

Una metodología para la definición del perímetro de protección de captaciones de agua subterránea en regiones montañosas – Caso de estudio en el macizo granítico de la Serra da Estrela (Portugal)

A methodology for definition of groundwater protection zones in highland areas – Case study in the granitic massif of Serra da Estrela (Portugal)

MENDES, E.¹, FERREIRA GOMES, L. M.¹ and CONDESSO DE MELO, M. T.²

(1) Universidade da Beira Interior, Dep. de Engenharia Civil e Arquitectura, 6200-001 Covilhã, Portugal; emendes@ubi.pt; lmfg@ubi.pt

(2) CVRM-Centro de Geossistemas, IST, Av.Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal; tmelo@geo.ua.pt

Recibido: 29/07/2008

Revisado: 25/11/2008

Aceptado: 20/12/2008

Abstract

The present research is a contribution to the delineation of well head protection zones in highland areas in order to prevent groundwater contamination and guarantee public water supply sustainability. Highlands are usually low permeability fractured regions, where groundwater is most commonly abstracted using galleries, drains, sub-horizontal boreholes and springs, which create several constraints to the application of common methodologies for the delineation of well head protection zones. This paper presents a case study for the delineation of the protection zones of 8 groundwater captations in Serra da Estrela mountain (Portugal). In this regard, and given also the lack of information at national level for the delineation of protection zones in non vertical captations, the present work, presents an innovative methodology which results from the combination of four

methods or aspects: 1) wyssling method; 2) application of the radius fixed equation; 3) geological/ structural and geomorphologic aspects of the involving area of groundwater captations; 4) vulnerability of geological formations adjacent to the groundwater captations. This methodology was tested in 74 groundwater captations and could be applied to other mountain regions.

Key words: protection zones, groundwater, sub-horizontal captations.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo surgió ante la necesidad de solucionar la falta de información para definir del perímetro de protección en captaciones no verticales.

Las zonas montañosas, sobre todo la Serra da Estrela (Portugal), tienen una gran cantidad de captaciones de abastecimiento público de buena calidad y reservas importantes. Estas captaciones son singulares en el contexto clásico de captaciones de abastecimiento público porque corresponden a galerías, drenes, pozos semi-horizontales y manantiales.

El perímetro de protección está constituido por un conjunto de tres zonas: zona de protección inmediata, zona de protección intermedia y zona de protección ampliada que se puede utilizar como una herramienta para predecir, reducir y controlar la polución de las aguas subterráneas. Esta zonación permite considerar los procesos naturales de dilución y auto-depuración minimizando, por una parte, el efecto de la descarga accidental de contaminantes y, por otra, proteger y garantizar la calidad de las aguas subterráneas a largo plazo.

Según CRUZ (1997), el perímetro de protección debe incluir el área necesaria y

suficiente para la protección de un determinado acuífero y sus medios de explotación, esto es, la zona de protección no debe tener dimensiones demasiado pequeñas, de modo que pierda su eficacia, ni demasiado grande, lo que implicaría un incremento de las tareas administrativas con problemas para el desarrollo y por tanto económicas.

Las captaciones que son el objeto de este estudio, corresponden a uno de los siete sectores geográficos distintos estudiados por MENDES (2006), en el sector montañoso de Souto Novo de la Serra da Estrela.

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La región estudiada se integra en la unidad geotectónica de la zona Centro Ibérica, donde predominan rocas graníticas hercínicas con edades entre los 280-340 millones de años (Figura 1). Estas rocas son normalmente caracterizadas por su aspecto macroscópico, composición mineralógica, granulometría y textura. Existen varios tipos de rocas graníticas, variando desde granito porfiróide a granito de grano medio a fino.

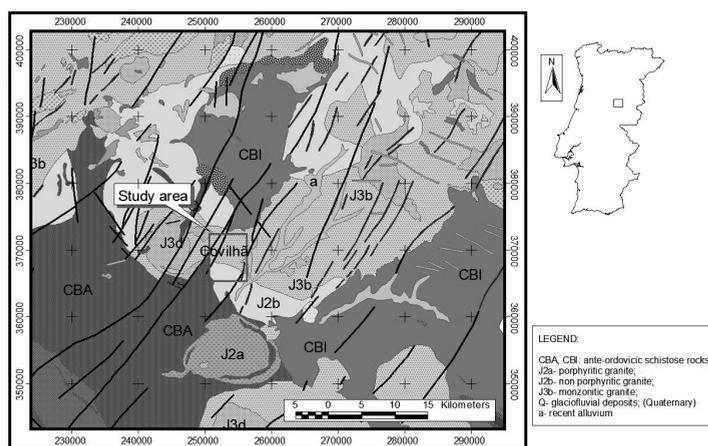


Figura 1 – Encuadramiento geográfico y geológico de la región en estudio (adaptado de SGP, 1992).

El estudio de la facturación local presenta facturas con orientación E-W, NNW-SSE e NNE-SSW que son las principales responsables del transporte de los fluidos hasta la superficie.

El flujo subterráneo no es muy profundo, como prueba en especial la baja mineralización del agua, conteniendo principalmente aguas de infiltración y circulación local, con tiempos de residencia cortos.

Una estimación de recarga de estos suelos graníticos considerando las características de la zona, en especial las pendientes y la vegetación típica de los sectores, permite suponer una tasa de infiltración de 15% de la precipitación anual. Aspectos más detallados sobre el tema han sido presentados por MENDES *et al.* (2007).

MÉTODOS EN LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN

Se diseñaron perímetros de protección para las varias captaciones estudiadas en este trabajo. Para ello se adaptó a cada captación el Método de Wyssling (WYSSLING, 1979 *in* NAVARRETE Y GARCIA, 2003) y el de radio fijo (según el Decreto-Ley n° 382/99 de 22 de septiembre del gobierno Portugués, DL, 1999) teniéndose en cuenta en cada caso las características geológicas y geomorfológicas y la vulnerabilidad de la formación geológica envolvente en las captaciones estudiadas. Presento a continuación una pequeña descripción de cada método o aspecto.

Aplicación del Decreto-Ley n° 382/99 de 22 de Septiembre

Al establecer el perímetro de protección para captaciones de agua subterránea que se destinan al abastecimiento público, el Decreto-Ley (DL, 1999), admite que las

captaciones son el único elemento drenante del acuífero para donde se dirigen todas las líneas de flujo y que no existen direcciones privilegiadas del caudal, se propone una metodología designada de “Método do Raio Fixo” o radio fijo, cuyas distancias al centro de la captación pueden obtenerse a través del cálculo de:

$$r = \sqrt{\frac{Q * t}{(3.1416 * n * H)}}$$

siendo:

- r, radio del perímetro de protección;
- Q, caudal de explotación;
- t, tiempo necesario para que el contaminante afecte la captación;
- n, porosidad eficaz, que se encuentra de acuerdo con la tabla adjunta del Decreto-Ley;
- H, espesor saturado en la captación.

Para adaptarse a una gran variedad de situaciones, el Decreto-Ley sistematiza además las formaciones acuíferas en 6 tipos, siendo de tipo 5 los terrenos del presente estudio.

Por lo tanto, para los acuíferos de Tipo 5, es decir, un sistema acuífero cuyo soporte litológico está constituido por rocas ígneas y metamórficas fisuradas, son establecidos los siguientes criterios:

- Zona de Protección Inmediata: r = 60 m (r es el radio de la zonación de protección);
- Zona de Protección Intermedia: r es el mayor valor entre 140 m y r (t=50 días);
- Zona de Protección Ampliada: r es el mayor valor entre 1200 m y r (t=3 500 días).

De esta manera y después de aplicar el método se han obtenido los resultados presentados en la Tabla 1.

Captación	Q (m ³ /d)	n	H	Zona de Protección Inmediata (tempo = 1 día)	Zona de Protección Intermedia (tempo = 50 días)	Zona de Protección Ampliada (tempo = 3500 días)
				r (m)	r (m)	r (m)
SN1d	31.1	0.002	3	60	287	2404
SN2d	24.0	0.002	7	60	165	1384
SN3d	16.8	0.002	4	60	183	1530
SN4d	17.4	0.002	3	60	215	1796
SN6d	27.3	0.002	5	60	209	1746
SN7m	12.6	0.002	5	60	142	1200
SN8d	20.6	0.002	3	60	234	1958
SN9d	6.0	0.002	7	60	140	1200

Tabla 1 – Resultados obtenidos para las diferentes zonas de protección de acuerdo con el método del Decreto-Ley n°382/99.

Método de Wyssling

Wyssling ha propuesto un método para optimizar el perímetro de protección (Wyssling, 1979 in NAVARRETE Y GARCIA, 2003), que consiste en el cálculo de la zona de llamada de una captación, 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 transito deseado. Este es un método en que se considera el gradiente hidráulico del macizo, y tiene como ventaja una medida más protectorista de las aguas arriba que de las aguas abajo de la captación. Para aplicar este método es necesario un conocimiento de valores de los siguientes parámetros:

- Ancho del frente de llamada:

$$B = \frac{Q}{Kbi}$$

- Radio de llamada:

$$X_0 = \frac{Q}{2\pi Kbi}$$

- Ancho del frente de llamada a la altura de captación:

$$B' = \frac{B}{2}$$

- Velocidad eficaz:

$$v_e = \frac{Ki}{m_e}$$

- Distancia de aguas arriba de la captación (en la dirección de flujo):

$$S_0 = \frac{+l + \sqrt{l(l+8 * X_0)}}{2}$$

- Distancia aguas abajo de la captación (en la dirección de flujo):

$$S_u = \frac{-l + \sqrt{l(l+8 * X_0)}}{2}$$

siendo:

- Q, caudal de explotación;
- K, conductividad hidráulica;
- b, espesor saturado del acuífero;
- t, tiempo necesario para que el contaminante afecte la captación;
- i, gradiente hidráulico;
- m_e, porosidad eficaz;
- l = v_e/t.

De este modo, y después de aplicar el método, los resultados obtenidos se presentan en las tablas 2, 3 y 4. Será de realizar que las distancias aguas abajo en la aplicación del método directo en muchos de los ensayos del presente estudio resultan con valores considerados en algunos casos no adecuados, por eso se entiende limitarlas a un valor mínimo por cuestiones operacionales, y limitarlas a un valor máximo por cuestiones de racionalidad por entenderse que en zonas de grandes declives como el presente caso, pues considerar las distancias demasiado grandes sería una exageración; así que, las distancias para aguas abajo de la captación estarán limitadas a valores de acuerdo con lo siguiente:

- zona inmediata: 5 a 25 m;
- zona intermedia: 10 a 35 m;
- zona ampliada: 15 a 40 m.

Sobre las distancias de aguas arriba, también en esta fase después de aplicarla en muchos ensayos, en la generalidad de las captaciones son siempre considerados los valores resultantes de ecuaciones, presentadas anteriormente, para la zona de protección inmediata; para las zonas de protección intermedia y ampliada los valores que resultan de las ecuaciones se deberán limitar a la distancia del método del Decreto-Ley, una vez que con frecuencia las distancias evolucionan hasta las zonas alejadas y para cuencas vecinas.

Zona de Protección Inmediata													
Captación	Q (m ³ /d)	Tiempo (días)	m_e	H (m)	K (m/d)	i	B (m)	X0 (m)	B' (m)	ve (m/d)	I (m)	Aguas arriba S ₀ (m)	Aguas abajo S _u (m)
SN1d	31.1	1	0.002	3	0.28	0.21	176	28	88	29	29	58	29 (25)
SN2d	24.0	1	0.002	7	0.28	0.21	58	9	29	29	29	42	13
SN3d	16.8	1	0.002	4	0.28	0.21	71	11	36	29	29	44	15
SN4d	17.4	1	0.002	3	0.28	0.21	98	16	49	29	29	48	19
SN5m	49.2	1	0.002	5	0.28	0.23	153	24	76	32	32	59	27 (25)
SN6d	27.3	1	0.002	5	0.28	0.21	93	15	47	29	29	48	18
SN7m	12.6	1	0.002	5	0.28	0.21	43	7	21	29	29	40	10
SN8d	20.6	1	0.002	3	0.28	0.21	117	19	58	29	29	51	22
SN9d	6.0	1	0.002	7	0.28	0.21	14	2	7	29	29	33	4 (5)
SN10m	53.8	1	0.005	16	0.14	0.35	69	11	34	10	10	20	11

Tabla 2 – Aplicación del método de Wyssling, para la zona de protección inmediata.

Zona de Protección Intermedia													
Captación	Q (m ³ /d)	Tiempo (días)	m_e	H (m)	K (m/d)	i	B (m)	X0 (m)	B' (m)	ve (m/d)	I (m)	Aguas arriba S ₀ (m)	Aguas abajo S _a (m)
SN1d	31.1	50	0.002	3	0.28	0.21	176	28	88	29	1470	1524	54 (35)
SN2d	24.0	50	0.002	7	0.28	0.21	58	9	29	29	1470	1488	18
SN3d	16.8	50	0.002	4	0.28	0.21	71	11	36	29	1470	1492	22
SN4d	17.4	50	0.002	3	0.28	0.21	98	16	49	29	1470	1501	31
SN5m	49.2	50	0.002	5	0.28	0.23	153	24	76	32	1610	1657	47 (35)
SN6d	27.3	50	0.002	5	0.28	0.21	93	15	47	29	1470	1499	29
SN7m	12.6	50	0.002	5	0.28	0.21	43	7	21	29	1470	1484	14
SN8d	20.6	50	0.002	3	0.28	0.21	117	19	58	29	1470	1506	36 (35)
SN9d	6.0	50	0.002	7	0.28	0.21	14	2	7	29	1470	1475	5 (10)
SN10m	53.8	50	0.005	16	0.14	0.35	69	11	34	10	490	511	21

Tabla 3 – Aplicación del método de Wyssling, para la zona de protección intermedia.

Zona de Protección Ampliada													
Captación	Q (m ³ /d)	Tiempo (días)	m_e	H (m)	K (m/d)	i	B (m)	X0 (m)	B' (m)	ve (m/d)	I (m)	Aguas arriba S ₀ (m)	Aguas abajo S _a (m)
SN1d	31.1	3500	0.002	3	0.28	0.21	176	28	88	29	102900	102956	56 (40)
SN2d	24.0	3500	0.002	7	0.28	0.21	58	9	29	29	102900	102919	19
SN3d	16.8	3500	0.002	4	0.28	0.21	71	11	36	29	102900	102923	23
SN4d	17.4	3500	0.002	3	0.28	0.21	98	16	49	29	102900	102931	31
SN5m	49.2	3500	0.002	5	0.28	0.23	153	24	76	32	112700	112749	49 (40)
SN6d	27.3	3500	0.002	5	0.28	0.21	93	15	47	29	102900	102930	30
SN7m	12.6	3500	0.002	5	0.28	0.21	43	7	21	29	102900	102914	14 (15)
SN8d	20.6	3500	0.002	3	0.28	0.21	117	19	58	29	102900	102937	37
SN9d	6.0	3500	0.002	7	0.28	0.21	14	2	7	29	102900	102905	5 (15)
SN10m	53.8	3500	0.005	16	0.14	0.35	69	11	34	10	34300	34322	22

Tabla 4 – Aplicación del método de Wyssling, para la zona de protección ampliada.

Aspectos geológico estructurales y geomorfológicos

La delimitación del perímetro de protección usado tiene en línea aspectos geológico-estructurales y geomorfológicos que se basan en una análisis de ocurrencia de estructuras geológicas como fallas y hilos, en el análisis de cartografía hidrogeológica, en los análisis de direcciones y sentido de flujo, en la relación entre acuíferos y líneas de agua, en el análisis de los límites de las basías de alimentación, entre otros. Según estos aspectos, cada caso podrá ser un caso con alguna especificidad, en general, la ocurrencia de una estructura del tipo barrera se analiza en relación con las líneas de flujo, para que se obtenga el encortamiento de las áreas de protección. También podrán ocurrir situaciones de estructuras lineares con gran permeabilidad como hilos muy fracturados, continuos y largos que en el caso llevarían a la ampliación de la zona de protección con el desarrollo de las estructuras para distancias superiores a las que resultan de los métodos anteriores.

Vulnerabilidad de contaminante

Las zonas de protección establecidas por los criterios anteriormente presentados han sido siempre analizadas en relación con

su vulnerabilidad, y, cuando ese análisis era necesario ha contribuido para conseguir definir algunos límites que surgieron de algunas dudas en especial cuando ocurren en zonas más complejas en relación a sus singularidades geológicas, en el sentido de optimizar por defecto o por exceso la función del grado de vulnerabilidad ser menor o mayor, respectivamente.

APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS EN LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN

Las diferentes zonas de protección fueron elaboradas de acuerdo con el siguiente:

Zona de Protección Inmediata

La zona de protección inmediata es consecuencia de la aplicación del método de Wyssling con algunos ajustes que se particularizan para cada caso después de la aplicación de la formulación correspondiente. Aguas abajo de la captación se consideran los valores de 5 y 25 como distancia mínima y máxima respectivamente partiendo de la boca de la captación. El valor mínimo se ha estimado por razones de operatividad y el máximo se ha fijado teniendo en cuenta que en algunos casos la aplicación del mé-

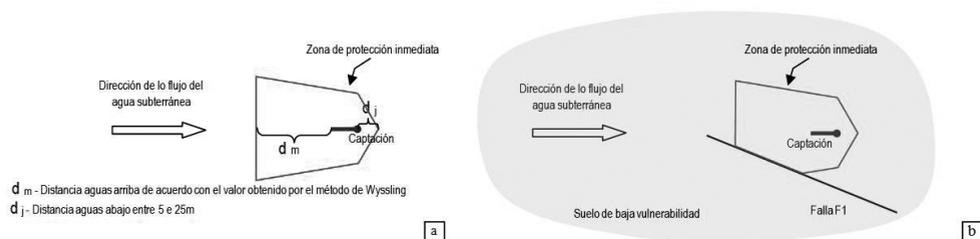


Figura 2 – Esbozo de la aplicación: a) de la 1ª fase sobre la metodología propuesta para la delimitación de la zona de protección inmediata; b) de la 2ª fase sobre la metodología propuesta para la delimitación de la zona de protección inmediata, con reducción del área inicial, debido a la ocurrencia de una estructura geológica (falla F1) en un suelo de baja vulnerabilidad a la polución

todo directo lleva a valores elevados, considerados no adecuados, por entenderse que en zonas de gran pendiente como en nuestro caso, sería una sobreestimación. Aguas arriba de la captación se consideran siempre los valores resultantes de las ecuaciones del método (Figura 2a).

Teniendo en cuenta la configuración que resulta de la 1ª fase, se analizan los aspectos de la 2ª fase, como por ejemplo las fronteras (fallas y límites de cuencas), la existencia de estructuras permeables como diques de rocas extremadamente fracturadas e incluso la vulnerabilidad general de las distintas formaciones presentes. Para delimitar la zona de protección las áreas podrán ser aumentadas o disminuidas, por ejemplo si se observa la existencia de una falla, con relleno de arcillas, en las proximidades de la captación (Figura 2b) o si se desarrolla en una dirección que aparte los flujos subterráneos de la captación. En este caso el área de la zona de protección inmediata se verá limitada en el sentido de redu-

cir, no habiendo necesidad así de restringir el uso del territorio a terceros.

Zona de Protección Intermedia

El método de Wyssling aplicado en la 1ª fase se utiliza también para definir la zona de protección intermedia con los valores de ajuste aguas abajo, de 10 y 35 m para las distancias mínimas y máximas respectivamente, a partir de la boca de la captación (Figura 3a). Después de esta corrección se marcan, a partir de este punto, líneas paralelas en relación a la zona de protección inmediata anteriormente definida hasta interceptarla aguas arriba de la captación. La tangente al círculo resultante de la aplicación de la fórmula de la radio fijo permite situar la zona intermedia. Esta zona de protección se debe ampliar en la 2ª fase si fuese necesario, como se hizo en la zona de protección inmediata, y como aún se representa en la Figura 3b, haciéndose notar que cada caso es diferente y que muy probablemente, investigadores diferentes obtendrán soluciones similares.

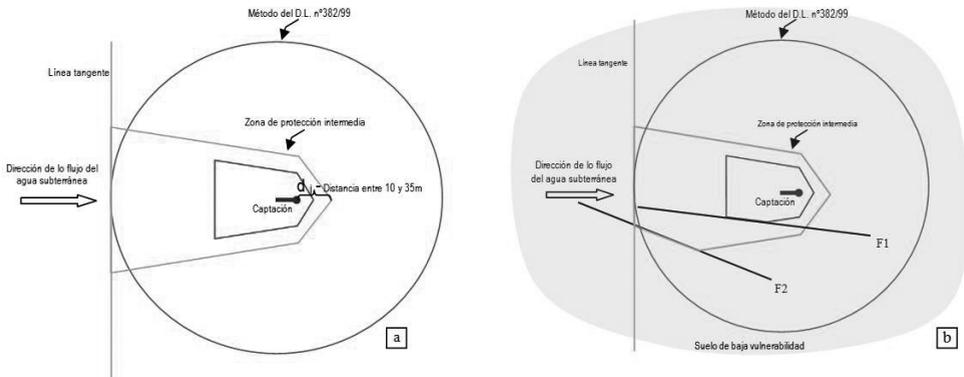


Figura 3 – Esbozo de la aplicación: a) de la 1ª fase de la metodología propuesta para la delimitación de la zona de protección intermedia; b) de la 2ª fase da metodología propuesta para la delimitación de la zona de protección intermedia donde existen dos estructuras geológicas (fallas F1 y F2) en un suelo de baja vulnerabilidad a la polución.

Zona de Protección Ampliada

La zona de protección ampliada también aquí en una 1ª fase es consecuencia de la aplicación del método de Wyssling con los valores límites de ajuste aguas abajo de 15 y 40 m, marcándose después, a partir de este punto, líneas paralelas en relación a la zona de protección intermedia anteriormente definida hasta interceptar aguas arriba de la captación la tangente al círculo resultante de la aplicación de la fórmula de la radio fijo ahora en la situación de la zona alargada (Figura 4a). Del mismo modo que ocurría en las zonas de protección inmediata e intermedia, también en esta zona de protección se deberá prever la 2ª fase, pudiendo apare-

cer alteraciones de la delimitación del área, en función de las singularidades geológicas, así como de la posibilidad frecuente de aparición de fronteras tipo límite de cuencas, si estas aparecieran a distancias menores que las anteriores (Figura 4b). Este tipo de situación, límite de cuencas, también se puede aplicar para el caso de las zonas de protección intermedia a pesar de ser menos frecuente su aparición que en el caso de la zona de protección ampliada. Hay que tener en cuenta que también aquí se consideran otros aspectos como la vulnerabilidad, mencionados para las otras zonas de protección, asociados a las demás particularidades.

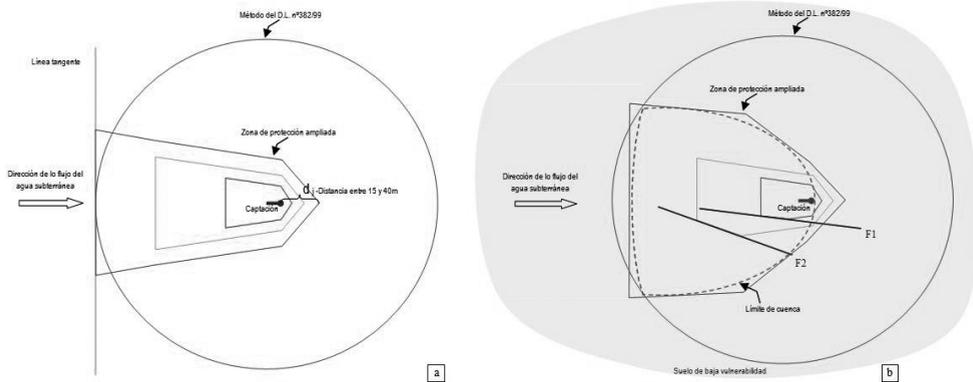


Figura 4 – Esbozo de la aplicación: a) de la 1ª fase de la metodología propuesta para la delimitación de la zona de protección ampliada; b) de la 2ª fase de la metodología propuesta para la delimitación de la zona de protección ampliada, donde en especial es evidenciado el ajuste de esta zona, menor, debido al límite de cuenca.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS CAPTACIONES ESTUDIADAS

En la Figura 5 se presentan las captaciones estudiadas. De la aplicación del conjunto de métodos descritos anteriormente se

obtiene para cada captación una zona inmediata, intermedia y ampliada (Figura 6).

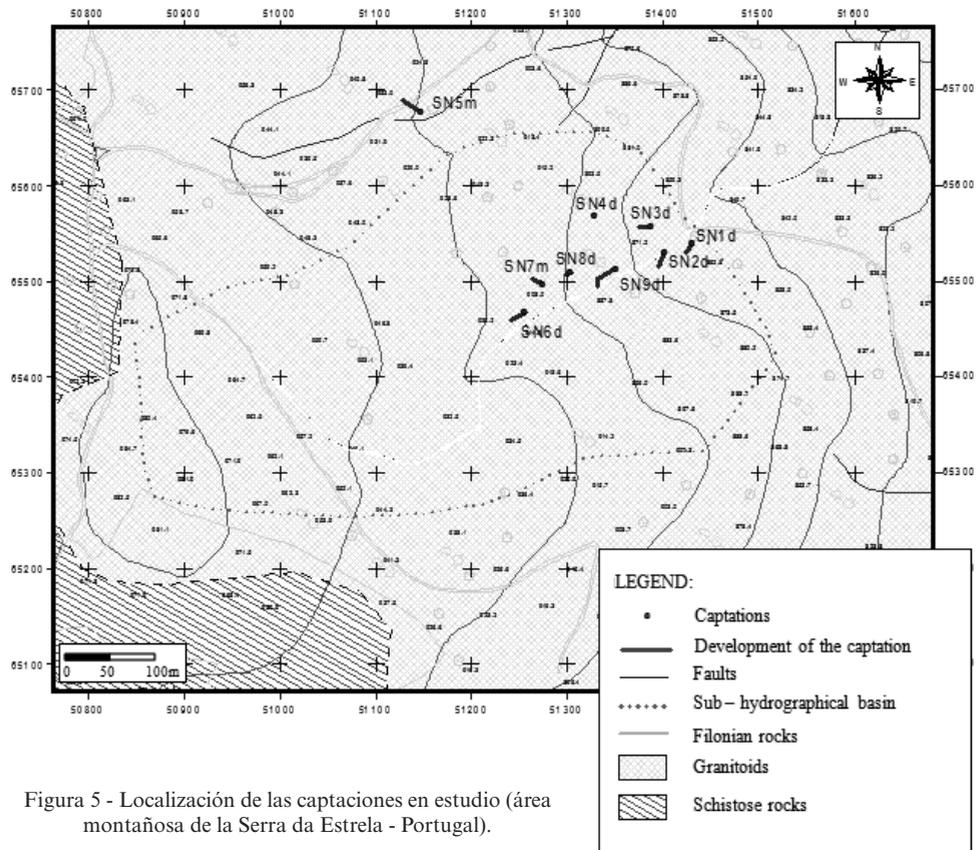


Figura 5 - Localización de las captaciones en estudio (área montañosa de la Serra da Estrela - Portugal).

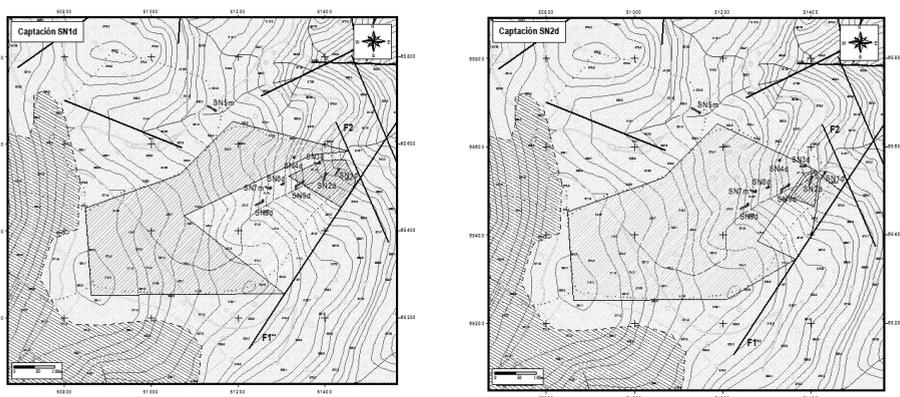


Figura 6 – Aplicación de la metodología presentada en la optimización de los perímetros de protección en un área montañosa de la Sierra de Estrela (Portugal): delimitación individual de las zonas de protección. (cont.)

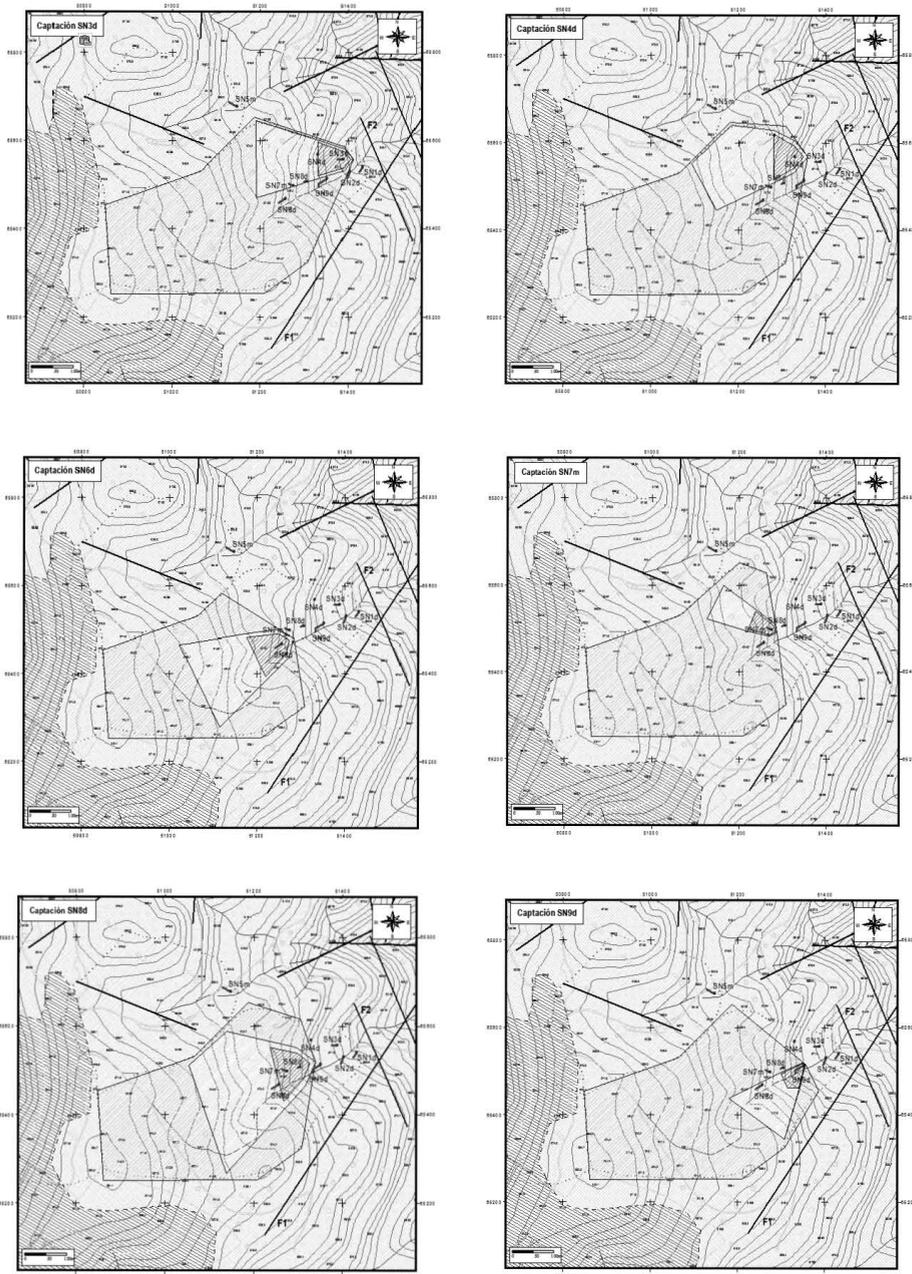


Figura 6 – Aplicación de la metodología presentada en la optimización de los perímetros de protección en un área montañosa de la Sierra de Estrella (Portugal): delimitación individual de las zonas de protección.

Si realizamos la proyección de las zonas de protección, se observa una superposición de las mismas. Por ejemplo, se verifica que parte de la zona de protección inmediata de la captación SN1d se encuentra superpuesta a la zona de protección inmediata de la captación SN2d. Se advierte, que del mismo modo, se verifica una superposición tanto para la zona de protección intermedia como para la zona de protección ampliada. En este sentido, y se verifica que esta situación, si las superposiciones tienen lugar en la mayoría de las captaciones, se tiende a delimitar una única área común para las varias zonas de protección inmediata, intermedia y alargada, resultante de la envolvente de las zonas de protección inmediatas, intermedias y alargadas individuales de cada captación. Así, como ensayo final de los perímetros de protección del conjunto de las 8 captaciones

se obtiene una única zona de protección inmediata, una única zona de protección intermedia y una única zona de protección ampliada (Figura 7).

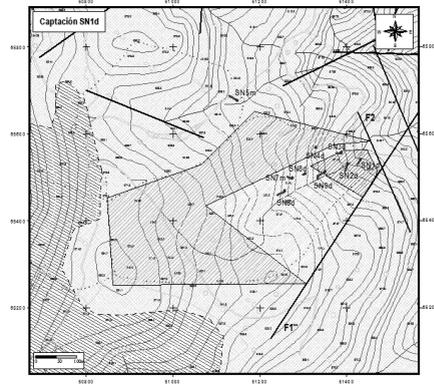


Figura 7 – Solución final del perímetro de protección de las 8 captaciones de agua subterránea de la región montañosa - Serra da Estrela.

CONCLUSIONES

La metodología seguida fue desarrollada en especial para captaciones semi-horizontales, siendo de realzar que también se puede aplicar a pozos verticales y manantiales, en que se consideran como casos particulares de los anteriores, siendo la zona inicial de la captación coincidente con la zona terminal.

BIBLIOGRAFÍA

CRUZ, J. F. A. da (1997). Objectivos e critérios para a elaboração das propostas de fixação dos perímetros de protecção in *Preservação da qualidade das águas minerais naturais e águas de nascentes*, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, pp. 30-46.

Como ensayo final de los perímetros de protección se llama la atención sobre el hecho de que debido a la proximidad entre las distintas captaciones de un mismo sector éstas fueron tratadas simultáneamente resultando así zonas comunes con el conjunto una única zona de protección inmediata para las 8 captaciones, una sola zona de protección intermedia y una sola zona de protección ampliada.

DL (1999). Decreto-Lei nº382/99, “Estabelece perímetros de protecção para captações de águas subterráneas destinadas ao abastecimento público”, *Diário da República* nº222/99, série I-A, de 22 de Setembro, 5p.

MENDES, E. (2006). Perímetros de Protecção de Captações de Água Subterránea para consumo humano em zonas de

- Montanha. Caso de Estudo da Cidade da Covilhã. Tese de Mestrado em Geotecnia Ambiental, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 122p. + Anexos 127p.
- MENDES, E., FERREIRA GOMES, L. M. and CONDESSO DE MELO, M. T. (2007). Contribution for the estimation of groundwater recharge in the Serra da Estrela crystalline-rock groundwater bodies (Portugal) in. XXXVI Congress International Association of Hydrogeologists, Groundwater and Ecosystems, Lisbon, 17-21 Sep. 2007. (editado em CD-ROM)
- NAVARRETE, C. and GARCIA, A. (2003). Perímetros de Protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 273p.
- SGP (1992). Serviços Geológicos de Portugal, Carta Geológica de Portugal à escala 1:500000 - hoja 1, Lisboa.