



<b>INFORME</b>	Identificación <b>H7-003-99</b>
	Fecha: 30-9-1999
<b>TÍTULO</b> "Sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas mediante infiltración directa sobre el terreno. Experiencia en Dehesas de Guadix (Granada)"	
<b>PROYECTO</b> HID96-1326. "Recarga artificial de acuíferos: evaluación, análisis y seguimiento de condicionantes técnicos y económicos".	
<b>RESUMEN</b> Los sistemas clásicos de depuración de ARU no son, en la mayoría de las ocasiones, la mejor opción para poblaciones pequeñas dados sus elevados costos de instalación y mantenimiento. En este sentido, se hace necesaria, en ocasiones con carácter urgente, la investigación y desarrollo de métodos de depuración compatibles con el medio ambiente, de implantación económica y coste de mantenimiento reducido.  Entre los sistemas de depuración que emplean tecnologías blandas para el tratamiento del ARU se encuentran los de infiltración directa sobre el terreno. Este método, exige contar con un material y unas condiciones hidrogeológicas adecuadas que pueden llegar a constituir un factor limitante que impida, al menos en teoría, la aplicación de la técnica.  Se ha planteado, como objetivo principal de este trabajo: investigar la viabilidad de la infiltración directa sobre el terreno como sistema de depuración de aguas residuales urbanas en condiciones de permeabilidad reducida.  Para la realización de la experiencia práctica, se ha diseñado y construido una planta piloto de tratamiento de las ARU, y un sistema de vigilancia y control de las aguas subterráneas, del suelo y de la solución del suelo, que permite determinar la viabilidad práctica del sistema de depuración, la eficacia como método de gestión del agua residual y el costo en condiciones reales de explotación práctica.  ----- Continua en el reverso -----	
<b>Revisión</b>  <b>Nombre</b> Juan Antonio López Geta.  <b>Unidad</b> Aguas Subterráneas y Geotécnia.  <b>Fecha</b>	<b>Autores:</b> Luis Moreno Merino  <b>Responsable:</b> José Manuel Murillo Díaz Juan Carlos Rubio Campos

CAPITULOS 1 a 6



Como resultado de la experiencia se ha llegado a las siguientes conclusiones:

a) Conclusiones:

1ª) Las aguas residuales de Dehesas de Guadix muestran una composición típica de aguas residuales urbanas sin componente industrial (el vertido de las pequeñas industrias chacineras es asimilable a uno puramente urbano).

La variación observada en los indicadores de contaminación y en iones mayoritarios es superior a los valores normalmente considerados como medios. Esto es debido a la escasa precipitación en la zona y al bajo consumo de agua en actividades que tienden a diluir el ARU (como pueden ser el baldeo de calles o el riego de jardines).

2ª) La depuración ejercida por el filtro verde es insuficiente. Se aprecia un impacto pequeño, pero medible, del ARU sobre la composición del agua del río Guadahortuna.

3ª) El paso del ARU a través de las balsas de decantación y almacén se muestra eficaz en la retirada de sólidos en suspensión alcanzándose un porcentaje medio de eliminación del 45%. La DQO y DBO5 disminuyen entre un 25 y un 30%.

4ª) La composición de la solución del suelo muestra unas características intermedias entre el agua residual y el agua subterránea. Cada especie química ha evolucionado de forma distinta. Puede destacarse la eficacia del suelo como filtro mecánico al obtenerse reducciones de sólidos en suspensión, en el dren más profundo, siempre mayores al 90%. De igual manera los indicadores de contaminación orgánica se reducen, en el caso de la DBO5 más del 90 % y en el de la DQO más del 70%. La disminución promedio del COT varía entre el 70 y el 80%. Los compuestos de nitrógeno, en su mayor parte en forma de amonio, se reducen entre el 67 % y el 88% dependiendo del dren muestreado.

La evolución de otras especies, como es el caso de los iones mayoritarios, está ligada a la intensa actividad biológica del suelo y a la consiguiente producción de CO<sub>2</sub>.

5ª) Las aguas subterráneas no se han visto afectadas por el desarrollo de la experiencia de infiltración. El suelo se ha comportado como un buen sistema de depuración.

6ª) El proceso de infiltración a través del terreno se muestra en conjunto como un sistema eficaz de depuración de la carga bacteriana del agua residual. Las tasas promedio de eliminación son (en los drenes profundos): del 99,66 % para los coliformes totales, del 99,75 % para los coliformes fecales, y del 99,61 % para los estreptococos fecales.

7ª) El efecto del proceso de infiltración sobre el lecho filtrante ha sido en general mejorante de su aptitud agrícola, produciéndose un lavado del exceso de sales solubles y un aumento claro de la materia orgánica, del nitrógeno y sobre todo del fósforo disponibles.

8ª) Se observa un proceso incipiente de descarbonatación de los horizontes superiores del suelo que a la larga puede dar lugar a la precipitación de carbonato cálcico en profundidad. Este proceso debe ser controlado pues puede ser causa de disminución importante de la capacidad de infiltración del sistema.

9ª) En el periodo de tiempo que ha durado la experiencia, aproximadamente un año, la colmatación del lecho filtrante no ha tenido suficiente entidad como para requerir la programación de labores de limpieza sobre la superficie de la balsa.



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

**RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS: EVALUACIÓN,  
ANÁLISIS Y SEGUIMIENTO DE CONDICIONANTES  
TÉCNICOS Y ECONÓMICOS**

**SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS  
MEDIANTE INFILTRACIÓN DIRECTA SOBRE EL TERRENO,  
EXPERIENCIA EN DEHESAS DE GUADIX (GRANADA).**

**MEMORIA (Capítulos 1 a 6)**

Madrid, Julio de 1999.

El presente trabajo constituye el informe final en el cual se recogen los estudios previos, desarrollo y conclusiones del estudio titulado: "**Sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas mediante infiltración directa sobre el terreno. Experiencia en Dehesas de Guadix (Granada)**" que forma parte del proyecto HID96-1326, titulado: "Recarga artificial de acuíferos: evaluación, análisis y seguimiento de condicionantes técnicos y económicos".

El proyecto ha sido desarrollado, en su totalidad, por un equipo de trabajo formado por personal técnico del Instituto Tecnológico Geominero de España, (ITGE). La Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), con cargo a la aplicación presupuestaria 18.13.542A.780., ha financiado una parte muy importante de las investigaciones realizadas.

El equipo técnico de realización ha estado constituido por:

Dirección del proyecto:

José Manuel Murillo Díaz.

Juan Carlos Rubio Campos.

Diseño, seguimiento de obra y muestreo:

José Antonio Gómez López.

Elaboración del informe:

Luis Moreno Merino.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible sin la colaboración desinteresada de personas e instituciones que han prestado su apoyo inestimable desde las fases de diseño de instalaciones y ejecución de obra, pasando por el mantenimiento y toma de muestras, hasta la aplicación de técnicas analíticas, por eso el ITGE quiere expresar su agradecimiento explícito a:

El Ayuntamiento de Dehesas de Guadix.

La Diputación de Granada.

La Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía.

El Instituto de Formación Profesional Jimenez Montoya de Baza.

El departamento de Edafología de la Universidad Complutense de Madrid.

## **EMPRESAS Y ORGANISMOS COLABORADORES**

En el desarrollo de este proyecto han participado las siguientes empresas y organismos:

SONBER S.A.: Construcción del sistema de pozos con drenes horizontales.

PROVISA: Construcción y acondicionamiento del sistema de balsas y de distribución del agua residual.

Laboratorio de Análisis de Aguas del ITGE: Análisis de aguas limpias.

Laboratorio de Análisis de Suelos del ITGE: Análisis granulométricos, difracción de rayos X, análisis de materia orgánica en suelos.

Laboratorio de Análisis de aguas residuales de EMGRISA: Análisis de aguas residuales.

Laboratorio de edafología de la Facultad de Farmacia de la UCM: Análisis de suelos.

## INDICE

1.- INTRODUCCIÓN Y MARCO LEGAL .....	1.1
1.1.- Criterios para la selección del método de depuración .....	1.3
1.1.1.- Descripción de las principales tecnologías blandas para el tratamiento de ARU .....	1.3
1.1.2.- Selección del método .....	1.8
1.2.- Aspectos legales .....	1.13
2.- ANTECEDENTES. ....	2.1
3.- OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO .....	3.1
4.- CRITERIOS DE SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL EMPLAZAMIENTO DE LAS INSTALACIONES .....	4.1
4.1.- Criterios de selección del emplazamiento .....	4.1
4.2.- Contexto geológico e hidrogeológico general y local .....	4.3
4.2.1.- Contexto general .....	4.3
4.2.2.- Contexto local .....	4.5
4.3.- Características del núcleo de población y tratamiento actual de sus aguas residuales .....	4.8
5.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INFILTRACIÓN .....	5.2
5.1.- Estudios previos .....	5.3
5.1.1.- Situación de los puntos de muestreo y ensayo .....	5.3
5.1.2.- Ensayos de infiltrometría .....	5.4
5.1.3.- Caracterización textural de la matriz sólida .....	5.11
5.1.4.- Caracterización de la fracción arcilla .....	5.14
5.1.5.- Catas descriptivas de investigación .....	5.18
5.2.- Metodología de dimensionamiento del sistema de balsas .....	5.19
5.2.1.- Estudio comparativo de los diferentes supuestos de recarga ..	5.19
5.3.- Superficie de balsas y ciclos propuestos .....	5.32
5.4.- Diseño final y características constructivas del sistema de infiltración ..	5.32
6.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE VIGILANCIA Y CONTROL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO .....	6.1
6.1.- Antecedentes. Criterios de selección del sistema de muestreo del agua subterránea y de la solución del suelo .....	6.1

6.1.1.- Métodos de campo .....	6.1
6.1.2.- Métodos de laboratorio .....	6.4
6.1.3.- Metodología elegida para la obtención de la solución del suelo ..	6.8
6.1.4.- Sistema de control de la calidad de las aguas subterráneas .....	6.9
6.2.- Diseño y construcción de los sondeos de control .....	6.10
6.2.1.- Consideraciones constructivas y de acondicionamiento .....	6.10
6.2.2.- Descripción litológica de los sondeos .....	6.11
6.3.- Diseño y construcción de los pozos con drenes horizontales .....	6.21
<b>7.- RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>7.1</b>
7.1.- Caracterización de las aguas subterráneas en la zona en estudio .....	7.2
7.1.1.- Material y métodos .....	7.2
7.1.2.- Resultados analíticos .....	7.5
7.1.3.- Conclusiones sobre la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas de la zona de Dehesas de Guadix .....	7.12
7.2.- Características del agua del río Guadahortuna .....	7.13
7.2.1.- Materiales y métodos .....	7.14
7.2.2.- Resultados analíticos .....	7.15
7.2.3.- Conclusiones sobre la caracterización hidroquímica de las aguas del río Guadahortuna .....	7.22
7.3.- Características químicas de las aguas residuales urbanas de Dehesas de Guadix .....	7.24
7.3.1.- Material y métodos .....	7.26
7.3.2.- Aguas residuales urbanas. Resultados analíticos .....	7.27
7.3.3.- Impacto de los vertidos líquidos de la población de Dehesas en la composición de las aguas de abastecimiento .....	7.36
7.3.4.- Evolución de las aguas residuales en las balsas almacén y de decantación .....	7.39
7.3.5.- Conclusiones acerca de las características de las ARU de Dehesas de Guadix y de su evolución en las balsas de decantación y almacén ..	7.48
7.4.- Evolución de la composición de la solución del suelo .....	7.51
7.4.1.- Material y métodos .....	7.52
7.4.2.- Resultados analíticos .....	7.53
7.4.3.- Conclusiones acerca de la composición y evolución de la solución del suelo .....	7.80

7.5.- Evolución de la composición de las aguas subterráneas .....	7.83
7.5.1.- Material y métodos .....	7.83
7.5.2.- Resultados analíticos .....	7.85
7.5.3.- Conclusiones acerca de la evolución de la composición de las aguas subterráneas .....	7.113
7.6.- Evolución de los indicadores de contaminación microbiológica en las aguas subterráneas y en la solución del suelo .....	7.114
7.6.1.- Materiales y métodos .....	7.114
7.6.2.- Resultados analíticos .....	7.118
7.6.3.- Conclusiones sobre la caracterización microbiológica del proceso de infiltración .....	7.126
7.7.- Evolución de las características físico-químicas del lecho filtrante .....	7.127
7.7.1.- Material y métodos .....	7.127
7.7.2.- Resultados analíticos .....	7.138
7.7.3.- Conclusiones acerca de la evolución del lecho filtrante .....	7.169
7.8.- Rendimiento del sistema .....	7.172
7.8.1.- Volúmenes de agua residual infiltrados .....	7.172
7.8.2.- Aporte neto de carga contaminante .....	7.173
7.8.3.- Rendimiento del proceso de depuración .....	7.175
8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES .....	8.1
9.- BIBLIOGRAFÍA .....	9.1
10.- DOSIER FOTOGRÁFICO.	
11.- ANEXOS	
1.- Fichas de inventario.	
2.- Análisis granulométrico y de rayos X de suelos.	
3.- Análisis granulométrico del sondeo nº 4.	
4.- Columnas litológicas de los sondeos de control.	
5.- Calendario de muestreo y descarga de ARU.	
6.- Curvas de infiltrometría.	
7.- Catas descriptivas.	
8.- Listado de análisis de aguas y cálculos.	

### Abreviaturas empleadas en la presente memoria:

ARU	Aguas Residuales Urbanas.
AT	Aerobios totales.
BA	Balsa almacén.
BD	Balsa de decantación.
CF	Coliformes totales.
COT	Carbono Orgánico Total.
CS	Clostridios sulfito reductores.
CSR	Carbonato sódico residual.
CT	Coliformes totales.
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno.
DQO	Demanda Química de Oxígeno.
EF	Estreptococos fecales.
icb	Índice de Cambio de Bases.
IPA	Inventario de puntos de agua.
ITGE	Instituto Tecnológico Geominero de España.
PDDAR	Plan Director de Depuración de Aguas Residuales de la Diputación de Granada.
RTS	Reglamentación Técnico Sanitaria.
RU	Residuos Líquidos Urbanos.
SS	Sólidos en suspensión.
TSD	Total de Sólidos Disueltos.
UNF	Unidades nefelométricas de formacina.

**CAPÍTULO 1**

**INTRODUCCIÓN Y MARCO LEGAL.**

## 1.- INTRODUCCIÓN Y MARCO LEGAL.

El agua de calidad es un recurso estratégico, escaso y desigualmente repartido y como señala Gómez Orea (Gómez Orea, 1998), *“el agua, además de recurso, es receptor de efluentes líquidos, -vertidos-, es un medio particular en el que se desarrollan ecosistemas específicos y es uno de los elementos más importantes en la configuración del paisaje”*, por ello su conservación y protección frente agresiones externas (contaminación, sobreexplotación) es un objetivo prioritario de las administraciones de cualquier nivel.

La concentración de la población en núcleos urbanos más o menos densamente poblados, tiene entre otros inconvenientes, la dificultad de gestionar los residuos producidos, que en otras circunstancias podrían ser eliminados mediante procesos naturales, pero que en las condiciones impuestas por la actividad antrópica, elevada concentración de contaminantes y naturaleza agresiva de estos, sobrepasan ampliamente la capacidad de depuración de suelos y aguas. La consecuencia inmediata de esta situación es la alteración del medio ambiente y los ecosistemas, introduciendo en ellos, de forma puntual, grandes cantidades de nutrientes y en ocasiones de productos contaminantes que pueden alterar la composición y calidad de las aguas superficiales y subterráneas comprometiendo seriamente su uso.

El tratamiento sistemático de las aguas residuales tiene su primer precedente en épocas muy recientes, entre finales del siglo pasado y principios del presente (Metcalf-Eddy, 1994), momento en el que el desarrollo de la microbiología era aún incipiente y la relación entre aguas residuales y enfermedad aún no estaba claramente establecida, los avances conseguidos en el último siglo han sido espectaculares, y en la actualidad, en el ámbito europeo, el porcentaje de población abastecida cuyas aguas residuales sufren algún tipo de tratamiento de depuración varía desde un máximo del 98 % en Dinamarca, hasta el 11,4 % en Grecia, España se encuentra en el 59,1 % (MMA, 1998).

No obstante los avances conseguidos, la gestión y tratamiento de las ARU constituyen aun un problema sanitario y medioambiental importante, pues aunque existen técnicas avanzadas de tratamiento de aguas y lodos, capaces de producir un efluente de calidad muy elevada, la

inversión económica y de recursos humanos necesaria para su puesta en práctica, puede llegar a ser prohibitiva, especialmente en el caso de pequeñas poblaciones aisladas. No obstante, el desarrollo a nivel mundial, en las últimas décadas, de técnicas "blandas" de tratamiento de ARU, compatibles con el medio ambiente y con reducidos requerimientos de inversión económica y mantenimiento, permite abordar el problema de la eliminación de residuos líquidos urbanos desde una nueva perspectiva. Se trata de técnicas novedosas y eficaces pero que, como se verá más adelante, no hacen sino aprovechar los procesos y sistemas naturales de depuración que durante milenios ha posibilitado la eliminación de la contaminación orgánica de la biosfera.

**A nivel nacional, especialmente en zonas deprimidas y escasamente pobladas, existe un especial interés por la implementación de estas técnicas de depuración, siempre que sean, técnica y económicamente, abordables por pequeños municipios, pues proporcionan soluciones al problema de eliminación de las ARU con suficientes garantías y con una inversión y mantenimiento económicamente reducido, además permiten abordar los objetivos de depuración impuestos por la normativa europea (Directiva 91-271-CEE) sin necesidad de hacer modificaciones relevantes en las previsiones presupuestarias de los ayuntamientos.**

El ITGE, como organismo investigador de la dinámica del agua y de los contaminantes en el subsuelo, viene desarrollando desde 1990 una línea de trabajo, encaminada a evaluar las posibilidades de aplicar la tecnología de tratamiento suelo-acuífero como elemento depurador de las aguas residuales, así como de almacenamiento del efluente tratado. Por ello se pensó en la necesidad de diseñar una planta piloto, plenamente operativa, de infiltración directa sobre el terreno de aguas residuales urbanas, de forma controlada, **para estudiar su impacto real sobre el sistema agua/suelo y su viabilidad a largo plazo.**

Entre las posibles ubicaciones para el desarrollo de esta experiencia piloto, dejando aparte los condicionantes técnicos que se discutirán más adelante, la población de Dehesas de Guadix parecía a priori un candidato idóneo, dada la disponibilidad de terreno, las características de las aguas residuales sin componente industrial, la naturaleza de los materiales que forman el

suelo y el acuífero, así como el interés y cooperación que mostraban tanto las autoridades locales como las provinciales. Además, en esta población existe un filtro verde en funcionamiento, con lo que se podrá comparar los resultados de este y de la infiltración rápida.

En la presente memoria se exponen los trabajos previos y resultados finales de la **planta experimental de tratamiento de ARU mediante infiltración directa sobre el terreno**, instalada en la población de Dehesas de Guadix, **el objetivo final es la eliminación segura del efluente contaminado, la recarga del acuífero es considerada como un efecto secundario beneficioso que podría llegar a ser significativo en sistemas de mayor entidad.**

### **1.1.- CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE DEPURACIÓN.**

#### **1.1.1.- Descripción de las principales tecnologías blandas para el tratamiento de ARU.**

##### **a) Filtro verde.**

Generalmente se aplica a poblaciones menores de 25.000 habitantes. Consiste en el vertido del agua residual al terreno, donde previamente se ha instalado una masa forestal. Con ello se consigue, además la depuración del efluente, el crecimiento de especies vegetales, generalmente arbóreas maderables, y la recarga artificial del acuífero. La depuración se realiza mediante la acción conjunta del suelo, los microorganismos y las plantas por medio de una triple acción: física (filtración), química (intercambio iónico) y biológica (degradación de la materia orgánica); y tiene lugar en los horizontes superiores del terreno, en donde se encuentra una capa biológicamente activa.

Para la instalación de un filtro verde se requieren una serie de condiciones relacionadas con el terreno y el agua residual:

- Terrenos con características de permeabilidad y granulometría determinadas. Los más idóneos son los terrenos franco-arcillosos y franco-arenosos.
- Nivel piezométrico a más de 1,5 m de la superficie.

- Superficies de terrenos del orden de 1 Ha por cada 250 habitantes, lo que es igual a 40 m<sup>2</sup>/hab., que variará de 10-90 m<sup>2</sup>/hab. dependiendo de la climatología de la zona, y de las características hidrogeológicas de la zona.
- El efluente no debe contener sustancias nocivas para los cultivos.

Con este sistema se consiguen reducciones de DBO<sub>5</sub> del orden del 90 % y de sólidos en suspensión del 95 %, destacando, además, el alto rendimiento en eliminación de microorganismos patógenos, fósforo y compuestos nitrogenados (más del 80 %). Presenta, además, la ventaja de no producir fangos. El principal inconveniente que presenta este sistema de depuración, es la gran extensión de superficie que requiere para su instalación.

#### **b) Infiltración rápida.**

Este sistema de depuración se aplica a poblaciones menores de 5000 habitantes. El agua residual se aplica al terreno a tasas elevadas, bien por extensión en lagunas o por aspersión, alternando periodos de inundación con periodos de secado. Los terrenos utilizados son permeables, con una capacidad de infiltración que oscila entre los 10-60 cm/día y, generalmente, no se utiliza vegetación. Acerca de la profundidad recomendable a la que debe situarse el nivel piezométrico, existen opiniones muy variadas, aunque entre 18 y 20 metros desde la base de la balsa de infiltración es una cifra frecuente. Las superficies necesarias oscilan entre 1 y 22 m<sup>2</sup>/hab.

La depuración se produce mediante los procesos físicos, químicos y biológicos que se producen al atravesar el agua residual urbana la matriz del suelo. Por medio de este sistema se consigue la recarga artificial de acuíferos, y la posibilidad de reutilizar agua tratada, recuperandola a través de zanjas o pozos. Se alcanzan reducciones de DBO<sub>5</sub> y de sólidos en suspensión alrededor del 90% y una elevada eliminación de patógenos, entre el 70-95 %.

### **c) Escorrentía superficial.**

La escorrentía superficial es un sistema de depuración relativamente nuevo, que se encuentra en fase de experimentación en Europa, siendo en estados Unidos donde existen instalaciones de este tipo funcionando. El ámbito óptimo de aplicación se encuentra en poblaciones menores de 2.000 habitantes, y consiste en la aplicación al terreno del agua residual, mediante riego por circulación superficial en láminas, alternando períodos de riego, con períodos de secado.

El agua se depura por medio de procesos físicos, químicos y biológicos, al transcurrir por bancales con una pendiente relativamente impermeable, recubierta de vegetación no arbórea. El agua tratada se recoge al final de cada bancal por medio de zanjas, alcanzándose en la depuración rendimientos en torno al 90 % de DBO<sub>5</sub> y al 70 % de sólidos en suspensión. Para la instalación de este sistema es necesario:

- Suelos con drenabilidad limitada tales como arcillas y limos arcillosos.
- Pendientes del orden del 2-8 %.
- Superficies muy lisas, para que el agua forme una lámina sobre la superficie del suelo, y de 10-44 m<sup>2</sup>/hab.

### **d) Lechos de turba.**

El ámbito óptimo de aplicación se encuentra en poblaciones entre 200 y 10.000 habitantes, requiere superficies entre 0,6 y 1 m<sup>2</sup>/hab., no superando la superficie total de cada lecho los 200 m<sup>2</sup>. El sistema está formado, como su propio nombre indica, por lechos de turba, a través de los cuales circula el agua residual. Cada lecho descansa sobre una delgada capa de arena, soportada, a su vez, por una capa de grava. El efluente se recoge a través de un dispositivo de drenaje situado en la base del sistema. El terreno donde se asienta cada lecho debe ser impermeable para garantizar la no contaminación de aguas subterráneas, en caso contrario, hay que recurrir a la impermeabilización.

Para la depuración de las aguas residuales se aprovechan las propiedades de absorción y

adsorción de la turba, así como la actividad bacteriana que se desarrolla en su superficie. Se producen, por tanto, procesos físicos, químicos y biológicos en los que se elimina alrededor del 80 % de DBO<sub>5</sub> y el 90 % de sólidos en suspensión.

El proceso completo de los lechos de turba está formado por un pretratamiento, tratamiento primario compuesto de una serie de filtros autolimpiables; tratamiento secundario, formado por los propios lechos de turba, y tratamiento terciario, opcional, cuyo objetivo es la eliminación de patógenos, sometiendo el efluente de los lechos de turba a un lagunaje aerobio, o bien a una cloración.

Los lechos se disponen en varias unidades, estando unas en funcionamiento y otras en conservación, para su mantenimiento y aireación. La turba necesita ser retirada y reemplazada por otra cada 5-7 años, pudiendo ser aprovechada para fines agrícolas.

El tratamiento de aguas residuales mediante este proceso presenta las siguientes ventajas:

- No produce olores.
- Se puede utilizar en climas muy fríos.
- Admite sensibles variaciones de caudal sin afectar, prácticamente, al rendimiento.
- Puede soportar puntos de caudal de 1,5 veces el caudal normal.
- Fácil adaptación estética al paisaje.
- Alta descontaminación bacteriana.

#### **e) Lagunajes.**

El lagunaje se puede aplicar a núcleos de población superior a los 200 habitantes y siempre que la superficie de terreno disponible esté en torno a los 6,5 m<sup>2</sup>/hab.

La depuración por lagunaje de aguas residuales consiste en el almacenamiento de éstas durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de los microorganismos presentes

en el medio. En función de los tipos de microorganismos que dependen, a su vez, de la presencia de oxígeno disuelto, las lagunas, también conocidas como estanques de estabilización, se clasifican en anaeróbicas, facultativas y aeróbicas o de maduración.

**Lagunas anaeróbicas.** Debido a la elevada carga orgánica, la profundidad de las lagunas (superior a 2 m.) y el corto período de retención del agua residual (entre 2-5 días), el contenido en oxígeno disuelto se mantiene bajo o nulo en toda la laguna. La misión principal de las lagunas de estabilización anaerobias es la sedimentación de la mayor parte de los sólidos en suspensión y la eliminación de parte de la materia orgánica por medio de las bacterias presentes en la laguna, pudiendo alcanzar reducciones en torno al 70 % de DBO<sub>5</sub> y sólidos en suspensión. En el peor de los casos, las lagunas anaerobias funcionan como un decantador.

Normalmente estas lagunas son las primeras de una serie, correspondiendo al tratamiento primario en el proceso de depuración. Por otra parte, pueden constituir, por sí solas, un sistema de depuración para poblaciones menores a los 2.000 habitantes que requieran, exclusivamente, de un tratamiento primario.

**Lagunas facultativas.** En estas lagunas se distingue una zona aerobia próxima a la superficie, una zona anaerobia en el fondo, donde se dan procesos de fermentación y una zona intermedia que contiene bacterias facultativas y es la que da el nombre a estas lagunas. El oxígeno necesario para la estabilización de la materia orgánica proviene de la reaireación que se produce en la superficie y de la fotosíntesis llevada a cabo por medio de las algas presentes en la zona aerobia. En esta zona, las bacterias presentes utilizan el oxígeno producido por las algas y desprenden CO<sub>2</sub> que, a su vez, es utilizado por estas, cerrando así el ciclo simbiótico.

La finalidad última de estas lagunas es la degradación de la materia orgánica. Las lagunas facultativas pueden ser las primeras de una serie o seguir a las lagunas anaerobias, correspondiendo así a un tratamiento secundario. Su profundidad varía de 1 a 2 metros.

**Lagunas de maduración.** También se llaman lagunas de oxidación o aerobias. Son lagunas de poca profundidad, entre 0,2 - 1 metro, en la que toda la columna de agua se mantiene en

condiciones aerobias. Su objetivo primordial es la eliminación de patógenos gracias a la radiación ultravioleta solar. Además del efecto desinfectante, estas lagunas cumplen otros objetivos como son la nitrificación, cierta eliminación de nutrientes, y la clarificación y oxigenación del efluente. El inconveniente es la presencia en el efluente de sólidos en suspensión en forma de algas, que en ciertos casos, como son los vertidos a ríos y lagos, puede limitar su uso.

Las lagunas de maduración constituyen un tratamiento terciario en el proceso de depuración, tanto si se combinan con otras lagunas, como si lo hacen con otros sistemas de tratamientos. Por tanto, sólo es necesario instalarlas en los casos en que se requiera un alto grado de depuración, bien sea para los objetivo de calidad del medio receptor o bine para la reutilización para regadío.

Algunas de las ventajas de los sistemas de lagunaje son:

- Altos rendimientos en DBO<sub>5</sub>, sólidos en suspensión, nutrientes y patógenos.
- Permiten regular y almacenar agua, que por sus características son sanitaria y agrícolamente actas para el riego.
- La retirada de fangos se realiza cada 5 - 10 años, dependiendo del agua residual.

Entre los inconvenientes cabe destacar:

- Disponibilidad de terreno.
- Pérdida de agua por evaporación.
- Aguas depuradas con elevada concentración de materias en suspensión (algas).
- Dificultad de adaptación a cambios climáticos.

#### 1.1.2.- Selección del método.

Para la selección del método a ensayar de entre las técnicas descritas, se han impuesto una serie de criterios, cuyo cumplimiento permiten valorar si una técnica determinada es mas o menos

adecuada al fin propuesto, de forma que se puede seleccionar objetivamente la que mejor se adapte al fin propuesto. En la tabla 1.1 se muestran los criterios impuestos y la puntuación objetiva que se le ha asignado a cada uno de ellos.

Un primer aspecto, de especial relevancia, es el que se refiere a la superficie requerida para cada sistema. En relación con ésta, los tratamientos blandos precisan en general de grandes superficies para su instalación, pues en sistemas no forzados los procesos de depuración son más lentos y la tasa de descomposición bacteriana es menor por unidad de superficie de instalación depuradora, este hecho se muestra en la tabla 1.2. Una excepción son los lechos de turba que necesitan superficies más reducidas, del orden de 1 m<sup>2</sup>/hab.

Tabla 1.1.- Adecuación de las tecnologías blandas de tratamiento de ARU al proyecto<sup>(\*)</sup>.

	Filtro verde	Infiltración rápida	Escorrentía superficial	Lagunaje	Lecho de turba
Gastos de Inversión	3	1	3	3	4
Gastos de mantenimiento	3	1	2	3	4
Necesidad de personal	3	1	2	2	3
Necesidad de terreno	4	5	5	3	1
Limitaciones de equipo	1	1	1	2	2
Nivel de depuración obtenido	4	4	3	4	4
<b>Total:</b>	18	13	19	17	18
Se trata de una estimación semicuantitativa valorandose de 1 a 5, obteniendo mayor puntuación el caso más desfavorable.					
(*) Modificado de PDDAR de la provincia de Granada.					

Otro aspecto a considerar en estos sistemas de tratamiento es el de su mayor o menor simplicidad de construcción. Para valorar éste factor se tienen en cuenta: el movimiento de tierra, la obra civil y los equipos mecánicos y electromecánicos. La instalación resulta en la mayoría de los casos sencilla, dependiendo de las características topográficas, la naturaleza del terreno y la superficie que se necesita acondicionar.

Los sistemas que requieren más movimiento de tierra son los lagunajes por la extensión que ocupan. En cuanto a la obra civil y equipos mecánicos y electromecánicos, destacar que estos sistemas pueden instrumentarse con equipamiento que pueden ir, de muy sencillo o altamente sofisticado, siendo los de infiltración directa sobre el terreno los que se pueden instalar con menor infraestructura, siempre que el agua pueda llegar al lugar de infiltración por gravedad y la topografía del lugar donde se van a construir las balsas sea suficientemente llana.

En lo que se refiere a mantenimiento y explotación, los más favorables son los sistemas de infiltración directa sobre el terreno y los de lecho de turba, siendo los lagunajes los que necesitan de un mayor seguimiento y control.

Para analizar los rendimientos que se consiguen en los distintos sistemas, en la tabla 1.2 se recogen los porcentajes de reducción en los parámetros más característicos de las aguas residuales.

Tabla 1.2.- Características de las tecnologías blandas para el tratamiento de ARU.

	SUPERFICIE REQUERIDA (m <sup>2</sup> /hab)	RENDIMIENTOS (%)					PRODUCCIÓN FANGOS (l/m <sup>3</sup> )	RECOGIDA DE FANGOS
		DBO <sub>5</sub>	DQO	SS	P	N		
Filtro Verde	10 - 90	90-95	90-95	95-99	85-90	90-95	No	No
Infiltración Rápida	1 - 22	90-95	70-80	90-95	25-40	90-95	-	< 6 meses
Escorrentía Superficial	10 - 44	90-95	60-70	70-80	20-30	45-50	No	No
Lecho de Turba	0,6 - 1	80-85	80-85	90-95	30-40	50-60	0,5-1	> 1 año
Laguna Facultativa	2,5	70-85	60-80	60-80	15-40	55-80	1,2-1,6	5-10 años
Lagunaje Completo	6,5	80-95	60-80	70-90	40-60	55-85	-	5-10 años

El filtro verde seguido de la infiltración rápida son los sistemas que alcanzan los rendimientos más altos en depuración. A estos les sigue el lagunaje y los lechos de turba. Por lo contrario, el sistema de escorrentía superficial, no llega a eliminar más del 30 % de fósforo, ni más del 50 % de nitrógeno total.

En rendimiento de eliminación de nutrientes (fósforo y nitrógeno) destacan el filtro verde y los lagunajes sin necesidad de recurrir a modificaciones en el sistema de depuración o a la implementación de procesos adicionales. Frente a variaciones de temperatura, los sistemas que presentan una mayor estabilidad son los de infiltración directa sobre el terreno, seguidos del lecho de turba, mientras que los que se adaptan peor son los lagunajes.

En cuanto a las variaciones de carga y caudal, los sistemas de aplicación al terreno son los que peor las absorben, mientras que son los lechos de turba los que pueden asimilar mejor dichas variaciones de carga, aunque siempre es posible dimensionar los sistemas de infiltración directa teniendo en consideración las puntas estacionales de producción de agua residual. El mayor problema puede darse en algunas poblaciones turísticas de la costa en las que las variaciones de población son extraordinariamente grandes.

La construcción de cualquier sistema de depuración de aguas residuales puede ocasionar pequeños problemas a la población cercana, si las instalaciones no están suficientemente alejadas del núcleo urbano, debido a la producción de ruidos, olores, presencia de insectos y a la posibilidad de riesgos sanitarios. Los sistemas que, en general, menos impacto de este tipo ocasionan, son los de lecho de turba. Por otra parte, los que causan más problemas a la población son los lagunajes, debido, sobre todo a los olores que producen, y a la posible proliferación de insectos.

En cuanto a la producción de fangos, los sistemas de infiltración directa sobre el terreno son los que menos fangos producen, a excepción de la infiltración rápida, que requieren una decantación previa y retirar los fangos frecuentemente, mientras que en el caso contrario se encuentran los lagunajes en los que se retiran cada 5 o 10 años.

En función de los rendimientos que proporcionan los diferentes sistemas de tratamiento, y considerando las exigencias establecidas para los diferentes niveles de depuración, objetivos que vienen establecidos basándose en la población equivalente asentada en el núcleo de población, los sistemas se pueden agrupar de la siguiente forma (PDDAR, 1993):

**Nivel 0:** Para los requerimientos de este nivel basta con un pretratamiento que, en todos los casos, estará compuesto de los siguientes elementos estáticos o dinámicos:

- Aliviadero
- Rejas y tamices
- Desarenador
- Medidor de caudal

**Nivel 1:** Los sistemas que permiten alcanzar los rendimientos de este nivel son.

- Fosa séptica
- Tanque Imhoff
- Laguna anaerobia
- Decantador-digestor
- Decantador primario

**Niveles 2 Y 2A:** Los sistemas que cumplen los objetivos del nivel 2 son los siguientes.

Tecnologías blandas:

a) Sistemas de tratamiento por aplicación al terreno:

- Filtro verde
- Infiltración rápida
- Escorrentía superficial

b) Otras tecnologías blandas

- Lecho de turba
- Lagunaje

**Nivel 3:** Son los sistemas de depuración que permiten obtener efluentes de mejor calidad.

Los sistemas que cumplen los objetivos del nivel 3 son los siguientes:

- Fangos activos.
- Lechos biológicos.
- Contactores biológicos rotativos.

## 1.2.- ASPECTOS LEGALES.

En el trabajo de Rico (Rico Amorós & col., 1998), se describen claramente las competencias en materia de depuración de aguas residuales urbanas y los objetivos a futuro: *“La labor de policía o vigilancia de la calidad de los recursos de agua ha sido encomendada por la Ley/29 de 2 de agosto de 1985, de aguas, a los Organismos de Cuenca, la depuración es un proceso técnico, administrativo y económico que asumen como competencia los ayuntamientos, según lo establecido en la Ley 7/ 1985, de 2 de abril de Bases de Régimen Local. No obstante, las Comunidades Autónomas y la Administración Central han sido las encargadas de redactar los planes regionales y nacional de saneamiento y depuración respectivamente, asumiendo la responsabilidad técnica y financiera necesaria para garantizar el cumplimiento de la Directiva Comunitaria 91/271. Esta norma europea está reglamentada por Real Decreto Ley 11/1995 y sobre ella se sustenta el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración vigente en España desde 1995”*.

Así pues, desde el punto de vista legal, es necesario que el sistema de depuración de las ARU cumpla con los requerimientos mínimos establecidos en la legislación en materia de vertido de aguas residuales urbanas. Puesto que la instalación de depuración se localiza en la provincia de Granada y se dispone del Plan Director de Depuración de Aguas Residuales<sup>1</sup>, plenamente adaptado a la directiva comunitaria 91/271, la instalación de tratamiento suelo-acuífero debe someterse a todos los requerimientos impuestos por dicho plan.

Se presenta<sup>2</sup> en la tabla 1.3 los valores de depuración que deben alcanzarse obligatoriamente en cuanto a los parámetros básicos de control. Por otra parte, como se ha explicado en un apartado anterior, los sistemas de infiltración rápida permiten alcanzar un nivel de depuración

---

<sup>1</sup> Los principales antecedentes en materia de planificación del saneamiento que afectan a la provincia de Granada, han quedado en mayor o menor medida desfasados ante los nuevos conceptos o exigencias que establecen la Ley de Aguas, la Ley de Costas y, especialmente la Directiva 9/271/CEE, traspuesta a la legislación española por los Reales Decretos 11/1995 y 509/1996, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.

<sup>2</sup> “Plan director de depuración de aguas residuales urbanas de la provincia de Granada. Documento de Síntesis Noviembre 1993”

2 o 2A.

Para la protección de los recursos hídricos superficiales el PDDAR ha establecido una zonificación de la provincia en base a las indicaciones de la Directiva 91/271-CEE encontrándose la población de Dehesas de Guadix dentro de la zona “De protección normal o no específica” para el cual se exige un nivel de depuración de 1 a 0. Desde el punto de vista de protección de los recursos subterráneos la población se incluye en la “Zona de protección media” para la cual se exige un nivel de depuración 1.

Tabla 1.3.- Niveles de depuración del plan de depuración de aguas residuales <sup>1</sup> (parámetros básicos)

Reducción mín. respecto al efluente bruto (%) o concentración máx. en el vertido.

PARÁMETROS	NIVEL 0		NIVEL 1		NIVEL 2 y 2A		NIVEL 3	
	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l
DBO <sub>5</sub>		300	20	250	70-90	25	>90	20
DQO		500	20	400	75	125	>75	80
Sól. susp.	10-20	300	50	150	90	35	>90	20
P. Total		20		20	25-35	15	80	2
N. Total		85		70	30-40	50	70-80	15
Sól. Gruesos (diám. > 12 mm)	Ausencia		Ausencia		Ausencia		Ausencia	
Desinfección (colif./100 ml)	No		En casos excepcionales		Uso de agricultura: ≤ 100 Calidad del medio: según usos			

Límites obligatorios establecidos según el REAL DECRETO 11/1995 y 509/1996
Límites máximos de vertidos según la Ley de Aguas (obligatorios salvo autorización)
Límites orientativos propuestos o extraídos de otras reglamentaciones

## **CAPÍTULO 2**

### **ANTECEDENTES**

sistema genérico de aplicación sobre el terreno, de forma planificada y regulada<sup>3</sup>, como sistema de reutilización del agua residual, en parte debido a que las aguas urbanas tienen un fuerte componente de origen industrial, pues no se suelen tratar en el lugar de origen, y aun es más rara la existencia de redes de recolección separadas para aguas urbanas e industriales.

La bibliografía es prolija en la descripción de experiencias acerca de la depuración de aguas residuales urbanas mediante infiltración en el terreno en sistemas de filtros verdes<sup>4</sup>, escasa en los sistemas de infiltración directa sobre el terreno de aguas residuales, y **francamente parca cuando se trata de infiltración sobre materiales fuera del rango de idoneidad para la infiltración directa**. Aunque algo antiguo, el trabajo de Sierra Antiñolo y Peñalver Cámara (1989) contiene una buena recopilación de diversas experiencias a escala mundial.

El ITGE desarrolló a lo largo de los años 1992 y 1993 un proyecto de investigación con la colaboración del BRGM y apoyo de la UE sobre Depuración natural de aguas residuales brutas mediante su infiltración controlada, los materiales elegidos para el proceso son arenas de playa consideradas como un material poco favorable para el proceso de infiltración dada su gran permeabilidad.

La experiencia (Nieto y Brissaud, 1994) se llevó a cabo a 4 km de Mazagón (Huelva) recibiendo el efluente de ARU de esta población que tiene menos de 1.000 habitantes de población fija.

Las instalaciones constan básicamente de un decantador (17m x 5m x 2m) con desarenador y rejilla de desbaste, un estanque de almacenamiento de 100 m<sup>3</sup> y dos balsas de infiltración de 2m x 20m x 10m, el proceso se controla mediante un sistema de muestreo del gas intersticial y del

---

<sup>3</sup> Esta puntualización es importante pues el empleo del agua residual como agua de riego es un sistema ampliamente extendido, aunque se hace de forma incontrolada y en ocasiones comprometiendo la salud de los consumidores de verduras y hortalizas.

<sup>4</sup> En nuestro país puede destacarse las experiencias de recarga-depuración por esta técnica en Villarrubia de los Ojos (Ciudad Real), en Daimiel con efluentes de alcoholeras previamente tratados, y en otras poblaciones de la Mancha. En Tarragona, se realiza desde 1982 la depuración de las aguas del pueblo de Rondoyá mediante el riego alternativo de surcos flanqueados por chopos de aguas brutas, la materia orgánica que se acumula en superficie se recoge y apila para formar un compost que se destina al abonado de campos próximos.

## 2.- ANTECEDENTES.

Los sistemas de reutilización del agua residual por aplicación directa sobre el terreno, son tan antiguos como el hombre, pues desde tiempos inmemoriales se empleaban los residuos domésticos, tanto sólidos como líquidos, como abono de los cultivos. Existen referencias del empleo de aguas urbanas desde la antigua Atenas y se conoce un sistema que estuvo en funcionamiento durante unos 300 años, desde 1.559 en la ciudad de Bunzlau, Alemania.

Sin embargo su generalización se produjo como resultado de la revolución industrial, en la segunda mitad del siglo XIX, la utilización de un mayor volumen de agua con tratamiento nulo, implicó un nivel inaceptable de contaminación de los ríos, puesto que en Europa Central, estos eran el principal suministro de agua potable a las poblaciones. La evacuación del agua residual cruda sobre el terreno era el único medio factible de tratamiento que se disponía en aquel momento.

El terreno tiene un límite en su capacidad de depuración, además no todos los terrenos son adecuados para el vertido, esto unido al crecimiento de las ciudades como consecuencia de la concentración de mano de obra en las mismas, necesaria para el trabajo industrial, hizo necesaria la implantación de tratamientos físico-químicos que garantizaran una calidad mínima del agua antes de su vertido a los cauces superficiales. A pesar de ello algunas ciudades importantes continuaron empleando el agua residual como sistema de riego, tanto en Europa como en EE.UU.

En la segunda década del siglo pasado y principios del actual se comienza a implantar de forma intensiva la aplicación al terreno de RLU, participando países como Estados Unidos, Inglaterra, Australia, Francia, Polonia, etc. (Metcalf-Eddy, 1994).

En España no se tienen muchos datos sobre poblaciones importantes que hayan utilizado el

agua.

Los resultados obtenidos muestran como conclusiones mas relevantes: una colmatación muy lenta del sistema de recarga, fácilmente solventable mediante rastrillado del fondo de las balsas, impacto nulo debido al desarrollo de olores o insectos, reducción de la DQO mayor del 90% en el último drenaje de control situado a una profundidad de 2 m, oxidación completa del amonio, aumento del contenido en nitratos de las aguas subterráneas, depuración insuficiente de la carga bacteriológica.

## **CAPÍTULO 3**

### **OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO.**

### 3.- OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO.

**Los sistemas clásicos de depuración de ARU no son, en la mayoría de las ocasiones, la mejor opción para poblaciones pequeñas dados sus elevados costos de instalación y mantenimiento.** En este sentido, se hace necesaria, en ocasiones con carácter urgente, la investigación y desarrollo de métodos de depuración compatibles con el medio ambiente, de implantación económica y coste de mantenimiento reducido.

Entre los sistemas de depuración que emplean tecnologías blandas para el tratamiento del ARU se encuentran los de infiltración directa sobre el terreno. Este método, exige contar con un material y unas condiciones hidrogeológicas adecuadas que no pueden llegar a constituir un factor limitante que impida, al menos en teoría, la aplicación de la técnica.

Se ha planteado, como objetivo principal de este trabajo: **investigar la viabilidad de la infiltración directa sobre el terreno como sistema de depuración de aguas residuales urbanas en condiciones de permeabilidad reducida**, (puesto que en la experiencia de Mazagón (ITGE, BRGM, 1994) se trabajó el caso de elevada permeabilidad, en esta ocasión se ha ensayado el caso contrario).

Para la realización de la experiencia práctica, se ha diseñado y construido una planta piloto de tratamiento y un sistema de vigilancia y control de las aguas subterráneas y del suelo y de la solución del suelo, que permite determinar la viabilidad práctica del sistema de depuración, la eficacia como método de gestión del agua residual y el costo en condiciones reales de explotación práctica.

Al cumplimiento final de estos objetivos se ha de llegar de forma estructurada, por ello el trabajo se ha dividido en cinco fases, cada una de las cuales está compuesta a su vez por una o varias actuaciones que pretenden, de forma lógica, optimizar el empleo de recursos humanos y económicos. Las citadas fases son:

**a) Definición del proyecto:**

Selección del emplazamiento y estudios previos sobre el terreno.

**b) Diseño:**

Diseño de las balsas de infiltración y sistema de control.

Planificación de las campañas de muestreo y mantenimiento de las instalaciones.

**c) Obra:**

Construcción de las balsas de tratamiento suelo-acuífero.

Construcción del sistema de monitorización.

Construcción de las instalaciones auxiliares.

**d) Explotación:**

Desarrollo del programa de vertido de aguas residuales y toma de datos.

**e) Interpretación de resultados y elaboración del informe final.**

En la redacción del presente documento se ha pretendido, en la medida de lo posible, seguir la estructura definida anteriormente.

Hay que tener presente que aunque la exposición de las fases en que se ha dividido el proyecto tiene una apariencia de desarrollo lineal en el tiempo, con el fin de optimizar los recursos disponibles, se han simultaneado, al menos en parte, alguna de ellas, así la planificación de campañas de muestreo y mantenimiento de instalaciones se realizó prácticamente durante la definición del proyecto, o la interpretación de datos se comenzó ya desde la primera toma de muestras.

2 o 2A.

Para la protección de los recursos hídricos superficiales el PDDAR ha establecido una zonificación de la provincia en base a las indicaciones de la Directiva 91/271-CEE encontrándose la población de Dehesas de Guadix dentro de la zona “De protección normal o no específica” para el cual se exige un nivel de depuración de 1 a 0. Desde el punto de vista de protección de los recursos subterráneos la población se incluye en la “Zona de protección media” para la cual se exige un nivel de depuración 1.

Tabla 1.3.- Niveles de depuración del plan de depuración de aguas residuales <sup>1</sup> (parámetros básicos)

Reducción mín. respecto al efluente bruto (%) o concentración máx. en el vertido.

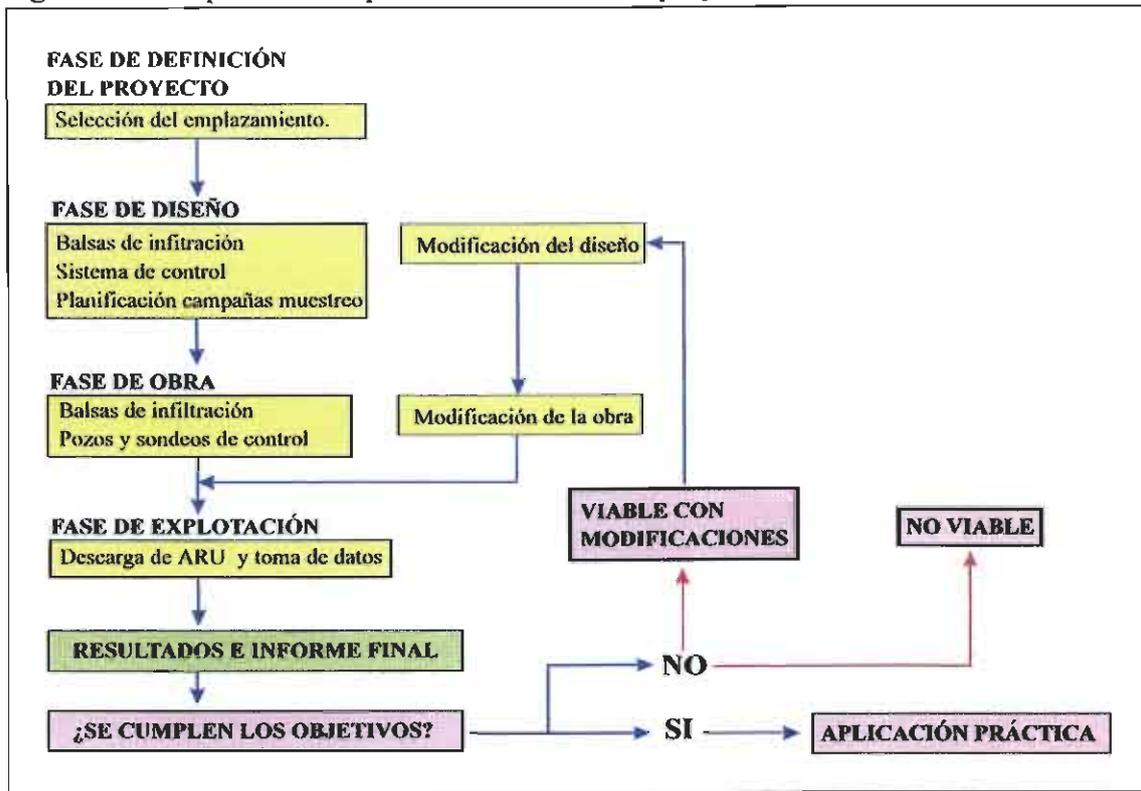
PARÁMETROS	NIVEL 0		NIVEL 1		NIVEL 2 y 2A		NIVEL 3	
	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l
DBO <sub>5</sub>		300	20	250	70-90	25	>90	20
DQO		500	20	400	75	125	>75	80
Sól. susp.	10-20	300	50	150	90	35	>90	20
P. Total		20		20	25-35	15	80	2
N. Total		85		70	30-40	50	70-80	15
Sól. Gruesos (diám. > 12 mm)	Ausencia		Ausencia		Ausencia		Ausencia	
Desinfección (colif./100 ml)	No		En casos excepcionales		Uso de agricultura: ≤ 100 Calidad del medio: según usos			

Límites obligatorios establecidos según el REAL DECRETO 11/1995 y 509/1996

Límites máximos de vertidos según la Ley de Aguas (obligatorios salvo autorización)

Límites orientativos propuestos o extraídos de otras reglamentaciones

Figura 3.1.- Esquema conceptual de desarrollo del proyecto.



En la figura 3.1 se muestra un esquema conceptual de desarrollo del proyecto en el que se ven claramente reflejadas las fases en que ha sido dividido y las actuaciones que engloba cada una de ellas.

## **CAPÍTULO 4**

# **CRITERIOS DE SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL EMPLAZAMIENTO DE LAS INSTALACIONES.**

#### 4.- CRITERIOS DE SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL EMPLAZAMIENTO DE LAS INSTALACIONES.

La selección del emplazamiento en el que se van a realizar las experiencias es una fase crítica del proyecto, pues los criterios a tener en consideración, de carácter técnico y científico, pero también sociales y económicos<sup>5</sup>, son en ocasiones incompatibles entre sí y es necesario llegar a una solución de compromiso que permita trabajar en condiciones lo más cercanas posible a un nivel óptimo.

En este marco metodológico y conceptual se han establecidos cuatro grandes grupos de criterios:

- a) Referentes a la población que da origen a las aguas residuales a tratar.
- b) Referentes al material sobre el cual se va a infiltrar el agua.
- c) Relativos a la naturaleza de los vertidos y por último.
- d) Relativos a cuestiones sociales y económicas.

En este apartado se exponen estos criterios y se discute el peso que se ha dado a cada uno de ellos y la solución a la que se ha llegado.

##### 4.1.- CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO.

###### a) Referente a la población.

A este respecto se impone como criterio único el que **la población debe contar con un máximo de 2.000 habitantes equivalentes<sup>6</sup>** en época punta, esto permite un diseño del

---

<sup>5</sup> Abundando en el tema, aunque a otra escala es importante recordar lo que apunta Cabrera Marcet: "La administración y gestión del agua es un problema socio-político que debe resolverse mediante criterios técnico-económicos" (Cabrera Marcet, 1997).

<sup>6</sup> La adaptación de la Directiva Comunitaria 91/271/CEE a la legislación española ha obligado a emplear el concepto de "habitante equivalente" para el establecimiento de sistemas de colectores y tratamientos de depuración, lo cual ha hecho necesario modificar el artículo 26 de la Ley de Bases ya que este empleaba el criterio

sistema de infiltración de tamaño fácilmente manejable, un costo de realización razonable y además, los requerimientos mínimos de depuración, nivel 1, exigidos en el PDDAR están, en principio, garantizados.

**b) Referente al material sobre el que se va a infiltrar el agua.**

Como se comenta en otros apartados, en la bibliografía disponible abundan los ejemplos de sistemas de depuración directa sobre el terreno construidos sobre materiales considerados como adecuados según la norma más común<sup>7</sup>, pero frecuentemente el único material disponible no cumple con este requisito. En esta experiencia se trata de demostrar la viabilidad del procedimiento en situaciones de permeabilidad reducida, en el límite inferior de los materiales considerados como aceptables, **por tanto se ha buscado ubicaciones de la planta piloto sobre materiales de media-baja permeabilidad.**

**c) Referente a la naturaleza de los vertidos.**

**Es condición necesaria que los vertidos de la población carezcan de componente industrial, o que si este existe su naturaleza fisico-química sea asimilable a un vertido típico urbano** (ausencia de metales pesados, compuestos orgánicos sintéticos, y en general de cualquier sustancia no biodegradable o que por sus especiales características, a las concentraciones de vertido, sean tóxicas impidiendo el normal desarrollo de la población bacteriana responsable de los procesos de depuración).

**d) Condiciones sociales y económicas.**

Es necesario que **las instalaciones de recarga no afecten al uso tradicional del suelo o del agua ni supongan un impacto visual importante**, además es conveniente concienciar a la

---

de "número de habitantes".

<sup>7</sup> Se considera que para que un sistema de infiltración rápida funcione correctamente es necesario que la permeabilidad del terreno sea superior a 25 mm/h. (Metcalf & Eddy, 1994).

población de su utilidad, importancia económica y medioambiental, y si es posible que las personas encargadas del mantenimiento de las instalaciones pertenezcan a la misma población.

El emplazamiento seleccionado, Dehesas de Guadix, cumple con todos los requisitos impuestos por lo que puede ser considerado como un modelo ideal para el desarrollo de la experiencia.

#### **4.2.- CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO GENERAL Y LOCAL.**

La zona de trabajo está situada en el acuífero aluvial del río Guadahortuna, incluido en el sistema acuífero Nº 32, Unidad Hidrogeológica 13 de la cuenca hidrográfica del Guadalquivir.

##### **4.2.1.- Contexto general.**

La Unidad Hidrogeológica 13 se sitúa totalmente en la provincia de Granada, entre las localidades Pedro Martínez y Alicún de Ortega. Ocupa una superficie de 63,9 km<sup>2</sup>, de los que 42,5 km<sup>2</sup> son permeables. La red hidrográfica viene representada por los ríos Fardes, Gor y Guadahortuna.

Los materiales permeables del Lías (calizas y dolomías) del Subbético Medio, que son los que constituyen los acuíferos de la unidad, dan origen a las elevaciones montañosas de la zona (El Mencal, La Secreta y Sierra de Alicún de Ortega). Los conglomerados y arenas del Mioceno y Plio-Cuaternario conforman una zona de descarga al sur y este, mientras que en el límite septentrional las margocalizas del Paleógeno actúan como barrera impermeable. Constituye un acuífero compuesto por una serie de pequeños afloramientos carbonatados dispersos, a los que hay que sumar por su interés hidrogeológico, los depósitos aluviales ligados a los cauces de los ríos, donde el más importante lo constituye los aluviales ligados al río Alicún. En su conjunto los afloramientos carbonatados totalizan una superficie de 17 km<sup>2</sup> y el aluvial del río Alicún 11 km<sup>2</sup>.

La única recarga de las unidades carbonatadas se produce por infiltración del agua de lluvia,

2,17 hm<sup>3</sup>/año, aunque pueden existir aportaciones subterráneas en el sector de Baños de Alicún. Para el aluvial del río Alicún la alimentación se produce también a partir de infiltración del agua de lluvia, 0,55 hm<sup>3</sup>/año, a través de los aluviales de los ríos tributarios, subterráneos desde el Cerro de Alicún, 0,09 hm<sup>3</sup>/año, por escorrentía superficial en la cuenca vertiente al aluvial, retornos del agua de riegos, e infiltración de aguas residuales procedentes de los núcleos de Alicún de Ortega y Dehesas de Guadix (0,76 hm<sup>3</sup>/año).

No existen surgencias naturales en los bordes de los afloramientos carbonatados, produciéndose las descargas a través de los conglomerados, hasta surgir en manantiales con carácter termal en el sector oriental, junto al cauce del río Fardes en Alicún de las Torres (2,67 hm<sup>3</sup>/año). También se producen algunas salidas de poca entidad (0,1 hm<sup>3</sup>/año), por extracción en sondeos.

Esta unidad compuesta por varios afloramientos carbonatados pequeños aislados y los aluviales de los ríos que la atraviesan, presentan facies hidroquímica variable en sus diferentes puntos. Así en el aluvial del río Alicún la facies es sulfatada-bicarbonatada magnésico-sódica, en el Cerro de Alicún es sulfatada cálcico-sódica, en los Baños de Alicún, de carácter termal (34°C), sulfatada cálcico-magnésica y por último en el Mencal bicarbonatada magnésica con alto contenido en sulfatos. En general las aguas presentan una mineralización y dureza fuerte y muy dura respectivamente, atribuible a la influencia de los materiales evaporíticos del substrato.

Excepto en los casos de salinidad elevada, son aptas para uso urbano y para riego, de tipo C<sub>3</sub>S<sub>1</sub>, sólo apta para regadíos resistentes a las sales, aunque en el Mencal se presentan como C<sub>2</sub>/S<sub>1</sub> aptas para riego.

Dentro de su poligonal se asientan dos núcleos urbanos, Dehesas de Guadix y Villanueva de las Torres, que suman 2.130 habitantes, dando una densidad de población a la unidad de 33 hab/km<sup>2</sup>. Las aguas residuales generadas en ambas localidades alcanzan los 0,22 hm<sup>3</sup>/año que sin tratamiento previo en su mayoría, vierten a ríos y ramblas, aunque en Dehesas de Guadix intermitentemente riegan una alameda (filtro verde). A estas aguas residuales hay que agregar

las correspondientes a Alicún de Ortega que suman 0,1 hm<sup>3</sup>/año, que vierten directamente al aluvial del río Alicún, dando origen a contaminación puntual.

Los residuos sólidos, calculados en 570 T/año, se depositan en vertederos incontrolados.

La superficie cultivada alcanza las 1.470 ha entre la que destaca la dedicada a cultivos herbáceos de secano (890 ha). El nitrógeno aportado por la aplicación de fertilizantes es de 250 T/año. En cuanto a la ganadería, sus residuos suponen una carga de 10 T/año de nitrógeno y 30 T/año de DBO<sub>5</sub>, lo que equivale a una población de 1.140 personas. En los municipios incluidos existen 10 industrias, prácticamente todas alimentarias (pan y derivados de molinería), de bajo poder contaminante. La potencia eléctrica total asciende a 70 kw.

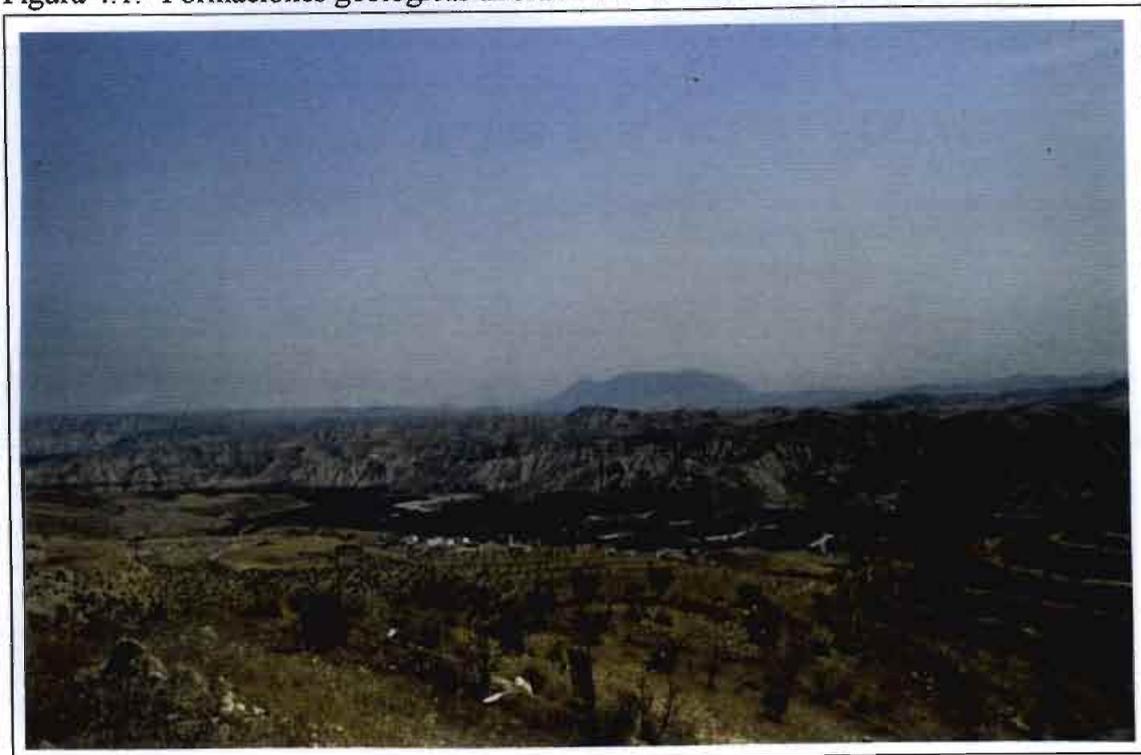
#### 4.2.2.- Contexto local.

El acuífero aluvial del río Guadahortuna está constituido fundamentalmente por formaciones detríticas del Holoceno, teniendo como impermeable de base las margas del Tortoniense (Mioceno Superior). En su conjunto se puede considerar como un acuífero libre, si bien aparecen excepcionalmente sectores donde la zona saturada está levemente confinada por algunos niveles de materiales arcillo-limosos.

En la figura 4.1 se puede apreciar el aspecto de los materiales aflorantes en el entorno de la población de Dehesas.

En la Figura 4.2 se representa la piezometría del acuífero en Julio de 1991, observándose los diferentes tramos en los que el cauce del río Guadahortuna presenta relación de influencia o de efluencia, respecto al acuífero aluvial asociado. Por otra parte, dependiendo de los tramos, la superficie piezométrica sufre apreciables fluctuaciones en función de los recursos, que varían notablemente según del período estacional.

Figura 4.1.- Formaciones geológicas aflorantes en el entorno de Dehesas de Guadix.



El sistema se puede considerar dividido en dos sectores, separados por el punto de confluencia de la Rambla de los Ciruelos. El sector más alto con un gradiente hidráulico de 0,013 y el más bajo con un gradiente hidráulico de 0,011, de acuerdo con una mayor anchura del afloramiento aluvial y de la sección de flujo.

A partir de ensayos de bombeo realizados en años anteriores sobre dos sondeos de la zona (puntos 2139-1-0007 y 2139-2-0011), el primero situado en las proximidades del núcleo de Alicún de Ortega, y el segundo entre Dehesas de Guadix y El Tarahal, se obtuvo una aproximación válida de los parámetros hidráulicos que definen el acuífero. **Los valores de transmisividad (T) son del orden de 700 m<sup>2</sup>/día, y la permeabilidad (K) promediada se sitúa entorno a los 65 m/día, considerada como alta.**

En la tabla 4.1, se sintetiza la información y evolución piezométrica extraída de los cinco sondeos de control, y de dos pozos, situados, uno aguas abajo y otro aguas arriba de la población de Dehesas de Guadix.

Figura 4.2.- Mapa piezométrico. Julio 1991.

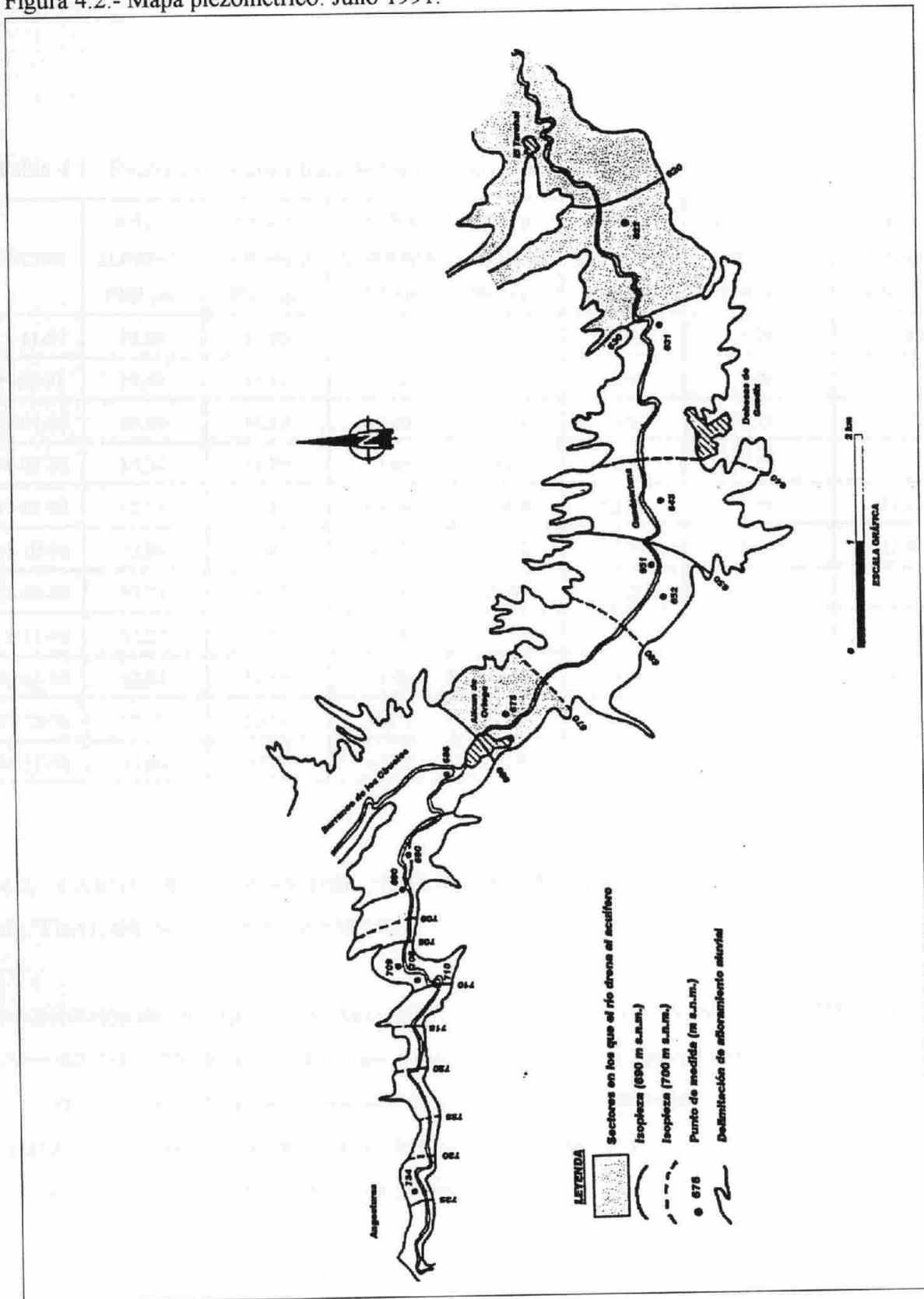


Tabla 4.1. Evolución piezométrica de los sondeos y pozos de control

FECHA	NºIPA 213920022 PNP (m)	Nº IPA 213920023 PNP (m)	Nº IPA 213920024 PNP (m)	Nº IPA 21392025 PNP (m)	Nº IPA 213920026 PNP (m)	Aguas Arriba 213920002 PNP (m)	Aguas Abajo 213920013 PNP (m)
11-11-97	14,50	15,40	15,12	14,52	14,64	8,28	12,40
9-12-97	14,40	15,12	14,90	14,52	14,64	7,02	-
19-01-98	13,60	14,30	14,20	13,64	13,82	3,12	11,71
04-02-98	13,32	14,00	13,80	13,45	13,55	3,39	-
09-03-98	12,78	13,43	13,24	12,099	12,90	3,40	11,21
14-10-98	12,00	13,45	15,50	17,60	13,10	4,55	11,46
28-10-98	12,78	13,45	15,50	17,60	13,10	4,30	-
12-11-98	11,52	13,50	13,00	12,70	12,65	4,10	11,10
26-11-98	12,32	12,90	12,80	11,54	11,58	3,70	10,35
10-12-98	12,28	12,90	12,75	12,49	12,52	3,65	10,72
20-12-98	12,08	12,71	12,51	12,48	12,28	3,48	10,50

#### 4.3.- CARACTERÍSTICAS DEL NÚCLEO DE POBLACIÓN Y TRATAMIENTO ACTUAL DE SUS AGUAS RESIDUALES.

La población del municipio de Dehesas de Guadix es inferior a 2.000 habitantes (699 según datos del INE 1995) durante todo el año. Dispone de una red de saneamiento unitario (Figura 4.5), en la que se consideran prácticamente despreciables las pérdidas, ya que esta es bastante reciente y está construida en su totalidad de PVC y no existen vertidos industriales. En la figura 4.3 se presenta una visión general de la población.

El agua residual generada se conduce mediante un colector a una planta de tratamiento, situada a unos 2 km del casco urbano. La planta de tratamiento consta básicamente de un clasificador de gruesos, un desarenador y un desengrasador, así pues, el agua residual que se destine a la infiltración habrá tenido antes un tratamiento primario.

Figura 4.3.- Vista general de la población de Dehesas de Guadix.

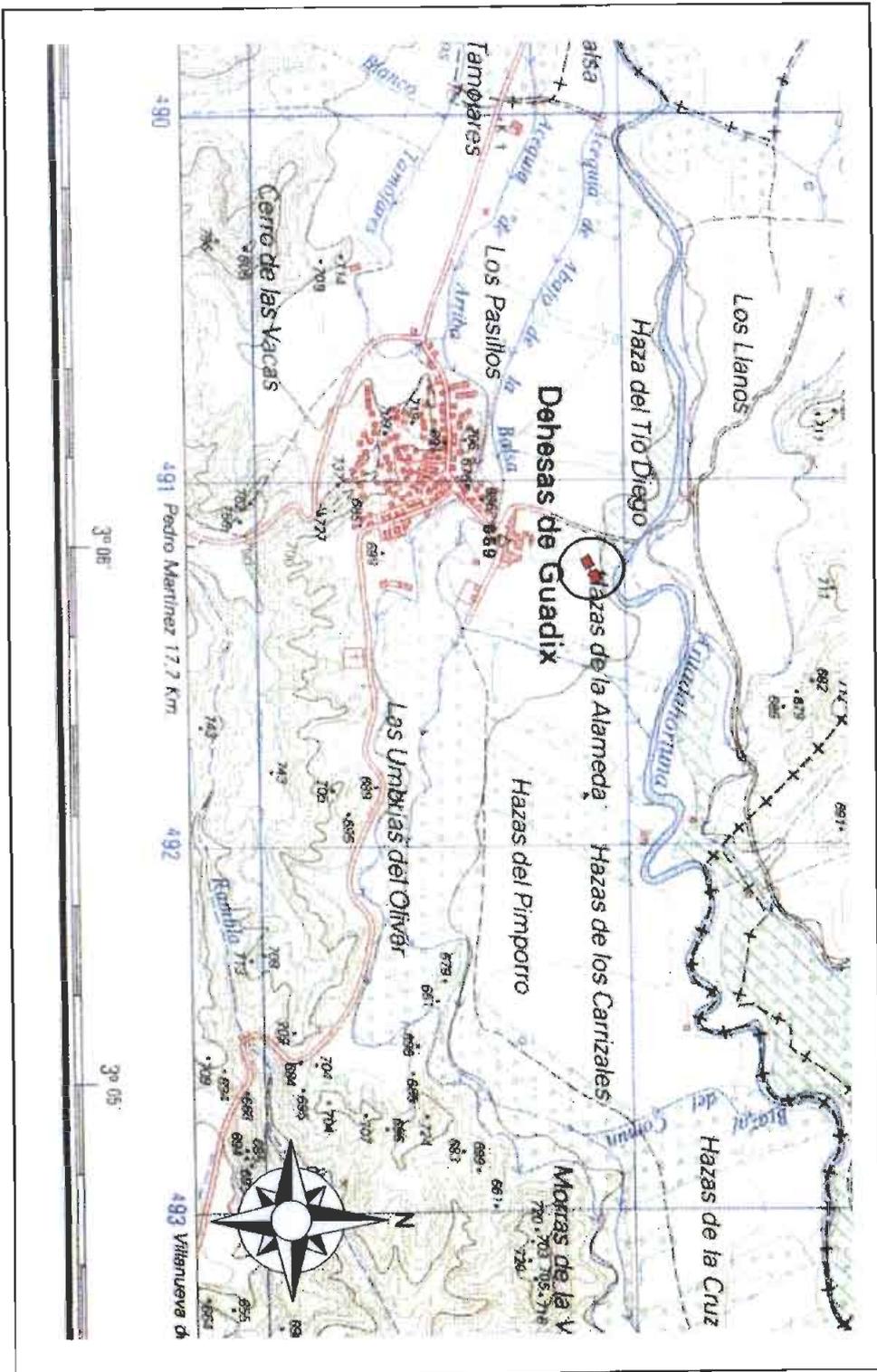


**Lugar previsto para las instalaciones de infiltración:**

El IARA, para la realización del proyecto, ha cedido al ITGE temporalmente 2.500 m<sup>2</sup> de terreno, situados en la finca contigua a las instalaciones de depuración. El ayuntamiento también ha cedido el terreno necesario para la construcción de las balsas de decantación y almacén. Como el terreno está situado en el límite de la planta de tratamiento de agua residual, se facilita la construcción de las instalaciones y el transporte del agua. Además, en los alrededores el uso agrícola es poco intenso, y no existen abastecimientos humanos en las proximidades.

Las instalaciones están situadas en una parcela que forma parte de la finca conocida como "Chozones", a unos 500 m, al nordeste, del casco urbano de Dehesas de Guadix (Granada), lindando al norte con el río Guadahortuna. En la figura 4.4 se muestra un plano de situación de la población de Dehesas de Guadix y de las instalaciones de recarga.

Figura 4.4.- Plano de situación de la población de Dehesas de Guadix y de las instalaciones de recarga.  
Mapa Topográfico Nacional Escala 1:25.000. 971-I. Alicún de Ortega.



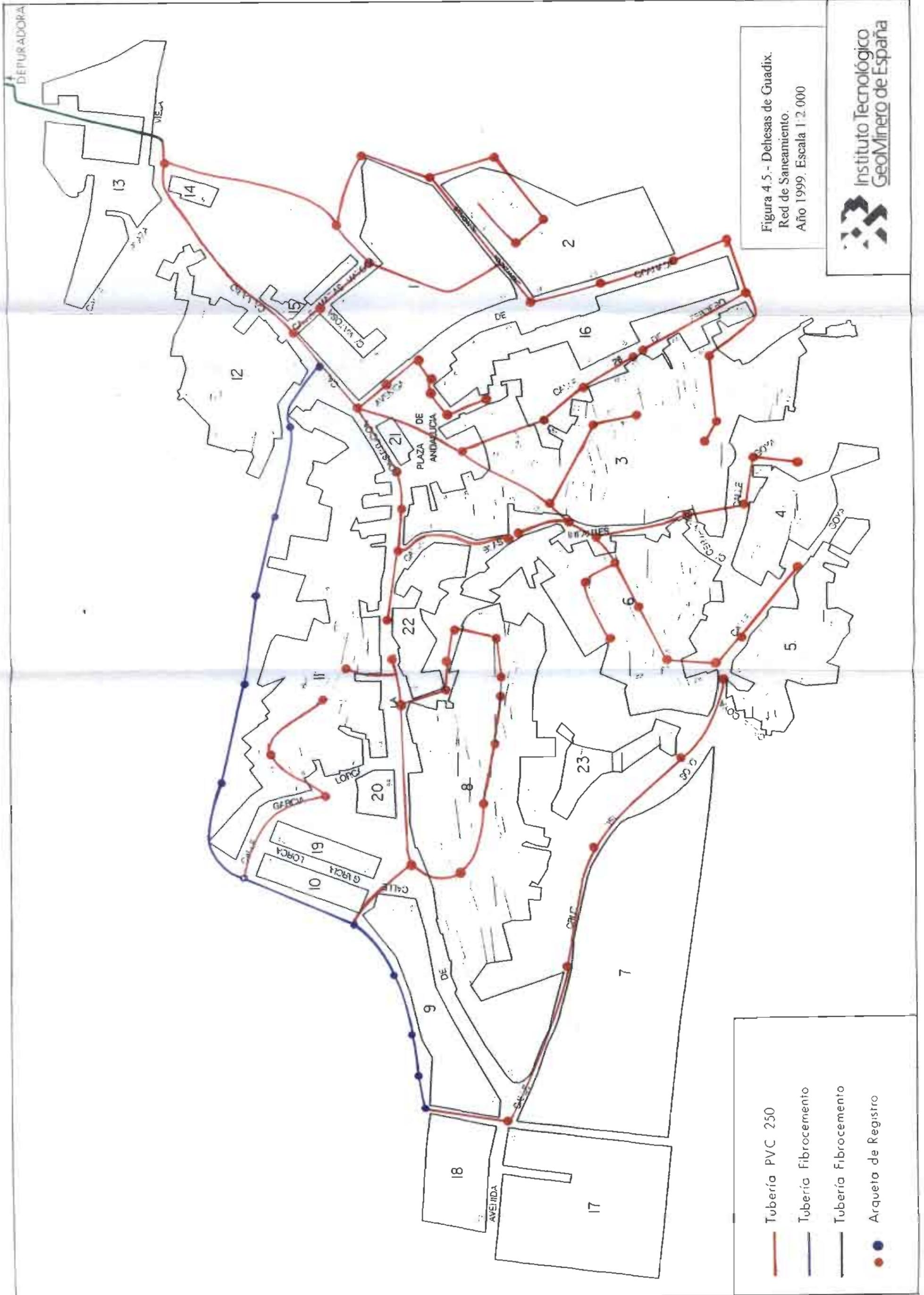


Figura 4.5.- Dehesas de Guadix.  
 Red de Saneamiento.  
 Año 1999. Escala 1:2.000



Instituto Tecnológico  
 GeoMinero de España

**CAPÍTULO 5**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE  
INFILTRACIÓN.**

## 5.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INFILTRACIÓN.

El sistema de infiltración de las aguas residuales, balsas de sedimentación y almacén, sistema de tuberías de distribución, sistemas de llaves de paso y las balsas propiamente dichas se han de diseñar teniendo como siempre presente la necesidad de cumplir al menos con seis condicionantes básicos:

- a) Han de ser capaces de aceptar todo el agua generada en la población, teniendo en consideración la posible existencia de puntas estacionales y diarias.
- b) El transporte de agua desde el sistema colector a las balsas debe tener un costo mínimo, en la medida de lo posible será por gravedad.
- c) El diseño no debe impedir o dificultar el acceso del personal de mantenimiento.
- d) El impacto visual será el menor posible.
- e) Debe contar con las medidas necesarias de vallado y señalización que impidan cualquier accidente de personas o animales.
- f) Se debe prever la acción de vándalos y desaprensivos por lo que conviene proteger suficientemente las instalaciones (vallado, candados de acceso, etc.).

La forma de abordar el cumplimiento de estos condicionantes dependerá de múltiples factores, principalmente de tipo físico (materiales sobre los cuales se va a construir el sistema de depuración), fisiográfico (topografía y paisaje), económico (es necesario adaptarse al presupuesto disponible) y medioambiental (el impacto ambiental ha de ser nulo).

En este capítulo se parte de la descripción de los estudios previos necesarios para el estudio de viabilidad, se diseña el sistema de infiltración y control de suelos y aguas, para concluir con su construcción.

## **5.1.- ESTUDIOS PREVIOS.**

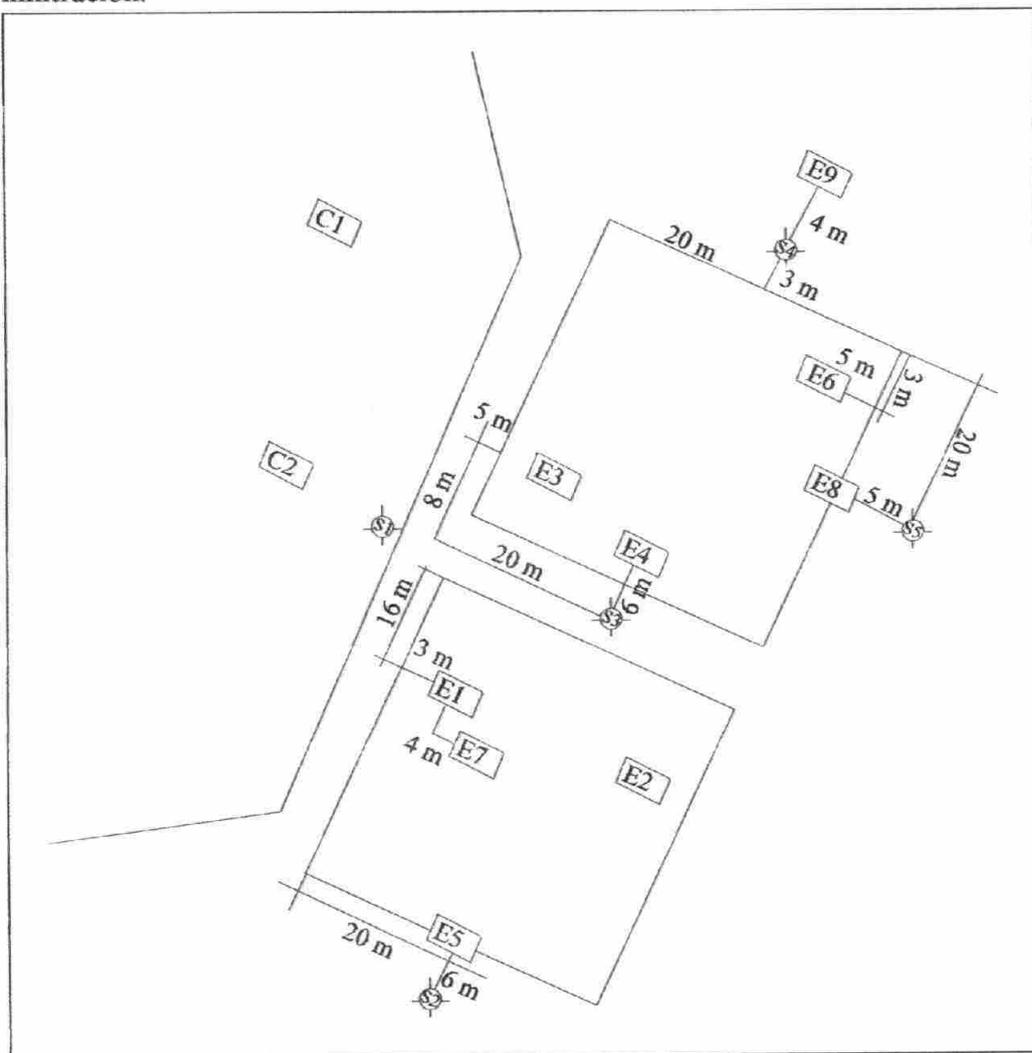
En este apartado se presentan los resultados de caracterización de los materiales sobre los cuales se va a desarrollar el proceso de infiltración de agua residual. En primer lugar se ha realizado una campaña de infiltrometría, pues la capacidad de infiltración, es el principal factor físico limitante del proceso de recarga, posteriormente se ha caracterizado la distribución granulométrica del material y se ha realizado un análisis de la fracción arcilla mediante difracción de rayos X, ya que la presencia de cantidades importantes de arcillas expansibles pueden impedir la infiltración del agua.

### **5.1.1.- Situación de los puntos de muestreo y ensayos.**

En la figura 5.1 se muestra un esquema acotado de situación con el emplazamiento de los puntos de muestreo y ensayo. Dada la uniformidad del terreno y la inexistencia de signos exteriores que hagan sospechar la situación de discontinuidades o variaciones laterales de las facies texturales, la localización de los puntos se ha hecho siguiendo un criterio de distribución mas o menos uniforme de forma que en la medida de lo posible se optimice el esfuerzo de abrir las catas. En otro apartado se encuentra su descripción litológica.

Las medidas y toma de muestras se han realizado en tres campañas, la primera del 7-5-97 al 9-5-97 en la finca EDAR por encontrarse aún cultivada la finca IARA. La segunda se llevó a cabo en la semana del 21-7-97 al 23-7-97 pudiendose realizar los ensayos en la finca IARA. Por último, aprovechando un periodo de lluvias excepcional a lo largo de la última semana del mes de septiembre se procedió a realizar una tercera campaña del 6 al 10 de octubre, al considerarse que el estado del suelo (con un grado de humedad cercano a la saturación) permitiría obtener resultados mas adecuados para la medida de la permeabilidad saturada de los perfiles.

Figura 5.1.- Esquema de situación de los puntos de muestreo y ensayos de infiltración.



### 5.1.2.- Ensayos de infiltrometría.

#### a) Selección del método.

La técnica seleccionada ha sido el infiltrómetro de doble anillo, pues el principal inconveniente que normalmente se achaca a estos dispositivos, el proporcionar medidas puntuales representativas únicamente de un área muy restringida, es en este caso, una ventaja.

Desde un principio se ha descartado el empleo de simuladores de lluvia, pues se pretende

conocer el comportamiento de las balsas en régimen de inundación. Entre los sistemas de tipo inundador no son adecuados, ni el método de Porchet (Porchet y Laferre, 1935), pues la absorción de agua por las paredes del hoyo excavado falsearían las medidas<sup>1</sup> (hay que tener en consideración que las balsas de infiltración presentan una relación superficie inferior / superficie lateral muy grande y en el hoyo excavado esta relación es, por el contrario, pequeña), ni los infiltrómetros de anillo simple debido a que la expansión lateral del bulbo de humectación, que es muy intensa en materiales finos como los estudiados, trae consigo un tiempo de estabilización del flujo excesivamente prolongado.

Por tanto el método seleccionado ha sido el de cilindros concéntricos o método de Müntz, desarrollado por Slater (Slater, 1957), para la optimización de sistemas de riego. Consiste básicamente en dos anillos concéntricos abiertos por ambos lados (la misión del cilindro exterior es únicamente impedir la expansión lateral del agua infiltrada en el anillo en el que se hace la medida), que se introducen en el terreno lo suficiente para evitar que el fluido circule a través de su contacto con el suelo (aproximadamente unos 10 cm).

Ambos anillos se llenan de agua y se mide en el central la velocidad de descenso del líquido, dando por concluida la experiencia cuando la velocidad de descenso del agua se estabiliza. La toma de datos de descensos ha de realizarse a intervalos regulares (que varíaran dependiendo de la velocidad de infiltración de cada terreno), rellenándose de agua el sistema cada vez que se mide con el fin de mantener el espesor de la lamina de agua constante, dicho espesor se seleccionará basándose en el fin que se vaya a dar a los datos, en este caso se ha seleccionado un espesor de lamina de 20 centímetros pues en este rango de valores se moverá la lámina de agua de las balsas de infiltración.

Para la experiencia se ha empleado el equipo de la casa Eijkelkamp modelo 09.04. En las figuras 5.2 y 5.3 se presentan dos fotografías del sistema en pleno funcionamiento.

---

<sup>1</sup> No obstante, se ha aprovechado la tercera campaña para realizar ensayos en zanjas, con los resultados que se comentan más adelante.

Figura 5.2.- Medida de la capacidad de infiltración del lecho filtrante mediante infiltrómetro de doble anillo.



Los datos que se obtienen se disponen en forma de tabla en la que se representan la velocidad de infiltración frente al tiempo. La capacidad de infiltración de los terrenos es fácil de determinar si se considera que la tasa de infiltración del agua en un suelo no saturado en un infiltrómetro de anillo puede expresarse según la ley de Darcy, como:  $V=K_1(O+z+h/z)$ , donde:

$V$  = velocidad de infiltración ( $LT^{-1}$ ).

$K_1$  = permeabilidad no saturada o conductividad capilar ( $LT^{-1}$ ).

$O$  = fuerza de succión en el frente de la zona de transmisión (L).

$z$  = distancia hasta el frente de transmisión (L).

$h$  = altura del agua en el infiltrómetro.

La influencia de  $O$  y de  $h$  con relación a  $z$  decrece cuando  $z$  y el porcentaje de humedad del suelo aumentan, consecuentemente  $(O+z+h/z)$  se aproxima a 1 en un perfil de suelo homogéneo y saturado, de forma que la tasa de infiltración adquiere un valor constante ("tasa

básica de infiltración" o TBI). Por tanto para un perfil saturado, V, K1 y K2 son constantes, siendo K2 la permeabilidad saturada. En la tabla 5.1 se muestra, a título orientativo, la clasificación de los suelos basándose en los valores de TBI elaborada por Landon (Landon, 1984).

Tabla 5.1.- Clases de suelo según su TBI.

Clase	Velocidad de infiltración mm/hora	Evaluación
1	<1	Muy lenta
2	1 a 5	Lenta
3	5 a 20	Moderadamente lenta
4	20 a 60	Moderada
5	60 a 125	Moderadamente rápida
6	125 a 250	Rápida.
7	> 250	Muy rápida

Figura 5.3.- Detalle del sistema de medición de la capacidad de infiltración mediante infiltrometría de doble anillo.



#### b) Resultados y discusión.

En la primera campaña se realizaron dos medidas de infiltración (C1/1 y C1/2) aprovechando la presencia de la maquina excavadora que se desplazó para abrir catas para la descripción de los materiales de la zona no saturada, dichos ensayos se realizaron a 90 centímetros de profundidad una vez retirado

el recubrimiento superficial (que parece provenir del movimiento de tierras que se hizo al construir las balsas de cocción de esparto próximas a la zona ensayada) sobre un material descrito "de visu" como arcilla limosa y posteriormente confirmada su granulometría como franco-limosa.

Las segundas medidas (C2/1, C2/2 y C2/3) se realizaron ya en la parcela IARA, la primera y tercera a un metro de profundidad y la segunda a algo más de dos metros. Todos los ensayos se han realizado sobre materiales limosos, algo más arcillosos en la segunda. Por último, en la tercera campaña se hicieron nueve parejas de medidas, la primera determinación de cada una de ellas sobre una pequeña zanja excavada en el terreno y rellena directamente de agua, la segunda en su proximidad pero mediante el método de doble anillo.

En la tabla 5.2 se muestra de forma resumida los datos identificativos de cada punto y los valores de permeabilidad final de todos los ensayos realizados, expresados en las unidades de uso más común, también se ha calculado la permeabilidad corregida suponiendo una tasa final de infiltración del 2%<sup>2</sup> de la medida.

Las medidas realizadas en las catas presentan una permeabilidad mucho mayor que la realizada en los correspondientes infiltrómetros, ello es debido, como se comentó anteriormente, a la conjunción de dos circunstancias, de un lado la elevada superficie lateral respecto al fondo, y de otro la abundancia de materiales finos que imponen un elevado potencial mátrico<sup>3</sup> con lo que la absorción de agua es muy intensa, esto trae consigo además de valores anormalmente altos medidas irregulares de difícil interpretación.

---

<sup>2</sup> U.S. Environmental protection agency. Center for Environmental Research Information. (1984). Process design Manual for land treatment of wastewater. Supplement on rapid infiltration and overland flow.

<sup>3</sup> También llamado potencial capilar, es la diferencia entre la presión del aire y del agua en los conductos capilares, se trata de un potencial de succión.

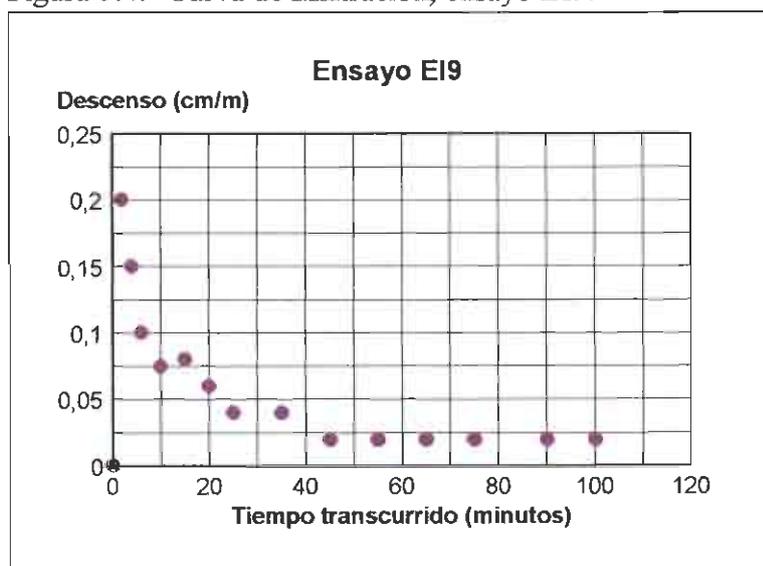
Tabla 5.2.- Resultados de los ensayos de Infiltrometría.

Ref.	Prof.	Permeabilidad			Permeabilidad corregida (2%)		
		cm/min	m/día	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> año	cm/min	m/día	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> año
C1/1	90	0,17	2,45	881,3	0,003	0,049	17,626
C1/2	90	0,12	1,73	622,1	0,002	0,035	12,442
C2/1	100	0,09	1,30	466,6	0,002	0,026	9,331
C2/2	200	0,07	1,01	362,9	0,001	0,020	7,258
C2/3	100	0,07	1,01	362,9	0,001	0,020	7,258
EC1	100	0,023	0,33	119,2	0,000	0,007	2,385
EI1	0	0,043	0,62	222,9	0,001	0,012	4,458
EC2	280	0,2	2,88	1036,8	0,004	0,058	20,736
EI2	200	0,033	0,48	171,1	0,001	0,010	3,421
EC3	360	0,333	4,80	1726,3	0,007	0,096	34,525
EI3	300	0,067	0,96	347,3	0,001	0,019	6,947
EC4	170	0,18	2,59	933,1	0,004	0,052	18,662
EI4	100	0,02	0,29	103,7	0,000	0,006	2,074
EC5	170	0,267	3,84	1384,1	0,005	0,077	27,683
EI5	100	0,02	0,29	103,7	0,000	0,006	2,074
EC6	200	0,3	4,32	1555,2	0,006	0,086	31,104
EI6	200	0,125	1,80	648,0	0,003	0,036	12,960
EC7	260	0,4	5,76	2073,6	0,008	0,115	41,472
EI7	200	0,3	4,32	1555,2	0,006	0,086	31,104
EC8	180	0,22	3,17	1140,5	0,004	0,063	22,810
EI8	100	0,033	0,48	171,1	0,001	0,010	3,421
EC9	165	0,4	5,76	2073,6	0,008	0,115	41,472
EI9	90	0,02	0,29	103,7	0,000	0,006	2,074

Muestras C1/1, C1/2, campaña de mayor del 97, muestras C2/1, C2/2 y C2/3, campaña de julio del 97, todas realizadas mediante infiltrómetro de doble anillo. Muestras EI1 a EI9 campaña de octubre del 97 mediante infiltrómetro de doble anillo, muestras EC1 a EC9 misma campaña medidas en zanja.

Las medidas realizadas en los infiltrómetros muestran un comportamiento que se ajusta al esperado, con un periodo de infiltración rápida al principio, coincidente con el establecimiento del flujo saturado seguido de una estabilización mas o menos rápida. En las medidas realizadas en la tercera campaña el periodo de humectación es prácticamente inexistente debido al periodo prolongado de lluvias que precedió a la visita al campo.

Figura 5.4.- Curva de infiltración, ensayo EI9.



balsas de cocción de esparto, que presentan una mejor estructuración que el resto y por ello una permeabilidad superior, no representativa de los materiales de la zona.

La permeabilidad de los ensayos EI6 y EI7 es algo superior al resto, a pesar de que la clase textural es la misma (limosa) que en los

otros puntos controlados, se trata de casos puntuales, por lo que no han sido tenidos en cuenta en los cálculos de la permeabilidad media.

Existe una ligera correlación entre la profundidad de medida y los valores de permeabilidad,  $r$  de Pearson =0,540 (considerandose significativo a partir de 0,5368 para un nivel de

significación de 0,01, (Fisher, 1974)), aunque la dispersión también es muy elevada. En cualquier caso este dato es importante, pues confirma el hecho observado en la descripción de las catas y los sondeos de investigación de que en profundidad, o al menos a partir de los 100-150 cm, la permeabilidad debe ser mayor al existir una ligera disminución de los elementos más finos (antes de llegar a las margas de fondo).

Tabla 5.3.- Descripción estadística de la permeabilidad cm/min

Media	0,0466
Error típico	0,0081
Mediana	0,038
Moda	0,02
Desviación típica	0,0256
Varianza	0,00066
Curtosis	-1,3478
Asimetría	0,44945
Recorrido	0,07
Mínimo	0,02
Máximo	0,09
Suma	0,466
Categoría	10
Nivel de confianza(0,95)	0,01587

En el anexo 6 se presentan las curvas de velocidad de infiltración / tiempo de los ensayos de infiltrometría. En la figura 5.4 se presenta, como ejemplo del comportamiento típico de los ensayos

realizados mediante el infiltrometro de doble anillo, la curva correspondiente al ensayo EI9.

### 5.1.3.- Caracterización textural de la matriz sólida.

El análisis de la textura de los materiales es necesaria, pues aporta información acerca de los dos factores principales que condicionan el comportamiento del suelo y zona no saturada como transmisor del fluido y depurador. Por una parte la distribución granulométrica condiciona la permeabilidad, **interesan permeabilidades suficientemente elevadas como para que pueda infiltrarse toda la carga hidráulica prevista, pero no tanto como para que el agua acceda al acuífero sin una depuración suficiente.** Aunque existen desarrollos analíticos que pretenden relacionar la distribución granulométrica de una muestra con su permeabilidad hidráulica<sup>4</sup> los parámetros necesarios para su calculo son mas complicados de obtener y su determinación ofrece mayor incertidumbre que la medida directa de la permeabilidad<sup>5</sup>.

En sentido contrario, las fracciones granulométricas finas, especialmente dentro del rango de los limos finos y las arcillas, son las responsables de gran parte de los procesos de depuración y de retención de los sedimentos orgánicos que luego serán descompuestos por la actividad microbiológica, por ello, cuando además de la recarga del acuífero se busca una depuración rápida y efectiva del agua, la situación ideal es aquella en la que se consigue el mayor porcentaje posible de arcillas de gran capacidad de cambio catiónico compatible con la permeabilidad necesaria para que infiltre toda la carga hidráulica disponible.

---

<sup>4</sup> Rumer, 1969. Ahoeller 1962, Cedergren 1967.

<sup>5</sup> Generalmente coeficientes experimentales como la  $n$  de Rumer, la  $n$  de Slichter, etc.

### **a) Método de determinación**

El análisis granulométrico se ha realizado según el siguiente procedimiento:

- \* Homogeneización de la muestra y toma de dos partes representativas.
- \* Determinación de la humedad por desecado a 105 °C durante 2 horas.
- \* Inmersión de la muestra en agua durante 24 horas y agitación suave.
- \* Tamizado por vía húmeda en tamices de la serie ASTM hasta tamaño de luz de malla de 63  $\mu\text{m}$
- \* La fracción inferior a 63  $\mu\text{m}$  se analiza mediante sedimentación por Sedigraph (para realizar este análisis es necesario conocer la densidad de la muestra, por lo que se ha determinado previamente)

### **b) Resultados obtenidos.**

En las figuras del anexo 2, se muestran las curvas de porcentaje acumulado de cada una de las fracciones granulométricas determinadas. En la tabla 5.4 los porcentajes de cada una de las fracciones según la norma USDA. En la figura 5.5 se presentan los resultados en un diagrama triangular en el que además se ha incluido una leyenda con las clases texturales y criterios de compatibilidad de la textura del terreno y el proceso de recarga.

Domina la textura franco-limosa, en todas las muestras salvo la número 7 que es muy arenosa y que corresponde a algunas de las pasadas de materiales más gruesos que se pueden observar en el talud del río en la finca del ayuntamiento.

No existe una clara relación entre la profundidad de muestreo y la clase textural o el porcentaje de las diferentes fracciones granulométricas, excepto en el caso de la arcilla para la que se

observa una ligera correlación negativa frente a la profundidad ( $r=-0,363$ )

Tabla 5.4.- Análisis granulométrico (% de cada fracción, norma USDA).

Muestra	Situación (*)	Arena (50-2000 $\mu\text{m}$ )	Limo (2-50 $\mu\text{m}$ )	Arcilla ( $< 2 \mu\text{m}$ )	Clasificación
1	1/1/f	17,5	73,88	8,62	Franco-Limoso
2	1/21	23	69,05	7,95	Franco-Limoso
3	1/3/2	8	73,27	18,73	Franco-Limoso
4	1/2f	18,5	69,63	11,87	Franco-Limoso
5	1/3/2	14,2	78,85	6,95	Franco-Limoso
6	1/3/f	9,1	68,88	22,02	Franco-Limoso
7	1/4/f	86,9	12,80	0,3	Arenoso
8	1/5/2	36,15	54,45	5,40	Franco-Limoso
9	1/6/f	20,1	67,90	12	Franco-Limoso
10	2/1/1	2,5	72	25,5	Franco-Limoso
11	2/1/2	1,9	70,35	27,75	Franco-Limoso
12	2/1/f	1,9	80,32	17,78	Franco-Limoso
13	2/2/1	0,9	74,25	24,85	Franco-Limoso
14	2/2/2	8,8	69,01	22,19	Franco-Limoso
15	2/2/f	0,8	75,26	23,94	Franco-Limoso
16	2/3/1	2,8	70,74	26,46	Franco-Limoso
17	2/3/2	2,95	80,44	16,61	Limoso
18	2/3/f	5,8	73,18	21,02	Franco-Limoso
19	2/4/1	5,4	72,76	21,84	Franco-Limoso
20	2/4/2	8,1	74,32	17,58	Franco-Limoso
21	2/4/f	3	74,54	22,46	Franco-Limoso

(\*) Campaña/cata/muestra.

**Desde el punto de vista de la infiltración rápida se trata en todos los casos de un terreno que se puede clasificar como desfavorable, pues se recomiendan suelos con textura franco arenosa, arenoso-franca o arenosa con un porcentaje de arcilla inferior al 10% (lo cual solo se produce en cinco de las 21 muestras).**

#### **5.1.4.- Caracterización de la fracción arcilla.**

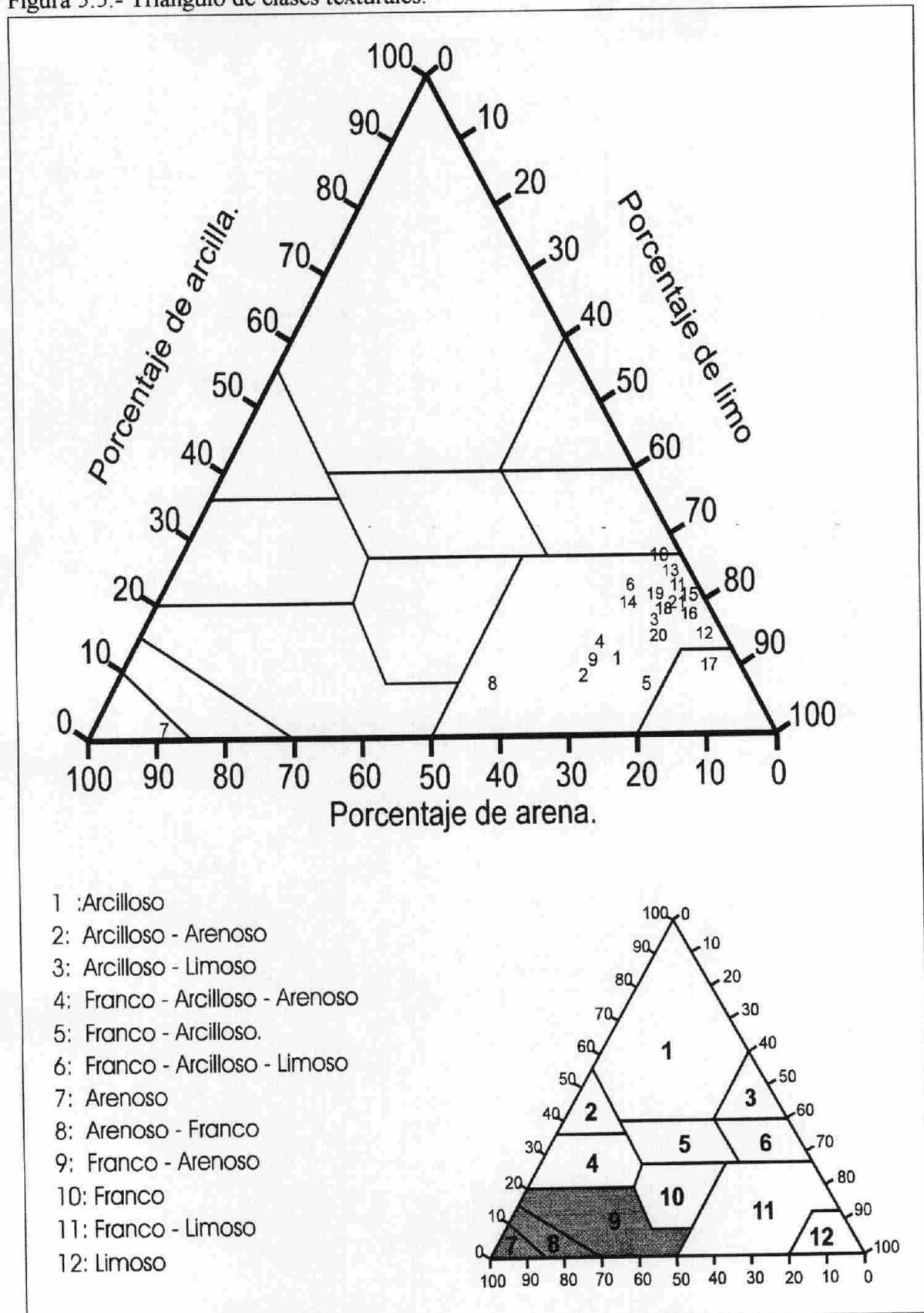
##### **a) Introducción y método de determinación.**

Aunque en campo el material sobre el que se prevé la construcción de las balsas de infiltración es muy homogéneo se han enviado al laboratorio cuatro muestras (9, 12, 20 y 21), seleccionadas entre las que parecían presentar alguna diferencia de color o textura aparente, para realizar su caracterización desde el punto de vista del contenido y naturaleza de sus arcillas. En el apartado anterior se estudiaba la importancia de las arcillas desde un punto de vista cuantitativo, en este apartado se trata de establecer la influencia que la presencia de un tipo u otro de arcilla puede tener sobre la evolución del lecho filtrante y su capacidad para infiltrar agua y depurarla.

Hay que tener en cuenta que la valoración del contenido en arcillas en las balsas de infiltración está sometida a una contradicción, ya expuesta en el apartado precedente, que requiere una solución de compromiso. Por un lado, elevados contenidos en arcilla, hacen prever la rápida colmatación del sistema y su inutilización como medio de filtrado, por otro lado, el efecto de filtro mecánico, es mayor al aumentar la proporción de finos, y si las arcillas poseen una CIC elevada su capacidad de depuración también es mayor.

Las determinaciones analíticas se han realizado mediante difracción de rayos X. Método del polvo cristalino y medida en equipo Phillips PW-1700. Tubo de cobre, monocromador de grafito y rendija automática. Se ha trabajado a 40 kV y 40 mA, efectuándose agregado orientado de cada una de las muestras, sometiendo a pruebas de hinchamiento con etilenglicol y de colapsamiento a 550°C. En el anexo 2 se adjuntan diagramas de polvo y de agregado orientado (A) conjuntamente con Etilenglicol (E) y térmico a 550°C (T).

Figura 5.5.- Triangulo de clases texturales.



Se ha efectuado además análisis semicuantitativo por la técnica de los poderes reflectantes de Schultz, con correcciones para la rendija de divergencia automática que se ha empleado. El contenido total en filosilicatos se ha obtenido aplicando un poder reflectante de 0,125

**b) Resultados analíticos y discusión de los resultados.**

En la tabla 5.5 se recogen los resultados obtenidos, como puede observarse casi la mitad de la fracción fina está compuesta por carbonato cálcico, alrededor del 5% es dolomita, sobre el 13% cuarzo y el resto filosilicatos. Entre los filosilicatos dominan las micas que se presentan en proporciones cercanas al 25% del total de fracción fina, las esmectitas suponen alrededor del 14% y las caolinitas el 5%.

Tabla 5.5.- Análisis semicuantitativo por difracción de rayos X.

Muestra	Mineral principal	Minerales secundarios	Accesorios y trazas
9	Calcita (44%)	Cuarzo (13%) Dolomita (4%)	Esmectitas (12%) Caolinitas (5%) Micas (22%)
12	Calcita (44%)	Cuarzo (13%) Dolomita (3%)	Esmectitas (13%) Caolinitas (4%) Micas (23%)
20	Calcita (42%)	Cuarzo (10%) Dolomita (8%)	Esmectitas (15%) Caolinitas (4%) Micas (21%)
21	Calcita (48%)	Cuarzo (9%) Dolomita (3%)	Esmectitas (14%) Caolinitas (5%) Micas (21%)

Figura 5.6.- Grietas de retracción en el fondo de las balsas de infiltración.



Desde el punto de vista del funcionamiento de las balsas de infiltración, resulta de especial relevancia la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de hinchamiento de las arcillas. Las arcillas micáceas, que son el tipo más abundante en las muestras estudiadas, son además muy frecuentes en suelos del área mediterránea, tienen una CIC menor a la que sería de esperar atendiendo a las sustituciones isomorfas (de 10 a 40 cmol (+) kg<sup>-1</sup>). La presencia de esmectitas es considerable, su propiedad más destacable es la capacidad de expansión-retracción interlaminar por el humedecimiento y secado y la elevada CIC (de 80 a 150 cmol (+) kg<sup>-1</sup>), su superficie específica también es elevada (600-800 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>), además son arcillas con una actividad coloidal, plasticidad y cohesión elevadas, se trata pues de un material no deseable desde el punto de vista de las propiedades físicas, ver la figura 5.6, pero favorable por su elevada actividad ante los agentes potencialmente contaminantes. Las caolinitas por su parte presentan una CIC muy reducida (de 1 a 10 cmol (+) kg<sup>-1</sup>), se trata seguramente de un material heredado.

En resumen se puede decir que la presencia de arcillas hinchables, esmectitas, aunque facilitará con seguridad los procesos de depuración, no es deseable en balsas de infiltración rápida y puede causar problemas de colmatación temprana del lecho de las balsas.

#### **5.1.5.- Catas descriptivas de investigación.**

En el anexo 7 se describe la textura y características morfológicas generales de las catas abiertas. En todas ellas predominan las texturas limo-arcillosas a arcillo-limosas habiéndose descrito en algunos casos pasadas de arenas limosas. Destaca el hecho de que los primeros decímetros, que debieran corresponder al suelo natural, están fuertemente antropizados ya sea por labores agrícolas, en la parcela del IARA, ya por tratarse de materiales de relleno como consecuencia de las obras de nivelación, o para la construcción de las balsas de secado de esparto que hay en la parcela de la depuradora.

## 5.2.- METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE BALSAS.

Según el manual de la Agencia de Protección Medioambiental Americana (EPA 1984), los ciclos de carga de agua residual tabla 5.6, procedente de un tratamiento primario, deben ser diseñados en función de que se quiera obtener:

- a) Rango máximo de infiltración.
- b) Máxima eliminación de nitrógeno.
- c) Máxima nitrificación.

Tabla 5.6.- Ciclos de carga (EPA, 1984)

OBJETIVO	ESTACIÓN	DÍAS DE CARGA	DÍAS DE SECADO
Rango máximo de infiltración	Verano	1 - 2	5 - 7
	Invierno	1- 2	7 - 12
Máxima eliminación de nitrógeno	Verano	1 - 2	10 - 14
	Invierno	1 - 2	12 - 16
Máxima nitrificación	Verano	1 - 2	5 - 7
	Invierno	1 - 2	7 - 12

### 5.2.1.- Estudio comparativo de los diferentes supuestos de recarga.

#### a) Prediseño y dimensionamiento del sistema.

Los parámetros básicos de diseño, carga hidráulica de agua residual ( $CH_{AR}$ ) y superficie necesaria del sistema ( $S_{NECESARIA}$ ), se calculan a partir de los resultados obtenidos en campo en los ensayos de infiltrometría.

## b) Carga hidráulica y superficie necesaria.

A la tasa de infiltración, se le aplica un coeficiente de corrección para el cálculo de la carga hidráulica de agua residual aplicable, entre el 2 - 4 % de la tasa de infiltración.

Los valores obtenidos son:

<u>Tasa de infiltración</u>	$K = 0,152 \text{ cm/min} = 820 \text{ m/año}$
<u>Caudal de agua residual disponible</u>	$Q_{AR} = 30.248,6 \text{ m}^3/\text{año}$
<u>Carga hidráulica de agua residual aplicable</u>	$CH_{AR} = k \times 2\% = 820 \text{ m/año} \times 2\% = 16,4 \text{ m/año}$
<u>Caudal medio diario</u>	$Q_{ARm} = Q_{AR}/365 = 82,87 \text{ m}^3/\text{día}$
<u>Superficie necesaria</u>	$S_{NECESARIA} = Q_{AR} / CH_{AR} = 1.844,43 \text{ m}^2$

## c) Número de ciclos anuales, carga hidráulica por ciclo, superficie a ocupar y número mínimo de balsas

A continuación se procede al ajuste de la superficie necesaria, en función de los ciclos de inundación-secado recomendables según otras experiencias (EPA, 1984).

En la tabla 5.8 aparecen diferentes posibilidades combinando los días de inundación y de secado, de los cuales se han calculado 17. Abarcando el mínimo y máximo de días/ciclo de inundación y secado (tabla 5.8), en función del número total de días disponibles en verano y en invierno (tabla 5.7).

Tabla 5.7.- Días disponibles en los periodos de verano e invierno.

MESES DE VERANO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEP	OCT	TOTAL DÍAS
DÍAS	30	31	30	31	31	30	31	214
MESES DE INVIERNO	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR			151
DÍAS	30	31	31	28	31			

Tabla 5.8.- Ciclos de inundación y secado (EPA, 1984).

SUPUESTOS CICLOS CON RANGO MÁXIMO DE INFILTRACIÓN				SUPUESTOS CICLOS CON MÁXIMA ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO				SUPUESTOS CICLOS CON MÁXIMA NITRIFICACIÓN			
Nº días/ciclo VERANO		Nº días/ciclo INVIERNO		Nº días/ciclo VERANO		Nº días/ciclo INVIERNO		Nº días/ciclo VERANO		Nº días/ciclo INVIERNO	
INUN	SECA	INUN	SECA	INUN	SECA	INUN	SECA	INUN	SECA	INUN	SECA
1	5	1	7	1	10	1	12	1	5	1	7
2	6	2	8	2	11	2	13	2	6	2	8
2	6	2	9	2	12	2	14	2	6	2	9
2	6	2	10	2	13	2	15	2	6	2	10
2	6	2	11	2	14	2	16	2	6	2	11
2	7	2	12	-----	-----	-----	-----	2	7	2	12

Para cada caso, teniendo en cuenta que el sistema funciona a flujo continuo y que el agua residual ha sido sometida a un tratamiento primario y a una decantación de sólidos en suspensión resulta un número diferente de ciclos anuales. La carga hidráulica de agua residual a aplicar en cada ciclo ( $CH_{ciclo}$ ) se obtiene de repartir la carga hidráulica anual entre el número de ciclos anuales. La superficie final necesaria será la mayor de la calculada para ambos periodos, verano e invierno, según la siguiente fórmula  $S = (Q_{ARm} \times N^{\circ} \text{días} / \text{ciclo}) / CH_{ciclo}$ . Esta superficie se distribuye en un número de balsas (recomendable por la EPA, 1984) para cada ciclo de carga considerado. A la superficie del sistema que se ha estimado debe añadirse la necesaria para construir instalación del pretratamiento. Esta estará compuesta de desbaste, desarenado y desengrasado (tratamiento primario) además de una balsa almacén y una balsa de decantación. Esta superficie supone, aproximadamente, 400 m<sup>2</sup> adicionales. A continuación se procede a calcular las 17 posibilidades para obtener la superficie necesaria y el número mínimo de balsas.

## CICLOS CON MÁXIMO RANGO DE INFILTRACIÓN

Tabla 5.9.- Ciclo correspondiente a máximo rango de infiltración, supuesto 1.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	1	5	6	36
INVIERNO	1	7	8	9

$$\text{Nº CICLOS ANUALES} = \text{Nº de ciclos de verano} + \text{Nº de ciclos de invierno} = \mathbf{45 \text{ ciclos}}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{Nº CICLOS ANUALES} = \mathbf{0,37 \text{ m/ciclo}}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{1.344 \text{ m}^2}$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{1.792 \text{ m}^2}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = \mathbf{6 - 8}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = \mathbf{8 - 13}$$

Tabla 5.10.- Ciclo correspondiente a máximo rango de infiltración, supuesto 2.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	6	8	27
INVIERNO	2	8	10	15

$$\text{Nº CICLOS ANUALES} = \text{Nº de ciclos de verano} + \text{Nº de ciclos de invierno} = \mathbf{42 \text{ ciclos}}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{Nº CICLOS ANUALES} = \mathbf{0,39 \text{ m/ciclo}}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{1.700 \text{ m}^2}$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{2.125 \text{ m}^2}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = \mathbf{4 - 5}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = \mathbf{5 - 7}$$

Tabla 5.11.- Ciclo correspondiente a máximo rango de infiltración, supuesto 3.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	6	8	27
INVIERNO	2	9	11	14

$$\text{N}^\circ \text{ CICLOS ANUALES} = \text{N}^\circ \text{ de ciclos de verano} + \text{N}^\circ \text{ de ciclos de invierno} = 41 \text{ ciclos}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{N}^\circ \text{ CICLOS ANUALES} = 0,4 \text{ m/ciclo}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{N}^\circ \text{ días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = 1.658 \text{ m}^2$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{N}^\circ \text{ días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = 2.279 \text{ m}^2$$

$$\text{N}^\circ \text{ MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = 4 - 5$$

$$\text{N}^\circ \text{ MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = 5 - 7$$

Tabla 5.12.- Ciclo correspondiente a máximo rango de infiltración, supuesto 4.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	6	8	27
INVIERNO	2	10	12	13

$$\text{N}^\circ \text{ CICLOS ANUALES} = \text{N}^\circ \text{ de ciclos de verano} + \text{N}^\circ \text{ de ciclos de invierno} = 40 \text{ ciclos}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{N}^\circ \text{ CICLOS ANUALES} = 0,41 \text{ m/ciclo}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{N}^\circ \text{ días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = 1.617 \text{ m}^2$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{N}^\circ \text{ días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = 2.426 \text{ m}^2$$

$$\text{N}^\circ \text{ MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = 4 - 5$$

$$\text{N}^\circ \text{ MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = 5 - 7$$

Tabla 5.13.- Ciclo correspondiente a máximo rango de infiltración, supuesto 5.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	6	8	27
INVIERNO	2	11	13	12

$$\text{Nº CICLOS ANUALES} = \text{Nº de ciclos de verano} + \text{Nº de ciclos de invierno} = \mathbf{39 \text{ ciclos}}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{Nº CICLOS ANUALES} = \mathbf{0,42 \text{ m/ciclo}}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{1.579 \text{ m}^2}$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{2.565 \text{ m}^2}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = \mathbf{4 - 5}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = \mathbf{5 - 7}$$

Tabla 5.14.- Ciclo correspondiente a máximo rango de infiltración, supuesto 6.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	7	9	24
INVIERNO	2	12	14	11

$$\text{Nº CICLOS ANUALES} = \text{Nº de ciclos de verano} + \text{Nº de ciclos de invierno} = \mathbf{35 \text{ ciclos}}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{Nº CICLOS ANUALES} = \mathbf{0,47 \text{ m/ciclo}}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{1.587 \text{ m}^2}$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{2.469 \text{ m}^2}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = \mathbf{4 - 5}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = \mathbf{5 - 7}$$

## CICLOS CON MÁXIMA ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO

Tabla 5.15.- Ciclo correspondiente a máxima eliminación de nitrógeno, supuesto 1.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	1	10	11	20
INVIERNO	1	12	13	12

**Nº CICLOS ANUALES** = Nº de ciclos de verano + Nº de ciclos de invierno = **32 ciclos**

**CH<sub>CICLO</sub>** = CH<sub>AR</sub> / Nº CICLOS ANUALES = **0,51 m/ciclo**

**S<sub>VERANO</sub>** = (Q<sub>ARm</sub> x Nº días / ciclo) / CH<sub>CICLO</sub> = **3.250 m<sup>2</sup>**

**S<sub>INVIERNO</sub>** = (Q<sub>ARm</sub> x Nº días / ciclo) / CH<sub>CICLO</sub> = **1.950 m<sup>2</sup>**

**Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO** = **11 - 15**

**Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO** = **13 - 17**

Tabla 5.16.- Ciclo correspondiente a máxima eliminación de nitrógeno, supuesto 2.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	11	13	17
INVIERNO	2	12	15	10

**Nº CICLOS ANUALES** = Nº de ciclos de verano + Nº de ciclos de invierno = **27 ciclos**

**CH<sub>CICLO</sub>** = CH<sub>AR</sub> / Nº CICLOS ANUALES = **0,61 m/ciclo**

**S<sub>VERANO</sub>** = (Q<sub>ARm</sub> x Nº días / ciclo) / CH<sub>CICLO</sub> = **1.766 m<sup>2</sup>**

**S<sub>INVIERNO</sub>** = (Q<sub>ARm</sub> x Nº días / ciclo) / CH<sub>CICLO</sub> = **2.038 m<sup>2</sup>**

**Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO** = **6 - 8**

**Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO** = **7 - 9**

Tabla 5.17.- Ciclo correspondiente a máxima eliminación de nitrógeno, supuesto 3.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	12	14	16
INVIERNO	2	14	13	10

$$\text{Nº CICLOS ANUALES} = \text{Nº de ciclos de verano} + \text{Nº de ciclos de invierno} = \mathbf{26 \text{ ciclos}}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{Nº CICLOS ANUALES} = \mathbf{0,63 \text{ m/ciclo}}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{1.842 \text{ m}^2}$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{2.105 \text{ m}^2}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = \mathbf{6 - 8}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = \mathbf{7 - 9}$$

Tabla 5.18.- Ciclo correspondiente a máxima eliminación de nitrógeno, supuesto 4.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	13	15	15
INVIERNO	2	15	17	9

$$\text{Nº CICLOS ANUALES} = \text{Nº de ciclos de verano} + \text{Nº de ciclos de invierno} = \mathbf{24 \text{ ciclos}}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{Nº CICLOS ANUALES} = \mathbf{0,68 \text{ m/ciclo}}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{1.828 \text{ m}^2}$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{2.072 \text{ m}^2}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = \mathbf{6 - 8}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = \mathbf{7 - 9}$$

Tabla 5.19.- Ciclo correspondiente a máxima eliminación de nitrógeno, supuesto 5.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nºdías/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nºdías/ciclo	TOTAL Nºdías/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	14	16	14
INVIERNO	2	16	18	9

**Nº CICLOS ANUALES** = Nº de ciclos de verano + Nº de ciclos de invierno = **23 ciclos**

**CH CICLO** = CH<sub>AR</sub> / Nº CICLOS ANUALES = **0,71 m/ciclo**

**S<sub>VERANO</sub>** = (Q<sub>ARm</sub> x Nº días / ciclo) / CH<sub>CICLO</sub> = **1.867 m<sup>2</sup>**

**S<sub>INVIERNO</sub>** = (Q<sub>ARm</sub> x Nº días / ciclo) / CH<sub>CICLO</sub> = **2.101 m<sup>2</sup>**

**Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO** = **6 - 8**

**Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO** = **7 - 9**

### CICLOS CON MÁXIMA NITRIFICACIÓN

Tabla 5.20.- Ciclo correspondiente a máxima nitrificación, supuesto 1.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nºdías/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nºdías/ciclo	TOTAL Nºdías/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	1	5	6	36
INVIERNO	1	7	8	19

**Nº CICLOS ANUALES** = Nº de ciclos de verano + Nº de ciclos de invierno = **55 ciclos**

**CH CICLO** = CH<sub>AR</sub> / Nº CICLOS ANUALES = **0,30 m/ciclo**

**S<sub>VERANO</sub>** = (Q<sub>ARm</sub> x Nº días / ciclo) / CH<sub>CICLO</sub> = **1.658 m<sup>2</sup>**

**S<sub>INVIERNO</sub>** = (Q<sub>ARm</sub> x Nº días / ciclo) / CH<sub>CICLO</sub> = **2.210 m<sup>2</sup>**

**Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO** = **6 - 8**

**Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO** = **8 - 13**

Tabla 5.21.- Ciclo correspondiente a máxima nitrificación, supuesto 2.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	6	8	27
INVIERNO	12	8	10	15

$$\text{N}^\circ \text{ CICLOS ANUALES} = \text{N}^\circ \text{ de ciclos de verano} + \text{N}^\circ \text{ de ciclos de invierno} = 42 \text{ ciclos}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{N}^\circ \text{ CICLOS ANUALES} = 0,39 \text{ m/ciclo}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{N}^\circ \text{ días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = 1.700 \text{ m}^2$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{N}^\circ \text{ días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = 2.125 \text{ m}^2$$

$$\text{N}^\circ \text{ MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = 4 - 5$$

$$\text{N}^\circ \text{ MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = 5 - 7$$

Tabla 5.22.- Ciclo correspondiente a máxima nitrificación, supuesto 3.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	6	8	27
INVIERNO	2	9	11	14

$$\text{N}^\circ \text{ CICLOS ANUALES} = \text{N}^\circ \text{ de ciclos de verano} + \text{N}^\circ \text{ de ciclos de invierno} = 41 \text{ ciclos}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{N}^\circ \text{ CICLOS ANUALES} = 0,4 \text{ m/ciclo}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{N}^\circ \text{ días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = 1.658 \text{ m}^2$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{N}^\circ \text{ días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = 2.279 \text{ m}^2$$

$$\text{N}^\circ \text{ MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = 4 - 5$$

$$\text{N}^\circ \text{ MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = 5 - 7$$

Tabla 5.23.- Ciclo correspondiente a máxima nitrificación, supuesto 4.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	6	8	27
INVIERNO	2	10	12	13

$$\text{Nº CICLOS ANUALES} = \text{Nº de ciclos de verano} + \text{Nº de ciclos de invierno} = \mathbf{40 \text{ ciclos}}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{Nº CICLOS ANUALES} = \mathbf{0,41 \text{ m/ciclo}}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{1.617 \text{ m}^2}$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{2.426 \text{ m}^2}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = \mathbf{4 - 5}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = \mathbf{5 - 7}$$

Tabla 5.24.- Ciclo correspondiente a máxima nitrificación, supuesto 5.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	6	8	27
INVIERNO	2	11	13	12

$$\text{Nº CICLOS ANUALES} = \text{Nº de ciclos de verano} + \text{Nº de ciclos de invierno} = \mathbf{39 \text{ ciclos}}$$

$$\text{CH}_{\text{CICLO}} = \text{CH}_{\text{AR}} / \text{Nº CICLOS ANUALES} = \mathbf{0,42 \text{ m/ciclo}}$$

$$\text{S}_{\text{VERANO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{1.579 \text{ m}^2}$$

$$\text{S}_{\text{INVIERNO}} = (\text{Q}_{\text{ARm}} \times \text{Nº días / ciclo}) / \text{CH}_{\text{CICLO}} = \mathbf{2.565 \text{ m}^2}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO} = \mathbf{4 - 5}$$

$$\text{Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO} = \mathbf{5 - 7}$$

Tabla 5.25.- Ciclo correspondiente a máxima nitrificación, supuesto 6.

	PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo	PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo	TOTAL Nº días/ciclo	TOTAL ANUAL Nº de ciclos
VERANO	2	7	9	24
INVIERNO	2	12	14	11

Nº CICLOS ANUALES = Nº de ciclos de verano + Nº de ciclos de invierno = 35 ciclos

$CH_{CICLO} = CH_{AR} / \text{Nº CICLOS ANUALES} = 0,47 \text{ m/ciclo}$

$S_{VERANO} = (Q_{ARm} \times \text{Nº días / ciclo}) / CH_{CICLO} = 1.587 \text{ m}^2$

$S_{INVIERNO} = (Q_{ARm} \times \text{Nº días / ciclo}) / CH_{CICLO} = 2.469 \text{ m}^2$

Nº MÍNIMO DE BALSAS EN VERANO = 4 - 5

Nº MÍNIMO DE BALSAS EN INVIERNO = 5 - 7

d) Resumen de la superficie necesaria, y del número mínimo de balsas en función del número de días por ciclo.

Tabla 5.26- Resumen de la superficie necesaria y el nº mínimo de balsas, con el rango máximo de infiltración, de agua residual procedente de un tratamiento primario (EPA, 1984).

PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo		PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo		Nº días/ciclo		TOTAL ANUAL Nº de ciclos	SUPERFICIE TOTAL A OCUPAR (m <sup>2</sup> )		Nº MÍNIMO DE BALSAS	
VER	INV	VER	INV	VER	INV	VER E INV	VER	INV	VER	INV
1	1	5	7	6	8	45	1344	1792	6-8	8-13
2	2	6	8	8	10	42	1700	2125	4-5	5-7
2	2	6	9	8	11	41	1658	2279	10	8
2	2	6	10	8	12	40	1617	2426	4-5	5-7
2	2	6	11	8	13	39	1579	2565	4-5	5-7
2	2	7	12	9	14	35	1587	2469	4-5	5-7



Período de inundación-secado y superficie máxima disponible

Tabla 5.27.- Resumen de la superficie necesaria y el nº mínimo de balsas para infiltración de agua residual procedente de un tratamiento primario con la máxima eliminación de nitrógeno (EPA, 1984)

PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo		PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo		Nº días/ciclo		TOTAL ANUAL Nº de ciclos	SUPERFICIE TOTAL A OCUPAR (m <sup>2</sup> )		Nº MÍNIMO DE BALSAS	
VER	INV	VER	INV	VER	INV	VER E INV	VER	INV	VER	INV
1	1	10	12	11	13	32	3250	1950	11-15	13-17
2	2	11	12	13	15	27	1766	2038	6-8	7-9
2	2	12	14	14	16	26	1842	2105	6-8	7-9
2	2	13	15	15	17	24	1828	2072	6-8	7-9
2	2	14	16	16	18	23	1867	2101	6-8	7-9



Periodo de inundación-secado y superficie máxima disponible

Tabla 5.28.- Resumen de la superficie necesaria y el nº mínimo de balsas para infiltración de agua residual procedente de un tratamiento primario con la máxima nitrificación (EPA, 1984)

PERÍODO DE INUNDACIÓN Nº días/ciclo		PERÍODO DE SECADO Nº días/ciclo		Nº días/ciclo		TOTAL ANUAL Nº de ciclos	SUPERFICIE TOTAL A OCUPAR (m <sup>2</sup> )		Nº MÍNIMO DE BALSAS	
VER	INV	VER	INV	VER	INV	VER E INV	VER	INV	VER	INV
1	1	5	7	6	8	55	1658	2210	6-8	8-13
2	2	6	8	8	10	42	1700	2125	4-5	5-7
2	2	6	9	8	11	41	1658	2279	4-5	5-7
2	2	6	10	8	12	40	1617	2426	4-5	5-7
2	2	6	11	8	13	39	1579	2565	4-5	5-7
2	2	7	12	9	14	35	1587	2469	4-5	5-7



Periodo de inundación-secado y superficie máxima disponible

### **5.3.- SUPERFICIES DE BALSA Y CICLOS PROPUESTOS.**

Sobre la base de las consideraciones teóricas anteriormente propuestas las balsas de infiltración de ARU se han construido con una superficie total de 2.450 m<sup>2</sup> repartidos en dos balsas gemelas de 1.225 m<sup>2</sup> cada una de ellas (divididas a su vez en otras dos balsas). Los ciclos de humectación/secado, dada la baja tasa de vertido que se espera tener serán en una primera etapa de 10 días / 10 días, basándose en los resultados que se vayan obteniendo se ajustarán con el fin de conseguir la máxima nitrificación. El tiempo de residencia en las balsas de decantación y almacén es de 18 horas en cada una de ellas. En el anexo 5 se muestra una tabla resumen del calendario de vertido.

### **5.4.- DISEÑO FINAL Y CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DEL SISTEMA DE INFILTRACIÓN.**

En este apartado se describen y explican las características constructivas de los diversos elementos que constituyen el sistema de infiltración. En la figura 5.7 se presenta un esquema detallado de la situación, distribución y dimensiones de cada uno de los constituyentes de la instalación. Esta consiste básicamente en un sistema de captación del agua residual, después del tratamiento al que es sometida en la depuradora del pueblo (desbaste, desengrasado y desarenado), una balsa almacén que sirve como elemento regulador del caudal de agua, una balsa de decantación cuyo fin primordial es eliminar la mayor cantidad posible de materia en suspensión que no haría más que colmatar el fondo de las balsas de infiltración, una arqueta de control y vaciado de la balsa de decantación, y por último el sistema de distribución del agua y las balsas de infiltración.

En las figuras 5.7 a 5.10 se muestran los planos de construcción acotados y de distribución de tuberías.

#### **a) Arqueta de toma de agua.**

El ARU procedente de la planta de pretatamiento llega a una arqueta de hormigón armado,

donde se ha construido una acometida para la toma de agua que se va a tratar. La acometida se ha realizado mediante la perforación del muro de hormigón armado y la colocación de una brida estanca roscada de 50 mm de diámetro. La brida se conecta a una tubería de polietileno de baja densidad de 50 mm de diámetro mediante racores de bronce rosca-polietileno. En la tubería de polietileno se ha insertado una válvula de esfera de latón, cuya misión es el corte y regulación del caudal de entrada a la balsa almacén.

#### **b) Balsa almacén.**

Esta balsa se ha construido mediante excavación en terreno natural por medio de una pala-retro. La balsa tiene unas dimensiones de 11 m de largo por 11 m de ancho, una profundidad de 1,2 m, con un talud 1:1 de inclinación, y una capacidad de 80.000 litros.

En el fondo de la balsa se ha construido un desagüe con válvula de compuerta de fundición, y un rebosadero conectados a 2 m de distancia y a 1,2 m del suelo, que desemboca en una chopera que funciona como filtro verde, a 15 m de las instalaciones de pretratamiento.

Una vez realizada la evacuación de los 145 m<sup>3</sup> de tierra resultante de la excavación, se han impermeabilizado las paredes y el fondo de la balsa mediante láminas de PVC maleable, para evitar filtraciones.

#### **c) Balsa decantadora.**

Está construida de la misma forma que la balsa almacén, con unas dimensiones de 12 m de ancho por 12 m de largo, una profundidad de 2 m, con un talud de 1:2 para evitar derrumbamientos, su capacidad es de 80.000 litros.

De igual manera se ha instalado un desagüe con una válvula de compuerta de fundición y un rebosadero a 2 m de distancia, estos conectan con las conducciones de desagüe y aliviadero de la balsa almacén.

#### **d) Arqueta de control y vaciado de balsa decantadora.**

La arqueta se ha diseñado para la ubicación de las válvulas de esfera de 90 mm de diámetro que envían el ARU procedente de la balsa de decantación, a la balsa de infiltración "A" o a la balsa de infiltración "B", contabilizándose anteriormente el ARU descargada mediante un caudalímetro de paletas de 100 mm de diámetro. La arqueta tiene unas dimensiones de 1,5 m de ancho, 1,5 m de largo, y 2 m de profundidad. Las paredes están entibadas con ladrillo hueco, el techo se ha construido mediante dos vigas de hormigón y bovedillas. El acceso al interior de la arqueta se realiza por medio de una escalera y una compuerta de chapa de 3 mm de espesor y 0,5 m de ancho por 0,5 m de largo.

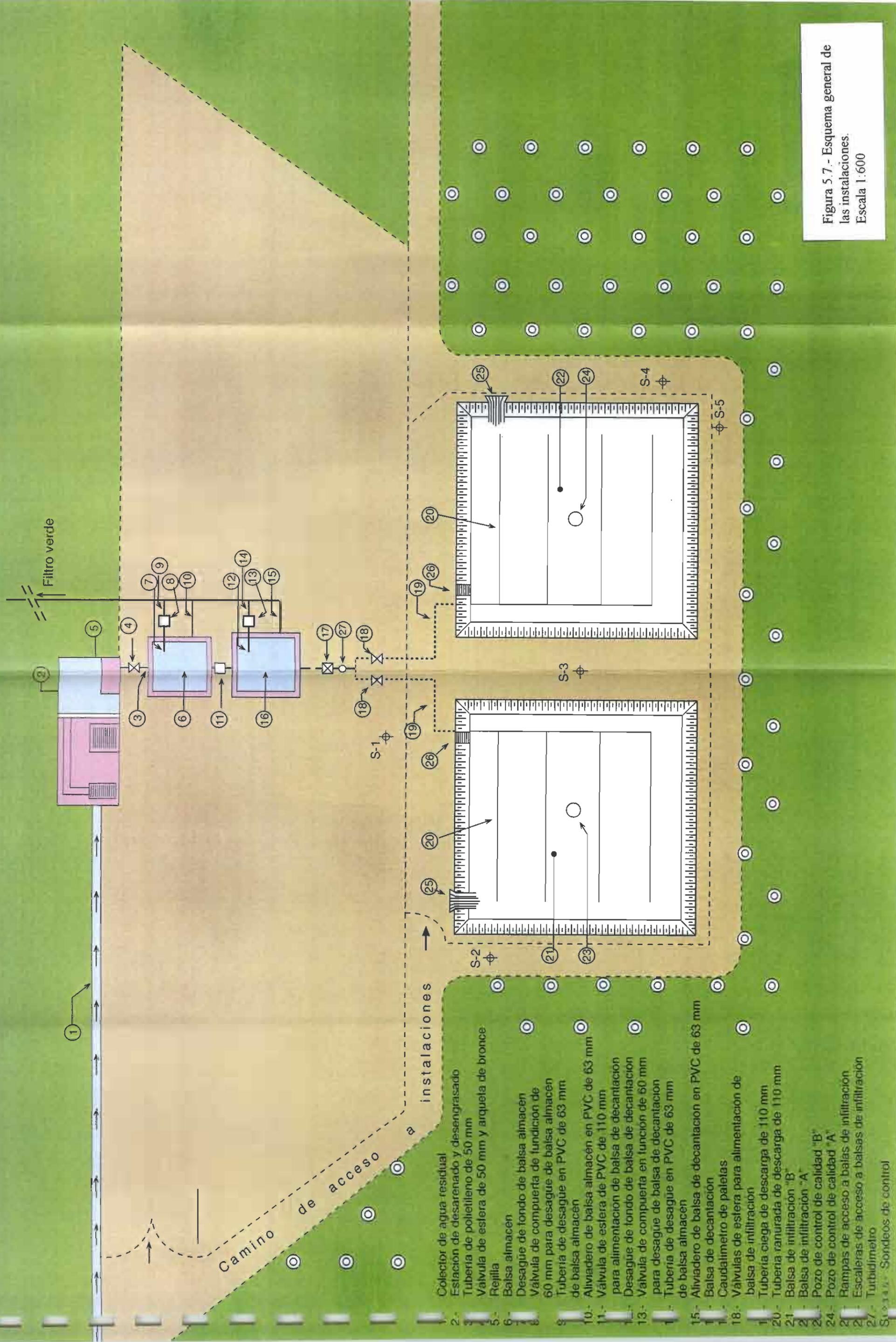
#### **e) Balsas de infiltración.**

Las balsas de infiltración se han construido mediante excavación en el terreno. Las balsas son iguales, tienen unas dimensiones de 40 m por 40 m en la parte superior y 35 m por 35 m en la base, con una inclinación del 66 % en las paredes, y una profundidad de 2,5 m. Con el fin de poder disponer de mayor capacidad de experimentación, las balsas se han dividido en dos partes iguales mediante un caballete de tierra empleándose para esta primera experiencia únicamente la mitad más próxima a la acometida de las tuberías de distribución.

Mediante triangulaciones, se procedió a la nivelación del fondo de cada una de las balsas, para posteriormente distribuir de forma ramificada aproximadamente 160 m de tubería de PVC ranurada de 90 mm de diámetro, por la cual se vierte el ARU a infiltrar.

# ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN DE TRATAMIENTO

# SUELO-ACUÍFERO DE DEHESAS DE GUADIX

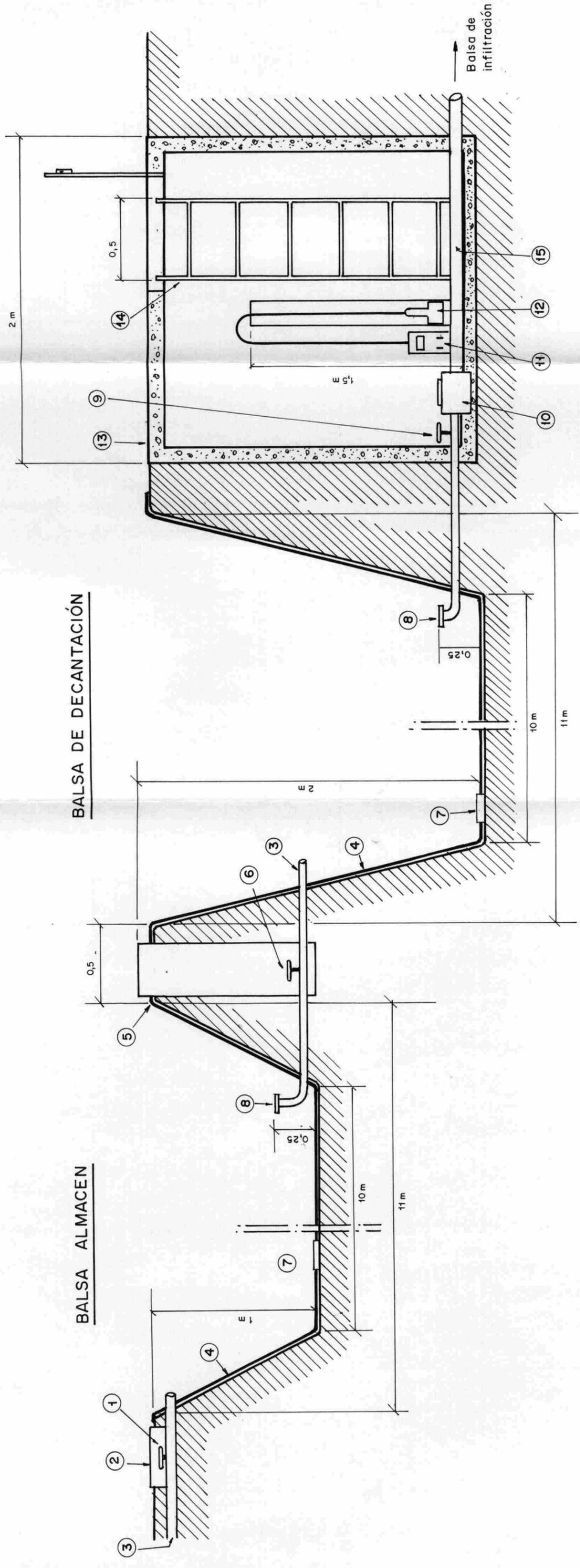


- 2.- Colector de agua residual
- 3.- Estación de desarenado y desengrasado
- 4.- Tubería de polietileno de 50 mm
- 5.- Válvula de esfera de 50 mm y arqueta de bronce
- 6.- Rejilla
- 7.- Balsa almacén
- 8.- Desagüe de fondo de balsa almacén
- 9.- Válvula de compuerta de fundición de 60 mm para desagüe de balsa almacén
- 10.- Tubería de desagüe en PVC de 63 mm de balsa almacén
- 11.- Aliviadero de balsa almacén en PVC de 63 mm
- 12.- Válvula de esfera de PVC de 110 mm para alimentación de balsa de decantación
- 13.- Desagüe de fondo de balsa de decantación
- 14.- Válvula de compuerta en función de 60 mm para desagüe de balsa de decantación
- 15.- Tubería de desagüe en PVC de 63 mm de balsa almacén
- 16.- Aliviadero de balsa de decantación en PVC de 63 mm
- 17.- Balsa de decantación
- 18.- Caudalímetro de paletas
- 19.- Válvulas de esfera para alimentación de balsa de infiltración
- 20.- Tubería ciega de descarga de 110 mm
- 21.- Tubería ranurada de descarga de 110 mm
- 22.- Balsa de infiltración "B"
- 23.- Balsa de infiltración "A"
- 24.- Pozo de control de calidad "B"
- 25.- Pozo de control de calidad "A"
- 26.- Rampas de acceso a balsas de infiltración
- 27.- Turbidímetro
- S-1, S-2, S-3, S-4, S-5.- Sondeos de control

Figura 5.7.- Esquema general de las instalaciones.  
Escala 1:600

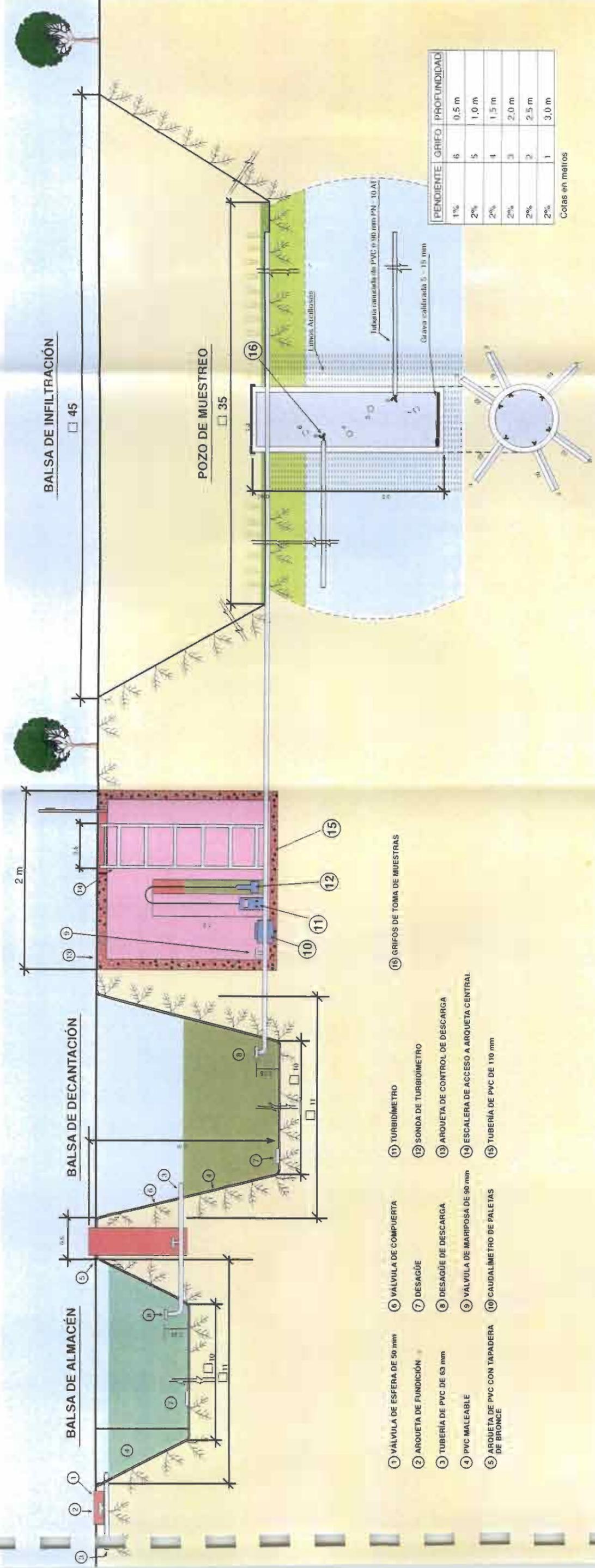
**BALSA ALMACEN**

**BALSA DE DECANTACIÓN**



- ① VÁLVULA DE ESFERA DE 50 mm
- ② ARQUETA DE FUNDICIÓN
- ③ TUBERIA DE PVC DE 63 mm
- ④ PVC MALEABLE
- ⑤ ARQUETA DE PVC CON TAPADERA DE BRONCE
- ⑥ VÁLVULA DE COMPUERTA
- ⑦ DESAGUE
- ⑧ DESAGÜE DE DESCARGA
- ⑨ VÁLVULA DE MARIPOSA DE 90mm
- ⑩ CAUDALÍMETRO DE PALETAS
- ⑪ TURBIDÍMETRO
- ⑫ SONDA DE TURBIDÍMETRO
- ⑬ ARQUETA DE CONTROL DE DESCARGA
- ⑭ ESCALERA DE ACCESO A ARQUETA CENTRAL
- ⑮ TUBERIA DE PVC DE 110mm

Figura 5.8.- Balsa almacén y de decantación.  
Escala 1:25



PENDIENTE	GRIFO	PROFUNDIDAD
1%	6	0.5 m
2%	5	1.0 m
2%	4	1.5 m
2%	3	2.0 m
2%	2	2.5 m
2%	1	3.0 m

Cotas en metros

- 1 VALVULA DE ESFERA DE 50 mm
- 2 ARQUETA DE FUNDICIÓN
- 3 TUBERÍA DE PVC DE 63 mm
- 4 PVC MALEABLE
- 5 ARQUETA DE PVC CON TAPADERA DE BRONCE
- 6 VALVULA DE COMPUERTA
- 7 DESAGÜE
- 8 DESAGÜE DE DESCARGA
- 9 VALVULA DE MARIPOSA DE 90 mm
- 10 CAUDALIMETRO DE PALETAS
- 11 TURBIDÍMETRO
- 12 SONDA DE TURBIDIMETRO
- 13 ARQUETA DE CONTROL DE DESCARGA
- 14 ESCALERA DE ACCESO A ARQUETA CENTRAL
- 15 TUBERÍA DE PVC DE 110 mm
- 16 GRIFOS DE TOMA DE MUESTRAS

Figura 5.9.-Sección de la instalación de tratamiento.

Figura 5.10.- Distribución de las tuberías de alimentación, desagüe y rebosadero en la balsa almacén y de decantación.

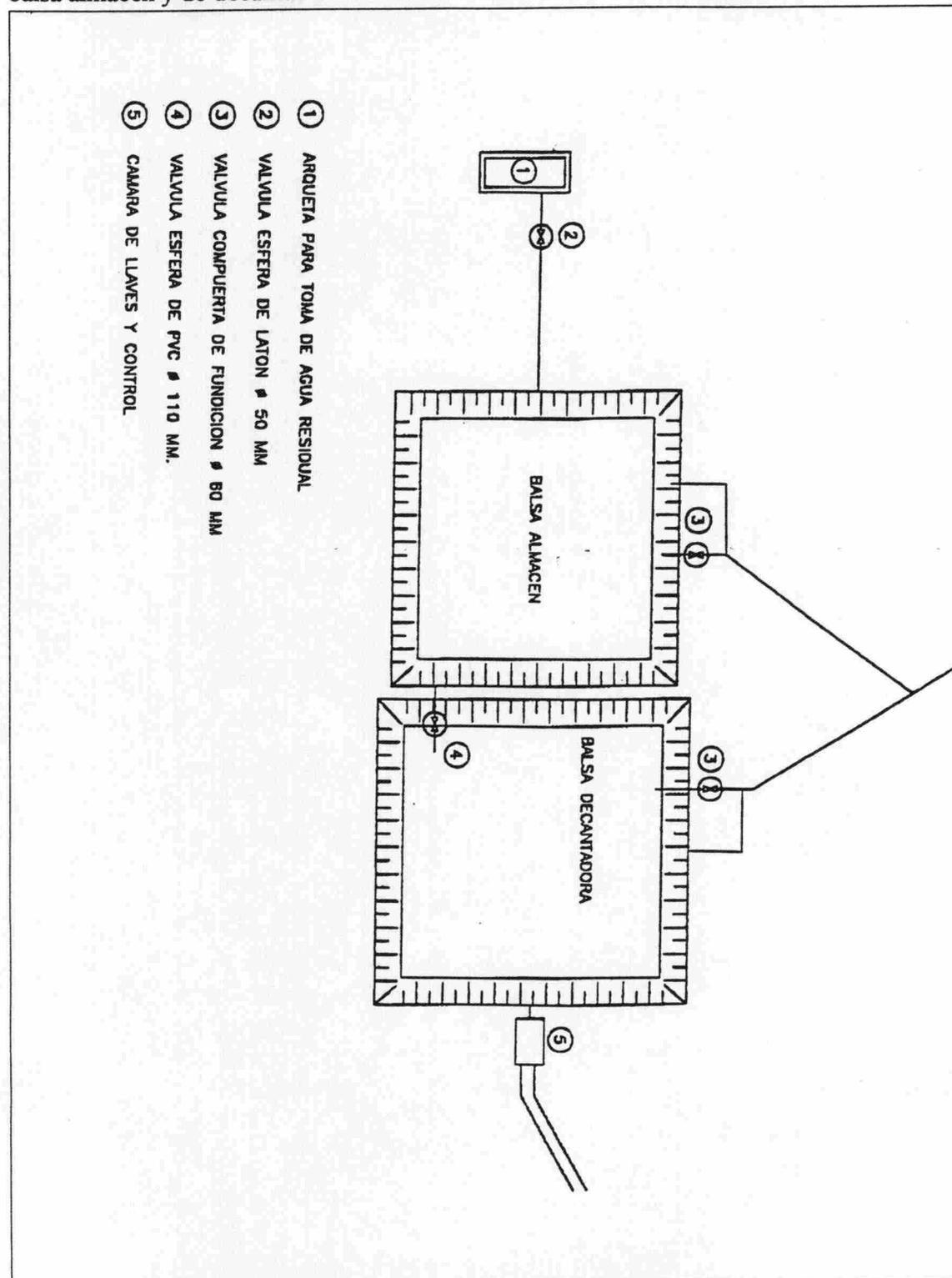
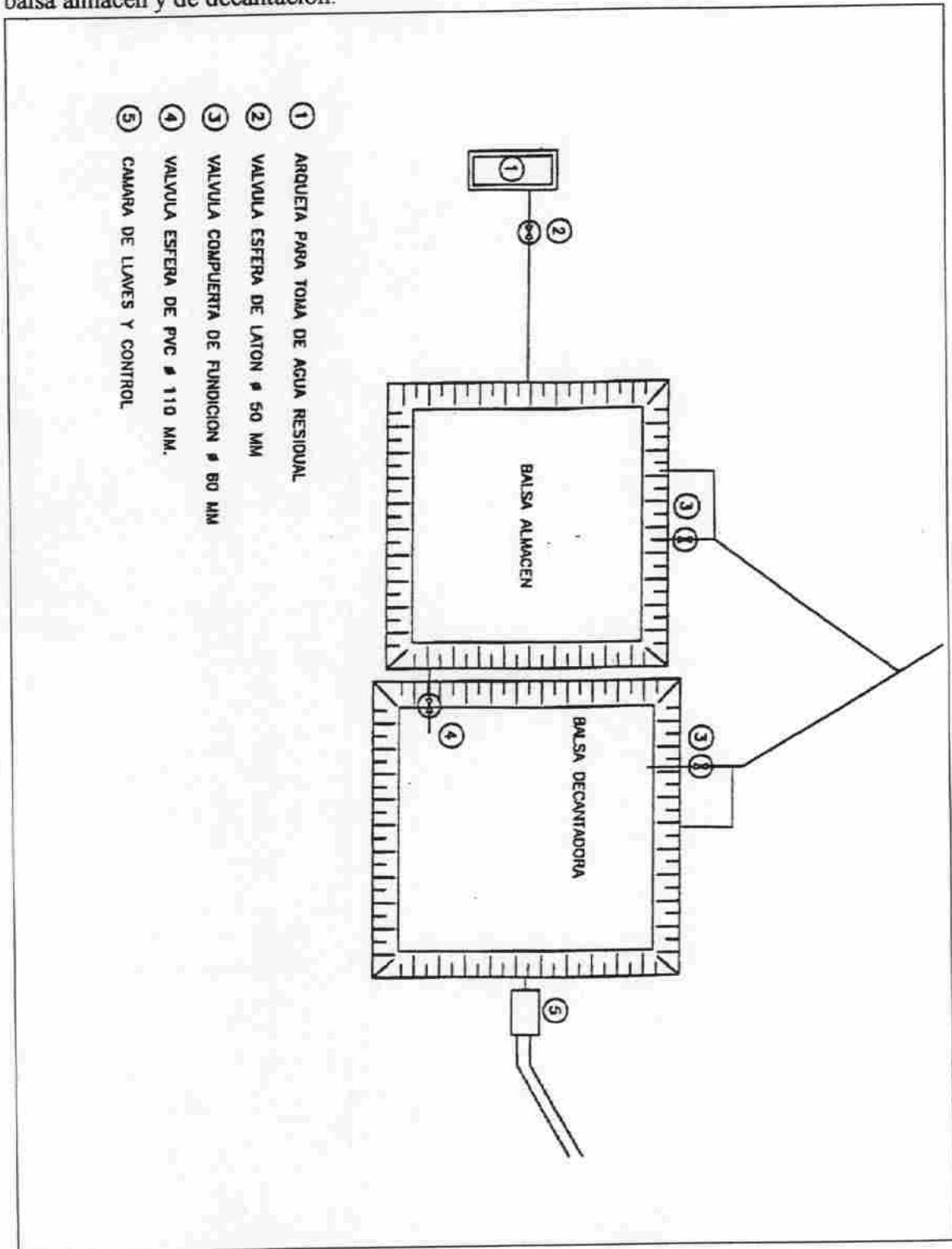


Figura 5.10.- Distribución de las tuberías de alimentación, desagüe y rebosadero en la balsa almacén y de decantación.



**CAPÍTULO 6**  
**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL**  
**SISTEMA DE VIGILANCIA Y CONTROL DE LAS AGUAS**  
**SUBTERRÁNEAS Y DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO.**

## 6.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE VIGILANCIA Y CONTROL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO.

### 6.1.- ANTECEDENTES. CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO.

Son muchos los métodos desarrollados para obtener inalterada la solución del suelo<sup>6</sup>, aunque básicamente pueden diferenciarse dos grandes grupos: los que se aplican en campo y los que se desarrollan en laboratorio. Ambas metodologías no solo se diferencian en los dispositivos de muestreo, sino que también, como se verá en los apartados siguientes, en las características y representatividad de las muestras a que dan lugar.

En este apartado se hace una revisión de los principales sistemas de obtención de la solución de suelo, tanto de laboratorio como de campo, para después justificar adecuadamente el seleccionado en este trabajo.

#### 6.1.1.- Métodos de campo.

##### a) Cápsulas de succión.

En la actualidad, el método mas extendido para la extracción de solución de suelo en campo son las *cápsulas de succión*, están construidas de material cerámico poroso, si bien es cierto que existen cápsulas de muchos otros materiales, como el PTFE (politetrafloroetileno). Su mecanismo de funcionamiento se basa en, una vez situada la cápsula a la profundidad deseada, extraer el aire de su interior creando un vacío parcial, de forma que la presión negativa ejerce una fuerza de succión sobre el agua que la rodea que permite su paso al interior de la cápsula.

La principal ventaja de este método es que permiten un sistema de *muestreo continuo* en

---

<sup>6</sup> Es preferible esta denominación a la que otros autores emplean cuando la denominan como "verdadera solución del suelo" queriendo de esta manera hacer hincapié que se trata de la solución que rellena los poros de la matriz sólida y no la que ha podido obtenerse alterada debido a las condiciones del proceso de muestreo.

condiciones aparentemente próximas a la realidad. Se suele muestrear en intervalos de tiempo relativamente prolongados y se ha comprobado que la solución, una vez en el interior de la cápsula cerámica, entra en contacto con la atmósfera -evidentemente el vacío no es perfecto- y las especies químicas como el hierro, amonio o manganeso pueden ser oxidadas en un tiempo relativamente corto, 2-3 días (Stumm y Morgan, 1981), con lo que sería necesario una toma de muestras en intervalos de tiempo extremadamente cortos, 2-3 horas, y su almacenamiento en atmósfera inerte, (Keigley *en* Iggy, 1988).

Un problema añadido a este tipo de tomamuestras es la fuerte desgasificación, con pérdida de  $\text{CO}_2$  inducida por el vacío necesario para la extracción de la muestra. Suárez (1987) comenta que los errores debido a las pérdidas de  $\text{CO}_2$  varían, en sus muestras, entre 0,28 y 0,44 unidades de pH, inaceptable para su empleo en modelos hidroquímicos en medios calizos. El mismo autor ha desarrollado un modelo para predecir el error en la medida del pH debido a la pérdida de anhídrido carbónico por desgasificación. También ha diseñado un modelo de tomamuestras con varias cámaras para minimizar este efecto, se trata, no obstante, de un sistema no disponible comercialmente y de difícil y cara construcción.

Por otro lado, puesto que la extracción del agua se debe a la presión negativa en el interior de la cápsula, que disminuye según se va llenando, la cantidad de líquido y sus características dependerán de la presión remanente en cada caso, con lo que si lo que se pretende muestrear es únicamente el agua gravitacional, puede ser muy difícil diferenciar esta de otras débilmente retenidas.

Otro problema, es el hecho de que la succión puede provocar en el terreno circundante a la cápsula, movimientos anormales del agua (por ejemplo puede ascender) que si bien presentan un radio de influencia muy pequeño, en ciertas circunstancias, pueden tener consecuencias apreciables (por ejemplo si la cápsula se sitúa en la proximidad del límite entre dos horizontes) o se investigan procesos que tienen lugar en un corto intervalo espacial.

Las cápsulas de succión, debido a su construcción mecánica, no son adecuadas para muestrear niveles muy superficiales, ni muy profundos, y por sus dimensiones físicas (vienen a tener una

longitud de 5 a 15 cm) no son adecuadas para el estudio de niveles delgados (de menos de 20 o 25 cm), además, a esta limitación hay que sumar la dificultad de situar con precisión la cápsula, especialmente cuando se va a hacer a cierta profundidad.

El estudio de productos orgánicos a nivel de traza como pueden ser los herbicidas, plaguicidas, hidrocarburos, etc. plantea muchos problemas, pues a las posibles interferencias debidas a los materiales plásticos empleados en la construcción del instrumento, hay que añadir la posibilidad de que la propia cerámica porosa empleada en la cápsula, sea capaz de retener parte de las sustancias que interesa determinar.

Por último, dependiendo del tipo de cápsula empleada y suelo a estudiar, con el tiempo se produce una colmatación progresiva de la cerámica porosa que cada vez se hace menos permeable, de forma que para obtener una misma cantidad de muestra, es necesario muestrear a intervalos de tiempo mayores o hacer un vacío más fuerte en la cápsula, circunstancias ambas que influyen negativamente en la calidad de la muestra obtenida.

#### **b) Lisímetros.**

Método menos empleado, debido a su mayor costo y dificultad de construcción. Permiten muestrear una columna de suelo en campo. El dispositivo consiste básicamente en una construcción que facilita la introducción de un sistema de muestreo horizontal a diversas profundidades, generalmente tuberías perforadas, obteniéndose de esta manera el agua que percola. Estos sistemas, de los cuales existen numerosas variantes, presentan inconvenientes que pueden resumirse en tres principales:

- \* Son difíciles de construir y mantener.
- \* Es difícil prever el camino real que seguirá el agua a través de la zona superior al dispositivo de recuperación, de forma que puede darse el caso de que la existencia de caminos preferenciales (grietas, fracturas, agujeros de origen biológico) sean causa de resultados erráticos y de difícil explicación.

- \* Por último, en el caso de mantener el sistema en régimen natural, especialmente en climas poco lluviosos, es necesario un tiempo muy largo para obtener resultados (en cualquier caso es preciso mantener el lisímetro funcionando un tiempo para que se estabilice y los resultados que se obtienen sean aprovechables).

También se han diseñado lisímetros que tratan de paliar, al menos de forma parcial, estos problemas, construyendo un contenedor y rellenándolo con el suelo que previamente ha sido extraído, evidentemente se trata de un proceso que altera fuertemente el medio y su representatividad no tiene por que ser mayor que la que se obtendría en el laboratorio con columnas.

#### 6.1.2.- Métodos de laboratorio.

Los métodos de laboratorio suponen el empleo de porciones de suelo extraídas en campo, transportadas y almacenadas en condiciones adecuadas, y analizadas en laboratorio. Pueden diferenciarse cinco métodos principales:

- a) Métodos de desplazamiento.
- b) Métodos de extracción en membrana mediante succión.
- c) Métodos de compactación.
- d) Métodos de centrifugación.
- e) Empleo de extractos de saturación.

Es frecuente el empleo de la refrigeración o la congelación para conservar las muestras inalteradas el mayor tiempo posible, sin embargo, se ha demostrado que estas técnicas pueden alterar la composición de la solución sobre todo en la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{F}^-$  debido a la alteración física del suelo y a la solubilización de la materia orgánica que se produce en el proceso (Ross and Bartlett, 1990).

#### **a) Extracción en membrana.**

Los métodos de extracción en membrana, se fundamentan en aplicar a una muestra de suelo, que se ha colocado sobre una membrana cerámica, celulósica o de fibra de vidrio, un gas a presión controlada. El diseño original del sistema es de Richards (1941) aunque fue posteriormente modificado por Reitemeier y Richards (1944). La principal ventaja de este método, es que puede obtenerse muestras a diversas presiones y en correspondencia a diferentes fuerzas de retención.

Como inconvenientes principales pueden citarse: la posibilidad de reacción entre los componentes de la solución del suelo y la membrana, variación en el equilibrio de especies disueltas debido a la presión del gas y a la descompresión después de salir del cilindro, así como la gran cantidad de muestra que es preciso extraer (3 a 4 kg). Otro inconveniente, y no pequeño, es el tiempo tan largo que se precisa para obtener una cantidad de solución adecuada para el análisis.

#### **b) Compactación.**

Los métodos de compactación consisten simplemente en aplicar, mediante una prensa, una gran presión a la muestra de suelo (se han empleado presiones desde 300 a 53.000 psi, Ramman 1916, Lipman 1918) y extraer la solución que abandona los poros del suelo al comprimirse. La técnica presenta numerosos inconvenientes. No se sabe exactamente que solución se extrae (la de poros más elásticos o grandes saldrá primero), se producirá un "espachurramiento" de la materia orgánica e incluso la enorme presión puede perturbar los equilibrios fisico-químicos de la solución por procesos de redisolución de gases (Northrup 1918).

#### **c) Centrifugación.**

Los métodos de centrifugación, muy desarrollados en los últimos años, han dado lugar a numerosas variantes: desplazamiento por centrifugación a baja presión (<500kPa),

desplazamiento por centrifugación a alta presión y centrifugación con líquidos inmiscibles. En la centrifugación a baja presión (desarrollado a principios de siglo por Cameron, 1911 y reintroducido por Davis en 1963) tienen la ventaja de requerir únicamente material de uso común en el laboratorio. Generalmente se emplean centrifugas no refrigeradas, lo que puede llevar a la alteración de la muestra por calentamiento. Otro inconveniente es que solo se obtiene el agua retenida débilmente. En la centrifugación a alta presión se requiere un sistema bastante mas caro y complejo, es más crítico mantener la muestra a baja temperatura y se producen problemas de rotura del filtro que separa el suelo del compartimento que contiene la solución extraída.

En la centrifugación con líquidos inmiscibles (esta técnica fue desarrollada originalmente por Mubark y Olsen en 1976 y posteriormente adaptada por muchos otros autores) se emplea una centrifuga de alta presión, se añade un exceso de un liquido denso e inmiscible con el agua al suelo húmedo, y al penetrar, debido a la fuerza centrífuga, desplaza a la solución del suelo de los poros que rellena. Se han empleado muy diversos líquidos para el desplazamiento (tetracloruro de carbono, etil benzoil acetato, diferentes cloro y fluorocarbonos, etc.). La técnica presenta entre otros inconvenientes el que la muestra se contamina con el liquido desplazante alterando su pH, equilibrio gaseoso y conductividad, además de interferir en la composición iónica.

#### **d) Extractos acuosos.**

Frecuentemente se emplean extractos acuosos, sin duda la técnica más sencilla, para, de su análisis, inferir la composición de la solución del suelo. Se han empleado extractos con diversas proporciones suelo/agua, aunque parece que el termino más próximo a la realidad se consigue mediante el empleo de técnica de la pasta saturada. Wolt (1994) demuestra la existencia de "evidencias empíricas", sobre la no idoneidad de los extractos acuosos de suelo, como modelos apropiados del comportamiento y características de la solución del suelo

### e) Desplazamiento.

La primera aproximación a la obtención de verdadera solución del suelo es, probablemente, la propuesta por Schlosing ya en 1866: *"El principio es el siguiente: el suelo se coloca en un cilindro con el fondo perforado, cubierto con papel de filtro. Se riega la superficie del suelo con una lluvia artificial, recogiendo y analizando el líquido de drenaje"*. Según el autor, con un 15% de humedad se puede desplazar cerca de 1/4 de la solución del suelo, sin modificar su estado. El autor demostró la validez del método, mediante el desplazamiento de una solución de cloruro sódico contenida en una columna de arena. A partir de 1 kg de arena que contenía 200 ml de solución, se desplazan cerca de 150 ml de líquido, cuya concentración se mantuvo igual a la de la solución de ClNa añadida. Posteriormente, se emplearon diversos líquidos desplazantes en lugar de agua: etanol, metanol, acetona, dioxano, soluciones acuosas de sales, etc.

Es interesante recoger aquí dos opiniones sobre las razones que explican lo poco extendido que está el método de desplazamiento para la obtención de la solución del suelo:

Adams (1974) dice: *"..... desafortunadamente la técnica de desplazamiento para obtener la solución del suelo fue abandonada a mediados de los años 30. La razón es oscura, pero parece ser el resultado de las dificultades encontradas por los novatos en el procedimiento, especialmente en los suelos de texturas más finas"*.

Jeffers (1994) veinte años más tarde afirma: *"..... A causa de la intensiva labor y el elevado consumo de tiempo propio de este procedimiento, es difícil para un único operador preparar más de una docena de desplazamientos en un periodo de ocho horas. Por estas razones, este método no ha sido empleado ampliamente, incluso cuando realizado de manera adecuada es probablemente el mejor para obtener la solución del suelo no alterada"*.

La metodología empleada para obtener la solución del suelo mediante desplazamiento en columna fue descrita de forma minuciosa por Adams (Adams, 1974), posteriormente, Adams describe con mayor precisión el procedimiento (Adams, 1980), y Jeffers (Jeffers, 1994) introduce algunas modificaciones para mejorar el sistema.

### 6.1.3.- Metodología elegida para la obtención de la solución del suelo.

A la hora de seleccionar un método de muestreo de la solución del suelo se ha impuesto como premisa fundamental el que las muestras deben ser representativas, tanto del proceso que se está estudiando como del medio receptor de los vertidos. Por ello se han establecido una serie de criterios cuyo cumplimiento se considera esencial para garantizar la representatividad de las muestras. Estos criterios, prioritarios a la hora del diseño del sistema de muestreo de la solución del suelo han sido:

- a) Ha de ser un sistema **selectivo en profundidad**, es decir, la muestra obtenida debe ser representativa de las condiciones del agua que percola a una determinada distancia de la superficie del terreno.
- b) Debe permitir el muestreo de **microorganismos**.
- c) **No debe alterar el material que se encuentra sobre el** de forma que se alteren las condiciones naturales del terreno.
- d) Debe **obtener muestra de la mayor extensión** posible de balsa.
- e) Debe captar un volumen suficiente de muestra para realizar en ella todas las determinaciones físicas, químicas y biológicas que están previstas.
- f) **No debe alterar la composición de la muestra** por someterla a condiciones anormales o por ponerla en contacto con materiales no inertes.
- g) El **equipo necesario para su instalación ha de ser de uso común**.
- h) La extracción de la muestra **no debe someter a esta a un estrés** innecesario y debe poder ser realizada por cualquier operario.

En base a estos criterios se ha elaborado una tabla de idoneidad en la que se valoran los principales métodos de obtención de la solución del suelo basándose en los condicionantes que se han establecido:

Tabla 6.1.- Valoración de los principales sistemas de obtención de la solución del suelo.

Método	Cápsulas de succión.	Extracción en laboratorio.	Lisímetros excavados.	Drenes horizontales.
a)	5	5	4	5
b)	0	0	4	5
c)	3	3	3	5
d)	1	1	3	4
e)	2	3	5	5
f)	3	2	2	3
g)	5	5	5	5
h)	2	2	5	5
Total	21	21	31	37

Para la valoración se ha seguido el criterio de asignar 5 puntos al sistema que cumple completamente el criterio y cero si no lo cumple en absoluto.

Del análisis de los resultados obtenidos en la tabla 6.1 se deduce que **el sistema que mejor se adapta a las necesidades y condicionantes del proyecto es el de lisímetros equipados con drenes horizontales.**

#### 6.1.4.- Sistema de control de la calidad de las aguas subterráneas.

Para el muestreo del agua subterránea se ha recurrido a la construcción "ex profeso" de cinco piezómetros de control cuyas características constructivas y demás detalles se recogen en el apartado 6.2. Además se han muestreado de forma sistemática dos sondeos más, uno aguas

### 6.2.2.- Descripción litológica de los sondeos.

Se pueden atribuir los materiales atravesados en los cinco sondeos al aluvial de limos, conglomerados y arenas del Holoceno; siendo las margas del Tortoniense el muro del acuífero. Se han tomado muestras para realizar análisis granulométrico en los horizontes más representativos del sondeo 4 (anexo 3). Los criterios que se han seguido para el levantamiento de la columna litológica (anexo 4) corresponden al sistema unificado de clasificación de suelos (Casagrande en Jiménez, S., 1975). En la figura 6.1 se muestra un momento de la toma de testigos de sondeos.

Tabla 6.3.- Características de la perforación en los sondeos de control.

N° IPA	2139/2/0022	2139/2/0023	2139/2/0024	2139/2/0025	2139/2/0026
<b>Inicio</b>	7-10-97	11-10-97	3-11-97	3-11-97	15-10-97
<b>Terminación</b>	9-11-97	16-10-97	9-11-97	10-11-97	17-10-97
<b>Método de perforación</b>	Rotación 0-28,2m Tricono 28,2-55m	Rotación 0-15,8m Tricono 15,8-52m	Rotación 0-15,8m Tricono 15,8-53m	Rotación 0-16,2m Tricono 16,2-53m	Rotación 0-12,8m Tricono 12,8-53m
<b>Equipo perf.</b>	Craelius D-900	Craelius D-900	Craelius D-900	Longyar - 38	Longyar - 38
<b>Herra. corte</b>	Widia 0-28,2 m Tricono 28,2-55 m	Widia 0-15,8 m Tricono 15,8-52 m	Widia 0-15,8 m Tricono 15,8-53 m	Widia 0-16,2 m Tricono 16,2-53 m	Widia 0-12,8 m Tricono 12,8-53 m
<b>∅ perf.</b>	0-18,2 m (101mm) 18,2-55 m (4 1/2")	0-15,8 m (101mm) 15,8-52 m (4 1/2")	0-15,8 m (101mm) 15,8-53 m (4 1/2")	0-16,2 m (101mm) 16,2-53 m (4 1/2")	0-12,8 m (101mm) 12,8-53 m (4 1/2")
<b>Cementación</b>	0-17 m	0-15,8 m	0-15,80 m	0-16 m	0-10 m
<b>Profundidad</b>	55 m	52 m	53 m	53 m	53 m

Figura 6.1.- Muestras tomadas en los sondeos de investigación.



Tabla 6.4.- Características del entubado de los sondeos de control.

N° PIA	2139/2/0022	2139/2/0023	2139/2/0024	2139/2/0025	2139/2/0026
<b>Material</b>	P.V.C.	P.V.C.	P.V.C.	P.V.C.	P.V.C.
<b>Long. entu.</b>	55 m	52 m	53 m	53 m	53 m
<b>ø interior</b>	85 mm	85 mm	85 mm	85 mm	85 mm
<b>Ranurado</b>	3 mm a 45°	3 mm a 45°	3 mm a 45°	3 mm a 45°	3 mm a 45°
<b>Descripción entubación</b>	0-17 m Ciego 17-49 m Ranurado 49-55 m Ciego	0-16 m Ciego 16-46 m Ranurado 46-52 m Ciego	0-15,80 m Ciego 15,8-47 m Ranurado 47-53 m Ciego	0-16 m Ciego 16-47 m Ranurado 47-53 m Ciego	0-10 m Ciego 10-48 m Ranurado 48-53 m Ciego

---

Litología del sondeo - 1 (N° IPA 2139/2/0022).

---

De 0,00 a 2,30	Arcilla con algo de limo de color pardo rojizo.
De 2,30 a 2,40	Limo con algo de arcilla pardo rojizo.
De 2,40 a 3,25	Arcilla con indicios de limo de color pardo rojizo.
De 3,25 a 3,90	Limo arcilloso pardo rojizo.
De 3,90 a 5,90	Limo con indicios de arcilla.(Muestras M - 1.1 a 4 m y M - 1.2 a 4,40 m).
De 5,90 a 7,20	Limo con algo de arcilla.
De 7,20 a 7,55	Arcilla con indicios de limo de color pardo rojiza.
De 7,55 a 8,10	Limo con bastante arcilla, color pardo rojizo.
De 8,10 a 8,50	Limo con algo de arcilla.
De 8,50 a 8,75	Limo con bastante arcilla, color pardo rojizo. ( Muestra M - 1.3 a 8,70 m).
De 8,75 a 9,55	Arena limosa de grano fino.
De 9,55 a 11,60	Limos con bastante arena de grano fino, color pardo oscuro. Aparecen niveles de arena fina de 20 cm a 9.80 m , de 17 cm a 10,75 m y de arena de grano medio de 10 cm con indicios de grava a 11 m.
De 11,6 a 12,85	Limo arcilloso de color gris oscuro.
De 12,85 a 14,2	Arcilla limosa de color gris oscuro
De 14,20 a 15	Arena limosa de grano fino. A 14,50 m nivel de arena de grano medio y fino de color pardo oscuro.
De 15 a 15,40	Arena de grano fino y medio.(Muestra M - 1.4 a 15 m).
De 15,4 a 17,25	Mezcla de grava y arena de grano medio.
De 17,25 a 18,9	Grava no graduada con pocos finos.
De 18,9 a 20,8	Limos con indicios de arcilla de color pardo oscuro.
De 20,8 a 21,15	Arena con algo de limos de color pardo oscuro.
De 21,15 a 23	Limos con bastante arena no graduada.

De 23 a 25,5	Mezcla de grava y arena de grano medio con indicios de limo de color pardo oscuro.
De 25,5 a 25,85	Mezcla de grava de grano medio y arena de grano fino, con indicios de limo de color pardo oscuro.
De 25,85 a 27	Limos de color pardo oscuro con indicios de arena de grano fino.
De 27 a 30	Grava con matriz limosa e indicios de arcilla de color pardo oscuro.
De 30 a 32	Grava con matriz arcillosa. Clastos de carbonatos y cuarzo.
De 32 a 48	Grava, arena de grano medio y fino y limo. Color pardo oscuro.
De 48 a 55	Marga de color gris oscuro.

---

**Litología del sondeo - 2 (N° IPA 2139/2/0023).**

---

De 0 a 2,95	Limos con bastante arcilla, color pardo oscuro. (Muestra M - 2.1 a 2,40 m).
De 2,95 a 3,50	Arcilla poco plástica con bastante limo, color pardo oscuro.
De 3,50 a 6,60	Arcilla poco plástica con indicios de limo. A 4,90 m veta de limos de 17 cm. De 6,50 m a 6,60 m los indicios de limo pasan a algo de limo. (Muestra M - 2.2 a 4,40 m)
De 6,60 a 7	Limos arcillosos de color pardo rojizo. (Muestra M - 2.3 a 6,80 m).
De 7 a 9,40	Limos con indicios de arcilla.
De 9,49 a 9,8	Limos con indicios de grava de grano medio, color pardo oscuro.
De 9,8 a 10,1	Arcilla con indicios de limo y grava. Algunos clastos tienen 5 cm, con esfericidad muy irregular.
De 10,1 a 13	Limos con indicios de arcilla de color pardo rojizo. A 10,45 m veta de arcilla plástica de 12 cm. (Muestra M - 2.4 a 10,50 m).
De 13 a 13,2	Limos arcillosos de color pardo rojizo. (Muestra M - 2.5 a 13 m).
De 13,2 a 14,6	Grava no graduada con limos. Centil 50 mm.

De 14,6 a 15,05	Grava no graduada con pocos finos. Centil 80 mm. A 15 m veta de grava arcillosa con clastos regulares de 5 mm.
De 15,05 a 15,6	Limos con indicios de arcilla desde 15,05 m a 15,5 m. De 15,5 m a 15,6 m los indicios de arcilla pasan a algo de arcilla.
De 15,6 a 17	Gravas con algo de limos, color pardo oscuro.
De 17 a 46	Grava, arena de grano medio y fino, y limo. Color pardo oscuro. No se aprecian tamaños como consecuencia de la trituración del tricono.
De 46 a 52	Margas de color gris oscuro.

---

**Litología del sondeo - 3 (N° IPA 2139/2/0024).**

---

De 0 a 1,2	Limos con bastante arcilla, color pardo oscuro.
De 1,2 a 1,8	Arcilla limosa, color pardo oscuro. Poco plástica. (Muestra M - 3.1 a 1,7 m)
De 1,8 a 6,55	Arcilla con algo de limo, color pardo oscuro. A 2,8 m la arcilla es muy plástica (Muestra M - 3.2 a 4 m).
De 4,15 a 4,25	Dique de arcilla plástica con indicios de limo, color pardo oscuro (Muestra M - 3.3 a 4,40 m).
De 6,55 a 7,1	De 5,7 m a 5,8 m el color cambia a pardo rojizo. Limo con algo de arcilla, color pardo oscuro. A 6,80 m la arcilla pasa a indicios.
De 7,1 a 7,4	Arcilla con indicios de limo, color pardo oscuro.
De 7,4 a 8,7	Limo con bastante arcilla, color pardo oscuro. (Muestra M - 3.4 a 7,55 m).
De 8,7 a 9,55	Limos con indicios de arcilla, color pardo rojizo.
De 9,55 a 12,4	Limo con indicios de arcilla y arena de grano fino, color pardo rojizo.
De 11,04 a 11,35	Los indicios de arcilla desaparecen. De 11,35 m a 11,7 m limo con

	indicios de grava mal graduada y arena silícea de grano fino y medio.
De 12,4 a 13,5	Limo arcilloso, color pardo oscuro. 12,6 m la arcilla pasa a algo de y a 12,8 m el porcentaje de arcilla vuelve ser el de arcillosa.
De 13,5 a 13,8	Arcilla limosa, color pardo oscuro.
De 13,8 a 14,8	Limo con algo de arcilla, color pardo oscuro.
De 14,8 a 15,3	Arena de grano medio y fino, con algo de arcilla y limo e indicios de grava. Color pardo oscuro.
De 15,3 a 17	Grava mal graduada con indicios de arena, limo y arcilla. Clastos de sílice y de carbonatos.
De 17 a 48	Grava, arena de grano medio y fino y limo. Color pardo oscuro.
De 48 a 53	Margas de color gris oscuro, con algo de arena de grano medio.

---

**Litología del sondeo - 4 (N° IPA 2139/2/0025).**

---

De 0 a 1,95	Arcilla con bastante limo, color pardo oscuro. (Muestra M - 4.1 a 1 m).
De 1,95 a 3	Arcilla con algo de limo, color pardo oscuro.
De 3 a 3,15	Arcilla con indicios de limo.
De 3,15 a 4	Arcilla con algo de limo.
De 4 a 5	Arcilla con indicios de limo. (Muestra M - 4.2 a 4,8 m).
De 5 a 5,5	Arcilla con algo de limo, color pardo rojizo.
De 5,5 a 7,6	Arcilla con indicios de limo. A 5,6 m el color cambia a color pardo oscuro. A 6,8 m los indicios de limo pasan a algo de.
De 7,6 a 7,8	Limo con algo de arcilla, color pardo rojizo. (Muestra M - 4.3 a 7,6 m).
De 7,8 a 8	Arcilla con indicios de limo, color pardo oscuro.
De 8 a 9	Limos con indicios de arcilla.
De 9 a 9,2	Arcilla con indicios de limo color pardo rojizo.

De 9,2 a 9,6	Limo con bastante arcilla.
De 9,6 a 10	Grava limosa mal graduada , con indicios de arena de grano fino. Centil 40 mm. Nivel de 10 cm de arcilla a 9,7 m.
De 10 a 10,6	Limos con indicios de arcilla, color pardo oscuro. De 10,3 m a 10,4 m los indicios pasan a algo de.
De 10,6 a 10,95	Arena de grano fino limosa, color pardo oscura. (Muestra M - 4.4 a 10,6 m).
De 10,95 a 12,1	Limo con bastante arcilla, color pardo oscuro. A 11,10 m dique de 10 cm de arcilla color pardo claro.
De 12,1 a 12,7	Arena de grano fino limosa, color pardo oscuro. (Muestra M - 4.5 a 12,1 m)
De 12,7 a 13,8	Arena de grano fino arcillosa, color pardo oscuro.
De 13,8 a 14,35	Limo con bastante arcilla, color pardo oscuro.
De 14,35 a 14,6	Limo con algo de arcilla, color pardo rojizo.
De 14,6 a 15	Limo con bastante arcilla, color pardo oscuro.
De 15 a 15,2	Arcilla limosa, color pardo oscuro.
De 15,2 a 15,75	Limos con indicios de arcilla, color pardo oscuro. A 15,6 m aparecen indicios de arena de grano medio y fino.
De 15,75 a 16,1	Grava limosa mal graduada de esfericidad, con algo de arena de grano medio y fino
De 16,1 a 17	Gravas limosas mal graduadas con esfericidad irregular, y arena de grano medio y fino. Centil 50 mm. Clastos silíceos y calizos.
De 17 a 48	Grava, arena de grano medio y fino, y limo. Color pardo oscuro.
De 48 a 53	Margas de color gris oscuro, con arena de grano medio.

---

**Litología del sondeo - 5 (N° IPA 2139/2/0026).**

---

De 0 a 4,4	Arcilla con bastante limo, color pardo oscuro. (Muestra M - 5.1 a 1,3 m). La arcilla con bastante limo, pasa a algo de limo desde 3,4 m a 3,6 m.
De 4,4 a 5,1	Limos con bastante arcilla, color pardo rojizo.
De 5,1 a 5,6	Limos con algo de arcilla.
De 5,6 a 7	Limos con indicios de arcilla. ( Muestra M - 5.2 a 5,6 m).
De 7 a 8	Limos con algo de arcilla, color pardo oscuro. (Muestra M - 5.3 a 8 m).
De 8 a 9	Limos con indicios de arcilla , color pardo oscuro.
De 9 a 9,4	Gravas mal graduadas con pocos finos, y matriz arcillosa. Centil 50 mm.
De 9,4 a 9,6	Limos con indicios de arcilla , color pardo oscuro.
De 9,6 a 9,8	Arena de grano fino graduada, con indicios de arcilla.
De 9,8 a 12,05	Limos con indicios de arcilla. (Muestra M - 5.4 a 9,8 m).
De 12,5 a 12,45	Arena de grano fino, con algo de arcilla.
De 12,45 a 14	Gravas calcáreas y silíceas mal graduadas. Centil 60 mm.
De 14 a 42	Grava, arena de grano medio y fino, y limo. Color pardo oscuro.
De 42 a 48	Arena de grano fino con bastante limo e indicios de arcilla color pardo claro. Desde los 45 m hasta los 47 m existen indicios de arena de grano medio.
De 48 a 53	Margas de color gris oscuro, con algo de arena de grano fino y medio.

Figura 6.2.- Sondeos de investigación. Esquemas de entubado.

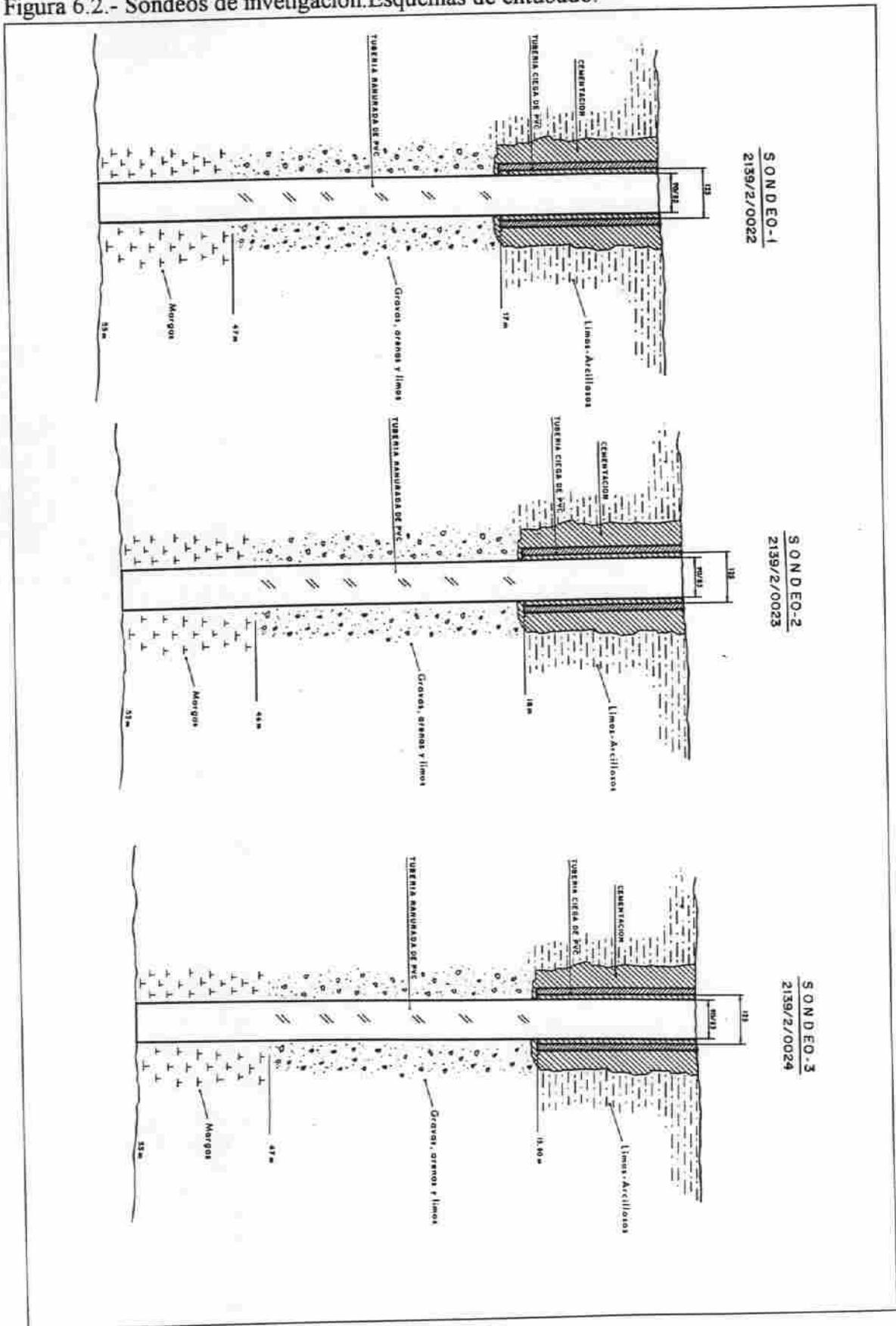
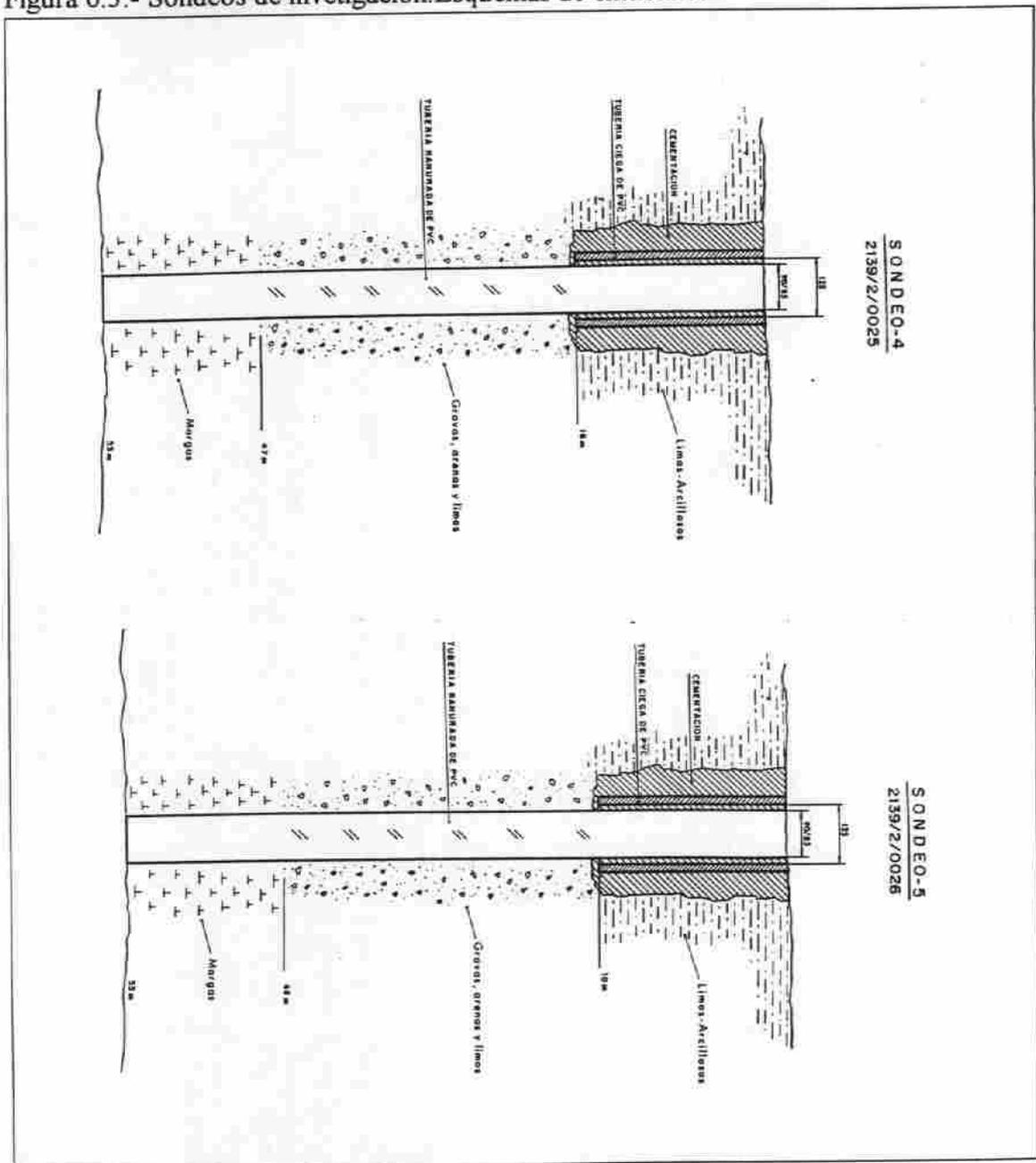


Figura 6.3.- Sondeos de investigación. Esquemas de entubado.



### 6.3.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS POZOS CON DRENES HORIZONTALES.

Para el control de la calidad hidroquímica y bacteriológica de la solución del suelo se han realizado dos pozos de 1,5 metros de diámetro y 3 metros de profundidad con seis taladros horizontales a diferentes profundidades. Los pozos están situados en el centro de cada una de las dos balsas de infiltración. La perforación de los dos pozos se ha realizado con una máquina rotativa modelo MAIT HR 110 de vástago telescópico. El detritos es evacuado con la cuchara de la propia máquina (bucket).

Los tubos utilizados para el revestimiento son de hormigón. Con un espesor de 80 mm, 1.500 mm de diámetro y 1.000 mm de longitud en cada tramo.

Se han realizado seis drenes horizontales en cada uno de los pozos, figuras 6.6 y 6.7. La máquina utilizada es de rotación, modelo COCHOBA, con inyección de agua a alta presión en circuito cerrado, con un consumo de agua de unos 50 litros por metro lineal.

El entubado de cada dren es de PVC de 90 mm de diámetro. Con ranuras en la parte superior, excepto el primer metro, que es ciego para evitar captar el agua que percola por el perímetro del pozo, así como para poder almacenar el agua drenada por la formación. El terreno que rodea el pozo ha sido alterado, en algunos decímetros, por la propia máquina de perforación.

Todos los drenes tienen una pendiente positiva de un 2 % para favorecer la toma de muestras, excepto los que están a menor profundidad que tienen un 1 %, para evitar que el tubo de PVC aflore en la balsa de infiltración.

Las características constructivas más relevantes se resumen en las tablas 6.5 y 6.7 y en el plano de detalle de entubado de los pozos y de los drenes horizontales, figuras 6.7 y 6.8.

Figura 6.4.- Pozos de gran diámetro para el muestreo de la solución del suelo.



Figura 6.5.- Sistema de drenes horizontales y grifos para la toma de muestras.



Figura 6.6.- Sección del pozo de control A.

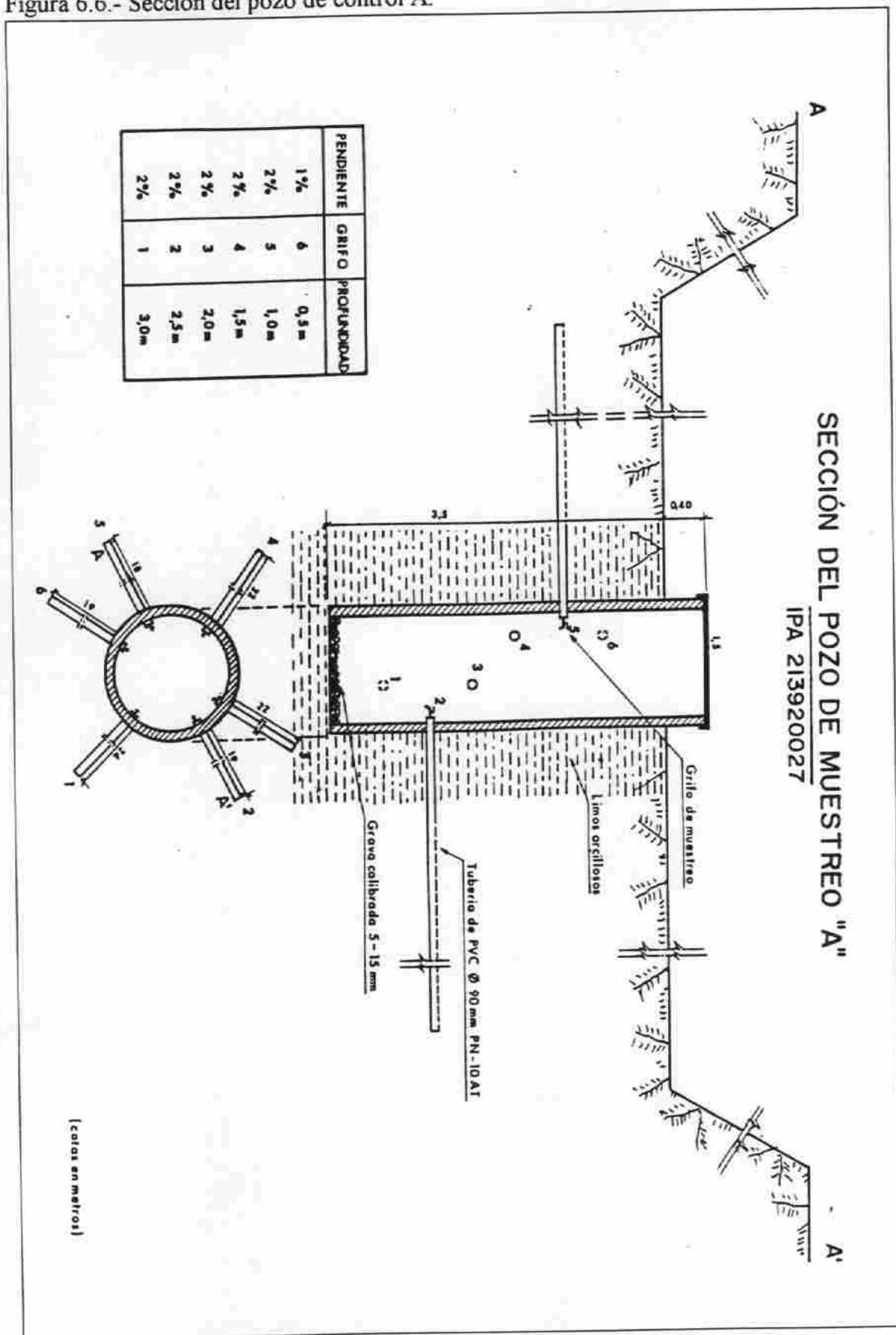


Figura 6.7.- Sección del pozo de control B.

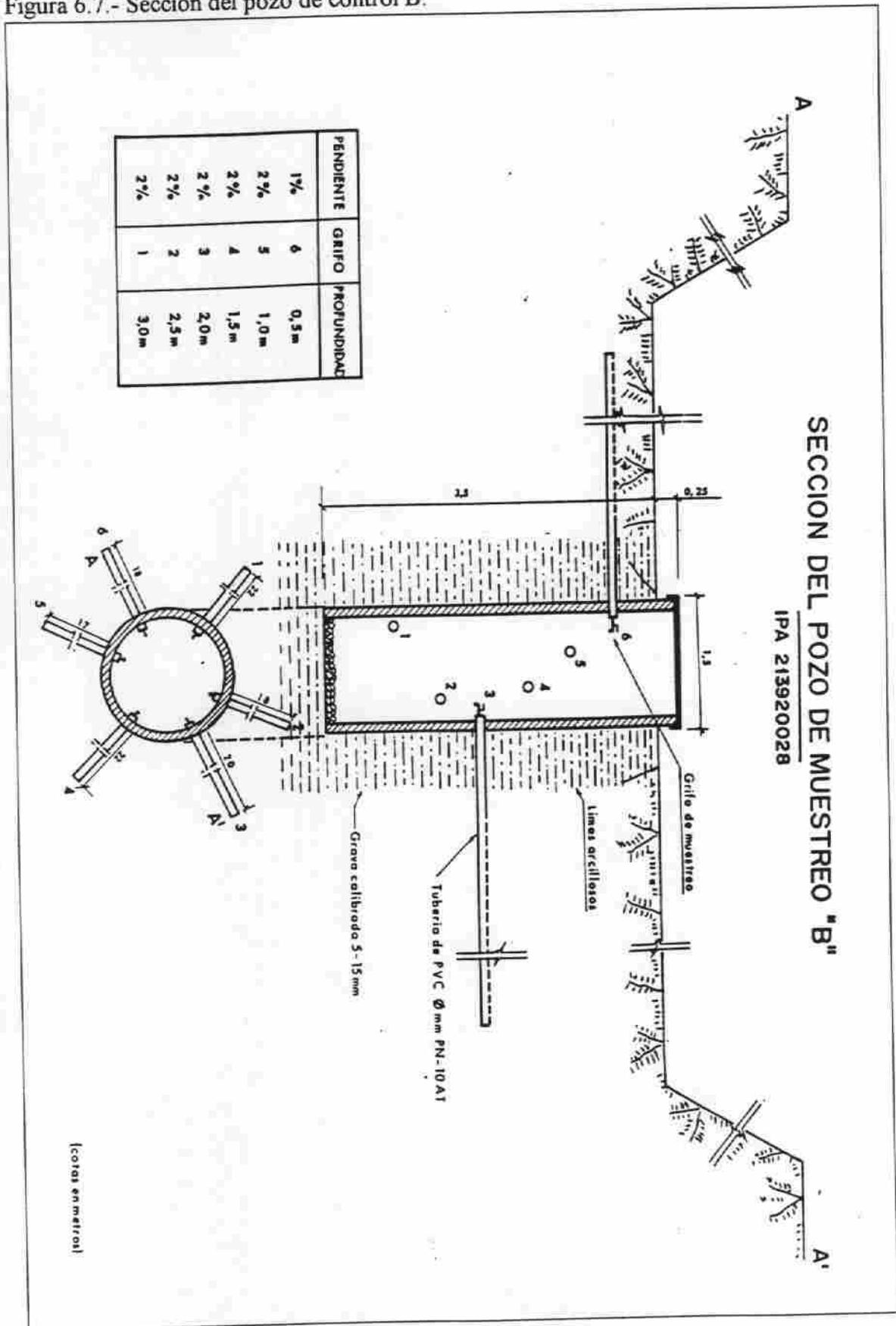


Tabla 6.5.- Características constructivas de los drenes horizontales.

	Profundidad (m)		Longitud (m)		Diámetro (mm)		Pendiente (%)	
	Pozo A	Pozo B	Pozo A	Pozo B	Pozo A	Pozo B	Pozo A	Pozo B
<b>DREN N°6</b>	0,5	0,5	24	22	90	90	1	1
<b>DREN N°5</b>	1	1,0	19	18	90	90	2	2
<b>DREN N°4</b>	1,5	1,5	22	20	90	90	2	2
<b>DREN N°3</b>	2	2	22	22	90	90	2	2
<b>DREN N°2</b>	2,5	2,5	18	17	90	90	2	2
<b>DREN N°1</b>	3	3	19	18	90	90	2	2

Tabla 6.6.- Litología de los drenes horizontales del pozo A.

Dren	Profundidad	Longitud	Litología
6	0,5 m	24 m	Arcilla con indicios de limo, color pardo oscuro
5	1,0 m	19 m	Arcilla con algo de limo, color pardo oscuro
4	1,5 m	22 m	Arcilla con indicios de limo, color pardo rojizo
3	2,0 m	22 m	Arcilla con indicios de limo, color pardo rojizo
2	2,5 m	18 m	Arcilla con indicios de limo, color pardo rojizo
1	3,0 m	19 m	Arcilla con indicios de limo, color pardo rojizo

Tabla 6.7.- Litología de los drenes horizontales del pozo B.

Dren	Profundidad	Longitud	Litología
6	0,5 m	22 m	Arcilla poco plástica con bastante limo, color pardo oscuro
5	1,0 m	18 m	Arcilla con bastante limo, color pardo oscuro
4	1,5 m	20 m	Arcilla con bastante limo, color pardo oscuro
3	2,0 m	22 m	Arcilla con bastante limo, color pardo oscuro
2	2,5 m	17 m	Arcilla con bastante limo, color pardo oscuro
1	3,0 m	19 m	Arcilla con bastante limo, color pardo oscuro