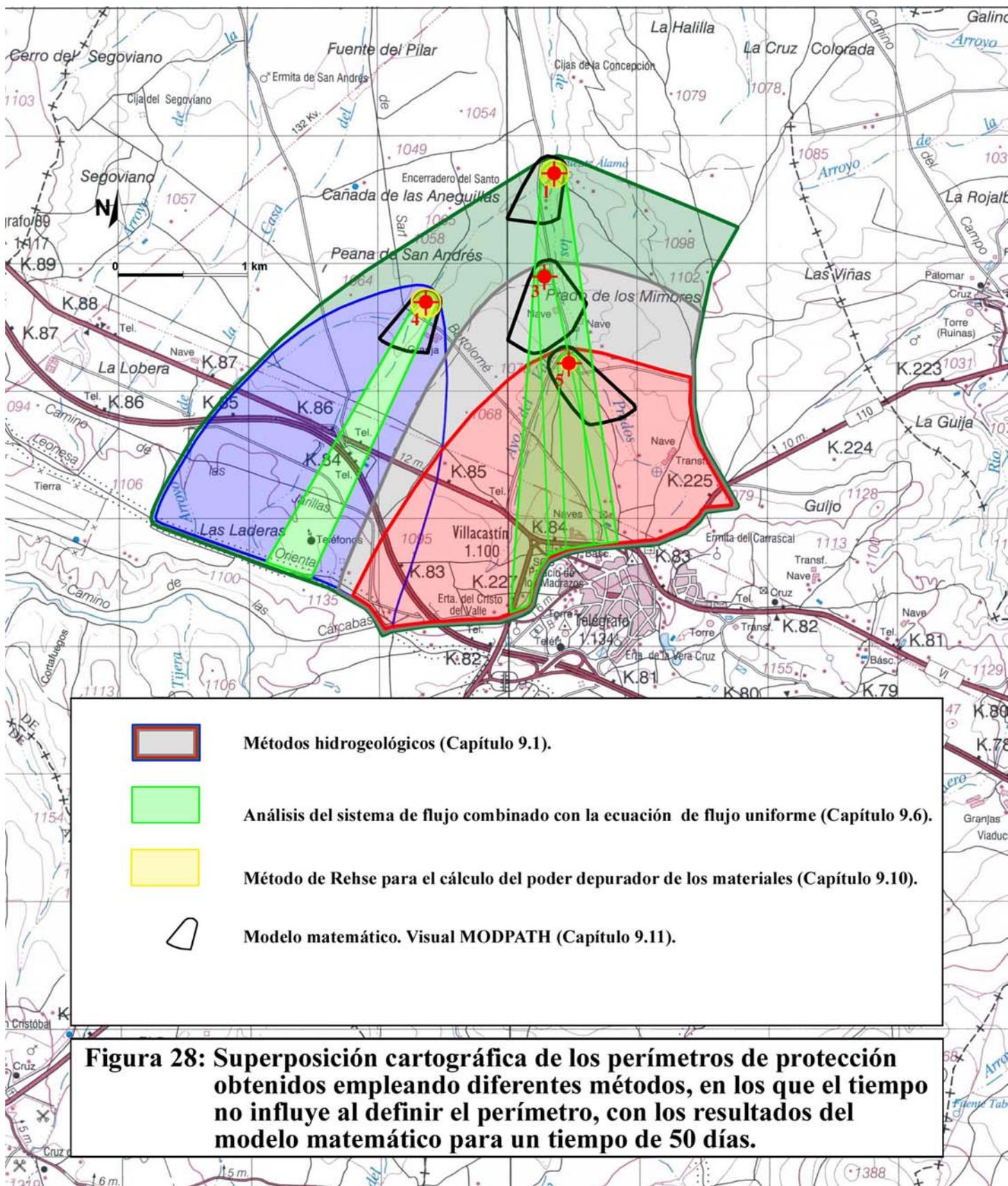


Figura 27 d: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 50 días.



ZONA DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DEFINIDA EMPLEANDO UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 4 AÑOS Y LA OBTENIDA MEDIANTE OTROS CRITERIOS ALTERNATIVOS

Se han comparado los resultados obtenidos al aplicar 10 métodos con los que proporciona la simulación del modelo matemático efectuada empleando los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH, tomada como referencia.

Métodos que emplean el tiempo de tránsito como criterio o en los que el tiempo influye en las distancias obtenidas

Los métodos de Wyssling (Capítulo 9.5) Jacobs y Bear (Capítulo 9.7) y método de solución analítica simple (Capítulo 9.8) proporcionan zonas a proteger (Figuras 29 a y 29 b) con una longitud aguas arriba mucho mayor de la necesaria. Para este tiempo de 4 años se obtienen resultados de longitud prácticamente idénticos para el método de Wyssling y el de la solución analítica simple y más largos por el método de Jacobs y Bear. El ancho de la zona a proteger que proporciona el método de Wyssling es mayor que en las otras dos siendo más preciso, si bien es menor de la obtenida con la simulación matemática efectuada y se produce una zona sobreprotegida en longitud de gran envergadura.

Los métodos de Radio fijo calculado, ecuación volumétrica, y Radio fijo calculado, método de la recarga (Capítulo 9.3) son prácticamente idénticos y proporcionan zonas a proteger definidas por un círculo (Figura 29 c) que abarcan aproximadamente la mitad de la longitud que debería tener aguas arriba y sobreprotegen la captación aguas abajo.

El método de Radio fijo calculado: función del descenso proporciona una zona definida por un círculo de tamaño desmesurado (Figura 29 c).

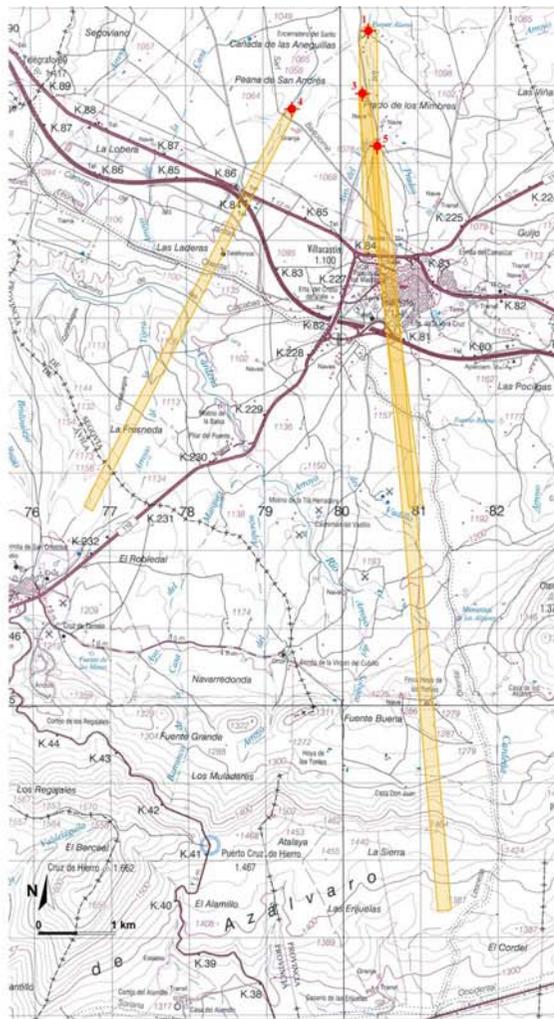
El método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito engloba la totalidad del área que proporciona el modelo matemático, si bien las áreas obtenidas son, en este caso, aproximadamente el doble de lo requerido respecto a la longitud, sobreprotegiendo también una zona amplia lateralmente.

Métodos en los que el tiempo no influye al definir el perímetro de protección

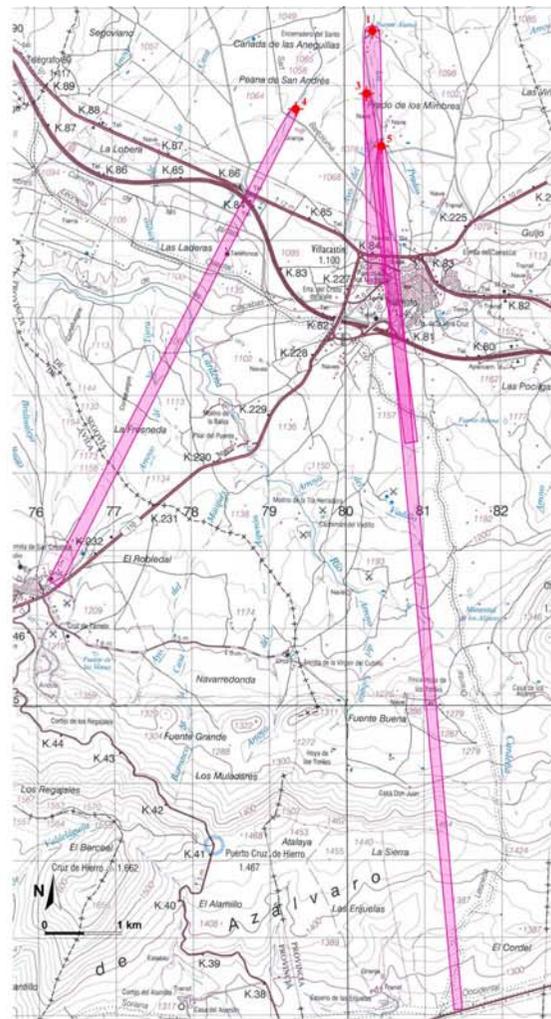
Definen una única zona independiente del tiempo incluyéndose en este análisis para poder comparar con el tamaño del perímetro de protección obtenido empleando métodos que utilizan otros criterios, como ya ha sido indicado anteriormente. Al no depender del tiempo son idénticos a los reseñados para 50 días previamente, pero se comparan con la simulación del modelo para 4 años que es una zona más amplia.

El método de Rehse (Capítulo 9.10) proporciona zonas excesivamente reducidas (Figura 30). Los perímetros de protección que se definen empleando métodos hidrogeológicos exclusivamente, delimitan áreas (Figura 30) que incluyen en su totalidad las proporcionadas por el modelo matemático, para un tiempo de tránsito de cuatro años, pero de extensión muy superior, ya que considera toda el área de recarga posible, bidimensionalmente.

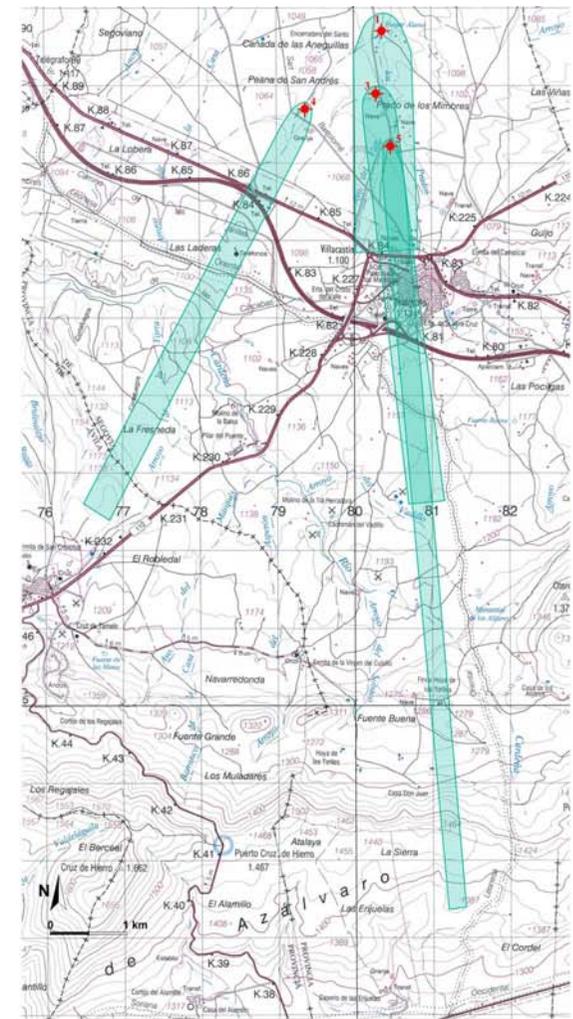
El método de análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme (Capítulo 9.6), de extensión menor a la obtenida con el método hidrogeológico, infraprotege una zona amplia respecto a la salida del modelo matemático (Figura 30). Es decir, no incluye en el perímetro grandes zonas en las cuales, según la simulación efectuada, una eventual actividad contaminante en las mismas alcanzaría la captación de abastecimiento en un tiempo inferior a 4 años. Cabe señalar, no obstante, la gran influencia que supone en este método cualquier posible incertidumbre respecto a la definición de la dirección principal de flujo.



Solución Analítica Simple.

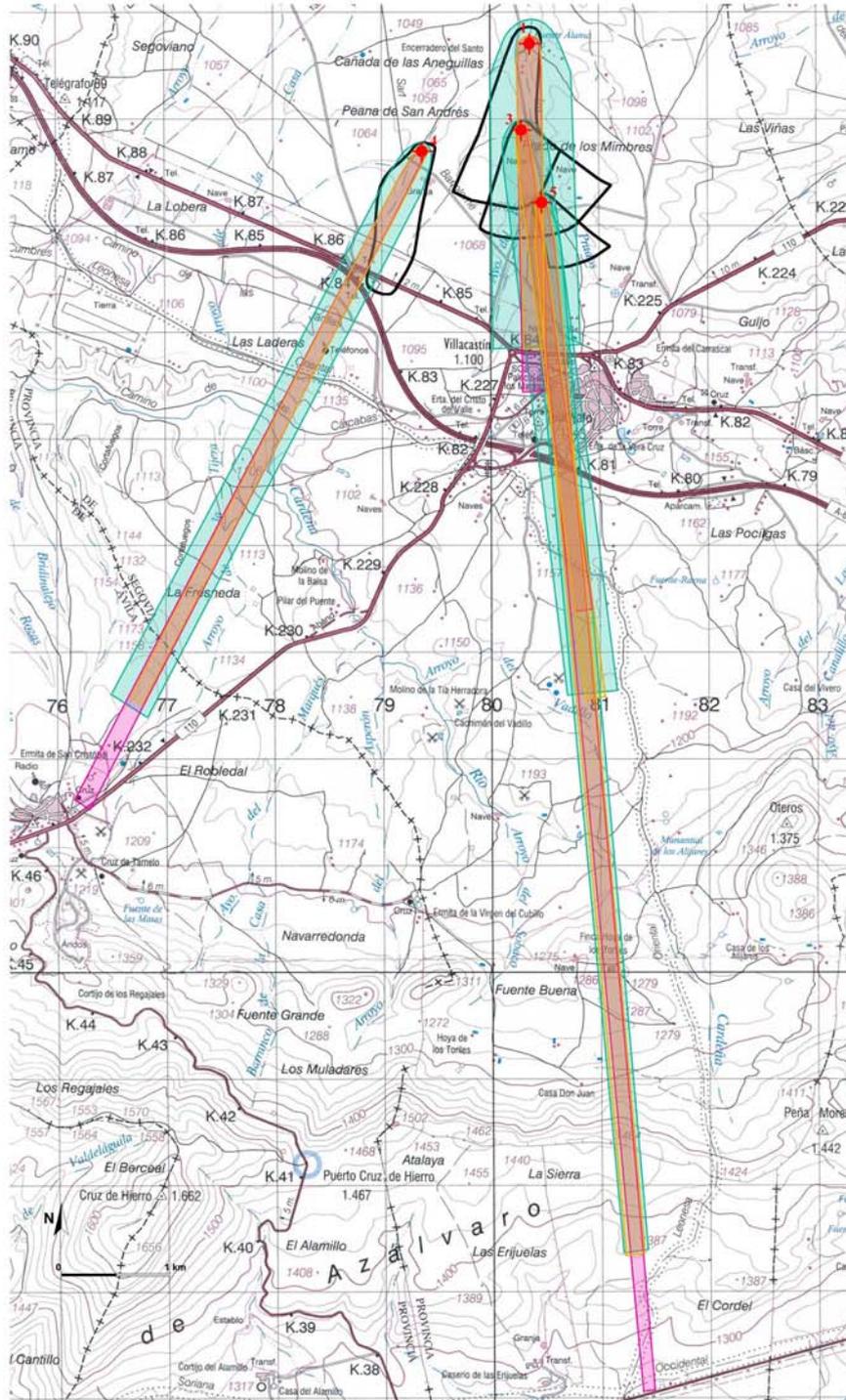


Método de Jacobs y Bear.



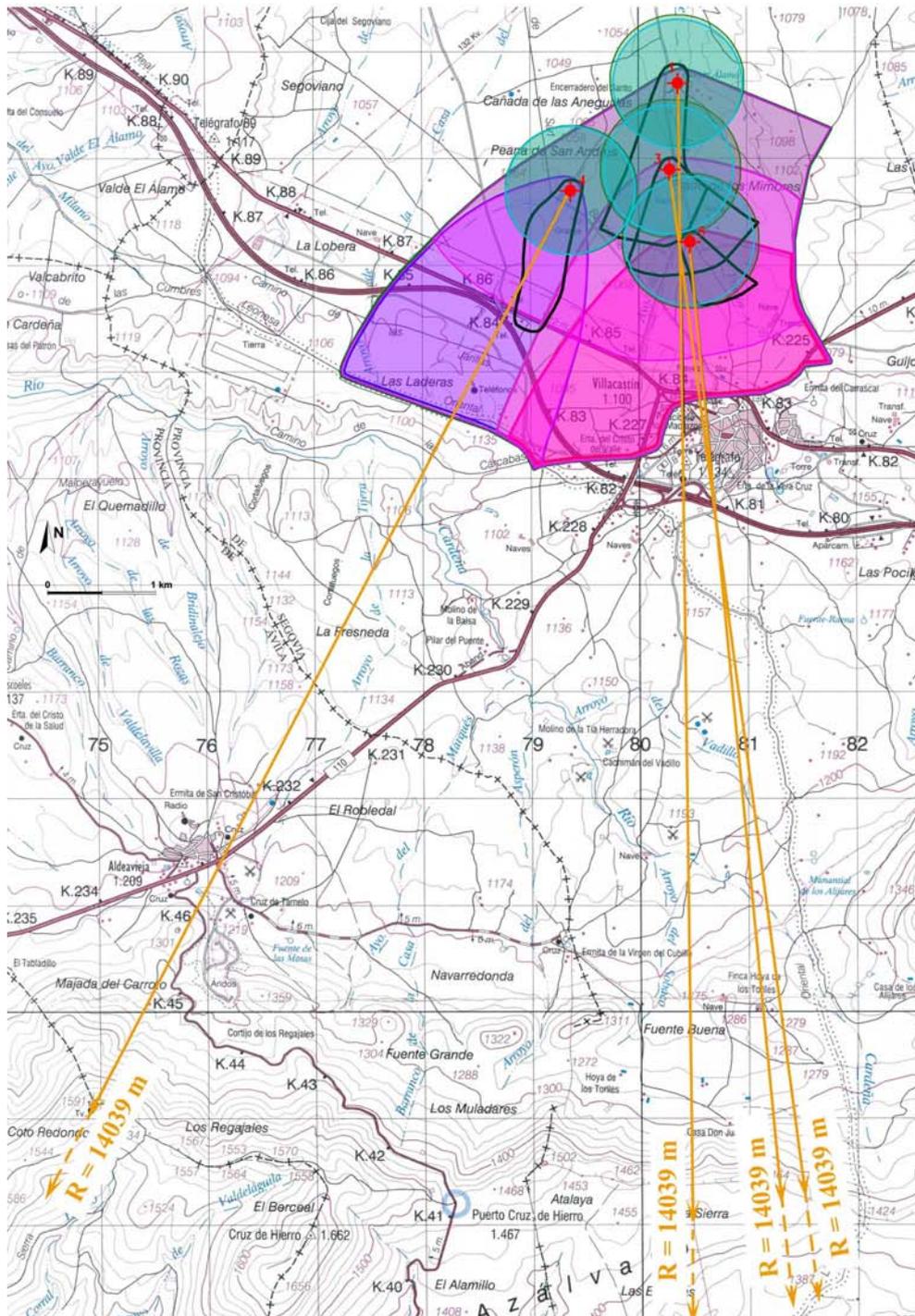
Método de Wyssling.

Figura 29 a: Superposición cartográfica de los perímetros obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 4 años



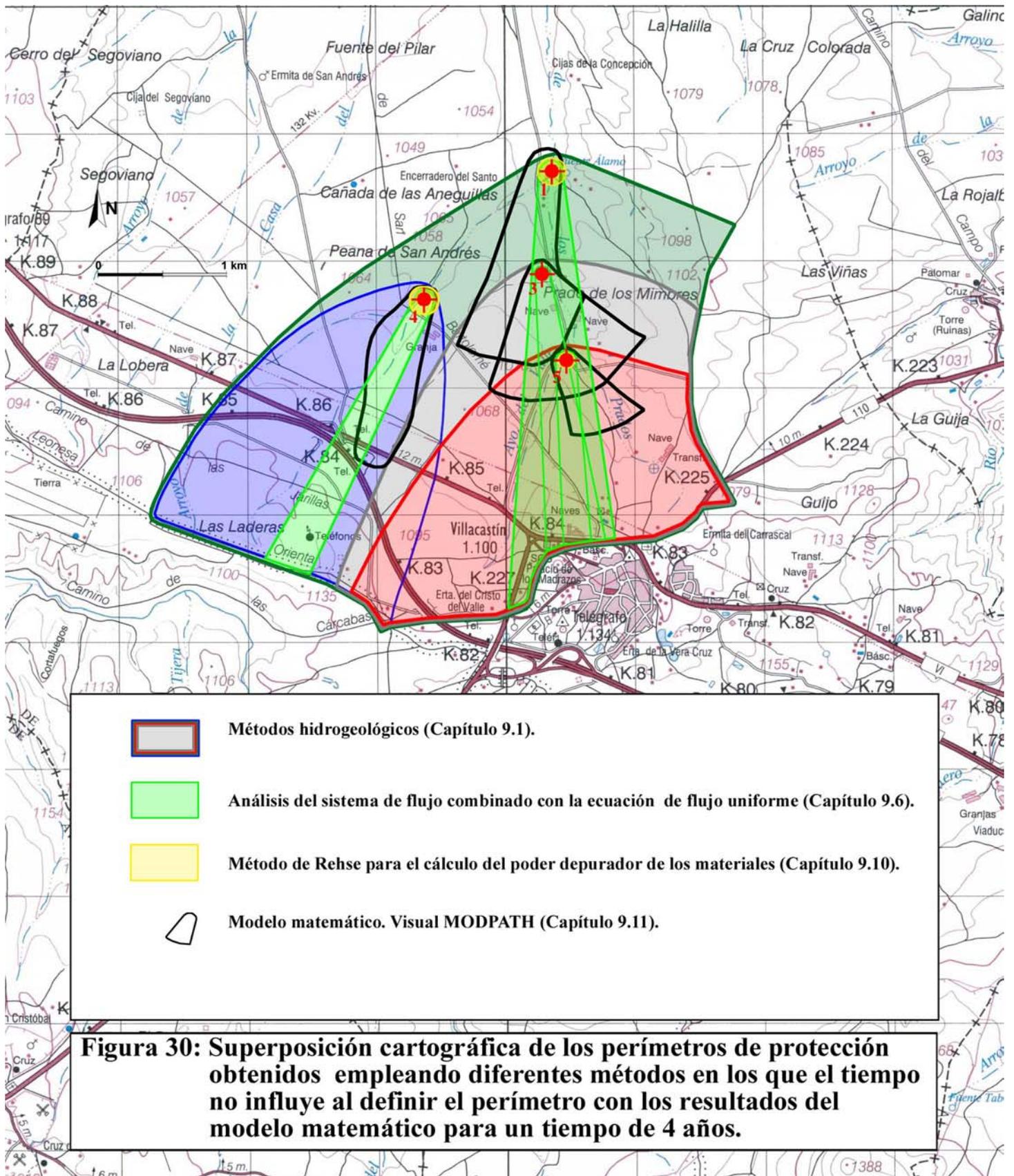
- Método de Wyssling (Capítulo 9.5).
- Método de Jacobs y Bear (Capítulo 9.7).
- Método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte (Capítulo 9.8).
- Modelo matemático. Visual MODPATH (Capítulo 9.11).

Figura 29 b: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 4 años.



- Método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito (Capítulo 9.2).
- Método del radio fijo calculado. Ecuación volumétrica (Capítulo 9.3).
- Método del radio fijo calculado. Método de la recarga (Capítulo 9.3).
- $R = 14039\text{ m}$ Método del radio fijo calculado. Función del descenso (Capítulo 9.4).
- Modelo matemático. Visual MODPATH (Capítulo 9.11).

Figura 29 c: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 4 años.



ZONA DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DEFINIDA EMPLEANDO UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 25 AÑOS Y LA OBTENIDA MEDIANTE OTROS CRITERIOS ALTERNATIVOS

Se han comparado los resultados obtenidos al aplicar 10 métodos con los que proporciona la simulación del modelo matemático efectuada empleando los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH, tomada como referencia.

Métodos que emplean el tiempo de tránsito como criterio o en los que el tiempo influye en las distancias obtenidas

Para un tiempo de tránsito de 25 años son inasumibles los resultados que proporcionan los métodos de Jacobs y Bear (Capítulo 9.7), Wyssling (Capítulo 9.5) y Solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte (Capítulo 9.8) ya que sobreprotegen ampliamente en longitud (Figura 31), y proporcionan áreas muy estrechas, infraprotegiendo paralelamente al flujo.

El Radio fijo calculado, función del descenso (Capítulo 9.4) sobreprotege amplísimas zonas (Figura 31).

El método de Radio fijo calculado, método de la recarga (Capítulo 9.3) tampoco es aplicable pues sobreprotege aguas abajo del flujo principalmente e infraprotege una gran parte de la zona que debería constituir el perímetro (Figura 31).

El método de Radio fijo calculado, ecuación volumétrica (Capítulo 9.3) aunque mejora la precisión respecto al anterior tampoco cubre toda la zona y sobreprotege amplias zonas (Figura 31), especialmente aguas abajo.

El análisis del sistema de flujo combinado con el tiempo de tránsito es para este tiempo idéntico al método hidrogeológico.

Métodos en los que el tiempo no influye al definir el perímetro de protección

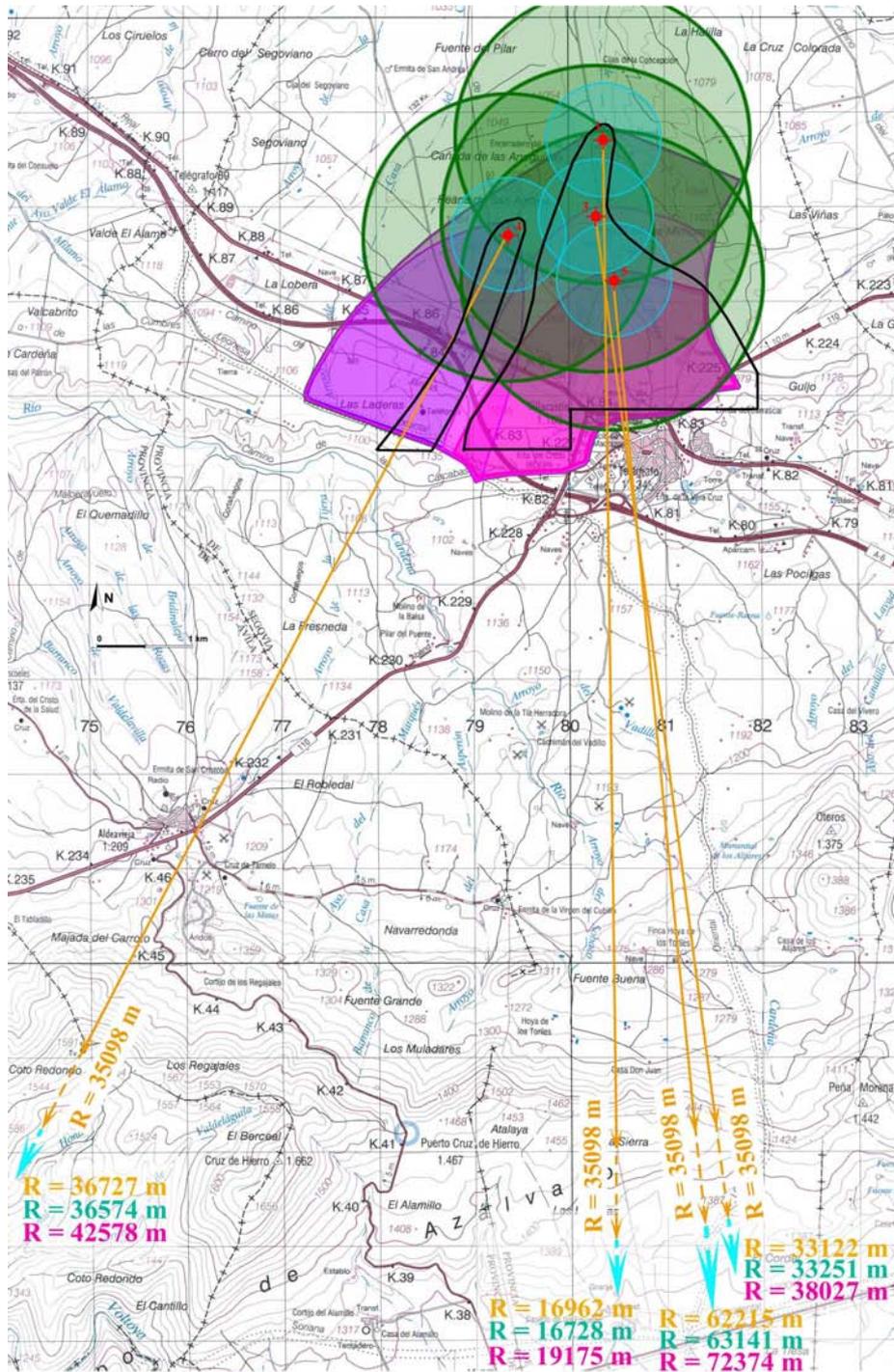
Definen, como se indicó anteriormente, una única zona independiente del tiempo, permitiendo su inclusión en este análisis poder comparar con el tamaño de los perímetros de protección que se obtienen al emplear métodos que utilizan otros criterios.

Al no depender del tiempo son idénticos a los reseñados para 50 días y 4 años previamente, pero se comparan con la simulación del modelo para 25 años que es una zona mucho mayor.

El método de Rehse (Figura 32) proporciona zonas muy reducidas en comparación con la obtenida en el modelo.

Las áreas delimitadas empleando métodos hidrogeológicos exclusivamente (Figura 32) engloban en su práctica totalidad (no incluyen una zona en el límite sureste de los perímetros de protección), las proporcionadas por el modelo matemático, para un tiempo de tránsito de 25 años, pero su extensión es más amplia, aunque en este caso la diferencia es, lógicamente, menor a la existente al compararlos con los resultados del modelo para tiempos de tránsito menores.

El método de análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme (Capítulo 9.6), proporciona áreas más reducidas a las obtenidas mediante los métodos hidrogeológicos pero que infraprotegen amplias zonas (Figura 32). No incluye así áreas en las que, según la simulación efectuada, una contaminación en las mismas alcanzaría las captaciones en un tiempo inferior a 25 años.



	Método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito. (Capítulo 9.2)
	Método del radio fijo calculado. Ecuación volumétrica. (Capítulo 9.3)
	Método del radio fijo calculado. Método de la recarga. (Capítulo 9.3)
	Método del radio fijo calculado. Función del descenso. (Capítulo 9.4)
R = 16728 m	Método de Wyssing. (Capítulo 9.5)
R = 19487 m	Método de Jacobs y Bear. (Capítulo 9.7)
R = 16469 m	Método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte. (Capítulo 9.8)
	Modelo matemático. Visual MODPATH. (Capítulo 9.11)

Figura 31: Comparación de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 25 años.

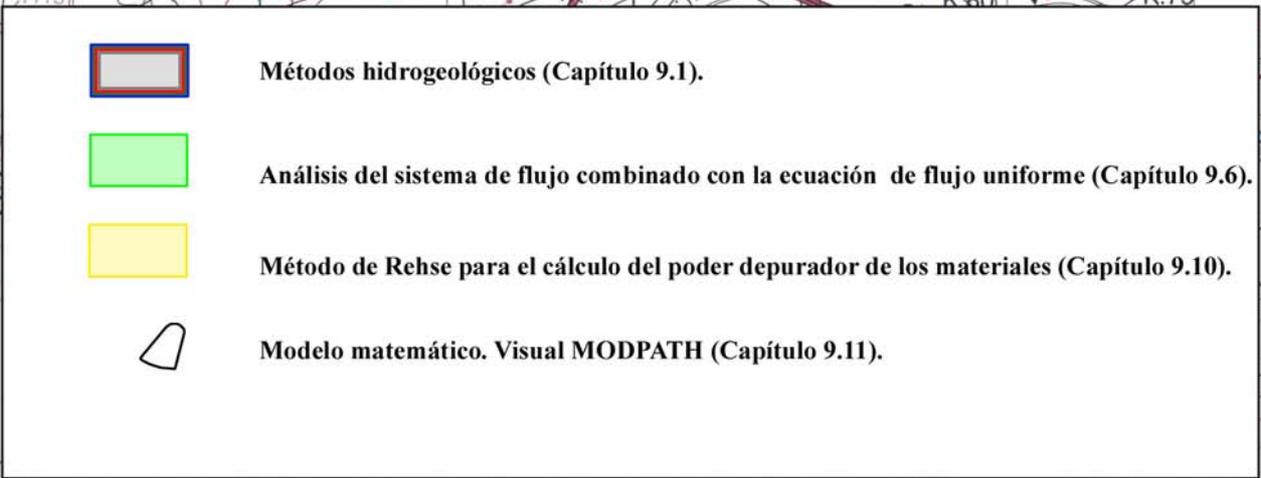
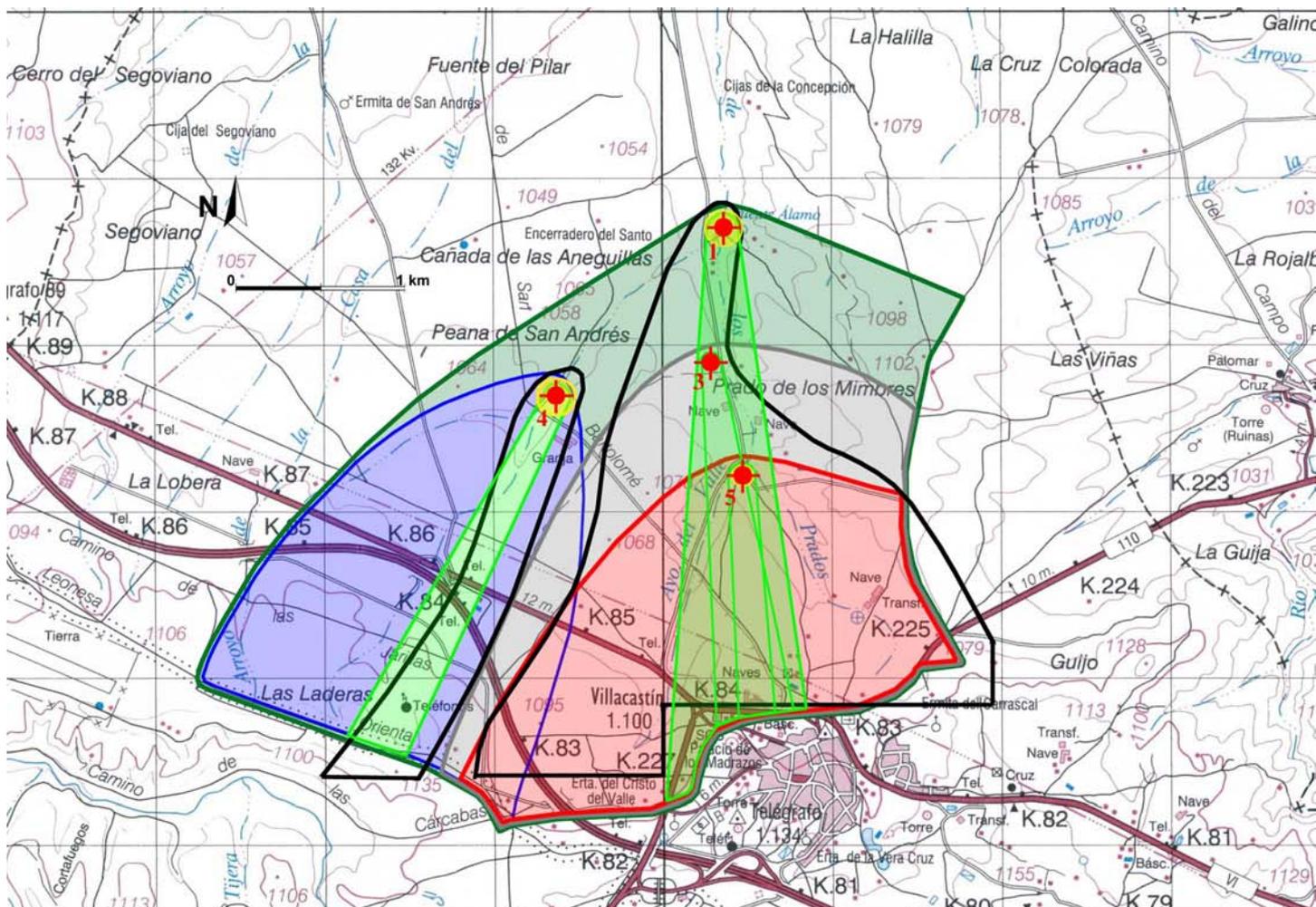


Figura 32: Comparación de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos, en los que el tiempo no influye al definir el perímetro, con los resultados del modelo matemático para un tiempo de 25 años.

11.- PROPUESTA FINAL DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DE LOS SONDEOS DE ABASTECIMIENTO DE VILLACASTÍN QUE CAPTAN EL ACUÍFERO DEL TERCIARIO DETRÍTICO

La propuesta final de delimitación de los perímetros de protección de la calidad de los 4 sondeos de abastecimiento urbano de Villacastín, que captan el acuífero del Terciario detrítico, sondeos San Bartolomé (172020004), Puente Alzado (172020001), Cañada del Abad (172020003) y Camino del Valle (172020005), debe incluir cuantas zonas se propone alrededor de cada captación, con qué criterios se delimitan, y las restricciones a imponer a diversas actividades en las mismas, si bien corresponde a la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca su aprobación, artículo 28 del texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 b), como se indicó en los capítulos 5 y 8.

Las conclusiones obtenidas del análisis efectuado en esta Tesis Doctoral de las características hidrogeológicas del acuífero captado, infraestructura del abastecimiento, necesidades de agua para el mismo, focos potenciales de contaminación en el municipio, vulnerabilidad de las diferentes zonas (capítulo 7), junto con el análisis de los resultados obtenidos aplicando diferentes métodos para delimitar los perímetros de protección de la calidad (capítulos 9 y 10), entre otros factores, permiten considerar como más apropiado la propuesta de dividir los perímetros de protección en tres zonas, cuyas principales características son las siguientes:

- Zona inmediata o de restricciones absolutas

Esta zona se ha definido en base a un criterio de tiempo de tránsito de 1 día, empleándose para delimitarlas el método de Wyssling.

El objetivo principal de esta zona es proteger la captación y sus instalaciones (la captación propiamente dicha, la caseta del transformador o del motor y depósitos de agua o combustible entre otros) contra vertidos o infiltraciones directas en su superficie, así como impedir el acceso de animales y desaprensivos que pudieran contaminar directamente las captaciones.

Por ello estará cerrada mediante una valla que impida el acceso a personas no autorizadas y convenientemente señalizada su identificación como parte del perímetro de protección así como la prohibición de acceso.

Sus dimensiones se muestran en la Tabla 37.

Las regulaciones y restricciones que se propone imponer a diversas actividades o instalaciones en esta zona se detallan en la Tabla 38. Esta ha sido elaborada en base al análisis de las actividades reguladas en diferentes países (Lallemand-Barrès, Roux, 1989 y 1999; Environment Agency, 1998; Moreno Merino *et al.*, 1991), los contemplados expresamente en la legislación española de aguas, en los artículos 173.5 y 173.6 del R.D.P.H. (BOE, 1986), así como otros trabajos precedentes (Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 2000; Martínez Navarrete y García García, 2001 b).

TABLA 37.- DIMENSIONES DE LA ZONA INMEDIATA O DE RESTRICCIONES ABSOLUTAS PARA LOS SONDEOS DE ABASTECIMIENTO A VILLACASTÍN.

CAPTACIÓN DE ABASTECIMIENTO	EJE PRINCIPAL			Longitud transversal a la altura de la captación
	Dirección	S _o : Longitud aguas arriba en la dirección del flujo (m) y orientación	S _u : Longitud aguas abajo en la dirección del flujo (m) y orientación	
Sondeo San Bartolomé (172020004)	N 30° E	23 m - suroeste	19 m - noreste	2 segmentos de 19 m perpendiculares al eje principal
Sondeo Puente Alzado (172020001)	N-S	22 m - sur	21 m - norte	2 segmentos de 21 m perpendiculares al eje principal
Sondeo Cañada del Abad (172020003)	N 6° W	24 m - sureste	21 m - noroeste	2 segmentos de 21 m perpendiculares al eje principal
Sondeo Camino del Valle (172020005)	N 4° W	26 m - sureste	19 m - noroeste	2 segmentos de 19 m perpendiculares al eje principal

Las restricciones indicadas en la Tabla 38 para esta zona deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del municipio de Villacastín.

- Zona próxima o de restricciones máximas

Su objetivo es proteger frente a la contaminación bacteriológica. Comprende el área en la cual una eventual contaminación en la misma alcanzaría la captación de abastecimiento en un tiempo de tránsito inferior a 50 días. Para delimitarlas se ha utilizado los resultados de la simulación efectuada mediante Visual MODFLOW en régimen permanente y la simulación advectiva del transporte con Visual MODPATH, indicándose sus dimensiones en la figura 33.

El tiempo de tránsito de 50 días es el que se considera necesario para garantizar la degradación de la contaminación bacteriológica (Lallemand-Barrès, Roux, 1989; Moreno Merino, *et al.*, 1991; Käss, 1998) y es utilizado con esta finalidad en la regulación de numerosos países (como ha sido analizado en el capítulo 8).

En la Tabla 38 se detallan las regulaciones y restricciones a imponer a diversas actividades o instalaciones. Estas son las mismas de la zona anterior, si bien aquí se permitiría el acceso peatonal y que la atravesen redes de comunicación, y deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del término municipal.

Hay que indicar que en el área que delimita esta zona próxima o de restricciones máximas existe actualmente cultivos de secano (trigo y cebada), así como diversas granjas (las identificadas con los números 6, 7, 8 y 10 en el mapa 2 y tabla 11, en la que se evalúa su potencial contaminante), y otras previstas (números 5 y 11 en las mismas), cuyas actividades quedarían afectadas por la regulación contemplada en el perímetro de protección.

- **Zona alejada o de restricciones moderadas**

Una eventual contaminación en la misma tardaría en alcanzar la captación de abastecimiento un tiempo comprendido entre un mínimo de 50 días y el límite superior de tiempo de tránsito considerado en esta zona, 25 años, al ser su objetivo proteger frente a contaminantes de larga persistencia. Para delimitarlas se ha utilizado los resultados de la simulación efectuada mediante Visual MODFLOW en régimen permanente, y la simulación advectiva del transporte con Visual MODPATH.

La elección de un tiempo de tránsito de 25 años se ha realizado valorando, entre otros aspectos, la problemática del abastecimiento a la localidad. Este, como ha sido detallado en el capítulo 7, se efectúa exclusivamente en base a la explotación de siete captaciones de agua subterránea ubicadas en el termino municipal.

El bombeo de los cuatro sondeos que captan el acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario, al norte del casco urbano, denominados sondeos Puente Alzado, San Bartolomé, Cañada del Abad y Camino del Valle) supone en torno al 72% del volumen requerido para el abastecimiento, proporcionando los tres pozos en materiales graníticos, al sur del casco urbano, llamados Pozo Estacio, de la Rejilla y de los Lavaderos, el 28% restante.

Las características de los materiales graníticos hacen muy improbable que pueda incrementarse notablemente esa cantidad, y no existen otros acuíferos en el ámbito del término municipal, es decir, la explotación, con calidad adecuada, de las captaciones en el acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario es imprescindible para el abastecimiento a la población.

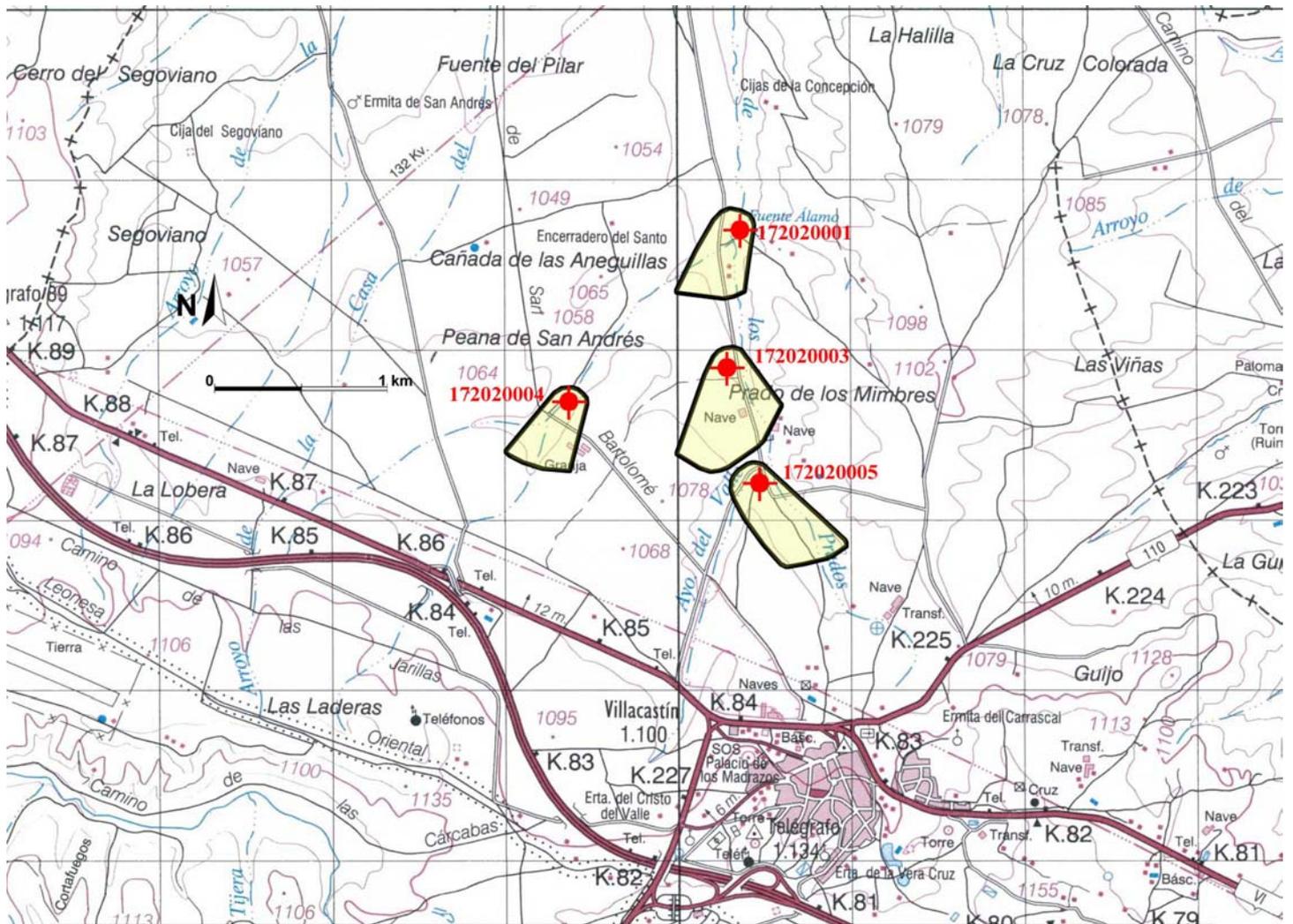
La dependencia del abastecimiento de la explotación de esos 4 sondeos, distribuidos en el acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario en la zona norte de la localidad (Mapa 1), y su vulnerabilidad a la contaminación, hace necesario que el límite externo de esta zona, y por lo tanto del perímetro de protección, no existiendo restricciones a partir de él, sea lo suficientemente elevado para garantizar un abastecimiento desde los mismos con calidad adecuada, al menos durante un periodo de tiempo dilatado, 25 años, que permita en su caso la búsqueda de fuentes de abastecimiento alternativos a la existente en el término municipal de Villacastín, ya que eventuales contaminantes de larga persistencia no alcanzarían las captaciones hasta transcurrido ese plazo de tiempo.

Sus dimensiones se indican en la figura 34. Como se muestra en dicha figura se ha considerado idóneo agrupar las zonas correspondientes a 3 captaciones: Sondeo Puente Alzado (172020001), sondeo Cañada del Abad (172020003) y sondeo Camino del Valle (172020005) al solaparse parcialmente y mantener independiente el correspondiente al sondeo San Bartolomé (172020004).

En la Tabla 38 se detallan las regulaciones y restricciones a imponer a diversas actividades o instalaciones en esta zona, que deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del término municipal, destacando que muchas actividades, especialmente las agrícolas o urbanas, con fuentes potenciales de contaminación de carácter bacteriológico, degradable en un tiempo superior a 50 días, pasan a ser condicionadas o permitidas.

Hay que indicar que en el área que delimita esta zona alejada o de restricciones moderadas existe en la actualidad cultivos de secano (trigo y cebada), así como las instalaciones del

matadero municipal y la depuradora (identificados con los números 9 y 40 en el Mapa 2 y Tabla 11), cuyos actividades quedarían afectadas por la regulación contemplada en el perímetro de protección.



Extensión de la zona próxima o de restricciones máximas de los perímetros de protección.

Figura 33: Zona próxima o de restricciones máximas de los perímetros de protección, obtenida con la simulación efectuada mediante Visual MODFLOW en régimen permanente y la simulación advectiva del transporte con Visual MODPATH para un tiempo de tránsito de 50 días.

Las actividades que se propone regular o restringir en las diferentes zonas del perímetro de protección, indicadas en la Tabla 38, deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del término municipal, ya que como indica el artículo 128.1 del texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 b) *“La Administración General del Estado, las Confederaciones Hidrográficas, las Comunidades Autónomas y las entidades locales, tienen los deberes de recíproca coordinación de sus competencias concurrentes sobre el medio hídrico con incidencia en el modelo de ordenación territorial, en la disponibilidad, calidad y protección de las aguas y, en general, del dominio público hidráulico, así como los deberes de información y colaboración mutua en relación con las iniciativas o proyectos que promuevan”*, como se indicó en el capítulo 5.2.

Las limitaciones que se propone imponer en las tres zonas en que se subdividen los perímetros de protección de los 4 sondeos (figuras 33 y 34), afectan a suelo cuya calificación urbanística actual es de *“suelo no urbanizable general”*.

Las modificaciones introducidas en la clasificación del suelo por la Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre régimen del suelo y valoraciones (BOE, 1998 a), supone que el mantenimiento como *“suelo no urbanizable”* del área definida por los perímetros de protección, requiere dotarlos de un régimen de especial protección (artículo 9 de dicha Ley), lo cual estaría plenamente justificado por la necesidad de establecer limitaciones para la protección del dominio público hidráulico.

Cabe señalar que sería conveniente establecer un Plan de Emergencia, contemplando la eventualidad de que se produjera algún vertido accidental en el ámbito del perímetro de protección, y estableciese un protocolo de actuación para los responsables municipales del suministro de agua potable a la población.

Este permitiría detener con carácter inmediato los bombeos en la zona afectada, al disponer el abastecimiento al municipio de dos sistemas, con conducciones independientes, uno con bombeos anuales de 86724 m³ en los sondeos que captan el acuífero del Terciario detrítico, y otro que proporciona 33276 m³ procedentes de las captaciones en materiales graníticos, como se indicó en el capítulo 7.6.

Al ser altamente improbable una contaminación accidental simultánea en los dos ámbitos, unido a la existencia de depósitos, con una capacidad total de 1440 m³, la cual permite cubrir el suministro actual, sin restricciones, durante 3 días en el período de abril, a septiembre, y de 6 días de octubre a marzo, proporcionaría el tiempo necesario para evaluar la repercusión que tendría esa contaminación accidental, en función de las previsiones y análisis efectuados al elaborar el perímetro de protección, actuando en consecuencia.

Por último, cabe resaltar que la existencia de nueva información podría hacer necesario efectuar una revisión del perímetro de protección, definido en base a los conocimientos del medio físico y la metodología existente en el momento en el que ha sido elaborado, debiéndose contemplar periódicamente si se considera necesario efectuar su revisión y eventual modificación.

TABLA 38. REGULACIONES Y RESTRICCIONES A IMPONER A DIVERSAS ACTIVIDADES E INSTALACIONES EN LAS DIFERENTES ZONAS EN QUE SE SUBDIVIDEN LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD EN LOS 4 SONDEOS DE VILLACASTÍN QUE CAPTAN EL ACUÍFERO DEL TERCIARIO DETRÍTICO. (SONDEO SAN BARTOLOME, PUENTE ALZADO, CAÑADA DEL ABAD Y CAMINO DEL VALLE).

	DEFINICIÓN DE ACTIVIDADES	ZONA DE RESTRICCIONES ABSOLUTAS	ZONA DE RESTRICCIONES MÁXIMAS			ZONA DE RESTRICCIONES MODERADAS		
		Prohibido	Prohib.	Cond.*	Permit.	Prohib.	Cond.*	Permitido
ACTIVIDADES AGRÍCOLAS Y GANADERAS	Uso de fertilizantes	•	•				•	
	Uso de herbicidas	•	•				•	
	Uso de pesticidas	•	•				•	
	Almacenamiento de estiércol	•	•				•	
	Vertido de restos de animales	•	•				•	
	Ganadería intensiva	•	•				•	
	Ganadería extensiva	•	•					•
	Almacenamiento de materias fermentables para alimentación del ganado	•	•				•	
	Abrevaderos y refugios de ganado	•	•				•	
	Silos	•	•				•	
ACTIVIDADES URBANAS	Vertidos de aguas residuales urbanas sobre el terreno	•	•				•	
	Vertidos de aguas residuales urbanas en fosas sépticas o balsas	•	•				•	
	Vertidos de aguas residuales urbanas en cauces públicos	•	•				•	
	Vertido de residuos sólidos urbanos	•	•				•	
	Cementerios	•	•				•	
ACTIVIDADES INDUSTRIALES	Asentamientos industriales	•	•				•	
	Vertido de residuos líquidos industriales	•	•			•		
	Vertido de residuos sólidos industriales	•	•			•		
	Almacenamiento de hidrocarburos	•	•				•	
	Depósito de productos radiactivos	•	•			•		
	Inyección de residuos industriales en pozos y sondeos	•	•			•		
	Conducciones de líquido industrial	•	•			•		
	Conducciones de hidrocarburos	•	•			•		
	Apertura y explotación de canteras	•	•				•	
	Relleno de canteras o excavaciones	•	•				•	
OTRAS	Campings	•	•				•	
	Acceso peatonal	•			•			•
	Transporte redes de comunicación	•		•			•	

* El proyecto de actividades debe incluir un informe técnico sobre las condiciones que debe cumplir para no alterar la calidad existente del agua subterránea.

Modificado de Martínez Navarrete y García García, 2001 b.

12.- ANÁLISIS METODOLÓGICO PARA LA PROTECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN CANTIDAD EN LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO EN MATERIALES DETRÍTICOS

El análisis crítico del encuadre legal de los perímetros de protección “de la cantidad” en las captaciones de abastecimiento urbano, efectuado en el capítulo 5.3 de esta Tesis Doctoral, indicaba la conveniencia de desarrollar mecanismos que permitieran contemplar regulaciones a establecer en un área del acuífero, en el entorno de las captaciones de abastecimiento, para garantizar el volumen extraído destinado al suministro de agua a la población y otras demandas, definiendo ese área, y las regulaciones a establecer, con una metodología adecuada.

Para desarrollarla se ha analizado el tratamiento metodológico otorgado a la protección de la cantidad por diversos autores y organismos (Environment Agency, 1998; Lallemand-Barrès, Roux, 1989 y 1999; Moreno Merino *et al.*, 1991; USEPA, 1987, 1993 a, 1993 b, y 2000), junto con los resultados del análisis de diversos aspectos técnicos y metodológicos realizados en los capítulos precedentes de esta Tesis Doctoral, en las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín.

La metodología que se propone para la protección del recurso hídrico en cantidad, en las captaciones de abastecimiento urbano, se esquematiza en la figura 35 indicándose secuencialmente los estudios a elaborar y diversos métodos aplicables.

ETAPA A:

En primer lugar habría que recopilar y analizar la información existente sobre la unidad hidrogeológica en la que se ubica la captación objeto de protección, especialmente respecto a sus recursos, la Norma general de explotación y las diferentes regulaciones existentes respecto a demandas ambientales, y de otro tipo, así como a las concesiones existentes para abastecimiento y otros usos.

ETAPA B:

En la segunda etapa se procederá a estudiar detalladamente el acuífero explotado por las captaciones de abastecimiento, efectuando un balance hidrogeológico detallado, cuantificando sus recursos y reservas (si es posible) y contemplando las limitaciones establecidas al recurso en la Unidad hidrogeológica que le afecten efectuándose los estudios indicados en la etapa B en la figura 35. Habría que analizar además la relación del acuífero con otros, tanto física como de gestión del recurso hídrico.

El análisis de la piezometría en diferentes estaciones y diferentes sectores permite, además de caracterizar el funcionamiento hidrogeológico del acuífero, contrastar los datos del balance, siendo de gran utilidad para delimitar zonas de protección, excepto en los casos en que existan grandes cambios de niveles y de direcciones de flujo estacionales o muy variables.

En el caso, muy frecuente, de que no exista una concesión específica para el abastecimiento, habrá que obtener el caudal necesario para abastecer a la población partiendo de las dotaciones previstas para estas en los Planes Hidrológicos de cuenca, efectuando la distribución del volumen necesario entre las captaciones de abastecimiento existentes, en función de sus características y la infraestructura municipal.

El dato de caudal se empleará posteriormente en los diferentes métodos existentes para definir zonas de protección, y será básico para definir cuándo se produciría afección a la captación de abastecimiento, al definirse esa afección como la “disminución del caudal realmente aprovechable o un deterioro de su calidad que lo haga inutilizable para el fin a que se dedicaba, y que sea consecuencia directa y demostrada del nuevo aprovechamiento, pero no la simple variación del nivel de agua en un pozo o la merma de caudal en una galería o manantial, si el remanente disponible es igual o superior al aprovechado (Artículo 184 del R.D.P.H. BOE, 1986).

ETAPA C:

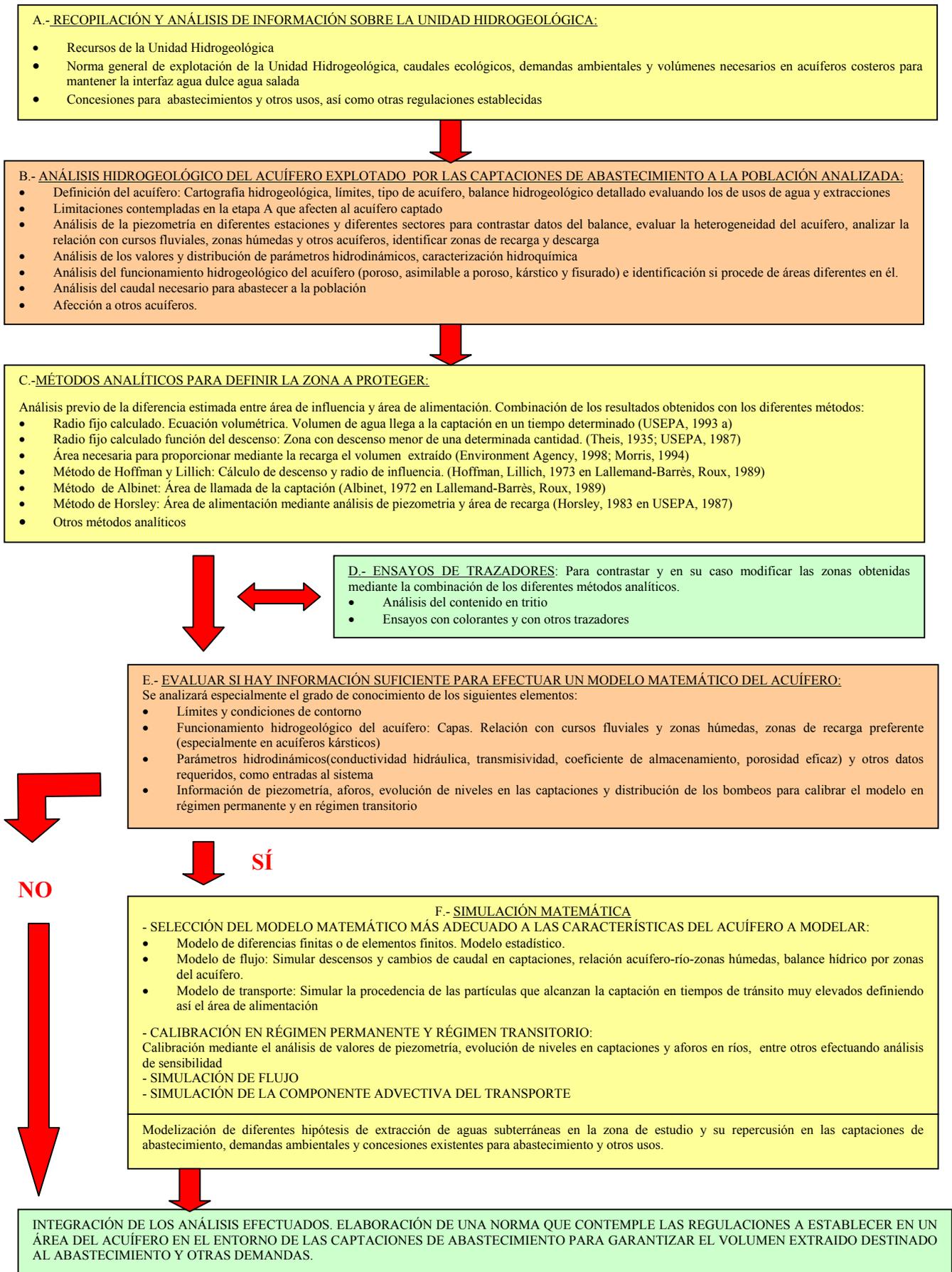
La recopilación crítica de información y el análisis hidrogeológico detallado del acuífero captado, efectuado en las primeras etapas del estudio, debe complementarse con la aplicación de otros métodos para definir con mayor precisión la zona a proteger, recomendándose inicialmente la aplicación de métodos analíticos o de parámetros agregados, como primera aproximación, combinándose los resultados obtenidos en la aplicación de cada uno de ellos.

En la Figura 35 se indican alguno de los métodos analíticos más utilizados:

- El método del radio fijo calculado. Ecuación volumétrica (USEPA, 1993), delimita el área de un cilindro de acuífero necesario para proporcionar el caudal bombeado, considerando que procede íntegramente del agua almacenada, definida por el volumen de cilindro y la porosidad eficaz, considerando la recarga despreciable. Ha sido descrito en el capítulo 9.3, indicándose también en el mismo los resultados de su aplicación a las captaciones de abastecimiento en el Terciario detrítico de Villacastín.
- Método que delimita el área necesaria para proporcionar mediante la recarga el volumen extraído (Environment Agency, 1998; Morris, 1994), su descripción y resultados obtenidos tras su aplicación se indican igualmente en el capítulo 9.4.
- El método del radio fijo calculado. Función del Descenso (Theis 1935; USEPA, 1987) se ha descrito en el capítulo 9.4, junto con los resultados obtenidos en su aplicación a las mismas captaciones.
- El método de Albinet (Albinet, 1972 en Lallemand-Barrès, Roux, 1989) emplea la misma ecuación de Theis (Theis, 1935) para el régimen transitorio, con idéntica formulación que el método anterior, del radio fijo calculado, función del descenso, para obtener las curvas de descenso en función de la distancia a la captación.

Estas se superponen a los valores de piezometría previos al bombeo, calculando por sustracción los valores modificados de la carga hidráulica. A partir de esos valores se trazan las isopiezas resultantes tras el bombeo, y las líneas de corriente hasta la captación, definiendo así el área de llamada de la captación.

Figura 35: Metodología para la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano.



- El método de Hoffman y Lillich (Hoffman, Lillich, 1973 en Lallemand-Barrès, Roux, 1989).

Es un método iterativo aplicable en medios homogéneos cuando el descenso provocado por el bombeo es pequeño en relación al espesor del acuífero. El descenso en las proximidades de una captación puede describirse como:

$$h - h_w = (h_0 - h_w) \frac{\ln(l/r)}{\ln(R/r)} \quad \text{acuífero confinado}$$

$$(h - h_w)^2 = (h_0 - h_w)^2 \frac{\ln(l/r)}{\ln(R/r)} \quad \text{acuífero libre. Si el descenso es menor que } 1/10 \text{ de la potencia del acuífero se puede emplear la ecuación del acuífero confinado.}$$

Donde:

h = nivel piezométrico en relación a un nivel de referencia en un punto dado.

l = distancia de ese punto a la captación.

h_w = nivel dinámico en el pozo respecto al nivel de referencia

h_0 = nivel piezométrico en reposo respecto al nivel de referencia

R = radio de influencia

r = Radio del pozo

Para aplicar este método (Figura 36) se sigue el siguiente procedimiento:

1º) El gradiente: $i = \frac{(h-h_w)}{l}$

2º) La velocidad eficaz $V_e = \frac{k \cdot i}{m_e}$

Donde:

K = Conductividad hidráulica

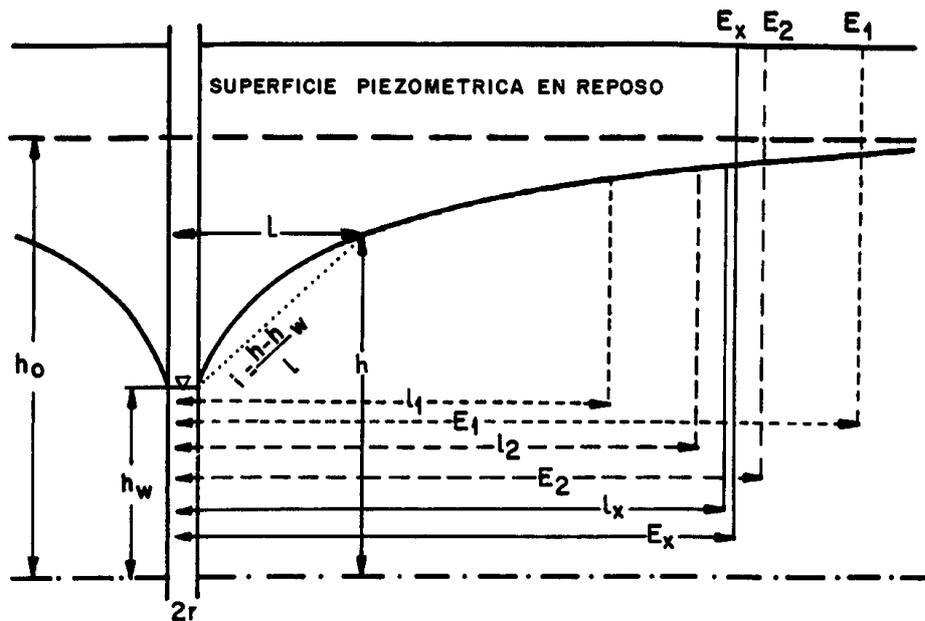
i = Gradiente hidráulico

m_e = Porosidad eficaz

3º) La distancia correspondiente a un tiempo de tránsito t es:

$$d = V_e \cdot t$$

Se trata entonces de encontrar, por tanto, la distancia l para la cual (siguiendo el procedimiento descrito en los pasos 1 a 3) esta tenga el mismo valor que la distancia d .



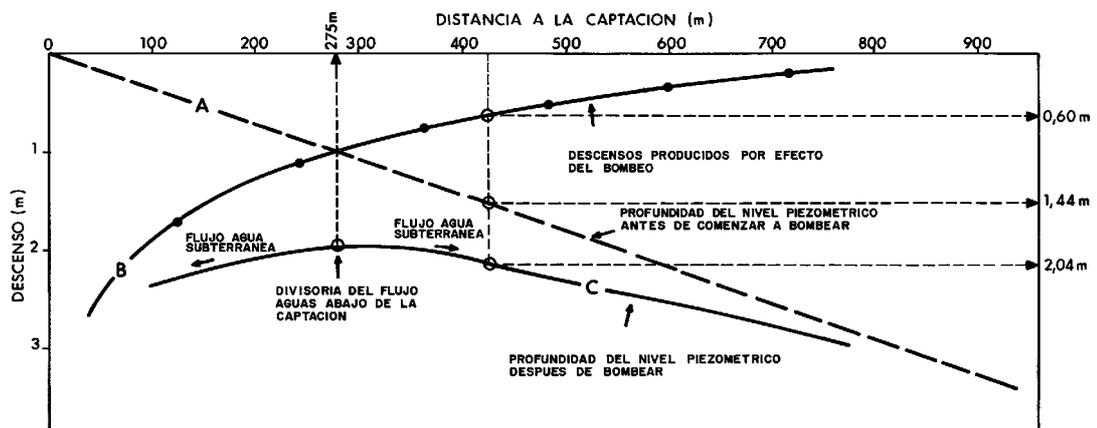
Fuente: Hoffman y Lillich, 1973, en Moreno Merino et al., 1991.

Figura 36. Aplicación del método de Hoffman y Lillich.

- El método de Horsley (Horsley, 1983 en USEPA, 1987). Define la zona de protección en 3 fases: En la primera obtiene la distancia; aguas abajo del flujo, en la que termina la zona de llamada (y por lo tanto las líneas de corriente ya no se dirigirán hacia la captación).

Para ello representa en una gráfica (Figura 37 a), la variación del nivel piezométrico antes de comenzar el bombeo (curva A) al alejarse de la explotación y el cono de bombeo que se produce por efecto de las extracciones (curva B).

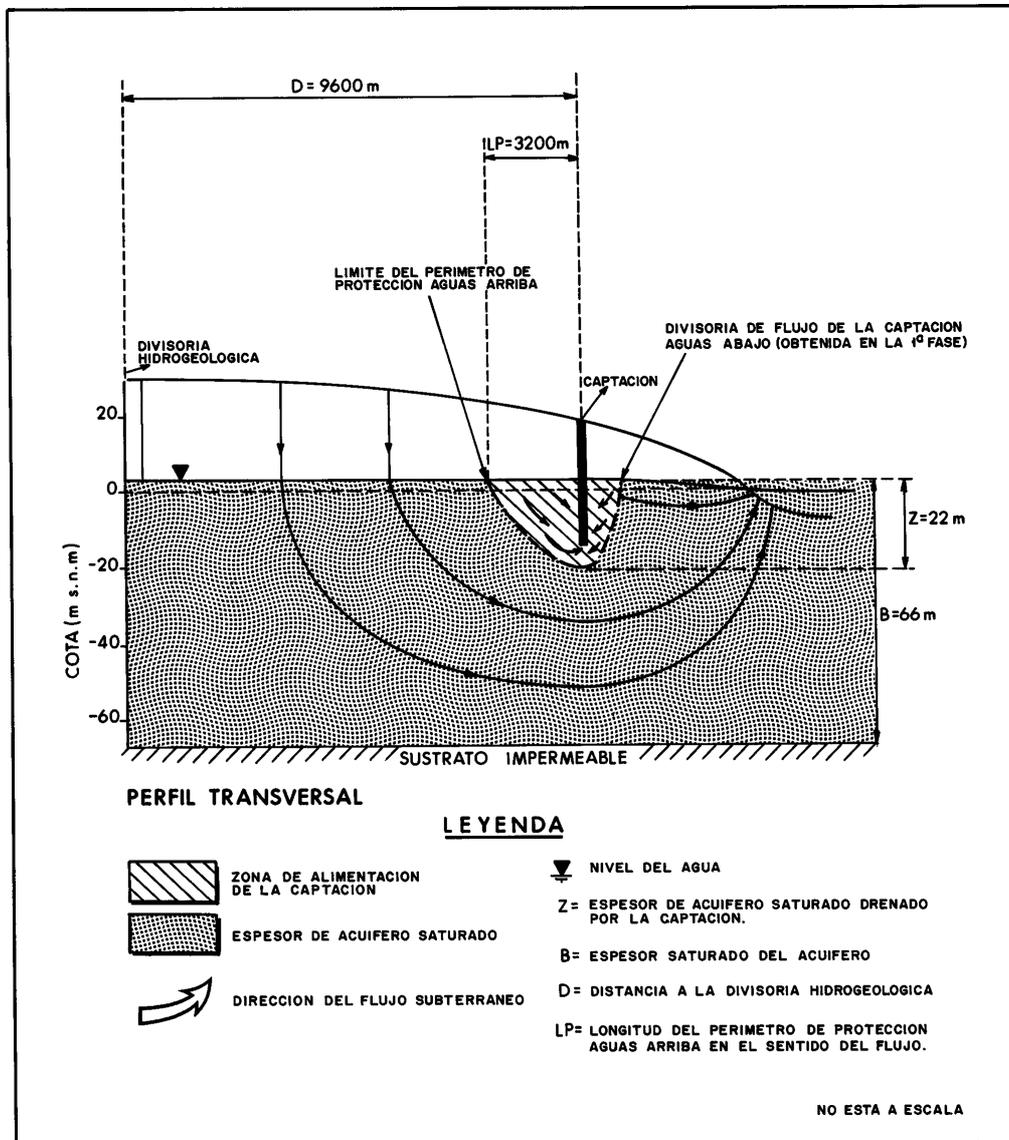
El punto de inflexión en la curva, suma de ambas, indica la distancia a la divisoria del flujo aguas abajo.



Modificado de Horsley, 1983.

Figura 37 a: Aplicación del método de Horsley.

En la segunda fase delimita la extensión del perímetro aguas arriba. Para ello calcula qué proporción existe entre la profundidad del sondeo y el espesor saturado del acuífero, aplicando la misma proporción (Figura 37 b), a la distancia existente hasta la divisoria hidrogeológica aguas arriba de la captación.



Modificada de Horsley, 1983.

Figura 37 b: Aplicación del método de Horsley.

En la tercera fase calcula el área que necesita para proporcionar el caudal extraído por el sondeo, en función de la recarga existente.

Emplea:

$$A = \frac{Q}{N}$$

Donde:

A = Área de alimentación (m^2)

Q = Caudal anual medio de explotación $m^3/año$

N = Recarga anual media a largo plazo $m/año$

Esta área, junto con la distancia aguas arriba y aguas abajo, permite delimitar el perímetro de protección resultante.

ETAPA D:

Es muy conveniente contrastar y, en su caso, modificar las zonas obtenidas mediante la combinación de los diferentes métodos analíticos efectuando ensayos de trazadores, destacando el empleo del análisis del contenido en tritio y el empleo de colorantes como la fluoresceína, al ser especialmente adecuadas para este tipo de estudios.

ETAPA E:

Consiste en evaluar si se dispone de la información suficiente para poder efectuar un modelo matemático del acuífero.

Para ello es imprescindible analizar el grado de conocimiento respecto a los límites y condiciones de contorno, funcionamiento hidrogeológico del acuífero, valores de piezometría y de parámetros hidráulicos, entre otros factores referidos en la Figura 35.

En caso de que no se disponga de suficiente información se dará por terminado el análisis, integrando los resultados obtenidos previamente.

ETAPA F:

La simulación matemática, que se realiza cuando se dispone de información suficiente para la ejecución, y calibrado del modelo, consta de las siguientes fases:

- Selección del modelo matemático más adecuado a las características del acuífero a modelar.
- Calibración en régimen permanente y transitorio.
- Simulación de flujo.
- Simulación de la componente advectiva del transporte.

Cabe indicar especialmente que, si bien lo más habitual es el empleo de modelos de flujo para definir la protección de la cantidad también puede emplearse la simulación de la componente advectiva del transporte simulando la procedencia de las partículas para tiempos de tránsito muy elevados, lo que permitiría definir el área de alimentación (Rayne *et al.*, 2001).

La simulación matemática permite modelizar diferentes hipótesis de extracción de aguas subterráneas en la zona de estudio, y su repercusión en las captaciones de abastecimiento, demandas ambientales y concesiones existentes para abastecimiento y otros usos, por lo que constituye una herramienta muy útil para definir la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano.

La metodología descrita debe concluir con la integración de los análisis efectuados y la elaboración de una norma que contemple las regulaciones a establecer en un área del

acuífero, en el entorno de las captaciones de abastecimiento, para garantizar el volumen extraído destinado al abastecimiento y otras demandas.

Esta incluirá el volumen global máximo de extracción en el entorno delimitado, la cuantía máxima de extracción para captaciones distintas de la que es objeto de protección, demandas ambientales, profundidades de sondeos y de instalación de bombas, distancias mínimas a la captación protegida entre otras a definir en una propuesta legal de contenido de una norma relativa a estos aspectos.

13.- PROTECCIÓN DE LA CANTIDAD EN LOS SONDEOS DE ABASTECIMIENTO DE VILLACASTÍN QUE CAPTAN EL ACUÍFERO DETRÍTICO DEL TERCIARIO

En este capítulo se efectúa una evaluación de la zona a delimitar y las medidas a establecer en la misma para proteger en cantidad los cuatro sondeos de abastecimiento que captan el acuífero detrítico del terciario en base a la aplicación de la metodología y propuestas contempladas en el capítulo 12.

Para definir el contenido de la Norma que contemple las regulaciones a establecer en un área del acuífero en el entorno de las captaciones para garantizar el volumen extraído destinado al abastecimiento y otras demandas se empleará los análisis y la información reflejados en los capítulos precedentes, destacando especialmente la contemplada en el capítulo 7 (Análisis de la información requerida para delimitar perímetros de protección a las captaciones de abastecimiento urbano. Aplicación al caso de la localidad de Villacastín (Segovia), así como la referente a la aplicación de los modelos matemáticos, especialmente Visual MODFLOW y su módulo “Zone Budget” (capítulo 9.11 y Anexos).

Hay que resaltar inicialmente que el Plan Hidrológico de la cuenca del Duero contempla que: *“se establecerán las Normas de Explotación de las Unidades Hidrogeológicas, que no podrán abordarse hasta completar la delimitación de las mismas y su inventario, actualmente en elaboración”*. Al no ser posible por tanto disponer aún de dichas Normas de Explotación, con su previsible repercusión en la zona analizada, se efectuará en base a criterios propios.

Se considera imprescindible garantizar:

- Los 4 sondeos de abastecimiento urbano en el acuífero detrítico del Terciario deben permitir obtener, a largo plazo, todo el volumen requerido para el abastecimiento a la población (120.000 m³/año) al no existir otros acuíferos en la zona. Reservándose los pozos en el acuífero granítico como fuente de suministro puntual alternativo.
- Los niveles de dichas captaciones deben ser estables a largo plazo
- Los arroyos que surcan el término municipal no deben secarse y deberán continuar siendo ganadores para evitar cambios de flujo que pudieran favorecer la contaminación de las captaciones, permitiendo el mantenimiento de la vegetación y fauna asociada a los arroyos.
- Permitir otros bombeos siempre que no impidan que se alcancen los requisitos precedentes.

El análisis efectuado en los capítulos precedentes de esta Tesis Doctoral cubre las etapas A,B,C indicadas en la metodología propuesta para proteger el recurso hídrico en cantidad desarrolladas en el capítulo 12, sintetizada en la Figura 35, y han permitido utilizar un modelo matemático (como se contemplaba en los apartados E y F de la misma).

El modelo matemático, una vez calibrado, como ha sido detallado en el capítulo 9.11 y el Anexo 1, ha permitido simular el comportamiento del acuífero, en régimen permanente, con un bombeo continuo de las 4 captaciones de abastecimiento y de otras dos captaciones más, obteniéndose los niveles piezométricos que se producirían.

Resalta que el acuífero soporta a largo plazo un bombeo continuo de 81 m³/día en cada una de las 4 captaciones de abastecimiento y otros dos bombeos adicionales de 21 m³/día en

el sondeo 172010003 (Gasolinera) y de 25 m³/día en el sondeo 172020006 (Granja de Huevos Velasco), produciéndose unos descensos de nivel asumibles, manteniéndose un flujo hacia los arroyos. Esta situación se observa en los perfiles de las filas 6 y 8 (Figuras 38 y 39 respectivamente, cuya ubicación en el área modelada se indica en la Figura 40.

Para avanzar en el análisis de la protección en cantidad de las captaciones de abastecimiento se ha empleado además el módulo “Zone Budget” del programa Visual MODFLOW.

Este módulo permite efectuar balances hídricos de entradas y salidas al acuífero por zonas, empleando los resultados procedentes de la simulación efectuada con MODFLOW, en régimen permanente o transitorio, especificando el usuario en qué regiones quiere que se calculen éstos.

En la Figura 40 se indican las cinco zonas seleccionadas. Estas son:

- Zona 1: Todo el área modelada excepto la incluida en las zonas 2-3-4-5.
- Zona 2: Arroyos de la Asperilla y de la Casa del Caballero (al oeste).
- Zona 3: Arroyos de los Prados y del Valle (que discurre junto a las captaciones de abastecimiento).
- Zona 4: Sondeo de abastecimiento San Bartolomé (172020004) y de la Granja Avícola Velasco (172020006).
- Zona 5: Límite septentrional de la zona simulada.

En la Figura 41 se muestra el flujo total de entradas y salidas en cada zona.

En la Figura 42 se muestra el flujo de entrada a cada una de las 5 zonas desglosado por su procedencia (celdas de nivel constante, pozos, drenes, recarga y zonas externas) y en la Figura 43 el correspondiente a las salidas desglosando igualmente su destino.

En la Tabla 39 se muestra cuantitativamente el balance de masas que el programa efectúa para la totalidad del área simulada. Cabe indicar:

- El modelo considera que la recarga en las celdas de nivel constante (5 celdas) es cero, por lo que es una cantidad ligeramente inferior a la obtenida si se hace el cálculo analíticamente (122 celdas activas x 500 m x 500 m x 0,0009 m/día = 2745 m³/día).
- El agua bombeada se corresponde lógicamente con la indicada (81 m³/día x 4 sondeos de abastecimiento + 22 m³/día, sondeo gasolinera, + 25 m³/día Granja Huevos Velasco= 371 m³/día).

El programa proporciona que fluyen 1931 m³/día por las celdas de nivel constante y que los drenes (es decir el conjunto de los arroyos en la zona simulada, zona 2 y zona 3) drenan 331 m³/día es decir 3,8 L/s, salidas superficiales y subterráneas del sistema).

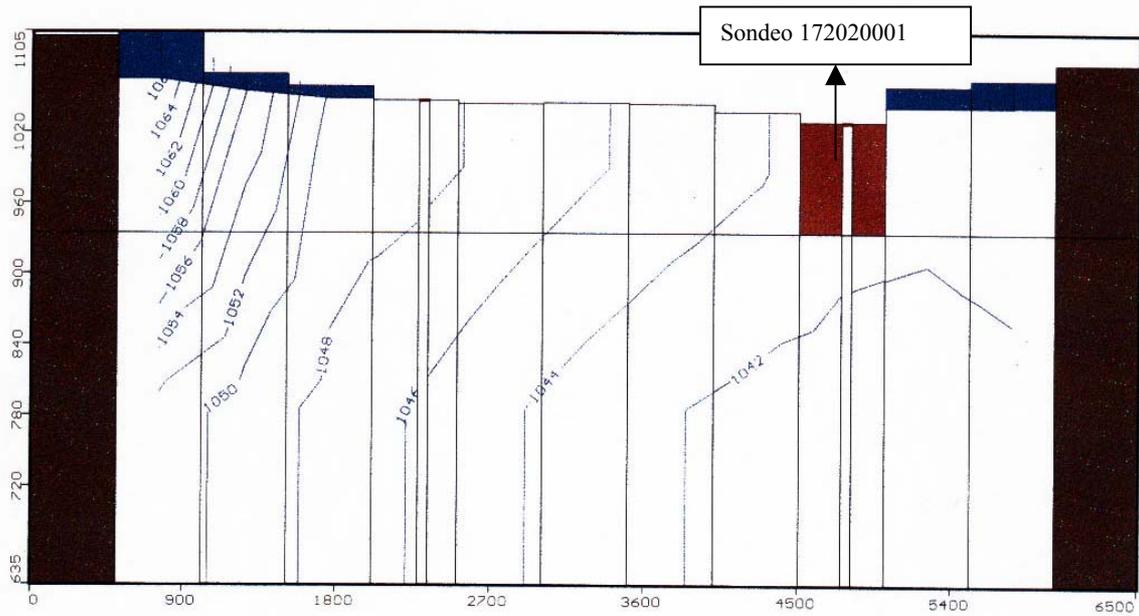


Figura 38: Perfil en la fila 6 del área modelada (Figura 40). Simulación con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente.

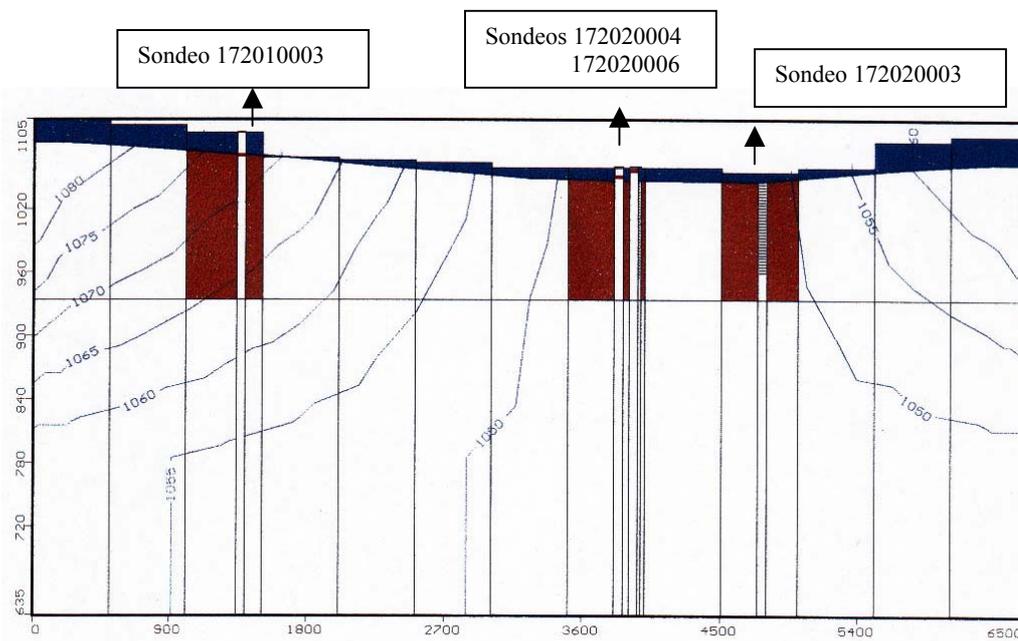


Figura 39: Perfil en la fila 8 del área modelada (Figura 40). Simulación con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente.

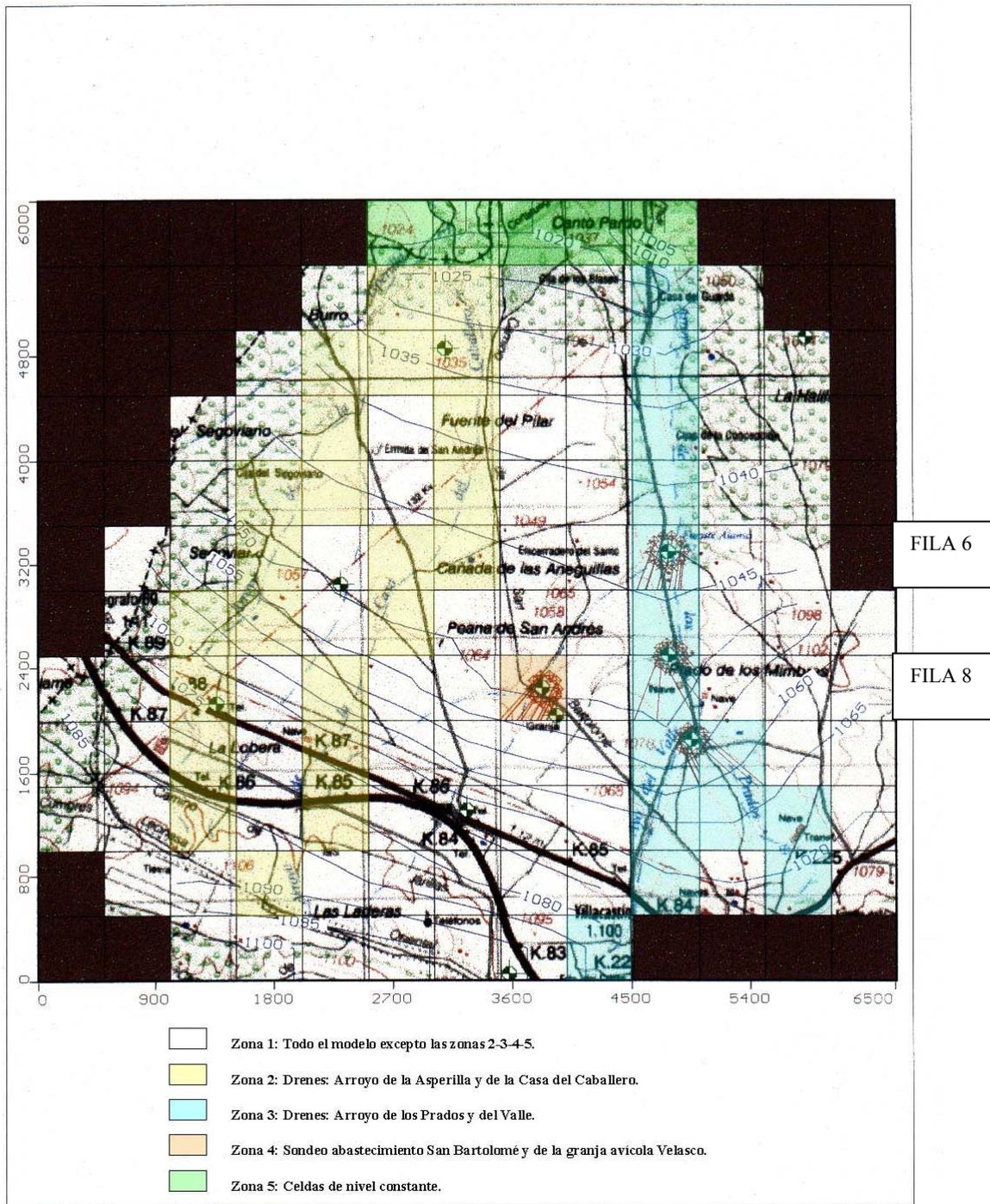
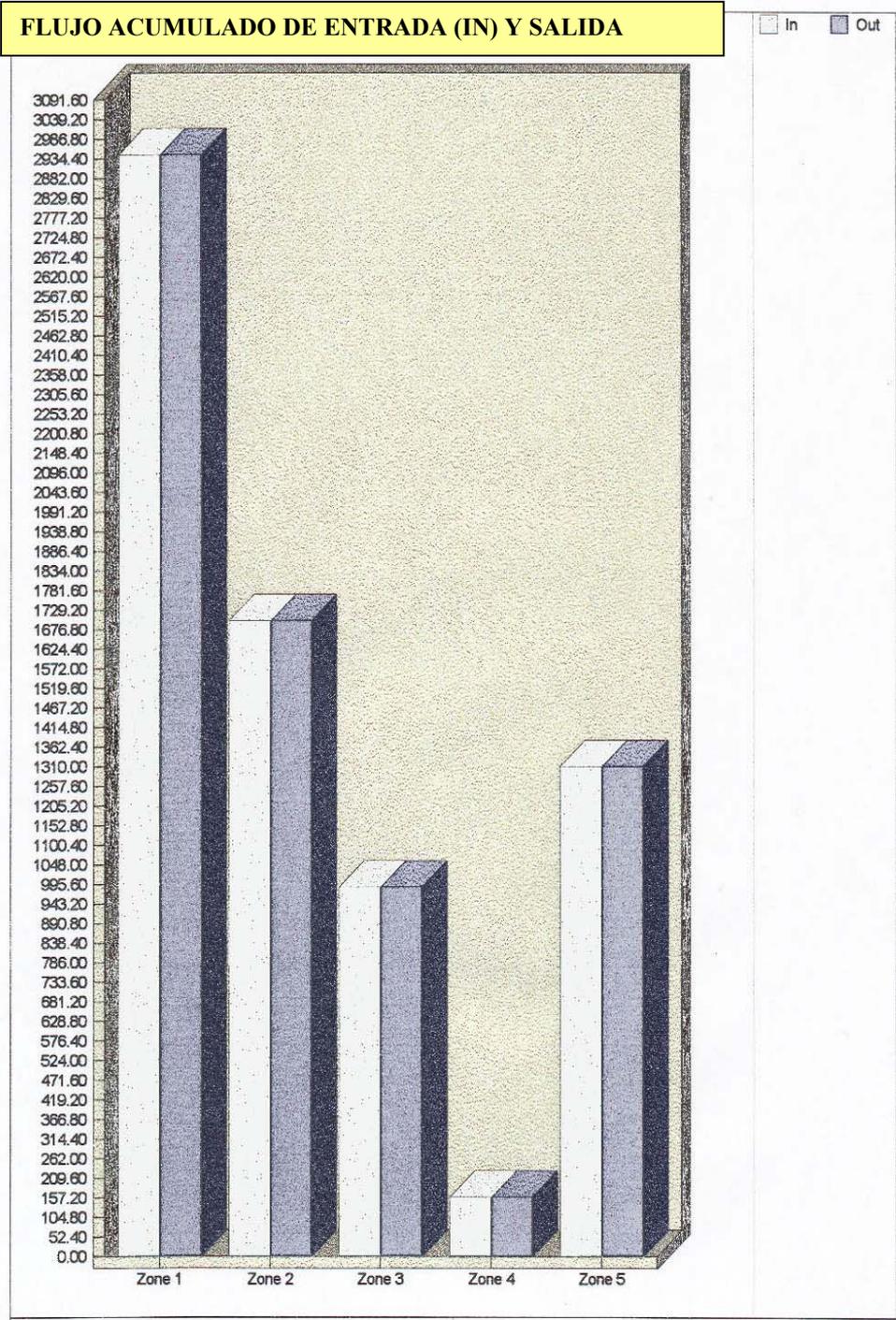


Figura 40: Zonas en las que se aplica la simulación con el programa Zone Budget.



Zona 1: Resto del modelo no incluido en zonas 2-3-4-5

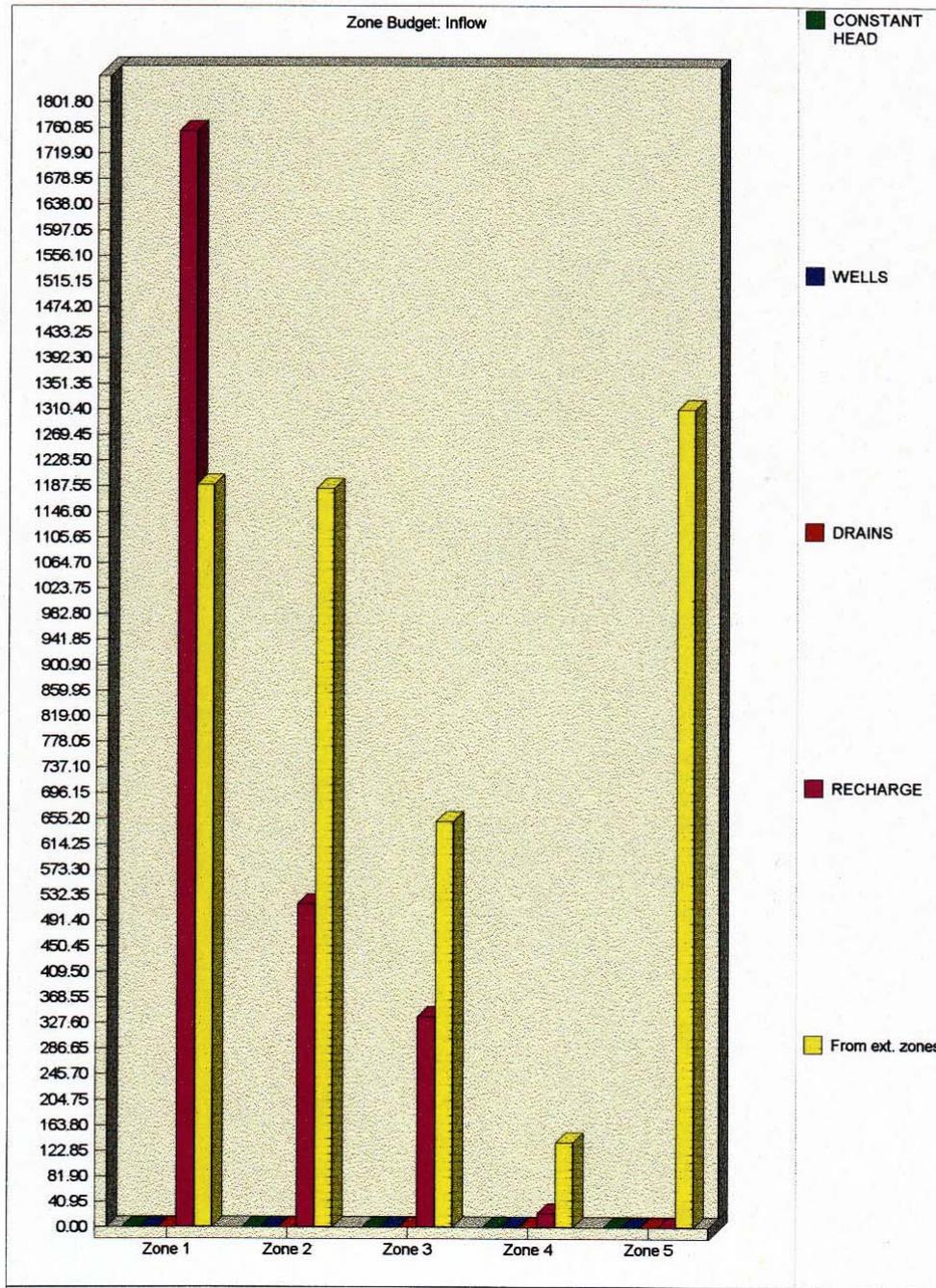
Zona 2: Drenes arroyo de la Asperilla y de la casa del caballero (al oeste).

Zona 3: Drenes arroyo de los Prados y del Valle (al este).

Zona 4: Sondeo de abastecimiento San Bartolomé y de la granja Avícola Velasco.

Zona 5: Celdas de nivel constante (límite norte de la zona modelada).

Figura 41: Flujo acumulado ($m^3/día$) de entrada y salida en las zonas seleccionadas.



Zona 1: Resto del modelo no incluido en zonas 2-3-4-5

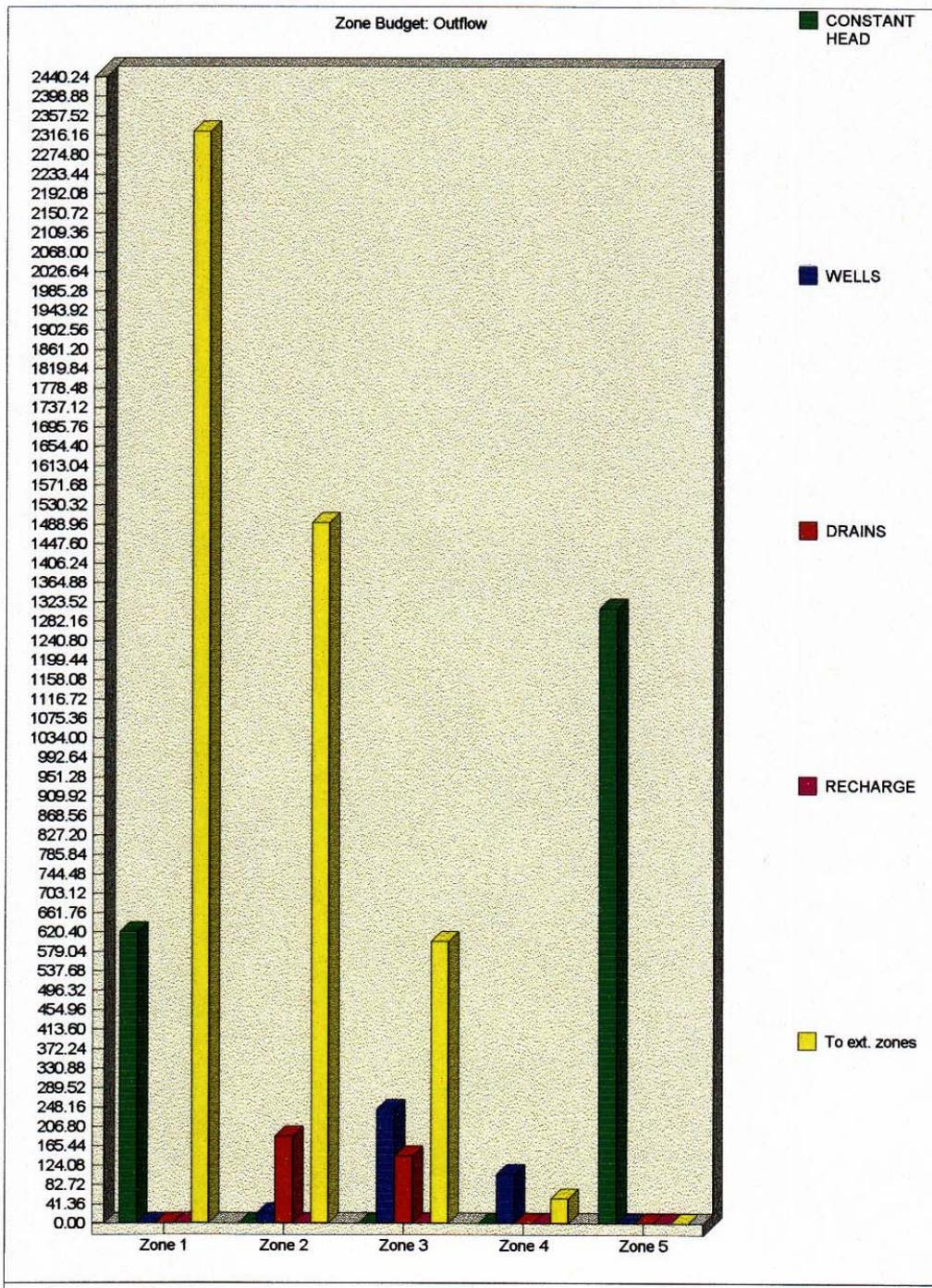
Zona 2: Drenes arroyo de la Asperilla y de la Casa del Caballero (al oeste)

Zona 3: Drenes arroyo de los Prados y del Valle (al este)

Zona 4: Sondeo de abastecimiento San Bartolomé y de la Granja Avícola Velasco.

Zona 5: Celdas de nivel constante (límite norte de la zona modelada).

Figura 42: Flujo de entrada ($m^3/día$) a cada una de las cinco zonas desglosado por su procedencia (celdas de nivel constante, pozos, drenes, recarga y zonas externas).



- Zona 1: Resto del modelo no incluido en zonas 2-3-4-5
- Zona 2: Drenes arroyo de la Asperilla y de la Casa del Caballero (al oeste)
- Zona 3: Drenes arroyo de los Prados y del Valle (al este)
- Zona 4: Sondeo de abastecimiento San Bartolomé y de la Granja Avícola Velasco.
- Zona 5: Celdas de nivel constante (límite norte de la zona modelada).

Figura 43: Flujo de salida ($m^3/día$) de cada una de las cinco zonas desglosado por su destino (celdas de nivel constante, pozos, drenes, recarga y zonas externas)

BALANCE DE MASA

Volúmenes acumulados Todo el área simulada

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante = 0.000000
Pozos = 0.000000
Arroyos (drenes) = 0.000000
Recarga = 2632.500000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Entradas totales = 2632.500000 m ³ /día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante = 1930.712500
Pozos = 370.600000
Arroyos (drenes) = 331.188200
Recarga = 0.000000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Salidas totales = 2632.500700 m ³ /día
Entradas-salidas = -0.000732
% Discrepancia = 0.000000

Tabla 39.- Balance de masas para la totalidad del área simulada.

Por su parte en las Tablas 40, 41 y 42 se refleja el balance correspondiente a cada una de las cinco zonas indicadas. Cabe destacar:

- Balance correspondiente a la zona 2 (Arroyos de la Asperilla y de la Casa del Caballero, al oeste):

Las entradas se deben a la recarga por infiltración de la precipitación y procedente de la zona 1 del acuífero. Las salidas se producen hacia las celdas de nivel constante y otras zonas, así como al bombeo de unos 22 m³/día en el sondeo de la gasolinera.

Hay que resaltar especialmente por su interés para los objetivos planteados, que fluyen hacia los drenes (arroyos) 186 m³/día, es decir 2,1 L/s evacuan los arroyos del acuífero.

La zona 2 es por tanto ganadora en su balance con la zona 1 (Tiene un superavit de 159 m³/día) y los drenes, con los bombeos previstos, reciben agua, es decir el arroyo es ganador y su aforo simulado es de 2,1 L/s.

- Balance correspondiente a la zona 3 (Arroyos de los Prados y del Valle):

Las entradas se deben a recarga por infiltración de la precipitación y procedente de la zona 1.

Las salidas se producen hacia las celdas de nivel constante y la zona 1, así como al bombeo de 3 sondeos de abastecimiento (que coinciden con celdas de esta zona al estar próximo al arroyo), $81 \text{ m}^3/\text{día} \times 3 = 243 \text{ m}^3/\text{día}$.

Como en el caso anterior hay que destacar que esta zona es también ganadora en su relación con la zona 1. Por su parte los drenes actúan, evacuando $145 \text{ m}^3/\text{día}$, es decir el arroyo es ganador y su aforo simulado es de $1,7 \text{ L/s}$.

Balance correspondiente a la zona 4:

Las entradas proceden de la recarga y de la zona 1 y las salidas se producen hacia la zona 1 y al bombeo ($81 \text{ m}^3/\text{día}$ de un sondeo de abastecimiento junto con $25 \text{ m}^3/\text{día}$ de una granja, lo cual supone en total $106 \text{ m}^3/\text{día}$).

- Balance correspondiente a la zona 5 (celdas de nivel constante):

Esta zona recibe entradas procedentes de las demás con las que está en contacto (zonas 1, 2 y 3) sin presentar salida hacia las mismas (lo que no habría tenido ningún sentido hidrogeológico).

Esta zona aporta al resto de la cuenca del Duero $1310 \text{ m}^3/\text{día}$.

Los balances obtenidos empleando el módulo “Zone Budget” del programa Visual MODFLOW han corroborado las conclusiones obtenidas en la simulación empleando Visual MODFLOW para delimitación de perímetros de protección en calidad que indicaban que el acuífero soportaba a largo plazo los bombeos previstos, con descensos asumibles, manteniéndose un flujo hacia los arroyos permitiendo cuantificar los balances resultantes.

Su análisis ha indicado que se cumplen las premisas consideradas imprescindibles, detalladas previamente en este capítulo (los 4 sondeos de abastecimiento urbano en el acuífero detrítico del Terciario deben permitir obtener a largo plazo los $120.000 \text{ m}^3/\text{año}$ requeridos para abastecer a la población, los niveles de estas captaciones deben ser estables a largo plazo, los arroyos no deben secarse y permitirse otros bombeos solamente en el caso de que no impidan que se alcancen los anteriores requisitos). No obstante para mantener la condición de ganadores para los arroyos y los bombeos previstos no cabe permitir nuevos bombeos al considerarse, entre otros aspectos, el caudal simulado en los arroyos ($2,1 \text{ L/s}$ y $1,7 \text{ L/s}$) como un valor que no puede sufrir nuevas reducciones.

**BALANCE CORRESPONDIENTE A
CADA ZONA SELECCIONADA**

**Zona 1: Todo el modelo excepto lo
incluido en zonas 2-3-4 y 5.**

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante = 0.000000
Pozos = 0.000000
Arroyos (drenes) = 0.000000
Recarga = 1755.000000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Zona 2 a 1 = 1024.500000
Zona 3 a 1 = 111.860000
Zona 4 a 1 = 53.145000
Zona 5 a 1 = 0.000000
Entradas totales = 2944.500000 m ³ /día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante = 620.240000
Pozos = 0.000000
Arroyos (drenes) = 0.000000
Recarga = 0.000000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Zona 1 a 2 = 1183.500000
Zona 1 a 3 = 650.430000
Zona 1 a 4 = 136.640000
Zona 1 a 5 = 353.720000
Salidas totales = 2944.500000 m ³ /día

Zona 2: Drenes (arroyos) del oeste

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante. = 0.000000
Pozos = 0.000000
Arroyos (drenes) = 0.000000
Recarga = 517.500000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Zona 1 a 2 = 1183.500000
Zona 5 a 2 = 0.000000
Entradas totales = 1701.000000 m ³ /día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante. = 0.000000
Pozos = 21.600000
Arroyos (drenes) = 186.380000
Recarga = 0.000000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Zona 2 a 1 = 1024.500000
Zona 2 a 5 = 468.490000
Salidas totales = 1701.000000 m ³ /día

Tabla 40.- Balance correspondiente a las zonas 1 y 2.

**BALANCE CORRESPONDIENTE A
CADA ZONA SELECCIONADA**

Zona 3: Drenes (arroyos) del este.

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante = 0.000000
Pozos = 0.000000
Arroyos (drenes) = 0.000000
Recarga = 337.500000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Zona 1 a 3 = 650.430000
Zona 5 a 3 = 0.000000
Entradas totales = 987.930000 m ³ /día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante = 0.000000
Pozos = 243.000000
Arroyos (drenes) = 144.810000
Recarga = 0.000000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Zona 3 a 1 = 111.860000
Zona 3 a 5 = 488.260000
Salidas totales = 987.930000 m ³ /día

**Zona 4: Celda de bombeo
Abastecimiento y granja**

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante = 0.000000
Pozos = 0.000000
Arroyos (drenes) = 0.000000
Recarga = 22.500000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Zona 1 a 4 = 136.640000
Entradas totales = 159.140000 m ³ /día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante = 0.000000
Pozos = 106.000000
Arroyos (drenes) = 0.000000
Recarga = 0.000000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Zona 4 a 1 = 53.145000
Salidas totales = 159.140000 m ³ /día

Tabla 41. Balance correspondiente a las zonas 3 y 4.

**BALANCE CORRESPONDIENTE A
CADA ZONA SELECCIONADA**

Zona 5: Celdas de nivel constante.

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante = 0.000000
Pozos = 0.000000
Arroyos (drenes) = 0.000000
Recarga = 0.000000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Zona 1 a 5 = 353.720000
Zona 2 a 5 = 468.490000
Zona 3 a 5 = 488.260000
Entradas totales = 1310.500000 m ³ /día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento = 0.000000
Celdas nivel constante = 1310.500000
Pozos = 0.000000
Arroyos (drenes) = 0.000000
Recarga = 0.000000
Evapotranspiración = 0.000000
Pérdida/ganancia de los ríos = 0.000000
Límites de nivel = 0.000000
Zona 5 a 1 = 0.000000
Zona 5 a 2 = 0.000000
Zona 5 a 3 = 0.000000
Salidas totales = 1310.500000 m ³ /día

Tabla 42.- Balance correspondiente a la zona 5.

La norma que define las regulaciones que se propone establecer en un área del acuífero del Terciario detrítico captado para el abastecimiento de la localidad de Villacastín, para garantizar el volumen destinado al abastecimiento a la población y otros usos, es la siguiente:

1. Se define una única zona para proteger en cantidad los 4 sondeos de abastecimiento que captan el acuífero del Terciario detrítico, garantizar los caudales ecológicos y minimizar el impacto ambiental de los bombeos.
2. Su tamaño coincide con la totalidad del área simulada (Figura 40).
3. Los bombeos para abastecimiento urbano en dicha zona se destinarán exclusivamente a subsanar las necesidades de abastecimiento de la población de Villacastín (120.000 m³/año) distribuyéndose entre los 4 sondeos de abastecimiento ya existentes (Sondeos: Camino del Valle, Cañada del Abad, Puente Alzado y San Bartolomé), sin realizar modificaciones en su profundidad (96 metros), efectuándose un bombeo máximo de 81 m³/día en cada uno de ellos.

Se autoriza proceder a la limpieza o sustitución de tuberías o equipos deteriorados en los mismos. En el caso de quedar inutilizado, por derrumbe u otras causas, podrán ser sustituidos por un nuevo sondeo, de características similares, ubicado lo más próximo posible a los actuales.

4. Se autoriza además continuar bombeos a largo plazo en las captaciones siguientes:
 - Sondeo 172010003. Sondeo que abastece dos gasolineras y un restaurante con un bombeo de 22 m³/día.
 - Sondeo 172020006. Sondeo que abastece a la Granja Avícola Velasco con un bombeo de 25 m³/día.

La limpieza, acondicionamiento y eventual sustitución de los mismos cumplirá los mismos requisitos indicados previamente para los sondeos de abastecimiento.

5. No se autoriza efectuar nuevas captaciones en la totalidad del área modelada excepto en los supuestos de sustitución de los actuales, reseñados en los puntos 3 y 4 de esta Norma.
6. Se señalizará en el terreno mediante carteles que en esa zona existe una Norma que impide efectuar nuevas captaciones.
7. Se controlará periódicamente que se cumplen las previsiones de la simulación respecto a los arroyos (flujo estimado en 2,1 L/s y 1,7 L/s) que no deben secarse y tienen que continuar siendo ganadores, y que los descensos de niveles observados en los sondeos se mantienen estables a largo plazo.

En el caso de producirse desviaciones respecto a lo simulado se procedería a la revisión inmediata de estas Normas contemplándose en primer lugar, si fuera preciso, reducir los bombeos indicados en el punto 4.

14.- RESUMEN, RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Esta Tesis Doctoral se ha centrado en la elaboración de una propuesta metodológica para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos detríticos, entendiendo dichos perímetros como un área entorno a una captación en la cual, de forma graduada, se restringen o prohíben las actividades o instalaciones susceptibles de contaminar las aguas subterráneas o que afecten al caudal aprovechado para el abastecimiento a una población.

Este sistema lleva décadas siendo aplicado satisfactoriamente en numerosos países. Por el contrario en España, pese a la gran importancia de las aguas subterráneas para el abastecimiento a la población, especialmente de núcleos medios y pequeños, la implantación real en el terreno de las restricciones a la calidad, así como las referentes a la cantidad del recurso que conllevan, es muy reducida.

La amplia extensión que tienen en España los acuíferos de materiales detríticos no consolidados, sus características, que los hacen especialmente indicados para la delimitación de perímetros de protección, y las numerosas poblaciones ubicadas en los mismos, supone que sea prioritario definir una metodología integral para la implantación de dichos perímetros, que pueda ayudar además a la ordenación del territorio en el ámbito local autonómico y de las cuencas hidrográficas.

Los principales resultados del análisis metodológico efectuado en esta Tesis Doctoral son los siguientes:

- Las principales conclusiones del análisis crítico efectuado del marco legal aplicable a la delimitación de perímetros de protección son:
 - Los Planes Hidrológicos de las diferentes cuencas españolas dan un tratamiento heterogéneo y, en general, escaso a los perímetros de protección. Por su parte el Plan Hidrológico Nacional, aprobado con posterioridad a estos, no ha fijado criterios para su definición, ni coordinación, contemplando únicamente que se regularán mediante Real Decreto en el plazo máximo de dos años desde su entrada en vigor.
 - La incertidumbre existente respecto al marco legal aplicable a la protección de la cantidad del recurso hídrico (al contemplar la vigente Ley de Aguas únicamente la determinación de perímetros de protección para preservar las aguas subterráneas frente a la contaminación, sin modificar ni derogar los reglamentos existentes, que contemplan la protección en calidad y cantidad), el hecho de que no coincidan los ámbitos territoriales de los perímetros de protección de calidad y cantidad para una misma captación, ser diferentes los criterios y metodología para su determinación así como las administraciones competentes, aconsejan definir para la protección en cantidad del recurso un mecanismo diferente al de los perímetros de protección de la calidad.

Este contendría regulaciones en un área del acuífero en torno de la captación que definirían el volumen máximo de extracción para diferentes usos y otras regulaciones, definidas con una metodología específica.

- Para que los perímetros de protección frente a la contaminación sean útiles es imprescindible definir legalmente cuantas zonas establecer, con qué criterios y las restricciones que se propone imponer a las mismas, en estrecha coordinación con una adecuada gestión y ordenación del territorio.

Para ello es necesario modificar los procedimientos administrativos de delimitación, aprobación de zonas e implementación en el territorio de las regulaciones indicadas en los perímetros de protección, implicando a las Comunidades Autónomas y Administraciones locales en la protección de sus captaciones de abastecimiento, trasladando así las restricciones indicadas para las diferentes zonas que componen el perímetro al planeamiento urbanístico de los municipios afectados.

- En la legislación de los países con mayor tradición en la definición e implementación de los perímetros de protección se especifica en cuantas zonas deben subdividirse, con qué criterios delimitarlas y las restricciones a imponer a diversas actividades en las mismas, siendo mayoritario considerar tres zonas.

La primera de ellas, la más cercana a la captación a proteger, suele definirse en función de una distancia fija, que varía normalmente entre 10 a 60 metros, o un tiempo de tránsito de 1 día, la segunda zona, destinada a proteger contra la contaminación bacteriológica, se delimita mayoritariamente con un tiempo de tránsito de 50 ó 60 días. La tercera se delimita en función del área de alimentación de la captación, distancias fijas, definidas según las diferentes características del acuífero, o un tiempo de tránsito, que varía de 1 a 25 años.

- Para la comprobación de la validez y comparación de métodos de delimitación de perímetros de protección de captaciones en acuíferos detríticos no consolidados se seleccionó la localidad de Villacastín, en la provincia de Segovia, que posee unas características y problemática extensibles a núcleos urbanos de población de menos de 5000 habitantes.

- El análisis del funcionamiento hidrogeológico del acuífero del Terciario detrítico en el entorno de Villacastín indica que su límite sur, constituido por el contacto con los materiales graníticos, es considerado como límite impermeable y la recarga del acuífero procede de la infiltración del agua de lluvia. Las zonas de recarga corresponden a los interfluvios, descargándose en los diferentes arroyos y mediante bombeos, para ganadería y el abastecimiento urbano de la localidad de Villacastín, existiendo un flujo regional de toda el área hacia el río Duero, al norte de la zona de estudio.

Los resultados de los análisis químicos efectuados en los sondeos de abastecimiento urbano de Puente Alzado, Cañada del Abad y Camino del Valle, que captan el acuífero del Terciario detrítico, indican que son aguas bicarbonatadas cálcicas, con dureza media y mineralización ligera, con una composición química muy parecida. Son aguas legalmente potables, aunque su contenido en ión nitrato (14 y 36 mg/L) podría relacionarse con actividades antrópicas (explotaciones agrícolas y ganaderas).

- Los recursos de los materiales graníticos existentes al sur de la localidad de Villacastín, sin importancia hidrogeológica regional, proceden exclusivamente de la infiltración del agua de lluvia sobre las rocas cristalinas, son descargados básicamente a través de escorrentías superficiales a diversos arroyos que surcan la zona, pequeños manantiales empleados para abrevar al ganado, y bombeo, principalmente de los 3 pozos empleados para abastecimiento de la localidad de Villacastín, existiendo muy probablemente un grado de desconexión elevado entre las diferentes áreas de alimentación de las captaciones difícil de precisar con la información disponible.

Los análisis hidroquímicos efectuados en los pozos en estos materiales indican que puede distinguirse dos grupos de aguas. Son cloruradas cálcicas en los pozos de la Rejilla y Estacio, así como bicarbonatadas cálcicas en el pozo de los Lavaderos y el

sondeo de Blascoeles, existiendo notables diferencias en las características químicas de las captaciones de cada uno de esos grupos.

Las aguas son legalmente potables en los pozos de abastecimiento Estacio y de los Lavaderos, superando el contenido en ión magnesio (54 mg/L) del pozo de la Rejilla el límite legal.

Los altos valores de conductividad y cloruros existentes en los pozos Estacio y de la Rejilla, así como el valor de nitratos y nitritos en el pozo Estacio, cabe atribuirlos a la posible existencia de focos de contaminación en su área de alimentación. Estos valores aconsejan efectuar un análisis detallado de posibles focos de contaminación en la zona y un seguimiento de la calidad de dichos pozos, efectuando nuevos análisis químicos y bacteriológicos.

- La dotación media de la población abastecida por la infraestructura municipal es de 217 L/hab·día, variando entre 147 L/hab·día (octubre-marzo) y 294 L/hab·día (abril-septiembre) con un total suministrado de 0,12 hm³/año.
- Los focos potenciales de contaminación en el término municipal son de tipo agrícola (básicamente cultivos de secano de cereales), ganadero (explotaciones extensivas e intensivas), urbanos (residuos sólidos y vertidos líquidos) e industriales (gasolineras y dos fábricas en el centro del casco urbano).

En el entorno de las captaciones en el acuífero del Terciario detrítico se ubican los cultivos de secano de cereales, con empleo de plaguicidas y fertilizantes, diversas granjas de ovejas, gallinas y chotos, a menos de 300 metros de dichas captaciones, así como la depuradora de vertidos líquidos urbanos, que no está operativa, vertiendo agua sin depurar al Arroyo de los Prados, que discurre junto a las captaciones, por lo que es prioritario que empiece a funcionar adecuadamente.

Por su parte la actividad ganadera (parcelas con abrevaderos y gran acumulación de estiércol y un criadero de perros) en las inmediaciones de los pozos en materiales graníticos constituye posiblemente el origen de la contaminación detectada en los mismos antes reseñada.

- El acuífero del Terciario detrítico en las inmediaciones de Villacastín presenta una alta vulnerabilidad frente a la contaminación.

Los pozos de abastecimiento que captan los aportes procedentes de la red de fracturas existentes en los materiales graníticos y su material de alteración presentan también una alta vulnerabilidad.

- El análisis efectuado de los diversos métodos que se utilizan en los países más concienciados en la protección de los recursos hídricos subterráneos para delimitar perímetros de protección de la calidad de captaciones en diferentes materiales, y de las experiencias resultantes de su aplicación, ha permitido seleccionar los métodos más apropiados para su utilización en acuíferos detríticos.

Los métodos finalmente elegidos se han utilizado para delimitar las zonas de restricciones obtenidas para diferentes tiempos de tránsito, o mediante otros criterios, de los perímetros de protección de la calidad en los 4 sondeos de abastecimiento urbano de Villacastín que captan el acuífero del Terciario detrítico. Son los siguientes:

- Métodos hidrogeológicos.
- Análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito.

- Radio fijo calculado: ecuación volumétrica, método de la recarga y función del descenso.
 - Método de Wyssling.
 - Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme.
 - Método de Jacobs y Bear.
 - Solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte.
 - Método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira.
 - Método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales.
 - Modelo matemático: Visual MODFLOW y Visual MODPATH.
- Se compararon todos los métodos utilizando como referencia diversas simulaciones realizadas con modelos matemáticos. Estos pueden considerarse como la mejor aproximación al funcionamiento real del acuífero, pero solo cuando se dispone de un número considerable de parámetros y variables válidas.

La comparación se efectuó, empleando como elemento aglutinador el tiempo de tránsito, al ser el criterio más utilizado para delimitar perímetros de protección en medios porosos o asimilables en su funcionamiento a los mismos, de modo independiente para los tiempos de tránsito de 1 día, 50 días, 4 años y 25 años.

En el análisis correspondiente a cada tiempo de tránsito se consideraron también los resultados obtenidos aplicando métodos que emplean otros criterios, como el poder autodepurador del terreno o hidrogeológicos, que proporcionan un perímetro de protección único, sin subdividir y no dependen del tiempo, para disponer de una referencia de la extensión de los perímetros empleando criterios alternativos.

En la simulación de los perímetros de protección de la calidad de los cuatro sondeos de abastecimiento de Villacastín que captan el acuífero detrítico del Terciario se emplearon los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH, así como el módulo “*Zone Budget*” del programa Visual MODFLOW como herramienta para definir la protección de la cantidad.

En el modelo se han considerado dos capas en los materiales detríticos del Terciario y Cuaternario. La primera capa corresponde a un acuífero libre siendo su potencia en el área donde se ubican las 4 captaciones de abastecimiento de 100 metros. La segunda capa, de 300 metros de potencia, corresponde a un acuífero confinado en los mismos materiales.

Sus límites los constituye: por el sur el contacto con los materiales graníticos, límite impermeable, por el este y oeste las divisorias hidrogeológicas obtenidas en base al análisis de la piezometría, por último al norte está el límite de la zona estudiada con el resto del acuífero del Terciario detrítico, considerándolo en las condiciones de contorno como celdas de nivel constante, para que no se produzcan cambios en las líneas de flujo simulando que este continua hacia el resto del acuífero.

Para simular los arroyos que surcan el área modelada se ha considerado más adecuado a su escasa entidad y tipo de funcionamiento considerarlos como drenes. En estos si el nivel piezométrico es superior a la cota del dren el agua se evacua del modelo (desaparece) y si el nivel piezométrico es inferior a la cota del dren no actúa.

Una vez concluida la calibración en régimen permanente se ha procedido a simular dos hipótesis. En primer lugar simular en régimen permanente los niveles obtenidos con un bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento en el acuífero del terciario detrítico. La segunda hipótesis contempla además de esos bombeos el existente en otras dos captaciones del acuífero.

Por último, partiendo de los resultados de la simulación obtenidos con Visual MODFLOW con las dos opciones de bombeos antes indicados en régimen permanente, se ha utilizado el programa Visual MODPATH para simular el área de procedencia de las partículas que alcanzarían las captaciones para los tiempos de tránsito de 50 días, 4 años y 25 años que permiten definir el perímetro de protección correspondiente a cada captación considerando la opción seleccionada. Ésta ha sido la más conservadora o protectora, es decir, un bombeo continuo en las cuatro captaciones de abastecimiento urbano y considerar que continuará el bombeo indefinidamente en los otros dos sondeos antes indicados.

- Los resultados obtenidos al delimitar la zona de los perímetros de protección de la calidad empleando un tiempo de tránsito de 1 día y la obtenida mediante otros criterios alternativos son:

No ha sido posible evaluar la precisión de cada método comparándolo con la simulación empleando el modelo matemático por las dimensiones de las celdas, que han sido adoptadas en función de la información disponible.

Los métodos que no emplean el tiempo para definir los perímetros de protección, empleando otros criterios, como el poder autodepurador del terreno o los criterios hidrogeológicos, definen un área única en el ámbito del perímetro, de dimensiones a priori demasiado grandes para ser asumibles en esta zona, en la que se aplicarán las restricciones más intensas a las diversas actividades reguladas.

El método de la recarga del radio fijo calculado no es adecuado al proporcionar un solo valor, aplicable para tiempos grandes, no siendo lógico considerar como tal 1 día.

De los 6 métodos restantes 5 proporcionan valores del mismo orden de magnitud (análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo de tiempo de tránsito, ecuación volumétrica del radio fijo calculado, método de Wyssling, método de Jacobs y Bear, método de solución analítica simple para aproximación a isocronas que definen zonas de transporte) y el del radio fijo calculado función del descenso proporciona un valor muy superior (367 m), no siendo lógico escoger la excepción sin tener otros métodos de evaluar la precisión.

Los métodos que se consideran más adecuados son, por tanto, el método del Radio fijo calculado, ecuación volumétrica (que lo define como un círculo de radio 16 a 17 m con centro en la captación) o el método de Wyssling con distancias aguas arriba en el sentido de flujo de 22 a 26 m y aguas debajo de 19 a 21m.

- Los resultados obtenidos al delimitar la zona de los perímetros de protección de la calidad empleando un tiempo de tránsito de 50 días y la obtenida mediante otros criterios alternativos son:

De los 7 métodos que emplean el tiempo los resultados más precisos se obtienen con los métodos de Wyssling, Jacobs y Bear y método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte. Con esos tres métodos los resultados son prácticamente idénticos por lo que respecta a la longitud aguas arriba y aguas abajo de esta zona del perímetro y suelen indicar un área a proteger algo

inferior a la requerida según el modelo matemático. Existe en todos ellos cierto grado de subjetividad, al tener que definir una única dirección principal del flujo en base a los valores de piezometría conocidos, lo que puede producir un error al orientar el perímetro en algunas captaciones en las que convergen diferentes direcciones de flujo.

A pesar de esta similitud respecto a la longitud, el método de Wyssling delimita, no obstante, perímetros de protección más anchos, proporcionando resultados muy parecidos a los obtenidos con el modelo en dos sondeos (1 y 4), si bien infraprotege en los sondeos 3 y 5.

El método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira proporciona perímetros de protección similares a los anteriores pero aumenta las áreas sobreprotegidas aguas arriba y abajo.

El método del Radio fijo calculado: ecuación volumétrica proporciona zonas del perímetro muy pequeñas que infraprotegen aguas arriba en el sentido de flujo.

En el extremo opuesto el Radio fijo calculado, función del descenso, considerando un descenso de 15 mm, proporciona una zona extraordinariamente grande que incluye toda la zona que indica el modelo pero sobreprotege amplísimas zonas alrededor de las captaciones.

Por último el método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito proporciona unas zonas más próximas a los resultados requeridos pero menos precisas que las obtenidas mediante los métodos de Wyssling, Jacobs y Bear, solución analítica simple y método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira.

Entre los métodos en los que el tiempo no influye al delimitar el perímetro de protección, que definen una única zona independiente de este, los definidos empleando métodos hidrogeológicos exclusivamente cubren toda el área a proteger pero delimitan una zona única de gran tamaño, muy superior a la definida por el modelo para el tiempo de tránsito de 50 días con el que se comparan.

La aplicación del análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme disminuye enormemente la extensión de la zona delimitadas pero infraprotege en parte, por lo que dejaría fuera del perímetro de protección zonas en las cuales una eventual contaminación afectaría a la captación de abastecimiento en un tiempo inferior a 50 días según los resultados del modelo.

Por último el método de Rehse proporciona perímetros muy pequeños e incluso la no necesidad de establecerlos.

Es decir en la región analizada en este estudio para un tiempo de tránsito de 50 días los métodos que más se asemejan a los resultados obtenidos con la simulación efectuada mediante modelos matemáticos empleando los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH son los métodos de Wyssling, Jacobs y Bear y Solución Analítica Simple siendo de estos tres el más preciso el método de Wyssling.

- Los resultados obtenidos al delimitar la zona de los perímetros de protección de la calidad empleando un tiempo de tránsito de 4 años y la obtenida mediante otros criterios alternativos son:

Los métodos de Wyssling, Jacobs y Bear y método de solución analítica simple proporcionan zonas a proteger con una longitud aguas arriba mucho mayor de la necesaria, con un ancho de la zona menor de la obtenida con la simulación matemática efectuada.

Los métodos de Radio fijo calculado de la ecuación volumétrica y método de la recarga son prácticamente idénticos y proporcionan zonas a proteger definidas por un círculo que abarcan aproximadamente la mitad de la longitud que debería tener aguas arriba y sobreprotegen la captación aguas abajo.

El método de Radio fijo calculado: función del descenso proporciona una zona definida por un círculo de tamaño desmesurado.

El método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito engloba la totalidad del área que proporciona el modelo matemático, si bien las áreas obtenidas son, en este caso, aproximadamente el doble de lo requerido respecto a la longitud, sobreprotegiendo también una zona amplia lateralmente.

En los métodos en los que el tiempo no influye al definir el perímetro de protección los resultados al no depender de este son idénticos a los reseñados para 50 días previamente, pero se comparan con la simulación del modelo para 4 años que es una zona más amplia.

El método de Rehse proporciona zonas excesivamente reducidas. Los perímetros de protección que se definen empleando métodos hidrogeológicos exclusivamente, delimitan áreas que incluyen en su totalidad las proporcionadas por el modelo matemático, para un tiempo de tránsito de cuatro años, pero de extensión muy superior, ya que considera toda el área de recarga posible, bidimensionalmente.

El método de análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme de extensión menor a la obtenida con el método hidrogeológico, infraprotege una zona amplia respecto al modelo matemático. Es decir, no incluye en el perímetro grandes zonas en las cuales, según la simulación efectuada, una eventual actividad contaminante en las mismas alcanzaría la captación de abastecimiento en un tiempo inferior a 4 años. Cabe señalar, no obstante, la gran influencia que supone en este método cualquier posible incertidumbre respecto a la definición de la dirección principal de flujo.

En conclusión al aumentar mucho el tiempo disminuye la precisión de los métodos analíticos. Si se descartan los métodos de Wyssling, Jacobs y Bear y método de solución analítica simple que proporcionan zonas a proteger con una longitud aguas arriba mucho mayor de la necesaria e infraprotegen lateralmente, por su infraprotección en una parte significativa del perímetro los métodos de radio fijo calculado ecuación volumétrica y método de la recarga, e inasumible sobreprotección en el caso del Radio fijo calculado función del descenso, los únicos métodos que cubren toda el área a proteger serían el método hidrogeológico, si bien sobreprotege una amplia zona y el método de análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme, de extensión menor a la obtenida con el método hidrogeológico pero que infraprotege una zona amplia respecto a la simulación del modelo matemático.

- Los resultados obtenidos al delimitar la zona de los perímetros de protección de la calidad empleando un tiempo de tránsito de 25 años y la obtenida mediante otros criterios alternativos son:

Son inasumibles los resultados que proporcionan los métodos de Jacobs y Bear, Wyssling y Solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte ya que sobreprotegen ampliamente en longitud y proporcionan áreas muy estrechas, infraprotegiendo paralelamente al flujo.

El Radio fijo calculado, función del descenso sobreprotege amplísimas zonas.

El método de Radio fijo calculado, método de la recarga tampoco es aplicable pues sobreprotege aguas abajo del flujo principalmente e infraprotege una gran parte de la zona que debería constituir el perímetro.

El método de Radio fijo calculado, ecuación volumétrica aunque mejora la precisión respecto al anterior tampoco cubre toda la zona y sobreprotege amplias zonas especialmente aguas abajo.

El análisis del sistema de flujo combinado con el tiempo de tránsito es para este tiempo idéntico al método hidrogeológico.

En los métodos en los que el tiempo no influye al definir el perímetro de protección los resultados (idénticos a los reseñados para 50 días y 4 años) se comparan con la simulación del modelo para 25 años que es una zona mucho mayor.

El método de Rehse proporciona zonas muy reducidas en comparación con la obtenida en el modelo.

Las áreas delimitadas empleando métodos hidrogeológicos exclusivamente engloban en su práctica totalidad (no incluyen una zona en el límite sureste de los perímetros de protección), las proporcionadas por el modelo matemático, para un tiempo de tránsito de 25 años, pero su extensión es más amplia, aunque en este caso la diferencia es, lógicamente, mucho menor a la existente al compararlos con los resultados del modelo para tiempos de tránsito menores.

El método de análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme, proporciona áreas más reducidas a las obtenidas mediante los métodos hidrogeológicos pero que infraprotegen amplias zonas. No incluye así áreas en las que, según la simulación efectuada, una contaminación en las mismas alcanzaría las captaciones en un tiempo inferior a 25 años.

Por lo tanto para este tiempo de tránsito solo se obtienen resultados parecidos a la simulación del modelo matemático empleando métodos hidrogeológicos.

- La puesta en explotación de dos granjas de cerdos propuesta por la sociedad Cañada del Abad supondría, según el análisis de las características de sus instalaciones y los resultados de la práctica totalidad de métodos empleados para delimitar los perímetros de protección, con tiempos de tránsito de 50 días o superiores así como mediante criterios alternativos, un grave riesgo de contaminación de las aguas subterráneas bombeadas desde varias de las captaciones de abastecimiento a Villacastín. Su prohibición sería la consecuencia lógica de la aplicación de los perímetros para la limitación de actividades.

Por otra parte casi todos los métodos, para un tiempo de tránsito de 25 años, así como los métodos que emplean otros criterios proporcionan un perímetro de protección que afecta al límite granitos-Terciario detrítico donde se sitúa el casco urbano de Villacastín, por lo tanto cualquier actividad que produzca contaminantes de larga duración al norte del casco urbano afectará a alguna captación.

- La propuesta final de delimitación de los perímetros de protección de la calidad de los 4 sondeos de abastecimiento urbano de Villacastín, que captan el acuífero del Terciario detrítico, sondeos San Bartolomé (172020004), Puente Alzado (172020001), Cañada del Abad (172020003) y Camino del Valle (172020005) se ha definido en función de las conclusiones del análisis efectuado de las características hidrogeológicas del

acuífero captado, infraestructura del abastecimiento, necesidades de agua para el mismo, focos potenciales de contaminación en el municipio, vulnerabilidad de las diferentes zonas, junto con el análisis de los resultados obtenidos aplicando diferentes métodos para delimitar los perímetros de protección de la calidad. Se ha considerado como más apropiado la propuesta de dividir los perímetros de protección en tres zonas, cuyas principales características son las siguientes:

- Zona inmediata o de restricciones absolutas:

Esta zona se ha definido en base a un criterio de tiempo de tránsito de 1 día, empleándose para delimitarlas el método de Wyssling.

Su objetivo principal es proteger la captación y sus instalaciones contra vertidos o infiltraciones directas en su superficie, así como impedir el acceso de animales y desaprensivos que pudieran contaminar directamente las captaciones, por ello estará cerrada mediante una valla que impida el acceso a personas no autorizadas y convenientemente señalizada su identificación como parte del perímetro de protección así como la prohibición de acceso.

Sus dimensiones se indican en la Tabla 37 del capítulo 11.

Las regulaciones y restricciones que se propone imponer a diversas actividades o instalaciones (agrícolas, ganaderas, urbanas, industriales y otras) en esta zona se detallan en la Tabla 38 del capítulo 11.

- Zona próxima o de restricciones máximas:

Su objetivo es proteger frente a la contaminación bacteriológica. Comprende el área en la cual una eventual contaminación en la misma alcanzaría la captación de abastecimiento en un tiempo de tránsito inferior a 50 días. Para delimitarlas se ha utilizado los resultados de la simulación efectuada mediante Visual MODFLOW en régimen permanente y la simulación advectiva del transporte con Visual MODPATH, indicándose sus dimensiones en la figura 33 del capítulo 11.

En la Tabla 38 del mismo se detallan las regulaciones y restricciones a imponer a diversas actividades o instalaciones. Estas son las mismas de la zona anterior, si bien aquí se permitiría el acceso peatonal y que la atravesen redes de comunicación.

Hay que indicar que en el área que delimita esta zona próxima o de restricciones máximas existe actualmente cultivos de secano (trigo y cebada), así como diversas granjas (las identificadas con los números 6, 7, 8 y 10 en el mapa 2 y tabla 11 del capítulo 7, en la que se evalúa su potencial contaminante), y otras previstas (números 5 y 11 en las mismas), cuyas actividades quedarían afectadas por la regulación contemplada en el perímetro de protección.

- Zona alejada o de restricciones moderadas:

Una eventual contaminación en la misma tardaría en alcanzar la captación de abastecimiento un tiempo comprendido entre un mínimo de 50 días y el límite superior de tiempo de tránsito considerado en esta zona, 25 años, al ser su objetivo proteger frente a contaminantes de larga persistencia. Para delimitarlas se ha utilizado los resultados de la simulación efectuada mediante Visual MODFLOW en régimen permanente, y la simulación advectiva del transporte con Visual MODPATH.

La elección de un tiempo de tránsito de 25 años se ha realizado valorando, entre otros aspectos, la problemática del abastecimiento a la localidad. El bombeo de los cuatro sondeos que captan el acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario supone en torno al 72% del volumen requerido para el abastecimiento, proporcionando los tres pozos en materiales graníticos el 28% restante.

Las características de los materiales graníticos hacen muy improbable que pueda incrementarse notablemente esa cantidad, y no existen otros acuíferos en el ámbito del término municipal, es decir, la explotación, con calidad adecuada, de las captaciones en el acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario es imprescindible para el abastecimiento a la población.

La dependencia del abastecimiento de la explotación de esos 4 sondeos, distribuidos en el acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario hace necesario que el límite externo de esta zona, y por lo tanto del perímetro de protección, no existiendo restricciones a partir de él, sea lo suficientemente elevado para garantizar un abastecimiento desde los mismos con calidad adecuada, al menos durante un periodo de tiempo dilatado, 25 años, que permita en su caso la búsqueda de fuentes de abastecimiento alternativos a la existente en el término municipal de Villacastín.

Sus dimensiones se indican en la figura 34 del capítulo 11. Como se muestra en dicha figura se ha considerado idóneo agrupar las zonas correspondientes a 3 captaciones: Sondeo Puente Alzado, sondeo Cañada del Abad y sondeo Camino del Valle al solaparse parcialmente y mantener independiente el correspondiente al sondeo San Bartolomé.

En la Tabla 38 del citado capítulo se detallan las regulaciones y restricciones a imponer a diversas actividades o instalaciones en esta zona destacando que muchas actividades, especialmente las agrícolas o urbanas, con fuentes potenciales de contaminación de carácter bacteriológico, degradable en un tiempo superior a 50 días, pasan a ser condicionadas o permitidas.

Hay que indicar que en el área que delimita esta zona alejada o de restricciones moderadas existe en la actualidad cultivos de secano (trigo y cebada), así como las instalaciones del matadero municipal y la depuradora (identificados con los números 9 y 40 en el Mapa 2 y Tabla 11) del capítulo 7 cuyos actividades quedarían afectadas por la regulación contemplada en el perímetro de protección.

- Las actividades que se propone regular o restringir en las tres zonas en que se subdividen los perímetros de protección de los 4 sondeos que captan el acuífero del Terciario detrítico, indicadas en la Tabla 38 del Capítulo 11, deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del término municipal y afectan a suelo cuya calificación urbanística actual es en su totalidad de “*suelo no urbanizable general*” ya que aunque en el caso del sondeo Puente Alzado se esté en el límite con zonas de “*suelo no urbanizable de protección especial*” este no abarca a su área de alimentación. No obstante las modificaciones introducidas en la clasificación del suelo por la Ley 6/1998 sobre régimen del suelo y valoraciones (BOE, 1998 a), supone que el mantenimiento como “*suelo no urbanizable*” del área definida por los perímetros de protección, requiere dotarlos de un régimen de especial protección, lo cual estaría plenamente justificado por la necesidad de establecer limitaciones para la protección del dominio público hidráulico.
- Se propone establecer un Plan de Emergencia, contemplando la eventualidad de que se produjera algún vertido accidental en el ámbito del perímetro de protección que

estableciese un protocolo de actuación para los responsables municipales del suministro de agua potable a la población.

Este permitiría detener con carácter inmediato los bombeos en la zona afectada, al disponer el abastecimiento al municipio de dos sistemas, con conducciones independientes, uno con bombeos anuales de 86724 m³ en los sondeos que captan el acuífero del Terciario detrítico, y otro que proporciona 33276 m³ procedentes de las captaciones en materiales graníticos.

Al ser altamente improbable una contaminación accidental simultánea en los dos ámbitos, unido a la existencia de depósitos, cuya capacidad permite cubrir el suministro actual, sin restricciones, durante 3 días en el período de abril, a septiembre, y de 6 días de octubre a marzo, proporcionaría el tiempo necesario para evaluar la repercusión que tendría esa contaminación accidental, en función de las previsiones y análisis efectuados al elaborar el perímetro de protección, actuando en consecuencia.

Por último, cabe resaltar que la existencia de nueva información podría hacer necesario efectuar una revisión del perímetro de protección, definido en base a los conocimientos del medio físico y la metodología existente en el momento en el que ha sido elaborado, debiéndose contemplar periódicamente si se considera necesario efectuar su revisión y eventual modificación.

- La metodología que se propone para la protección del recurso hídrico en cantidad, en las captaciones de abastecimiento urbano es consecuencia del análisis crítico del encuadre legal de los perímetros de protección “de la cantidad” en dichas captaciones. Esta indica la necesidad de plantear secuencialmente los estudios a elaborar y los métodos aplicables. Comprendería las siguientes etapas:
 - ETAPA A:

Recopilar y analizar la información existente sobre la unidad hidrogeológica en la que se ubica la captación objeto de protección.
 - ETAPA B:

Estudiar detalladamente el acuífero explotado por las captaciones de abastecimiento, efectuando un balance hidrogeológico detallado, cuantificando sus recursos y reservas (si es posible) y contemplando las limitaciones establecidas al recurso en la Unidad hidrogeológica que le afecten analizando además la relación del acuífero con otros, tanto física como de gestión del recurso hídrico.
 - ETAPA C:

Aplicación de otros métodos para definir con mayor precisión la zona a proteger, recomendándose inicialmente la aplicación de métodos analíticos o de parámetros agregados, como primera aproximación, combinándose los resultados obtenidos en la aplicación de cada uno de ellos.
 - ETAPA D:

Es muy conveniente contrastar y, en su caso, modificar las zonas obtenidas mediante la combinación de los diferentes métodos analíticos efectuando ensayos de trazadores.

- ETAPA E:

Consiste en evaluar si se dispone de la información suficiente para poder efectuar un modelo matemático del acuífero. Para ello es imprescindible analizar el grado de conocimiento respecto a los límites y condiciones de contorno, funcionamiento hidrogeológico del acuífero, valores de piezometría y de parámetros hidráulicos, entre otros factores. En caso de que no se disponga de suficiente información se dará por terminado el análisis, integrando los resultados obtenidos previamente.

- ETAPA F:

La simulación matemática, que se realiza cuando se dispone de información suficiente para la ejecución, y calibrado del modelo, permite modelizar diferentes hipótesis de extracción de aguas subterráneas en la zona de estudio, y su repercusión en las captaciones de abastecimiento, demandas ambientales y concesiones existentes para abastecimiento y otros usos.

La metodología descrita debe concluir con la integración de los análisis efectuados y la elaboración de una norma que contemple las regulaciones a establecer en un área del acuífero, en el entorno de las captaciones de abastecimiento, para garantizar el volumen extraído destinado al abastecimiento y otras demandas. Esta incluirá el volumen global máximo de extracción en el entorno delimitado, la cuantía máxima de extracción para captaciones distintas de la que es objeto de protección, demandas ambientales, profundidades de sondeos y de instalación de bombas, distancias mínimas a la captación protegida entre otras a definir en una propuesta legal de contenido de una norma relativa a estos aspectos.

➤ Al definir la zona a delimitar y las medidas a establecer en la misma que se propone para proteger en cantidad los cuatro sondeos de abastecimiento que captan el acuífero detrítico del Terciario se ha considerado imprescindible garantizar:

- Los 4 sondeos de abastecimiento urbano en el acuífero detrítico del Terciario deben permitir obtener, a largo plazo, todo el volumen requerido para el abastecimiento a la población (120.000 m³/año).
- Los niveles de dichas captaciones deben ser estables a largo plazo
- Los arroyos que surcan el término municipal no deben secarse y deberán continuar siendo ganadores.
- Permitir otros bombeos siempre que no impidan que se alcancen los requisitos precedentes.

El análisis efectuado cubre las etapas A, B, C indicadas en la metodología propuesta para proteger el recurso hídrico en cantidad y ha permitido utilizar un modelo matemático (como se contemplaba en los apartados E y F de la misma). Este ha permitido simular el comportamiento del acuífero, en régimen permanente, con un bombeo continuo de las 4 captaciones de abastecimiento y de otras dos captaciones.

Resalta que el acuífero soporta a largo plazo un bombeo continuo de 81 m³/día en cada una de las 4 captaciones de abastecimiento y otros dos bombeos adicionales de 21 m³/día y de 25 m³/día, produciéndose unos descensos de nivel asumibles, manteniéndose un flujo hacia los arroyos.

Se ha empleado además el módulo “Zone Budget” del programa Visual MODFLOW, efectuando balances hídricos de entradas y salidas al acuífero en las cinco zonas

siguientes:

- Zona 1: Todo el área modelada excepto la incluida en las zonas 2-3-4-5.
- Zona 2: Arroyos de la Asperilla y de la Casa del Caballero (al oeste).
- Zona 3: Arroyos de los Prados y del Valle (que discurre junto a las captaciones).
- Zona 4: Sondeo de abastecimiento San Bartolomé (172020004) y de la Granja Avícola Velasco (172020006).
- Zona 5: Límite septentrional de la zona simulada.

El programa proporciona que fluyen 1931 m³/día por las celdas de nivel constante que constituyen el límite con el resto del acuífero y que los drenes (es decir el conjunto de los arroyos en la zona simulada, zona 2 y zona 3) descargan 331 m³/día es decir 3,8 L/s, salidas superficiales y subterráneas del sistema.

En el balance correspondiente a cada una de las cinco zonas indicadas cabe destacar, por su interés para los objetivos planteados, que la zona 2 (Arroyos de la Asperilla y de la Casa del Caballero) es ganadora en su balance con la zona 1 y fluyen hacia los drenes 186 m³/día, es decir 2,1 L/s evacuan estos arroyos del acuífero.

La zona 3 (Arroyos de los Prados y del Valle) es también ganadora en su relación con la zona 1. Por su parte los drenes actúan, evacuando 145 m³/día, es decir el arroyo es ganador y su aforo simulado es de 1,7 L/s.

El balance correspondiente a la zona 5 (celdas de nivel constante) indica que recibe entradas procedentes de las demás con las que está en contacto (zonas 1, 2 y 3) sin presentar salida hacia las mismas (lo que no habría tenido ningún sentido hidrogeológico) aportando al resto de la cuenca del Duero 1310 m³/día.

Los balances obtenidos empleando el módulo “Zone Budget” del programa Visual MODFLOW han complementado las conclusiones obtenidas en la simulación empleando Visual MODFLOW para delimitación de perímetros de protección en calidad que indicaban que el acuífero soportaba a largo plazo los bombeos previstos, con descensos asumibles, manteniéndose un flujo hacia los arroyos permitiendo cuantificar los balances resultantes e indicado que se cumplen las premisas consideradas imprescindibles, detalladas previamente. No obstante para mantener la condición de ganadores para los arroyos y los bombeos previstos no cabe permitir nuevos bombeos al considerarse, entre otros aspectos, el caudal simulado en los arroyos (2,1 L/s y 1,7 L/s) como un valor que no puede sufrir nuevas reducciones.

La norma que define las regulaciones que se propone establecer en un área del acuífero del Terciario detrítico captado para el abastecimiento de la localidad de Villacastín, para garantizar el volumen destinado al abastecimiento a la población y otros usos, es la siguiente:

- 1.-Se define una única zona para proteger en cantidad los 4 sondeos de abastecimiento que captan el acuífero del Terciario detrítico, garantizar los caudales ecológicos y minimizar el impacto ambiental de los bombeos.
- 2.-Su tamaño coincide con la totalidad del área simulada.
- 3.-Los bombeos para abastecimiento urbano en dicha zona se destinarán exclusivamente a subsanar las necesidades de abastecimiento de la población de Villacastín (120.000 m³/año) distribuyéndose entre los 4 sondeos de abastecimiento ya existentes (Sondeos: Camino del Valle, Cañada del Abad, Puente Alzado y San

Bartolomé), sin realizar modificaciones en su profundidad (96 metros), efectuándose un bombeo máximo de 81 m³/día en cada uno de ellos.

Se autoriza proceder a la limpieza o sustitución de tuberías o equipos deteriorados en los mismos. En el caso de quedar inutilizado, por derrumbe u otras causas, podrán ser sustituidos por un nuevo sondeo, de características similares, ubicado lo más próximo posible a los actuales.

4.-Se autoriza además continuar bombeos a largo plazo en las captaciones siguientes:

-Sondeo 172010003. Sondeo que abastece dos gasolineras y un restaurante con un bombeo de 22 m³/día.

-Sondeo 172020006. Sondeo que abastece a la Granja Avícola Velasco con un bombeo de 25 m³/día.

La limpieza, acondicionamiento y eventual sustitución de los mismos cumplirá los mismos requisitos indicados previamente para los sondeos de abastecimiento.

5.-No se autoriza efectuar nuevas captaciones en la totalidad del área modelada excepto en los supuestos de sustitución de los actuales, reseñados en los puntos 3 y 4 de esta Norma.

6.-Se señalará en el terreno mediante carteles que en esa zona existe una Norma que impide efectuar nuevas captaciones.

7.-Se controlará periódicamente que se cumplen las previsiones de la simulación respecto a los arroyos (flujo estimado en 2,1 L/s y 1,7 L/s) que no deben secarse y tienen que continuar siendo ganadores, y que los descensos de niveles observados en los sondeos se mantienen estables a largo plazo.

En el caso de producirse desviaciones respecto a lo simulado se procedería a la revisión inmediata de estas Normas contemplándose en primer lugar, si fuera preciso, reducir los bombeos indicados en el punto 4.

15.- PROPUESTA DE MODIFICACIONES LEGALES RELATIVAS A LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD Y A LA PROTECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN CANTIDAD EN LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO

El análisis efectuado en esta Tesis Doctoral del marco legal referente a la delimitación de perímetros de protección (capítulo 5), la metodología para la delimitación de perímetros de protección de la calidad y la referente a la protección en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano (capítulo 6, 8, 9, 12), junto con los resultados de su aplicación a las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico (capítulos 10, 11 y 13), indica la necesidad de efectuar modificaciones legales relativas a la delimitación e implementación en el territorio de los mismos, coordinados con el tratamiento metodológico desarrollado.

Las propuestas de modificaciones legales efectuadas son las siguientes:

15.1.- Propuesta de contenido de una norma parcial para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento

La incertidumbre respecto al marco legal aplicable a los perímetros de protección que tienen como objetivo salvaguardar la cantidad ha sido analizada en el capítulo 5.3. Está motivada en gran parte por la modificación efectuada en el artículo 56.3 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 b), que contempla para estos únicamente la protección frente a los riesgos de contaminación, sin modificar ni derogar los Reglamentos existentes (R.D.P.H., 1986 y R.A.P.A.P.H., 1988) que consideran la protección en calidad y cantidad.

La propuesta que se realiza, para su eventual inclusión en la modificación, se supone que inminente, del R.D.P.H. de 1986 (BOE, 1986), es reservar la denominación de “perímetros de protección” exclusivamente para los delimitados con objeto de proteger frente a la contaminación, con limitaciones a diversas actividades. Por otra parte se establecería una “norma parcial para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento”, referido a un entorno de las captaciones de abastecimiento, definido conforme a la metodología propuesta en el capítulo 12.

La aprobación de estas “normas parciales, a incluir en la norma general de explotación de la unidad hidrogeológica, se efectuaría en el seno de la Confederación Hidrográfica, sin que sea imprescindible la concurrencia de otras Administraciones. El soporte legal estaría en los artículos 55.1 y 76 del Texto Refundido de la Ley de Aguas, 184 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, 84.4 del Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, así como diversos artículos de los Planes Hidrológicos de cuenca en que se recogen normas para el otorgamiento de autorizaciones y concesiones en las unidades hidrogeológicas, dentro del Capítulo sobre Conservación y Protección de Acuíferos.

La “norma parcial para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento” que se propone, cuyas regulaciones prevalecerían sobre las de carácter general, ya que el hecho de dictarse presupone la existencia de circunstancias especiales o particulares que hacen necesaria su excepción de la norma general, definirá al

menos los siguientes aspectos:

A.- Delimitación del acuífero explotado por la captación de abastecimiento urbano, características hidrogeológicas y esquema estructural y de funcionamiento del acuífero. Determinación de los recursos naturales y asignables con las restricciones que imponen los objetivos de calidad, los aspectos medioambientales y las explotaciones actuales en el ámbito del acuífero. Se detallaran:

- Límites, tipo de acuífero, litología y balance hidrogeológico detallado, definiendo los usos de agua y extracciones.
- Regulaciones sobre los volúmenes necesarios para el mantenimiento de zonas húmedas y caudales ecológicos de los cursos fluviales en el acuífero, volúmenes necesarios en acuíferos costeros para mantener la interfaz agua dulce agua salada, concesiones para abastecimiento y otros usos así como otras regulaciones establecidas.
- Recursos naturales asignables (recursos renovables minorados por regulaciones y concesiones existentes) y volumen necesario para abastecer a la población.
- Análisis piezométrico en diferentes estaciones y años, valores y distribución de parámetros hidrodinámicos (conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento y porosidad eficaz entre otros), caracterización hidroquímica, definición del funcionamiento hidrogeológico del acuífero (poroso, asimilable a poroso, kárstico, fisurado) identificando si procede, de áreas diferentes dentro del acuífero.

B.- Distribución de las extracciones y de los recursos asignables a los diferentes usos. Volúmenes de explotación y regulación de caudales en cada captación en el entorno delimitado para asegurar el recurso en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano.

Las extracciones totales máximas en todo el acuífero en un año deben ajustarse a los recursos renovables medios del acuífero minorados por las regulaciones medioambientales y las concesiones ya existentes para abastecimiento y otros usos en el acuífero considerando el volumen restante como recursos asignables. Se pretende asegurar que los niveles estén estables y a un nivel aceptable a largo plazo y que los descensos de niveles que se produzcan puedan recuperarse por la recarga.

El volumen de agua necesario para el abastecimiento se obtiene mediante todas las captaciones de abastecimiento del municipio, distribuyéndose entre estas en función de su productividad y de la infraestructura de abastecimiento a la población (depósitos, tuberías...). Para garantizar el volumen a bombear en cada una de ellas hay que definir un área que permita suministrarlo de un modo estable.

La Norma parcial puede definir un área que incluya únicamente la captación o captaciones de abastecimiento del municipio o bien un área que incluya, además de esta, limitaciones por usos medioambientales, otras concesiones o incluso otros recursos asignables en su interior, definiendo limitaciones al volumen máximo, caudal y profundidad entre otros de cada captación o uso.

El tamaño de ese área de protección y las restricciones en su interior se obtienen sobre la base de la aplicación de la metodología expuesta en el capítulo 12 empleando una combinación de criterios hidrogeológicos, métodos analíticos, ensayos de trazadores y, en su caso, modelos matemáticos.

El grado de precisión con que se puede definir en cada zona estudiada las regulaciones establecidas en el entorno de la captación para garantizar el volumen requerido depende de

los métodos que se hayan aplicado para complementar los criterios obtenidos por el análisis hidrogeológico de detalle del acuífero. Así, por ejemplo, si ha podido efectuarse un modelo matemático, pueden simularse muchas más hipótesis de la respuesta a obtener en la captación a proteger ante posibles nuevas extracciones que si se emplean métodos analíticos junto con criterios hidrogeológicos.

En todo caso, y con el grado de detalle que permita el método empleado y la complejidad e interrelación de los diferentes usos, deberán concretarse, además del método mediante el que fueron definidos, los siguientes aspectos:

- Tamaño del área de protección, número de captaciones de abastecimiento incluidas y si incluye además otras concesiones o limitaciones medioambientales.
- Normas de señalización en el terreno del área de protección.
- Régimen de explotación: Volumen global máximo de extracción en la totalidad del área de protección definida, incluyendo en ese volumen las captaciones de escasa importancia (que son aquellas con un volumen anual extraído menor de 7000 m³ y un caudal instantáneo menor de 1 L/s, que tengan instalado un equipo mecánico adecuado a las anteriores condiciones, o las que cumplan los requisitos indicados expresamente en los Planes Hidrológicos para cada acuífero o unidad hidrogeológica), así como el volumen y caudal máximo de extracción para captaciones distintas de la que es objeto de protección.
- Distancia mínima entre la captación de abastecimiento a proteger y otras captaciones, detallando el método que se ha empleado en su definición.
- Requisitos a cumplir para limpiar, modificar o perforar una captación que sustituya a otra que disponga de concesión, así como condiciones de clausura de la captación original.
- Profundidades de perforación de los pozos, sondeos y de instalación de bombas, detallando, en acuíferos con problemas de intrusión salina la evaluación de su repercusión ante el posible avance del frente salino.
- Regulación de solicitudes a presentar ante el Organismo de cuenca correspondiente para obtener la preceptiva autorización de investigación para determinar la existencia de aguas subterráneas y las labores de perforación, alumbramiento y aforo de caudales y requisitos mínimos del proyecto de investigación.
- Normas de sellado de niveles acuíferos con mala calidad química que haga inadecuada su explotación para abastecimiento a poblaciones, a otros usos, con objeto de no contaminar el recurso hídrico disponible, así como normas referentes al abandono de pozos o de sondeos de investigación para evitar conexiones entre diferentes acuíferos y contaminaciones.
- Regulaciones a las obras civiles, detallando las restricciones a imponer en el área de protección de la captación de abastecimiento urbano a dichas obras (autopistas, trazados férreos, túneles, fosas, aparcamientos subterráneos, barreras impermeables bajo el nivel piezométrico y cimentaciones entre otras), así como las restricciones a actividades mineras (como el establecimiento de graveras), ya que pueden producir cambios en el nivel piezométrico, creando depresiones o modificando la dirección y sentido del flujo entre otros, produciendo afección a la captación a proteger (Rayne *et al.*, 2001).
- Mecanismos de revisión de la norma parcial ante nueva información que mejore el conocimiento del área a proteger y definición de una red de control para evaluar su correcto funcionamiento.

15.2.- Propuesta de modificaciones legales relativas a los perímetros de protección de la calidad

El análisis del marco legal referente a la delimitación de perímetros de protección, efectuado en el capítulo 5, ha puesto de manifiesto, entre otros aspectos, la insuficiente atención, diversidad de criterios y de detalle con que han sido contemplados los perímetros de protección en los Planes Hidrológicos de cuenca, así como la escasa implementación real en el territorio de las restricciones a diversas actividades que contemplan.

La modificación de la Ley de Aguas, reflejada en su Texto Refundido (BOE, 2001 b), sin modificar ni derogar los reglamentos existentes (R.D.P.H., 1986 y R.A.P.A.P.H., 1988), hace imprescindible una modificación urgente de los mismos.

Se propone incluir, en el nuevo reglamento que desarrollará la Ley, las siguientes propuestas de modificaciones legales relativas a los perímetros de protección de la calidad, que contemplan íntegramente el desarrollo metodológico efectuado para la delimitación de estos, y los resultados de su aplicación a las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico, detallado en los diferentes capítulos de esta Tesis Doctoral.

Definición del perímetro de protección

En el marco legal vigente en cada estudio de delimitación de perímetros de protección debe indicarse cuantas zonas establecer, con qué criterios y las restricciones que se propone imponer a las mismas. Se propone efectuar una regulación de los perímetros que dependa de las características del material captado para el abastecimiento a la población: poroso o asimilable en su funcionamiento a poroso, kárstico, fisurado.

En los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento en acuíferos en medios porosos, o asimilables en su funcionamiento a los mismos, se propone establecer reglamentariamente su división en tres zonas y los criterios para su delimitación. Sus características principales son:

➤ Zona inmediata o de restricciones absolutas

Su objetivo es impedir el acceso de personal no autorizado a la captación, por lo que estará vallada y convenientemente señalizado la prohibición de acceso a la misma.

El criterio de delimitación es un tiempo de tránsito de 1 día.

➤ Zonas próxima o de restricciones máximas

Tiene como objeto proteger contra la contaminación bacteriológica. Se delimitará en función de un tiempo de tránsito de 50 días, empleando métodos analíticos o modelos matemáticos, utilizando también criterios hidrogeológicos.

➤ Zona alejada o de restricciones moderadas

Su objetivo es proteger frente a contaminantes de larga persistencia. Se delimitará conforme a un tiempo de tránsito de varios años, empleando métodos analíticos o preferentemente modelos matemáticos, criterios de tipo hidrogeológico o una combinación de ambos.

En la propuesta de delimitación se justificará el tiempo de tránsito empleado, considerándose en todo caso: los focos potenciales de contaminación, la vulnerabilidad del acuífero en el entorno de las captaciones, las características del abastecimiento a la población y la existencia de acuíferos alternativos al empleado por el mismo.

En cada propuesta de delimitación de perímetros de protección se justificará las restricciones que se propone para las tres zonas incididas con objeto de evitar la contaminación de las aguas captadas para abastecimiento. Estas contemplarán como mínimo los condicionamientos y prohibiciones a los que deben someterse las actividades urbanas, agrícolas, ganaderas, industriales, recreativas y las obras de infraestructura indicada en la Tabla 38 en el capítulo 11.

En los acuíferos kársticos y en los fisurados las zonas a considerar y criterios por los que se establezcan deben ser objeto de un tratamiento específico, que no ha sido contemplado en esta Tesis Doctoral.

Procedimiento administrativo de delimitación, aprobación de zonas e implantación en el territorio de las regulaciones indicadas en los perímetros de protección

La propuesta efectuada sustituiría al actual procedimiento del artículo 173 del R.D.P.H. (BOE, 1986).

El documento en el que se propone la delimitación del perímetro de protección, cuyo procedimiento se iniciará de oficio en las áreas de actuación del Organismo de cuenca o a solicitud de la autoridad medioambiental, municipal o cualquier otra en que recaigan competencia sobre la materia, será elaborado conforme a las indicaciones metodológicas antes indicadas. Dicho documento deberá considerar la normativa urbanística actual de las zonas en que se subdivide el perímetro de protección y detallará las regulaciones propuestas en cada zona con objeto de evitar la contaminación de las captaciones de abastecimiento.

Será tramitado ante el Organismo de cuenca que, tras su evaluación y eventual modificación, lo remitirá a los Servicios de Ordenación del Territorio de los Ayuntamientos y las Comunidades Autónomas a los que pertenezca el área que delimita el perímetro. Estos emitirán informe sobre el perímetro de protección, especialmente respecto a su incidencia en la normativa urbanística, actual y prevista, de los terrenos afectados.

La propuesta de perímetro de protección con las eventuales modificaciones, fruto de los informes previos que, analizados conjuntamente por dichas administraciones y la proponente del perímetro, resulten compatibles con el objetivo de preservar la calidad del agua captada para abastecimiento, serán objeto de trámite de información y audiencia pública ante posibles interesados.

La propuesta final será aprobada por la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca, que la remitirá a las Comunidades Autónomas y Ayuntamientos afectados para que trasladen las restricciones indicadas para las diferentes zonas que componen el perímetro de protección a las normativas autonómicas y locales sobre ordenación del territorio y autorización de actividades clasificadas.

Se considerará las áreas incluidas en los perímetros de protección como suelo no urbanizable sometido a un régimen especial de protección, justificado por la necesidad de proteger el dominio público hidráulico, máxime ante su uso para abastecimiento a la población. Este procedimiento subsanaría los actuales problemas en la implantación real en el terreno de los perímetros de protección.

Se contemplará por último reglamentariamente la conveniencia de establecer un Plan de intervención, y su Protocolo de actuación, ante eventuales contaminaciones accidentales en el entorno del perímetro de protección, así como la necesidad de revisar los perímetros de protección ante nueva información significativa, no existente en la época en que se elaboró el perímetro, y en todo caso transcurrido un período máximo de 5 años desde su aprobación.

16.- PROPUESTA METODOLÓGICA BÁSICA

En el presente capítulo se propone una metodología para la delimitación de perímetros de protección de la calidad del agua y cantidad en captaciones de abastecimiento urbano en acuíferos porosos o asimilables (en cuanto a funcionamiento), basada en diversos aspectos desarrollados a lo largo de la Tesis Doctoral.

Una vez iniciado el procedimiento de definición del perímetro de protección (a través de los Planes Hidrológicos o por el Organismo de cuenca, de oficio o a instancia de las autoridades medioambientales, municipal o a solicitud de otra autoridad con competencias sobre la materia), la metodología para su delimitación contemplaría el desarrollo de las siguientes etapas:

1. Análisis de la información requerida para delimitar perímetros de protección a las captaciones de abastecimiento urbano de una localidad

➤ Recopilación de la información existente:

- Tratamiento legal de los perímetros de protección en el Plan Hidrológico de cuenca donde se ubiquen las captaciones y su definición en la Normativa correspondiente al mismo.
- Estudios relativos al área donde se ubican las captaciones de abastecimiento: geológicos e hidrogeológicos regionales, específicos del acuífero captado, características de la unidad hidrogeológica, análisis socioeconómico, informaciones relativas a las infraestructuras del abastecimiento y tendentes a evaluar las necesidades de agua para este, estudios referentes a diversas actividades antrópicas en el municipio su evaluación administrativa, así como referente a la legislación del suelo específica de la Comunidad Autónoma a la que pertenezca el municipio y al planeamiento urbanístico del mismo.

➤ Trabajos de campo.

Estos contemplarán, al menos, los siguientes aspectos:

- Evaluación de la cartografía, geología, hidrogeología e informes existentes.
- Inventario de puntos de agua.
- Análisis litoestratigráfico de los materiales aflorantes y de columnas litológicas de los sondeos.
- Elaboración de mapas de isopiezas representativas de diferentes estaciones y condiciones climáticas, identificando zonas de flujo y descarga, analizando la relación río-acuífero-ecosistemas-zonas húmedas.
- Elaboración de cartografía hidrogeológica del acuífero captado en el entorno de las captaciones de abastecimiento urbano.
- Análisis de los elementos que componen la infraestructura del abastecimiento a la población, situación y características de las captaciones, sus sistemas de protección, funcionamiento de la estación depuradora y red de alcantarillado.
- Inventario de focos potenciales de contaminación agrícolas, efectuando una cartografía de cultivos e identificación de prácticas de abonado y utilización de

plaguicidas.

- Inventario de focos potenciales de contaminación ganaderos, reconociendo las granjas para evaluar las principales características de las explotaciones, el estiércol producido, sus sistemas de recogida, almacenamiento y eliminación.
 - Inventario de focos potenciales de contaminación industriales, evaluando, según el tipo de actividad, su relación con las infraestructuras de abastecimiento urbano y sus posibles efectos medioambientales.
 - Inventario de focos potenciales de contaminación urbanos, identificando el estado de la red de alcantarillado, estaciones depuradoras, uso y distribución de fosas sépticas y vertederos de residuos sólidos.
 - Toma de muestras de agua, con análisis de componentes mayoritarios, bacteriológicos y, en función de los focos de contaminación, componentes específicos (hidrocarburos, metales pesados...).
- Encuestas al Ayuntamiento, empresas e instituciones relacionadas con el abastecimiento a la población.

En ellas se analizarán entre otros, los siguientes aspectos:

- Actividad socioeconómica del municipio: población y principales actividades en el mismo.
 - Infraestructura del abastecimiento a la población: captaciones, depósitos, redes de distribución, redes de alcantarillado, estaciones depuradoras.
 - Necesidad de agua para abastecimiento: control de volúmenes bombeados y consumidos, dotación, periodo en que no se cubra la demanda.
 - Características de instalaciones agrícolas, ganaderas, industriales y urbanas del municipio e incidencias relativas a las mismas.
 - Análisis de las solicitudes de futuras actividades económicas potencialmente contaminantes.
 - Planeamiento urbanístico y perspectivas de modificaciones al mismo.
- Elaboración en gabinete de los datos de campo y encuestas efectuadas.

El análisis de la información obtenida en el trabajo de campo y de las encuestas realizadas comprenderá:

- Población, su evolución y características de la actividad socioeconómica del municipio.
- Análisis hidrogeológico detallado del acuífero captado.

Este contemplará, entre otros, los siguientes aspectos: Naturaleza de los materiales captados; Tipo de acuífero, geometría, características de sus límites; Características de las captaciones; Funcionamiento hidrogeológico (análisis piezométrico y su evolución, características de las zonas de recarga y descarga, identificación de divisorias hidrogeológicas, relación río-acuífero-zonas húmedas-ecosistemas de interés especial, aforos de ríos y manantiales); Evaluación de la recarga y descarga, (balance de entradas y salidas, desglose de usos del agua, distribución); Parámetros hidráulicos, representatividad y tratamiento estadístico; Definición del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero.

- Tratamiento de los datos de análisis químicos: distribución espacial de los tipos de agua, potabilidad y problemas de calidad por actividades antrópicas.
- Problemática del abastecimiento a la población.

Análisis de la infraestructura del abastecimiento (características de las captaciones y su régimen de explotación, potabilización, depósitos de almacenamiento y redes de distribución, redes de alcantarillado, estaciones depuradoras, pérdidas de las infraestructuras), necesidades de agua para abastecimiento (volumen bombeado y facturado, dotaciones aplicadas).

- Análisis de los focos potenciales de contaminación (agrícolas, ganaderos, industriales y urbanos) del municipio y específicamente del entorno de las captaciones, evaluando su potencial contaminante, así como vulnerabilidad del acuífero ante la contaminación.
- Planeamiento urbanístico en el entorno de las captaciones de abastecimiento y de su área de alimentación así como análisis de la reglamentación del suelo aplicable en esas zonas.

2. Zonación a establecer en los perímetros de protección de la calidad

Se propone dividir los perímetros de protección en medios porosos o asimilables en su funcionamiento en tres zonas, en base a los criterios que se detallarán en cada uno de ellas.

Los métodos aplicables para su delimitación dependerán de las características hidrogeológicas del acuífero, la disponibilidad de los datos requeridos, las características específicas y problemática existente en el entorno de la captación de abastecimiento, así como del tiempo disponible para el estudio (si es un requerimiento judicial, un estudio general, de planificación etc.) y debe ser analizado en cada caso.

No obstante como primera aproximación hay que resaltar que si se aplican métodos hidrogeológicos como único criterio de delimitación se obtiene un perímetro único, que corresponde a toda el área de alimentación posible de la captación, bidimensionalmente, lo que da lugar a perímetros innecesariamente extensos, no siendo posible subdividirlos en zonas en las que aplicar diferentes grados de restricciones, como posibilita el empleo de métodos numéricos. Estos son representaciones matemáticas de sistemas de agua subterránea que incluyen asunciones y simplificaciones, por lo que la validez de sus resultados está directamente relacionada con la efectividad con la que representa dichos sistemas, debiéndose valorar en cada estudio la simplificación necesaria.

La utilización de modelos matemáticos, cuando se dispone de información adecuada para su ejecución y calibrado, permite considerar flujo tridimensional, distribución espacial de los parámetros hidráulicos, heterogeneidades del acuífero, influencia de ríos o drenes y efecto de los bombeos, entre otros factores, por lo que proporcionan resultados que se ajustan más a la realidad que los obtenidos al aplicar otros métodos, si bien presentan el inconveniente de requerir muchos datos y tiempo para su elaboración.

En los métodos analíticos es necesario efectuar una gran simplificación de las características hidrogeológicas del acuífero, y de las condiciones de explotación, siendo necesario introducir condiciones muy estrictas (pozos totalmente penetrantes, acuíferos de extensión infinita...) que pueden alejarse sensiblemente de la realidad, por lo que, especialmente para la delimitación de las zonas de restricciones que afectan a las zonas más alejadas de las captaciones, resulta más conveniente la utilización de modelos matemáticos siempre que se disponga de la información requerida para su eficaz calibración y ejecución.

Para ello se recomienda el empleo de modelos que resuelven las ecuaciones que definen el flujo en el acuífero modelado, proporcionando como salidas el nivel del agua en cada celda en diferentes pasos de tiempo, junto con modelos que utilizan los resultados del anterior y simulan la componente de advección en el transporte de solutos. Estos simulan el recorrido de partículas para diferentes tiempos de tránsito simulando así el área de procedencia de las partículas que alcanzarían las captaciones en diferentes tiempos de tránsito, lo que define su área de alimentación para dicho tiempo, en base a la cual se define la extensión final del perímetro de protección.

Este sistema permite evaluar la repercusión que tienen en el tamaño y forma de las zonas de alimentación diferentes hipótesis de bombeos en la captación a proteger y en otras del acuífero captado.

Los resultados de los métodos analíticos indicados se aproximarán más al funcionamiento real del acuífero cuanto más se asemejen las características hidrogeológicas en el entorno de las captaciones a un acuífero homogéneo, con flujo preferentemente bidimensional, gradiente regional uniforme y con una dirección principal de flujo en su entorno y mayor sea la capacidad de bombeo en las captaciones de abastecimiento a proteger.

Las zonas propuestas y sus características principales son:

➤ Zona inmediata o de restricciones absolutas

El objetivo principal de esta zona es proteger la captación y sus instalaciones (la captación propiamente dicha, la caseta del transformador o del motor y depósitos de agua o combustible entre otros) contra vertidos o infiltraciones directas en su superficie, así como impedir el acceso de animales y desaprensivos que pudieran contaminar directamente las captaciones. Por ello estará cerrada mediante sistemas que impidan el acceso a personas no autorizadas y convenientemente señalizada su identificación como parte del perímetro de protección así como la prohibición de acceso.

El criterio de delimitación será un tiempo de tránsito de 1 día.

Los métodos a emplear serán principalmente métodos analíticos, ya que el uso de modelos matemáticos para este tiempo de tránsito obligaría a establecer un tamaño de celda mucho menor de la requerida para tiempos mayores, o cambio en el tamaño de las celdas en el entorno de las captaciones a proteger, complicando la modelización sin aumentar significativamente la precisión que se obtiene empleando estos.

Pueden emplearse diversos métodos analíticos: Análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito, ecuación volumétrica del radio fijo calculado, método de Wyssling, método de Jacobs y Bear, método de solución analítica simple para aproximación a isocronas que definen zonas de transporte, considerándose no obstante que los más adecuados son el método del radio fijo calculado de la ecuación volumétrica o el método de Wyssling.

Las regulaciones y restricciones que se propone imponer a diversas actividades o instalaciones (agrícolas, ganaderas, urbanas, industriales y otras) en esta zona se detallan en la Tabla 43, que refleja las restricciones consideradas idóneas en la propuesta de perímetros de protección en el acuífero del Terciario detrítico desarrollada en el capítulo 11 de esta Tesis Doctoral y deben trasladarse al planeamiento urbanístico de los municipio afectados.

➤ Zona próxima o de restricciones máximas

Su objetivo es proteger frente a la contaminación bacteriológica, delimitándose en función de un tiempo de tránsito de 50 días, que es el considerado necesario para garantizar la degradación de la misma, utilizando también criterios hidrogeológicos.

El método de delimitación será preferentemente mediante modelos matemáticos de flujo simulando régimen permanente o transitorio y la simulación advectiva del transporte.

Cuando no sea posible el empleo de la simulación matemática se emplearán métodos analíticos.

Los métodos de Wyssling, Jabobs y Bear y método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte son los que proporcionan resultados más parecidos a las salidas de la simulación con el modelo matemático, especialmente en las captaciones en las que existe una clara dirección principal de flujo, presentándose habitualmente las menores diferencias con el método de Wyssling, que proporciona zonas más anchas que los otros.

También puede emplearse el método de Bas Krijgsman y Lobo Ferreira si bien, en general, es menos preciso que los anteriores, debiéndose comprobar si se está en los límites de aplicabilidad definidos para el mismo por sus autores.

Existe en todos ellos cierto grado de subjetividad, al tener que definir una única dirección principal de flujo en base a los valores de piezometría conocidos, lo que puede producir un error al orientar el perímetro en algunas captaciones en las que convergen diferentes direcciones de flujo.

En estos casos puede ser conveniente trasladar las longitudes obtenidas por el método a las direcciones de flujo existentes, integrando los resultados en una única zona.

En la Tabla 43 se detallan las regulaciones y restricciones a imponer a diversas actividades. Estas son las mismas de la zona anterior, si bien aquí se permitiría el acceso peatonal y que la atravesen redes de comunicación, y deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del término municipal.

➤ Zona alejada o de restricciones moderadas

Su objetivo es proteger la captación de abastecimiento frente a contaminantes de larga persistencia.

Se definirá en función de un tiempo de tránsito de varios años, criterios de tipo hidrogeológico o una combinación de ambos, debiéndose justificar en la propuesta de delimitación la opción elegida.

La delimitación de esta zona del perímetro empleando métodos hidrogeológicos exclusivamente, con el objetivo de definir el área de alimentación de cada captación, contemplará al menos el análisis de los límites del acuífero captado, cartografía hidrogeológica en el entorno de las captaciones, análisis de las isopiezas y dirección de flujo, relación del acuífero con ríos, arroyos, ecosistemas y zonas húmedas.

En el caso de emplear el tiempo de tránsito este se definirá en función de un análisis que contemple entre otros aspectos las características hidrogeológicas del acuífero captado, los focos potenciales de contaminación existentes en el entorno de las captaciones de abastecimiento, la vulnerabilidad frente a la contaminación, así como las características de la infraestructura del abastecimiento a la población y necesidades

de agua para el mismo.

En las poblaciones cuyo abastecimiento dependa por completo de las captaciones de agua subterránea, procedentes de un mismo acuífero, no existiendo otros acuíferos en el entorno del municipio, es necesario que el límite externo de esta zona, y por lo tanto del perímetro de protección, no existiendo restricciones a partir de él, sea lo suficientemente elevado para garantizar un abastecimiento desde los mismos con calidad adecuada, al menos durante un periodo de tiempo dilatado, 25 años, que permita en su caso la búsqueda de fuentes de abastecimiento alternativos, ya que eventuales contaminantes de larga persistencia no alcanzarían las captaciones hasta transcurrido ese plazo de tiempo. Por otra parte no se recomienda que el tiempo seleccionado sea inferior a 4 años.

La precisión de los métodos analíticos, que era aceptable para tiempos de tránsito de 1 día y 50 días, disminuye enormemente al aumentar mucho el tiempo. Así para tiempos de 4 años se produce un doble efecto de sobreprotección, generalmente en longitud e infraprotección lateralmente, que permitiría la llegada de contaminantes a la captación al quedar fuera de las restricciones impuestas en el ámbito del perímetro, ambas de gran magnitud, por lo que para tiempos de tránsito de 4 años o superiores se recomienda especialmente la utilización de los resultados de la simulación de flujo junto con la simulación advectiva del transporte.

En el caso de no poder emplearse modelos matemáticos para estos tiempos de tránsito es preferible el empleo de métodos hidrogeológicos, que en general delimitan áreas que incluyen en su totalidad las proporcionadas por el modelo matemático pero de extensión muy superior ya que, entre otros aspectos, consideran toda el área de recarga bidimensionalmente o el empleo de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito que disminuye dicha sobreprotección.

Hay que resaltar que cuanto mayor es el tiempo considerado menor es la diferencia del área a proteger entre la modelización y los métodos hidrogeológicos, si bien también puede suceder que la simulación del flujo tridimensional para tiempos elevados incluya en el perímetro de protección alguna zona no incluida con el método hidrogeológico, que define el área de alimentación bidimensionalmente.

En el caso de que se solapen las zonas de protección de diversas captaciones es conveniente agruparlas.

En la Tabla 43 se detallan las regulaciones y restricciones a imponer a diversas actividades o instalaciones en esta zona, que deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del término municipal, destacando que muchas actividades, especialmente las agrícolas o urbanas, con fuentes potenciales de contaminación de carácter bacteriológico, degradable en un tiempo superior a 50 días pasan a ser condicionadas o permitidas.

TABLA 43. REGULACIONES Y RESTRICCIONES A IMPONER A DIVERSAS ACTIVIDADES E INSTALACIONES EN LAS DIFERENTES ZONAS EN QUE SE SUBDIVIDEN LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD.

	DEFINICIÓN DE ACTIVIDADES	ZONA DE RESTRICCIONES ABSOLUTAS	ZONA DE RESTRICCIONES MÁXIMAS			ZONA DE RESTRICCIONES MODERADAS		
		Prohibido	Prohib.	Cond.*	Permit.	Prohib.	Cond.*	Permitido
ACTIVIDADES AGRÍCOLAS Y GANADERAS	Uso de fertilizantes	●	●				●	
	Uso de herbicidas	●	●				●	
	Uso de pesticidas	●	●				●	
	Almacenamiento de estiércol	●	●				●	
	Vertido de restos de animales	●	●				●	
	Ganadería intensiva	●	●				●	
	Ganadería extensiva	●	●					●
	Almacenamiento de materias fermentables para alimentación del ganado	●	●				●	
	Abrevaderos y refugios de ganado	●	●				●	
	Silos	●	●				●	
ACTIVIDADES URBANAS	Vertidos de aguas residuales urbanas sobre el terreno	●	●				●	
	Vertidos de aguas residuales urbanas en fosas sépticas o balsas	●	●				●	
	Vertidos de aguas residuales urbanas en cauces públicos	●	●				●	
	Vertido de residuos sólidos urbanos	●	●				●	
	Cementerios	●	●				●	
ACTIVIDADES INDUSTRIALES	Asentamientos industriales	●	●				●	
	Vertido de residuos líquidos industriales	●	●			●		
	Vertido de residuos sólidos industriales	●	●			●		
	Almacenamiento de hidrocarburos	●	●				●	
	Depósito de productos radiactivos	●	●			●		
	Inyección de residuos industriales en pozos y sondeos	●	●			●		
	Conducciones de líquido industrial	●	●			●		
	Conducciones de hidrocarburos	●	●			●		
	Apertura y explotación de canteras	●	●				●	
	Relleno de canteras o excavaciones	●	●				●	
OTRAS	Campings	●	●				●	
	Acceso peatonal	●			●			●
	Transporte redes de comunicación	●		●			●	

* El proyecto de actividades debe incluir un informe técnico sobre las condiciones que debe cumplir para no alterar la calidad existente del agua subterránea.

- Las actividades que se propone regular o restringir en las tres zonas en que se subdividen los perímetros de protección, que pueden afectar a actividades ya existentes o no, a definir y justificar en cada propuesta de delimitación de perímetros de protección contemplará como mínimo los condicionamientos y prohibiciones a las que deben someterse las actividades urbanas, agrícolas, ganaderas, industriales, recreativas y las obras de infraestructura, indicadas en la Tabla 43, deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del término municipal como ha sido indicado. Para ello se debe analizar la calificación urbanística actual de las mismas, debiéndose resaltar que las modificaciones introducidas en la clasificación del suelo por la Ley 6/1998 sobre régimen del suelo y valoraciones (BOE, 1998 a), supone que el mantenimiento como “*suelo no urbanizable*” del área definida por los perímetros de protección, requiere dotarlos de un régimen de especial protección, lo cual estaría plenamente justificado por la necesidad de establecer limitaciones para la protección del dominio público hidráulico.
- Se propone establecer en cada estudio de delimitación de perímetros de protección un “Plan de emergencia”, contemplando la eventualidad de que se produzca algún vertido accidental en el ámbito del perímetro de protección, que estableciese un protocolo de actuación para los responsables municipales del suministro de agua potable a la población.

Este permitiría detener con carácter inmediato los bombeos en la zona afectada y utilizar, si es posible, la infraestructura del abastecimiento a la población (conducciones, depósitos, captaciones de abastecimiento entre otros) para cubrir el suministro, proporcionando el tiempo necesario para evaluar la repercusión que tendría esa contaminación accidental, en función de las previsiones y análisis efectuados al elaborar el perímetro de protección, actuando en consecuencia.

Por último, cabe resaltar que la existencia de nueva información podría hacer necesario efectuar una revisión del perímetro de protección, definido en base a los conocimientos del medio físico y la metodología existente en el momento en el que ha sido elaborado, debiéndose contemplar periódicamente si se considera necesario efectuar su revisión y eventual modificación.

3. Protección del recurso hídrico en cantidad

La metodología que se propone para la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano es consecuencia del análisis crítico del encuadre legal de los perímetros de protección “de la cantidad” en dichas captaciones. Esta indica la necesidad de plantear secuencialmente los estudios a elaborar y los métodos aplicables. Comprendería las siguientes etapas:

➤ Etapa A:

En primer lugar habría que recopilar y analizar la información existente sobre la unidad hidrogeológica en la que se ubica la captación objeto de protección, especialmente respecto a sus recursos, la Norma general de explotación y las diferentes regulaciones existentes respecto a demandas ambientales, y de otro tipo, así como a las concesiones existentes para abastecimiento y otros usos.

➤ Etapa B:

En la segunda etapa se procederá a estudiar detalladamente el acuífero explotado por las captaciones de abastecimiento, realizando una cartografía hidrogeológica,

definiendo sus límites, tipo de acuífero, efectuando un balance hidrogeológico detallado, cuantificando sus recursos y reservas (si es posible), contemplando las limitaciones establecidas al recurso en la Unidad hidrogeológica que le afecten.

Se analizará la piezometría en diferentes estaciones y diferentes sectores para contrastar datos del balance, evaluar su heterogeneidad, analizar la relación con cursos fluviales, ecosistemas, zonas húmedas y otros acuíferos, identificando zonas de recarga y descarga, valores y distribución de parámetros hidrodinámicos, caracterización hidroquímica e identificación, si procede, de áreas diferentes en un mismo acuífero, evaluando la relación del acuífero con otros, tanto física como de gestión del recurso hídrico.

En el caso, muy frecuente, de que no exista una concesión específica para el abastecimiento, habrá que obtener el caudal necesario para abastecer a la población partiendo de las dotaciones previstas para estas en los Planes Hidrológicos de cuenca, efectuando la distribución del volumen necesario entre las captaciones de abastecimiento existentes, en función de sus características y la infraestructura municipal.

➤ Etapa C:

La recopilación crítica de información y el análisis hidrogeológico detallado del acuífero captado, efectuado en las primeras etapas del estudio, debe complementarse con la aplicación de otros métodos para definir con mayor precisión la zona a proteger, recomendándose inicialmente la aplicación de métodos analíticos o de parámetros agregados, como primera aproximación, combinándose los resultados obtenidos en la aplicación de cada uno de ellos.

Los métodos analíticos más utilizados, son los siguientes: El método del radio fijo calculado de la ecuación volumétrica; Método que delimita el área necesaria para proporcionar mediante la recarga el volumen extraído; Método del radio fijo calculado función del descenso; Método de Albinet; Método de Hoffman y Lillich; Método de Horsley.

➤ Etapa D:

Es muy conveniente contrastar y, en su caso, modificar las zonas obtenidas mediante la combinación de los diferentes métodos analíticos efectuando ensayos de trazadores, destacando el empleo del análisis del contenido en tritio y el empleo de colorantes como la fluoresceína, al ser especialmente adecuadas para este tipo de estudios.

➤ Etapa E:

Consiste en evaluar si se dispone de la información suficiente para poder efectuar un modelo matemático del acuífero.

Para ello es imprescindible analizar el grado de conocimiento respecto a los límites y condiciones de contorno, funcionamiento hidrogeológico del acuífero, valores de piezometría, evolución de niveles en las captaciones, aforos de cursos fluviales y manantiales, parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, porosidad eficaz), volumen y distribución de bombeos, relación con cursos fluviales, ecosistemas y zonas húmedas, entre otros factores.

En caso de que no se disponga de suficiente información se dará por terminado el análisis, integrando los resultados obtenidos previamente.

➤ Etapa F:

La simulación matemática, que se realiza cuando se dispone de información suficiente para la ejecución, y calibrado del modelo, permite modelizar diferentes hipótesis de extracción de aguas subterráneas en la zona de estudio, y su repercusión en las captaciones de abastecimiento, demandas ambientales y concesiones existentes para abastecimiento y otros usos.

Los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral al aplicar un modelo matemático de flujo que permite además la realización de balances hídricos aconsejan el empleo de modelos matemáticos que permitan efectuar balances hídricos de entradas y salidas al acuífero en las zonas que se seleccione del área modelada, desglosados por su procedencia y destino (celdas de nivel constante, pozos, ríos, drenes, recarga y zonas externas entre otras) para proteger en cantidad el recurso hídrico.

Esas zonas deben incluir en todo caso específicamente los arroyos, ecosistemas y zonas húmedas para poder simular el flujo del acuífero a los mismos por su importancia medioambiental.

Las simulaciones permiten definir la zona a delimitar y las medidas a establecer en la misma en función de los requerimientos que se impongan. Entre estos cabe destacar los volúmenes necesarios para el abastecimiento sostenibles a largo plazo, niveles asumibles, relación río-acuífero-ecosistemas-zonas húmedas que garantice su mantenimiento con los requisitos ambientales que se determinen, volúmenes de bombeo compatibles con los anteriores requerimientos, entre otros a definir en cada estudio.

➤ Etapa G:

La metodología descrita debe concluir con la integración de los análisis efectuados y la elaboración, conforme a las propuestas de modificaciones legales efectuadas en esta Tesis Doctoral, de una “Norma parcial para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento”, referida al entorno de las captaciones, definida con la metodología propuesta, para garantizar el volumen extraído destinado al abastecimiento y otras demandas.

Estas Normas parciales, a incluir en la Norma general de explotación de la Unidad Hidrogeológica, cuyas regulaciones prevalecerán sobre las de carácter general ya que el hecho de dictarse presupone la existencia de circunstancias especiales o particulares que hacen necesaria su excepción de la norma general definirá, al menos, los siguientes aspectos:

- Delimitación del acuífero explotado por la captación de abastecimiento urbano, características hidrogeológicas y esquema estructural y de funcionamiento del acuífero. Determinación de los recursos naturales y asignables con las restricciones que imponen los objetivos de calidad, los aspectos medioambientales y las explotaciones actuales en el ámbito del acuífero. Se detallarán:
 - Límites, tipo de acuífero, litología y balance hidrogeológico detallado, definiendo los usos de agua y extracciones.
 - Regulaciones sobre los volúmenes necesarios para el mantenimiento de ecosistemas, zonas húmedas y caudales ecológicos de los cursos fluviales en el acuífero, volúmenes necesarios en acuíferos costeros para mantener la interfaz agua dulce agua salada, concesiones para abastecimiento y otros usos, así como otras regulaciones establecidas.

- Recursos naturales asignables (recursos renovables minorados por regulaciones y concesiones existentes) y volumen necesario para abastecer a la población.
- Análisis piezométrico en diferentes estaciones y años, valores y distribución de parámetros hidrodinámicos (conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento y porosidad eficaz entre otros), caracterización hidroquímica, definición del funcionamiento hidrogeológico del acuífero identificando, si procede, áreas diferentes dentro del acuífero.
- Distribución de las extracciones y de los recursos asignables a los diferentes usos. Volúmenes de explotación y regulación de caudales en cada captación en el entorno delimitado para asegurar el recurso en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano.

Las extracciones totales máximas en todo el acuífero en un año deben ajustarse a los recursos renovables medios del acuífero minorados por las regulaciones medioambientales y las concesiones ya existentes para abastecimiento y otros usos en el acuífero, considerando el volumen restante como recursos asignables. Se pretende asegurar que los niveles estén estables y a un nivel aceptable a largo plazo y que los descensos de niveles que se produzcan puedan recuperarse por la recarga.

El volumen de agua necesario para el abastecimiento se obtiene mediante todas las captaciones de abastecimiento del municipio, distribuyéndose entre estas en función de su productividad y de la infraestructura de abastecimiento a la población (depósitos, tuberías...). Para garantizar el volumen a bombear en cada una de ellas hay que definir un área que permita suministrarlo de un modo estable.

La Norma parcial puede definir un área que incluya únicamente la captación o captaciones de abastecimiento del municipio o bien un área que incluya, además de esta, limitaciones por usos medioambientales, otras concesiones o incluso otros recursos asignables en su interior, definiendo limitaciones al volumen máximo, caudal y profundidad entre otros de cada captación.

El tamaño de ese área de protección y las restricciones en su interior se obtienen sobre la base de la aplicación de la metodología propuesta empleando una combinación de criterios hidrogeológicos, métodos analíticos, ensayos de trazadores y, en su caso, modelos matemáticos.

El grado de precisión con que se puede definir en cada zona estudiada las regulaciones establecidas en el entorno de la captación, para garantizar el volumen requerido, depende de los métodos que se hayan aplicado para complementar los resultados del análisis hidrogeológico de detalle del acuífero. Así, por ejemplo, si ha podido efectuarse un modelo matemático, pueden simularse muchas más hipótesis de la respuesta a obtener en la captación a proteger ante posibles nuevas extracciones que si se emplean métodos analíticos junto con criterios hidrogeológicos.

En todo caso, y con el grado de detalle que permita el método empleado y la complejidad e interrelación de los diferentes usos, deberán concretarse, además del método mediante el que fueron definidos, los siguientes aspectos:

- Tamaño del área de protección, número de captaciones de abastecimiento incluidas y si incluye además otras concesiones o limitaciones medioambientales.
- Normas de señalización en el terreno del área de protección.

- Régimen de explotación: Volumen global máximo de extracción en la totalidad del área de protección definida, incluyendo en ese volumen las captaciones de escasa importancia (que son aquellas con un volumen anual extraído menor de 7000 m³ y un caudal instantáneo menor de 1 L/s, que tengan instalado un equipo mecánico adecuado a las anteriores condiciones, o las que cumplan los requisitos indicados expresamente en los Planes Hidrológicos para cada acuífero o unidad hidrogeológica), así como el volumen y caudal máximo de extracción para captaciones distintas de la que es objeto de protección.
- Distancia mínima entre la captación de abastecimiento a proteger y otras captaciones, detallando el método que se ha empleado en su definición.
- Requisitos a cumplir para limpiar, modificar o perforar una captación que sustituya a otra que disponga de concesión, así como condiciones de clausura de la captación original.
- Profundidades de perforación de los pozos, sondeos y de instalación de bombas, detallando, en acuíferos con problemas de intrusión salina la evaluación de su repercusión ante el posible avance del frente salino.
- Regulación de solicitudes a presentar ante el Organismo de cuenca correspondiente para obtener la preceptiva autorización de investigación para determinar la existencia de aguas subterráneas y las labores de perforación, alumbramiento y aforo de caudales y requisitos mínimos del proyecto de investigación.
- Normas de sellado de niveles acuíferos con mala calidad química que haga inadecuada su explotación para abastecimiento a poblaciones o su empleo para otros usos, con objeto de no contaminar el recurso hídrico disponible, así como normas referentes al abandono de pozos o de sondeos de investigación para evitar conexiones entre diferentes acuíferos y contaminaciones.
- Regulaciones a las obras civiles, detallando las restricciones a imponer en el área de protección de la captación de abastecimiento urbano a dichas obras (autopistas, trazados férreos, túneles, fosas, aparcamientos subterráneos, barreras impermeables bajo el nivel piezométrico y cimentaciones entre otras), así como las restricciones a actividades mineras (como el establecimiento de graveras), ya que pueden producir cambios en el nivel piezométrico, creando depresiones o modificando la dirección y sentido del flujo entre otros, produciendo afección a la captación a proteger.
- Mecanismos de revisión de la norma parcial ante nueva información que mejore el conocimiento del área a proteger y definición de una red de control para evaluar su correcto funcionamiento.

4. Tramitación administrativa

La tramitación administrativa se efectuaría conforme a las propuestas de modificaciones legales desarrolladas en esta Tesis Doctoral que contemplan la denominación de “perímetros de protección” exclusivamente para los delimitados con objeto de proteger frente a la contaminación, con limitaciones a diversas actividades. Por otra parte se establecería una “norma parcial para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento”, siendo el procedimiento de tramitación, diferente en ambos casos, el siguiente:

➤ Perímetros de protección de la calidad.

La propuesta de delimitación del perímetro de protección efectuada conforme a lo indicado previamente en el punto segundo de esta propuesta metodológica (“Zonas a establecer en los perímetros de protección de la calidad”) será tramitada ante el Organismo de cuenca que, tras su evaluación y eventual modificación, lo remitirá a los Servicios de Ordenación del Territorio de los Ayuntamientos y las Comunidades Autónomas a los que pertenezca el área que delimita el perímetro. Estos emitirán informe sobre el perímetro de protección, especialmente respecto a su incidencia en la normativa urbanística, actual y prevista, de los terrenos afectados.

La propuesta de perímetro de protección con las eventuales modificaciones, fruto de los informes previos que, analizados conjuntamente por dichas administraciones y la proponente del perímetro, resulten compatibles con el objetivo de preservar la calidad del agua captada para abastecimiento, será objeto de trámite de información y audiencia pública ante posibles interesados.

La propuesta final será aprobada por la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca, que la remitirá a las Comunidades Autónomas y Ayuntamientos afectados para que trasladen las restricciones indicadas para las diferentes zonas que componen el perímetro de protección a las normativas autonómicas y locales sobre ordenación del territorio y autorización de actividades clasificadas.

Se considerará las áreas incluidas en los perímetros de protección como suelo no urbanizable sometido a un régimen especial de protección, justificado por la necesidad de proteger el dominio público hidráulico, máxime ante su uso para abastecimiento a la población. Este procedimiento subsanaría los actuales problemas en la implantación real en el terreno de los perímetros de protección.

➤ Normas parciales para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento.

La propuesta de Norma parcial elaborada conforme a lo reseñado en el punto tercero de esta propuesta (“Protección del recurso hídrico en cantidad”) a incluir en la Norma general de explotación de la unidad hidrogeológica, se efectuaría en el seno de la Confederación Hidrográfica, sin que sea imprescindible la concurrencia de otras Administraciones.

17.- BIBLIOGRAFÍA

- Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council. 1995. *Guidelines for groundwater protection in Australia*. Commonwealth Government bookshops in the states and territories, 83 pp.
- Akker, C. 1994. Supply well protection in the Netherlands. En *Seminario sobre perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas. Experiencia en países europeos*. Fundación Centro Internacional de Hidrología subterránea, Barcelona, diciembre 1994.
- Albinet, M. 1972. *Contribution à la délimitation des périmètres de protection des captages d'eau souterraine. Essai de détermination de l'aire d'alimentation de captages en nappes libres*. Note technique n° 3, BRGM 72. SGN 370. AME.
- Alonso, A. 1981. El Cretácico de la provincia de Segovia (Borde norte del sistema Central). Universidad Complutense de Madrid. *Seminario de estratigrafía*, 7,1-271.
- Alvarez-Campana, J.M.; Aroca Lujan, E.; Ballesteros Navarro, B. y Santafé Martínez J.M. 1992. Consideraciones sobre perímetros de protección a captaciones de agua subterránea para abastecimiento urbano. Nueva propuesta de zonificación y definición. *V Simposio de Hidrogeología*, Alicante, Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Tomo XV.
- Ayuntamiento de Villacastín. 1994. *Revisión de las Normas Subsidiarias de Villacastín (Segovia). Tomo I. Normas urbanísticas*, 70 pp.
- Bas Krijgsman, Ir. and Lobo Ferreira, J.P. 2001. *A methodology for delineating wellhead protection areas*. Serie informacao Técnica científica de Hidráulica n° 7. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 76 pp.
http://www-dh.lnec.pt/Gias/english/projects/BK_LF_ICT2001.pdf
- Bear, J. and Jacob, M., 1965. On the movement of water bodies injected into aquifers: *Journal of hidrogeology*, 3, 37-57.
- Bellido, F.; Capote, R.; Casquet, C.; Fuster, J.M.; Navidad, M.; Peinado, M.; Villaseca, C. 1981. Caracteres generales del cinturón Hercínico en el Sector oriental del Sistema Central Español. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 7,15-52.
- Boletín Oficial de Castilla y León (BOCYL). 1994. *Decreto 151/1994, de 7 de julio, por el que se aprueba el Plan Director de Infraestructura urbana*. BOCYL número 70, de 26 de octubre.
- Boletín Oficial de Castilla y León (BOCYL). 1999. *Ley 5/1999, de 8 de abril, de urbanismo de Castilla y León*. BOCYL número 70, de 15 de abril.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1985. *Ley 29/85, de 2 de agosto, de Aguas*. BOE número 189, de 8 de agosto.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1986. *Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/85, de 2 de agosto, de Aguas*. BOE número 103, de 30 de abril.

- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1988. *Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas*. BOE número 209, de 31 de agosto.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1990. *Real Decreto 1138/1990, de 14 de septiembre, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público*. BOE número 226, de 20 de septiembre.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1998 a. *Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre régimen del suelo y valoraciones*. BOE número 89, de 14 de abril.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1998 b. *Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca*. BOE número 191, de 11 de agosto de 1998.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1999 a. *Orden de 13 de agosto de 1999 por la que se dispone la publicación de las determinaciones del contenido normativo del plan Hidrológico de la cuenca del Duero, aprobado por Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio*. BOE número 206, de 28 de agosto, de 1999.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1999 b. *Ley 46/99, de 13 de diciembre, de modificación de la Ley 29/85, de 2 de agosto, de Aguas*. BOE número 298 de 14 de diciembre.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 2001 a. *Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional*. BOE número 161, de 6 de julio.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 2001 b. *Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas*. BOE número 176, de 24 de julio.
- California Environmental Protection Agency. State water resources. 2002. *Evaluation of groundwater model applications*. California Environmental Protection Agency. [Http://www.swrcb.ca.gov/cwphome/land/landu/intErnet/modeval.htm](http://www.swrcb.ca.gov/cwphome/land/landu/intErnet/modeval.htm).
- Capote, R. 1985. Historia deformativa en el Sistema Central. Tectónica prehercínica y Hercínica. *Revista Real Academia de Ciencias exactas Físicas y Naturales*. 79, 4, 511-522.
- Capote, R.; Casquet, C. y Fernández Casal, M.J. 1982. Los grandes complejos estructurales del Sistema Central: Modelo de evolución tectonometamórfica. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*. 76, 2, 313-331.
- Daly, D. and Misstear, B.D. 2001. The groundwater protection scheme in Ireland: A risk-based tool for effective land use planning. *Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 134-146.
- Dirección General de Obras Hidráulicas (DGOH). 1993. *Estudio de caracterización de la unidad hidrogeológica: Región de los Arenales. 02-17*. Informe 2884. Servicio Geológico.
- Dirección General de Obras hidráulicas (DGOH) e Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1988. *Estudio de delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares, y síntesis de sus características*. Informe 2505. Servicio Geológico.

- Environment Agency. 1998. *Policy and practice for the protection of groundwater*. The Stationery Office, 57 pp.
- Environment Agency. 2001. *Guidance on the assessment and interrogation of subsurface analytical contaminant fate and transport models*. National Groundwater Contaminated Land Centre report. Environment Agency. NC/99/38/1, 50 pp.
- Fernández Ruiz, L.; Montserrat Rebull, F.X y Cristobal, F.P. 1990. Residuos sólidos urbanos. En *XXIII Curso Internacional de hidrogeología aplicada*. IGME. ETSIMM, Madrid, 1990.
- Fernández Sánchez, J.A. 2001. Protección de las aguas subterráneas en el desarrollo del territorio. En Iribar, V.Grima, J, y Sánchez Vila (ed), *Las aguas subterráneas en el Plan Hidrológico Nacional*. Ediciones Mundiprensa, Madrid, 99-106.
- Fletcher, S. 2001. Linking groundwater and surface water management. *Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 270-276.
- Foster, S. 1994. Managing land to protect groundwater sources: The English experience. En *Seminario sobre perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas: Experiencia en países europeos*, Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona, diciembre 1994.
- González Manso, J.; Giráldez Cebollos-Escalera, R. 1998 a. *Evaluación de Impacto Ambiental (Simplificada). Ampliación de explotación porcina hasta 400 reproductoras, producción de lechones de 6 kg (fase 1)*. Sociedad Cañada del Abad S.L., 43 pp.
- González Manso, J.; Giraldez Cebollos-Escalera, R. 1998 b. *Evaluación de Impacto Ambiental (Ordinaria). Construcción de explotación porcina para recría y cebo. (Fase 2 y 3)*. Sociedad cañada del Abad S.L., 47 pp.
- González Monterrubio, J.M. 1992. *Análisis hidrogeológico de la sobreexplotación y protección de humedales en la ley de Aguas de 1985*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 365 pp.
- Gramel, S.; Urban, W. 2001. Cooperative agreements between water supply and agriculture in Germany. *Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 37-49.
- Hirata, R.; Reboucas, A. 1999. La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. *Boletín Geológico y Minero*, 110-4, 423-436.
- Hofmann, W., Lillich, W., 1973. *Problematik der bemessung der engeren schutzzones für lockergesteinsaquifere*. Deutsch, Geol. Hannover.
- Horsley, Scott, W., 1983. Delineating zones of contribution for public supply wells to protect groundwater. *National water well conference*. Worthington, Ohio. Proceedings.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1979. *Proyecto para la investigación hidrogeológica de la cuenca del Duero. Sistemas número 8 y 12. Plan nacional de investigación de aguas subterráneas (PIAS)*. IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1980. *Investigación hidrogeológica de la cuenca del Duero. Sistemas número 8 y 12*. Colección Informe. IGME, Madrid, 75 pp.

- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1982 a. *Proyecto de investigación de infraestructura hidrogeológica del sistema 11. Cuenca del Duero*. IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1982 b. *Investigación hidrogeológica de la cuenca del Duero. La explotación de los recursos hidráulicos en la zona comprendida entre los ríos Voltoya y Trabancos*. IGME, Madrid, 47 pp.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1982 c. *Proyecto de Gestión y conservación de acuíferos en la cuenca del Duero. Informe sobre la calidad del agua*. IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1987. *Calidad de las aguas subterráneas en los acuíferos terciarios detríticos de la cuenca del Duero*. IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1991. *Cartografía hidrogeológica a escala 1:200.000. Hoja 38 (Segovia)*. IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME) 2000. *Unidades Hidrogeológicas de España. Mapa y datos básicos*. IGME, Madrid, 34 pp.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). 2002. *Demografía y población. Series cronológicas TEMPUS. Datos de población de los municipios de España*. <http://www.ine.es/inebase/cgi/um>.
- Junta de Castilla y León. 1995. *Mapa hidrogeológico de Castilla y León*. Junta de Castilla y León.
- Käss, W. 1998. *Tracing technique in geohydrology*. A.A. Balkema, Rotterdam. 580 pp.
- Konikow. 1986. *Current issues predictive modeling of groundwater*. U. S. Geological Survey Newsletter, p. 4.
- Lallemand – Barrès, A., Roux, J.C. 1989. *Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée a la consommation humaine*. Manuels et methodes. Éditions du BRGM. Orleans, 221 pp.
- Lallemand – Barrès, A., Roux, J.C. 1999. *Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée a la consommation humaine*. Éditions du BRGM. Orleans, 334 pp.
- Laws, A.T. 2001. Groundwater protection in western Australia. *Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings. 105-118.
- López-Camacho y Camacho, B. 1976. *Aplicación de métodos estadísticos en la planificación de recursos hidráulicos subterráneos. Aplicación al área metropolitana de Madrid*. Tesis doctorales. ETSICCP. Madrid.
- López-Camacho y Camacho, B. 1995. Las aguas subterráneas en los abastecimientos españoles: gestión, protección y perspectivas. En *Las aguas subterráneas en la Ley de aguas Española. Un decenio de experiencia*. AIH-GE, Madrid, 109-131.
- López-Camacho y Camacho, B. y Martínez Alfaro, P.E. 1979. Análisis estadístico del comportamiento de acuíferos muy heterogéneos. Aplicación a la identificación de parámetros. *II Simposio Nacional de Hidrogeología*, Pamplona, 37-56.
- López Geta, J.A., Navarrete Martínez, P., Moreno Merino, L., Ruiz Hernández, J.M. Ballester Rodríguez, A., del Barrio Beato, V. 1996 a. *Calidad química y contaminación de las aguas subterráneas en España. Periodo 1982-1993. Cuenca del Duero*. IGME.

- López Geta, J.A., Martínez Navarrete, C.; Moreno Merino, L., Navarrete Martínez, P. y Rodríguez Caro, J.B. 1996 b. *Guía para la elaboración de perímetros de protección de las aguas minerales y termales*. IGME, Madrid, 104 pp.
- López Geta, J.A., Fornés Azcoiti, J.M.; Ramos González, G.; Villarroya Gil, F. 2001. *Las Aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo*. IGME. Fundación Marcelino Botín, Madrid, 94 pp.
- Madsen, B. 1994. Protection of groundwater resources in Denmark. En *Seminario sobre perímetros de protección de captaciones de agua subterránea: Experiencia en países europeos*, Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona.
- Madsen, B., Henriksen, H.J. and Knudby, C. 1998. The national water resource model developed for the assesment of the distribution and protection of the Danish groundwater resources. En Brahma *et al. IAH/AIH joint conference Gambling with groundwater –physical, chemical and biological aspects of aquifer stream relations*, 219-226.
- Martínez Alfaro, P.E. 1979. Análisis estadístico de los materiales del Terciario detrítico de la fosa del Tajo. *II Simposio Nacional de Hidrogeología*, Pamplona, 287-307.
- Martínez Alfaro, P.E. 1980. Un primer análisis de la permeabilidad y el grado de anisotropía de los materiales detríticos de la fosa del Tajo. *Boletín Geológico y Minero* T XCI-V, 645-648.
- Martínez Alfaro, P.E.; Montero González, E.; Martínez Navarrete, C. y Vázquez Valenzuela, L. 1986. *Sobreexplotación de las aguas subterráneas en la zona de la Moraña*. IBERSAT. Junta de Castilla y León . Consejería de Industria, Energía y Trabajo.
- Martínez Navarrete, C. López Geta, J.A. y Rodríguez Hernández, L. 1997. *Metodología para la delimitación de perímetros de protección en captaciones destinadas al abastecimiento público y criterios para establecer un orden de prioridad en su implantación. Aplicación al caso de los municipios de la provincia de Alicante*. IGME. Diputación de Alicante, 86 pp.
- Martínez Navarrete, C. y Fernández Sánchez, J.A. 1999. *Informe preliminar sobre posible afección a las captaciones de agua subterránea para abastecimiento a Villacastín por la instalación de dos granjas porcinas*. IGME.
- Martínez Navarrete, C. y Fernández Sánchez, J.A. 2000. *Estudio para la delimitación de perímetros de protección a las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín (Segovia)*. IGME. Informe H8-01-00.
- Martínez Navarrete, C. y López Geta, J.A. 2001. Perímetros de protección de aguas subterráneas y del medio ambiente relacionado. En Iribar, V.; Grima, J. y Sánchez Vila (ed.), *Las aguas subterráneas en el Plan Hidrológico Nacional*. Ediciones Mundiprensa, Madrid, 89 - 97.
- Martínez Navarrete, C. y García García , A. 2001 a. Metodología para la protección de captaciones de abastecimiento en materiales detríticos. Integración de métodos analíticos, modelos matemáticos y criterios hidrogeológicos. *VII Simposio de Hidrogeología*, Murcia, Tomo XXIII, Hidrogeología y recursos hidráulicos, 137 – 149.
- Martínez Navarrete, C. y García García , A. 2001 b. Methodology for wellhead protection areas implementation. Application to urban water supply catchments in

- carbonated and detritic formations in Spain. *Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 198-209.
- Martínez Navarrete, C. 2002. *Un ejemplo de metodología para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos detríticos: Villacastín*. Trabajo de investigación tutelado. Programa de doctorado de Geología Dinámica y Ambiental. Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid, 81 pp.
 - McDonald, M.C., and Harbaugh, A.W.1988. *A modular three-dimensional finite difference groundwaterflow model*. U.S. Geological Survey Techniques of water resources investigation, 6, chap A.1, 586 pp.
 - Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM). 1997. *Plan Hidrológico de la cuenca del Duero. Normativa*. MIMAM. Madrid.
 - Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM) 2000. *Libro Blanco del Agua en España*. MIMAM, Madrid, 637 pp.
 - Moreno Merino, L.; Martínez Navarrete, C.; López Geta, J.A. y Navarrete Martínez, P. 1991. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. IGME, Madrid, 289 pp.
 - Morris, B.L. 1994. Providing the tools: The British experience in groundwater protection zoning. *2º Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*. Santiago de Chile.
 - Office Fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEFP). 2002. *Guide pratique. Delimitation des zones de protection des eaux sou terraines en milieu fissuré. Version provisoire du 28 mars 2002*. <http://guf.unibe.ch/dokugs2/DISCO.pdf>.
 - Pérez González, A., Ruiz García, C.; Bellido Mulas, F.; Fuster, J.M.; Martín Serrano, A.; Navidad, M.; Olmo Sanz, A.; Pablo Macia, J.G.; Villaseca, C. 1990. *Mapa Geológico de España, E. 1:50000. Hoja 17-20, El Espinar*. Mapa y Memoria. IGME.
 - Pernía Llera, J.M.; Navarro Iañez, J.A.; Gómez Gómez, J.D.; Ortega Vargas, R.; Larka Abellan, M. 2001. Prioridades para la implantación de perímetros de protección en las captaciones de agua subterránea. Metodología desarrollada y aplicación a la Comunidad Valenciana. *VII Simposio de Hidrogeología*, Murcia, Tomo XXIII, Hidrogeología y recursos hidráulicos, 173 – 183.
 - Petit, V. 1998. *Les périmètres de protection en milieu fissuré: Exemples et principes d'application*. Raport BRGM-R-40289, 55 pp.
 - Phillips, G. 2001. Planning for water resources: The catchment abstraction management strategies (CAMS) process. *Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 12-18.
 - Pollock, D.W. 1994. User's guide for Modpath, Modpath-plot, V-3.0. A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite difference groundwater flow model. U.S. Geological Survey. Open file report 94-464, 234 pp.
 - Portero, J.M. y Aznar, J.M. 1984. Evolución morfotectónica y sedimentación terciarias en el Sistema Central y cuencas limítrofes (Duero y Tajo). *I Congreso Español de Geología*, 3, 253-263.
 - Preene, M. 2001. The inter-relationship between civil engineering works and groundwater protection. *Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 314-321.

- Rayne, T.W. Bradbury, K.R. y Muldoon, M.A. 2001. Delineación of capture zones for municipal wells in fractured dolomite, Sturgeon Bay, Wisconsin, USA. *Hydrogeology Journal*, 9 (5), 432-450.
- Rehse, W. 1977. *Abbaubane organische Verunreinigungen pathogene Keime und Viren*. Rapport n° 40177. Eidgenössisches amt für umweltschutz (Office de l'environnement à Berne).
- Reilly, T.E. 2001. *System and boundary conceptualization in groundwater flow simulation*. Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey book. Applications of hydraulics, chapter B8, 29 pp.
- Samper Calvete, J. 2001. El Plan Hidrológico nacional. La calidad y la contaminación de las aguas subterráneas. En Iribar, V.; Grima, J. y Sánchez Vila (ed.), *Las aguas subterráneas en el Plan Hidrológico Nacional*. Ediciones Mundiprensa, Madrid, 79 - 87.
- Sánchez González, A. 1994. Perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas: Situación legal en España. En *Seminario sobre perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas: Experiencia en países europeos*, Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona, diciembre 1994.
- Sánchez González, A. 2000. Perímetros de protección de las captaciones de agua potable. En Fernández Rubio, R.; Fernández Sánchez, J.A.; López-Camacho y Camacho, B. y López Geta, J.A. (ed.), *Aguas subterráneas y abastecimiento urbano*. IGME, Madrid, 245-249.
- Santafé Martínez, J.M. 1994. Las áreas de protección de captaciones de agua subterránea en la planificación hidrológica. En *Seminario sobre perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas: Experiencia en países europeos*, Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona, diciembre 1994.
- Santafé Martínez, J.M.; Ballesteros Navarro, B.; Aroca Lujan, E.; Alvarez-Campana Gallo, J.M. 1992. Aspectos metodológicos para la aplicación de restricciones en las diferentes zonas definidas en los perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas y diseño de planes de vigilancia y control. *V Simposio de Hidrogeología*, Alicante, Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Tomo XV.
- Servicio Geográfico del Ejército. 1988. *Cartografía militar de España. Escala 1:50.000. El Espinar*. Serie L. Hoja 17-20. Servicio Geográfico del Ejército.
- Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP). 1980. *Las aguas subterráneas en la provincia de Segovia*. SGOP.
- Sondagua. 1993. *Informe sobre el estudio hidrogeológico en el término municipal de Villacastín (Segovia)*, 27 pp.
- Sorensen, H.R. and Refsgaard, A. 2001. *Groundwater protection based on interpreted dynamic flow and particle tracking. Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 210-220.
- Southern Water Authority. 1985. *Aquifer protection policy*. Worthing, West Sussex, England, Guildbourne House, 47 pp.
- Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (SAEFL). 1998. *Practical Guide. Groundwater vulnerability mapping in Karstic regions (EPIK)*.
- Theis, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the

- rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *American Geophysical Union Transactions*, 16, 519-524.
- Todd, D.K. 1980. *Groundwater hydrology*. New York, John Wiley Sons, 535 pp.
 - Tribunal Constitucional. 1988. *Sentencia 227/1988, de 29 de noviembre, en recursos planteados en relación con la Ley 29/1985, de Aguas y conflictos positivos de competencia en relación con el Real Decreto 849/1986 que aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, la Orden de 23-12-1986 sobre vertidos de aguas residuales, y el Real Decreto 650/1987 regulador de los Organismos de cuenca*. Suplemento del BOE de 23 de diciembre de 1988.
 - Unión Europea. 2000. *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. DO L 327 de 22-12-2000.
 - United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1987. *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*. Technical Report EPA-440/5-93-001. Environmental Protection Agency, Office of Water.
 - United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1991 a. *Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks*. Technical Report EPA-570/9-91-009. Environmental Protection Agency, Office of Water.
 - United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1991 b. *Wellhead protection strategies for confined- aquifer settings*. Technical Report EPA-570/9-91-008. Environmental Protection Agency, Office of Water.
 - United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1992. *Case Studies in wellhead protection: Ten examples of innovative wellhead protection programs*. Technical Report EPA-813/R-92-002. Environmental Protection Agency, Office of Water.
 - United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1993 a. *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*. Technical Report EPA-440/5-93-001. Environmental Protection Agency, Office of water Office of groundwater protection Washington, DC.
 - United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1993 b. *Wellhead protection: a guide for small communities*. Technical Report EPA-625/R-93-002. Environmental Protection Agency, Office of water.
 - United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2000. *Working with WhAEM 2000. Source Water Assesment for a Glacial Outwash Wellfield, Vincennes, Indiana*. Technical Report EPA-600/R-00/022. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, DC.
 - United States Geological Survey (USGS). 1997. *Modelling groundwater flow with MODFLOW and related programs*. USGS. Fact sheet. FS-121-97.
 - Villanueva Martínez, M. e Iglesias López, A. 1984. *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. IGME, Madrid, 426 pp.
 - Villarroja Gil, F.; Rebollo Ferreiro, L.F.; García Jimenez, M.A. 1992. Estudio para la delimitación de perímetros de protección en la unidad hidrogeológica “Mancha occidental”. *V Simposio de Hidrogeología*, Alicante, Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Tomo XV, 453-468.

- Villaseca, C. 1985. Los granitos de la Sierra de Guadarrama. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 79,4, 573-587.
- Vorreyer, C. 1998. Delineating surface source water protection areas in Germany. *Source water assessment and protection* 98, Dallas, Proceedings, 61-64.
- Water and Rivers Commission 1999. *Esperanza Water Reserve. Water source protection plan. Esperance town water supply*. Water resource protection series. Report WRP22. Water and Rivers Commission, 31 pp.
- Water and Rivers Commission 2000. *Draft Allanooka and Dongara-Denison Water Reserves. Water source protection plan. Geraldton and Dongara-Port Denison Town water supplies*. Water resource protection series. Water and Rivers Commission, 29 pp.
- Waterloo Hydrogeologic. 1995. Visual Modflow v 2.7. User's manual. Waterloo Hydrogeologic Inc. Waterloo, 313 pp.
- Wen-Hsing, C. y Kinzelbach, W. 1998. *Processing Modflow. A simulation system for modeling groundwater and pollution*, User's manual, 325 pp.
- Wyssling, L. 1979. *Eine neue Formel zur Berechnung der Zuflussdauer der Grundwasser zu einem Grundwasserpumpen*. *Eclogae geol. Helv.* 72, 401-406.

ANEXOS

En el CD adjunto se incluye en 8 carpetas toda la información referente a las entradas al modelo, calibraciones en régimen permanente y simulación efectuada con los programas Visual MODFLOW, su módulo “Zone Budget” y Visual MODPATH, requiriéndose para su uso emplear dicho software.

Su distribución por carpetas, así como las figuras y ficheros a resaltar específicamente es la siguiente:

1. Modelo Villacastín-2002

Datos de entrada al modelo tras efectuar tanteos y calibraciones previas.

Calibración en régimen permanente sin bombeo.

- *Figura-1-Anexo*: Límites de la zona modelada. Celdas inactivas y condiciones de contorno (Celdas de nivel constante y drenes).
- *Figura-2-Anexo*: Iteraciones y valor residual al ejecutar el modelo.
- *Figura-3-Anexo*: 1-Isopiezas simuladas. Régimen permanente sin bombeos.
- *Figura-4-Anexo*: 1-Valoración estadística de la calibración obtenida empleando diversos puntos de control. Régimen permanente sin bombeos.
- *Fichero con valores de entrada de topografía*: TopografíaVillacastín2002.ASC
- *Fichero con valores de piezometría simulada*: Isop-sim-permanente-1.ASC

2. Modelo Villacastín-2002-Ajustes

Resultados de calibración modificando valores de conductividad hidráulica horizontal.

- *Figura-5-Anexo*: 2-Isopiezas simuladas. Régimen permanente sin bombeos. Cambios en valores de K_H .
- *Figura-6-Anexo*: 2-Valoración estadística de la calibración obtenida empleando diversos puntos de control. Cambio en valores de K_H . Régimen permanente sin bombeos.

3. Modelo Villacastín-2002-Recarga

Resultados de calibración modificando valores de recarga.

- *Figura-7-Anexo*: 3-Valoración estadística de la calibración obtenida empleando diversos puntos de control con recarga de 0,00001 m/día. Régimen permanente sin bombeos.
- *Figura-8-Anexo*: 4- Valoración estadística de la calibración obtenida empleando diversos puntos de control con recarga de 0,00009 m/día. Calibración final del régimen permanente sin bombeos.
- *Figura-9-Anexo*: 3- Isopiezas simuladas. Recarga de 0,00009 m/día. Calibración final del modelo en régimen permanente sin bombeos.
- *Figura-10-Anexo*: 3-Isopiezas simuladas. Recarga de 0,00009 m/día. Calibración final del modelo en régimen permanente sin bombeos. Base topográfica.

Con los resultados de esta simulación se considera el modelo calibrado en régimen permanente sin bombeos.

4. Modelo Villacastín-2002-Bombeo

Simulación en régimen permanente, de niveles obtenidos con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento en el acuífero del terciario detrítico.

- *Figura-11-Anexo*: 4-Isopiezas simuladas. Régimen permanente con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento en el acuífero del terciario detrítico.

5. Modelo Villacastín-2002-MODPATH

Simulación, en régimen permanente, de los perímetros de protección obtenidos en base a la trayectoria de partículas, para diferentes tiempos de tránsito, con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento, en el acuífero del terciario detrítico.

- *Figura-12-Anexo*: Perímetro de protección para un tiempo de tránsito de 50 días, con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento. Régimen permanente.
- *Figura-13-Anexo*: Perímetro de protección para un tiempo de tránsito de 4 años, con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento. Régimen permanente.
- *Figura-14-Anexo*: Perímetro de protección para un tiempo de tránsito de 25 años, con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento. Régimen permanente.

6. Modelo Villacastín-2002-MODPATH-Todos bombeos

Simulación, en régimen permanente, de los perímetros de protección obtenidos en base a la trayectoria de partículas, para diferentes tiempos de tránsito, con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones (granja y gasolinera-hotel).

- *Figura 24*: Zonas de alimentación para un tiempo de tránsito de 50 días, con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente, que definen la zona del perímetro de protección correspondiente a ese tiempo.
- *Figura 25*: Zonas de alimentación para un tiempo de tránsito de 4 años, con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente, que definen la zona del perímetro de protección correspondiente a ese tiempo.
- *Figura 26*: Zonas de alimentación para un tiempo de tránsito de 25 años, con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente, que definen la zona del perímetro de protección correspondiente a ese tiempo.
- *Figura 38*: Perfil en la fila 6 del área modelada. Simulación con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente.
- *Figura 39*: Perfil en la fila 8 del área modelada. Simulación con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente.

7. Modelo Villacastín-2002-Annotate

Idéntico a la carpeta anterior más etiquetas identificativas de captaciones y granjas.

8. Modelo Modelo Villacastín-2002-Budget

Simulación de balances por zonas en el área modelada.

- *Figura 41*: Flujo acumulado ($m^3/día$) de entradas y salidas en las zonas seleccionadas.

- *Figura 42:* Flujo de entrada ($\text{m}^3/\text{día}$) a cada una de las 5 zonas desglosado por su procedencia (celda de nivel constante, pozos, drenes, recarga y zonas externas).
- *Figura 43:* Flujo de salida ($\text{m}^3/\text{día}$) de cada una de las 5 zonas desglosados por su destino (celda de nivel constante, pozos, drenes, recarga y zonas externas).
- Ficha con balances por zonas:
 - Zona 1-Budget-Input-Output-Zona 1
 - Zona 2- Budget-Input-Output-Zona 2
 - Zona 3- Budget-Input-Output-Zona 3
 - Zona 4- Budget-Input-Output-Zona 4
 - Zona 5- Budget-Input-Output-Zona 5
- Balance de masa de toda el área modelada.

ANEXO 1: APLICACIÓN DEL PROGRAMA VISUAL MODFLOW AL ACUÍFERO DEL TERCIARIO DETRÍTICO EXISTENTE EN EL ENTORNO DE VILLACASTÍN

1. ENTRADAS AL MODELO REALIZADO (CARPETA 1 - MODELO VILLACASTÍN-2002)

1.1.- Límites de la zona modelada (Figura 1-Anexo)

Se ha considerado los siguientes límites

- Límite sur: El contacto con los materiales graníticos (límite impermeable), definido mediante la cartografía hidrogeológica (Mapa 1).
- Límites este y oeste: los definen las divisorias hidrogeológicas obtenidas en base al análisis de la piezometría (Mapa 1).
- Límite norte: Es el límite de la zona estudiada con el resto del acuífero del Terciario detrítico.

1.2.- Malla

Se ha establecido una malla cuadrada con celdas de 500 metros de longitud, que ha sido georeferenciada (coordenadas UTM), empleándose como mapa base el mapa topográfico a escala 1:50.000 de dicha zona (Servicio Geográfico del Ejército, 1998), escaneado.

1.3.- Capas

Se ha considerado dos capas en los materiales detríticos del Terciario y Cuaternario.

La primera capa corresponde a un acuífero libre. La cota del muro es de 935 metros. El techo esta dado por la topografía del terreno. Esta se ha reproducido mediante 79 valores obtenidos del mapa topográfico (fichero topográfico Villacastín-2002-ASC) y la interpolación que efectúa el programa para asignar elevaciones al centro de cada celda usando los 5 puntos más cercanos. La potencia de esta capa en las áreas donde se ubican las captaciones de abastecimiento es así de 100 metros al tener todas ellas una profundidad menor (Tabla-8).

La segunda capa corresponde a un acuífero confinado situándose el muro a 635 m, es decir con una potencia de 300 metros.

La existencia de estas dos capas así definidas permite simular ríos o drenes que afectan a la capa 1, en lugar de a los 400 metros del acuífero, y poder considerar que los bombeos afecten solo a los niveles más someros del acuífero, es decir a cota superior a 935 metros como ocurre en la realidad en todas las captaciones del área modelada.

1.4. Valores de conductividad hidráulico y almacenamiento en las diferentes celdas del modelo

En la carpeta denominada 1-Modelo Villacastín-2002 están reflejados los valores asignados a cada celda para los diferentes parámetros requeridos en base a la información descrita en el capítulo 7.5 de esta Tesis Doctoral y tras los tanteos previos efectuados. Estos son: Conductividad hidráulica en las tres direcciones del espacio (K_x , K_y , K_z), porosidad eficaz,

porosidad total, coeficiente de almacenamiento en acuífero libre, coeficiente de almacenamiento en acuífero confinado (S_s). Si bien el modelo asigna en cada momento a cada capa el valor que le corresponde (S_s o S_y) dependiendo de la situación del nivel piezométrico. Así considera por ejemplo a la capa 2 el valor S_s mientras que el nivel piezométrico esté por encima de la cota del techo de la capa 2.

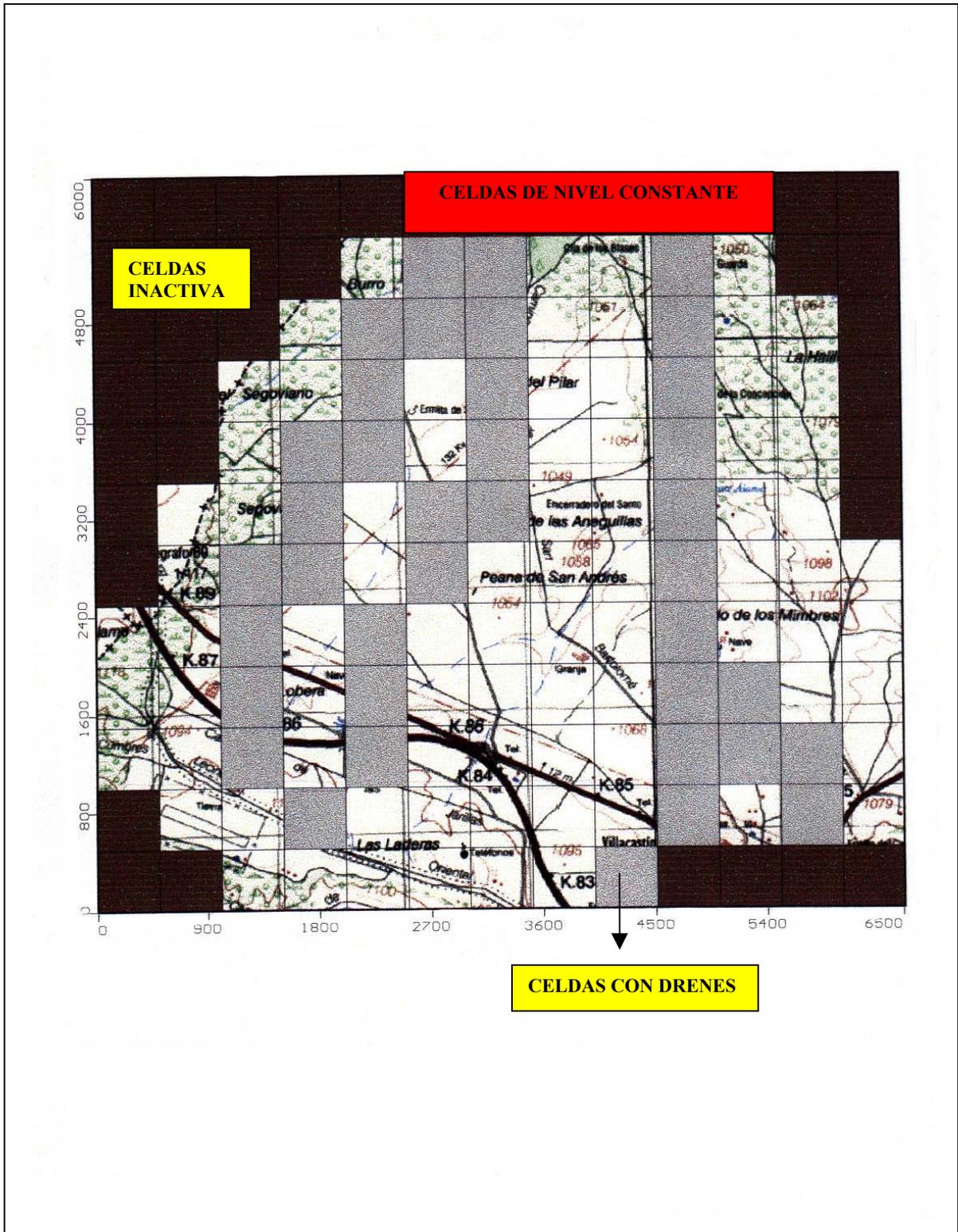


Figura-1-Anexo: Límites de la zona modelada, celdas inactivas y condiciones de contorno (celdas de nivel constante y drenes).

Su consulta se efectúa fácilmente mediante la herramienta “Cell inspector”, incluida en la opción “Tools”, del menú “Input”, del programa Visual MODFLOW, que permite ver todos los valores correspondientes a una celda colocando el cursor sobre esta, o también mediante la opción “Data base”, en cada propiedad, que refleja los diferentes rangos de valores considerados. Cabe indicar no obstante, como complemento a esa consulta detallada, algunas indicaciones sobre los valores de esos parámetros: los valores de K_x son iguales a las de K_y al asumir Visual MODFLOW que hay isotropía horizontal respecto a la conductividad hidráulica.

Son en la 1ª capa de 0,03 m/día en las celdas de las filas 9 a 12 próximas al contacto con los granitos y se incrementan hacia el centro de la cuenca pasando a valores de 0,3 m/día considerándose en la 2ª capa valores de 0,05 m/día.

La conductividad hidráulica vertical asignada a cada celda es 100 veces inferior a la horizontal en base a las evaluaciones y consideraciones reflejadas en el capítulo 7.5 de esta Tesis Doctoral.

El valor del coeficiente de almacenamiento en el acuífero libre es del orden de $2 \cdot 10^{-3}$ y en el confinado de $5 \cdot 10^{-4}$ (éste es menor que en acuífero libre porque el volumen de agua que sale procede de la descompresión en lugar del volumen de agua entre granos).

Siendo el valor de la porosidad eficaz del orden de $2 \cdot 10^{-3}$.

1.5. Celdas inactivas

El flujo no se simula en las celdas inactivas, su límite externo es por todo un límite de “no flujo”.

Se emplean para simular las divisorias hidrogeológicas que constituyen los límites este y oeste del área modelada (Figura 1-Anexo). Así como el contacto con los granitos al sur, en las zonas en que no coincide ya con el límite externo del mallado, que también es un límite de “no flujo”, como ha sido previamente indicado.

1.6. Condiciones de contorno (Boundary conditions)

Se ha considerado las siguientes:

- Recarga:

La recarga de los acuíferos del Terciario y Cuaternario, en el área analizada, procede del agua de lluvia que se infiltra y supone según el análisis efectuado en el capítulo 7.5 $1,02 \cdot 10^{-4}$ m/día.

Este valor, aplicado inicialmente a todas las celdas, se ajustará en la calibración como se indicará posteriormente.

- Celdas de nivel constante:

El límite norte de la zona simulada, que es el límite con el resto del acuífero del terciario detrítico, se simula mediante celdas de nivel constante (Figura-1 - Anexo).

En esta celda el modelo asigna un valor de almacenamiento infinito (aunque físicamente el almacenamiento no puede ser mayor de 1), para que en ellas los niveles nunca varíen.

El valor asignado es el que corresponde a sus valores de piezometría en esas 5 celdas (1018-1020-1020-1018-1000). Estos valores se asignan también a la capa 2 para evitar que se produzca una concentración de líneas de flujo hacia la capa 1.

- Drenes:

Para simular los arroyos que surcan el área modelada se ha valorada más adecuada a su escasa entidad y tipo de funcionamiento considerarlos como drenes. En estos sí el nivel piezométrico es superior a la cota del dren el agua se evacua del modelo (desaparece), y si el nivel piezométrico es inferior a la cota del dren no actúa.

En la Figura-1-Anexo se indica las celdas en las que se ha incluido dren que corresponden al trazado de los arroyos principales.

Para ello se ha introducido en cada celda con dren la cota del arroyo a la mitad de la celda (obtenida del mapa topográfico junto con la interpolación que efectúa el propio programa) y el valor de la conductancia hidráulica.

Esta se obtiene:

$$C_{\text{arroyo}} = \frac{K \cdot L \cdot W}{M} = \frac{0,001 \times 500 \times 5}{1} = 2,5 \text{ m}^2/\text{día}$$

Donde:

- C_{arroyo} : Conductancia hidráulica
K: Conductividad hidráulica
L: Longitud celda
W: Anchura del arroyo
M: Espesor

En la calibración previa se ajustó el valor inicial asignada 2,5 m²/día resultando un valor de 3 m²/día para los arroyos de los Prados, del Valle y de la Asperilla y de 2,5 m²/día para el arroyo de la Casa del Caballero.

2. CALIBRACIONES EFECTUADAS EN RÉGIMEN PERMANENTE

2.1. 1ª calibración en régimen permanente sin bombeos (Carpeta-1-modelo Villacastín-2002).

Para ejecutar el modelo con los datos de entrada indicados, en régimen permanente, sin bombeos, no ha sido necesario introducir los valores iniciales de piezometría. Se ha empleado la opción “constante para cada capa”, en la cual el programa determina un valor inicial para cada capa, basado en los valores de entrada que se le indican. Esta opción suele ser suficiente para que se alcance una solución convergente. En el modelo simulado el programa ha asignado a la capa 1 y a la capa 2 un valor de 1015,2 metros.

Se ha empleado para el tipo de acuífero en las dos capas el “Tipo 3: Confinado-libre, transmisividad y coeficiente de almacenamiento variable” como fue indicado previamente. En ellos la transmisividad de la capa varía calculándose a partir del espesor saturado y la conductividad hidráulica. El coeficiente de almacenamiento asigna el indicado para acuífero confinado o libre en función de la situación del nivel piezométrico respecto al techo de la capa considerada.

Empleando el algoritmo WHS-Solver, desarrollado por la empresa Waterloo Hydrogeologic Inc (con un máximo número de iteraciones externas de 50 e internas de 25, un criterio de convergencia de cambio de nivel de 0,01 y un criterio residual para convergencia de 0,001), se obtiene una rápida convergencia, con los datos de entrada consideradas, tras los tanteos y ajustes previos efectuados (Figura-2-Anexo).

Los niveles obtenidos (fichero Isop-sim-permanente-1.ASC) se muestran en la Figura-3-Anexo.

En la Figura-4-Anexo, se indica una valoración estadística de la calibración obtenida, empleando para ello los diversos puntos de control indicados en la Figura-3-Anexo.

2.2. 2ª calibración en régimen permanente sin bombeos (Carpeta 2-modelo Villacastín-2002-ajustes).

Para mejorar la calibración anterior se ha analizado por zonas los cambios que podrían efectuarse. Así, para aumentar el valor del nivel piezométrico calculado se puede aumentar la recarga o disminuir la conductividad hidráulica, y a la inversa, para que disminuya el valor de piezometría calculado.

En el pozo 1720-2-0008, muy próximo al contacto con los granitos, el nivel calculado es 1087,6 m s.n.m. y el observado es de 1099 m s.n.m.

Para incrementar el nivel calculado se ha disminuido el valor de la conductividad hidráulica en la fila 12 (columna 3 a 9) obteniéndose los siguientes valores:

K_H (m/día)	Nivel calculado (m s.n.m.) Pozo 1720-2-0008	Nivel real (m s.n.m.)	Observaciones
0,03	1087,6	1099	Dato considerado en la anterior calibración.
0,009	1092,5		
0,006	1095,7		
0,005	1097,6		
0,003	1105		

Los resultado indican que el modelo es muy sensible a cambios de conductividad hidráulica en esta zona de borde. Así:

Al pasar de 0,03 a 0,003 el nivel sube 17,4 m (cambiando un orden de magnitud el valor de conductividad hidráulica).

Al pasar de 0,006 a 0,005 el nivel sube 1,9 m (cambiando 0,001 m/día).

Los mejores resultado se obtienen con K=0,005, indicándose en la Figura-5-Anexo, los valores de piezometría obtenidos al ejecutar el modelo con estas modificaciones y en la Figura-6-Anexo, la valoración estadística de la calibración que se obtiene empleando los puntos de control antes indicados.

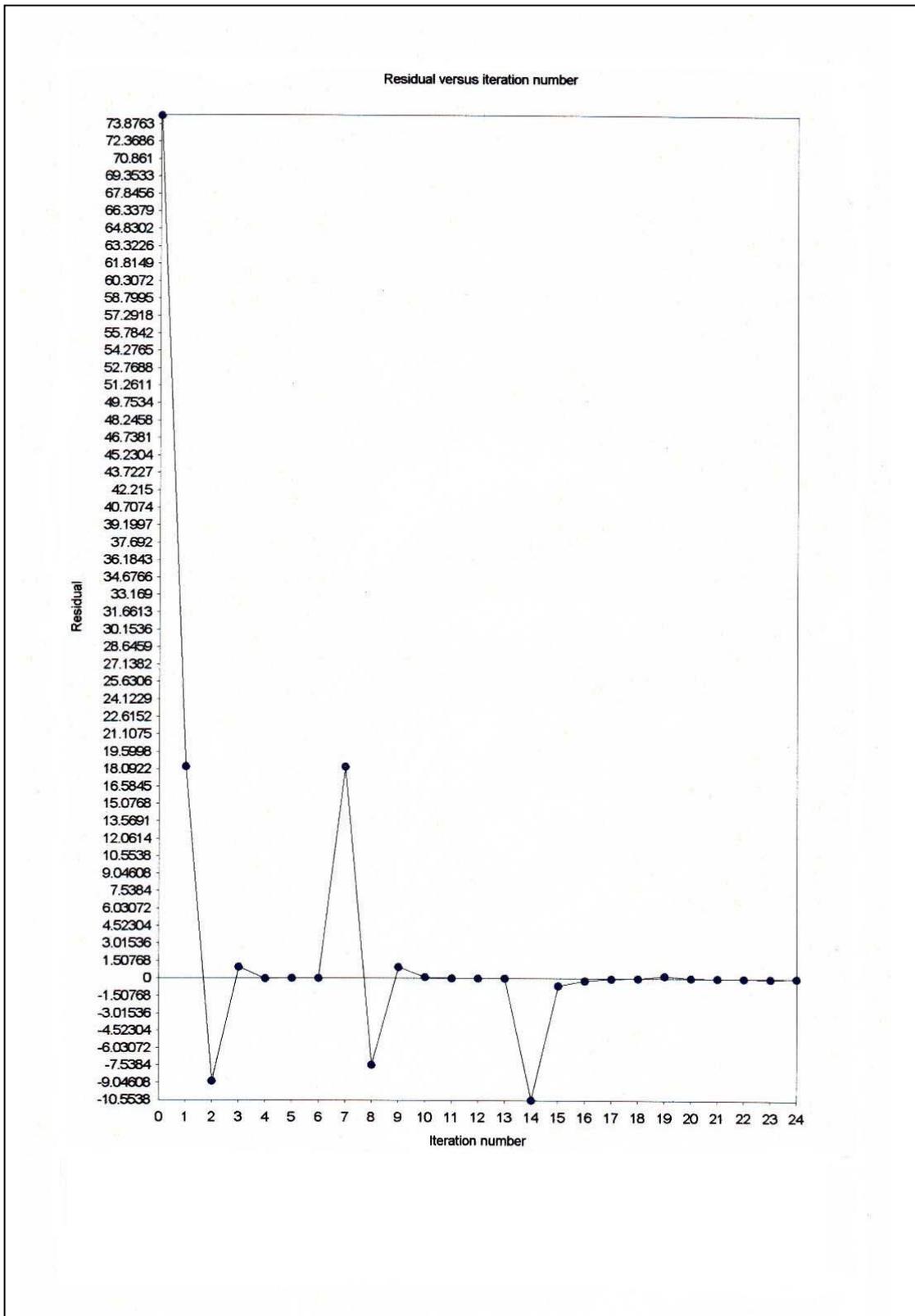


Figura-2-Anexo: Iteraciones y valor residual al ejecutar el modelo.

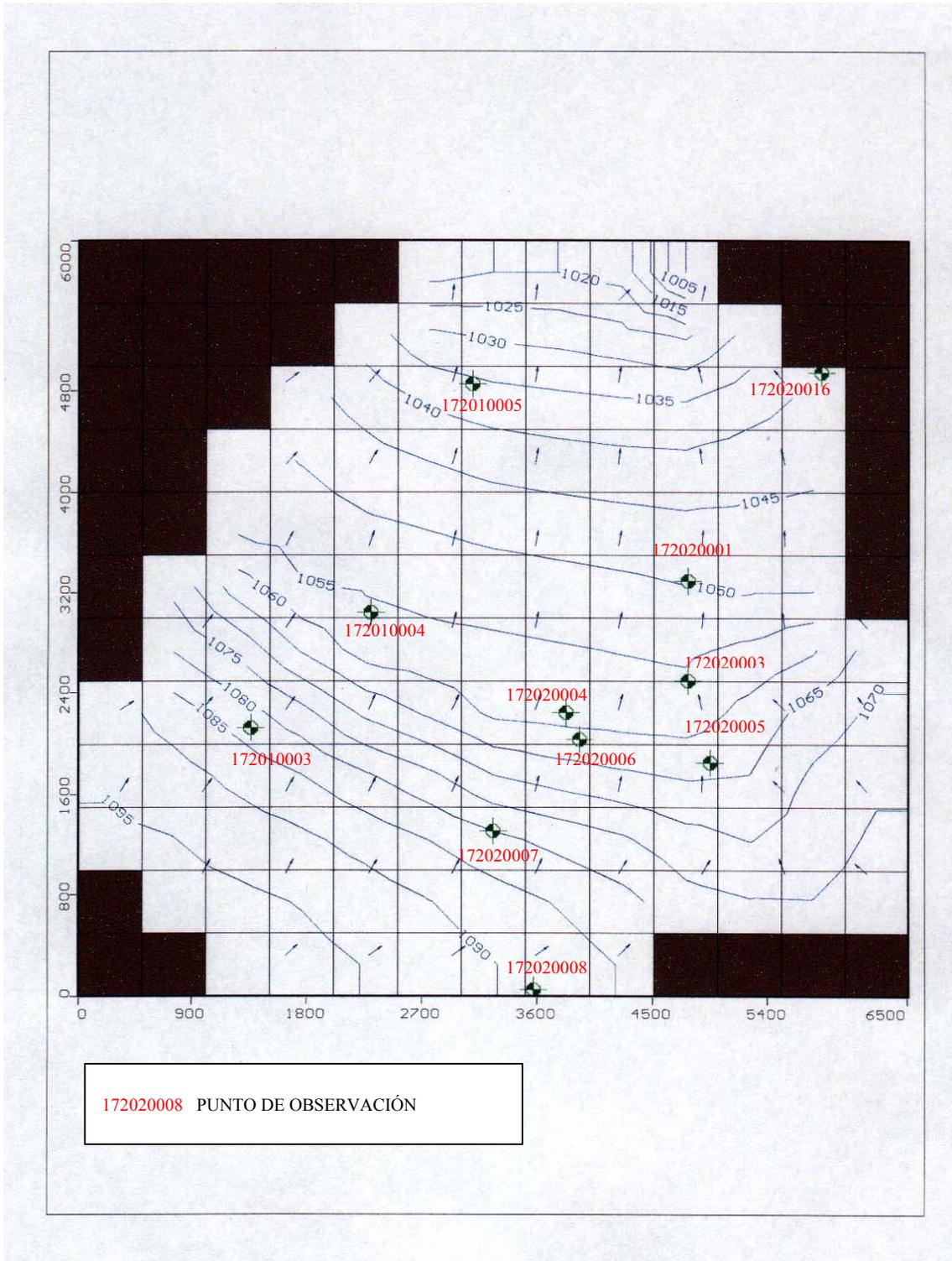


Figura-3-Anexo: 1- Isopiezas simuladas. Régimen permanente sin bombeos.

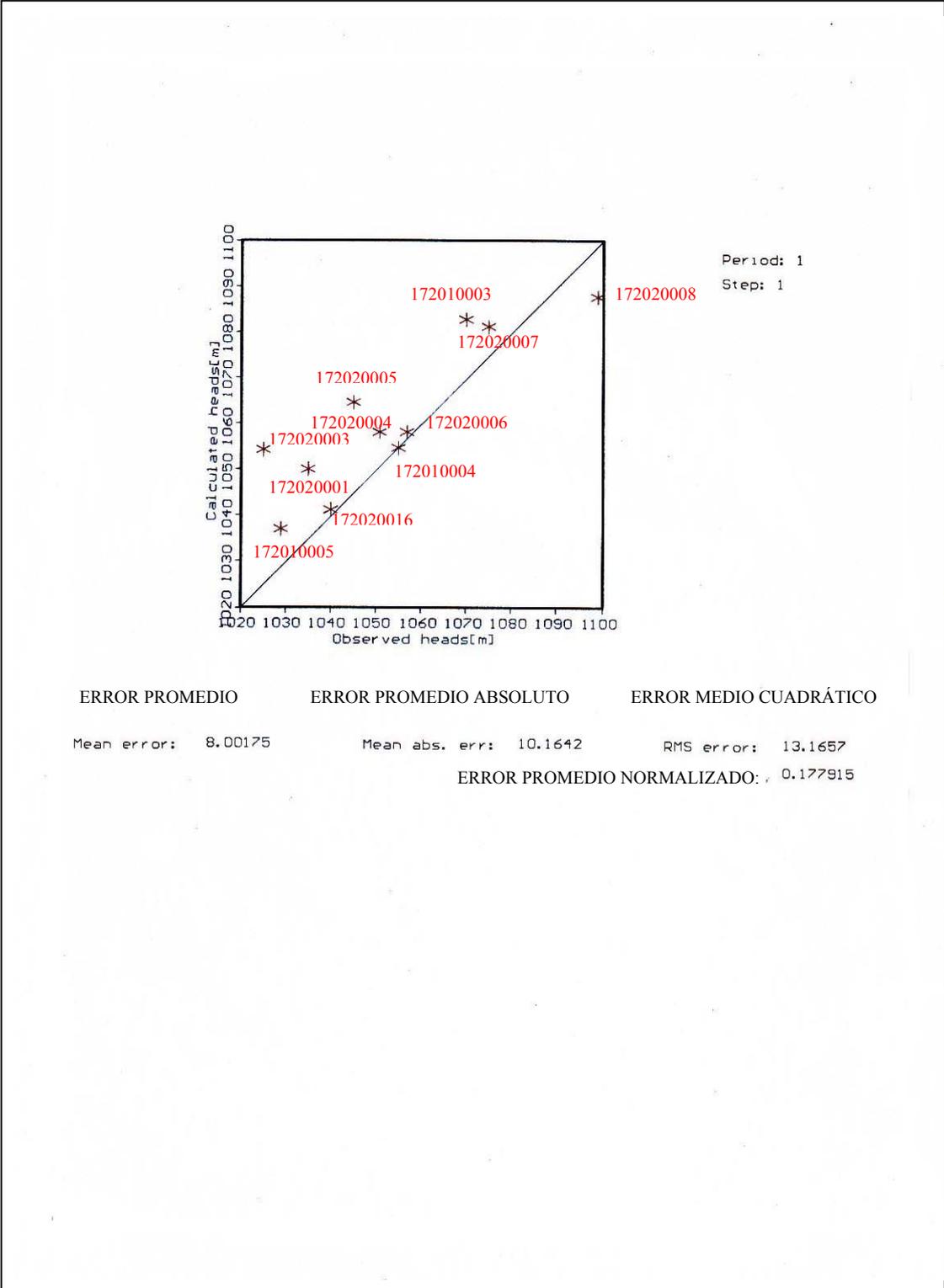


Figura-4-Anexo: 1- Valoración estadística de la calibración obtenida empleando diversos puntos de control. Régimen permanente sin bombeos.

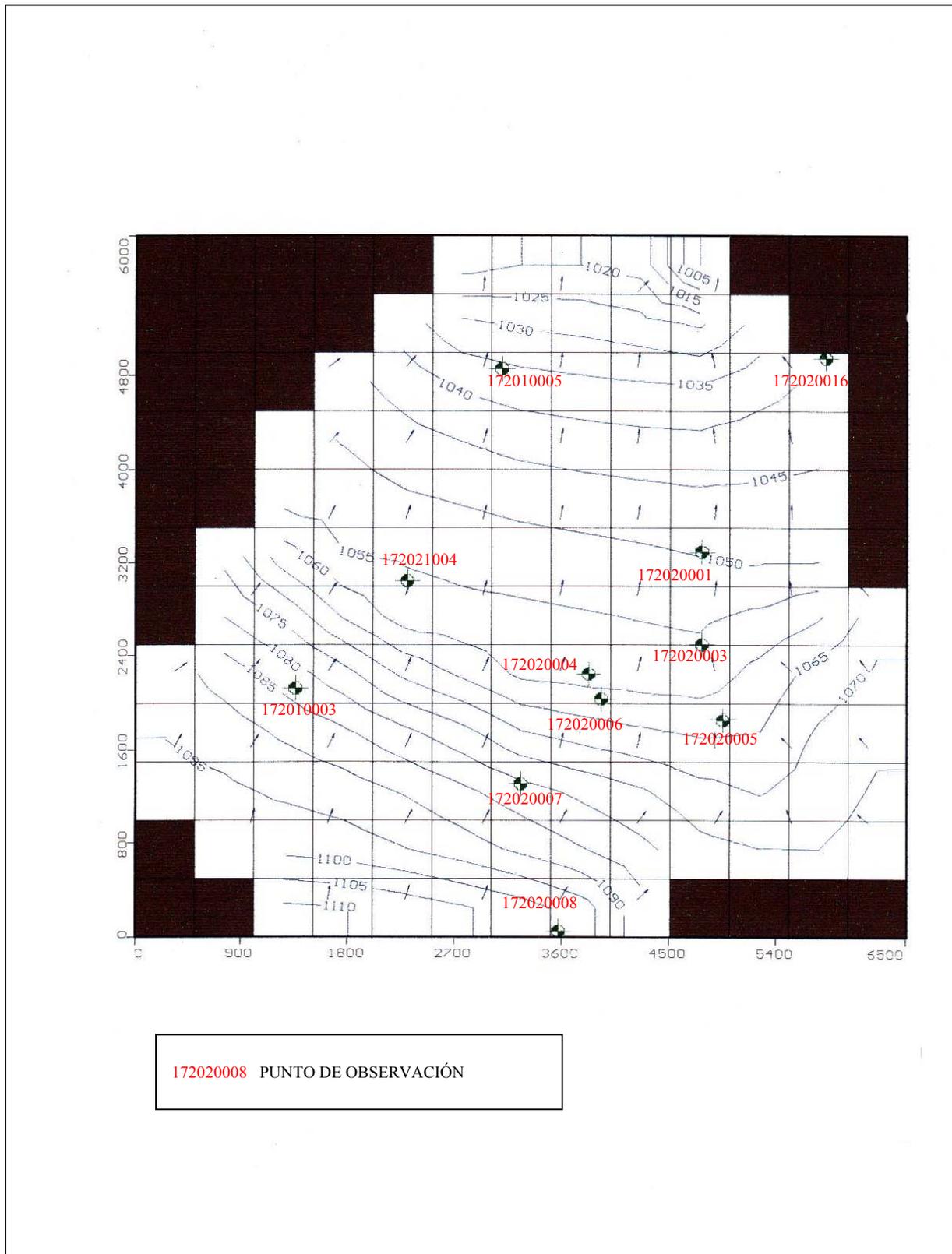


Figura-5-Anexo: 2- Isopiezas simuladas. Régimen permanente sin bombeos. Cambios en valores de K_H .

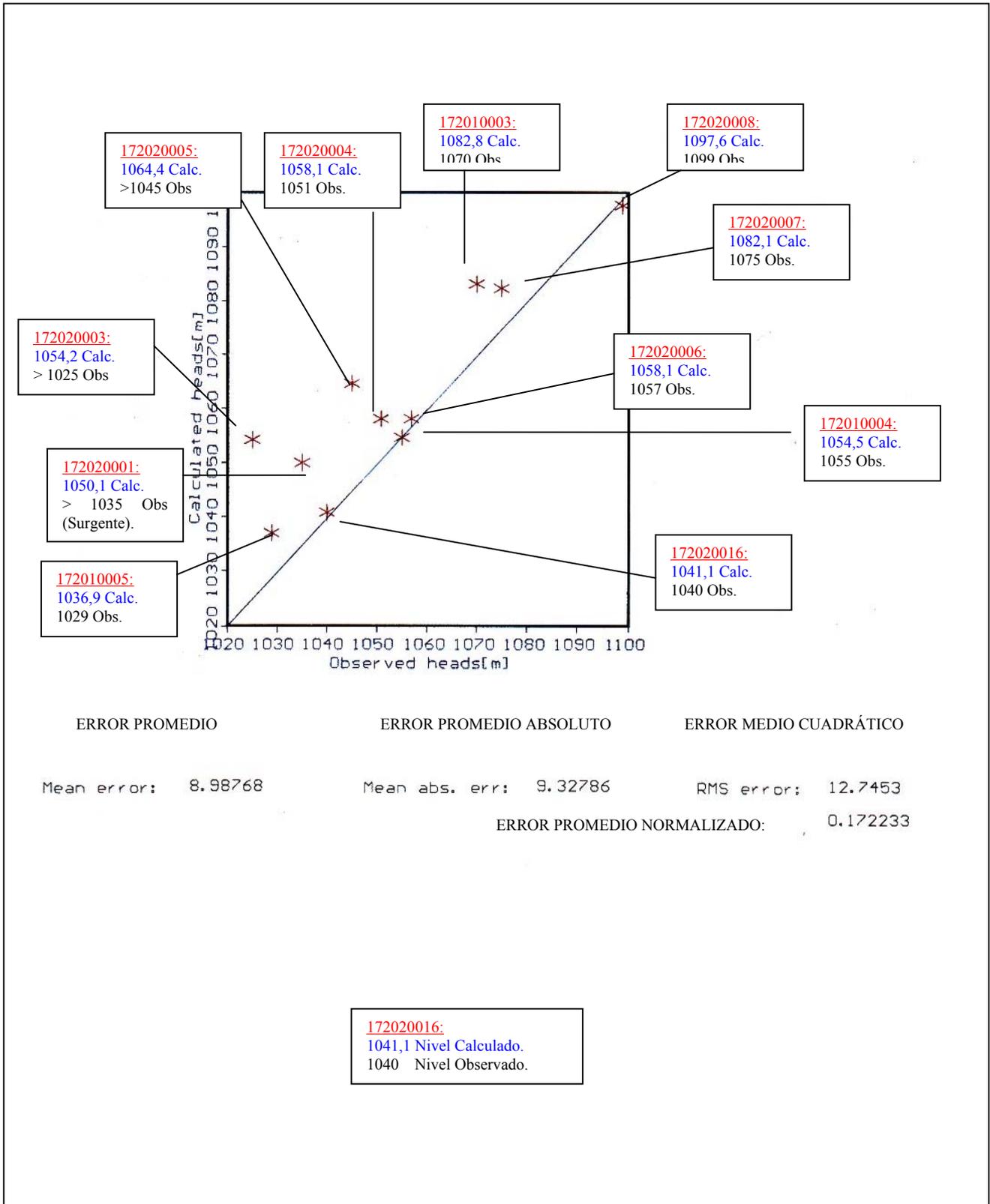


Figura-6-Anexo: 2- Valoración estadística de la calibración obtenida empleando diversos puntos de control. Cambios en valor de K_H . Régimen permanente sin bombeos.

2.3. 3ª calibración en régimen permanente sin bombeos (Carpeta-3. Modelo Villacastín-2002-recarga).

Para mejorar la calibración anterior se ha analizado los cambios que se producirán al modificar el valor de recarga asignado previamente (0.0001 m/día) a todas las celdas del modelo.

Si la recarga disminuye un orden de magnitud y pasa a ser de 0,00001 m/día, los niveles calculados descienden fuertemente (de 35 a 70 metros según las zonas) y la calibración obtenida (Figura-7-Anexo), es mucho peor. Si por el contrario se emplea un valor de recarga de 0,00009 m/día, es decir una diferencia de -0,00001 m/día respecto al valor inicial, disminuyen los niveles calculados (ya que el modelo simulado es muy sensible a cambios de recarga), mejorando la calibración final notablemente (Figura-8-Anexo).

Se obtiene en esta calibración final:

- El error promedio: Sumatorio del nivel calculado menos el observado en cada punto, dividido por el número total de puntos de observación, es de 6,25.
- El error promedio absoluto: Sumatorio en valor absoluto del nivel calculado menos el observado en cada punto, dividido por el número total de puntos de observación) es de 8,32.
- El error medio cuadrático:

$$\sqrt{\frac{\sum (\text{nivel_calculado} - \text{nivel_observado_en_cada_punto})^2}{\text{numero_total_de_puntos_de_observación}}} = 11.26$$

- El error promedio normalizado:

$$\frac{\text{Error_medio_cuadrático}}{\text{Valor_máximo_de_piezometria} - \text{Valor_mínimo_de_piezometria_en_modelo}} = 0,15$$

Estos valores se han considerado una calibración aceptable, desde un criterio estadístico.

Al valorar la calibración cualitativamente se considera también aceptable, ya que el mapa de isopiezas simulado (Figura-9-Anexo y Figura-10-Anexo) reproduce el flujo hacia los arroyos y el flujo general hacia el río Duero (hacia el norte) como el mapa de isopiezas efectuado manualmente en base a la piezometría en los puntos de agua (Mapa 1).

Por último debe resaltarse que el nivel observado en tres de los puntos que más se separan de la calibración debe ser mayor al medido (Figura-8- Anexo), lo que mejoraría aún más la calibración estadística. Ya que corresponde en dos casos a nivel en recuperación (debería seguir subiendo) y el tercero corresponden a un sondeo surgente, al que se le ha asignado la cota de superficie del terreno pero que podría ser más alta.

3. SIMULACIÓN DEL FLUJO EN RÉGIMEN PERMANENTE (CARPETA-4-MODELO VILLACASTÍN-2002-BOMBEO).

Se ha considerado que el volumen anual de 120.000 m³ requerido para el abastecimiento a la población (capítulo 7.6.2. de esta Tesis Doctoral) proceda en su totalidad de las 4 captaciones existentes en el acuífero del terciario detrítico, dejando en reserva, bombeando solo en momentos puntuales, los pozos en el acuífero granítico.

Se ha supuesto para ello un bombeo de 81 m³/día en cada uno de las 4 captaciones en la primera capa.

En la Figura-11-Anexo se indica las isopiezas proporcionadas por la simulación para esos bombeos.

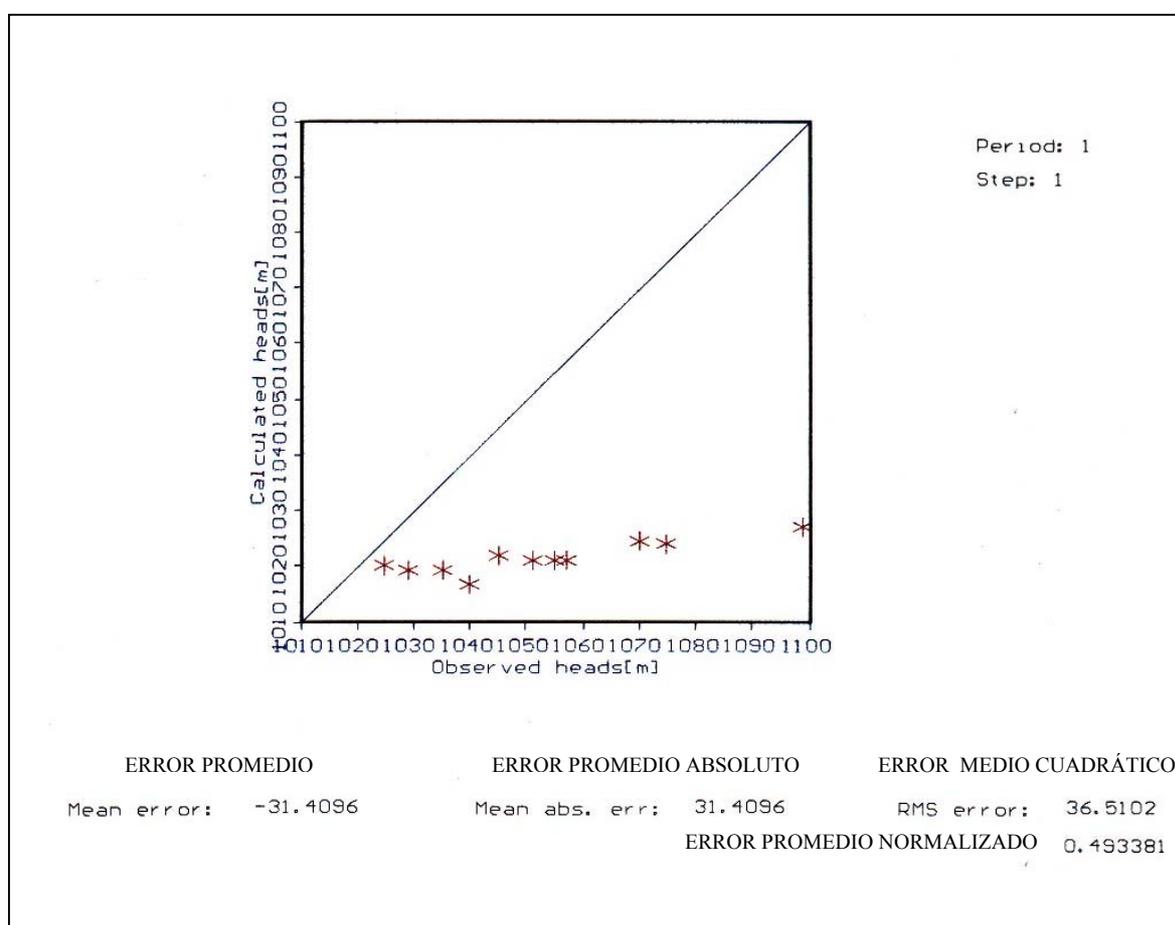


Figura-7-Anexo: 3- Valoración estadística de la calibración obtenida empleando diversos puntos de control con recarga de 0,00001 m/día. Régimen permanente sin bombeos.

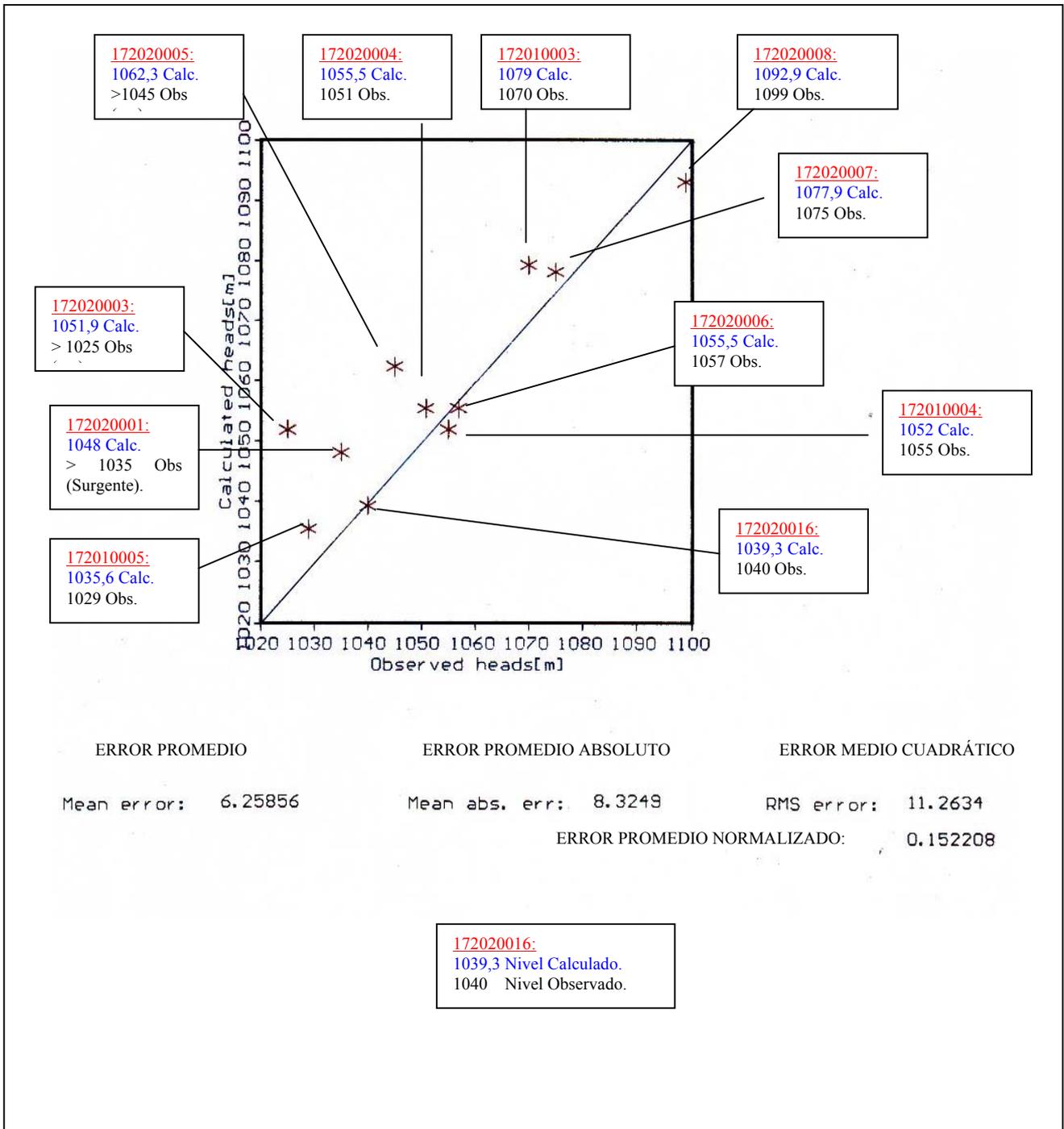


Figura-8-Anexo: 4-Valoración estadística de la calibración obtenida empleando diversos puntos de control con recarga de 0,00009 m/día. Calibración final del régimen permanente sin bombeos.

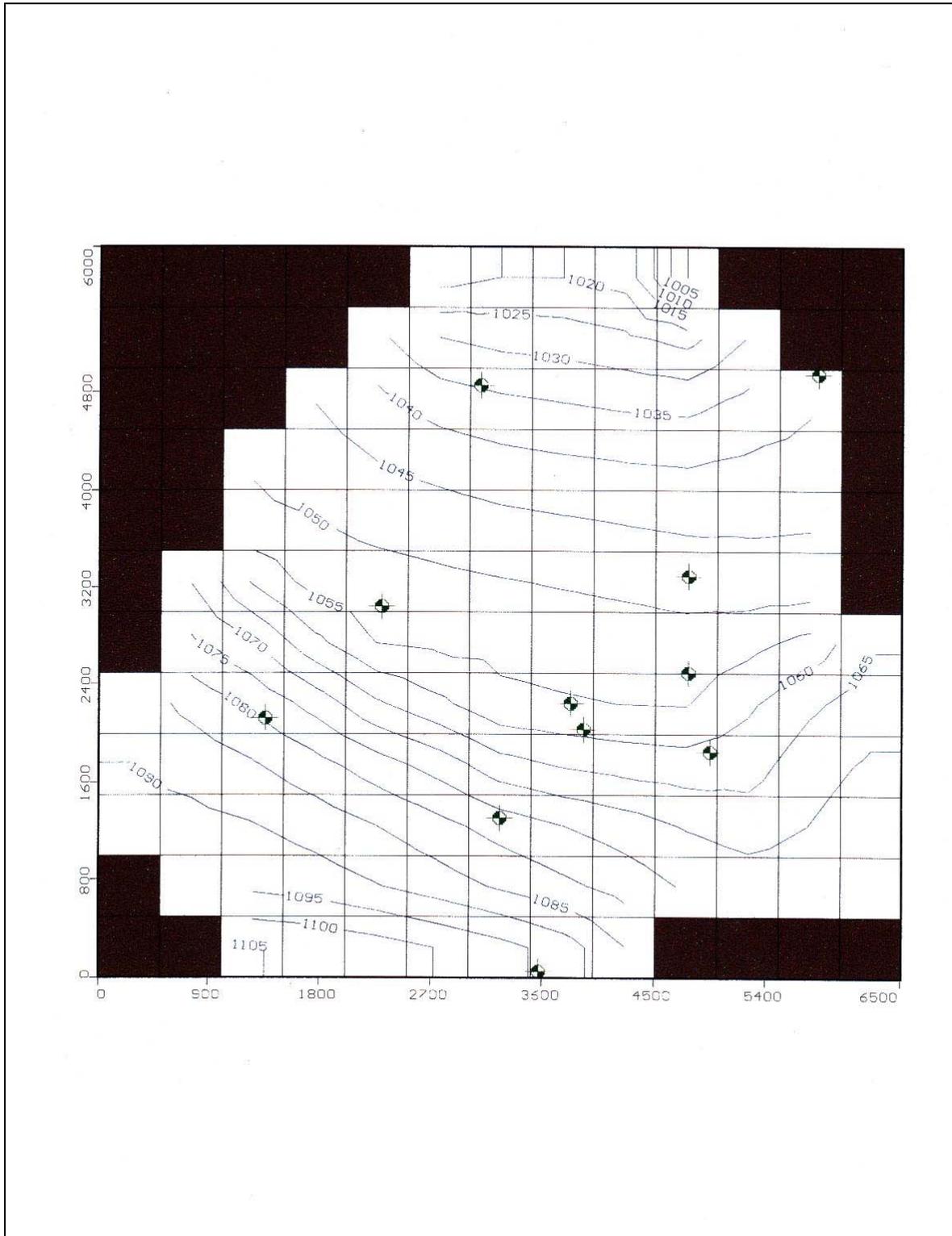


Figura -9-Anexo: 3- Isopiezas simuladas. Recarga de 0,00009 m/día. Calibración final del modelo en régimen permanente sin bombeos.

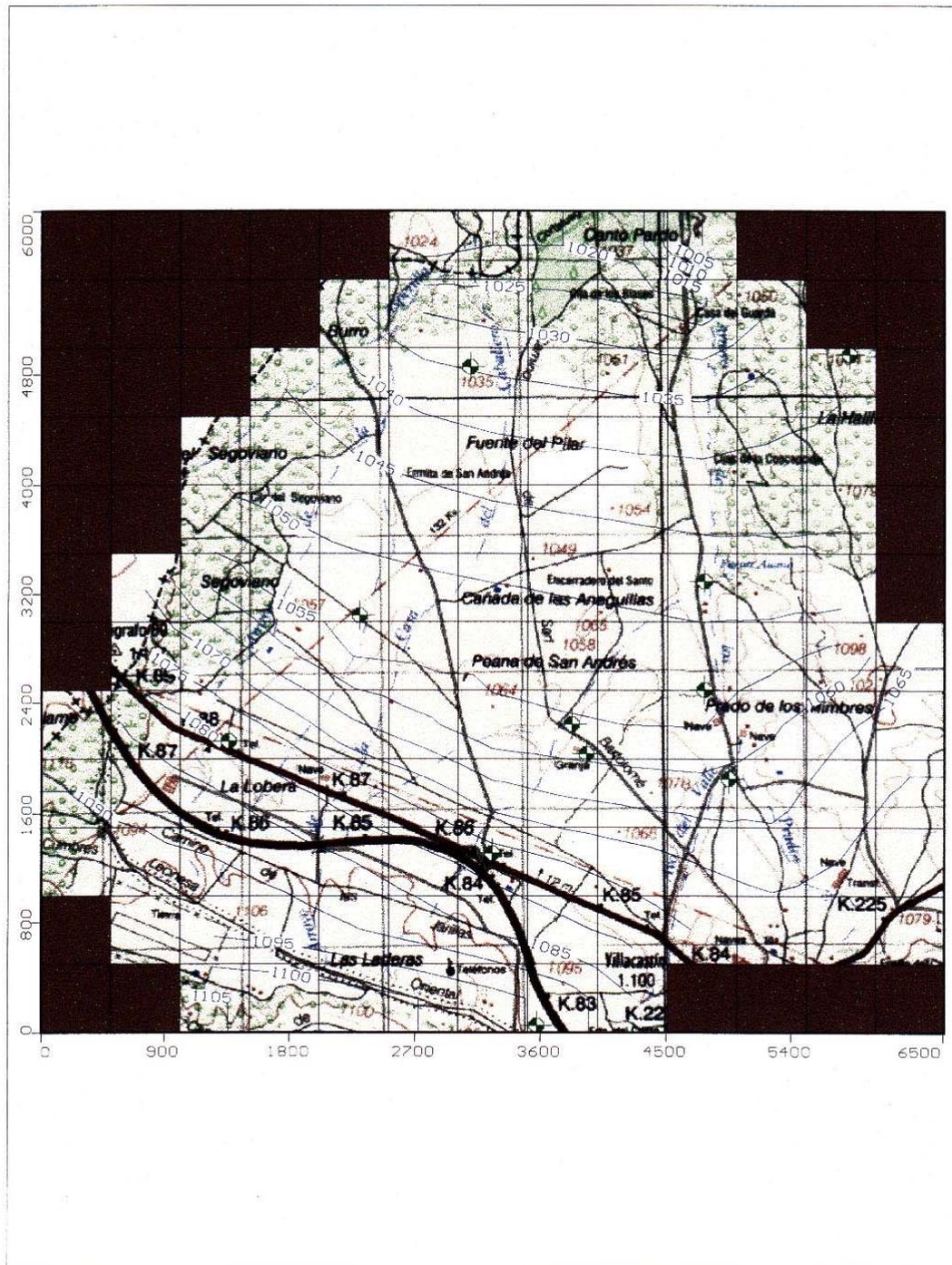


Figura-10-Anexo: 3- Isopiezas simuladas. Recarga de 0,00009 m/día. Calibración final del modelo en régimen permanente sin bombeos. Base topográfica.

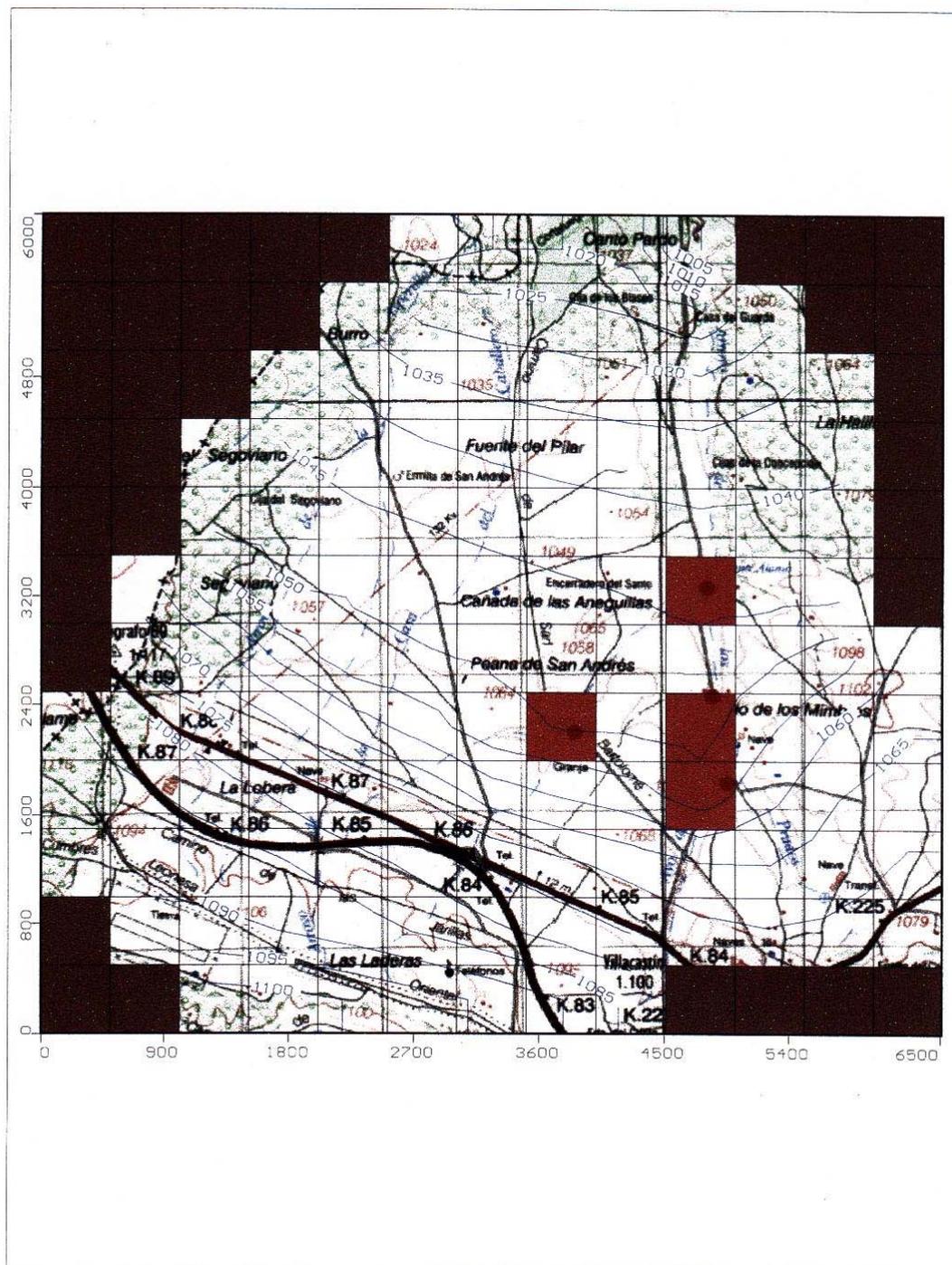


Figura-11-Anexo: 4 - Isopiezías simuladas. Régimen permanente con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento en el acuífero del terciario detrítico.

ANEXO 2: APLICACIÓN DEL PROGRAMA VISUAL MODPATH AL ACUÍFERO DEL TERCIARIO DETRÍTICO EXISTENTE EN EL ENTORNO DE VILLACASTÍN

1. SIMULACIÓN EN RÉGIMEN PERMANENTE DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN PARA DIFERENTES TIEMPOS DE TRÁNSITO CON BOMBEO CONTINUO EXCLUSIVO EN LOS 4 SONDEOS DE ABASTECIMIENTO

Se emplean para esta simulación los resultados de la simulación de flujo obtenidos usando el programa Visual MODFLOW simulando mediante el programa visual MODPATH la componente de advección del transporte de solutos.

Se rodea las captaciones con un círculo de partículas, empleándose en esta caso un radio de 100 metros, para diferentes tiempos de tránsito. En la figura-12-Anexo se indica el perímetro de protección así obtenido para un tiempo de tránsito de 50 días.

El perímetro de protección correspondiente a 4 años se muestra en la Figura-13-Anexo.

El perímetro de protección correspondiente a 25 años se muestra en la Figura-14-Anexo.

2. SIMULACIÓN EN RÉGIMEN PERMANENTE DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN OBTENIDOS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE TRÁNSITO CON BOMBEO CONTINUO EN LOS 4 SONDEOS DE ABASTECIMIENTO Y EN OTRAS CAPTACIONES

En esta simulación, que será la empleada finalmente en la propuesta de delimitación de perímetro de protección empleando este programa, se ha añadido a los anteriores bombeos dos más (Figura-26) que son los siguientes:

- 172010003. Sondeo de la gasolinera. Abastece a dos gasolineras y un restaurante y se le ha asignado un bombeo de $21,6 \text{ m}^3/\text{día}$.
- 172020006. Granja de Huevos Velasco. Abastece a dicha granja de gallinas y se le ha asignado un bombeo de $25 \text{ m}^3/\text{día}$.

Con estos nuevos bombeos cambian algo las isopiezas (simuladas mediante Visual MODFLOW). Los perímetros de protección obtenidos se reflejan en el capítulo 9.11.

El perímetro de protección correspondiente a 50 días se muestra en la Figura-24.

El perímetro de protección correspondiente a 4 años se muestra en la Figura-25.

El perímetro de protección correspondiente a 25 años se muestra en la Figura-26.

En la Figura-38 se muestra un perfil en la fila 6 del área modelada (empleando Visual MODFLOW) para estas condiciones y del mismo modo en la Figura 39 se indica el perfil en la fila 8.

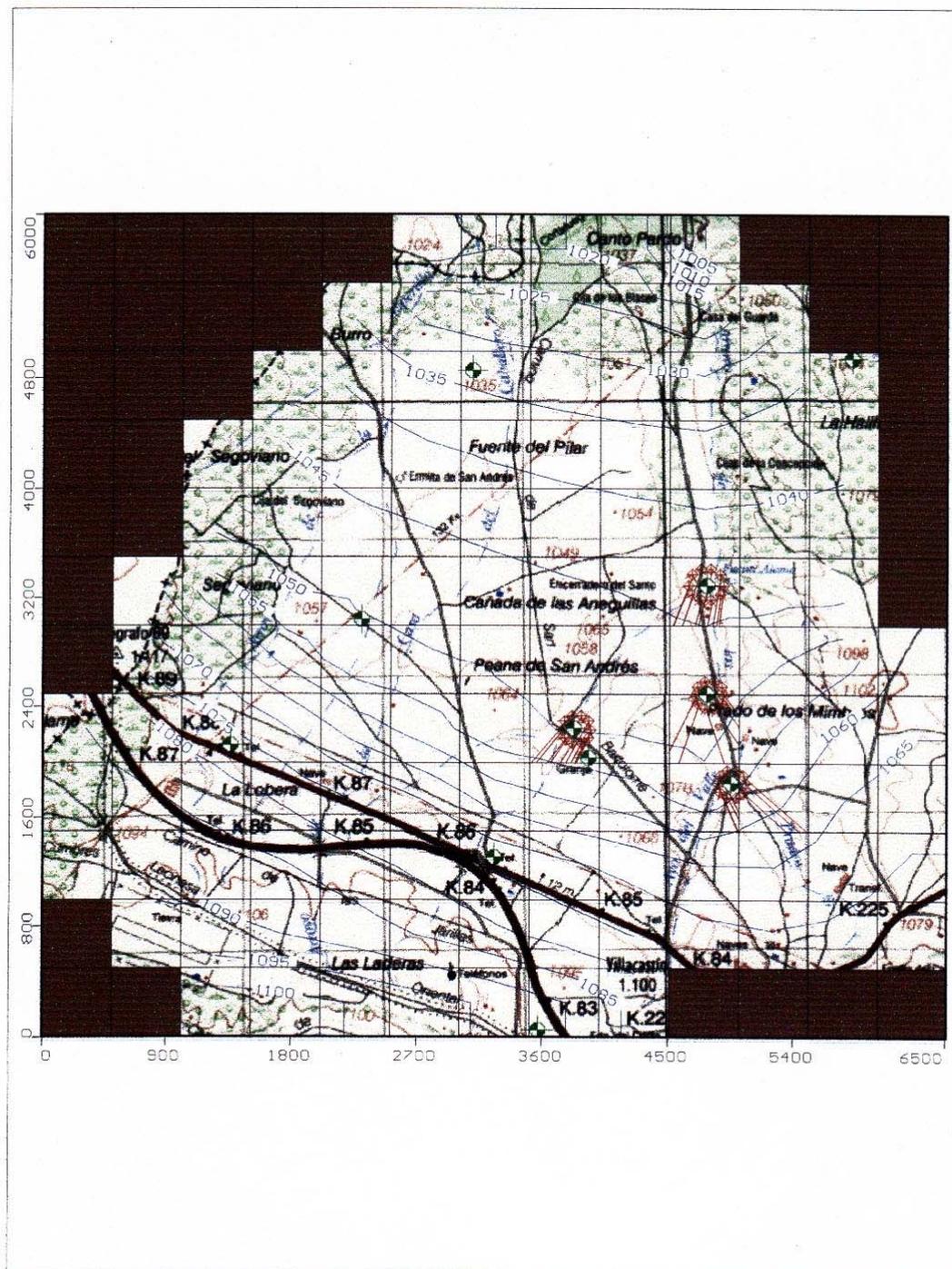


Figura-12-Anexo: Perímetros de protección para un tiempo de tránsito de 50 días con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento. Régimen permanente.

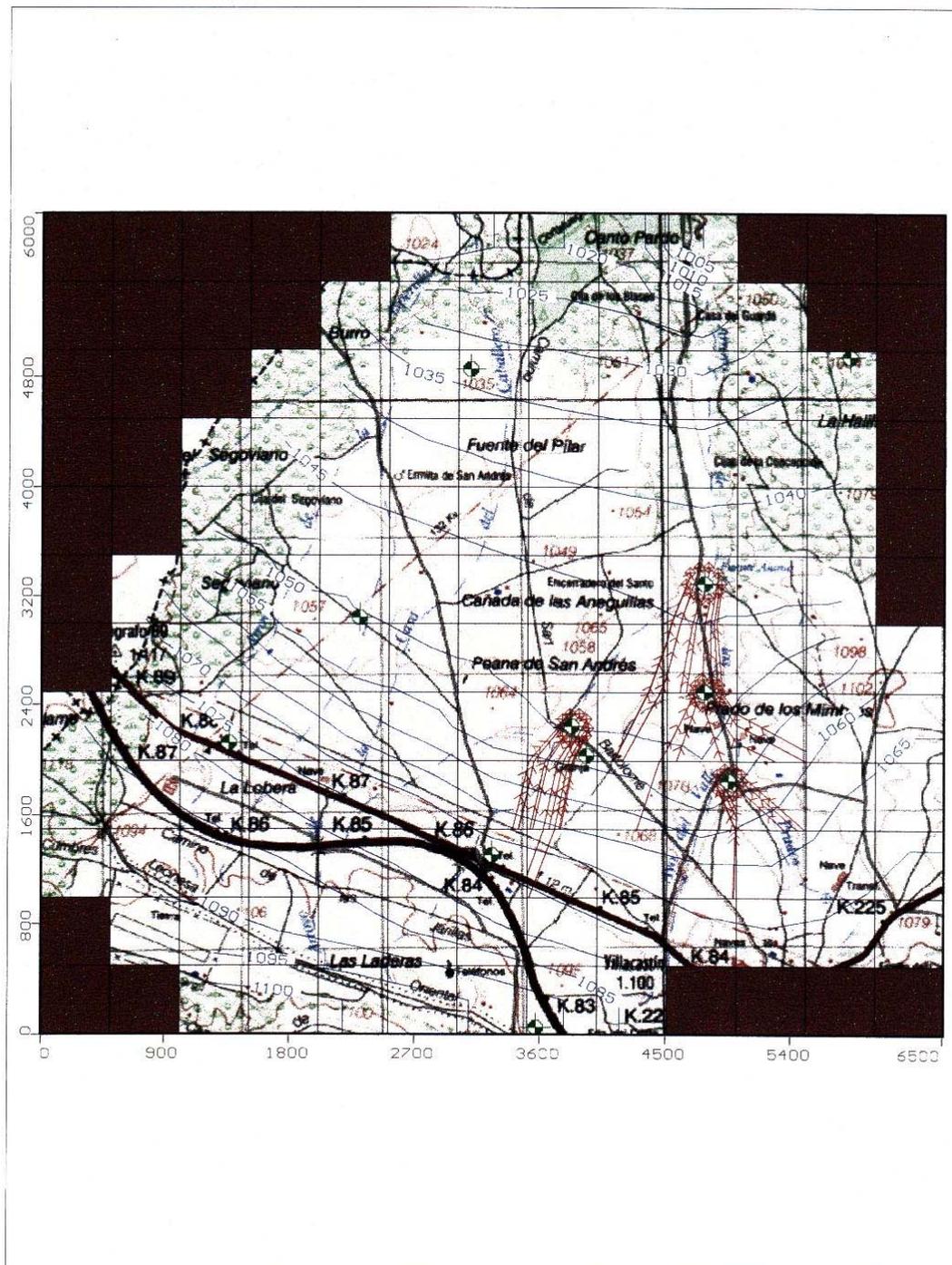


Figura-13-Anexo: Perímetros de protección para un tiempo de tránsito de 4 años con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento. Régimen permanente.

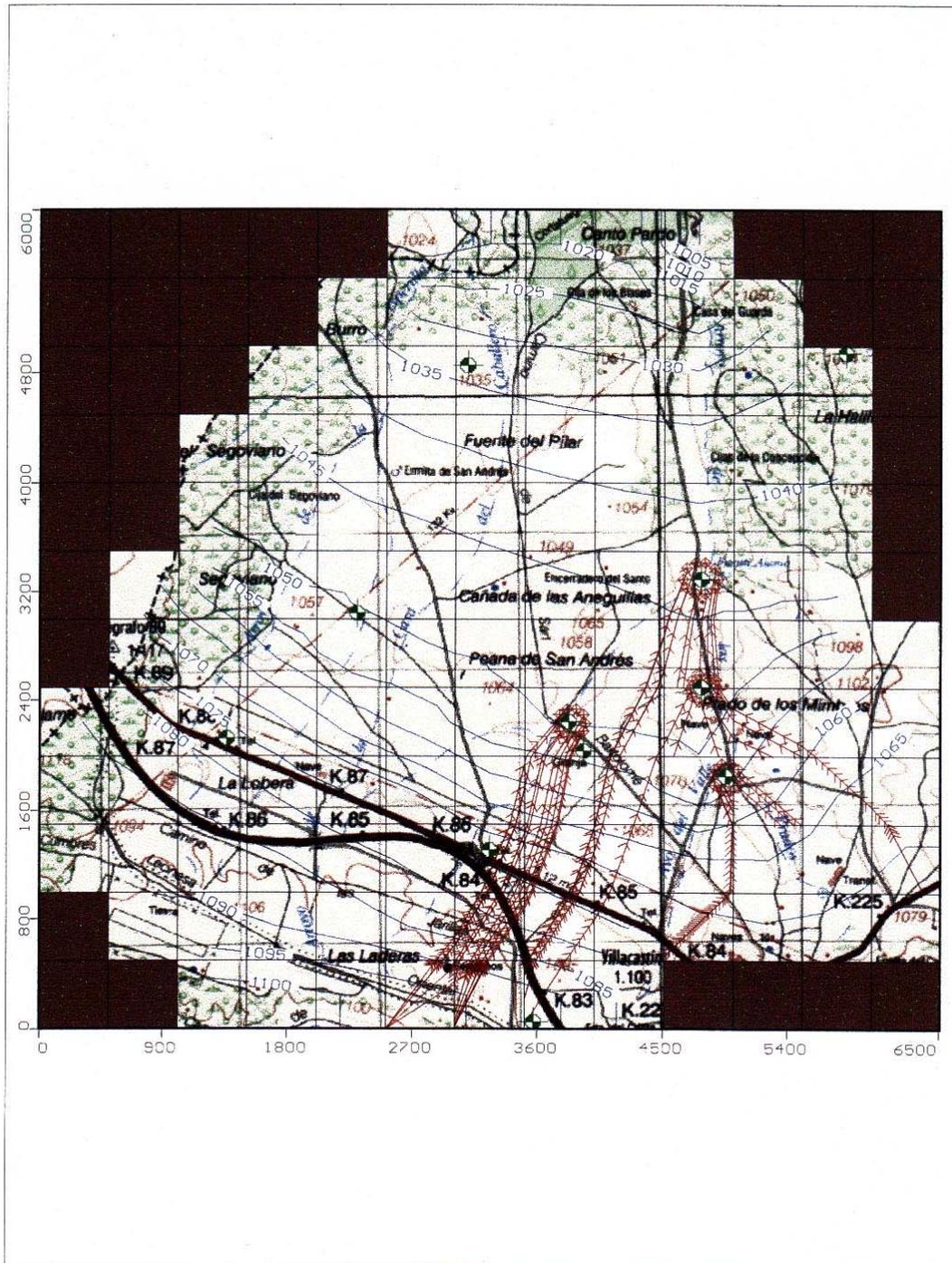


Figura-14-Anexo: Perímetros de protección para un tiempo de tránsito de 25 años con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento. Régimen permanente.