



FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA

**MOVILIDAD DEL NITRÓGENO, FOSFORO Y METALES
PESADOS, SU RELACIÓN CON LA ZONA EDÁFICA Y
LA AFECCIÓN PRODUCIDA EN LA CUENCA DEL RÍO
GUADARRAMA.**

Memoria de investigación presentada por:
D^a María Luisa Anguiano Mañero
para la obtención del grado de Doctora en Ciencias

María Luisa Anguiano Mañero

Licenciada en CC. Químicas

Directores:

Prof^a. Dra. D^a. Carmen Gómez Artola

Prof. Dr. D. Benito Lacalle Pareja

Madrid, Julio 2010

D^a Carmen Gómez Artola, Doctora en CC. Químicas e Hidrogeóloga y Profesora Titular del Departamento de Geología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid, y

D. Benito Lacalle Pareja, Doctor en CC. Químicas y Profesor Titular del Departamento de Ciencias Ambientales de la Facultad de Ciencias de la Universidad Católica Española Universitaria (C.E.U) de San Pablo de Madrid,

CERTIFICAN

Que D^a. María Luisa Anguiano Mañero, licenciada en CC. Químicas, ha realizado bajo su dirección el trabajo titulado “*Movilidad del Nitrógeno, Fósforo y Metales Pesados, su relación con la zona edáfica y la afección producida en la Cuenca del río Guadarrama*”, que reúne los requisitos necesarios para ser presentado como Tesis Doctoral

Madrid, 16 de Julio de 2.010

Dra. Carmen Gómez Artola

Dr. Benito Lacalle Pareja

A mi familia,

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero mostrar mi profundo agradecimiento a mis directores de Tesis, la Dra. Carmen Gómez Artola y el Dr. Benito Lacalle Pareja, por la confianza que me han transmitido para realizar este trabajo, y sin cuya ayuda y colaboración no habría sido posible realizar esta Tesis.

Deseo agradecer al Departamento de Ciencias Ambientales del C.E.U de Madrid y al departamento de Geología y Geoquímica de la U.A.M el soporte material, de espacio físico y científico que me ha facilitado para el desarrollo de este trabajo de investigación. Merecen un agradecimiento especial, la Dra. M^a Teresa Domínguez (CEU), y Dra. Ana Álvarez (UAM) por su colaboración desinteresada en este trabajo. A la Sra. Amalia Álvarez le agradezco su apoyo sobre temas administrativos y por su incansable amabilidad.

A mi marido, Enrique Hernández Torrego, mi compañero de viaje, que gracias a su amor, su sonrisa diaria, su ánimo para superar las horas más bajas, su comprensión y su apoyo incondicional han sido clave para poder finalizar esta Tesis.

A mis padres y hermano, que siempre serán mi inspiración para alcanzar mis metas, por enseñarme que todo se aprende y que todo esfuerzo es al final recompensa, y gracias a ellos estoy aquí.

En general quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis doctoral, les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se han estudiado y analizado en la cuenca del río Guadarrama, la evolución espacio-temporal de algunos parámetros físico-químicos de sus aguas, con objeto de determinar el coeficiente de exportación y transporte de nutrientes o carga de nutrientes en el mismo, lo que va a permitir conocer el estado y la problemática asociada a la cuenca de estudio desde un punto de vista hidroquímico y ambiental. También se han estudiado las distintas formas de las especies químicas, el contenido de fósforo en el agua y en los suelos del entorno del cauce del río, la caracterización general de los suelos y el estudio del efecto de la deposición de contaminantes sobre la fauna edáfica. Además se contempla el estudio de los aportes de nutrientes (N y P), y la variación del quimismo de las aguas durante un eventos de tormenta en la cuenca alta del río Guadarrama.

Para la realización de la presente memoria de investigación se han tenido en cuenta numerosos trabajos e informes previos existentes, con una recopilación bibliográfica exhaustiva de la información cartográfica, así como análisis estadísticos, trabajos de campo y de laboratorio.

El procedimiento seguido ha sido estudiar en una primera aproximación la cuenca del río Guadarrama en su conjunto; esto comprende el estudio de la climatología, relieve, geología, hidrología e hidrogeología, cubierta vegetal, usos y tipos de suelo, y la fauna edáfica que existe. Todos estos factores condicionan el funcionamiento de la cuenca y nos han permitido dividir la cuenca en subcuencas con características más o menos homogéneas en cuanto a éstos factores y los usos del suelo. Con éste criterio se ha establecido una red de 10 puntos de muestreo en los que se ha recogido el agua del río Guadarrama, midiendo el caudal y los parámetros ambientales, así como muestras de suelos en el entorno de cada punto seleccionado.

El muestreo del agua de escorrentía del río Guadarrama se efectuó mensualmente durante un año. Desde febrero de 2006 hasta enero de 2007. Adicionalmente, se realizó un muestreo de materiales de arrastre de fondo del cauce del río Guadarrama para la caracterización de fosfatos el día 8 de enero del 2007.

Al objeto de reconocer posibles variaciones del quimismo y aportación de nutrientes del río Guadarrama en cortos temporales, se realizó un muestreo intensivo de veinticuatro horas, el día 24/10/06. Aprovechando el paso de un frente sobre la Península Ibérica y después de periodos secos del verano para controlar el lavado del terreno y la variación del quimismo del río Guadarrama. El muestreo de suelo se llevó a cabo durante las dos primeras semanas del mes de febrero de 2006, donde se separaron dos fracciones, una para determinar la edafofauna del suelo y otra para el análisis edafológico. También, se realizó un muestreo de suelo próximo al cauce de la cuenca del río Guadarrama para la caracterización de las formas del fósforo el día 15/11/2006.

Para la caracterización de las aguas se analizaron "in situ" los siguientes parámetros: pH, caudal circulante en el momento de la toma, temperatura del aire,

temperatura del agua, aspecto del agua, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, turbidez. Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los iones fundamentales en el agua (CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), así como los sólidos suspendidos, demanda química y bioquímica de oxígeno, y por último se determinaron los metales pesados (Cu, Cd, Ni, Zn y Cr) más característicos de contaminación antrópica.

El estudio de los procesos de eutrofización de las aguas conlleva a escoger como parámetros químicos y ambientales significativos, los compuestos nitrogenados solubles (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , Norg), y los compuestos del fósforo (PO_4^{3-} y P orgánico). Por este motivos se han determinado la concentración de estas especies químicas en el laboratorio para posteriormente calcular la cantidad de fósforo y nitrógeno que se origina en la cuenca del río Guadarrama en un año.

La determinación de fosfatos en las aguas requirió el cálculo de fósforo particulado y de fósforo disuelto. Así mismo, la determinación de fosfatos en los suelos requirió el cálculo de fósforo particulado.

En la caracterización de los suelos se analizaron los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno total, textura, Color, y se determinaron los metales pesados (Cu, Cd, Ni, Zn y Cr).

Para el estudio del estado de las aguas se calculó el Índice Simplificado de Calidad del Agua. Para establecer los criterios de calidad de agua se ha utilizado el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, que será nuestro Marco de Referencia.

Con todos los datos obtenidos se realizó análisis multivariante obteniéndose las diferentes matrices de correlación donde aparecen las correlaciones entre los distintos parámetros. Este análisis nos va a permitir predecir el aporte de nitrógeno y fósforo con las variaciones de la escorrentía.

Se calculó el coeficiente de exportación o producción unitaria de nitrógeno y fósforo para toda la cuenca y para la subcuenca 2 en el evento de tormenta. Para obtener el coeficiente de exportación de nutrientes para toda la cuenca de estudio se calculó las distintas superficies de las distintas subcuencas. Los coeficientes de exportación se expresan en $\text{g/m}^2/\text{año}$ y constituyen una herramienta para obtener de forma fácil y sencilla la producción de nutrientes de otras cuencas que tengan características semejantes a la nuestra, de manera que permita resolver los problemas ambientales que se planteen en relación con los compuestos de nitrógeno y fósforo.

Los resultados finales indican que existe una relación directa en la mayoría de los casos entre la movilidad del nitrógeno y fósforo, el suelo y el uso del territorio en la cuenca del río Guadarrama.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	CAPÍTULO I - PLANEAMIENTO GENERAL	10
1.1	Introducción	11
1.2	Problemática ambiental planteada	11
1.3	Objetivos	12
1.4	Estado del Arte	15
1.5	Características Generales	17
1.5.1	<i>Calidad del Agua</i>	17
1.5.2	<i>Metales Pesados</i>	17
1.5.3	<i>Formas del fósforo</i>	18
1.5.4	<i>Sistemas bioindicadores</i>	20
1.5.5	<i>Transporte de nutrientes</i>	21
1.5.6	<i>Coeficiente de exportación</i>	29
1.5.7	<i>Evento de tormenta</i>	31
1.6	Estructura de trabajo seguida	32
1.7	Normativa	36
2	CAPÍTULO II - MARCO DE LA CUENCA DE ESTUDIO	37
2.1	Introducción	38
2.2	Localización de la cuenca y puntos del estudio	39
2.3	Climatología y vegetación	43
2.3.1	<i>Climatología</i>	43
2.3.2	<i>Vegetación</i>	46
2.4	Hidrología	50
2.5	Geología	54
2.6	Edafología y edafofauna	58

2.6.1	<i>Edafología</i>	58
2.6.2	<i>Edafofauna</i>	61
2.7	Población, usos del territorio y su relación con la zona de estudio.....	64
3	CAPÍTULO III - METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	73
3.1	Introducción.....	74
3.2	Metodología de los muestreos en la cuenca de estudio	74
3.2.1	<i>Parámetros analizados</i>	75
3.2.2	<i>Origen de los parámetros analizados en el agua</i>	83
3.2.3	<i>Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQUA)</i>	89
3.2.4	<i>Longitud y caudales en la cuenca de estudio</i>	91
3.3	Determinación del coeficiente de exportación de nutrientes en la cuenca de estudio.....	94
3.3.1	<i>Variación de la concentración de nutrientes con el caudal</i>	94
3.3.2	<i>Cargas y coeficientes de exportación de nutrientes</i>	96
3.4	Metodología y análisis del evento de tormenta	99
3.5	Caracterización de las formas del fósforo en la zona de estudio.....	99
3.5.1	<i>Formas en las que se encuentra el fósforo</i>	99
3.5.2	<i>Extracción del fósforo particulado por diferentes métodos</i>	100
3.5.3	<i>Contenido de fósforo en el agua y en el suelo</i>	101
3.6	Determinación de la edafofauna en la zona de estudio	102
3.6.1	<i>En suelos naturales</i>	102
3.6.2	<i>En suelos contaminados por metales pesados (Cu, Cd, Ni, Zn y Cr)</i>	103
3.6.3	<i>Caracterización general de la edafofauna de los suelos de las parcelas experimentales</i>	103
3.7	Tratamientos estadísticos	107
4	CAPÍTULO IV - RESULTADOS	109
4.1	Introducción.....	110

4.2	Caracterización del agua en la cuenca de estudio	110
4.2.1	<i>Datos obtenidos de los parámetros considerados</i>	110
4.2.2	<i>Relación entre los parámetros considerados</i>	120
4.2.3	<i>Evolución de los parámetros considerados</i>	124
4.2.4	<i>Clasificación de las aguas</i>	165
4.2.5	<i>Metales pesados en las aguas</i>	177
4.2.6	<i>Datos obtenidos de la determinación del Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQUA)</i>	179
4.2.7	<i>Longitud de la cuenca de estudio</i>	182
4.3	Determinación del coeficiente de exportación de nutrientes en la cuenca de estudio.....	187
4.3.1	<i>Variación de la concentración de nutrientes con el caudal</i>	187
4.3.2	<i>Cargas y coeficientes de exportación de nutrientes</i>	196
4.4	Datos obtenidos en el evento de tormenta	203
4.5	Datos obtenidos en la caracterización del suelo en la cuenca de estudio.....	209
4.5.1	<i>Análisis granulométrico:</i>	209
4.5.2	<i>Determinación del color del suelo:</i>	210
4.5.3	<i>Determinación del pH del suelo:</i>	211
4.5.4	<i>Determinación de la conductividad del suelo:</i>	211
4.5.5	<i>Determinación del carbono total y la materia orgánica del suelo:</i>	212
4.5.6	<i>Determinación del pH del nitrógeno total y la relación C/N:</i>	214
4.5.7	<i>Determinación de los metales traza:</i>	215
4.6	Datos obtenidos en el estudio de las formas de fósforo en la zona de estudio .	217
4.6.1	<i>Curso medio del río Guadarrama</i>	217
4.6.2	<i>Curso alto y bajo del río Guadarrama</i>	225
4.6.3	<i>Comparación de las formas de fósforo del río Guadarrama</i>	226
4.6.4	<i>Formas del fósforo en el suelo</i>	228

4.7	Datos obtenidos en la determinación de la edafofauna en la cuenca de estudio	230
4.7.1	<i>En suelos naturales</i>	230
5	CONCLUSIONES	237
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	243

I - ANEJOS

A) ANEJOS MARCO DE LA CUENCA DE ESTUDIO

- ✚ **ANEJO 1.1:** Evolución de la densidad de población en los municipios ubicados en la subcuenca alta y subcuenca media de la zona de estudio, para el período 1985-2009 (Fuente: Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid)
- ✚ **ANEJO 1.2:** Datos de evolución de la población y superficie en los municipios ubicados en la subcuenca baja de la zona de estudio, para el período 1986-2009 (Fuente: I.N.E)
- ✚ **ANEJO 1.3:** Evolución de la densidad de población en los municipios ubicados en la subcuenca baja de la zona de estudio, para el período 1986-2009 (Fuente: Elaboración propia)

B) ANEJOS METODOLOGIA DE TRABAJO

- ✚ **ANEJO 1.4:** Metodología para la toma y preservación de muestras de agua
- ✚ **ANEJO 1.5:** Procedimiento de toma de muestras para el cálculo de fósforo particulado
- ✚ **ANEJO 1.6:** Metodología para la toma de muestras de suelo para su posterior análisis edafológico
- ✚ **ANEJO 1.7:** Determinación de metales pesados mediante la técnica TXRF
- ✚ **ANEJO 1.8:** Determinación del Nitrógeno Total por el método Kjeldahl y cálculos
- ✚ **ANEJO 1.9:** Medida del fósforo por colorimetría
- ✚ **ANEJO 1.10:** MÉTODO EPA 3051 M
- ✚ **ANEJO 1.11:** Conversión de la concentración de 1.000 p.p.m de los metales Cu, Cd, Ni, Zn y Cr para comprobar la relación entre la existencia de estos metales y la edafofauna

C) ANEJOS RESULTADOS

- ✚ **ANEJO 1.12:** Datos de aforo y parámetros analíticos en los puntos de muestreo de la cuenca del río Guadarrama para el período 2006-2007
- ✚ **ANEJO 1.13:** Clasificación mensual de las aguas en los puntos de muestreo de la cuenca del río Guadarrama para el período 2006-2007
- ✚ **ANEJO 1.14:** Clasificación de las aguas para riego (S.A.R) . Normas Riverside.
- ✚ **ANEJO 1.15:** Diagramas de riverside mensuales de los puntos de muestreo
- ✚ **ANEJO 1.16:** Cantidad de material litológico recogido en 5 s en distintos puntos de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **ANEJO 1.17:** Resultados de la determinación de la biodiversidad de la mesofauna en suelo natural

D) OTROS ANEJOS

- ✚ **ANEJO 1.18:** Glosario de símbolos y/o abreviaturas.

II – ÍNDICE DE FIGURAS

- ✚ **Figura 1:** Magnificación del impacto de la contaminación en el ecosistema edáfico
- ✚ **Figura 2.1, 2.2, 2.3:** Ciclos de los nutrientes nitrógeno y fósforo (en el suelo y agua)
- ✚ **Figura 5.1, 5.2, 5.3:** Técnicas de gabinete; Técnicas de laboratorio y de campo; Metodología de trabajo
- ✚ **Figura 6:** Normativa
- ✚ **Figura 7:** Mapa de situación de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 8:** Mapa de clasificación climática de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 9:** Subcuenas hidrográficas de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 10:** Geología de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 11:** Edafología de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 12.1, 12.2, 12.3:** Densidad de población en la cuenca alta, media y baja de estudio
- ✚ **Figura 13:** Representación triangular de Feret. Clases Texturales
- ✚ **Figura 14:** Tipos de curvas teóricas representativas de la correlación entre concentraciones de nutrientes y caudales
- ✚ **Figura 15:** Metodología del cálculo del coeficiente de exportación de nutrientes
- ✚ **Figura 16:** Variación entre los caudales medios en la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 17:** Variación entre las conductividades medias en la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 18:** Variación entre los distintos parámetros analizados de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 19.1, 19.2, 19.3:** Evolución de los parámetros en el punto nº 1 - E. Navalmedio
- ✚ **Figura 20.1, 20.2, 20.3:** Evolución de los parámetros en el punto nº 2 – V. Fuenfría
- ✚ **Figura 21.1, 21.2, 21.3:** Evolución de los parámetros en el punto nº 3 – Cercedilla (pueblo)
- ✚ **Figura 22.1, 22.2, 22.3:** Evolución de los parámetros en el punto nº 4 – Guadarrama (pueblo)
- ✚ **Figura 23.1, 23.2, 23.3:** Evolución de los parámetros en el punto nº 5 – Pto.Cruz Verde (El Escorial)
- ✚ **Figura 24.1, 24.2, 24.3:** Evolución de los parámetros en el punto nº 6 - Galapagar- La Navata
- ✚ **Figura 25.1, 25.2, 25.3:** Evolución de los parámetros en el punto nº 7 - E. Molino de la Hoz (Pte.Romano)
- ✚ **Figura 26.1, 26.2, 26.3:** Evolución de los parámetros en el punto nº 8 - Móstoles (urb.Guadarrama)
- ✚ **Figura 27.1, 27.2, 27.3:** Evolución de los parámetros en el punto nº 9 - Batres
- ✚ **Figura 28.1, 28.2, 28.3:** Evolución de los parámetros en el punto nº 10 - Bargas
- ✚ **Figura 29:** Clasificación de las aguas de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 30:** Diagrama de Schoeller-Berkaloff para los puntos de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 31:** Clasificación de las aguas para riego en la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 32:** Metales Pesados en las aguas
- ✚ **Figura 33:** Clasificación de las aguas según el ISQUA en la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 34:** Evolución de la longitud de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 35:** Evolución de la longitud de la cuenca del río Aulencia
- ✚ **Figura 36.1, 36.2:** Curvas de regresión (Concentración de N_T y/o P_T frente al Caudal)
- ✚ **Figura 37.1, 37.2:** Variación del caudal (l/s), y precipitación durante el evento de tormenta
- ✚ **Figura 38:** Parámetros analizados durante el evento de tormenta
- ✚ **Figura 39:** Concentraciones de ortofosfatos y fósforo total en kg/ g/año de suelo para el punto de Galapagar
- ✚ **Figura 40:** Concentraciones de ortofosfatos y fósforo total en kg/ g/año de suelo para el punto de E. Molino de la Hoz
- ✚ **Figura 41:** Concentraciones de Pdisuelto kg/gsuelo/año en los puntos del curso alto-medio-bajo de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 42:** Concentraciones de Pparticulado kg/gsuelo/año en los puntos del curso alto-medio-bajo de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Figura 43:** Porcentaje de colémbolos en suelos naturales
- ✚ **Figura 44:** Porcentaje de ácaros en suelos naturales
- ✚ **Figura 45:** Porcentaje de colémbolos en suelos contaminados por metales pesados
- ✚ **Figura 46:** Porcentaje de ácaros en suelos contaminados por metales pesados

III – ÍNDICE DE TABLAS

- ✚ **Tabla 1:** Aportación de nutrientes a través de tributarios
- ✚ **Tabla 2:** Coeficiente de exportación de nutrientes por escorrentía del terreno
- ✚ **Tabla 3:** Cantidades de N y P aportadas por distintas fuentes de nutrientes
- ✚ **Tabla 4:** Descripción de puntos los muestreo de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Tabla 5.1, 5.2, 5.3:** Datos climáticos de la cuenca alta, media y baja del río Guadarrama
- ✚ **Tabla 6:** Vegetación “in situ” de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Tabla 7:** Superficies de las subcuencas hidrográficas
- ✚ **Tabla 8.1, 8.2:** Litología de la cuenca del Guadarrama y del las distintas subcuencas del río Guadarrama
- ✚ **Tabla 9:** Evolución de la densidad de población, en los municipios ubicados sobre la cuenca alta, media y baja del río Guadarrama
- ✚ **Tabla 10.1, 10.2, 10.3 y 10.4:** Densidad de población en los municipios de la cuenca del río Guadarrama en 1986, 1996, 2006 y 2009
- ✚ **Tabla 11:** Cuantificación de los usos del suelo en la zona de estudio
- ✚ **Tabla 12:** Equipos y métodos utilizados en los distintos análisis
- ✚ **Tabla 13:** Variación del pH en el agua
- ✚ **Tabla 14:** Variación del oxígeno disuelto en el agua
- ✚ **Tabla 15:** Variación de la DBO en el agua
- ✚ **Tabla 16:** Rangos de clasificación del ISQUA en función del uso del agua
- ✚ **Tabla 17:** Métodos utilizados para la extracción de fósforo particulado
- ✚ **Tabla 18.1, 18.2:** Relación de valores máximos, medios y mínimos de los distintos parámetros en los puntos de muestreo de la cuenca de estudio; Factor de Biodegradabilidad
- ✚ **Tabla 19:** Correlación de Spearman entre los parámetros considerados
- ✚ **Tabla 20:** Clasificación de las aguas de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Tabla 21:** Concentración de Metales Pesados presentes en el río Guadarrama y límites permisible según legislación española
- ✚ **Tabla 22:** Resultados obtenidos de la determinación del Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQUA en la cuenca del río Guadarrama)
- ✚ **Tabla 23:** Longitud de la cuenca del río Navalmedio
- ✚ **Tabla 24:** Longitud de la cuenca del río Aulencia
- ✚ **Tabla 25.1, 25.2, 25.3:** Longitud de la cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Tabla 26.1, 26.2:** Ecuaciones de regresión y Matrices del N_T y P_T con el caudal en los distintos puntos de muestreo
- ✚ **Tabla 27:** Resultados de las cargas y coeficientes de exportación de N_T y P_T en la Cuenca del río Guadarrama
- ✚ **Tabla 28.1, 28.2:** Parámetros analizados in situ y laboratorio durante el evento de tormenta
- ✚ **Tabla 29:** Correlación de Spearman del evento de tormenta
- ✚ **Tabla 30:** Resultados de los análisis granulométrico ($d=g/cc$) en los distintos puntos de muestreo de estudio
- ✚ **Tabla 31:** Color del suelo en los distintos puntos de muestreo de estudio
- ✚ **Tabla 32:** pH del suelo en los distintos puntos de muestreo de estudio
- ✚ **Tabla 33:** Conductividad del suelo en los distintos puntos de muestreo de estudio
- ✚ **Tabla 34:** Carbono total y materia orgánica del suelo en los distintos puntos de muestreo de estudio
- ✚ **Tabla 35:** Nitrógeno total y C/N del suelo en los distintos puntos de muestreo de estudio

- ✚ **Tabla 36:** Concentración de los metales pesados (mg/kg de suelo) en las distintas muestras de estudio
- ✚ **Tabla 37:** Niveles de referencia para metales pesados en varias comunidades españolas
- ✚ **Tabla 38:** Valores límite de concentración de metales pesados (mg/Kg) según el R.D 1310/1990
- ✚ **Tabla 39:** Resultados en extracto acuoso para las muestras de Galapagar
- ✚ **Tabla 40:** Resultados en extracto acuoso para las muestras de E. Molino de la Hoz
- ✚ **Tabla 41:** Medidas de fósforo referidas a gramos de suelo para las muestras de Galapagar
- ✚ **Tabla 42:** Medidas de fósforo referidas a gramos de suelo para las muestras de E. Molino de la Hoz
- ✚ **Tabla 43:** Resultados obtenidos de kg de fósforo transportados al año por los diferentes métodos para el punto de Galapagar
- ✚ **Tabla 44:** Resultados obtenidos de kg de fósforo transportados al año por los diferentes métodos para el punto de E. Molino de la Hoz
- ✚ **Tabla 45:** Porcentajes de ortofosfatos y fósforo total (fósforo disuelto y particulado) para los puntos de muestreo
- ✚ **Tabla 46:** Resultados del fósforo disuelto en los puntos de E. Navalmedio, Cercedilla, Móstoles y Bargas
- ✚ **Tabla 47:** Resultados del fósforo particulado en los distintos puntos
- ✚ **Tabla 48:** Porcentajes de ortofosfatos y fósforo total en los distintos puntos
- ✚ **Tabla 49:** Concentraciones de las formas del fósforo en la zona de estudio
- ✚ **Tabla 50:** Mesofauna encontrada en suelos naturales
- ✚ **Tabla 51:** Mesofauna encontrada en suelos contaminados por metales pesados
- ✚ **Tabla 52:** Correlaciones entre los diferentes parámetros del suelo y los colémbolos en suelo contaminado por metales pesados
- ✚ **Tabla 53:** Correlaciones entre los diferentes parámetros del suelo y los ácaros en suelo contaminado por metales pesados

CAPÍTULO I

PLANEAMIENTO GENERAL

1.1 Introducción

En este capítulo se hace referencia a la problemática ambiental e hidroquímica planteada, los objetivos para llegar a obtener el coeficiente de exportación, estado del arte, las características generales de la cuenca y el resto de parámetros, para pasar por último, a describir la estructura de trabajo seguida y la normativa aplicada.

1.2 Problemática ambiental planteada

Actualmente existe un gran interés en la Unión Europea en el diseño de estrategias que supongan una compatibilidad entre la viabilidad económica, social y medioambiental de ecosistemas naturales, así como el mantenimiento de la biodiversidad inherente a los mismos. Por esta razón, las decisiones futuras deberían incluir previsiones para mantener la integridad de los distintos ecosistemas de una forma medioambientalmente sostenible.

El incremento demográfico de la población está íntimamente ligado a la producción agrícola y al desarrollo industrial. Actualmente el impacto de estas actividades afecta a más del 95% del medio ambiente edáfico, y tiene consecuencias adversas sobre las distintas especies de organismos que componen la biodiversidad y que interactúan dentro del ecosistema del que forman parte.

La regulación interna del funcionamiento de los ecosistemas edáficos naturales es producto de la biodiversidad, que opera a través de los flujos de energía, de nutrientes y de sinergias biológicas. Sin embargo, los procesos de autorregulación que la biodiversidad edáfica propicia, se ven distorsionados debido a los cambios de uso del suelo, que con frecuencia empobrecen y alteran su comunidad biológica.

En lo concerniente a los ecosistemas de agua dulce, hay que tener en cuenta que estos están ligados a la cuenca o a la zona de influencia de las que forman parte, e influenciados por los usos y las modificaciones que realiza el ser humano del terreno y del agua, que van a modificar sustancialmente el aporte de nutrientes.

Centrándonos en la eutrofización de las aguas superficiales continentales, ésta representa una serie amenaza para todos los ecosistemas que habitan en las masas de agua afectadas y representa una merma importante para su utilización directa en otros usos. Los problemas derivados de la eutrofización son múltiples y variados, al ser dependientes del espacio y del tiempo (inversiones térmicas que modifican la estratificación hidroquímica de las masas de agua, disminución del oxígeno disuelto en las mismas, etc.). Por lo tanto, este problema ambiental nos conduce a calcular los "coeficientes de exportación" correspondientes a las condiciones reales de una cuenca y así poder extrapolar los resultados obtenidos a otras cuencas de similares características mediante el método indirecto de evaluación.

En los últimos años, las actuaciones de la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio en relación al agua se han centrado en la mejora de su calidad así como en la protección y control ambiental de la misma, y para ello se ha desarrollado el concepto de carga contaminante en un río, de hecho algunas comunidades autónomas ya aplican este concepto en industrias que son potencialmente fuente de nutrientes.

Así pues, este trabajo de investigación, complementa los estudios de calidad del agua superficial realizados hasta la fecha a lo largo de la cuenca del río Guadarrama, y abre una nueva línea de investigación en la cual se pretende integrar la mayor parte de los conocimientos de una cuenca para prever el funcionamiento y planificación territorial de la misma.

Dicha tesis tiene un enfoque multidisciplinar; en ella se engloban y complementan los distintos temas como son la calidad del agua, presencia de metales pesados en agua y suelo, las formas del fósforo en el agua y el suelo, el transporte de nutrientes, los coeficientes de exportación y la carga contaminante, y todos son estudiados espacial y temporalmente en la cuenca del río Guadarrama, situada dentro de la Comunidad de Madrid.

Todas estas tareas de investigación se incluyen en la presente tesis para optar al grado de Doctor en la Universidad Autónoma de Madrid.

En este trabajo de investigación se estudia la cuenca del río Guadarrama, situada en su mayor extensión (N-SSW) dentro de la Comunidad de Madrid y ocupando en menor extensión (NW) la provincia de Toledo. Su cabecera se asienta sobre los materiales graníticos del sector occidental de la Sierra de Guadarrama y el resto de la cuenca se sitúa sobre los materiales sedimentarios de la depresión terciaria del Tajo, formados en su mayor parte por materiales detríticos, que se van haciendo más finos a medida que el río desciende hacia el sur llegando a fases intermedias en su zona de desembocadura en el río Tajo, con algún tramo ya en zona salina. De hecho el nombre Guadarrama significa río de las "Arenas" en alusión a las arenas que porta y atraviesa dicho río.

1.3 Objetivos

El Parque Regional del Curso Medio del río Guadarrama y su Entorno, con una extensión aproximada de 22.116 hectáreas, se sitúa en la zona Oeste de la Comunidad de Madrid y abarca las márgenes y riberas del río Guadarrama. Una de las principales amenazas que actualmente sufre la zona es el crecimiento urbanístico que se está produciendo en los últimos años. Esta actividad urbanizadora, aunque se produzca fuera de los límites del espacio protegido, ejerce una fuerte presión sobre el mismo, siendo el principal responsable del deterioro ambiental (González, P., 2008).

Así, la Cuenca de río Guadarrama es una de las que presenta mayor contaminación dentro de la Comunidad de Madrid, sobre todo de origen agrícola y urbano. En ella se presume que los tres agentes contaminantes asociados a la eutrofización son los sedimentos, el N y el P.

Como hipótesis de partida consideramos el caudal como factor determinante, en la movilidad de nutrientes y la consecuente afección a la masa de agua superficial, como resultado de los nutrientes que se generan a través de la cuenca del río Guadarrama en función de los usos del territorio.

Así, mediante técnicas de análisis hidrológico, hidrogeoquímico y edafológico, y el empleo de herramientas hidrogeoquímicas e informáticas se puede modelizar la respuesta de un sistema fluvial y su dinámica ante la intervención antrópica en el mismo.

Este trabajo de investigación pretende por una parte cuantificar las pérdidas de fuentes específicas de nutrientes para diferentes vías de transporte de nutrientes y por otra considerar fuentes dispersas de nutrientes relacionadas con características específicas del suelo, condiciones hidrológicas, y prácticas antrópicas en cultivos, ganadería y urbanismo que influyan en el transporte de nutrientes en diferentes condiciones climáticas y geológicas.

Con los criterios anteriores, el objetivo general del presente trabajo de investigación es, ***“evaluar la producción de nitrógeno y fósforo a partir de fuentes de contaminación difusas y puntuales en la cuenca del río Guadarrama, y establecer la relación con la zona edáfica así como con los distintos usos del territorio en ésta cuenca”***.

Este objetivo global puede desarrollarse mediante una serie de objetivos específicos o particulares:

- Caracterización hidrogeológica e hidroquímica.
- Caracterizar espacial y temporalmente la dinámica de nutrientes (Nt y Pt) a lo largo de la cuenca del río Guadarrama.
- Establecimiento del balance global de nutrientes a lo largo de la cuenca del río Guadarrama.
- Caracterizar la respuesta del sistema fluvial del río Guadarrama ante las perturbaciones antrópicas, tanto directas como indirectas, estudiando el aumento de la concentración de las especies químicas más determinantes.

- Caracterizar la calidad del agua desde el punto de vista hidrogeoquímico en los distintos tramos del río Guadarrama, indicando el posible origen de los parámetros.
- Cálculo y evolución espacio-temporal del coeficiente de exportación de nutrientes a lo largo de la cuenca del río Guadarrama.

Una descripción detallada del desarrollo de lo anterior expuesto es:

- * Estudiar la evolución espacio-temporal de la calidad del agua del río, justificando las diferencias de los valores en los distintos puntos muestreados a lo largo del río Guadarrama.
- * Calcular el índice de calidad del agua (ISQUA) en los distintos tramos del río Guadarrama.
- * Analizar la evolución espacio-temporal del caudal a partir de los datos de aforo obtenidos en campo.
- * Analizar la influencia de la concentración de metales pesados en los distintos tramos del río Guadarrama.
- * Analizar el aporte de nutrientes y variaciones del quimismo en la cabecera del río Guadarrama durante las crecidas en el evento de tormenta.
- * Estudiar la evolución espacial de la calidad del suelo a lo largo del río Guadarrama, justificando las diferencias de los valores en los distintos puntos muestreados.
- * Estudiar del efecto de la deposición de contaminantes sobre la mesofauna edáfica, correspondientes a los suelos de los tramos de cabecera, medio y bajo del río Guadarrama.
- * Analizar la influencia de la concentración de metales pesados en la mesofauna edáfica, correspondiente a los suelos de los tramos de cabecera, medio y bajo del río Guadarrama.
- * Caracterización de la concentración de las formas del fósforo en el agua y el suelo, en el curso medio del río Guadarrama.
- * Recopilación de toda la información gráfica y digital disponible en un Sistema de Información Geográfica (Arcview 3.2), como herramienta de visualización y coordinación de todos los datos y resultados.

Y por último, el alcance de este trabajo de investigación es que pretende aportar una base de datos que permita su utilización posterior para cubrir otros muchos aspectos que no son objeto de ésta tesis, de manera que permita abrir futuras líneas de investigación y extrapolar la metodología de estudio a otras cuencas hidrográficas.

1.4 Estado del Arte

Como resultado de la fase de documentación previa se puede decir que en referencia a los temas de calidad del agua, la presencia de metales pesados en el agua y suelo, nutrientes y coeficiente de exportación se ha obtenido una amplia información de base sobre estudios anteriores a este trabajo de investigación científica. Sin embargo, en relación con los temas de las formas de fosfatos en agua y suelo, suelo-sistemas bioindicadores, y eventos de tormenta, de forma general la información recopilada es menos extensa, pero suficiente como para entrar dentro del alcance de ésta tesis.

La información se ha obtenido de multitud de fuentes bibliográficas pasando por organismos autonómicos, estatales, públicos, universidades, la red de Internet o web, etc., de los que se puede resaltar por el volumen de información aportado de una u otra forma, la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT), la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, el Centro de Investigaciones Científicas (CSIC) y el Instituto Geológico y Minero de España.

En el contexto internacional actual, las investigaciones existentes en relación con los temas aquí estudiados aún siendo más extendida o abundante a la existente en nuestro país, no son suficientemente representativas.

Por lo anterior expuesto, no se hace una exposición convencional de los antecedentes, agrupando la bibliografía obtenida en una serie de temas como son la calidad del agua, presencia de metales pesados en agua y suelo, los fosfatos en agua y suelo, el transporte de nutrientes, los coeficientes de exportación, la carga contaminante de nutrientes y los eventos de tormenta. Muchos de los trabajos citados y recogidos en la bibliografía cubren más de uno de estos temas. En este caso los citamos donde consideremos más importante su contribución, a veces incluso en más de un apartado.

En esta tesis de investigación se han consultado de forma especial los siguientes trabajos:

- En relación con la calidad de las aguas: *Gómez Artola, C. (1990); Intecsa (1975); Sánchez, F. et col.(1993); Lacalle, B. (1989); Debels, P. et col.*
- En relación con los metales pesados en aguas y suelos: *De Miguel, E. et col. (2002); Sande, P. et col. (2005); Lacalle, B. et col. (2002); y la*

ponencia: Procesos de degradación y recuperación de suelos, (Ciemat, 2007).

- En relación con las formas del fósforo en aguas y suelos incluimos: *Vargas et col. (1992); Ramírez, R. et col. (1998); Sadzawka y Molina, (2004); Daza y Muller (1965); M. Sande, P. et col. (2005); Sharpley y Menzel (1987); Sharpley et al. (2000); Haygarth y Jarvis, (1999).*
- En relación con los sistemas bioindicadores: *Koehler, H.H. (1996); Van Straalen & Krivolutsky (1996); Goula et al., (2000).*
- En relación con los nutrientes, eutrofización y coeficiente de exportación: *Gómez Artola, C. (1990); Lacalle, B. (1989); Ortiz Casas (1984); Rast y Lee (1978); Gómez Elvira y López Vera (1983); Rodríguez, O.Y. (2006).*
- En relación con el evento de tormenta: *Gómez Artola, C. (1990), Lacalle, B. (1989), Lacalle, B. y González, P. (1991), Corvera, R., (2005).*
- En relación con el deterioro posible por el aumento de la población: *(González, P., 2008).*

Destacar que prácticamente no existen trabajos específicos sobre o en la cuenca del río Guadarrama que engloben todos los temas tratados en el presente trabajo de investigación. Sí es verdad que existen algunos trabajos puntuales realizados dentro de la cuenca del río Guadarrama que tienen que ver en parte con la temática de esta investigación, de forma que los más destacados son los que a continuación se muestran:

- Método indirecto de evaluación de las fuentes difusas de nutrientes: aplicación a la cuenca del embalse de Valmayor (Gómez Artola, C. 1990).
- Estudio de recopilación y síntesis de los recursos hidráulicos de las cuencas bajas de los ríos Guadarrama y Jarama. (Servicio Geológico de Obras Públicas Comisaría de Aguas del Tajo. Madrid: Intecsa, 1975).

Este es el marco o alcance en el que ha desarrollado esta tesis doctoral, teniendo presente que todos estos estudios asociados tanto a la hidrología de superficie como al uso del suelo y bioindicadores, constituyen una aportación relevante al conocimiento científico del medio ambiente de la cuenca del río Guadarrama y su funcionamiento.

1.5 Características Generales

A continuación, se realiza una breve exposición de los temas tratados en el presente trabajo de investigación sobre los que profundizaremos más adelante, concretamente en el capítulo III.

1.5.1 Calidad del Agua

La calidad del agua de un río es el resultado de un conjunto de factores: tanto la geoquímica de la cuenca hidrográfica como su régimen hidrológico y las características hidráulicas del sistema fluvial influyen en su composición. Adicionalmente, en la sociedad moderna, esta calidad 'natural' se ve muchas veces drásticamente alterada debido al ingreso de contaminantes de origen antropogénico, provenientes desde fuentes puntuales y difusas (DEBELS, P. et col, 1999).

Los objetivos de calidad que proponen las Directrices del Plan Hidrológico de la Cuenca del Tajo para cada tramo de río, se definen de acuerdo con los Anexos nº1, nº2 y nº3 del Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica y con el Real Decreto 734/1988 por el que se establecen normas de calidad de aguas de baño.

A nivel estatal, la ley 4/2007, junto con la Directiva Marco Europea del Agua (2000/60/CEE), establecen los parámetros medioambientales que no han de superar las aguas superficiales para mantener la calidad de sus aguas.

Por otra parte, el Plan de Saneamiento y Depuración de la Comunidad de Madrid y el Plan Hidrológico del Tajo, establecen unos objetivos de calidad para las aguas superficiales que quedan definidos según el uso del recurso hídrico y en función de las concentraciones máximas límites en la carga contaminante de los vertidos.

1.5.2 Metales Pesados

Se considera metal pesado aquél que tiene una densidad igual o superior a 5 gr.cm^{-3} cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo metales alcalinos y alcalino-térreos). Desde el punto de vista biológico, se distinguen dos grandes grupos (Ciemat, 2007):

- Micronutrientes u oligoelementos, requeridos en pequeñas cantidades por plantas y animales y que son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasado cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn.

- Metales pesados sin función biológica conocida; su presencia en seres vivos, causa alteraciones. Son muy tóxicos y pueden acumularse en los seres vivos. Son, principalmente: Cd, Hg, Pb, Sb, Bi.

Los metales pesados se encuentran en las aguas como consecuencia del lavado de los terrenos que drenaron o como resultado de actividades humanas, principalmente procesos industriales y minería. Los metales pesados pueden encontrarse en el agua en forma soluble o insoluble (Sande, P. *et col.*, 2005).

En la contaminación del suelo destaca la causada por metales traza. Su importancia deriva de su larga persistencia en el medio edáfico, la cual no sólo depende de las características de estos metales, sino también de las propiedades físicas y químicas del suelo.

El uso del suelo, su manejo y la ordenación del territorio son factores importantes de los que depende el predominio de fuentes puntuales (residuos industriales, de depuradora, etc.) o difusas (agricultura, red de comunicación urbana) que aportan materiales a las aguas superficiales. La industria, la minería y las actividades agrícolas son, también, fuentes que pueden aportar metales pesados a los sistemas acuáticos. Algunos metales pesados son micronutrientes por lo que los organismos acuáticos los requieren en pequeñas cantidades; por otra parte, muchos elementos traza, incluyendo los micronutrientes, pueden alcanzar niveles en el suelo y en las aguas que resulten tóxicos para plantas y animales (Sande, P. *et col.*, 2005).

Para el reconocimiento de la contaminación por metales pesados en suelos, se utilizan los niveles de referencia de varias Comunidades Españolas que conllevan sistemas de alerta, vigilancia y control (Ciemat, 2007). Así como, Real Decreto 1310/1990, de 29 de Octubre, que establece los parámetros y valores límite de concentración de metales pesados en los suelos (mg/Kg).

1.5.3 Formas del fósforo

Actualmente existe una gran problemática por la contaminación por fosfatos de las aguas naturales. Como consecuencia de la actividad humana, los niveles de estos compuestos se han incrementado en niveles muy por encima de los que se podrían considerar como naturales, en las diferentes formas y fracciones en las que se puede presentar este compuesto.

Por ello se revela como esencial el establecimiento de los mejores métodos para determinar las concentraciones de fósforo en el medio en el que nos encontramos, ya que se han desarrollado una gran cantidad de técnicas para la extracción de éste elemento, que varían en su adecuabilidad dependiendo de el tipo de fracciones de suelo en el que tengamos el fósforo y cuáles sean sus formas predominantes.

Es muy importante conocer la concentración de fosfatos de las aguas, además de para ver su grado de contaminación o carga contaminante, para determinar el origen de estos fosfatos, establecer si se encuentran también en los suelos del entorno del cauce, si fluyen a éste por lixiviados, o si son retenidos por las distintas fracciones edáficas.

En muchos trabajos y estudios de investigación consultados del contenido en fósforo de las aguas, sólo se toman las medidas del fósforo disuelto, sin tener en cuenta la cantidad de éste elemento o de sus compuestos que pueden ser transportado por el agua como material particulado no disuelto.

El transporte de nutrientes de ambientes terrestres puede ser por medio de una fase disuelta o a través del movimiento de sedimentos (Sharpley, A.N. et col., 1987). El PD (fósforo soluble) en la escorrentía se origina de la liberación del fósforo de la zona superficial del suelo (1-2.5 cm) y/o material vegetal que interactúa con la lluvia (Sharpley, A.N. et al., 1994). El transporte de PD depende de reacciones de adsorción-desorción (Sharpley, A.N. et al., 1992) y del contenido de P en la superficie del suelo (Sharpley, A.N. et al., 2000) los cuales lideran su movimiento en eventos de escorrentía.

Se admite que existen, al menos, tres mecanismos de transferencia de fosfato desde el suelo a los sistemas acuáticos: disolución y movimiento en forma soluble; transporte de formas adsorbidas, asociado al desplazamiento vertical de la fracción coloidal y, sobre todo, a los materiales erosionados; y, por último, pérdidas directas de fertilizante cuando llueve tras la aplicación del mismo. La importancia de cada uno de estos mecanismos puede variar en función del tipo de suelo, del manejo agrícola y de las condiciones climáticas (Sande, P. et col., 2005).

Haygarth y Jarvis (1999) identificaron 3 mecanismos principales del transporte del fósforo denominados: disolución, físico e incidental.

- La disolución describe el transporte de PD con partícula menor de 0.45mm y explica el equilibrio que ocurre entre las partículas del suelo o sitios de adsorción y la solución del suelo. Ejemplos de disolución son la adsorción-desorción y solubilización de P en suelos saturados (Haygarth y Sharpley, 2000; Haygarth y Jarvis, 1999).
- El PT es movido principalmente por mecanismos físicos como la erosión del suelo. Conforme se incrementa la intensidad de los mecanismos físicos como la erosión, las concentraciones de PT en la escorrentía se incrementan (Sharpley et al., 1992). En contraste con la disolución, los mecanismos erosivos son procesos a macro escala (Haygarth y Jarvis, 1999).
- Los mecanismos incidentales son conceptualmente diferentes que los de disolución y físicos debido a que son controlados por condiciones instantáneas

(Haygarth y Jarvis, 1999). Ejemplos son transportes a corto plazo de materiales particulados de fincas enmendadas con fertilizante fosforado y estiércol. El corto periodo de transporte ocurre después de lluvias efectivas que remueven la enmienda en muy poco tiempo después de ser aplicado.

Los factores de manejo de uso de la tierra y la hidrología tienen una incidencia directa sobre los tres mecanismos de transporte de P (Sharpley, A.N. *et al.*, 2000).

1.5.4 Sistemas bioindicadores

El suelo es un pilar fundamental del Desarrollo Sostenible, pero se conoce muy poco del impacto que producen las prácticas agrícolas y el desarrollo urbano sobre los organismos que componen la biodiversidad edáfica, muy sensibles a los cambios de uso del suelo, que influyen en la regulación interna y en la productividad del ecosistema edáfico.

Es importante señalar la magnificación de la contaminación ambiental (Figura 1), debido al efecto cascada, que produce en los distintos organismos que componen la biodiversidad edáfica. Además del interés global en reducir la contaminación ambiental, se están realizando grandes esfuerzos para desarrollar sistemas bioindicadores que permitan estimar el nivel de degradación biológica del suelo.

El sistema bioindicador jerarquizado está basado en la información obtenida a través de tres categorías: a) procesos del ecosistema (descomposición de restos vegetales, ciclo de nutrientes, etc.), b) microorganismos y c) animales invertebrados (mesofauna, microfauna), valorando el efecto de la contaminación y degradación del suelo en varios niveles del ecosistema. Esto permite averiguar los cambios en la estructura y función de las comunidades del suelo. De esta forma se puede evaluar el efecto de la contaminación a corto, medio y largo plazo, obtener datos precisos del estado de conservación del suelo y potencialmente identificar la naturaleza de la perturbación.

Figura 1: Magnificación del impacto de la contaminación en el ecosistema edáfico

Nivel de organismos: Efectos letales directos, o subletales en el desarrollo y reproducción



Nivel de población: Se altera el tamaño, estructura y estabilidad de las poblaciones



Nivel de Comunidad: Se alteran las redes tróficas, las interacciones entre organismos, se pierde la regulación interna del sistema, y se dañan los procesos y funcionamiento del suelo



Nivel de Ecosistema Terrestre: Cuando se alteran los procesos y función del suelo, se afecta a las plantas y a su interacción con los fitofagos



Nivel de Paisaje: La transferencia hidrológica de contaminantes altera la interacción de los ecosistemas que interactúan en el paisaje

1.5.5 Transporte de nutrientes

La cuantificación de los volúmenes de nutrientes aportados por diversas fuentes es una cuestión aún no resuelta del todo. Por ello, es necesario conocer y distinguir los siguientes conceptos que se desarrollan a continuación.

La calidad de las aguas superficiales en cuanto a su contenido de nutrientes se refiere, se contempla de forma genérica en el R.D. 4/2007, de 13 de abril, por el que se modifica el Texto Refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de junio; en el que se marcan unos estándares de calidad para las aguas superficiales en función de varios usos.

√ Proceso de eutrofización

La eutrofización se ha convertido en una de las principales causas de contaminación de las aguas superficiales. No cabe duda que, para una gestión y control de la degradación de las aguas superficiales es necesario conocer la relación de las sustancias nutrientes en el medio acuático, las características de la cuenca vertiente (medio físico) y usos del suelo (factores antrópicos).

Cuando en los ecosistemas de agua dulce ingresa una cantidad adicional de nutrientes, básicamente nitrógeno y fósforo, proveniente de las actividades humanas, se produce el fenómeno de eutrofización cultural.

Las alusiones al término *nutriente* son frecuentes en el ordenamiento jurídico europeo y español. Al parecer la primera aparece en la Directiva 91/271/CEE, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, en su Art. 2: *“A efectos de la presente Directiva, se entenderá por “eutrofización” el aumento de nutrientes en el agua, especialmente de los compuestos de nitrógeno y/o fósforo, que provoca un crecimiento acelerado de algas y especies vegetales superiores, con el resultado de trastornos no deseados en el equilibrio entre organismos presentes en el agua y en la calidad del agua a la que afecta.* El anejo II dictamina qué medios acuáticos son sensibles, diferenciando varios grupos: Lagos de agua dulce naturales y otros medios de agua dulce, estuarios y aguas costeras eutróficas o que podrían llegar a serlo, lagos y arroyos que desemboken en lagos/embalses/bahías cerradas con escaso intercambio de aguas y en los que pueda producirse una acumulación de fósforo y nitrógeno, estuarios, bahías y aguas costeras que reciban gran cantidad de nutrientes, determinadas aguas dulces de superficie y zonas que precisen un tratamiento adicional del agua.

Según el Real Decreto 2116/1998, se entenderá por *“eutrofización” el aumento de nutrientes en el agua, especialmente de los compuestos de nitrógeno o de fósforo, que provoca un crecimiento acelerado de algas y especies vegetales superiores, con el resultado de trastornos no deseados en el equilibrio entre organismos presentes en el agua y en la calidad del agua a la que afecta.*

La definición de eutrofización propuesta en el Artículo 2 de la Directiva del Consejo 91/271/CEE se presta a su utilización como indicador de estado para las aguas leníticas (estancadas) en general o a escala de detalle.

Según la FAO se define la *“eutrofización” como el enriquecimiento de las aguas superficiales con nutrientes para las plantas. Si bien la eutrofización se produce en forma natural, normalmente está asociada a fuentes antropogénicas de nutrientes.*

La causa de la eutrofización de las aguas superficiales es debida a una aportación de elementos nutritivos de distinta procedencia (residuos urbanos, industriales, agrícolas, etc.). De estos nutrientes, los más efectivos son aquellos para los que existe una

limitación natural, principalmente, el nitrógeno y el fósforo. El primer elemento puede ser extraído de la atmósfera por determinados microorganismos quedando en último término el fósforo como principal elemento limitante del proceso.

El proceso de eutrofización se acelera con el incremento de nutrientes en los cuerpos de agua. Estos niveles elevados de nutrientes causan a menudo producción anormalmente alta de algas y de plantas acuáticas. La descomposición eventual de las mismas reduce a niveles críticos el contenido del oxígeno disuelto del agua superficial que causan la muerte de peces y otros organismos acuáticos (U.S – E.P.A., 1996).

Si bien los efectos de la eutrofización, como las mareas de algas, son fácilmente visibles, el proceso de eutrofización es complejo y comprende la interacción de numerosos factores físicos, químicos y biológicos, que varían entre distintas masas de agua; además ofrece dificultades de cuantificación.

En las masas de agua encontramos como elementos nutrientes el carbono, nitrógeno y fósforo por ser éstos los principales componentes del protoplasma de las algas, siendo las proporciones atómicas en que se combinan: 106 C, 16 N, 1 P, o lo que es lo mismo 40 C, 7 N, 1 P en gramos (Vallentyne, J.R., 1975; Wetzel, R.G., 1975; Rast, W., and Lee, G.F., 1978).

Según Ortiz Casas (1984), nutriente limitante será aquel que siendo necesario esté presente en la cantidad que más se acerque a la mínima necesaria para el organismo.

Con éste criterio, se puede afirmar que, si la proporción atómica en que ambos elementos (N y P) se encuentran en el agua resulta ser (N/P) es mayor que 16 será el nitrógeno el nutriente que quedará sobrante, mientras que el fósforo será consumido totalmente (Rast y Lee, 1978). En tales circunstancias, la producción de biomasa dependerá del fósforo, que actúa como limitante de estas. Llegando al punto en que, por un mayor aporte de P, resulte la relación N/P menor que 16, el papel limitante pasará al nitrógeno y quedará un sobrante de fósforo en el agua.

Este caso se presenta generalmente en las zonas más próximas a los vertidos de aguas residuales urbanas, zonas en las cuales la relación N/P es generalmente del orden de 4 (Ortiz Casas, J.L., 1984).

√ Fuentes de contaminación

Para poder controlar los elementos nutrientes del agua y el posible fenómeno de eutrofización, es necesario conocer la procedencia de los principales nutrientes (N y P) en el agua. Es importante señalar que las aportaciones de nitrógeno y fósforo (carga externa de nutrientes) son ajenas a la masa del agua y proceden de diferentes fuentes como son:

- Aguas residuales urbanas e industriales.
- Ríos y arroyos tributarios.
- Escorrentía agrícola.
- Escorrentía forestal.
- Escorrentía urbana y suburbana.
- Precipitación atmosférica (lluvia y seca).

Dentro de éste tipo de carga de nutrientes, se pueden distinguir aquellas aportaciones que son naturales, es decir, la carga no asociada a actividades humanas y las aportaciones directamente procedentes de actividades humanas (carga cultural). (O.C.D.E., 1982).

La carga interna o aportación interna de nutrientes (P y N), está formada por los nutrientes liberados tras la putrefacción de los productos orgánicos vegetales y animales que se generan dentro de la misma masa de agua y que en algunos casos y épocas del año constituyen un aporte de nutrientes (Gómez, C., 1990).

Estas fuentes de nutrientes pueden ser puntuales o dispersas. Las fuentes puntuales se producen en un punto específico de entrada en los cauces, siendo fácilmente controladas. Por el contrario, las fuentes dispersas son aquellas en las que la descarga de nutrientes no puede ser reducida a puntos específicos de entrada en los cauces.

Las fuentes puntuales de contaminación del agua son fácilmente identificables y controladas. Sin embargo, las fuentes difusas son las principales proveedoras de contaminantes de los ecosistemas de agua dulce. Por ello, hay que reconocer dichas fuentes contaminantes para controlar la entrada de nutrientes y de sustancias químicas al medio acuático, de modo que garantice la sustentabilidad de los ecosistemas acuáticos.

Por otra parte, conociendo la problemática envuelta en la movilización del fósforo, es posible reducir considerablemente la aportación del fósforo procedente de fuentes difusas, prácticamente sin costo alguno, mejorando la aplicación de abonos al terreno en cuanto a formas y dosis, así como aplicando los medios para minimizar la erosión del suelo de cultivo. Así mismo, los ganaderos deberán almacenar el estiércol en depósitos adecuados y proceder al reciclaje de los residuos animales, o mediante otras actuaciones encaminadas a fijar el fósforo (López Cadenas, F., et al (1982), Lee, G.F., et al (1980)).

En la tabla 1, se hace una clasificación de las fuentes de contaminación, puntuales y difusas, en la que se señalan los factores que influyen en cada una de ellas (Gómez, C., 1990).

● **Tabla 1: Aportación de nutrientes a través de tributarios**

FUENTES PUNTUALES	FUENTES DIFUSAS
Elementos de zonas pobladas urbanizadas: residuos humanos, residuos domésticos, residuos de alimentos, escorrentías de las calles, residuos industriales.	Efluentes de zonas pobladas sin alcantarillado: tanques sépticos, residuos domésticos, erosión del suelo.
Efluentes industriales vertidos directamente a los cauces.	Efluentes de terrenos cultivados: erosión del suelo, pérdidas de fertilizantes, excrementos de animales domésticos.
Efluentes de plantas de tratamiento de aguas.	Efluentes de terrenos no cultivados: erosión del suelo, residuos orgánicos vegetales, excrementos de animales no domésticos.
Escorrentía de las calles si no existe sistema de alcantarillado conjunto.	Manantiales y aguas naturales.
	Reservas internas en las masas de aguas tributarias.
	Atmósfera: precipitaciones sólidas y de lluvia.
	Tipo de suelo y cubierta vegetal.

Destacar que en la mayoría de los casos las fuentes puntuales de origen industrial y doméstico son difíciles de separar; y que las fuentes difusas en determinadas situaciones aportan a las masas de agua una gran cantidad de contaminantes.

Algunas actividades agrarias pueden contribuir con grandes cargas de nutrientes debido a la aplicación masiva de fertilizantes, en cuyo caso la contribución de nitratos a las aguas superficiales tiene una gran importancia dada la solubilidad de los mismos y por tanto su transporte por las aguas de escorrentía. Mientras que el fósforo se ve afectado al ser añadido a suelo ácidos con formación de fosfatos de Fe y Al, o suelos básicos con formación de fosfatos de Ca en los alcalinos (Loehr, R.C., 1974).

La mayor parte de éstas fuentes de carácter difuso, no afectan a la calidad del agua de forma permanente, actuando unas de forma estacional (retorno de regadíos), y otras sólo bajo condiciones meteorológicas concretas (escorrentía de tormentas). (Peña, R., 1984).

Una vez que se haya identificado las fuentes puntuales en la cuenca se determina la carga puntual, teniendo en cuenta para ello el volumen de agua descargada desde la fuente y la concentración de nutrientes en el efluente.

√ Geoquímica de los nutrientes

Cuando hablamos de geoquímica de los nutrientes (N y P) nos referimos a su comportamiento y evolución en el medio físico, siendo estos constituyentes los responsables de la eutrofización.

a).- Ciclo del nitrógeno.

El nitrógeno es uno de los nutrientes minerales de mayor demanda en la naturaleza y, a pesar de su abundancia en la atmósfera, es sin embargo el auténtico "cuello de botella" en la productividad primaria de los ecosistemas. Este elemento tiene una importancia decisiva, ya que es uno de los constituyentes moleculares de proteínas y ácidos nucleicos. Se trata de un ciclo típicamente gaseoso siendo su principal depósito la atmósfera, la cual contiene un 79 % de riqueza en este elemento en forma de gas.

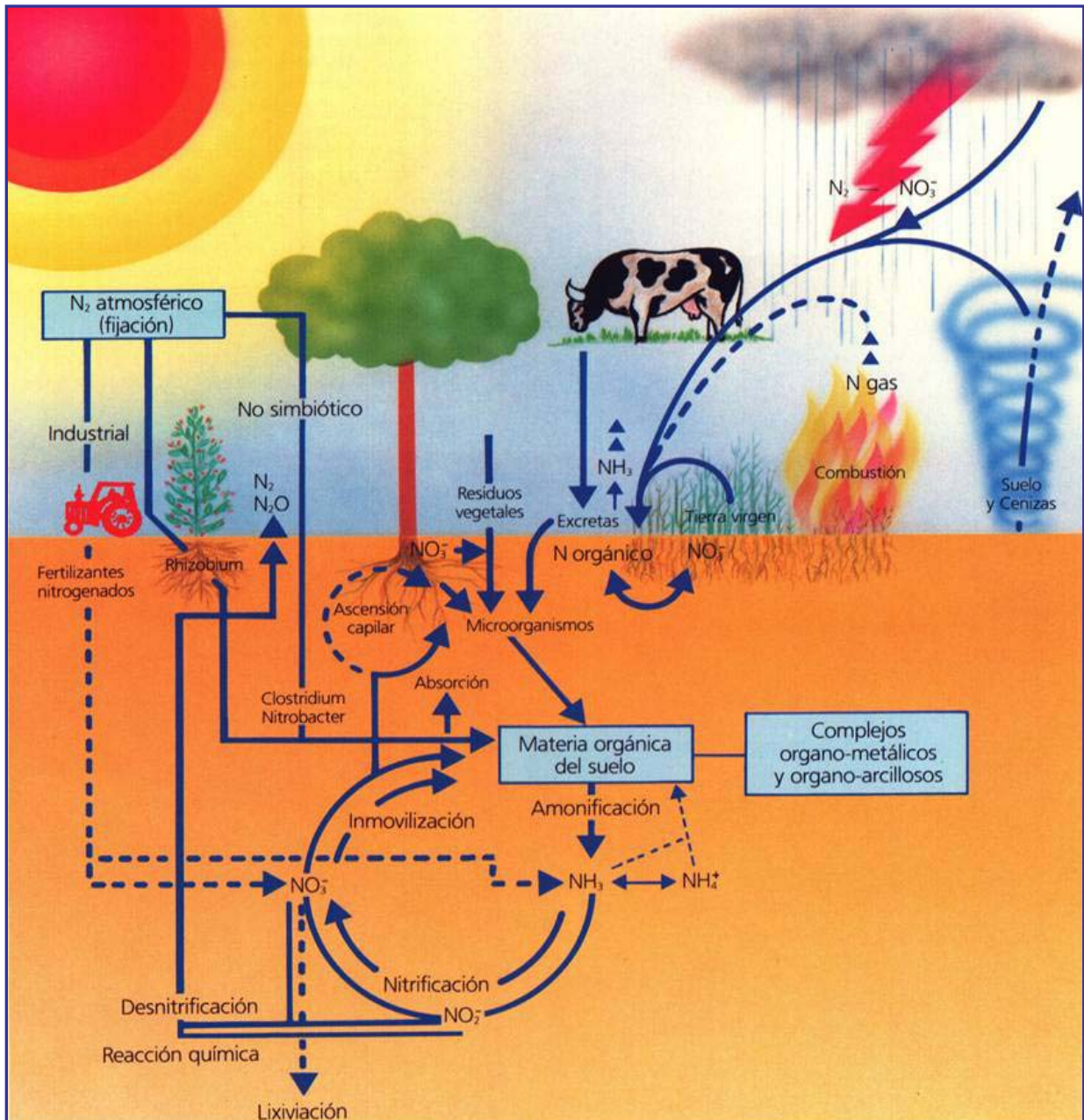
Las formas en las que el nitrógeno está presente en el medio, abarcan un espectro que varía entre su estado de mayor oxidación, el del nitrato (NO_3^-) (el estado de oxidación del Nitrógeno es +5), y el más reducido, el amoníaco (NH_3) o el amonio (NH_4^+) según el caso (el estado de oxidación del Nitrógeno es -3). Los cambios de valencia significan transformaciones y su conjunto constituye el denominado ciclo del nitrógeno (Figura 2). A pesar de que en una escala temporal suficientemente prolongada puede apreciarse la naturaleza cíclica de dichas transformaciones. Los cinco procesos esenciales que intervienen en el ciclo del nitrógeno son los siguientes:

- 1.- **Fijación del nitrógeno**, por bacterias específicas, que transforman el nitrógeno atmosférico en nitratos mediante procesos físico-químicos.
- 2.- **Proteolisis**, primer paso para la mineralización de una proteína, en donde estas se convierten en aminoácidos.
- 3.- **Amonificación**, realizado por bacterias y hongos del suelo, que convierten esos aminoácidos en nitrógeno amoniacal.
- 4.- **Nitrificación**, realizado por bacterias nitrificantes que convierten dichos compuestos de amonio, en nitritos y estos a su vez en nitratos.
- 5.- **Desnitrificación**, llevado a cabo por bacterias desnitrificantes, las cuales transforman el nitrato en nitrógeno atmosférico.

El 95% del nitrógeno del suelo, suele encontrarse en forma de nitrógeno orgánico, y sólo un 5% en forma mineral. Este último denominado nitrógeno inorgánico puede encontrarse en forma de ión amonio, que puede estar en la solución del suelo o bien en la fase coloidal del suelo (arcillas, etc.). También aparece como nitratos que al ser muy móvil, es poco retenido por el suelo y pasa a las aguas subterráneas (Moore, E., 1970).

Las formas presentes del nitrógeno en el agua son generalmente: amonio, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico. En la atmósfera existe nitrógeno en forma molecular (79%), pero ésta forma no es asimilable por las algas y demás. Las formas asimilables son las inorgánicas, éstos compuestos nitrogenados del agua provienen de la mineralización o descomposición de compuestos orgánicos o vegetales (Catalán, J., 1984).

Figura 2: Ciclo del Nitrógeno



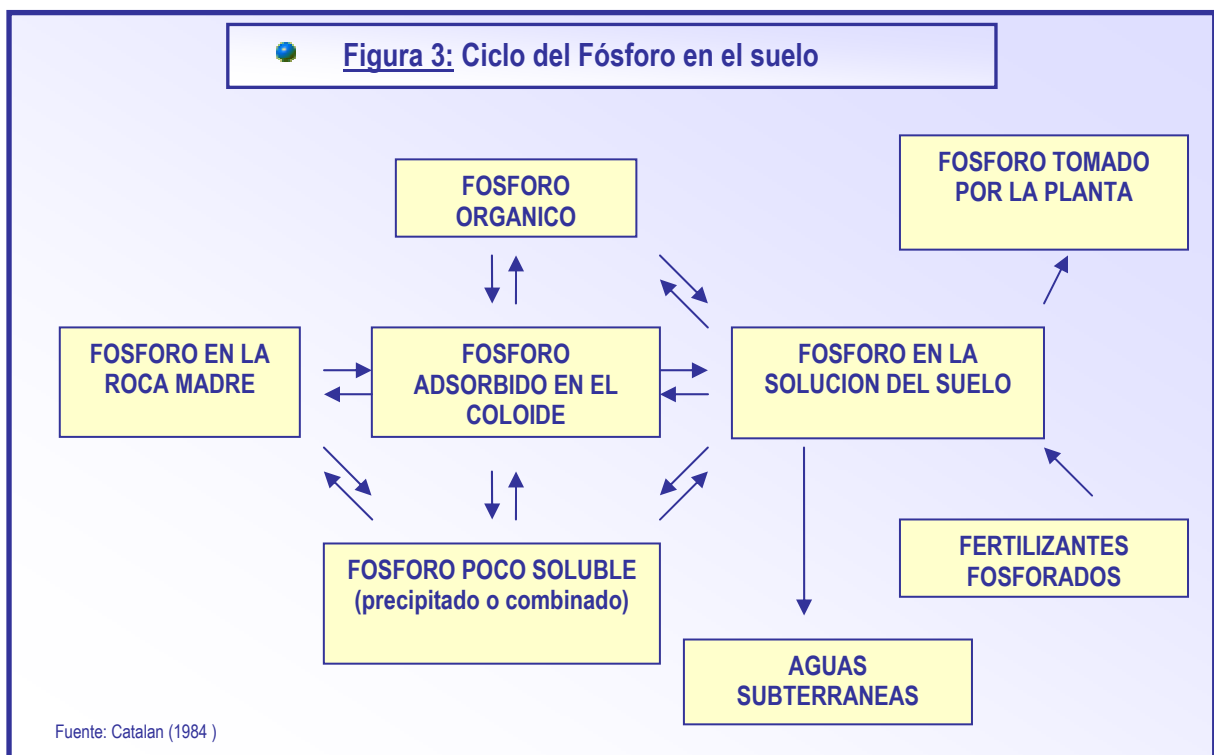
Fuente: (Contaminación de las aguas subterráneas. La problemática de los nitratos y su incidencia en España. ITGE 1989)

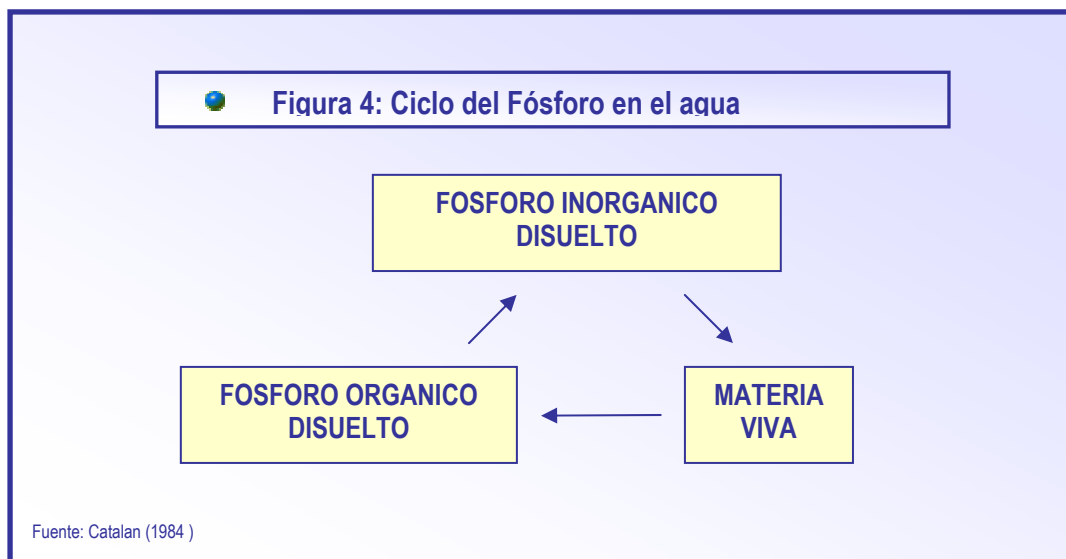
b).- *Ciclo del fósforo.*

Los compuestos fosforados, se diferencian de los del nitrógeno, en la menor solubilidad de los mismos y la mayor capacidad de fijación en el suelo. Esta fijación se atribuye normalmente, a una serie de fenómenos tales como la absorción física, el cambio aniónico y las reacciones de doble descomposición donde intervienen la relación del producto de solubilidad (Mengel, K., 1985).

El fósforo en el suelo se encuentra en forma orgánica y mineral, siendo el 20% orgánico y el resto mineral. El fósforo orgánico, al igual que el nitrógeno presenta un ciclo de mineralización (Figura 3). Los iones fosfatos de ciertos complejos orgánicos, pueden ser absorbidos por el coloide del suelo a través del Ca, Al y Fe (Douchafor, P., 1984).

El fósforo en el agua, está en forma orgánico e inorgánico. Normalmente pueden existir varias especies dependiendo del pH. Por lo general sólo una fracción del fósforo esta en el agua (Figura 4), (Catalán, J., 1984).





1.5.6 Coefficiente de exportación

Para el cálculo del coeficiente de exportación, es necesario conocer como los diferentes usos de terreno producen y permiten el transporte de sedimentos a los cuerpos de agua afectados. Los coeficientes de exportación de sedimentos establecen la cantidad de sedimentos aportados por cada uso de terreno en unidades de masa por unidad de área para un determinado intervalo de tiempo.

Para cuantificar los nutrientes (N y P) de cargas dispersas se recurre a coeficientes de exportación. El cálculo del coeficiente de exportación de nutrientes por escorrentía del terreno es función principalmente el tipo de utilización del terreno de la cuenca, y la extensión de éstos.

Cabe señalar que, para la aplicación de éste coeficiente, a fuentes difusas de nutrientes, será esencial, la clasificación de la cuenca por su utilización del suelo, así como las cargas de nutrientes que se generan en la misma. La aportación anual vendría dada por la concentración y el caudal, y a partir de ahí se calcula el coeficiente de exportación por unidad de área y en función del uso del suelo ($\text{g}/\text{m}^2/\text{año}$ ó $\text{kg}/\text{m}^2/\text{año}$), (Ortíz, J.L. et al, 1983).

Así, la carga anual de nitrógeno y fósforo, será igual a la suma

$$\sum_{i=1}^n C_i * q_{mi} * t$$

siendo C_i , la concentración del nutriente medida el día i ésimo del muestreo, y Q_i el caudal correspondiente a ese período. Considerando el área que representa esa aportación, y en función del uso del suelo obtendremos el coeficiente de exportación correspondiente (Ortíz, J.L. et al, 1983).

En la tabla 2 y 3, se dan los coeficientes de exportación de (N y P), en $g/m^2/año$, que por término medio aportan los distintos tipos de terreno y las fuentes características de nutriente (Rast, W. et col., 1978). Estos coeficientes sirven para compararlos con los datos obtenidos en el capítulo de resultados.

Destaca que mientras el nitrógeno total tiene una variación mínima en relación con el uso del suelo, el fósforo total presenta mayor variación entre los distintos usos, siendo el uso urbano el de mayor valor (Tabla 2).

 **Tabla 2: Coeficiente de exportación de nutrientes por escorrentía del terreno**

Tipo de utilización del terreno de la cuenca	Coeficientes de exportación de nutrientes ($g.m^2/año$)	
	Fósforo total	Nitrógeno total
Urbano	0,1	0,5
Rural/agrícola	0,05	0,5
Forestal	0,01	0,3
Otros: Lluvias y partículas sólidas del aire	0,02	2,4 (1)

(1) Lluvia 0,8 y partículas sólidas del aire 1,6

Tabla 3: Cantidades de N y P aportadas por distintas fuentes de nutrientes

Tipo de utilización del terreno de la cuenca	Coeficientes de exportación de nutrientes (g.m ² /año)					
	Fósforo total			Nitrógeno total		
	*(1)	*(2)	*(3)	*(1)	*(2)	*(3)
Urbano	0,1	0,15	0,03	0,5	0,5	0,8
Rural/agrícola	0,07	0,03	0,03	0,5	0,5	1,0 – 0,6
Forestal	-	0,02	0,01	-	0,25	0,4
Praderas- zonas húmedas	0	0	0	0	0	0
Atmósfera	0,02 - 0,08	-	-	0,8 - 1,6	-	-

*(1) Sonzogui y Lee, 1974
 *(2) Uttormek et. At, 1974
 *(3) U.S. EPA y Omemik, 1976

1.5.7 Evento de tormenta

Un análisis del aporte de nutrientes, supone por una parte la determinación de la concentración de las sustancias y por otra la medida del caudal en orden a garantizar un cálculo de la cantidad de los mismos. Numerosos análisis se realizan en condiciones de niveles de agua bajos o normales. En condiciones de alto nivel de agua, donde los resultados individuales pueden fluctuar considerablemente, se requieren análisis especiales (Lacalle, B. y González, P., 1991).

Evans (1978) encontró que 7.5 mm/día de lluvia pueden causar erosión, mientras que 5 mm/hora o más de lluvia es considerada como alta intensidad y puede causar erosión severa.

Las concentraciones de elementos disueltos y particulados en eventos de tormenta son dependientes de muchos factores que controlan la movilización y transporte de los elementos hacia el canal durante los eventos de tormenta. Esos factores incluyen cantidades de precipitación, intensidad y duración, velocidad del flujo en el canal,

cantidades de partículas solubles e insolubles de la superficie del terreno de las microcuencas y características de usos de terreno (Corvera, R., 2005).

Es bien conocido que existe una fuerte correlación entre la concentración de sedimentos suspendidos (CSS) y el PT en el sedimento (Holtan, H. et al., 1988). En dos micro cuencas agrícolas localizadas en Bélgica se observó un comportamiento logarítmico en la función que relacionó la CSS con la concentración de PT en eventos de tormenta analizados (Steege, A. et al., 2001), además se encontró una fuerte relación entre PT y la arcilla suspendida en el sedimento de las cuencas.

Durante las tormentas, las aportaciones de SS, PT, PD y NTK, son el resultado de las contribuciones del flujo base y el flujo adicional asociado a las tormentas (Corvera, R., 2005).

Por último citar a Correll et al. (1999), quien determinó que las concentraciones de nutrientes particulados transportados desde la superficie del suelo a los cuerpos de agua fueron importantes en los incrementos de N total y PT durante eventos de tormenta.

1.6 Estructura de trabajo seguida

Para la realización de ésta tesis de investigación es preciso el uso combinado e integrado de diversas metodologías:

- **Técnicas de gabinete:** como recopilación de información, cartografía gráfica y digital, análisis estadístico de datos numéricos, aplicación de modelos matemáticos hidrológicos, desarrollo de un sistema de información geográfica, estudio y análisis de las distintas muestras.
- **Técnicas de laboratorio:** comprendiendo análisis de agua, suelo y edafofauna del suelo.
- **Técnicas de campo:** mediciones hidrológicas, toma de muestras, y cálculo de los distintos caudales del río Guadarrama.

Este trabajo de investigación se ha realizado según una secuencia metodológica convencional, y a continuación se enumeran las principales metodologías utilizadas (Figura 5.1, Figura 5.2 y Figura 5.3).

En el capítulo III se desarrolla ampliamente el alcance y contenido de dichos temas tratados en el presente trabajo de investigación.



Figura 5.1: TÉCNICAS DE GABINETE

- Recopilación de información y fuentes de datos:
 - Bibliografía.
 - Normativa.
 - Cartografía.
 - Datos numéricos.
 - Fuentes estadísticas de información microterritorial.
 - Imágenes de teledetección.

- Estudio del medio físico natural.
- Estudio del marco socio-económico.
- Discretización de la cuenca.
- Programa de muestreo.
- Programa de toma de datos.
- Análisis de nutrientes y metodología analítica.
- Cálculo de la carga y los coeficientes de exportación de nutrientes.
- Cálculo del contenido de fósforo en el agua y en el suelo.
- Cálculo del Índice Simplificado de Calidad del Agua.
- Trazado de las secciones del río Guadarrama.
- Tratamiento de los resultados:
 - Análisis estadístico de los distintos datos numéricos.
 - Correlaciones.

- Sistemas de información geográfica.
 - Fuentes de datos espaciales.
 - Adquisición y almacenamiento de los datos.
 - Operaciones en el análisis de los datos.
- Redacción de la memoria de investigación.
- Resumen y conclusiones.



Figura 5.2: TÉCNICAS DE CAMPO Y DE LABORATORIO

A) TÉCNICAS DE CAMPO

- Mediciones hidrológicas.

- Toma de muestras:

- Muestreos de agua.
- Muestreos de suelo.

B) TÉCNICAS DE LABORATORIO

- Análisis de agua:

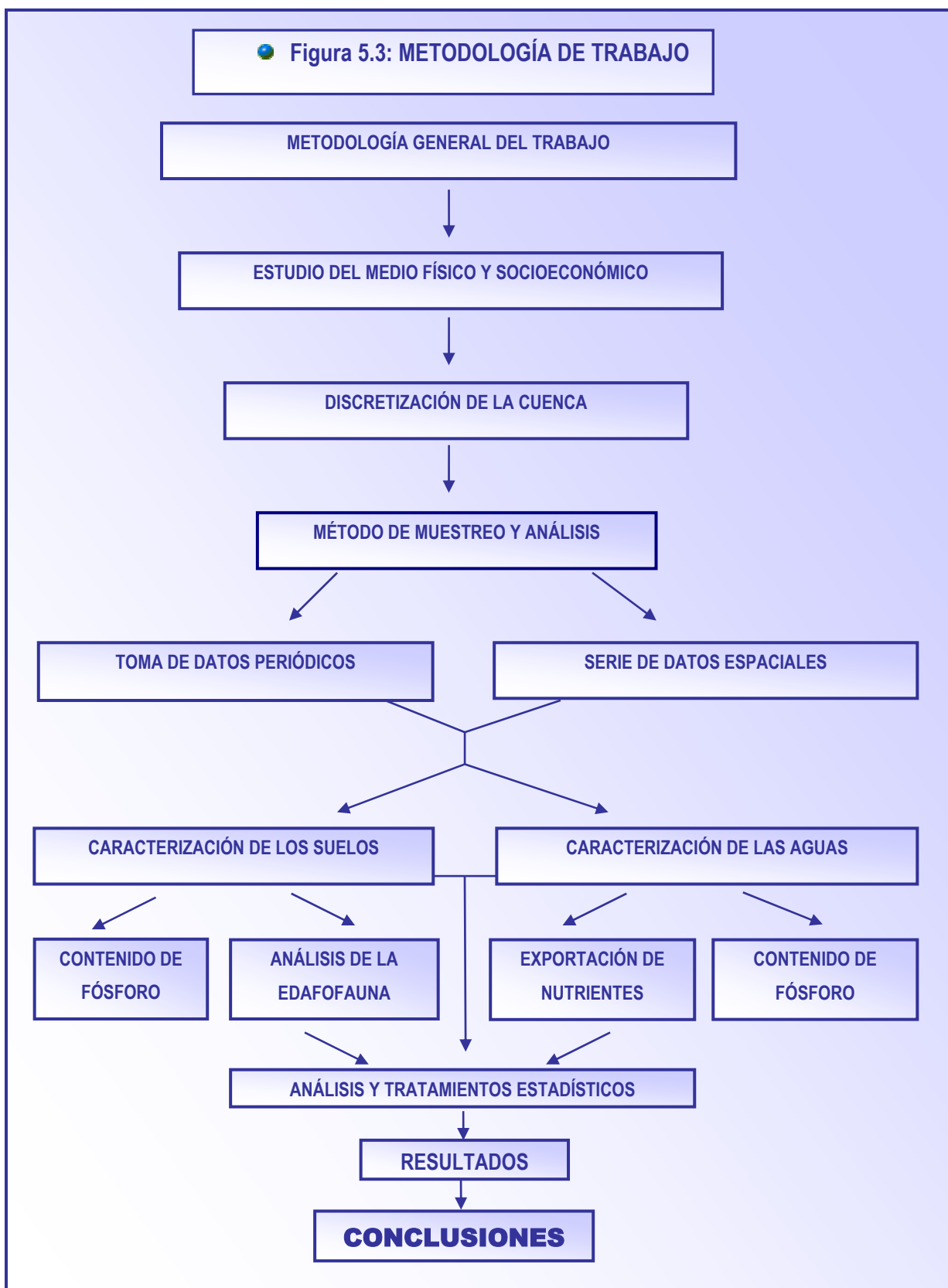
- Determinación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅).
- Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitratos (NO₃⁻), Nitritos (NO₂⁻), Amonio(NH₄⁺), Fósforo (P_{total} y PO₄⁻), Sulfato (SO₄²⁻), mediante espectrofotómetro de absorción molecular.
- Determinación del Sódio y Potasio mediante fotometría de llama.
- Determinación de Cloruros (Cl⁻), Carbonatos (CO₃²⁻) y Bicarbonatos (HCO₃⁻), Calcio (Ca) y Magnesio. (Mg), mediante técnicas analíticas.
- Determinación de los Sólidos en Suspensión.
- Determinación del Nitrógeno total.
- Análisis de los metales pesados mediante el método de absorción atómica.

- Análisis de suelo:

- Determinación del color del suelo: Munsell Soil Color Charts.
- Análisis de los metales pesados mediante el método de absorción atómica.
- Medición del pH.
- Medición de la conductividad eléctrica.
- Determinación del contenido en Materia Orgánica mediante el método de Carbono total por vía seca.
- Determinación del Nitrógeno total mediante el método Kjeldahl.
- Determinación del Fósforo (P_{total} y PO₄⁻).
- Análisis granulométrico mediante método Boyoucos.

- Análisis de la fauna edáfica:

- Determinación de la edafofauna mediante el método Berlesse-Tullgren.
- Conteo de la edafofauna.
- Análisis de la edafofauna del suelo con metales pesados mediante el método de absorción atómica.



1.7 Normativa

La sociedad refleja, en lo que respecta a la conservación del medio natural o medio ambiente y al empleo sostenible de los recursos, una exigencia cada vez mayor, lo que en los últimos tiempos ha repercutido en la promulgación de normativa y en actividades de planificación.

Ello queda demostrado por las disposiciones legales promulgadas por las distintas administraciones, incluso a nivel europeo con la “Directiva Marco de Aguas”, y por los compromisos adquiridos por el Estado Español al adherirse a múltiples convenios internacionales (Diversidad Biológica, Man and Biosphere, Ramsar, etc.). A continuación se detallan las normativas utilizadas en la presente tesis de investigación (Figura 6).

Figura 6: NORMATIVA

A) LEGISLACIÓN COMUNITARIA

- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 23 de octubre de 2000, establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Directiva 91/271/CEE, relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas.

B) LEGISLACIÓN NACIONAL

- Real Decreto Ley 4/2007, de 13 de abril, por el que se modifica el Texto Refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de junio.
- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, establece los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- Real Decreto 2116/1998, de 2 de Octubre, por el que se modifica el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Real Decreto 1310/1990, de 29 de Octubre, el Anexo 1 A, establece los valores límite de concentración de metales pesados en los suelos (mg/Kg).
- Orden de 1 de julio de 1987 por la que se aprueban los métodos oficiales de análisis físico-químicos para aguas potables de consumo público.

C) LEGISLACIÓN AUTONÓMICA

- Ley 17/1984, reguladora del abastecimiento y saneamiento de agua en la Comunidad de Madrid.
- Ley 4/2001, de 28 de junio, por la que se modifica la Ley 20/1999, de 3 de mayo, del Parque Regional del Curso Medio del río Guadarrama y su entorno.
- Decreto 26/1999, de 11 de febrero, por el que se aprueba el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales del Parque Regional del Curso Medio del río Guadarrama y su entorno.
- Ley 2/1991, de 14 de febrero, para la Protección y Regulación de la Fauna y Flora Silvestres en la Comunidad de Madrid

CAPÍTULO II

MARCO DE LA CUENCA DE ESTUDIO

2.1 Introducción

Este capítulo incluye la localización de la cuenca y puntos de estudio, además de datos generales del medio como son el clima, el relieve, el conocimiento de la geología, hidrología e hidrogeología, la vegetación y usos del suelo, edafología y edafofauna.

Para la realización de éste capítulo se ha utilizado la información que se relaciona a continuación:

A) Para la realización del apartado de climatología y relieve:

- **Información del Instituto Nacional de Meteorología (I.N.M.). Ministerio de Medio Ambiente. Información del Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA), Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino**

B) Para la realización del encuadre geológico e hidrológico:

- **Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. ITGE (Instituto Tecnológico Geominero de España)**

Abarcando parte de las hojas topográficas a escala 1:50.000 números 533(18-21, San Lorenzo de El Escorial), 508 (18-20, Cercedilla), 532 (17-21, Las Navas del Marques), 558 (18-22, Majadahonda), 559 (19-22, Madrid), 581(18-23, Móstoles), 582 (19-23, Getafe), 603 (17-24, Fuensalida), 628 (17-25, Torrijos), 629 (18-25, Toledo), 604 (18-24, Villaluenga de la Sagra)

- **Cartografía militar de España, escala 1:50.000, del SGE (Servicio Geográfico de España) y del CEGET (Centro Geográfico del Ejército)**

Abarcando parte de las hojas siguientes: 18-20, Cercedilla; 17-21, Las Navas del Marques; 18-21, San Lorenzo de El Escorial; 18-22, Majadahonda; 19-22, Madrid; 19-23, Getafe; 18-23, Móstoles; 17-24 (603), Fuensalida; 17-25 (628), Torrijos; 18-24 (604), Villaluenga de la Sagra; 18-25(629), Toledo

- **Información de la Confederación Hidrográfica del Tajo. Ministerio de Medio Ambiente**

Recopilación de toda la información gráfica y digital disponible para su utilización en el Sistema de Información Geográfica (Arcview 3.2)

C) Para la realización del marco edafológico:

- **Atlas Digital de Comarcas de Suelos. SEIS.net. (MIMAM-CSIC)**

Abarcando parte de las comarcas de Guadarrama, Area Metropolitana, Madrid, Sur Occidental. Recopilación de toda la información gráfica y digital disponible para su utilización en el Sistema de Información Geográfica (Arcview 3.2)

D) Para la realización del estudio de la evolución demográfica y usos del territorio:

- **Información del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (www.madrid.org/iestadis/), del banco de datos “Almudena”**
- **Información del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (I.N.E.)**
- **Información del Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA), Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino**

A partir de toda esta información, se ha reunido la más relevante y se han homogeneizado los datos obtenidos.

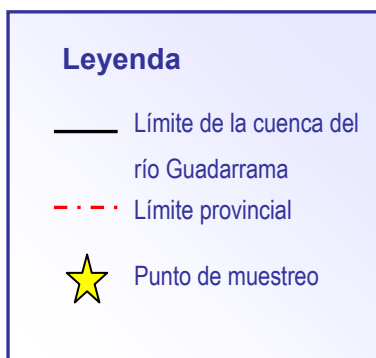
2.2 Localización de la cuenca y puntos del estudio

La cuenca hidrográfica del río Guadarrama tiene una extensión territorial de aproximadamente de 1708 km². Está localizada en la parte central de la Península Ibérica, concretamente está comprendida entre el Sistema Central y el río Tajo. Siendo el río Guadarrama afluente de la margen derecha del río Tajo.

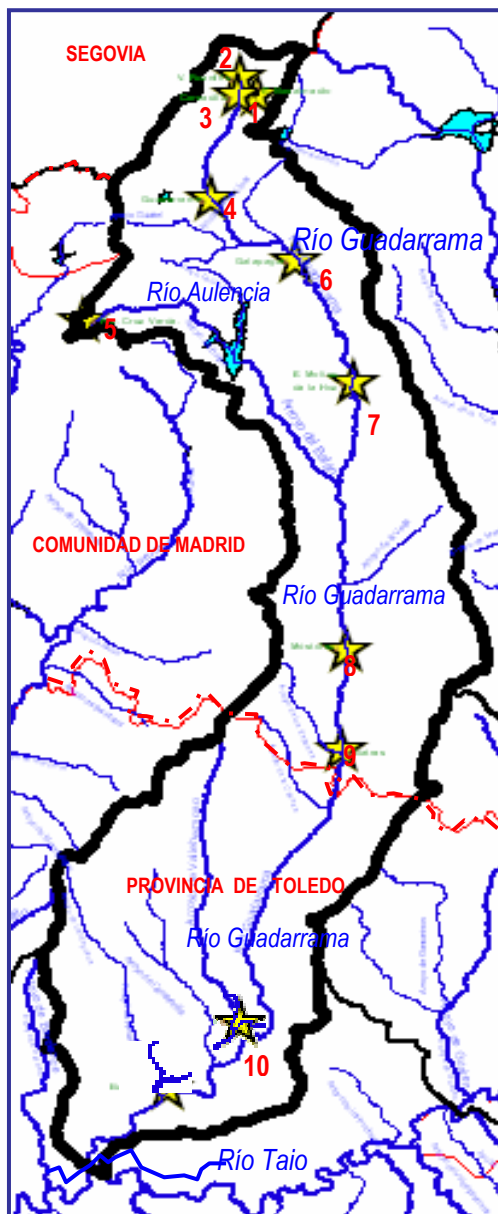
El ámbito geográfico del área de estudio forma parte de la cuenca Hidrográfica del Tajo, concretamente en la subcuenca del río Guadarrama, localizándose casi dos terceras partes dentro de la Comunidad de Madrid y un tercio medida dentro de la provincia de Toledo (Figura7).

La cuenca del río Guadarrama atraviesa por un paisaje muy diverso y con diferentes usos del suelo, que van alterando sus propiedades y la composición de las aguas a medida que discurre aguas abajo, teniendo además los aportes de numerosos ríos secundarios y arroyos tributarios que vierten en él sus aguas en diferentes puntos.

Figura 7: Mapa de situación de la cuenca del río Guadarrama



● Fuente: Elaboración propia



El río Guadarrama discurre en dirección N-SSW, atravesando en este sentido la zona oeste de la Comunidad de Madrid, desde su origen en los Picos de la Sierra de Guadarrama a más de 2000 metros, en los municipios de Navacerrada y Cercedilla, hasta su desembocadura en el río Tajo. La longitud total de la cuenca del río Guadarrama es de 131,8 Km (I.G.N). Esto supone una densidad media de 1 muestreo por cada 13 Km aproximadamente.

La zona de estudio ha sido dividida en tres cuencas: alta, media y baja. Situándose la cuenca media dentro del Parque Regional del Curso Medio del río Guadarrama y su entorno. Está regulado por la Ley 4/2001, de 28 de junio.

Para el muestreo se ha diseñado una red de muestreo específica, consistente en diez puntos, que cubre toda la cuenca del río Guadarrama desde su curso alto, pasando por el medio y llegando al curso bajo, cuya situación (Figura 7) y descripción se expone en la tabla 4.

El área de estudio elegida incluye terrenos pertenecientes a los términos municipales de Navacerrada, Cercedilla, Los Molinos, Guadarrama, San Lorenzo de El Escorial, El Escorial, Collado Mediano, Alpedrete, Collado Villalba, Galapagar, Colmeralejo, Valdemorillo, Torreloz, Las Rozas de Madrid, Villanueva del Pardillo, Majadahonda, Villanueva de la Cañada, Boadilla del Monte, Brunete, Villaviciosa de Odón, Sevilla la Nueva, Móstoles, Navalcarnero, Arroyomolinos, Moraleja de Enmedio, El Álamo, Serranillos del Valle, Batres, Casarrubios del Monte, Carranque, El Viso de San Juan, Palomeque, Chozas de Canales, Lominchar, Recas, Camarerilla, Yuncillos, Villamiel de Toledo, Bargas. Estos municipios serán nuestras unidades de estudio en los valores considerados de población, usos del terreno y consideración de generación de vertidos.

Tabla 4.: Descripción de puntos los muestreo de la cuenca del río Guadarrama

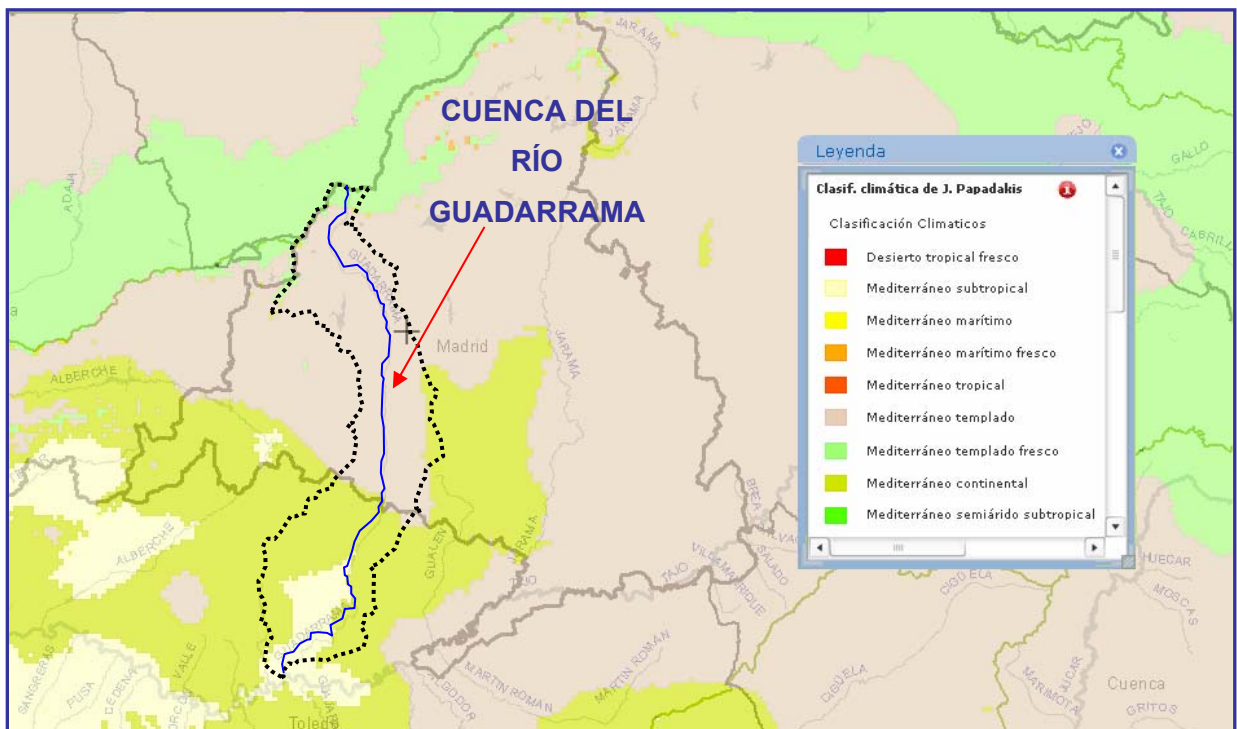
Puntos de Muestreo	Coordenadas GPS UTM huso: 30T			Situación y Localización	Descripción del entorno "in situ"
	X UTM	Y UTM	Cota m.s.n.m		
Cuenca alta					
1.- E. Navalmedio	412689	4511753	1300 m	Al pie del puerto de Navacerrada (desvío por detrás de el Restaurante La Fonda Real).	Se toman distintas muestras de agua y suelos, en la cola de la presa (arroyo). Encontramos típica vegetación de ribera junto al arroyo y un pequeño pastizal de media montaña, en un entorno granítico.
2.- Valle de la Fuenfría (Arroyo de la Venta)	410060	4513855	1365 m	Dentro del parque recreativo de Las Berceas (Las Dehesas). Bajo las tirolinas del ecoparque y cerca de las piscinas de las Dehesas.	Se toman distintas muestras de agua y suelos, junto al arroyo. Encontramos típica vegetación de ribera junto al arroyo, en un entorno de pequeños canchales graníticos.
3.- Cercedilla (Pueblo)	410000	4510050	1120 m	Junto al puente romano, por debajo de la estación de RENFE (desvío Residencia de Empleados BBVA).	Se toman distintas muestras de agua y suelos, junto al río y a un pequeño puente, en una pequeña chopera, se observa que el suelo está bastante antropizado (derribos en general). La vegetación actual es muy diferente de la potencial debido a la transformación que ha sufrido el territorio por la acción del hombre y tan solo se pueden encontrar etapas regresivas producidas por la alteración antrópica del medio natural.
4- Guadarrama (Pueblo)	0408922	4502245	935 m	Junto a la antigua carretera nacional VI, debajo del puente que atraviesa el río.	Se toman distintas muestras de agua y suelos, junto al río y a un pequeño puente, en una pequeña chopera merendero, cerca de una gasolinera CEPESA, en un entorno granítico.
5- Puerto de la Cruz Verde (El Escorial)	403611	4095428	1110 m	Poco antes de llegar al alto del puerto de la Cruz Verde, , cerca Restaurante-Terraza "El Tomillar".	Se toman distintas muestras de agua y suelos, junto a un pequeño puente en un arroyo (Arroyo del Batán), en un entorno granítico.
Cuenca media					
6- Galapagar-La Navata	4116779	4495042	870 m	Aguas abajo del embalse de las Nieves. Cerca de la estación de RENFE Galapagar-La Navata.	Se toman distintas muestras de agua y suelo junto al río, en una chopera, se observa que el suelo está bastante antropizado. Encontramos típica vegetación de ribera junto al río, en un entorno granítico. La vegetación actual es muy diferente de la potencial debido a la transformación que ha sufrido el territorio por la acción del hombre y tan solo se pueden encontrar etapas regresivas producidas por la alteración antrópica del medio natural.
7- E. de Molino de la Hoz (Pte. Romano)	420496	448119	620 m	Aguas abajo del embalse Molino de la Hoz. Junto al Restaurante la Playa, y el puente del Retamar. Junto a la antigua Ctra. Escorial-Madrid.	Se toman distintas muestras de agua y suelos, junto al río y al puente del Retamar, en una zona de recreo rodeada de chopos, se observa que el suelo es arenoso. Encontramos típica vegetación de ribera junto al río, en un entorno granítico.
8- Móstoles Urbanización Guadarrama	419838	4463002	550 m	Junto al antiguo puente de hierro ferroviario, y la urbanización Guadarrama.	Se toman distintas muestras junto al río y al antiguo puente de hierro ferroviario, se observa que existen asentamientos urbanos ilegales a lo largo del río. Encontramos típica vegetación de bosque de ribera.
9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón)	420651	4452298	550 m	En la carretera Navalcarnero-Chinchón, km 11, junto a una gasolinera de CEPESA.. M-404.	Se toman distintas muestras de agua y suelos, junto al río y a un puente, en una chopera merendero, cerca de una gasolinera CEPESA, en un entorno detrítico.
Cuenca baja					
10- Bargas (M-403 con C.M 4006)	404408	4421781	451 m	Junto al cruce de la M-403 con C.M 4006, dirección Torrijos-Villamiel.	Se toman distintas muestras de agua y suelos, junto a un puente y al río con típica vegetación de bosque de ribera. En un entorno detrítico.

2.3 Climatología y vegetación

2.3.1 Climatología

Según la clasificación agroclimática de J.Papadakis, el clima de la región de estudio se caracteriza por su clima continental con tendencia mediterránea. En concreto, el clima de la cuenca del Guadarrama es de tipo mediterráneo templado, con cierta continentalidad (Figura 8).

● **Figura 8: Mapa de clasificación climática de la cuenca del río Guadarrama**



● **Fuente:** <http://sig.mapa.es/siga/>

El clima de la región se clasifica según Papadakis como clima mediterráneo continental templado, caracterizado por la estacionalidad anual del régimen de precipitaciones y por la amplitud térmica anual, con veranos calurosos e inviernos muy fríos.

Los datos meteorológicos de los municipios correspondientes a el área de estudio son suministrados por el Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA) del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, y quedan reflejados en las tablas 5.1, 5.2, 5.3.

Si dividimos la cuenca en tres tramos:

- **En la cuenca alta del Guadarrama** se observa que entre los 912 y 1462 metros de altitud, las precipitaciones anuales se sitúan entre los 771 y 1052 mm, siendo la precipitación media anual en esta área de estudio de 858,11 mm. Respecto a la temperatura media anual en esta zona está entre los 8,7 y 12,4 °C, siendo la temperatura media anual en esta área de estudio de 10,92 °C, llegando a temperatura media de máximas en verano de 28,86 °C y a temperatura media de mínimas en invierno de – 0,92 °C. En esta zona cercana a la sierra de Guadarrama, se observa una evapotranspiración potencial (ETP) media anual de 659 mm.

- **En la cuenca media del Guadarrama** se observa que entre los 602 y 850 metros de altitud, las precipitaciones anuales se sitúan entre los 432 y 685 mm, siendo la precipitación media anual en esta área de estudio de 505,53 mm. Respecto a la temperatura media anual en esta zona está entre los 12 y 14,1 °C, siendo la temperatura media anual en esta área de estudio de 13,26 °C, llegando a temperatura media de máximas en verano de 31,91 °C y a temperatura media de mínimas en invierno de 0,06 °C. Por último, se observa una evapotranspiración potencial (ETP) media anual de 745,74 mm.

- **En la cuenca baja del Guadarrama** se observa que entre los 524 y 602 metros de altitud, las precipitaciones anuales se sitúan entre los 411 y 460 mm, siendo la precipitación media anual en esta área de estudio de 444,33 mm. Respecto a la temperatura media anual en esta zona está entre los 14,1 y 15,2 °C, siendo la temperatura media anual en esta área de estudio de 14,59 °C, llegando a temperatura media de máximas en verano de 33,83 °C y a temperatura media de mínimas en invierno de 1,03 °C. Por último, se observa una evapotranspiración potencial (ETP) media anual de 794,33 mm.

La cuenca, se considera como un sistema físico que ante una precipitación genera una escorrentía. La presencia de granito o el gneis en la cuenca alta hace que la retención de agua por el terreno sea prácticamente nula. Puede decirse que al segundo día de un régimen de lluvias, la totalidad de la precipitación se convierte en caudales circunlantes por los cauces, sin más excepción que las nieves que quedan retenidas por encima de la cota 1.600 m. Por el contrario, la cuenca baja es una auténtica esponja que absorbe el 80 por 100 de las precipitaciones y se va desangrando poco a poco por las diferentes capas alternas de arenas y margas que constituyen el mioceno de la meseta (Cabala, J., 1966).

En resumen, se puede decir que el clima en esta área de estudio varía notablemente con la altura, diferenciándose las distintas zonas climáticas, tal variación en el clima va a producir una variación en el ciclo hidrológico de la cuenca y por lo tanto en los recursos hídrico disponibles en la zona de estudio.

Tabla 5.1: Datos climáticos de la cuenca alta del río Guadarrama						
Municipios de la Cuenca Alta	Altitud (metros)	Pluviometría anual (mm)	ETP anual (mm)	Temperatura media de mínimas del mes más frío (°C)	Temperatura media anual (°C)	Temperatura media de máximas del mes más cálido (°C)
Cuenca alta						
Navacerrada	1462	1052	588	-2,10	8,70	25,80
Cercedilla	1434	1038	601	-1,80	8,90	26
Molinos (Los)	1201	932	646	-1,10	10,40	28
Guadarrama	1151	878	665	-0,70	10,90	28,90
Escorial (El)	912	771	702	-0,10	12,30	30,30
San Lorenzo de El Escorial	1161	844	677	-0,20	11,20	29,30
Collado Mediano	1060	815	666	-1	11,3	29,3
Alpedrete	935	730	693	-0,6	12,2	30,8
Collado Villalba	962	663	693	-0,70	12,40	31,30
Valores Medios		858,11	659,00	-0,92	10,92	28,86

● Fuente: <http://sig.mapa.es/sigal/>

Tabla 5.3: Datos climáticos de la cuenca baja del río Guadarrama						
Municipios de la Cuenca Baja	Altitud (metros)	Pluviometría anual (mm)	ETP anual (mm)	Temperatura media de mínimas del mes más frío (°C)	Temperatura media anual (°C)	Temperatura media de máximas del mes más cálido (°C)
Casarrubios del Monte	607	437	779	1,1	14,1	32,3
Carranque	614	452	778	0,9	14,2	32,8
Viso de San Juan (El)	604	455	788	1,1	14,4	33
Palomeque	602	460	788	1,1	14,5	33,4
Chozas de Canales	579	455	796	1,3	14,6	33,4
Lominchar	604	455	791	1,1	14,5	33,9
Recas	543	444	802	1	14,8	34,7
Camarenilla	505	440	812	1	15	35,10
Yuncillos	520	430	809	0,9	15	35,4
Villamiel de Toledo	503	446	816	1	15,10	35,10
Bargas	524	411	818	0,8	15,2	35,6
Valores Medios		444,33	794,33	1,03	14,59	33,83

● Fuente: <http://sig.mapa.es/sigal/>

Tabla 5.2: Datos climáticos de la cuenca media del río Guadarrama						
Municipios de la Cuenca Media	Altitud (metros)	Pluviometría anual (mm)	ETP anual (mm)	Temperatura media de mínimas del mes más frío (°C)	Temperatura media anual (°C)	Temperatura media de máximas del mes más cálido (°C)
Galapagar	850	591	717	-0,4	12,7	31,7
Colmenarejo	810	616	714	-0,5	12,5	31
Valdemorillo	796	685	708	-0,8	12	30,3
Torreodones	822	560	721	-0,50	12,90	32,20
Rozas de Madrid (Las)	705	522	739	-0,20	13,30	32,30
Villanueva del Pardillo	661	556	739	-0,40	13,10	31,80
Majadahonda	695	524	740	0	13,30	32
Villanueva de la Cañada	619	555	737	-0,50	12,90	31,60
Boadilla del Monte	684	497	743	0,20	13,30	31,80
Brunete	621	498	739	-0,50	12,80	31,60
Villaviciosa de Odón	624	453	750	0,10	13,20	31,80
Sevilla la Nueva	620	479	745	-0,30	13	31,90
Móstoles	635	439	759	0,60	13,60	32
Navalcarnero	610	444	764	0,40	13,60	32,20
Arroyomolinos	602	433	766	0,70	13,80	32,20
Moraleja de Enmedio	653	438	765	0,80	13,80	32,30
Álamo (El)	600	432	777	0,90	14,10	32,40
Serranillos del Valle	613	445	772	0,8	14	32,6
Batres	603	438	774	0,8	14,1	32,5
Valores Medios		505,53	745,74	0,06	13,26	31,91

● Fuente: <http://sig.mapa.es/siga/>

2.3.2 Vegetación

Dentro de la cuenca del Guadarrama en su tramo medio, está situado el Parque Regional del Curso Medio del río Guadarrama, con una extensión aproximada de 22.116 ha, esta alberga zonas de alto valor ecológico y paisajístico, entre las que destacan, los sotos fluviales y las masas de encinar. Según González, P. (2008), estas áreas de indudable calidad ambiental, coexisten con zonas ciertamente degradadas, en su mayor parte por la actividad urbanizadora que se está produciendo en los últimos años, principalmente, en los términos municipales de su entorno tales como: El Álamo, Arroyomolinos, Batres, Boadilla del Monte, Brunete, Las Rozas,

Majadahonda, Móstoles, Serranillos del Valle, Sevilla la Nueva, Villanueva de la Cañada, Villanueva del Pardillo y Villaviciosa de Odón.

La vegetación encontrada “in situ” en los diez puntos de muestreo dentro de la cuenca de estudio, descritos en el apartado 4.1, queda reflejada en la Tabla 5.

En resumen, la vegetación actual es muy diferente de la potencial debido a la transformación que ha sufrido el territorio por la acción del hombre y tan solo se pueden encontrar etapas regresivas producidas por la alteración antrópica del medio natural.


El Decreto 124/2002 de 5 de julio, por el que se aprueba la ampliación del Plan de Ordenación de los Recursos Naturales del Parque Regional del Curso Medio del Río Guadarrama y su entorno, desarrolla la zonación ambiental por ecosistema que a continuación se expone:

- Sotos y vegas del Guadarrama-Aulencia.
- Encinares sobre la rampa de la sierra.
- Masas mixtas de encina y pino sobre la rampa de la sierra.
- Etapas de sustitución del encinar sobre la rampa de la sierra.
- Encinares sobre la campiña detrítica.
- Etapas de sustitución del encinar sobre la campiña detrítica.
- Masas mixtas de encina y pino sobre la campiña detrítica.
- Pinares de repoblación sobre la campiña detrítica.
- Cultivos de secano sobre la campiña detrítica.

El establecimiento de la zonación ambiental constituye un instrumento para avanzar en la definición del modelo de ordenación en sus aspectos espaciales, es decir, en la asignación de zonas con diferente régimen de usos y actividades.

Tabla 6: Vegetación “in situ” de la cuenca del río Guadarrama

Puntos de Muestreo	Coordenadas GPS - UTM huso: 30T			Vegetación “in situ”			
	X UTM	Y UTM	Cota m.s.n.m	Estrato Arbóreo	Estrato Arbustivo	Estrato Matorral	Estrato Herbáceo
1- E. Navalmedio	412689	4511753	1300 m	- Fresnos (<i>Fraxinus angustifolia</i>) - Pinos de Valsain (<i>Pinus sylvestris</i>) - Enebro común (<i>Juniperus communis</i>) - Encinas (<i>Quercus ilex</i> L.) - Sauces (<i>Salix atrocinerea</i> y <i>Salix salvifolia</i>)	- Zarzas (<i>Rubus ulmifolius</i>) - Retama blanca (<i>Genista florida</i>) - Jarales de estepa (<i>Cistus laurifolius</i>) - Brezo blanco (<i>Erica arborea</i>) - Gamonales (<i>Asphodelus albus</i>)	- Matorrales ruderal-nitrófilos	- Diversas crucíferas - Boragináceas - Gramíneas - Helechos águila (<i>Pteridium aquilim</i>) - Tomillo (<i>Thymus zygis</i>)
2- Arroyo de la Venta (Valle de la Fuenfria-Cercedilla)	410060	4513855	1365 m	- Fresnos (<i>Fraxinus angustifolia</i>) - Pinos de Valsain (<i>Pinus sylvestris</i>) - Piornos serrano (<i>Cytisus purgans</i>) - Robles rebollo (<i>Quercus pyrenaica</i>) - Abedules (betuna celtibérica)	- Zarzas (<i>Rubus ulmifolius</i>) - Retama blanca (<i>Genista florida</i>) - Retama (<i>Genista cinerea</i>)	- Juncos (<i>Juncus articulatus</i>)	- Poleo (<i>Mentha pulegium</i>) - Alcaravea (<i>Carum verticillatum</i>) - Helechos águila (<i>Pteridium aquilim</i>) - Musgo común - Gamonales (<i>Asphodelus albus</i>)
3- Cercedilla (Pueblo)	410000	4510050	1120 m	- Chopos (<i>Populus nigra</i>)	- Zarzas (<i>Rubus ulmifolius</i>) - Retamas (<i>Lygos sphaerocarpa</i>)	- Matorrales	- Gramíneas - Urtica dioica - Malva sylvestris - Dedalera (<i>Digitalis purpurea</i>) - Genciana (<i>Gentiana lutea</i>) - Lirio silvestre (<i>Lilium martagon</i>)
4- Guadarrama (Pueblo)	408922	4502245	935 m	- Chopos (<i>Populus nigra</i>) - Fresnos (<i>Fraxinus angustifolia</i>) - Sauces (<i>Salix fragilis</i>) - Olmos (<i>Ulmus minor</i>)	- Zarzas (<i>Rubus ulmifolius</i>) - Retamas (<i>Lygos sphaerocarpa</i>) - Espino cerval (<i>Rhamnus catártica</i>)	- Matorrales	- Gramíneas - Urtica dioica - Malva sylvestris - Mejorana (<i>Thymus mastichina</i>) - Cantueso (<i>Lavandula pedunculata</i>) - Tomillo (<i>Thymus zygis</i>) - Trébol rojo (<i>Trifolium pratense</i>) - Trébol blanco (<i>Trifolium repens</i>)
5- El Escorial-Puerto de la Cruz Verde	403611	4095428	1110 m	- Fresnos (<i>Fraxinus angustifolia</i>) - Robles rebollo (<i>Quercus pyrenaica</i>) - Pino albar (<i>Pinus sylvestris</i>) - Chopos (<i>Populus nigra</i>) - Sauces (<i>Salix fragilis</i>)	- Zarzas (<i>Rubus ulmifolius</i>) - Retamas (<i>Lygos sphaerocarpa</i>)	- Matorrales	- Helechos (<i>Pteridium aquilinum</i>) - Gramíneas - Urtica dioica - Malva sylvestris - Mejorana (<i>Thymus mastichina</i>) - Tomillo (<i>Thymus zygis</i>) - Cantueso (<i>Lavandula pedunculata</i>)

 **Tabla 6: Vegetación “in situ” de la cuenca del río Guadarrama**

Puntos de Muestreo	Coordenadas GPS - UTM huso: 30T			Vegetación “in situ”			
	X UTM	Y UTM	Cota m.s.n.m	Estrato Arbóreo	Estrato Arbustivo	Estrato Matorral	Estrato Herbáceo
6- Galapagar-La Navata	411677	4495042	870 m	- Fresnos (<i>Fraxinus angustifolia</i>) - Chopos (<i>Populus nigra</i>) - Encinas (<i>Quercus ilex</i> L)	- Zarzas (<i>Rubus ulmifolius</i>) - Retamas (<i>Lygos sphaerocarpa</i>)	- Matorrales	- Gramíneas - Urtica dioica - Malva sylvestris - Juncos (<i>Juncus articulatus</i>) - Poleo (<i>Mentha pulegium</i>) - Dedalera (<i>Digitalis purpurea</i>) - Genciana (<i>Gentiana lutea</i>) - Lirio silvestre (<i>Lilium martagon</i>)
7- E. de Molino de la Hoz-Pte. Romano	420496	448119	620 m	- Pino albar (<i>Pinus sylvestris</i>) - Chopos (<i>Populus nigra</i>) - Encinas (<i>Quercus ilex</i> L)	- Zarzas (<i>Rubus ulmifolius</i>) - Retamas (<i>Lygos sphaerocarpa</i>)	- Matorrales	- Gramíneas - Urtica dioica - Malva sylvestris - Juncos (<i>Juncus articulatus</i>) - Gamonales (<i>Asphodelus albus</i>)
8- Móstoles (Urbanización Guadarrama)	419838	4463002	550 m	- Chopos (<i>Populus nigra</i>) - Sauces (<i>Salix fragilis</i>) - Olmos (<i>Ulmus minor</i>)	- Zarzas (<i>Rubus ulmifolius</i>) - Retamas (<i>Lygos sphaerocarpa</i>)	- Matorrales	- Gramíneas - Urtica dioica - Malva sylvestris - Juncos (<i>Juncus articulatus</i>) - Gamonales (<i>Asphodelus albus</i>)
9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón)	420651	4452298	550 m	- Chopos (<i>Populus nigra</i>) - Sauces (<i>Salix fragilis</i>) - Olmos (<i>Ulmus minor</i>) - Encinas (<i>Quercus ilex</i> L)	- Zarzas (<i>Rubus ulmifolius</i>) - Retamas (<i>Lygos sphaerocarpa</i>)	- Matorrales	- Gramíneas
10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006)	404408	4421781	451 m	- Chopos (<i>Populus nigra</i>) - Sauces (<i>Salix fragilis</i>) - Olmos (<i>Ulmus minor</i>)	- Zarzas (<i>Rubus ulmifolius</i>) - Retamas (<i>Lygos sphaerocarpa</i>)	- Matorrales	- Gramíneas

2.4 Hidrología

La red hidrográfica que drena la zona de estudio pertenece a la Cuenca del Tajo, en la subcuenca del río Guadarrama. Desde el punto de vista de la hidrología superficial, la variable más importante a analizar es la red de drenaje que atraviesa el ámbito de estudio. En este sentido, la principal arteria fluvial en sentido extenso es el río Guadarrama que discurre de norte a sur principalmente.

El río Guadarrama, afluente del río Tajo por su margen derecha, tiene su origen en el Valle de la Fuenfría, a unos 1.900m de altura, dentro del término municipal de Cercedilla en la ladera sur de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central). Se extiende a lo largo de 131,8Km, desembocando finalmente en la provincia de Toledo. Recorre ambas provincias en un trazado muy ajustado a la vertical norte-sur. El principal afluente es el río Aulencia, en el curso medio-alto de la cuenca del río Guadarrama, este desemboca por su margen derecha tras recorrer desde las cumbres de El Escorial un trayecto de 34 km.

El régimen hídrico es irregular, con acusadas crecidas y estiajes. El Guadarrama tiene una alimentación nivopluvial, sus aportes de agua proceden de la nieve y de las precipitaciones. Por eso, tendrá un caudal máximo en primavera debido al deshielo y lluvias y también en otoño, por las precipitaciones. En pleno periodo de verano, sufre un fuerte estiaje con caudales mínimos. El régimen de caudales en el río Guadarrama viene condicionado fundamentalmente por:

- Embalse de las Nieves.
- Derivación al Embalse de Valmayor.
- Río Aulencia (Valmayor).
- Profusión de vertidos urbanos.
- Extracciones puntuales para riego y usos diversos.

El principal embalse regulador de la zona de estudio es el de Valmayor enclavado en el río Aulencia. Este embalse soporta una cuenca vertiente de una superficie de 92 km², y almacena un volumen de 124 Hm³ procedente en su mayoría del mismo río, y en menores proporciones de otros arroyos pequeños existentes en su entorno. Existe la posibilidad de trasvase en determinadas épocas desde el embalse de las Nieves, situado en el río Guadarrama (Gómez, C., 1990). Los embalses de menor entidad situados en la zona de estudio son el de Navalmedio, de Las Nieves y de Molino de la Hoz.

Los límites hidrográficos de la cuenca del río Guadarrama son: por el Norte y Noroeste las alturas principales de la sierra del Guadarrama que sirve de divisoria con la cuenca del Duero; por el Este las estribaciones de la misma sierra y los altozanos de la meseta madrileña-toledana que lo separan del río Manzanares y el arroyo Guatén, y por el Oeste otra cadena de sierras y altiplanicies lo separan del río Alberche y sus afluentes Cofio y Perales. Se trata, pues, de una cuenca muy alargada en sentido N-S con una anchura media transversal de unos 18 km (Cábala, J., 1966).

La zona de estudio corresponde a la Cuenca Hidrográfica del Tajo, esta se divide en tres cuencas: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja del río Guadarrama.

Desde el punto de vista hidrogeológico se distinguen las siguientes unidades hidrogeológicas:

- Sustrato granítico paleozoico (cuenca alta).
- Terciario detrítico (cuenca media y baja).
- Cuaternario (cuenca media y baja).

- El sustrato granítico-paleozoico se considera hidrogeológicamente hablando impermeable, si bien pueden existir pequeños acuíferos localizados en fracturas, que mantienen pequeños caudales de aguas de excelente calidad. Posee unos recursos subterráneos que únicamente pueden ser utilizables para cubrir demandas muy pequeñas (del orden de 100 m³/día como máximo, en condiciones hidrogeológicas favorables y con problemas de persistencia del caudal en estiajes prolongados).

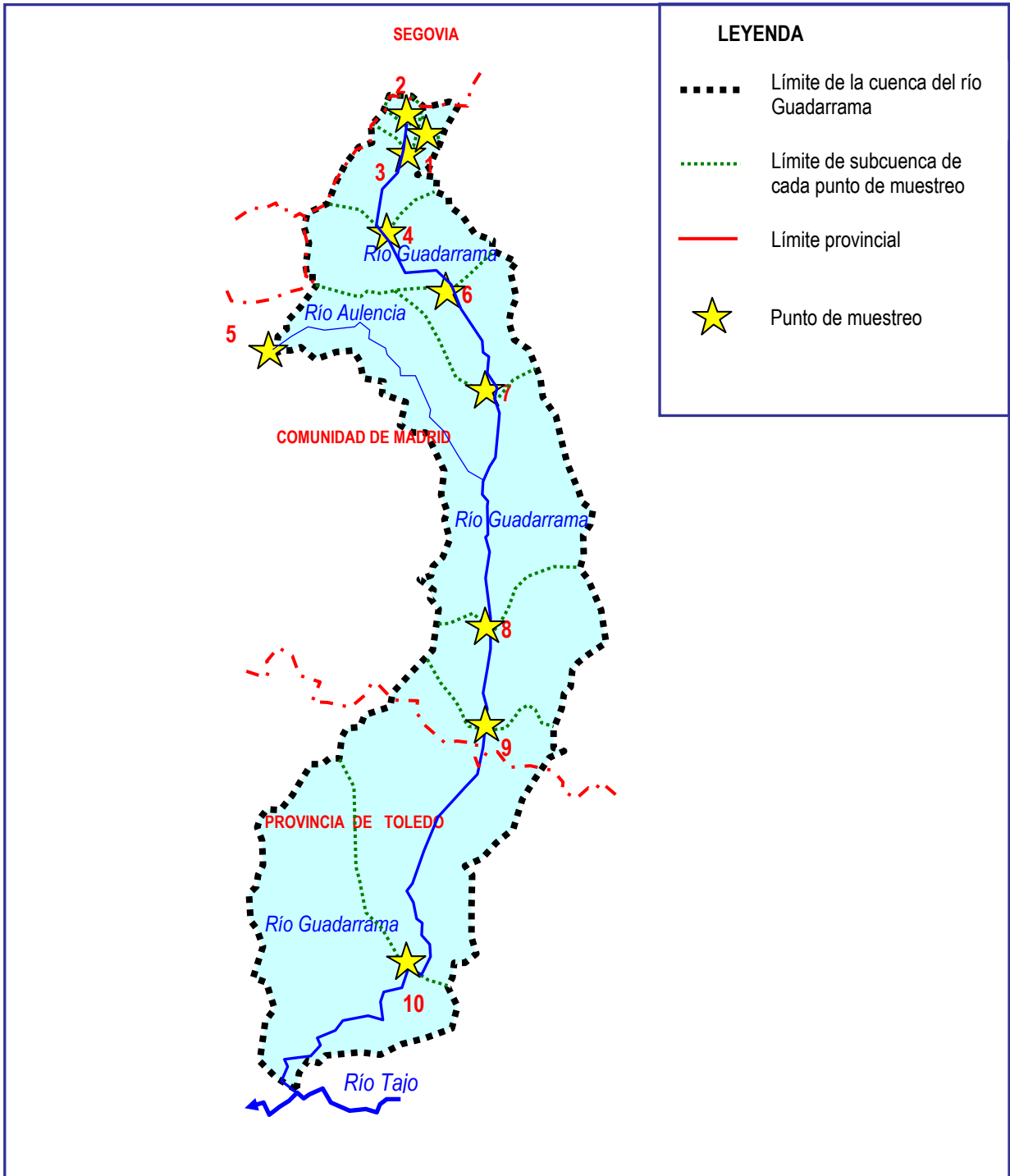
- El Terciario detrítico es un acuífero complejo, fuertemente anisótropo y heterogéneo. La recarga se produce en gran parte por infiltración de agua de lluvia y en menor proporción a partir de las fracturas del Complejo ígneo-metamórfico cuando ambos están en contacto. La descarga se produce subterráneamente, directamente a los aluviales cuaternarios situados en los valles. Se produce un flujo que parte de las zonas topográficas altas a los valles.

El acuífero detrítico terciario de Madrid forma parte de la unidad hidrogeológica 03.05 Madrid - Talavera, ocupando la porción centro septentrional de la cuenca del Tajo, dicha Unidad Hidrogeológica está dentro del acuífero número 14, denominado "Terciario Detrítico de Madrid-Toledo-Cáceres", según la nomenclatura del Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1985), se divide en dos subunidades, la de Madrid-Toledo y la de Cáceres. La zona de estudio en su mayor extensión (cuenca media y baja) está en el ámbito de la subunidad Madrid-Toledo.

- El Cuaternario sustrato desarrollado en los terrenos próximos al cauce con una profundidad del orden de 3m.

Observando la morfología de la cuenca se consideraron diez subcuencas hidrográficas (Figura 9) que engloban a los distintos puntos de muestreo dentro de la cuenca total de estudio. Se planimetraron dichas subcuencas para cuantificar sus superficies (Tabla 7), dato necesario en el cálculo del coeficiente de exportación de nutrientes en toda la cuenca de estudio.

● **Figura 9: Subcuencas hidrográficas de la cuenca del río Guadarrama**



● Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Superficies de las subcuencas hidrográficas	
SUBCUENCAS (Ptos. Muestreo)	SUPERFICIE (km²)
SUBCUENCA I (Pto.1- E. Navalmedio)	8,035
SUBCUENCA II (Pto.2- Valle de la Fuenfría (Arroyo de la Venta))	4,815
SUBCUENCA III (Pto.3- Cercedilla (Pueblo))	16,82
SUBCUENCA IV (Pto.4- Guadarrama (Pueblo))	83,7
SUBCUENCA V (Pto.5-Puerto de la Cruz Verde- El Escorial)	0,25
SUBCUENCA VI (Pto.6- Galapagar-La Navata)	331,57
SUBCUENCA VII (Pto.7- E. de Molino de la Hoz-Pte. Romano)	407,17
SUBCUENCA VIII (Pto.8- Móstoles (Urbanización Guadarrama))	817,19
SUBCUENCA IX (Pto.9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón))	981,06
SUBCUENCA X (Pto. 10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006))	1306,74
CUENCA TOTAL DEL RIO GUADARRA	1708

2.5 Geología

La cuenca del Guadarrama, que se encuentra en la Comunidad de Madrid y en la provincia de Toledo, geológicamente está localizada entre la Submeseta Meridional o Cuenca del Tajo al Sur y la sierra del Guadarrama, en el complejo ígneo-metamórfico del Sistema Central al Norte.

La cuenca de estudio atraviesa dos unidades de relieve: la Rampa de la Sierra y la llanura arenosa de la depresión del Tajo. La Falla de Torrelodones, situada en el municipio homónimo - cerca de su límite con Las Rozas de Madrid -, sirve de transición entre ambas unidades geológicas.

Desde un punto de vista geomorfológico, la cuenca alta junto con la parte septentrional de la cuenca media del río Guadarrama integra formaciones graníticas y materiales de gneiss.

El resto de la cuenca media y baja del río Guadarrama discurre por campiñas detríticas y vegas, formadas a partir de los depósitos aluviales del cuaternario, a través de inundaciones y flujos de barro. Los materiales areno-arcillosos rellenan la antigua depresión sobre la que se encuentra la mayor parte de la cuenca del Guadarrama.

Respecto a las características litológicas de la cuenca, esta presenta una gran homogeneidad, constituida apenas por dos grandes conjuntos. Su cabecera se desarrolla sobre granitos tardihercínicos que ocupan una cuarta parte del área de la cuenca, entre los que afloran algunos gneises glandulares hercínicos. Dichos materiales forman el frente montañoso y la Rampa Meridional de la Sierra de Guadarrama. El resto de la cuenca está constituida por las arenas arcósicas de la depresión terciaria del Tajo procedentes directamente de los abanicos aluviales originados en los citados materiales del Sistema Central.

No existe una diferenciación neta que permita separar unidades litológicas distintas en estos sedimentos terciarios, pero se manifiesta un cambio lateral de facies con una clara disminución del tamaño de grano de las arenas, y especialmente un aumento de las arcillas, hacia los tramos bajos del río. (Garzón, G., 1996).

El cauce discurre encajado en un suave valle flanqueado por retazos de múltiples niveles de terrazas, que en la salida del macizo granítico presentan alturas de hasta 90m. Composicionalmente en las terrazas más altas dominan las gravas pero paulatinamente estas van haciéndose más arenosas aguas abajo (ITGE, 1993).

La topografía es consecuencia de su constitución geológica. El tercio norte está formado por terrenos antiguos (granito y gneis) y el resto por terrenos arenosos del Mioceno. La cadena montañosa que bordea su cabecera tiene altitudes que varían de 1800 metros en el extremo occidental a 2200 en el oriental.

Al pie de esa cadena se extiende una altiplanicie con altitudes descendentes desde 1000 a 800 metros, que termina en un nuevo escalón formado por el final del granito,

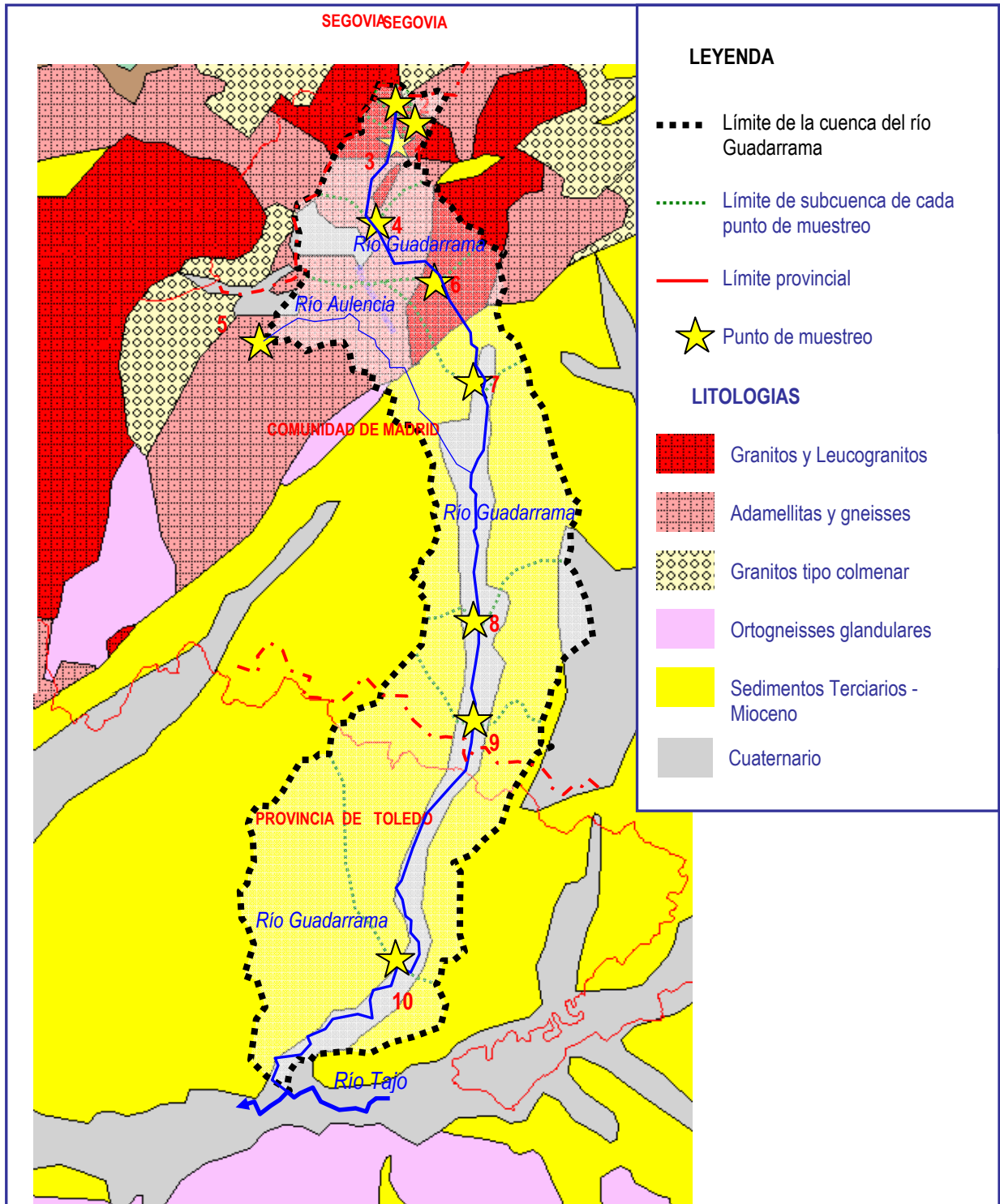
siguiendo la línea Valdmorillo-Torrelozones. Desde aquí hasta el Tajo, las dos terceras partes de la cuenca total, nos encontramos la meseta miocena con altitudes de 650 a 400 metros (Cabala, J., 1966).

La distribución general de la litología en la Cuenca del Guadarrama (Cubillo, F., 1986) es la siguiente (Tabla 8.1).

 Tabla 8.1: Litología de la Cuenca del Guadarrama		
Litología	Porcentaje	Superficie Ha.
Rocas graníticas	38,5	38.084
Rocas metamórficas	6,2	6.133
Sedimentos terciarios	51,5	50.944
Sedimentos cuaternarios	2,7	2.671
Zona inundada	1,1	1.088

Partiendo de datos facilitados por el IGME-Confederación Hidrográfica del Tajo y utilizando el programa ArcView Gis 3.2., se ha obtenido la geología de la Cuenca del Guadarrama (Figura 10), el cual se planímetro para cuantificar la litología en las distintas subcuencas (Tabla 8.2).

● **Figura 10: Geología de la cuenca del río Guadarrama**



● Fuente: Elaboración propia

Tabla 8.2: Litología en las distintas subcuencas del río Guadarrama	
SUBCUENCAS (Ptos. Muestreo)	Litología (%)
SUBCUENCA I (Pto.1- E. Navalmedio)	10 % Adamellitas y Gneisses 90% Granitos y Leucogranitos
SUBCUENCA II (Pto.2- Valle de la Fuenfria (Arroyo de la Venta))	100% Granitos y Leucogranitos
SUBCUENCA III (Pto.3- Cercedilla (Pueblo))	100% Granitos y Leucogranitos
SUBCUENCA IV (Pto.4- Guadarrama (Pueblo))	55 % Adamellitas y Gneisses 45% Granitos y Leucogranitos
SUBCUENCA V (Pto.5-Puerto de la Cruz Verde- El Escorial)	100 % Adamellitas y Gneisses
SUBCUENCA VI (Pto.6- Galapagar-La Navata)	70 % Adamellitas y Gneisses 30% Granitos y Leucogranitos
SUBCUENCA VII (Pto.7- E. de Molino de la Hoz-Pte. Romano)	15% Terciario + Cuaternario (13% Terciario, 2% Cuaternario) 60 % Adamellitas y Gneisses 25% Granitos y Leucogranitos
SUBCUENCA VIII (Pto.8- Móstoles (Urbanización Guadarrama))	50% Terciario + Cuaternario (40% Terciario, 10% Cuaternario) 30 % Adamellitas y Gneisses 20% Granitos y Leucogranitos
SUBCUENCA IX (Pto.9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón))	65% Terciario + Cuaternario (50% Terciario, 15% Cuaternario) 20 % Adamellitas y Gneisses 15% Granitos y Leucogranitos
SUBCUENCA X (Pto. 10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006))	75% Terciario + Cuaternario (60% Terciario, 15% Cuaternario) 15 % Adamellitas y Gneisses 10% Granitos y Leucogranitos
TODA LA CUENCA DE ESTUDIO DEL RIO GUADARRAMA	80% Terciario + Cuaternario (65% Terciario, 15% Cuaternario) 12 % Adamellitas y Gneisses 8 % Granitos y Leucogranitos

2.6 Edafología y edafofauna

2.6.1 Edafología

Según la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Conservation Service, 1987), se distinguen tres tipos de suelos presentes en la cuenca de estudio (Figura 10).

a) **Los Entisoles:** Se caracterizan por una débil evidencia de la acción de procesos edáficos significativos, lo que constituye su distinción taxonómica más importante. De este modo se caracterizan, fundamentalmente, por la ausencia o bien escaso desarrollo de los horizontes edafogénéticos, presentando como característica común de diagnóstico un epípedon ócrico (horizonte superficial de color claro con bajo contenido en carbono orgánico y generalmente de poco espesor).

Se han encontrado Entisoles pertenecientes al suborden ortents y a los aquents.

Los ortents, son suelos afectados por una activa erosión de origen geológico, ocupando generalmente, posiciones fisiográficas en pendientes acusadas. Dentro de la categoría de “grandes grupos”, encontramos: xerorthents (orthents afectados por un régimen de humedad xerico), formados a partir de diversos materiales (granitos, gneis, sedimentos arcósicos). Habitualmente presentan un epipedon ochrico con espesor débil. A nivel de “subgrupo”, se han encontrado los siguientes xerorthents: dystric y lithic.

Los aquents, son suelos que durante largos períodos del año se presentan saturados de agua, originándose condiciones reductoras puestas de manifiesto por colores de chromas bajos en algunos horizontes del perfil. A nivel de gran grupo se han encontrado aquents definidos por exclusión, con el “subgrupo” typic.

b) **Los Inceptisoles:** Se caracterizan fundamentalmente, por su evidente desarrollo edáfico, lo que se traduce en la presencia de horizontes de diagnósticos. En general presentan un epipedon ochrico o úmbrico, y en ocasiones un horizonte de diagnóstico cámbico. Estos suelos están ampliamente representados dentro de la zona de estudio tanto sobre materiales graníticos y gnéisicos como en materiales terciarios. A nivel de suborden, encontramos inceptisoles pertenecientes a los ochrepts y umbrepts.

Los ochrepts, presentan un epipedon ochrico de color claro con escaso contenido en materia orgánica y frecuentemente con un espesor inferior a los 50 cm. Se incluyen también en éste suborden, aquellos suelos con un

epipedon úmbrico de espesor menor a 25 cm y un régimen de temperaturas mesic. Los umbrepts presentan un epipedon úmbrico de color oscuro, rico en materia orgánica, desaturado, con pH ácido y que se corresponde dentro de la zona con humus tipo mull ácido o mull moder.

Dentro de la categoría taxonómica de gran grupo, los ochrepts presentan un régimen de humedad rico, lo que permite clasificarlos como xerochrepts, los subgrupos representados son: Dystric y Aquic dystric.

Los dystric xerochrepts presentan a diferencia de los typic, una saturación bases inferior al 60%, en alguna parte del suelo entre los 25 y 75 cm de profundidad.

Los aquic dystric se trata de ochrepts desaturados y afectados por condiciones de hidromorfía durante períodos importantes del año, a consecuencia de esto presentan horizontes con manifestaciones de pseudogley.

Los umbrepts están representados a nivel de gran grupo por los xerumbrepts, y caracterizados por un régimen de humedad rico. A nivel de subgrupo se han encontrado los lithic xerumbrepts, con contacto lítico dentro de los primeros 50 cm de profundidad, y los entic xerumbrepts sin horizonte de diagnóstico cámbico.

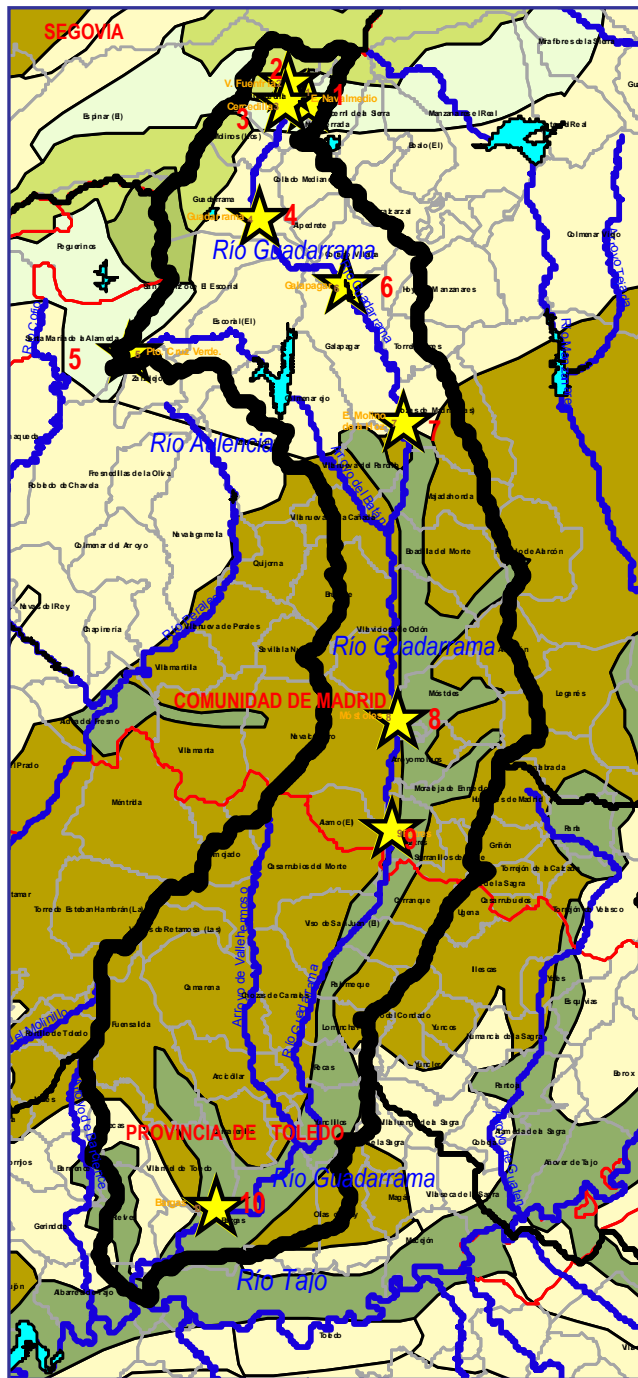
Por otra parte se considera importante las distintas asociaciones que estos suelos puedan tener relacionadas con el material litológico que le sirve de sustrato.

c) **Los Alfisoles:** Este tipo de suelos tienen régimen de humedad Xeralfs. Los Xeralfs presentan un epipedon ócrico descansa sobre el horizonte argílico pudiendo ser el límite brusco entre ambos. Se han encontrado en el área de estudio un tipo de Xeralfs: Haploxeralfs.

Los Haploxeralfs son suelos que poseen colores pardos (pardo rojizo, pero no rojos (hue de 5YR o más amarillo), con poca materia orgánica y un límite neto o gradual hacia un horizonte argílico con una clase textural franca.

Partiendo de datos facilitados por el MIMAM-CSIC y utilizando el programa ArcView Gis 3.2., se ha obtenido la edafología suelos de la cuenca del Guadarrama (Figura 11).

Figura 11: Edafología de la cuenca del río Guadarrama



LEYENDA

Color	Símbolo	Orden	Suborden	Grupo	Asociación
[Light Green]		99 Inceptisol	Umbrept	Cryumbrept	Cryorthent+Cryochrept
[Light Green]		105 Inceptisol	Umbrept	Xerumbrept	Xerorthent+Xerochrept
[Light Green]		45m Entisol	Orthent	Orthent	Xerumbrept
[Light Green]		95 Inceptisol	Ochrept	Xerochrept	Xerorthent+Xerumbrept
[Light Green]		8X Alfisol	Xeralf	Haploxeraif	Xerochrept+Xerorthent
[Light Green]		51 Entisol	Orthent	Xerorthent+Xerofluvent	Xerochrept
[Light Green]		92 Inceptisol	Ochrept	Xerochrept	Xerorthent
[Light Green]		85 Inceptisol	Ochrept	Xerochrept	Haploxeraif
[Yellow Star]		Punto de muestreo			

Fuente: Elaboración propia

2.6.2 Edafofauna

El incremento demográfico de la población está íntimamente ligado a la producción agrícola y al desarrollo industrial. Actualmente el impacto de estas actividades afecta a más del 95% del medio ambiente edáfico, y tiene consecuencias adversas sobre las distintas especies de organismos que componen la biodiversidad y que interactúan dentro del ecosistema del que forman parte.

La regulación interna del funcionamiento de los ecosistemas edáficos naturales es producto de la biodiversidad, que opera a través de los flujos de energía, de nutrientes y de sinergias biológicas. Sin embargo, los procesos de autorregulación que la biodiversidad edáfica propicia, se ven distorsionados debido a los cambios de uso del suelo, que con frecuencia empobrecen y alteran su comunidad biológica.

El suelo está lleno de vida, de grandes comunidades, algunas de ellas con funciones muy distintas y complejas. El trabajo de estas comunidades biológicas es importante. Ellas fertilizan el suelo, descomponen los organismos muertos y transforman los nutrientes para ser usados por las plantas. Algunos de estos organismos son microscópicos, otros son visibles fácilmente a simple vista. Pero aunque los veamos o no, son vitales para la salud del ecosistema.

Hay que tener en cuenta que la edafofauna realiza funciones de enorme importancia para la actividad y estructura de los suelos como soporte de las plantas. Básicamente son tres las funciones a destacar: una acción mecánica, una acción química y una acción biológica.

1) Acción mecánica: se produce una formación de agregados estables y mejora de la porosidad. Los animales del suelo fragmentan y distribuyen la materia orgánica y con sus movimientos, construyen pequeñas galerías. Todo esto en conjunto produce una mayor aireación y mejor circulación del agua y el aire en el suelo.

Los microartrópodos en los diferentes niveles del suelo realizan unas funciones parecidas a las de las lombrices. Actúan como trituradores en partículas finas de la materia orgánica, haciéndola más asimilable para la planta.

2) Acción química: se produce una mejora en la lixiviación y un enriquecimiento en minerales asimilables. Así como una degradación de los compuestos orgánicos a moléculas más sencillas. Una mineralización de componentes orgánicos a formas inorgánicas: liberación de nutrientes para las plantas. Una síntesis y excreción de productos orgánicos en el suelo.

También intervienen en el ciclo de numerosos elementos como C, N, P, Ca, Fe y Mn entre otros. Producen compuestos biorreguladores, sustancias alelopáticas, así como de acción bactericida y fungicida entre otras.

3) Acción biológica: se produce una estimulación de la flora microbiana del suelo. El material que ha atravesado el intestino de los animales es atacado más fácilmente por la microflora edáfica (hongos y bacterias), y con ello, aumenta su velocidad de mineralización.

La vida del suelo, su respiración, la movilización de nutrientes, la percolación del agua, la humidificación de la materia orgánica, etc., depende de la biomasa, pero de una biomasa formada en el suelo de cada localidad, por unas especies determinadas y propias. La actividad y fisiología de los suelos ante una variación del medio, su respuesta y capacidad de reacción ante las perturbaciones depende de las diferentes especies que en él viven.

Dentro del grupo de pobladores del suelo, se encuentran determinados taxones que son exclusivamente dependientes del suelo, por éste el medio en el que realizan su actividad. Es este el caso de colémbolos y ácaros del suelo. Por estar estos animales ligados al suelo, todo aquello que ocurra en su hábitat, influirá en su comportamiento y hábitos de vida. Por lo que son un claro reflejo del estado en el que se puede encontrar un suelo. Pueden ser usados como indicadores biológicos, refiriéndonos a organismos vivos que nos indican el estado o la situación de un medio en concreto, que es este caso es el suelo.

Con los bioindicadores se pretende:

- a) predecir el riesgo de productos químicos (principalmente agroquímicos y residuos industriales).*
- b) valorar el impacto de agentes desconocidos o difusos que a menudo tienen efectos crónicos.*

Se define bioindicador como la herramienta para extraer información biológica de un ecosistema que será la base científica para la toma de decisiones en el manejo de lugares contaminados. Se trata de una colección de información ecológica de un ecosistema obtenida de un modo organizado, de tal forma que el conjunto de los diferentes componentes permitan extraer conclusiones sobre la calidad del ecosistema como un todo. Esto debería incluir no solamente aspectos de las especies individuales, sino también aspectos de biodiversidad y funcionamiento.

Dada la complejidad de los ecosistemas del suelo y las estrechas relaciones que se establecen entre los organismos y los procesos del suelo, es muy difícil determinar el efecto del contaminante sin considerar sus efectos interactivos potenciales. Por tanto, un sistema bioindicador ecológicamente relevante debería basarse en la información obtenida a partir de tres categorías: a) animales invertebrados (macrofauna, mesofauna, microfauna), b) microorganismos, c) procesos del ecosistema (dinámica del suelo, descomposición de restos vegetales, ciclo de nutrientes, etc.). Se trata de un modelo jerarquizado en el cual la información de las especies de invertebrados se combina con la información de microorganismos y procesos del suelo.

En el suelo existen tres niveles relativamente cerrados e independientes, con diferentes dimensiones en el espacio y el tiempo:

1) Nivel de bacterias, algas y protozoos: se trata de organismos unicelulares, y algunos pluricelulares como algunos rotíferos y nematodos que viven en el agua de los poros o en la película de agua que rodea las partículas del suelo. El tamaño del ecosistema es de unos pocos mm. a algunos cm. y un volumen de algunos cm^3 . El tiempo ecológico (tiempo de desarrollo de una sucesión) es el orden de días o meses. Se corresponde con el nivel microtrófico en el que los organismos utilizan fácilmente las fuentes de C disponibles, y sirven de alimento a protozoos, rotíferos y nematodos.

2) Nivel de hongos-microartrópodos: lo componen pequeños organismos pluricelulares incluyendo ácaros, colémbolos y larvas de otros organismos más grandes. Viven en los poros del suelo, en las cavidades de la capa de residuos, y en la película del agua. El tamaño del ecosistema varía de unos pocos cm. a algunos m., y a menudo está limitado por el volumen de la rizosfera. El tiempo ecológico varía de una semana a algunos meses. Se corresponde con el nivel mesotrófico en el que los organismos son capaces de utilizar un amplio rango de sustratos, y sus depredadores que son componentes de la mesofauna.

3) Nivel de lombrices-plantas: su frontera es la superficie del suelo. Se corresponde con el nivel macrotrófico; son animales grandes capaces de cavar sus propios poros y que se alimentan de un amplio rango de microflora, microfauna, detritus, etc, y sus depredadores. El tiempo ecológico varía de algunos meses a algunos años.

Dado que estos ecosistemas incluyen organismos de distinto tamaño hay que tener en cuenta algunas consideraciones cuando se utilicen en los sistemas bioindicadores:

1- Los organismos que viven en el primer nivel reflejan el efecto de los tóxicos rápidamente. Esto es resultado del corto ciclo de vida de las especies y la rapidez de la sucesión. Además toman el tóxico de la fase acuosa donde las sustancias solubles se encuentran en un estado altamente biodisponible.

2- La influencia del mismo factor en niveles de diferentes dimensiones, es cualitativamente diferente.

3- Los organismos del segundo nivel reflejan el impacto de los tóxicos a medio plazo, resultado de un ciclo de vida relativamente largo. Además existen barreras físico-químicas como la materia orgánica y distintos microorganismos que interfieren la adquisición del tóxico.

4- Los grandes organismos del tercer nivel son indicadores del efecto del tóxico a largo plazo, debido a sus largos ciclos de vida, a su papel en los procesos del suelo y la influencia sobre los organismos que viven en un lugar más bajo. También el efecto sobre los niveles más bajos a menudo influye en los organismos de escalas superiores.

Las especies elegidas como bioindicadores deben reunir las siguientes características:

- a) Desempeñar un papel clave en los procesos del ecosistema.
- b) Estar presentes en un amplio rango de ecosistemas del suelo.
- c) Existir en poblaciones grandes y dominantes.
- d) Poder ser objeto de ensayos tanto en condiciones naturales como simuladas en el laboratorio.
- e) Se debe disponer de métodos eficaces y poco laboriosos para determinar las poblaciones.

2.7 Población, usos del territorio y su relación con la zona de estudio

La cuenca, se considera como un sistema físico que ante una precipitación genera una escorrentía. En la calidad y cantidad de esa escorrentía confluyen una serie de variables socio-económicas derivadas de la cuenca como son: la evolución de la población y el uso del suelo (Gómez, C., 1990).

√ Densidad de población

La densidad de población es una variable fundamental para el estudio del medio ambiente, ya que refleja la presión demográfica sobre el territorio. Para evaluar el impacto que la población de nuestra área de estudio ejerce sobre el medio físico, se estudia la evolución de la densidad de población (habitantes/km²) desde el 1 de enero de 1986 hasta el 1 de enero de 2009.

La cuenca de estudio fue dividida en tres cuencas (cuenca alta, cuenca media y cuenca baja), los municipios de las dos primeras cuencas están situados dentro de la Comunidad de Madrid y los de la tercera están situados dentro de la provincia de Toledo.

Los valores de densidad de población de los municipios situados en la Comunidad de Madrid (cuenca alta y media) se han extraído del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (www.madrid.org/iestadis/), (Anejo 1.1), no se dispone de datos de proyección de densidad de población para el año 1997. Los valores de población de los municipios situados en la provincia de Toledo (cuenca baja) se han extraído del Instituto Nacional de Estadística (I.N.E), no se dispone de datos de

proyección de población para los años 1997, 2007 y 2008. Se calculó la variación de la densidad de población (habitantes/km²) en estos últimos municipios, es decir, se tomo los datos de población de cada municipio y se dividió por la superficie total de cada municipio (Anejos 1.2 y 1.3).

Los valores de la evolución de la densidad de población en los municipios ubicados sobre la cuenca del río Guadarrama (Tabla 9), nos indican que la densidad de población de todos los municipios aumentó durante el período comprendido entre 1986 a 2009.

En la cuenca alta del río Guadarrama el mayor incremento de población en las últimas décadas es debido a la existencia de la segunda residencia cada vez mayor en esta zona, destacando el término municipal de Collado Villalba (Figura 12.1).

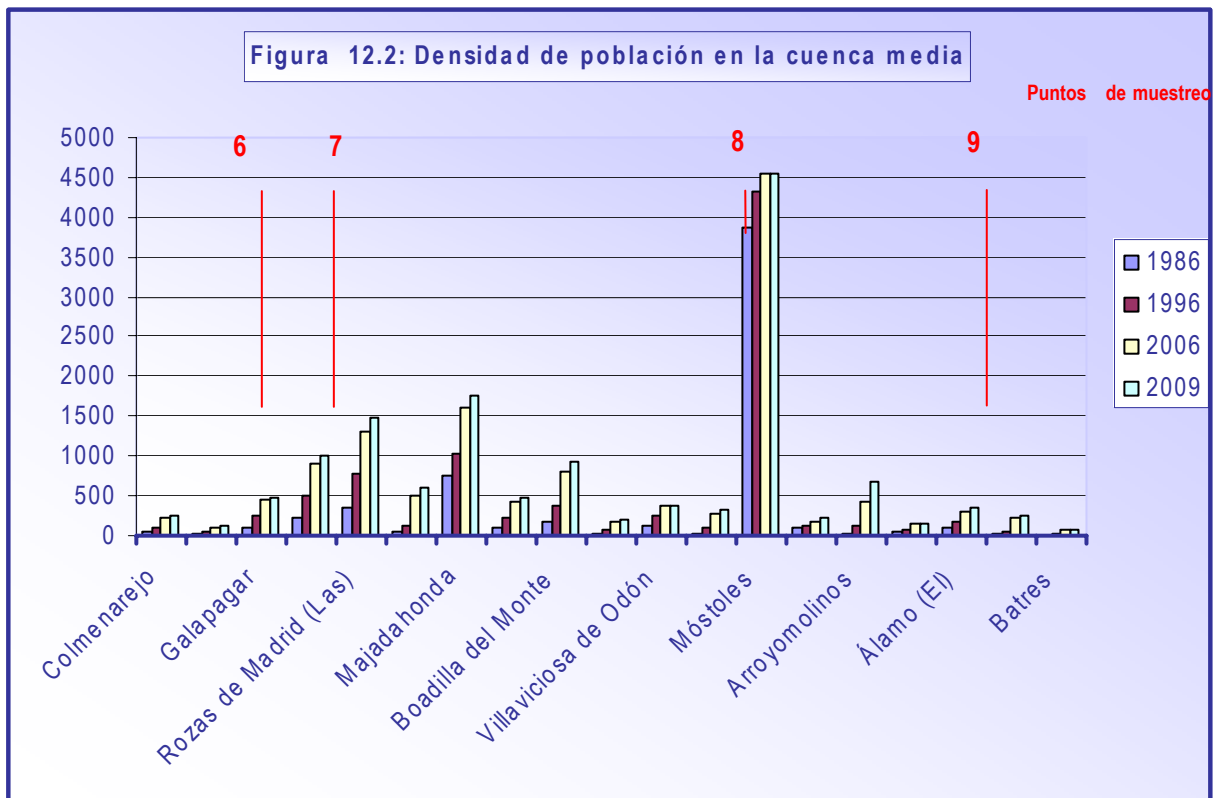
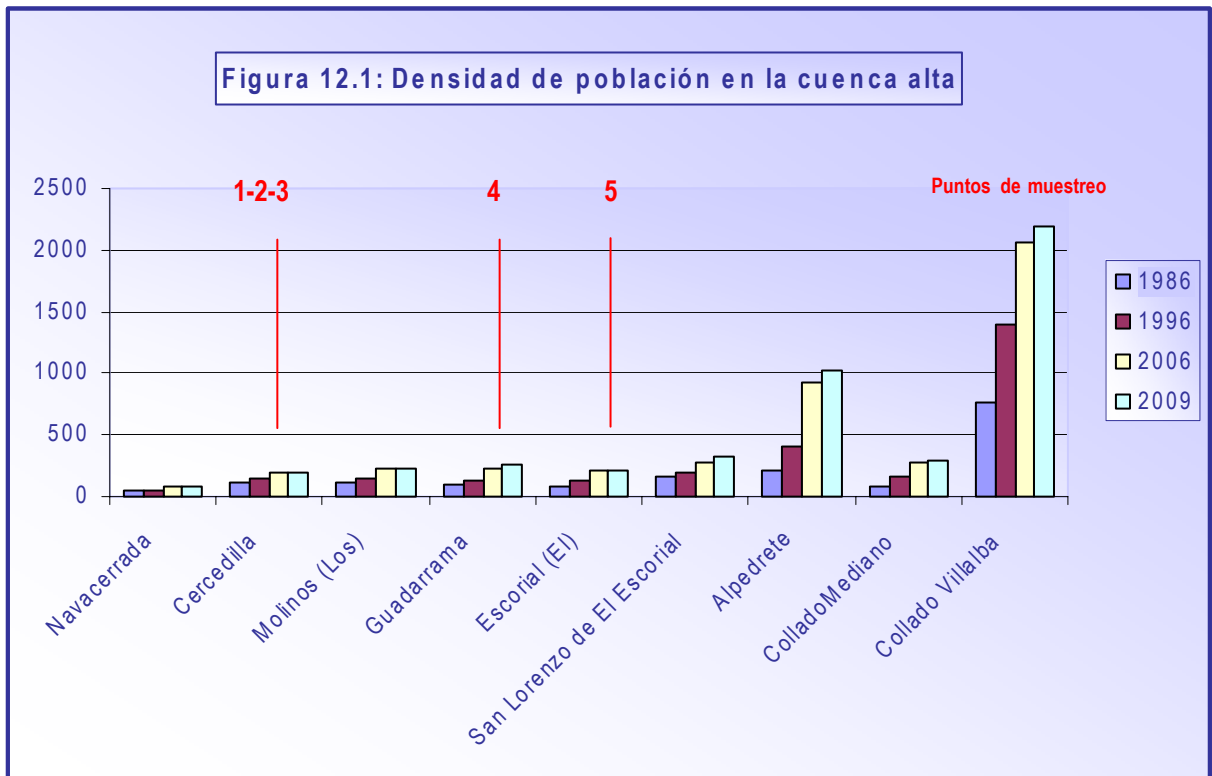
La cuenca media del río Guadarrama se encuentra protegida dentro del Parque Regional del Curso Medio del río Guadarrama y su entorno, está regulado por la Ley 20/1999, de 3 de mayo (B.O.C.M. 24/05/1999). Cumple una función de corredor ecológico, que intenta preservar los valores medioambientales de la zona de la presión urbanística. Dentro de este Parque Regional se integran áreas de gran valor medioambiental y paisajístico, no obstante estas coexisten con zonas degradadas debido en gran parte por la actividad urbanizadora que se está produciendo en los últimos años en los términos municipales de la zona de estudio. Destaca el término municipal de Móstoles cuya tendencia aglutinadora de población es mayor debido a la actividad industrial existente en su entorno (Figura 12.2).

La cuenca baja del río Guadarrama se caracteriza por su baja densidad de población, prácticamente nula industria y un uso del suelo básicamente dedicado a actividades agrarias y ganaderas. Destaca el término municipal de Carranque cuya tendencia aglutinadora de población se ha incrementado en gran medida en los últimos años (Figura 12.3).

Dichos valores se han dividido en una serie de intervalos (Tablas 10.1, 10.2, 10.3 y 10.4), de entre los cuales destaca el de 500 hab/km², valor a partir del cual Bodega Fernández et al (2006), consideran que la presión que ejerce la población sobre el medio es muy importante. Como se puede observar, la densidad de población es mayor de 500 hab/km² en el año 1986 en 3 municipios, en 1996 en 4 municipios, en 2006 a 8 municipios, en 2009 a 9 municipios, esto nos indica que el aumento de población que comenzó en los años 60 ha ido en aumento hasta nuestros días.

El crecimiento urbano puede provocar importantes cambios en el ciclo hidrológico. Así, un primer estado de urbanización en una zona determinada, puede provocar la desaparición de árboles y vegetación natural, lo que conlleva una disminución en la evapotranspiración, así como en la interceptación de las precipitaciones por parte del follaje. Por otro lado, también tiene lugar un aumento de los sedimentos en los cursos de agua, como consecuencia de una mayor erosión de los suelos (González, P., 2008).

<p>Tabla 9: Evolución de la densidad de población, en los municipios ubicados sobre la cuenca alta, media y baja del río Guadarrama (Datos facilitados por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid y por el I.N.E.</p>				
Municipios	1986	1996	2006	2009
Cuenca alta				
Navacerrada	47,35	54,71	76,43	83,38
Cercedilla	106,68	141,09	190	196,17
Molinos (Los)	119,64	150,87	220,51	231,48
Guadarrama	104,53	137,37	228,51	259,65
Escorial (El)	89,22	124,33	205,13	217,72
San Lorenzo de El Escorial	159,2	191,99	283,78	317,18
Alpedrete	218,25	413,57	919,68	1.015,63
ColladoMediano	75,13	162,88	272,52	286,42
Collado Villalba	769,66	1.394,34	2.066,79	2.183,61
Cuenca media				
Colmenarejo	53	112,24	230,54	259,68
Valdemorillo	25,12	42,66	104,85	117,88
Galapagar	107,92	253,89	444,98	489,54
Torrelotones	229,13	490,55	906,07	994,57
Rozas de Madrid (Las)	357,08	776,67	1.298,78	1.480,96
Villanueva del Pardillo	42,89	114,11	509,05	596,32
Majadahonda	752,57	1.040,05	1.617,40	1.769,09
Villanueva de la Cañada	89,46	226,73	424,33	481,49
Boadilla del Monte	176,53	377,42	803,52	919,79
Brunete	32,92	80,57	176,79	194,72
Villaviciosa de Odón	117,9	249,91	382,91	388,77
Sevilla la Nueva	26,41	105,58	268,17	328,05
Móstoles	3.857,56	4.320,99	4.544,07	4.547,97
Navalcarnero	89,59	115,78	175,32	215,41
Arroyomolinos	14,01	130,87	435,75	668,36
Moraleja de Enmedio	37,73	73,13	140,26	150,54
Álamo (El)	88,43	173,9	312,48	353,92
Serranillos del Valle	32,78	60,9	226,02	256,92
Batres	11,99	29,58	65,6	67,87
Cuenca baja				
Casarrubios del Monte	16,86	26,10	45,01	53,45
Carranque	35,80	58,76	113,36	155,84
Viso de San Juan (El)	8,15	18,74	44,13	62,62
Palomeque	16,77	21,14	33,59	41,68
Chozas de Canales	27,91	30,48	63,15	116,70
Lominchar	45,91	50,23	64,95	84,77
Recas	68,81	79,65	101,23	120,23
Camarenilla	23,37	22,55	23,12	25,17
Yuncillos	18,03	19,65	22,77	25,61
Villamiel de Toledo	6,14	10,50	17,93	20,52
Bargas	61,20	73,85	88,99	100,44



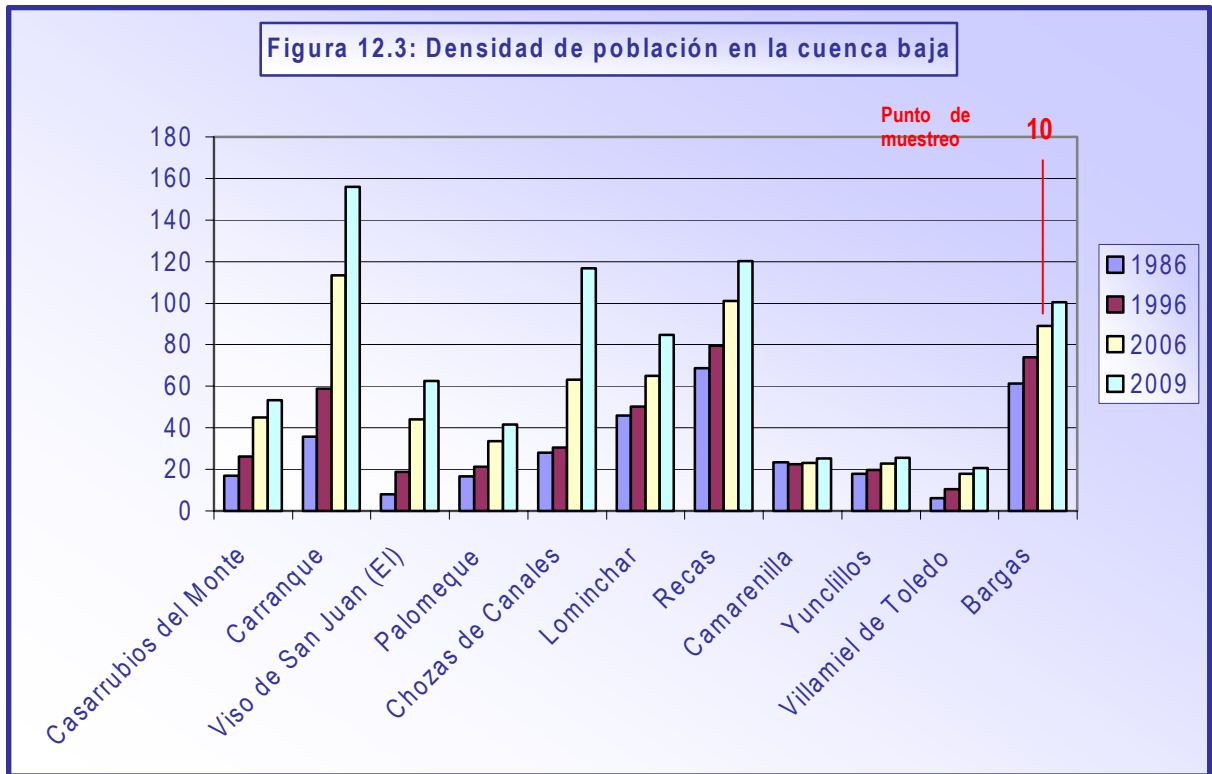


Tabla 10.1: Densidad de población en los municipios de la cuenca del río Guadarrama en 1986 (Datos facilitados por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid y por el I.N.E.)

Densidad de población (hab/km ²)	Municipios
≤ 250	Navacerrada, Cercedilla, Molinos (Los), Guadarrama, Escorial (El), San Lorenzo de El Escorial, Alpedrete, ColladoMediano, Colmenarejo, Valdemorillo, Galapagar, Torrelodones, Villanueva del Pardillo, Villanueva de la Cañada, Boadilla del Monte, Brunete, Villaviciosa de Odón, Sevilla la Nueva, Navalcarnero, Arroyomolinos, Moraleja de Enmedio, Álamo (El), Serranillos del Valle, Batres, Casarrubios del Monte, Carranque, Viso de San Juan (El), Palomeque, Chozas de Canales, Lominchar, Recas, Camarenilla, Yuncillos, Villamiel de Toledo, Bargas
250-500	Rozas de Madrid (Las)
500-1000	Collado Villalba, Majadahonda
1000-2000	
2000-3000	
3000-5000	Móstoles
≥ 5000	

Tabla 10.2: Densidad de población en los municipios de la cuenca del río Guadarrama en 1996 (Datos facilitados por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid y por el I.N.E.)

Densidad de población (hab/km ²)	Municipios
≤ 250	Navacerrada, Cercedilla, Molinos (Los), Guadarrama, Escorial (El), San Lorenzo de El Escorial, ColladoMediano, Colmenarejo, Valdemorillo, Villanueva del Pardillo, Villanueva de la Cañada, Brunete, Villaviciosa de Odón, Sevilla la Nueva, Navalcarnero, Arroyomolinos, Moraleja de Enmedio, Álamo (El), Serranillos del Valle, Batres, Casarrubios del Monte, Carranque, Viso de San Juan (El), Palomeque, Chozas de Canales, Lominchar, Recas, Camarenilla, Yuncillos, Villamiel de Toledo, Bargas
250-500	Alpedrete, Galapagar, Torrelodones, Boadilla del Monte
500-1000	Rozas de Madrid (Las)
1000-2000	Collado Villalba, Majadahonda
2000-3000	
3000-5000	Móstoles
≥ 5000	

Tabla 10.3: Densidad de población en los municipios de la cuenca del río Guadarrama en 2006 (Datos facilitados por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid y por el I.N.E.)

Densidad de población (hab/km ²)	Municipios
≤ 250	Navacerrada, Cercedilla, Molinos (Los), Guadarrama, Escorial (El), Colmenarejo, Valdemorillo, Brunete, Navalcarnero, Moraleja de Enmedio, Serranillos del Valle, Batres, Casarrubios del Monte, Carranque, Viso de San Juan (El), Palomeque, Chozas de Canales, Lominchar, Recas, Camarenilla, Yuncillos, Villamiel de Toledo, Bargas
250-500	San Lorenzo de El Escorial, ColladoMediano, Galapagar, Villanueva de la Cañada, Villaviciosa de Odón, Sevilla la Nueva, Arroyomolinos, Álamo (El)
500-1000	Alpedrete, Torrelodones, Villanueva del Pardillo, Boadilla del Monte
1000-2000	Rozas de Madrid (Las), Majadahonda
2000-3000	Collado Villalba
3000-5000	Móstoles
≥ 5000	

<p>Tabla 10.4: Densidad de población en los municipios de la cuenca del río Guadarrama en 2009 (Datos facilitados por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid y por el I.N.E.)</p>	
Densidad de población (hab/km ²)	Municipios
≤ 250	Navacerrada, Cercedilla, Molinos (Los), Escorial (El), Valdemorillo, Brunete, Navalcarnero, Moraleja de Enmedio, Batres, Casarrubios del Monte, Carranque, Viso de San Juan (El), Palomeque, Chozas de Canales, Lominchar, Recas, Camarenilla, Yuncillos, Villamiel de Toledo, Bargas
250-500	Guadarrama, San Lorenzo de El Escorial, ColladoMediano, Colmenarejo, Galapagar, Villanueva de la Cañada, Villaviciosa de Odón, Sevilla la Nueva, Álamo (El), Serranillos del Valle
500-1000	Torreldones, Villanueva del Pardillo, Boadilla del Monte, Arroyomolinos
1000-2000	Alpedrete, Rozas de Madrid (Las), Majadahonda
2000-3000	Collado Villalba
3000-5000	Móstoles
≥ 5000	

√ Usos del territorio

El uso del territorio es una variable fundamental para el estudio del medio ambiente, y para evaluar el impacto que los diferentes usos del suelo de nuestra área de estudio ejerce sobre el medio físico, se estudia la evolución del uso del suelo en los distintos municipios de la cuenca de estudio entre el período 1980–1990 y el período 2000–2009.

Los valores del uso del suelo de los municipios situados en la cuenca de estudio se han extraído del Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA), Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Se tomo los datos del uso de suelo (1980–1990) y los datos del uso de suelo (2000–2009) de cada municipio, se extrapolo dichos datos a una hoja de cálculo (Excel) y se calculó el porcentaje del uso del suelo (Anejo 1.4). Debido a la industrialización del campo las zonas agrícolas tienden a disminuir pasando éstas a pastos y los pastizales se han repoblado de árboles produciéndose un aumento del uso forestal. Dichos valores nos indican que el uso de suelo forestal junto a la densidad de población de todos los municipios aumentó durante el período comprendido entre (2000–2009).

Así mismo, se cuantificó los distintos usos del suelo en cada subcuenca hidrográfica existente en la cuenca de estudio. Para cuantificar dichos usos del suelo, se ha utilizado el Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA), se identifico y se calculó el porcentaje del uso del suelo en cada subcuenca hidrográfica (Tabla 11) durante el período comprendido entre (2000–2009).

Los valores del uso del suelo en cada subcuenca hidrográfica nos indican que en las subcuencas I, II, III y V el uso de suelo forestal es predominante. En las subcuencas IV, VI el uso de suelo forestal es dominante seguido del uso ganadero y urbano, y aunque existe una pequeña área agrícola el uso agrícola es casi inexistente. En la subcuenca VII el uso de suelo forestal es dominante seguido del uso urbano y ganadero, y aunque existe una pequeña área agrícola el uso agrícola es casi inexistente. En la subcuenca VIII el uso de suelo forestal es dominante seguido del uso urbano, ganadero y agrícola. En la subcuenca IX el uso de suelo agrícola es dominante seguido del uso forestal, urbano y ganadero. Por último, la subcuenca X el uso de suelo agrícola es dominante seguido del uso ganadero, forestal y urbano.

El Curso Medio del Río Guadarrama y su entorno fue sometido al régimen de protección preventiva mediante Decreto 44/1992, de 11 de junio, con el objetivo fundamental de tratar de evitar el deterioro y la destrucción de la zona, sometida a fuertes presiones tanto de tipo urbanístico como de vertidos domésticos e industriales y de actividades extractivas relacionadas con los usos del agua.

Como conclusión a éste apartado, es de resaltar el hecho de que, en el deterioro paulatino de los recursos naturales de la cuenca del río Guadarrama se ha hecho patente con el intenso proceso de urbanización que se está produciendo en los últimos años y con el cambio en el predominio del uso del suelo.

● **Tabla 11:** Cuantificación de los usos del suelo en la zona de estudio

SUBCUENCAS (Ptos. Muestreo)	Coordenadas GPS - UTM huso: 30T			SUPERFICIE (km ²)	Usos del suelo			
	X UTM	Y UTM	Cota m.s.n.m		Forestal	Urbano	Ganadero	Agrícola
SUBC. - I (Pto.1- E. Navalmedio)	412689	4511753	1300 m	8,035	98%	2%	---	---
SUBC. - II (Pto.2- Valle de la Fuenfria (Arroyo de la Venta))	410060	4513855	1365 m	4,815	100%	---	---	---
SUBC. - III (Pto.3- Cercedilla (Pueblo))	410000	4510050	1120 m	16,82	95%	4%	1%	---
SUBC. - IV (Pto.4- Guadarrama (Pueblo))	408922	4502245	935 m	83,7	66%	16%	18%	0,04%
SUBC. - V (Pto.5- Puerto de la Cruz Verde- El Escorial)	403611	4095428	1110 m	0,25	100%	---	---	---
SUBC. - VI (Pto.6- Galapagar-La Navata)	411677	4495042	870 m	331,57	63,9%	17%	18,64%	0,3%
SUBC. - VII (Pto.7- E. de Molino de la Hoz-Pte. Romano)	420496	448119	620 m	407,17	65%	18%	16%	1%
SUBC. - VIII (Pto.8- Móstoles (Urbanización Guadarrama)	419838	4463002	550 m	817,19	55%	19%	15%	11%
SUBC. - IX (Pto.9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón))	420651	4452298	550 m	981,06	27%	10%	8%	55%
SUBC. - X (Pto. 10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006))	404408	4421781	451 m	1306,74	3,1%	2,8%	8%	86,1%

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 Introducción

En este capítulo se hace referencia a la metodología seguida a lo largo de la presente tesis de investigación.

3.2 Metodología de los muestreos en la cuenca de estudio

Se planteó la campaña de toma de datos en la cuenca del río Guadarrama de acuerdo con los objetivos enunciados en el apartado 1.3, en un ámbito que cubriera toda la cuenca del río Guadarrama desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Tajo.

Los resultados de la metodología del área de estudio nos permitirán conocer por un lado la evolución temporal y espacial anual, y por otro lado la posible comparación entre los distintos puntos de muestreo. Fundamentalmente consiste en la toma de muestras de agua superficial, en la toma de muestras de suelo y la toma de muestras de edafofauna, en los distintos puntos de muestreo seleccionados en la cuenca del río Guadarrama.

En la elección de la toma de muestras de las aguas superficiales, se decidió como primer punto de muestreo el punto aguas arriba del Embalse de Navalmedio, con un caudal que no recibiera ningún vertido aguas arriba, condición que no se cumplió como se verá en los apartados siguientes. Dicha condición si se cumplió en el segundo punto de muestreo, en el punto del Valle de la Fuenfría.

En el sentido de aguas abajo se prolongó el estudio hasta la confluencia con el Tajo, en el punto de muestreo de Bargas situado en la provincia de Toledo, para analizar los efectos producidos por los diferentes vertidos originados a lo largo del río Guadarrama dentro de la Comunidad de Madrid en el río Tajo.

El muestreo de agua superficial se efectuó cada primera semana de mes por un periodo de un año de duración, durante el período comprendido entre febrero de 2006 hasta enero de 2007. Las muestras de agua se tomaron en un total de diez puntos de muestreo, de los cuales nueve corresponden a escorrentía superficial (nº. 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 y 10) y uno a un manantial (nº. 5). Se ha realizado siempre en días de semana comprendidos entre lunes y viernes, para no tener variaciones en el agua debido a la movilidad de la población en fines de semana.

El muestreo y los análisis químicos se realizó siguiendo las técnicas descritas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1992), y el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios del agua de consumo humano (BOE nº 45 de 21 de febrero de 2003). La metodología seguida para la toma y preservación de muestras se resume en el anejo 1.4.

Simultáneamente a la toma de muestras, como se ha dicho anteriormente, se realizaron medidas de caudal en todos los puntos con el objetivo de determinar la carga generada de nutrientes.

También, se realizó un muestreo de agua en el fondo del cauce del río Guadarrama para la caracterización de fosfatos el día 8 de enero del 2007 en seis puntos de muestreo (nº. 1, 2, 6, 7, 8 y 10). En el anejo 1.5 se recoge la metodología seguida para la toma de muestras.

Por otra parte, se realizó un muestreo de suelo que se llevó a cabo durante las dos primeras semanas del mes de febrero de 2006. Se separan en dos fracciones, una para determinar la edafofauna del suelo y otra para el análisis edafológico. La metodología seguida para la toma y preparación de muestras de suelo natural se resume en el anejo 1.6.

Las muestras fueron tomadas para su posterior análisis edafológico, en diez zonas próximas al cauce del río Guadarrama de los puntos de muestreo (nº. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10).

Las muestras de suelo tomadas para la determinación de la edafofauna del suelo, se efectuó en ocho zonas próximas al cauce del río Guadarrama de los puntos de muestreo (nº. 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9 y 10).

También, se realizó un muestreo de suelo próximo al cauce de la cuenca del río Guadarrama para la caracterización de fosfatos el día 15 de noviembre del 2006 en seis puntos de muestreo (nº. 1, 2, 6, 7, 8 y 10).

3.2.1 Parámetros analizados

Los análisis se han realizado en el laboratorio de Suelos y Aguas del departamento de Ciencias Ambientales del C.E.U de Madrid mayoritariamente, y en el laboratorio de Aguas del departamento de Geología y Geoquímica de la U.A.M, exceptuando la técnica TXRF que ha sido realizada en el Servicio Interdepartamental de Investigación de la Universidad Autónoma de Madrid (SIDI).

√ Parámetros analizados en el agua

Para cada muestra se indicó los tipos de análisis realizados. Estos parámetros analizados, con sus respectivas abreviaturas y unidades, se agrupan del siguiente modo:

A) Condiciones ajenas a la composición del agua:

- Caudal circulante en el momento de la toma (Q) (l/s): determinación realizada con micromolinete de tipo hélice.
- Temperatura del aire (T) (°C).
- Temperatura del agua (T) (°C): determinación realizada mediante el pH-metro de campo. Determinación realizada siguiendo las técnicas descritas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1992).
- Aspecto: determinación visual.

B) Parámetros generales químicos-biológicos:

- Oxígeno disuelto (DO) (mg/l): determinación realizada mediante electrodo selectivo. Determinación realizada siguiendo las técnicas descritas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1992).
- Sedimentos Suspendidos (SS) (mg/l): determinación realizada según la norma UNE-EN 872:1996:2002: Sólidos separados por filtración a través de un filtro de fibra de vidrio de borosilicato sin aglomerante, redondo y con un diámetro fijo.
- pH: determinación realizada mediante el pH-metro. Determinación realizada siguiendo las técnicas descritas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1992).
- Conductividad eléctrica (Ω) ($\mu\text{S}/\text{cm}$): determinación realizada mediante conductímetro. Determinación realizada siguiendo las técnicas descritas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1992).
- Demanda química de oxígeno (D.Q.O) (mg/l): determinación realizada según método colorimétrico. (fotómetro SQ 118 Merck).
- Demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.₅) (mg/l): determinación realizada según la norma UNE-EN 1899-1: 1998: Medir el oxígeno consumido tras 5 días de incubación y en condiciones definidas. Determinar exclusivamente el consumo de O₂ por la descomposición de la materia orgánica por ello hay que evitar la nitrificación inhibiendo los microorganismos responsables de la misma.

C) Macroconstituyentes:

- Cloruros (Cl^-) (mg/l): determinación realizada según el método oficial (Orden de 1 de julio de 1987 por la que se aprueban los métodos oficiales de análisis físico-químicos para aguas potables de consumo público).
- Sulfatos (SO_4^{2-}) (mg/l): determinación realizada según método colorimétrico (fotómetro SQ 118 Merck).
- Calcio (Ca^{2+}) (mg/l): determinación realizada según el método oficial (Orden de 1 de julio de 1987 por la que se aprueban los métodos oficiales de análisis físico-químicos para aguas potables de consumo público). Complexometría.
- Magnesio (Mg^{2+}) (mg/l): determinación realizada según el método oficial (Orden de 1 de julio de 1987 por la que se aprueban los métodos oficiales de análisis físico-químicos para aguas potables de consumo público). Complexometría.
- Sodio (Na^+) (mg/l): determinación realizada mediante Fotometría de llama. Determinación realizada siguiendo las técnicas descritas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1992). Fotometría de llama.

D) Metales pesados: determinación realizada mediante la técnica TXRF (Anejo 1.7)

- Cobre (Cu) (mg/l)
- Cadmio (Cd) (mg/l)
- Niquel (Ni) (mg/l)
- Zinc (Zn) (mg/l)
- Cromo (Cr) (mg/l)

E) Determinaciones complementarias:

- Turbidez (UNT): determinación realizada según la norma UNE-EN ISO 7027:2001.
- Bicarbonatos (HCO_3^-) (mg/l): determinación realizada por volumetría. Determinación realizada siguiendo las técnicas descritas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1992).

- Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/l): determinación realizada por volumetría. Determinación realizada siguiendo las técnicas descritas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1992).
- Potasio (K^+) (mg/l): determinación realizada mediante Fotometría de llama. Determinación realizada siguiendo las técnicas descritas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1992).
- Nitritos (NO_2^-) (mg/l): determinación realizada según método colorimétrico (fotómetro SQ 118 Merck).
- Nitratos (NO_3^-) (mg/l): determinación realizada según método colorimétrico (fotómetro SQ 118 Merck).
- Amonio (NH_4^+)(mg/l): determinación realizada según método colorimétrico (fotómetro SQ 118 Merck).
- Nitrógeno Orgánico (Norg) (mg/l): Anejo 1.8.
- Nitrógeno Total (Nt) (mg/l) ó Nitrógeno Total Kjeldahl (TKN) (mg/l): Anejo 1.8.
- Fosfatos: Ortofosfatos (PO_4^-) (mg/l), Fósforo Total (TP) (mg/l): determinaciones realizadas según método colorimétrico (fotómetro SQ 118 Merck).Anejo 1.9.
- Fósforo Particulado (PP) (mg/año): determinación realizada mediante cualquiera de los métodos descritos en el apartado 3.5.2.
- Fósforo Disuelto (DP) (mg/año): Anejo 1.9.

De entre estos parámetros señalados se han analizado "in situ" los siguientes: pH, caudal circulante en el momento de la toma (Q) (l/s), temperatura del aire (T) (°C), temperatura del agua (T) (°C), aspecto del agua, oxígeno disuelto (DO) (mg/l), conductividad eléctrica (Ω) ($\mu\text{S}/\text{cm}$), turbidez (UNT). El resto de parámetros fueron analizados en el laboratorio.

Los equipos y las técnicas analíticas llevadas a cabo para la determinación de los distintos parámetros estudiados son las siguientes (Tabla 12).

Tabla 12: Equipos y métodos utilizados en los distintos análisis

Parámetros	Equipos	Parámetros	Métodos
Oxígeno disuelto	Electrodo selectivo	Sodio	Espectrométrico: Fotometría de llama
Sedimentos Suspendidos	Gravimétrico UNE-EN 872:1996:2002	Potasio	Espectrométrico: Fotometría de llama
pH	Potenciométrico	Bicarbonatos	Volumétrico
Conductividad eléctrica	Conductimétrico	Carbonatos	Volumétrico
Demanda química de oxígeno	Colorimétrico	Turbidez	Nefelométrico de medida UNE-EN ISO 7027:2001
Demanda bioquímica de oxígeno	Electrométrico UNE-EN 1899-1: 1998	Amonio	Colorimétrico
Cloruros	Volumétrico Orden de 1 de julio de 1987 (BOE nº 163)	Nitratos	Colorimétrico
Sulfatos	Colorimétrico	Nitritos	Colorimétrico
Calcio	Complexométrico Orden de 1 de julio de 1987 (BOE nº 163)	Nitrógeno Total	Kjeldahl
Magnesio	Complexométrico Orden de 1 de julio de 1987 (BOE nº 163)	Fósforos	Colorimétrico
Cobre	Espectroscópica TXRF	Niquel	Espectroscópica TXRF
Cadmio	Espectroscópica TXRF	Zinc	Espectroscópica TXRF
Cromo	Espectroscópica TXRF	T ambiente y agua	Termómetro calibrado $\pm 0,1$ °C

√ Parámetros analizados en el suelo

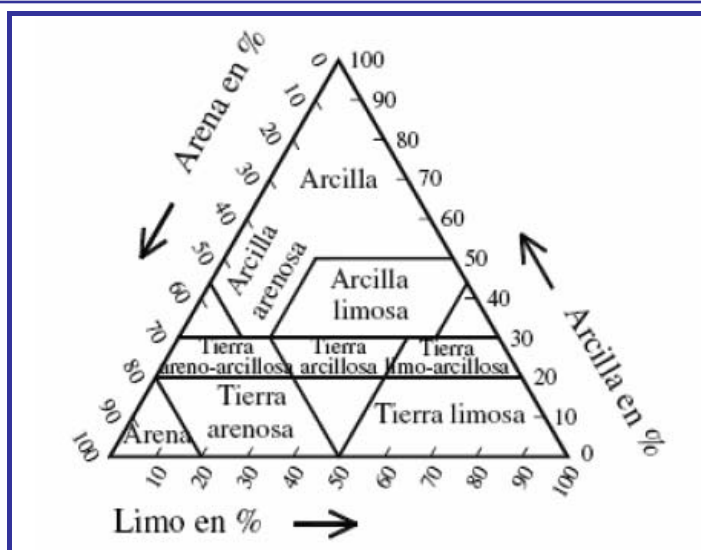
Los parámetros analizados a las diferentes muestras de suelo son los que a continuación se detallan:

- **Análisis granulométrico:** para este análisis se empleó el método Boyoucos, mediante el cual se determinan los porcentajes de las distintas fracciones de arena, limo y arcilla, con los cuales se clasifican las distintas texturas del suelo.

Este método se basa en la variación de densidad de una suspensión de suelo en función del tiempo, empleándose hexametáfosfato sódico (calgón) como agente dispersante.

Las densidades se miden con el hidrómetro Bouyocos. Este método permite prescindir de tratamientos previos de las muestras para destruir la materia orgánica, carbonatos y sesquióxidos, especialmente cuando se trata de suelos con contenidos en materia orgánica muy bajos, como los suelos objetos de estudio. Es importante conocer la textura del suelo y el agua útil característica del mismo ya que estos parámetros junto con los de fertilidad y presencia de contaminantes van a influir en la composición y nivel de población de las distintas especies que componen la biota del suelo. Se ha utilizado como variantes la fertilidad y la textura, debido a la dificultad en la determinación del agua útil. Se extrapolan los porcentajes obtenidos de arena, arcilla y limo al triángulo de textura (Figura 13), y a través de una serie de cálculos determinamos la clase textural del suelo.

● **Figura 13: Representación trianqular de Feret. Clases Texturales**



- **Conductividad eléctrica:** se midió en extracto suelo:agua, en relación 1:5, previa agitación a temperatura ambiente (20°); la medida se realizó con un conductivímetro Crison micro CM-2201. La conductividad de una solución depende de la concentración de iones libres que ésta contiene y de la movilidad de estos iones.
- **pH:** la medición del pH se llevó a cabo en agua destilada en relación suelo:agua 1:2.5 (10 g de suelo : 25 ml de agua), utilizando un pHmetro Crison 2001.
- **Color:** se establece el color de cada uno de los horizontes descritos en el campo y de cada una de las muestras tomadas para análisis en laboratorio, haciéndolo constar. Asimismo se precisa si el color se ha comparado en estado húmedo o seco del suelo. Si se aprecian manchas coloreadas en los horizontes se determina, además del color del fondo, el de dichas manchas, describiéndolas con indicación de su forma y orientación, sus dimensiones y el porcentaje que representan sobre la superficie total del horizonte correspondiente. Otras alteraciones crónicas y en especial las que corresponden a concreciones, u otras superficies del perfil con características más o menos endurecidas, pero con límites netos, se describen en cuanto a su abundancia, dimensiones y color. Se utilizó como referencia la carta de colores Munsell Soil Color Charts.
- **Contenido en materia orgánica:** se determina mediante calcinación a 400 °C, teniendo en cuenta que durante esta calcinación la pérdida al fuego elimina de la muestra, además de la materia orgánica total, lo siguiente:
 1. El agua contenida hasta 105 °C, que debe calcularse previamente.
 2. El agua de constitución de los minerales arcillosos.
- **Determinación de metales pesados:** se prepara las muestras de suelo para el análisis multielemental por TXRF siguiendo la norma EPA 3051 M (Anejo 1.10). Del extracto obtenido por la digestión de microondas se midieron los siguientes metales pesados: cobre, cadmio, níquel, cinc y cromo por TXRF.

Se realizó mediante un procedimiento de extracción secuencial química. El conocimiento de las distintas especies químicas de los metales pesados o bien de su asociación con los distintos constituyentes del suelo y sedimentos es esencial para estimar la biodisponibilidad, movilidad y reactividad química.

Las especies metálicas se encuentran disueltas en la solución del suelo o adsorbidas a fases sólidas por quimisorción o procesos de cambio catiónico. Los metales pesados también pueden ser complejados con componentes orgánicos, adsorbidos u ocluidos en carbonatos, óxidos minerales o en estructuras de minerales primarios y secundarios.

La extracción secuencial presenta ventajas sobre una determinación total ya que contribuye al conocimiento de la toxicidad, del impacto ambiental de las distintas fracciones y de la posible bioasimilación de los distintos metales por organismos.

El impacto ambiental de las distintas fracciones depende de la facilidad de removilización del metal. Las fracciones más peligrosas, desde el punto de vista ambiental, son las correspondientes al metal intercambiable y asociado a carbonatos, que liberan el metal al producirse un descenso en el pH, y la fracción asociada a óxidos de hierro y manganeso, que puede liberar el metal por cambios en el potencial redox.

El metal intercambiable y unido a materia orgánica y sulfuros puede ser fácilmente movilizado por reacciones de cambio iónico, descomposición y transformación de la materia orgánica, que pueden tener lugar bajo distintas condiciones medioambientales.

La extracción secuencial comprende varias etapas de extracción química en las que se utilizan reactivos de distinta fuerza para separar las especies metálicas en distintas fracciones. Estos procedimientos están muy influidos por factores experimentales como la elección de reactivos, tiempos de extracción y relación extractante/sedimento, así como problemas analíticos como una incompleta selectividad y posible reabsorción.

A pesar de estos inconvenientes, la metodología de extracción secuencial ha sido ampliamente utilizada y con considerable éxito para obtener información sobre la biodisponibilidad y comportamiento geoquímica de los elementos en el suelo.

Para la determinación de la concentración de metales pesados se utilizó la técnica de espectroscopia TXRF, basada en el fenómeno de fluorescencia de rayos X.

- **Determinación del Nitrógeno total:** se realizó mediante el método Kjeldhal clásico o Kjeldhal modificado en algunas ocasiones (Anejo 1.8).
- **Relación C/N:** el valor de la relación carbono/nitrógeno en el suelo es un buen índice para juzgar la actividad global del humus, así como el proceso de humificación, es decir, la calidad del humus existente en el suelo. Esta materia orgánica será tanto mejor cuanto menor sea la relación, alcanzando en los casos más favorables un valor próximo a 10. A medida que disminuye la relación C/N se reduce el número de microorganismos del suelo.

En suelos naturales, la relación desciende progresivamente desde los horizontes superiores a los inferiores. Las características de los valores de

C/N en cada suelo, dependen por lo tanto, de los humus (relación: clima-vegetación-tipo de humus):

- 1) Relación C/N de 5-12 en A₁: Humus mulcálcico.
- 2) Relación C/N de 12-15 en A₁: Humus mulforestal.
- 3) Relación C/N de 15-23 en A₁: Humus moder.
- 4) Relación C/N de > 23 en A₁: Humus mor.

El humus del suelo bien descompuesto tiene una valoración C/N aproximadamente entre 12 y 13 en suelos húmedos templados (Cobertera, E., 1950).

3.2.2 Origen de los parámetros analizados en el agua


Es fundamental dar una visión general del origen de los parámetros analizados en éste estudio, para poder interpretar los resultados obtenidos y su discusión que se verán en el capítulo 4. Basándonos fundamentalmente en la existencia de procesos químicos en que participan el agua y los materiales constituyentes del terreno.

El conocimiento de las variaciones del quimismo del agua nos va a aportar esencialmente información sobre los procesos hidrogeoquímicos que tienen lugar en la cuenca de estudio. Siendo estas variaciones, esenciales para el cálculo de exportación de nutrientes en todas las subcuencas y en la cuenca de estudio. A continuación, vamos a comentar cada uno de los parámetros analizados.

- **pH:** Mide la acidez relativa del agua. Indicador de factor de crecimiento biológico. Según tengamos un nivel de pH u otro variará la calidad del agua (Tabla 13).

Tabla 13: Variación del pH en el agua	
pH	Calidad del Agua
Menos de 5,5	Mala: Muy Ácida A los peces y otros organismos les será casi imposible sobrevivir
5,5 - 5,9	Aceptable
6,0 - 6,4	Buena
6,5 - 7,5	Excelente
7,6 - 8,0	Buena
8,1 - 8,5	Aceptable
Más de 8,6	Mala: Muy Alcalina A los peces y otros organismos les puede ser casi imposible sobrevivir

- **Temperatura:** Es importante conocer la temperatura del agua en el sitio del muestreo porque ayuda a predecir y/o confirmar otras condiciones del agua. Por ejemplo, la temperatura del agua tiene influencia directa en otros factores de la calidad del agua tales como el oxígeno disuelto (OD), la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la supervivencia de algunas especies acuáticas. En general, cuando la temperatura del agua está más fría, la cantidad de oxígeno disuelto (OD) debe ser más alta y, por lo tanto, el agua podrá soportar la vida acuática (peces y plantas) con más facilidad. Esto se debe a que el oxígeno puede disolverse en agua fría más fácilmente que en el agua tibia. Lo contrario puede esperarse en aguas más templadas.
- **Oxígeno disuelto:** Es la cantidad de oxígeno que está disuelta en las aguas superficiales. Es un indicador de la actividad biológica y de la calidad del agua. En general, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Si los niveles de oxígeno disuelto son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir (Tabla 14).

 Tabla 14: Variación del oxígeno disuelto en el agua	
Oxígeno disuelto (mg/l o ppm)	Calidad del Agua
0,0 - 4,0	Mala Algunas poblaciones de peces y macroinvertebrados empezarán a bajar.
4,1 - 7,9	Aceptable
8,0 - 12,0	Buena
12,0 +	Repita la prueba El agua puede airearse artificialmente.

- **Compuestos de Nitrógeno:** El nitrógeno es un elemento necesario para que todas las plantas y los animales vivos produzcan proteínas. En los ecosistemas acuáticos, el nitrógeno está presente en muchas formas (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , y nitrógeno orgánico). Estos compuestos de nitrógeno resultan de la mineralización de la materia orgánica, y son muy móviles. La eutrofización ocurre cuando los nutrientes (tales como los nitratos y los fosfatos) se añaden a la masa de agua.
- **Compuestos de Fósforo:** El fósforo está presente en las aguas naturales en forma de fosfatos (ortofosfatos, fosfatos condensados y otros polifosfatos ligados orgánicamente). Los fosfatos son nutrientes esenciales para las plantas acuáticas. En las aguas superficiales el fósforo se puede encontrar en forma disuelta o en suspensión, intentando analizar principalmente las formas

de fósforo asociadas a los sedimentos pues éstas intentan dominar el total del flujo del fósforo.

El fósforo en las aguas de escorrentía puede provenir de la alteración de ciertos minerales como el apatito, o de un suelo agrícola o bien de un foco puntual de contaminación. Por otra parte la influencia de la producción de fósforo es mayor que la del nitrógeno cuando se trata de vertientes eutróficas (Gómez, F.J., 1983). Diversos autores como Globler y Silberbaver (1985), identifican la escorrentía como el principal factor de control en la exportación de fósforo.

- **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO):** El objetivo de una medición de DBO es determinar la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer la materia orgánica mediante la acción de microorganismos aerobios presentes en el agua.

Como el proceso de descomposición varía según la temperatura, este análisis se realiza en forma estandar durante cinco días a 20 °C; esto se indica como D.B.O₅. La presencia de los nitratos y fosfatos en una masa de agua, y la temperatura del agua pueden contribuir a los niveles altos de DBO (Tabla 15).

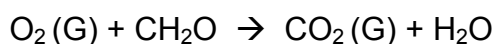
🌐 <u>Tabla 15:</u> Variación de la DBO en el agua	
DBO (mg/l o ppm)	Calidad del Agua
1 - 2	Muy Buena No hay mucho desecho orgánico presente en la muestra de agua.
3 - 5	Aceptable: Moderadamente Limpia
6 - 9	Mala: Algo Contaminada Generalmente indica que hay materia orgánica presente y que las bacterias están descomponiendo este desecho.
100 o más	Muy Mala: Muy Contaminada Contiene desecho orgánico.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** El objetivo de una medición de DQO es determinar la cantidad de oxígeno que se necesitará para oxidar toda la materia orgánica presente en el agua. El valor recomendado es ≤ 20 mg/l. de oxígeno/l.

- **Sulfatos (SO_4^{2-}):** La concentración de sulfatos en aguas naturales está sujeta a fenómenos modificadores de tipo redox a los que se acoplan procesos bacteriológicos que, en medios oxidantes, tienden a incrementar el contenido de SO_4^{2-} , mientras que, en medios anaerobios los reducen a sulfuros que pueden llegar a precipitar. Asimismo, concentraciones anómalas de SO_4^{2-} pueden ser debidas a una contaminación local producida por fertilizantes.
- **Cloruros:** El ión cloruro se encuentra en cantidades variables en las aguas de precipitación, aumentando con la contaminación atmosférica. Existen pocos minerales pertenecientes a las rocas ígneas que cedan por alteración el ión cloruro; las escapolitas pueden ser un ejemplo de éstos, mientras que el porcentaje de cloruros lixiviados de las series sedimentarias es mucho mayor, especialmente si éstas son de origen marino. El cloruro en grandes concentraciones en aguas vadosas, descartando los procesos de intrusión marina, es producto normalmente de la contaminación.

Cuando el ión cloruro es puesto en solución por los procesos de alteración, es un anión bastante conservativo ya que los procesos redox no suelen afectarle dadas las características químicas, por lo que en general suele incrementarse con respecto a otros aniones presentes en las aguas a medida que éstas evolucionan.

- **Carbonatos y Bicarbonatos:** Su concentración en el agua está en función del CO_2 , en el sistema ($\text{CO}_2\text{-HCO}_3^- \text{-CO}_3^{2-}$). Inicialmente, las aguas de lluvia pueden disolver entre 50 y 75 ppm de CO_3Ca existente en el terreno (Custodio, E., 1976). Además, la respiración de las plantas aumenta la presión parcial del CO_2 . Otro aporte importante de éste gas, es el que tiene lugar a partir de la oxidación de la materia orgánica, representada por CH_2O . La reacción sería:



En éstas condiciones, existe un aumento de CO_2 , lo que pudiera incrementar la concentración de CO_3Ca (Freeze and Cherry., 1979).

Por tanto la concentración de HCO_3^- , estará en función de la temperatura y del CO_2 y dada la relación del pH con lo anterior será otro factor a considerar. Diversos autores como, Hem (1970), Freeze (1979) y Matthes (1982), ponen de manifiesto ésta relación mediante gráficos construidos con curvas a distintos pH.

- **Turbidez:** Se refiere a cómo este el agua bien clara o turbia. Así, una agua clara tiene un nivel de turbidez bajo y una agua turbia o lodosa tiene un nivel alto de turbidez. La turbidez del agua es producida por materias en

suspensión, como arcilla, cieno o materias orgánicas e inorgánicas, finamente divididas, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton y otros microorganismos.

La turbidez es una expresión de la propiedad óptica que origina que la luz se disperse y absorba en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra (Efecto Tynadall). La correlación de la turbidez con la concentración en peso de la materia en suspensión es difícil de establecer, ya que en la dispersión luminosa también intervienen el tamaño, la forma y el índice de refracción de las partículas. Partículas óptimamente negras, como el carbón activado, pueden absorber luz y aumentar significativamente las cifras de turbidez.

- **Conductividad eléctrica:** El agua que contiene sales disueltas, conduce la corriente eléctrica aproximadamente en proporción a la cantidad de sal disuelta. El agua transmite la corriente eléctrica de una disolución, dependiendo de la movilidad que presentan las distintas especies iónicas existentes, lo cual está en función de su concentración, carga, tamaño, grado de hidratación, etc. Las soluciones de electrolitos conducen la corriente eléctrica por el desplazamiento de iones bajo la influencia de un campo eléctrico. Al igual que los conductores metálicos, los electrólitos obedecen la ley de Ohm.
- **Calcio:** La concentración de calcio presente en las aguas de lluvia es bastante baja. La mayor parte de este ión procede de la meteorización de rocas de tipo silicato y sobre todo de los depósitos de origen evaporítico. En facies detríticas más o menos arcillosas, éste, proviene de la disolución del cemento carbonatado existente y una parte menos importante se encuentra como Ca^{2+} fácilmente cambiante en las arcillas.

En general, la solubilización de este elemento está directamente relacionada con el sistema CO_2 , HCO_3^- y CO_3^{2-} siendo normalmente este ión junto con el HCO_3^- las especies químicas de mayor abundancia en substratos en los que puede lixiviarse como CO_3Ca calcita o cemento carbonatado; en estas condiciones ambos dependen de la presión parcial de CO_2 en la zona no saturada, la cual varía de 10^{-2} a 10^{-5} bars aproximadamente.

El ión Ca^{2+} es la forma de este elemento más abundante en aguas naturales aunque en menores concentraciones asociadas al bicarbonato se encuentra el complejo Ca HCO_3^+ .

Finalmente, el calcio entra en el ciclo biogeoquímico con la incorporación a los huesos de los vertebrados siendo posteriormente liberado de ellos; asimismo y junto con el magnesio es incorporado a las plantas en su ciclo de nutrición.

Según González del Tanago (1985), la concentración de éste ión está contralada en alguna medida también por la vegetación.

- **Magnesio:** El magnesio, menos abundante que el calcio, posee unas características geoquímicas similares a éste. Se presenta en substratos ígneos en los minerales ferromagnesianos principalmente, los cuales se alteran con mucha facilidad liberando el ión Mg^{2+} , que realmente migra como catión hexahidratado $(Mg(H_2O))_6^{2+}$. Este elemento es bastante abundante en formaciones de tipo evaporítico asociado a carbonatos, cloruros y sulfatos, de las cuales es fácilmente lixiviado.

La solubilidad del magnesio viene condicionada así mismo por el sistema CO_2 , HCO_3^- y CO_3^{2-} , y en términos generales, como se ha indicado, su geoquímica es similar a la del calcio aunque su abundancia es menor por estar presente en menos minerales que éste, no obstante, un descenso en la concentración de Mg^{2+} en aguas con relación a un fondo geoquímico establecido puede ser debido a una absorción selectiva con respecto al calcio por parte de algunas arcillas (Davis, S. De Wiest., 1966).

La forma predominante del magnesio en aguas naturales es el catión hidratado. No obstante, a pH inferior a 10 la especie de $MgOH^+$ tiene cierta importancia; en concentraciones menores se encuentra el $MgSO_4(aq)$, de estabilidad similar al $CaSO_4(aq)$, y el $MgHCO_3^+$.

Finalmente, el magnesio se incorpora al ciclo biogeoquímico a través de la nutrición vegetal. Según González del Tanago (1985), la concentración de éste ión está controlada en alguna medida también por la vegetación.

- **Sodio:** Este catión se encuentra en algunas rocas ígneas en cantidades apreciables, tal es el caso de la albita, que durante su alteración libera fácilmente Na^+ que migra en solución y tiende a incrementarse debido al cambio iónico, ya que por sus características geoquímicas es difícilmente retenido por las arcillas (Douchafourd, P., 1984). Aunque existen otros muchos minerales capaces de liberar sodio en los procesos de alteración, los depósitos de origen evaporítico ponen en juego grandes cantidades de este elemento. Cabe destacar que en casos de contaminación, tanto este catión como el ión cloruro, alcanzan concentraciones muy elevadas.

El sodio se encuentra en aguas naturales como catión Na^+ , no obstante, en menor proporción se presentan iones complejos como el $NaCO_3^-$, $NaHCO_3(aq)$ y $NaSO_4^-$. Presentando una gran solubilidad que se favorece en presencia del ión cloruro. Su existencia parece estar relacionada con la vegetación según González del Tanago (1985).

- **Potasio:** Los feldespatos (ortosa), micas y otros minerales constituyentes de las rocas ígneas, contienen cantidades de potasio que son puestas en

solución mediante los procesos de alteración. Los depósitos salinos liberan cantidades importantes de este elemento; el cual, después de una migración más o menos larga, es capturado por algunos minerales de la arcilla, (p.e. la illita) penetrando en las semicavidades hexagonales de las capas tetraédricas de sus láminas en donde queda fijado.

Por tanto, y pese a que sus características geoquímicas son similares a las del sodio, su concentración en las aguas naturales es en general mucho menor, de modo que la relación Na^+/K^+ es siempre mayor de la unidad. Según lo expuesto, este catión se encontrará en mayor concentración en aguas que han circulado poco tiempo. No obstante, una concentración anormalmente elevada puede responder a una contaminación debida a los abonos de los cuales las aguas de infiltración lo lixivian fácilmente. Según Likens, G.E. et col. (1977), el ión potasio puede incrementar su concentración en relación con las zonas de bosque y de regulación e interacción hidrológica ejercida por el propio bosque.

El K^+ entre otras bases, es retenido por la mayor parte de las arcillas que lo incorporan a su estructura y además se encuentra ligado al ciclo biogeoquímico, por uno u otro procedimiento se restan cantidades significativas de este elemento a la solución del suelo que puede ser posteriormente drenada por los manantiales.

3.2.3 Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQUA)

Para el estudio del estado de las aguas del río Guadarrama en los diez puntos de muestreo descritos en el apartado 2.2, en función de unos rangos de calidades establecidos, se ha determinado el Índice Simplificado de Calidad del Agua. Se ha utilizado como criterio de calidad el uso para agua potable, para ello se ha utilizado el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

El ISQUA es un índice simplificado de calidad, que permite operar con muy pocos parámetros analíticos y que ofrece garantía en los resultados obtenidos. Se obtiene a partir de la siguiente fórmula que comprende cinco parámetros fisicoquímicos:

$$\text{ISQUA} = T (A + B + C + D)$$

A continuación se describen los cinco parámetros fisicoquímicos:

- **T) Temperatura:** deducida a partir de la temperatura del agua en el río, medida en °C. Varía entre 0,8 y 1, según:

$T = 1$	si $T \leq 20 \text{ }^\circ\text{C}$
$T = 1 - (T - 20) \cdot 0,0125$	si $T > 20 \text{ }^\circ\text{C}$

- **A) Demanda Química Orgánica (DQO en mg/l):** corresponde al oxígeno que es consumido en una oxidación con MnO_4K en ebullición y medio ácido. Incluye todo el contenido orgánico, tanto si es natural como artificial, tanto si es biodegradable como si no lo es. Varía entre 0 y 30 mg/l según:

$A = 30 - \text{DQO}$	si $\text{DQO} \leq 10 \text{ mg/l}$
$A = 21 - (0,35 \cdot \text{DQO})$	si $60 \text{ mg/l} \geq \text{DQO} > 10 \text{ mg/l}$
$A = 0$	si $\text{DQO} > 60 \text{ mg/l}$

- **B) Sólidos en Suspensión Totales (SST en mg/l):** corresponde a la materia suspendida que se pueden separar por filtración. Varía entre 0 y 25 según:

$B = 25 - (0,15 \cdot \text{SST})$	si $\text{SST} \leq 100 \text{ mg/l}$
$B = 17 - (0,07 \cdot \text{SST})$	si $250 \text{ mg/l} \geq \text{SST} > 100 \text{ mg/l}$
$B = 0$	si $\text{SST} > 250 \text{ mg/l}$


- **C) Oxígeno disuelto en el agua (O_2 mg/l):** la concentración se encuentra muy ligada a la oxidabilidad, sobre todo al contenido de materia orgánica biodegradable, y al contenido de nutrientes que controlan los procesos de depuración, varía entre 0 y 25 mg/l según:

$C = 2,5 \cdot \text{O}_2$	si $\text{O}_2 < 10 \text{ mg/l}$
$C = 25$	si $\text{O}_2 \geq 10 \text{ mg/l}$

- **D) Conductividad eléctrica** del agua a 18 °C (**CE** en $\mu\text{S}/\text{cm}$). Si la conductividad se mide a 25 °C, para obtener la conversión a 18 °C se multiplicará por 0,86. Varía entre 0 y 20 mg/l según:

$D = (3,6 - \log CE) * 15,4$	si $CE \leq 4000 \mu\text{S}/\text{cm}$
$D = 0$	si $CE > 4000 \mu\text{S}/\text{cm}$

Los valores del ISQUA van a oscilar entre 0 (calidad mínima) y 100 (calidad máxima) de manera similar a como lo hace el ICG (Índice de Calidad General). Los rangos de clasificación del ISQUA en función del uso del agua se muestran en la siguiente tabla (Tabla 16).

 Tabla 16: Rangos de clasificación del ISQUA en función del uso del agua	
Índice de Calidad	Clasificación de Calidad
85 - 100	Todos los usos
60 - 85	Abastecimiento para consumo humano, recreación por contacto directo, piscicultura.
45 - 60	Riego, industria, abastecimiento para consumo humano con tratamiento especial
30 - 45	Recreación por contacto indirecto (navegación) y refrigeración industrial
0 - 30	No puede usarse

 Fuente: Rubió S. (2000)

3.2.4 Longitud y caudales en la cuenca de estudio

√ Metodología para medir la longitud de la cuenca del río Guadarrama

El río Guadarrama según los mapas nace en la confluencia de los ríos de la Venta y el arroyo de las Fuentes. El río de la Venta recoge las aguas del Valle de la Fuenfría y que se va a tomar como cabecera del río Guadarrama, y el arroyo de las Fuentes recoge las aguas de la zona del Embalse de Navalmedio y Puerto de Navacerrada. Estos confluyen en el término municipal de Cercedilla a 250 m del término municipal Los Molinos.

Para medir la longitud total de la cuenca del río Guadarrama se toman en cuenta los afluentes más destacados de la zona de estudio:

1. En cabecera se mide la longitud del río de la Venta y el arroyo de las Fuentes.
2. Se mide todas las aguas que recoge la zona del Puerto de la Cruz Verde (San Lorenzo de el Escorial - El Escorial), que incluye el arroyo del Valle donde esta situado el punto de muestreo nº. 5.
3. El río Aulencia, afluente principal del río Guadarrama.
4. El río Guadarrama desde la confluencia del río de la Venta y el arroyo de las Fuentes, hasta el punto de muestreo nº. 10 de Bargas.

La metodología para medir las distintas longitudes de la zona de estudio es la siguiente:

- 1.- Se utiliza el Visor del SIGPAC (Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino), para visualizar el mapa del IGN (Instituto Geográfico Nacional) a una escala razonable del área de la zona de estudio
- 2.- Se selecciona o si se tiene las coordenadas se realiza la búsqueda de la zona de estudio a medir (mapa topográfico)
- 3.- Se elige un punto de partida, utilizando la herramienta de medir distancia para medir la longitud del tramo seleccionado, para cometer el mínimo de error se mide poco a poco, y se anota el dato cada kilómetro y la altitud. Se termina de medir en un punto de referencia que luego servirá como punto de continuación
- 4.- Para conocer la altitud del punto seleccionado se observan en el mapa topográfico las curvas de nivel que cortan el cauce del río o arroyo. Al principio se mide según distancias, ya que la altitud varía mucho y hasta el punto en que por distancias no se puede calcular la altitud. Llegados a este punto se mide según altitudes ya que la distancia varía mucho
- 5.- Se mueve el mapa para continuar midiendo la longitud de estudio, y se comienza a medir desde el punto de referencia anterior, y se continua midiendo hasta otro punto de referencia o sino se va necesitar mover el mapa hasta el final de la hoja del mapa topográfico
- 6.- Se llevan a Excel los datos para hacer una gráfica con todos ellos

√ Caudales

El régimen antrópico de caudales en el río Guadarrama viene condicionado fundamentalmente por:

- Embalse de las Nieves.
- Derivación al Embalse de Valmayor.
- Río Aulencia (Valmayor).
- Profusión de vertidos urbanos (urbanizaciones, etc.).
- Extracciones puntuales para riego y usos diversos.
- Extracción de áridos.

La contaminación proviene fundamentalmente de origen urbano, estando directamente relacionada con la movilidad de la población y el cambio estacional.

En los pueblos de la Sierra de Guadarrama, donde predominan las segundas residencias, se producen unos importantes vertidos que, incrementados en los meses de verano, contaminan intensamente la calidad del agua de los ríos Aulencia y Guadarrama. A su vez, la alteración de la calidad del agua de los ríos produce un efecto negativo sobre la fauna y la flora de los mismos.

Se han realizado medidas del caudal circulante en los diez puntos de muestreo seleccionados a lo largo de la cuenca del río Guadarrama para su caracterización.

A la vez que se han tomado muestras se ha medido el caudal en cada punto; lo que nos ha permitido obtener la carga contaminante del nitrógeno y fósforo, y su coeficiente de exportación.

En los aforos de caudal se han utilizado molinetes. El molinete utilizado es de tipo hélice, con este se midió la velocidad del agua en un único punto y para el cálculo de la corriente total se realizó varias mediciones. Se trazó sobre papel cuadriculado la sección transversal de la corriente para el cálculo del caudal total. Para ello se tomó como profundidad máxima del caudal distintas señales realizadas por las crecidas del río Guadarrama durante la campaña de estudio.

En cada punto seleccionado se han tomado medidas mensuales del caudal en el año hidrológico de estudio (2006-2007), determinándose el régimen de caudales.

3.3 Determinación del coeficiente de exportación de nutrientes en la cuenca de estudio

3.3.1 Variación de la concentración de nutrientes con el caudal

El fenómeno natural que se trata de modelizar estadísticamente, es la incidencia del clima en la movilización de los nutrientes de N y P expresados como nitrógeno total (N_T) y fósforo total (P_T). Este factor climático expresado por la escorrentía es el más importante según Clobler et al (1985), al ser el causante de un 74 a 99% de las variaciones temporales del coeficiente de exportación, siendo la incidencia de otros factores como litología y relieve, de menor importancia.

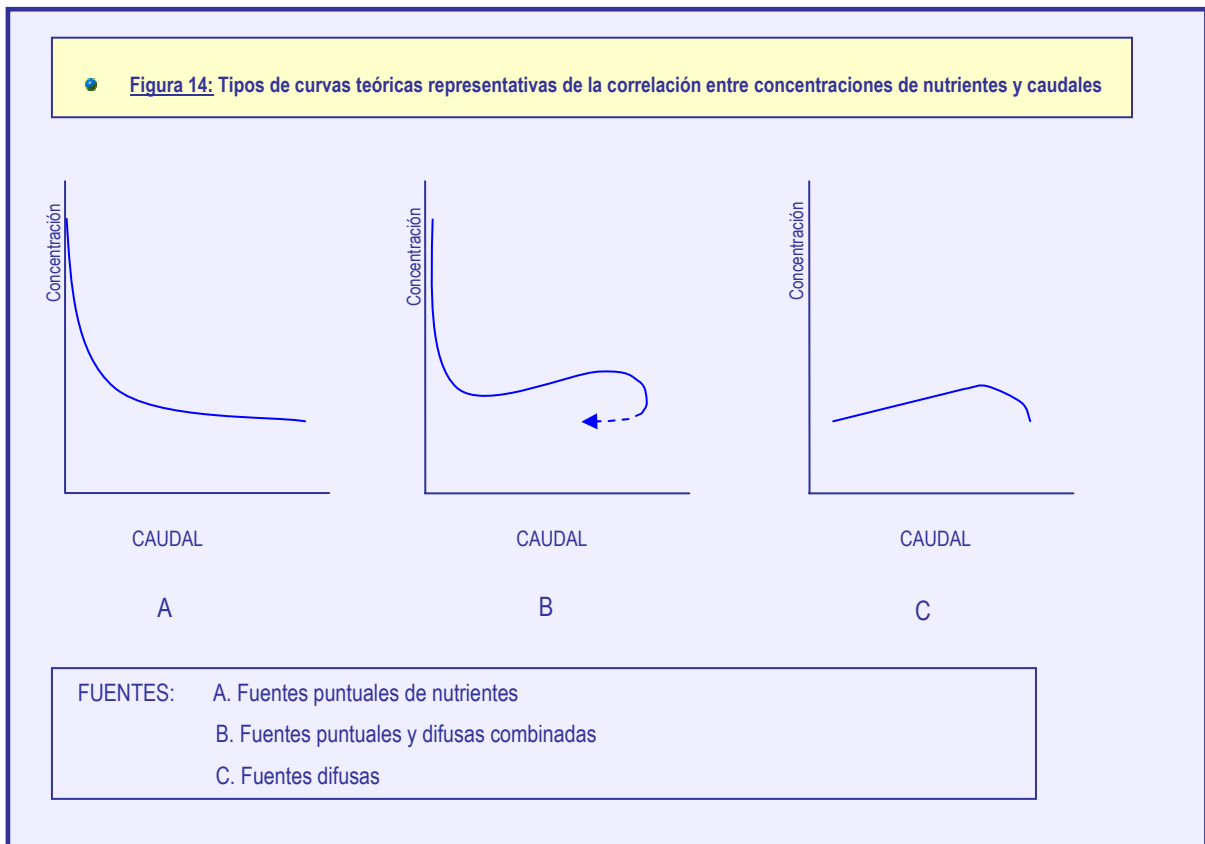
Los distintos tipos de curvas teóricas representativas de la correlación entre concentraciones de nutrientes y caudales (Figura 14) nos dan información sobre el origen y tipo de fuente de contaminación, para la cuenca de estudio se comparan éstas curvas teóricas con los resultados obtenidos en relación con las distintas fuentes difusas y puntuales.

Es importante señalar que las concentraciones de fósforo y nitrógeno asociados a la escorrentía dependen de muchos factores, como intensidad y frecuencia de lluvia, tipo de cubierta vegetal, pendiente, etc. Por lo cual los valores de la figura 14 se deben considerar a título orientativo.

En la figura 14, se presentan las curvas teóricas dadas por Fricker (1980), citadas por Gómez, C. (1990) y por Peña Martínez et al. (1983) que expresan la correlación caudal-concentración de nutrientes, en definitiva la aportación de nutrientes a una cuenca, según las distintas fuentes de contaminación.

De la figura 14 A, se deduce que, un aumento del caudal supone un aumento en la concentración por verse incrementada su capacidad de arrastre, así como la redisolución y resuspensión. Pero si los caudales aumentan mucho más, puede disminuir la concentración de nuevo por haberse saturado la capacidad de arrastre (Figura 14 B). De la misma manera, al producirse el descenso de caudales, las concentraciones se mantienen o aumentan (línea a trazos).

Este tipo de curvas caudal-concentración es difícil que se consigan en cuencas pequeñas, de ahí a tener que recurrir al método de coeficientes de exportación, incrementando lo más posible el período de representatividad (Gómez, C., 1990).



Fuente: Wagner et al. 1976, citado por Fricker, 1980

Si tuviéramos una fuente puntual, como puede ser el afluyente de una urbanización que descargarse con una concentración constante, al aumentar el caudal, por ejemplo después de una precipitación, se produciría un ejemplo de dilución de forma que el modelo de evolución se ajustara a una ecuación potencial negativa (Figura 14 A) (Wagner et al. 1976, citado por Fricker, 1980).

Si en una cuenca vertiente existen simultáneamente una fuente puntual y difusa, al aumentar el caudal se producirá una dilución de la concentración correspondiente a la fuente puntual pero una vez alcanzado el tiempo de concentración del hidrograma, la concentración de nutrientes en el canal aumentará como consecuencia de los aportes de la fuente difusa. Sin embargo, éste incremento no se mantiene por la suma de los dos efectos, por una parte el descenso de la curva de agotamiento del hidrograma al disminuir la escorrentía y por otra el lavado del suelo-fuente difusa-hace disminuir la concentración de nutrientes (Figura 14 B) (Wagner et al. 1976, citado por Fricker, 1980).

En el caso de la existencia de una fuente difusa exclusivamente, en un primer momento la concentración de los nutrientes aumenta con el caudal al irse lavando progresivamente más terreno, sin embargo, éste proceso no es limitado, una vez

producido el primer lavado en la que el caudal-concentración crecen linealmente, la concentración de nutrientes en la fuente disminuye y por tanto también en la escorrentía, dándonos un modelo de evolución (Figura 14 C) (Wagner et al. 1976, citado por Fricker, 1980).

Según lo expuesto se estudia cuál es el modelo estadístico entre nitrógeno total (N_T) y fósforo total (P_T) con el caudal, tomándose como variable independiente el caudal y variable dependiente el (N_T) y (P_T).

La curva de regresión utilizada es una potencial,

$$y = a \cdot x^b$$

Siendo y el nitrógeno o fósforo total, x el caudal, obteniéndose los valores de a y de la pendiente b para cada caso. Esta ecuación nos permite predecir el aporte de ambos parámetros con las variaciones de la escorrentía.

Este análisis de regresión se completa con un análisis multivariante, se utilizó la correlación de Spearman, a partir del cuál se han obtenido las matrices de correlación donde aparecen las correlaciones entre N_T y P_T con el caudal.

La representación gráfica de la curva de regresión obtenida en cada caso permite comparar ésta con las curvas teóricas representativas de la correlación entre concentraciones de nutrientes y caudales (Figura 14), obteniendo información cualitativa sobre el tipo de fuente de contaminación (puntual o difusa) existente.

El Software utilizado fue el programa Statistica for Windows. Release 4.2. Statgraphics Plus 5.1, y el programa Microsoft Excel.

3.3.2 Cargas y coeficientes de exportación de nutrientes

Se han calculado las cargas y los coeficientes de exportación de nutrientes según los criterios que aparecen en la presente memoria de investigación, basándose en la definición de las características de nuestra cuenca de estudio.

La metodología para calcular las distintas cargas de nitrógeno total (N_T) y fósforo total (P_T) expresada en Kg/año y los coeficientes de exportación para cada punto de muestreo de la cuenca de estudio es la siguiente (Figura 15):

- 1.- Se suma todas las formas de nitrógeno y fósforo existentes para cada punto de muestreo y mes del año hidrológico de estudio, obteniéndose las cargas de N_T y/o P_T

2.- El N_T y P_T obtenido en cada punto de muestreo se multiplica por el número de días que representan y por el caudal circulante durante el período de estudio, obteniendo como resultado la cantidad de N y/o P que cada año aporta cada subcuenca a partir del punto de muestreo considerado en esta. La relación entre ambas cargas N/P nos indica el nutriente limitante de la producción en cada caso

3.- El reparto de ésta carga en toda la superficie de cada cuenca unitaria suponiendo una distribución homogénea, se utiliza como parámetro de comparación entre cuencas que representa las condiciones de usos de suelo, climatológicas, litológicas, de escorrentía, etc. Por tanto, los valores de los coeficientes de exportación (N_T y/o P_T) para cada año de muestreo vienen expresados en $g/m^2/año$

Para calcular la carga contaminante de N_T y/o P_T (Kg/año) producida en toda la cuenca de estudio, se ha considerado el punto de muestreo n°. 4 (Guadarrama Pueblo) donde no hay presión antrópica, y el punto n°. 10. (Bargas (Cruce M-403 con C. M 4006)) que es el último punto de muestreo y que recoge toda la carga contaminante producida a lo largo de la cuenca de estudio.



Figura 15: Metodología del cálculo del coeficiente de exportación de nutrientes

- Para cada punto de muestreo y año de estudio

$$1) \begin{cases} \sum \text{formas de P} = P_T = C_1 \text{ (mg/l)} \\ \sum \text{formas de N} = N_T = C_1 \text{ (mg/l)} \end{cases}$$

- Donde:

- Carga de N_T y/o $P_T = C_1$
- Carga de N_T y/o $P_T = C_2$ expresada en (mg/mes)
- Sumatorio de todos los meses en cada punto de $C_2 (\sum C_2) = C_3$
- Carga de N_T y/o $P_T = C_3$ expresada en kg/año
- Coeficiente de exportación de N_T y/o $P_T = C_4$ expresado en g/m²/año
- Caudal circulante = Q expresada en l/seg
- Periodo de muestreo = t
- Superficie de cada cuenca unitaria = S

$$2) \begin{cases} C_1 * Q * t = C_2 & \text{(mg/mes)} \\ \sum C_2 = C_3 & \text{(mg/año)} \\ C_3 * 10^{-6} = C_3 & \text{(Kg/año)} \\ C_3 * S * 10^{-3} = C_4 & \text{(g/m}^2\text{/año)} \end{cases}$$

3) La carga contaminante de N_T y P_T producida en toda la cuenca de estudio, en el supuesto que esta estuviese libre de cualquier tipo de presión antrópica.

- Se elige el punto con menor presión antrópica de toda la cuenca de estudio, y se utilizan sus coeficientes de exportación de N_T y/o P_T (g/m²/año).
- Se multiplican los coeficientes de exportación de N_T y/o P_T (g/m²/año) por la superficie total de la cuenca de estudio, y se convierten los g en kg, y así se obtiene la carga de N_T y/o P_T (kg/año) sin presión antrópica.
- Se toma el punto último de la cuenca de estudio que refleja toda la carga de N_T y/o P_T (kg/año) con presión antrópica que sufre esta.
- La diferencia entre ambas cargas refleja la carga antrópica producida por la cuenca de estudio.

Carga contaminante de N_T y/o P_T (Kg/año) producida en toda la cuenca de estudio = Concentración de N_T y/o P_T (Kg/año) en el punto último de la cuenca - Concentración de N_T y/o P_T (Kg/año) producida en toda la cuenca sin presión antrópica

3.4 Metodología y análisis del evento de tormenta

Se ha llevado a cabo un evento de tormenta situado dentro en la subcuenca 2 de la cuenca de estudio, en el punto de muestreo nº. 2. Arroyo de la Venta (Valle de la Fuenfría), se realizó desde el 24 de octubre del 2006 al 25 de octubre del 2006.

Las muestras de agua de la escorrentía asociada con el evento de tormenta se colectaron manualmente, la metodología seguida se resume en el anejo 1.4. La programación del intervalo de tiempo de muestreo se estableció en forma visual.

Los datos de precipitación asociada al evento de tormenta se tomaron de la Estación Meteorológica de Cercedilla.

Las muestras de agua de escorrentía colectadas en campo fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos y Aguas del departamento de Ciencias Ambientales del C.E.U. de Madrid. Los parámetros analizados son los mismos que se hicieron para las muestras de agua descritos en el apartado 3.2.

3.5 Caracterización de las formas del fósforo en la zona de estudio

3.5.1 Formas en las que se encuentra el fósforo

El fósforo, tanto orgánico como inorgánico, lo podemos separar en varias formas o fracciones. Dichas fracciones no guardan relación con el metabolismo del fósforo, sino con las formas químicas en las que se encuentran.

De esta forma, lo dividimos en fósforo disuelto y en fósforo particulado. Dentro del disuelto englobamos el que se encuentra como ortofosfato, polifosfatos (que vienen principalmente de detergentes sintéticos), o formando coloides orgánicos.

El fósforo particulado puede encontrarse como restos orgánicos (ácidos nucleicos, fosfoproteínas, restos de membrana), o en fases minerales, como en apatita, o absorbido a complejos inorgánicos, tales como arcillas, carbonatos o hidróxidos férricos. Además, el fósforo se puede encontrar absorbido a materia orgánica particulada muerta o asociaciones macroorgánicas.

Los análisis químicos están centrados alrededor de la reactividad del fósforo con el molibdato y los cambios en la reactividad de las formas complejas del fósforo, durante hidrólisis enzimática y acídica, según éstas son convertidas a ortofosfato.

La mayoría de los datos publicados, del mismo modo que lo vamos a hacer nosotros, sobre concentraciones de fósforo, lo refieren como fósforo total y fósforo inorgánico soluble, es decir, ortofosfatos.

Las formas químicas en las que se encuentra el fósforo forman complejos quelados y sales insolubles cuando se asocian con iones de metales. El grado de formación de complejos y quelados entre los fosfatos inorgánicos y los iones de metales en cuerpos de aguas naturales dependerá del pH y de la presencia de otros ligandos (SO_4 , carbohidratos, fluoruro y especies orgánicas).

La formación de complejos con cationes tiene un efecto marcado en la distribución de fosfato. Iones de metales como Fe^{3+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Ca^{2+} , están presentes en concentraciones comparables o más bajas que las concentraciones de fosfatos inorgánicos. Para dichos iones, la formación de complejos puede afectar significativamente a la distribución del ión metálico, la distribución de fosfato o ambos. La solubilidad de complejos como el de FePO_4 es mínima a pH 6, pero aumenta según el pH aumenta y la concentración de calcio afecta en la formación de hidroxiapatito.

3.5.2 Extracción del fósforo particulado por diferentes métodos

Para la determinación del fósforo particulado, se han seleccionado cinco métodos de extracción de fósforo de los referidos en bibliografía para este tipo de experimentos.

Con estos métodos lo que se persigue es extraer el fósforo de las distintas fracciones en las que se encuentra retenido, y liberarlo en la solución, de forma que sea medible, ya que de forma natural se encuentra asociado a complejos y moléculas que hacen imposible su cuantificación.

Para conseguir la extracción del fósforo de las diferentes fracciones donde se encuentra retenido se utilizó unas soluciones extractantes con posterior agitación.

En los distintos métodos que emplearemos (Vargas, M. et. al., 1992), las diferencias se encuentran en la solución extractora que utilizaremos, así como en su concentración, en la relación cantidad de la muestra/volumen de solución extractante, y en el tiempo que tendremos la mezcla en agitación.

Los métodos que se van a emplear para la caracterización de fosfatos en la cuenca del río Guadarrama son los siguientes (Tabla 17).

Con las soluciones extractantes lo que se va a realizar es un ataque a los compuestos donde está retenido el fósforo. La mayoría de los métodos se basan en un ataque ácido, con oxidantes fuertes, que destruyan los compuestos, oxidando el fósforo hasta ortofosfato.

En el método de Olsen modificado, en cambio, la solución extractante, consiste en una solución alcalina tamponada de NaHCO_3 .

En las soluciones extractantes, además del oxidante, se incluye a veces un ión acomplejante, como son el NH_4F y el EDTA, que desplazan al fósforo de los complejos en los que se encuentra en las muestras de suelo.

Tabla 17: Métodos utilizados para la extracción de fósforo particulado

Método	Solución extractora			Agitación
	Disolvente	Concentración	Relación	
Olsen modificado	NaHCO_3	0,5 N	1:10	30 min
	EDTA	0,01M		
Bray 1	HCl	0,025N	1:7	1 min
	NH_4F	0,03N		
Bray 2	HCl	0,1N	1:7	40 seg
	NH_4F	0,03N		
Truog	H_2SO_4	0,002N	1:200	30 min
Mehlich	HCl	0,05N	1:4	5 min
	H_2SO_4	0,025N		

Entre los distintos métodos, también se juega con las concentraciones de la solución extractante y la relación que hay entre ésta y la muestra, ya que la cantidad de extractante, también nos va a influir en la reactividad que va a tener con las muestras de suelo.

El otro factor determinante para las extracciones es el tiempo de agitación. El tiempo de agitación va a suponer el tiempo que el suelo se va a poner en contacto con la solución extractante, dando lugar, por tanto, a que los ácidos reaccionen con el suelo, destruyendo los complejos y compuestos donde se encuentra atrapado el fósforo y dejándolo libre para que pueda tener lugar la reacción de colorimetría, y de ésta forma, obtener una fracción de fósforo medible.

El empleo de unos métodos u otros, o la adecuabilidad de cada uno de ellos, va a depender del tipo de material litológico en el que estemos trabajando, ya que cada extractante va a tener una reactividad con las diferentes fracciones en las que se encuentra atrapado el fósforo del suelo.

3.5.3 Contenido de fósforo en el agua y en el suelo

Para el estudio de la determinación de fosfatos del agua a lo largo de la cuenca del río Guadarrama se eligieron distintos puntos de dicha cuenca donde se realizaron los siguientes estudios:

- En el curso medio de la cuenca del río Guadarrama: se realizó una comparación entre los cinco métodos de extracción de fósforo particulado. Y una comparación entre las cantidades anuales transportadas por el río Guadarrama de fósforo disuelto y particulado.
- En el curso alto y bajo de la cuenca del río Guadarrama: se realizó una comparación entre las cantidades anuales transportadas por el río Guadarrama de fósforo disuelto y particulado.

Para el estudio de la determinación de fosfatos del suelo a lo largo de la cuenca del río Guadarrama se eligieron distintas zonas próximas al cauce de dicha cuenca.

La toma de muestras en los puntos seleccionados tanto para la determinación de fosfatos del agua como del suelo se realizó durante el mes de enero de 2007.

3.6 Determinación de la edafofauna en la zona de estudio

3.6.1 En suelos naturales

Para determinar la edafofauna del suelo natural se utiliza el método Berlesse-Tullgren. De cada una de las diferentes muestras llevadas al laboratorio en bolsas de plástico cerradas y numeradas, se coge una fracción para emprender el método. Utilizando baterías de aparatos Berlesse-Tullgren.

Estos aparatos están formados por un embudo de zinc con un diámetro inferior de 3 cm. y uno superior de 40 cm. Sobre cada uno de estos embudos se coloca un cedazo de malla metálica de 3 mm de luz, que llenamos con su correspondiente fracción de muestra y debajo colocamos un recipiente que va a ser el receptor de las diferentes especies, en este caso será un erlenmeyer. La altura del cedazo es de 9 cm y su radio es de 10 cm, por lo que el volumen de suelo es aproximadamente de 3.000 cm³.

Teóricamente cada aparato Berlesse-Tullgren se ilumina por la parte superior con bombillas incandescentes de 25 W, pero en este caso se utilizó sólo la luz natural (luz solar). Las diferentes especies de la edafofauna huyendo de la desecación y de la luz, atraviesan la malla metálica, resbalan por el embudo y son recogidos en el erlenmeyer con alcohol de 76°. En contacto con el alcohol se produce su muerte y conservación para su posterior identificación y cuantificación. Esta extracción duró ocho días y una vez finalizado todo el proceso se tapa cada uno de los erlenmeyers con parafilm para que no se produzca la evaporación del alcohol que estropearía todo el proceso. Al final se obtienen tantos erlenmeyers como muestras se tengan. En el presente estudio se obtuvo 72 muestras edafofáunicas.

3.6.2 En suelos contaminados por metales pesados (Cu, Cd, Ni, Zn y Cr)

Para el estudio de la edafofauna del suelo contaminado por metales pesados provocado, es un proceso más laborioso ya que se rellenan las diferentes macetas o recipientes de plástico que albergarán los horizontes por cada punto de muestreo con los tres horizontes de suelo (superior, intermedio e inferior), conservando su disposición original para simular el suelo con sus horizontes.

Estas macetas se contaminan de una sola vez con una concentración de 1.000 mg/l o p.p.m. (Anejo 11) de los metales Cu, Cd, Ni, Zn y Cr para comprobar la relación entre la existencia de estos metales y la edafofauna. Se deja pasar 15 días y se repite el proceso anterior (método de Berlesse-Tullgren). Al final se obtienen tantos erlenmeyers como muestras se tengan. En el presente estudio se obtuvo 72 muestras edafofáunicas.

Dentro de los metales pesados existen dos grupos diferentes:

- *Oligoelementos o micronutrientes*: que son necesitados en pequeñas cantidades por plantas y animales, para que estos organismos completen su ciclo vital. Pasado cierto umbral se vuelven tóxicos; dentro de este grupo podemos incluir Cr, Cu, Ni y Zn.
- *Metales pesados sin función biológica conocida*: cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva aparejadas disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos, ej: Cd.

3.6.3 Caracterización general de la edafofauna de los suelos de las parcelas experimentales

Se ha estudiado diversos representantes de la mesofauna edáfica para su evaluación como bioindicadores del efecto de la contaminación del suelo.

Van Straalen y Krivoltsky (1996) definen a un sistema bioindicador como la herramienta para extraer información biológica de un ecosistema que será la base científica para la toma de decisiones en el manejo de lugares contaminados. Se trata de una colección de información ecológica de un ecosistema obtenida de un modo organizado, de tal forma que el conjunto de los diferentes componentes permitan extraer conclusiones sobre la calidad del ecosistema como un todo. Esto debería incluir no solamente aspectos de las especies individuales, sino también aspectos de biodiversidad y funcionamiento.

Tras el empleo de la técnica de extracción de Berlesse-Tullgren, los frascos de recolección contienen los diferentes grupos de microartrópodos y sus formas larvarias móviles que se hallaban en las muestras de suelo, hojarasca y musgo.

La mesofauna del suelo interviene en procesos decisivos para el mantenimiento de la productividad del suelo como son la descomposición de la materia orgánica, la aceleración y reciclaje de los nutrientes y la mineralización del fósforo y el nitrógeno (Seastedt y Crossley) 1980), factores decisivos para el mantenimiento de la productividad del suelo. La presencia y el balance de algunos de sus grupos, constituyen indicadores biológicos de estabilidad y fertilidad del suelo, por ser muy sensible a los cambios climáticos y a las perturbaciones antrópicas del medio edáfico, que provoca variaciones en su densidad y diversidad (Socarrás, A y Rodríguez, M., 2005).

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un análisis de los distintos táxones que conforman la mesofauna en cada punto de muestreo indicadores de la calidad del suelo, y cuantificar las relaciones entre la actividad antrópica y el ambiente natural.

Las especies que se obtienen en la presente investigación se detallan a continuación.

a) MICROARTRÓPODOS

Son la mayor fracción de la mesofauna. La anchura del cuerpo varía entre 0,1-2 mm y la longitud entre 0,2-10 mm, y están dominados por dos grandes grupos: ácaros y colémbolos que componen el 90% de la fauna. Viven en la parte no acuosa de los poros del suelo, y por eso no están expuestos a los xenobióticos solubles en agua. La ruta principal de exposición es indirecta vía alimentación. Su escala espacial y temporal en el ecosistema del suelo se sitúa entre la de los nematodos y los oligoquetos (lombrices de tierra).

Junto con protozoos y nematodos, los microartrópodos forman parte de la red alimenticia de varios niveles tróficos actuando desde la descomposición de residuos a la movilización de nutrientes.

Así, tanto los colémbolos como los ácaros pertenecen al filo artrópodos. Los ácaros pertenecen a la clase de arácnidos y los colémbolos a la clase de insectos.

b) COLÉMBOLOS

Constituyen entre el 20-30 % de la fauna de los microartrópodos, la mayoría son fungívoros o detritívoros, y de forma oportunista pueden alimentarse de nematodos. Dunger (en Koehler, 1996) considera que este grupo reúne características apropiadas para ser considerado como bioindicador, ya que son descomponedores de la materia orgánica del suelo y ejercen una gran influencia en la mineralización/inmovilización de los nutrientes.

Son pequeños insectos ápteros, raramente de más de 5 mm de largo. Cuerpo cilíndrico o globular y habitualmente provisto de un órgano saltador bifurcado en el

extremo posterior que permite a estos insectos brincar al aire cuando se les molesta. Viven en el suelo, entre la hojarasca y vegetación en general.

Este es, con mucho, el orden de insectos apterigotos más numeroso hasta lo que abarca el conocimiento actual, con alrededor de 1.500 especies. Su distribución es mundial y ciertas especies incluso se dan más allá de las líneas nivales de las regiones árticas y antárticas, alimentándose aparentemente de las algas escasas o de los granos de polen acarreados por el viento. Sin embargo, la mayoría de las especies viven en el suelo, entre la hojarasca y renuncian a los lugares donde la humedad no es alta puesto que estos insectos son muy susceptibles a la desecación. Incluso unos pocos viven en el agua y alrededor de ella. Los colores predominantes de los colémbolos son los grises y los pardos, aunque algunos son blancos y muchas especies que viven en la hojarasca son moteadas de pardo y de amarillo pálido. A menudo el cuerpo está revestido de pelos o escamas y muchas especies tienen un collar prominente de cerdas justo por detrás de la cabeza.

Las piezas bucales de los colémbolos son del tipo masticador y están parcialmente hundidas dentro de la cápsula cefálica. Las antenas son de longitud variable aunque no contienen más de seis artejos: cuatro es el número habitual. No tienen ojos compuestos, pero habitualmente están presentes cierto número de ocelos y están a menudo rodeados por un área pigmentada que da la impresión de un ojo. Los segmentos torácicos no son fácilmente distinguibles de los del abdomen aparte del hecho de que en los primeros traen las patas, pero la propias patas son a su vez inhabituales por no tener segmentos tarsales: las tibias terminan en una o dos uñas.

Es por el abdomen por lo que se diferencian tanto los saltarines (nombre coloquial de los colémbolos) de los demás insectos ya que su abdomen contiene sólo seis segmentos en vez de los once de todos los demás insectos adultos. En todos los colémbolos o saltarines, el primer segmento abdominal trae un órgano característico llamado tubo ventral, formado por la fusión de los apéndices de este segmento. El tubo contiene sacos o vesículas eversibles que se hinchan haciendo entrar sangre en su interior. La respiración, la absorción de agua y la adhesión son algunas de las funciones que se sugieren para este órgano.

El tercero y cuarto segmentos abdominales están relacionados con la acción saltadora que da al grupo su nombre vulgar. El órgano saltador bifurcado está formado por la fusión parcial de los apéndices del cuarto segmento abdominal y se conoce con el nombre de fúrcula. Cuando no la emplea, el animal la trae replegada hacia delante bajo el abdomen, sujeta por los apéndices del tercer segmento abdominal que a su vez están parcialmente fusionados y se conocen con el nombre de hámulo o retináculo. Cuando el animal es perturbado el hámulo suelta la fúrcula cuyos músculos se contraen en ese momento y los impulsan hacia atrás y hacia abajo, contra el suelo. Este órgano está bien desarrollado en la mayoría de los colémbolos, pero es pequeño o falta en algunos géneros. El salto no es, naturalmente, el procedimiento usual de locomoción debido a que menudo los insectos viven en espacios confinados. Andan o corren a sacudidas entre la

hojarasca, con las antenas en continuo movimiento, buscando vías de paso y alimento.

Estos insectos alcanzan la madurez sexual antes de llegar al tamaño máximo. Los cambios que tienen lugar durante el ciclo vital son tan ligeros que debemos decir que no existe metamorfosis. En condiciones normales probablemente hay varias generaciones por año.

c) ÁCAROS

Los miembros de este orden superan, con mucho, a otros órdenes en número de individuos y especies. Aunque hay descritas unas 30.000 especies, algunos autores estiman que existen que existen de 500.000 a un millón sin describir. En una pequeña porción de mantillo de hojas de un bosque se pueden encontrar cientos de individuos de lagunas especies de ácaros. Aparecen en todo el mundo, tanto en hábitat terrestres como acuáticos, extendiéndose por regiones inhóspitas como los desiertos, las áreas polares y las fuentes termales. Muchos ácaros son parásitos durante uno o más estados de su ciclo vital.

Los ácaros se diferencian de todos los demás arácnidos por tener completamente fusionados el cefalotórax y el abdomen, sin ningún signo de división externa o segmentación. Llevan sus piezas bucales sobre un pequeño saliente anterior, el capítulo, formado principalmente por apéndices que están al servicio de la alimentación y que rodean la boca. A cada lado de ésta hay un quelícero que sirve para desgarrar, triturar o morder el alimento. La forma de los quelíceros varía ampliamente en las distintas familias. Al lado de los quelíceros hay un par de pedipalpos articulados, cuya forma y función también varían mucho según el tipo de alimentación. Las bases de los pedipalpos se fusionan centralmente para formar un hipostoma, mientras que dorsalmente, sobre la boca, se extiende un rostro o tectum. Los ácaros adultos tienen normalmente cuatro pares de patas.

La mayoría de los ácaros transfieren el esperma directamente, pero algunas especies lo hacen mediante un espermatóforo. Del huevo sale una larva con tres pares de patas, que antes de alcanzar el estado adulto, pasa por uno o más estado ninfales con ocho patas.

Los ácaros de vida edáfica pertenecen a tres subórdenes:

- *Prostigmata*: la mayoría de las especies son depredadoras, y algunas fungívoras que llegan a ser muy abundantes en la materia orgánica en descomposición. Otras son oportunistas y su nivel de población crece rápidamente cuando ocurre alguna perturbación del medio.
- *Mesostigmata*: no son tan numerosos como los de los otros subórdenes, pero desempeñan un papel muy importante en el suelo ya que son depredadores.

Las especies más pequeñas son nematófagas, y las más grandes son depredadoras muy activas de colémbolos.

- *Oribatida*: junto con los colémbolos son los más numerosos de la fauna de microartrópodos del suelo. Behan-Pelletier y Bisset (1993) calculan que sólo se ha descrito el 20% de las especies. La tasa de reproducción es más lenta que la de los colémbolos, pero su supervivencia es más alta y mantienen un alto nivel de población.

Los oribátidos son principalmente fungívoros aunque utilizan una amplia variedad de alimentos. Son capaces de cortar y digerir trozos de hojas y madera en descomposición y muchas especies se pueden criar con algas y líquenes.

Lo más importante de los oribátidos en el suelo es su efecto en los procesos de descomposición de la materia orgánica. Los adultos poseen un exoesqueleto altamente esclerotizado con abundantes deposiciones de CaCO_3 que acumulan de los cristales de oxalato cálcico procedentes de los hongos de los que se alimentan.

Por ello desempeñan un importante papel en el metabolismo del Ca en el suelo. En bosques caducifolios, su nivel de población alcanza picos muy alto en primavera y otoño, manteniendo un nivel alto durante los meses de verano.

Las mayores poblaciones de oribátidos se encuentran en los bosques de coníferas, seguidas por las de los bosques caducifolios, los pastos y la tundra, reduciéndose considerablemente en los suelos agrícolas. Todo el conjunto de características anteriormente reseñadas, hace de los ácaros oribátidos un taxón especialmente como bioindicador.

3.7 Tratamientos estadísticos

Se han realizado varios análisis multivariantes a partir de los cuales se han obtenido las diferentes matrices de correlación donde aparecen las correlaciones entre los distintos parámetros para cada punto. Estos valores se recogen en el anejo III.

Los distintos análisis multivariantes realizados son los que a continuación se enumeran:

- Entre los parámetros analizados en las diferentes muestras de agua, que condicionan la calidad del agua del río Guadarrama, con el fin de poder evaluar el origen de la misma.

- Entre los diferentes parámetros del suelo y la concentración de metales pesados con la presencia de bioindicadores en suelos naturales y contaminados.
- Entre caudales y producción de nutrientes.

El Software utilizado fue el programa Statistica for Windows. Release 4.2. Statgraphics Plus 5.1. El Statgraphics Plus 5.1: nos indica la mejor correlación matemática entre los valores correspondientes a los distintos parámetros analizados.

Referente al análisis multivariante, señalar que se seleccionaron las variables más significativas, con un coeficiente de correlación alto (es decir cerca de 1 ó -1), más concretamente aquellas cuyo coeficiente de correlación queda comprendido entre 0.8 y 1.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se hace referencia a la metodología seguida a lo largo de la presente tesis de investigación.

4.2 Caracterización del agua en la cuenca de estudio

Los resultados de la campaña de muestreo extensivo (2006-2007) obtenidos a partir de aforos y análisis químicos en todos los puntos de muestreo de la cuenca del río Guadarrama, se recogen en el anejo 1.12.

4.2.1 Datos obtenidos de los parámetros considerados

Dada el gran volumen de datos disponibles, se ha utilizado el programa Microsoft Excel para elaborar la tabla 18.1 en la que se dan los valores máximos, medio y mínimos de todos los parámetros analizados en cada punto de muestreo. Los datos están expresados en ppm y el caudal en l/s.

El criterio que se ha utilizado para discriminar los datos ha sido el nivel de potabilidad del agua reflejado en el R.D 140/2003 para aguas de abastecimiento a la población.

Tabla 18.1: Relación de valores máximos, medios y mínimos de los distintos parámetros en los puntos de muestreo de la cuenca de estudio

Parámetros	Valor	Q Caudal (l/s)	T(°C)	pH	Cond. (μS/cm)	O ₂ dis. (mg/l)	Satur. (%)	Turbidez (NTU)	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	N t (mg/l)	PO ₄ ⁻ (mg/l)	P t (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	SS. (mg/l)
1- E. Navalmedio	Máx.	196,00	20,60	8,30	274,00	11,50	99,00	17,70	7,00	36,00	91,00	4,00	78,10	19,50	18,50	17,90	0,05	5,10	1,90	2,07	0,80	0,67	37,00	19,50
	Med.	112,50	11,65	7,22	205,25	8,41	88,62	1,92	1,63	18,08	47,08	2,58	57,10	11,56	12,58	3,58	0,02	2,73	0,47	0,99	0,13	0,12	14,08	7,63
	Min.	10,00	4,00	6,15	106,00	5,56	65,10	0,00	0,50	8,00	6,00	1,00	28,40	4,90	8,10	0,90	0,01	0,90	0,10	0,44	0,01	0,03	7,00	1,80
2- Arroyo de la Venta (Valle de la Fuenfria-Cercedilla)	Máx.	150,00	17,00	8,50	57,00	10,20	102,0	28,64	4,00	49,00	8,00	2,00	21,30	17,10	7,30	8,20	0,18	4,70	17,70	1,84	1,10	0,35	24,00	8,60
	Med.	89,69	9,91	7,68	43,06	7,91	82,61	2,76	1,50	14,25	4,92	1,42	11,54	12,16	5,07	1,98	0,03	2,33	1,77	0,87	0,14	0,11	11,50	3,16
	Min.	1,50	2,50	7,01	24,00	1,85	20,60	0,00	0,50	4,00	0,00	1,00	7,10	7,32	1,60	0,30	0,01	0,90	0,10	0,28	0,10	0,01	6,00	1,20
3- Cercedilla (Pueblo)	Máx.	312,00	20,00	8,01	141,00	10,50	108,0	3,60	11,0	33,00	18,00	4,00	21,30	22,00	19,30	14,50	0,12	5,40	2,10	2,36	0,50	0,22	24,00	13,80
	Med.	144,50	11,53	7,32	95,71	7,84	82,59	1,20	2,88	18,33	11,67	2,42	14,95	15,91	11,48	2,61	0,03	3,46	0,38	1,09	0,11	0,11	11,63	5,67
	Min.	8,00	3,50	6,55	38,00	2,08	23,00	0,10	0,50	7,00	4,00	2,00	7,10	9,76	5,30	0,30	0,01	1,30	0,10	0,37	0,01	0,01	7,00	1,90
4- Guadarrama (Pueblo)	Máx.	900,00	23,00	8,06	388,00	12,00	102,0	7,90	4,00	78,00	52,00	9,00	71,00	67,10	48,40	11,60	0,18	12,80	1,30	2,97	0,70	0,48	76,00	19,20
	Med.	367,63	11,37	7,19	251,56	8,49	84,49	3,26	1,67	32,11	38,78	5,56	45,37	28,87	24,30	5,89	0,05	5,97	0,34	1,22	0,17	0,16	24,89	5,06
	Min.	1,50	4,30	6,29	147,00	5,95	65,00	0,30	0,50	7,00	21,00	3,00	28,40	18,30	8,40	2,60	0,01	2,10	0,10	0,63	0,02	0,01	11,50	1,10
5- El Escorial- Puerto de la Cruz Verde	Máx.	8,00	20,00	8,00	296,00	11,08	106,0	5,38	4,00	29,00	66,00	4,00	56,80	59,80	40,30	17,10	0,17	4,00	2,00	2,28	0,49	0,49	25,00	18,60
	Med.	3,40	12,50	7,05	241,71	7,60	77,17	0,67	1,50	14,83	26,83	2,08	39,64	37,78	26,07	8,12	0,03	2,18	0,64	1,00	0,13	0,13	11,08	7,14
	Min.	0,30	3,50	6,30	153,00	1,86	21,30	0,00	0,50	6,00	5,00	1,00	28,40	17,70	13,70	2,40	0,01	0,90	0,10	0,29	0,01	0,01	7,00	0,40
6- Galapagar-La Navata	Máx.	2750	26,30	8,04	700,00	12,25	105,1	15,50	9,00	64,00	286,0	54,00	85,20	74,40	40,30	19,40	1,50	44,90	23,60	28,95	4,30	3,31	51,00	22,20
	Med.	812	16,49	7,09	463,17	7,32	79,14	8,41	3,21	36,67	96,33	25,75	59,47	44,17	32,37	8,35	0,27	13,73	8,44	9,75	1,70	1,86	39,17	13,85
	Min.	150	4,50	6,32	296,00	4,51	50,70	1,10	0,50	10,00	39,00	8,00	35,50	10,90	25,80	2,40	0,01	5,40	0,10	2,02	0,29	0,51	26,00	7,10
7- E. de Molino de la Hoz-Pte. romano	Máx.	4360	25,60	7,58	632,00	11,80	104,4	18,32	20,00	92,00	280,0	57,00	99,40	68,30	39,50	44,70	2,18	51,70	20,60	17,66	8,90	2,81	99,00	31,80
	Med.	1076	16,28	6,89	473,33	6,81	72,40	11,77	5,21	37,33	102,1	28,83	63,02	40,70	35,27	10,63	0,41	13,37	5,38	7,33	2,21	1,79	51,25	15,72
	Min.	300	4,90	6,25	313,00	4,00	44,00	5,80	0,50	9,00	42,00	10,00	35,50	10,90	24,20	3,60	0,02	6,90	0,20	2,17	0,52	0,75	27,00	9,30
8- Móstoles (Urbanización Guadarrama)	Máx.	5210	21,90	7,69	592,00	10,41	89,00	17,70	10,00	62,00	188,0	50,00	92,30	134,00	44,30	31,60	0,69	40,40	20,60	25,35	16,60	3,65	63,00	32,50
	Med.	2325	14,60	7,07	497,25	6,84	69,73	13,09	4,08	33,75	97,17	31,58	62,73	94,12	37,00	8,69	0,25	19,50	6,25	9,34	3,81	2,09	49,50	20,14
	Min.	795,00	4,10	6,53	337,00	1,75	19,40	9,40	1,00	9,00	42,00	14,00	35,50	23,20	28,20	0,90	0,03	9,30	0,30	3,14	0,58	0,64	40,00	7,40
9- Batres (Ctra. El Alamo a	Máx.	7100,00	23,00	7,69	752,00	8,90	80,00	29,00	9,00	85,00	238,0	58,00	85,20	177,00	72,50	25,70	1,49	43,30	15,10	19,10	14,20	4,88	68,00	32,10

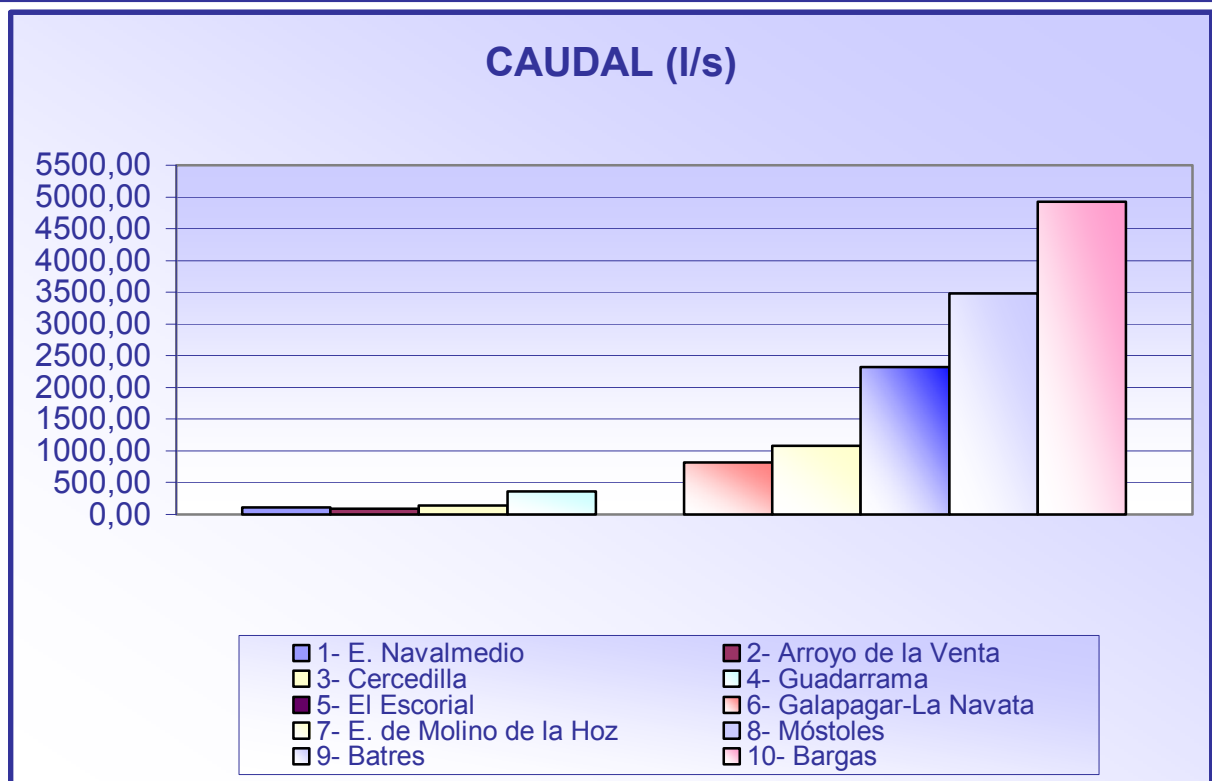
Tabla 18.1: Relación de valores máximos, medios y mínimos de los distintos parámetros en los puntos de muestreo de la cuenca de estudio

Parámetros		Q Caudal (l/s)	T(°C)	pH	Cond. (µS/cm)	O ₂ dis. (mg/l)	Satur. (%)	Turbidez (NTU)	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	N t (mg/l)	PO ₄ ⁻ (mg/l)	P t (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	SS. (mg/l)
Puntos de muestreo	Valor																							
Grifón)	Med.	3483,88	16,51	7,02	561,96	5,76	59,48	16,90	4,08	40,58	114,5	34,92	62,13	93,83	40,03	7,94	0,37	18,70	6,13	9,11	4,07	2,75	51,17	20,18
	Min.	900,00	6,93	6,21	360,00	1,29	15,00	11,50	1,00	16,00	58,00	17,00	35,50	11,00	29,80	0,90	0,02	9,90	0,10	2,32	0,67	1,00	40,00	13,20
10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006)	Máx.	11697,0	21,60	8,20	744,00	10,67	91,40	96,00	9,00	88,00	254,0	56,00	85,20	171,00	76,50	42,80	0,64	35,30	18,20	19,85	16,80	4,05	70,00	42,70
	Med.	4928,17	15,13	7,29	598,63	7,51	75,72	27,10	4,38	46,58	125,1	37,83	68,94	110,89	44,78	11,13	0,17	20,28	5,94	9,25	4,18	2,39	58,50	22,83
	Min.	1000,00	5,00	6,28	322,00	1,96	21,00	11,10	0,50	25,00	48,00	20,00	28,40	12,20	31,40	1,90	0,01	13,40	0,20	3,39	0,70	1,10	42,00	12,20

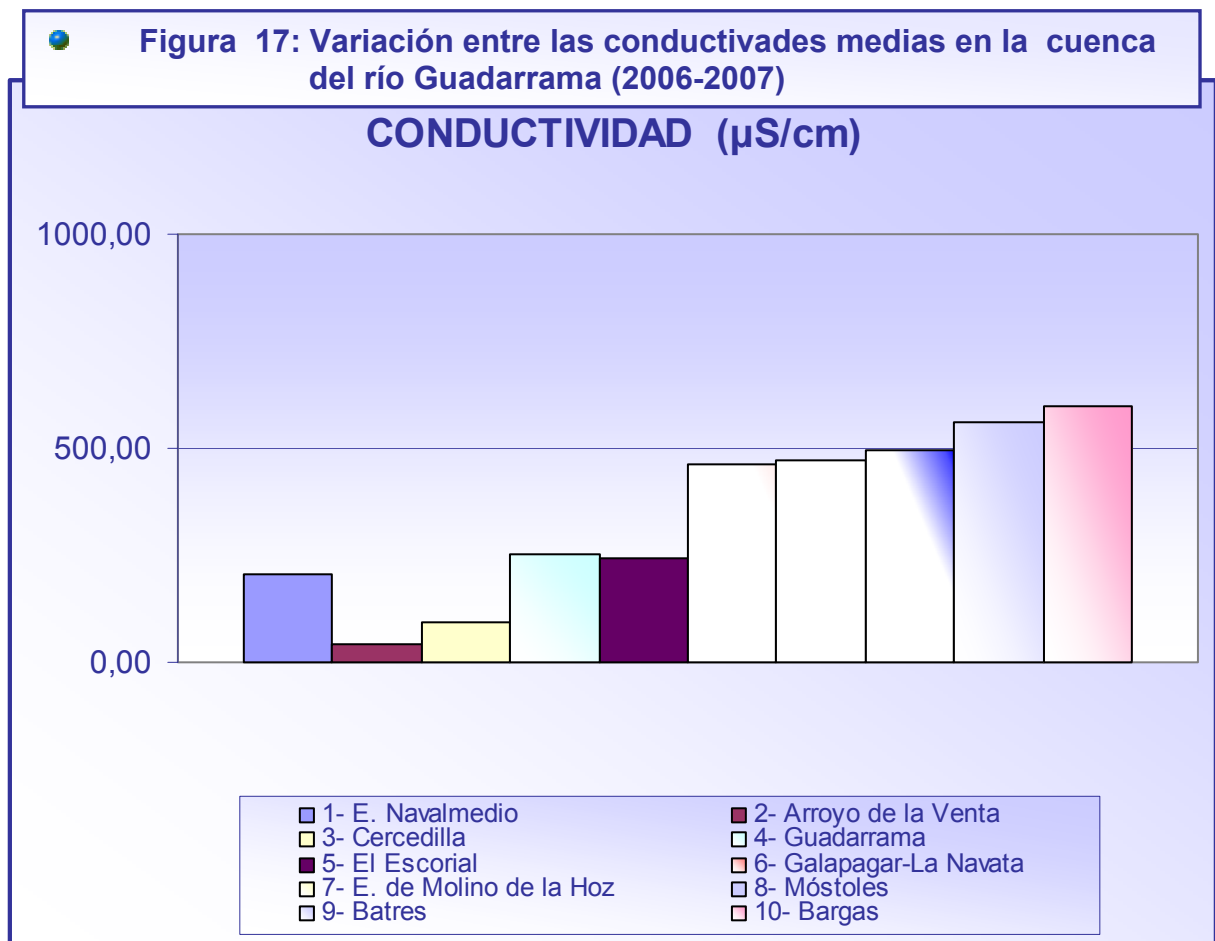
De la observación de dichos datos se deduce lo siguiente:

- Los valores de caudal medio, presentan una gran diversidad estando en relación con la irregularidad interanual de las precipitaciones. En los puntos de cabecera del río (puntos nº. 1, 2, 3y 4) apenas existe un incremento del caudal, el punto nº. 5 tiene un caudal circundante casi inexistente al ser un pequeño arroyo estacional. Destaca la incorporación del río Aulencia aguas abajo del punto nº. 5, produciéndose un incremento continuado del caudal a partir del punto nº. 6 hasta el punto nº. 10 donde se recoge el máximo caudal circundante (punto nº. 10; 4928,17 l/s) de la cuenca de estudio (Figura16).
- La temperatura del agua con valores medios que van desde 9,91 °C (punto nº. 2) a 16,61 °C (punto nº. 9), presenta una gran homogeneidad dentro de las distintas estaciones, llegando en algún caso a alcanzar temperatura media de máximas en verano de 26,3 °C (punto nº. 6) y temperatura media de mínimas en invierno de 2,5 °C (punto nº. 2).

Figura 16: Variación entre los caudales medios en la cuenca del río Guadarrama (2006-2007)



- El pH presenta valores medios entorno a 7 en todos los puntos, excepto en el punto n°. 7 que presenta un valor medio de 6,89. Estos valores están dentro del rango permitido por el R.D 140/2003 (6,5-9,5). La distribución de los valores del pH en cada caso esta conectada con la materia orgánica, vegetación, vertidos, etc., por esto es imposible establecer unas normas de comportamiento general de las aguas respecto al pH.
- De la conductividad, se obtiene una variación en los valores medios de 43,06 a 251,56 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entorno a los cinco primeros puntos de muestreo, y una variación en los valores medios de 463,17 a 598,63 $\mu\text{S}/\text{cm}$; llegando en algún caso a alcanzar valores máximos de 752,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (punto n°. 9) pueden ser atribuibles a los vertidos procedentes de áreas con predominio de uso industrial y mínimos de 24 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (punto n°. 2) (Figura 17). La tendencia general coincide con la del caudal.



- Respecto al oxígeno disuelto, la saturación en %, o el déficit, presenta valores medios que va desde 5,76 a 8,49 mg/l, llegando en a alcanzar valores máximos de 12,25 mg/l (punto nº. 6) y mínimos de 1,29 mg/l (punto nº. 9). En general, sus valores son más bajos en verano ya que los caudales disminuyen; en algunos puntos debido a la existencia de vertidos urbanos no existe una variación lineal con el caudal. Estas altas concentraciones de oxígeno disuelto en el río se consigue por su elevada reoxigenación natural, a pesar de la gran demanda de oxígeno que posee a lo largo de su recorrido.
- Los valores medios de la turbidez y los sólidos en suspensión van aumentando a medida que aumenta la contaminación en las aguas de la cuenca de estudio, destacando el punto nº. 10 donde se alcanzan valores máximos.
- Los valores medios de Demanda Biológica de Oxígeno (DQO₅) se sitúan entorno de 1,50 a 5,21 mg/l, llegando a alcanzar valores máximos de 20,0 mg/l (punto nº. 7, probablemente debido al embalse Molino de la Hoz) y mínimos de 0,50 mg/l (todos los puntos excepto el punto nº. 8). En líneas generales, la calidad del agua es mala indicando la presencia de materia orgánica y la descomposición de esta por las bacterias debido a la polución del río.
- Los valores medios de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se sitúan entorno de 14,25 a 46,58 mg/l, llegando a alcanzar valores máximos de 92,0 mg/l (punto nº. 7) y mínimos de 4,0 mg/l (punto nº. 2). Estos valores nos indican que se necesita gran cantidad de oxígeno para oxidar todas las sustancias oxidables presentes en el agua, quedando relacionados con las altas concentraciones de oxígeno disuelto obtenidas.
- La variación entre los distintos parámetros mayoritarios, nitrógeno total y los compuestos de fósforo para el período de estudio (2006-2007), queda reflejada en la figura 18. En los cinco primeros puntos los valores medios de N_T están en torno a la unidad, con intervalos de variación entre 2 y 3; mientras que en el resto de los puntos se produce un incremento notable entorno a 9 y con intervalos de variación mayores en todos los casos, salvo en el punto nº. 7 correspondiente al embalse de Molino de la Hoz, con un valor medio de 7,33.
- Igualmente ocurre con el fósforo total (P_T), con un valor medio en los cinco primeros puntos entorno a 0,13; mientras que el resto de los puntos presenta valores medios superiores, sobre todo a partir del punto nº. 8 (Móstoles) en adelante, como cabría esperar en la zona tan influenciada por vertidos de todo tipo aguas abajo de Móstoles.

- El ión sodio (Na^+) es el catión predominante en los cinco últimos puntos, fácilmente alterable en los minerales que lo contienen y cedido por las arcillas, encontrándose asociado a los cloruros. Los valores medios de Na^+ se sitúan entorno de 4,92 a 125,1 mg/l, llegando a alcanzar valores máximos de 286,0 mg/l (punto nº. 6) y mínimos de 0,0 mg/l (punto nº. 2). La concentración de Na^+ raramente sobrepasa los 100 ó 150 mg/l en las aguas dulces. Sin embargo, en el punto nº. 6 supera el valor máximo permitido por el R.D 140/2003 (200 mg/l), indicando la presencia de contaminación en las aguas.
- El ión potasio (K^+) presenta valores medios se sitúan entorno de 1,42 a 37,83 mg/l, presentando los cinco primeros puntos de muestreo concentraciones bajas como era de esperar, y aumentando su concentración a partir del punto nº. 6 debido al aumento de contaminación de las aguas a partir de este punto, llegando a alcanzar valores máximos de 58,0 mg/l (punto nº. 9) y mínimos de 1,0 mg/l (puntos nº. 1, 2 y 5). La concentración de K^+ no suele sobrepasar los 10 mg/l, valores de concentración superiores a dicho valor pueden ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales.
- El ión cloruro (Cl^-) presenta valores altos debido tanto a la acción antrópica como al largo recorrido del agua. Los valores medios oscilan entre 11,54 para el punto nº. 2 en donde no se da ninguno de los dos efectos anteriores, y de 68,94 punto nº. 10 donde se conjugan los dos efectos esto es por la gran presión antrópica y el largo recorrido del agua, llegando a alcanzar valores máximos de 99,4 mg/l (punto nº. 7) y mínimos de 7,1 mg/l (puntos nº. 2 y 3).
- El bicarbonato (HCO_3^-) es el anión predominante en los tres últimos puntos (Figura 18), sus valores medios se sitúan entorno de 11,56 a 110,89 mg/l, estos se incrementan a lo largo del curso del río llegando a alcanzar valores máximos de 177,0 mg/l (punto nº. 9) y mínimos de 4,9 mg/l (punto nº. 1).
- El ión calcio (Ca^{2+}) acompaña al bicarbonato, presenta valores medios entorno de 5,07 a 44,78 mg/l, estos se incrementan a lo largo del curso del río llegando a alcanzar valores máximos de 76,5 mg/l (punto nº. 10) donde se produce mayor contaminación y mínimos de 1,6 mg/l (punto nº. 2).
- El ión magnesio (Mg^{2+}) resulta ser menor abundante que el calcio, presenta valores medios entorno de 1,98 a 11,13 mg/l, valores máximos de 44,7mg/l (punto nº. 7) supera el valor máximo permitido por el R.D 140/2003 (40 mg/l), indicando la presencia de contaminación en las aguas y mínimos de 0,3 mg/l (punto nº. 2).

- Los nitritos (NO_2^-) que indican contaminación reciente, presentan valores medios entorno de 0,02 a 0,41 mg/l, valores mínimos de 0,01 mg/l, llegando a alcanzar valores máximos de 1,5 mg/l (punto n°. 6), 1,49 mg/l (punto n°. 9) y 2,18 mg/l (punto n°. 7). Estos valores indican que las aguas están contaminadas, esto puede ser debido por la utilización excesiva de fertilizantes en zonas próximas al cauce del río o por las condiciones reductoras del agua junto con la presencia de amonio.
- El ión nitrato (NO_3^-) presenta valores medios entorno de 2,18 a 20,28 mg/l, llegando a alcanzar valores máximos de 51,7 mg/l (punto n°. 7) supera el valor máximo permitido por el R.D 140/2003 (50 mg/l), indicando un elevado grado de contaminación y mínimos de 0,9 mg/l (puntos n°.1, 2 y 5).
- El ión amonio (NH_4^+) también indica contaminación reciente, presenta valores medios entorno de 0,34 a 8,44 mg/l, estos se incrementan a lo largo del curso del río llegando a alcanzar valores máximos de 23,6mg/l (punto n°. 6) donde se produce mayor contaminación y mínimos de 0,1 mg/l. Las aguas superficiales contienen en condiciones naturales un valor máximo de 0,5 mg/l de NH_4^+ , éste valor es superado en la mayor parte de los puntos de muestreo. En los cinco últimos puntos aumenta considerablemente la presencia de amonio indicando el estado de polución de las aguas, esto puede ser debido a los vertidos urbanos preferentemente.
- El nitrógeno total (N_T) presenta valores medios entorno de 0,87 a 9,75mg/l, valores máximos de 28,95mg/l (punto n°. 6) y mínimos de 0,28 mg/l (punto n°. 2). La concentración de nitrógeno total se incrementa en los cinco últimos puntos de muestreo.
- El ión fosfato (PO_4^-) presenta valores medios entorno de 0,11 a 4,18 mg/l, valores máximos de 16,8 mg/l (punto n°. 10) y mínimos de 0,01 mg/l(puntos n°. 1,2, 3 y 5). La presencia de fosfatos es mayor en los cinco últimos puntos, siendo atribuible a los vertidos urbanos preferentemente. El fósforo total presenta valores medios entorno de 0,11 a 2,75mg/l, valores máximos de 4,88 mg/l (punto n°. 9) y mínimos de 0,01 mg/l (puntos n°. 2,3,4 y 5). La concentración de fósforo total se incrementa en los cinco últimos puntos de muestreo.
- La concentración de ión sulfato (SO_4^{2-}) varía entre 11,08 y 58,50 mg/l, presenta valores máximos de 99,0 mg/l (punto n°. 7) y mínimos de 6,0 mg/l (punto n°. 2). El contenido en sulfatos es notablemente inferior al de bicarbonatos, siendo sus valores más constantes que los de bicarbonatos. En ningún caso, la concentración de ión sulfato supera el valor máximo permitido para aguas destinadas al consumo humano (200 mg/l). Su concentración proviene del agua de lluvia y al incorporarse a la escorrentía

superficial puede admitirse una oxidación de sulfuros por microorganismos. Las zonas de praderas donde existen gravíneas son muy sensibles al gas SO_2 y dada su gran solubilidad no es de extrañar que pase a las aguas y mediante procesos de oxidación dé lugar a sulfatos (Seoanez, M., 1978).

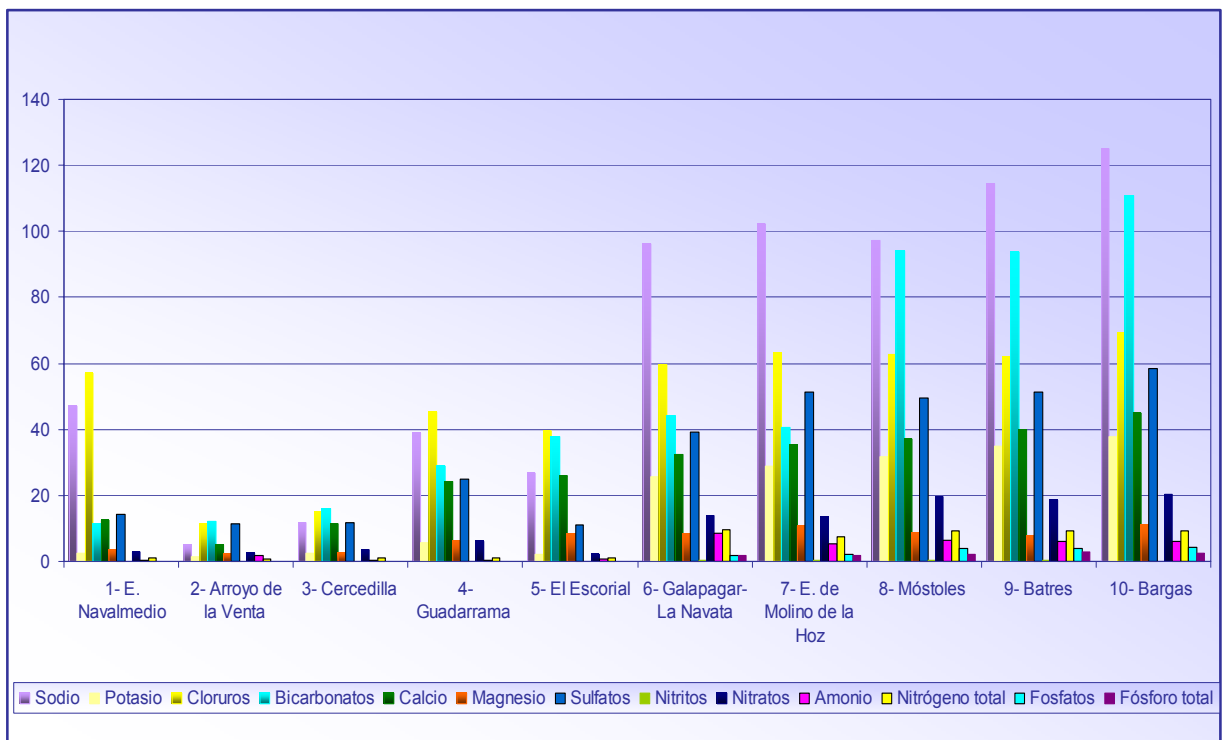
- El factor de biodegradabilidad (Tabla 18.2), en todos los puntos de muestreos indica agua muy poco biodegradable, aumenta en los primeros puntos de muestreo (nº. 1 => nº. 3), en el punto nº. 4 presenta el valor más bajo, en el punto nº. 5 presenta un valor mayor, a partir del punto nº. 6 aumenta debido a que se recupera con el aumento del caudal, presenta un valor máximo en el punto nº. 7, disminuye de nuevo en los últimos puntos de muestreo (nº. 9 => nº. 10).

 Tabla 18.2: Factor de Biodegradabilidad		
Ptos. Muestreo	Valores medios de DBO_5/DQO	Carácter de las aguas
1- E. Navalmedio	0,09	Muy poco biodegradable
2- Valle de la Fuenfría (Arroyo de la Venta)	0,11	Muy poco biodegradable
3- Cercedilla (Pueblo)	0,16	Muy poco biodegradable
4- Guadarrama (Pueblo)	0,05	Muy poco biodegradable
5-Puerto de la Cruz Verde- El Escorial	0,10	Muy poco biodegradable
.6- Galapagar-La Navata	0,09	Muy poco biodegradable
7- E. de Molino de la Hoz-Pte. Romano	0,14	Muy poco biodegradable
8- Móstoles (Urbanización Guadarrama)	0,12	Muy poco biodegradable
9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón)	0,13	Muy poco biodegradable
10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006)	0,09	Muy poco biodegradable
* $\text{DBO}/\text{DQO} < 0,2$ AGUAS CIRCULANTES MUY POCO BIODEGRADABLE * $\text{DBO}/\text{DQO} 0,2-0,6$ AGUAS CIRCULANTES BIODEGRADABLE * $\text{DBO}/\text{DQO} > 0,6$ AGUAS CIRCULANTES BIODEGRADABLE		

A la vista de las concentraciones de parámetros analizados, se concluye que:

- La calidad del agua en todos los puntos del río Guadarrama es mala, no puede ser utilizada como agua para consumo humano, supera el límite marcado por la legislación para la calidad del agua de consumo humano (R.D 140/2003) para el caso del Na^+ , Mg^+ , NO_3^- .
- En general, las concentraciones de los parámetros analizados son altas en la mayor parte de los puntos de muestreo indicando el elevado grado de contaminación de las aguas, incrementándose en los cinco últimos puntos de muestreo, esto puede ser debido a la existencia de vertidos urbanos e industriales preferentemente.
- En general, es muy poco biodegradable, con algunas diferencias coincidiendo con fuentes de contaminación o áreas poco antropizadas.

Figura 18: Variación entre los distintos parámetros analizados de la cuenca del río Guadarrama (2006-2007)



4.2.2 Relación entre los parámetros considerados

El agua es un ente dinámico y como tal está en continua evolución, lo cual contribuye a su complejidad geoquímica. Un valor aislado no tiene mucha significación ya que cualquier proceso puede afectar su composición. Es por ello la importancia de establecer correlaciones entre los distintos parámetros que condicionan su calidad, con el fin de poder evaluar el origen de la misma (Gómez, C., 1990).

Con éste criterio se ha realizado un análisis multivariante a partir del cuál se han obtenido las matrices de correlación donde aparecen las correlaciones entre los distintos parámetros para cada punto.

A nivel global de la cuenca de estudio, resulta arriesgado establecer correlaciones dada la complejidad de los factores que inciden en la misma, no obstante como aproximación al objetivo de estudio se ha elaborado una tabla de correlación (Tabla 19) con los valores medios de los parámetros analizados.

Aplicando estadística descriptiva de estas variables se han obtenido: media, desviación standard, mediana, mínimo y máximo. Se utilizó la correlación de Spearman debido a que no todas las variables se distribuían normalmente.

La teoría concerniente al coeficiente de correlación, establece que la correlación mide la relación lineal entre dos variables y su sentido (si es directo o inverso). Cuando la relación es perfectamente lineal dicho coeficiente vale 1 (ó -1).

Cuando el coeficiente tiene un valor próximo a cero, o bien no existe relación entre las variables analizadas o bien dicha relación no es lineal. Sin embargo, ello no significa que no haya correlación alguna, puesto que puede existir una alta correlación no lineal entre ellas.

Un coeficiente de correlación alto (cerca de 1 ó -1), no nos indica que exista necesariamente una dependencia directa entre las variables, que puede tratarse de variables independientes en la naturaleza, por tanto aunque exista una correlación significativa entre dos variables, no se debe confundir correlación con causalidad, la relación de causa debe ser determinada mediante el conocimiento del entorno natural de estudio y criterios geoquímicos.

A continuación analizamos las correlaciones de Spearman existentes entre los distintos parámetros:

El caudal se correlaciona positivamente con casi todas las variables; excepto con el oxígeno disuelto, magnesio, nitrito y amonio; esto puede ser debido a que a mayor lavado, es decir, a mayores caudales habría una mayor movilización de sustancias químicas, insistiendo numerosos autores sobre éste hecho. Algunos autores como

Lewis et al (1979), Lewis et al (1984) y Lacalle et al (1990) encuentran una relación potencial positiva entre el caudal y los nutrientes.

La temperatura y el pH, aunque son parámetros que mediatizan los procesos geoquímicos, muestran una correlación muy pobre con los restantes parámetros químicos, la temperatura tan sólo se correlaciona positivamente regular con el sodio, calcio y fósforo total. Se correlaciona negativamente regular con el oxígeno disuelto.

La conductividad es una expresión de la movilidad de los iones en una solución, contribuyendo todos ellos en diferente medida. Así se explica que tenga una correlación positiva muy buena con los iones sodio, potasio, cloruro, bicarbonato, calcio y compuestos del fósforo. Se correlaciona positivamente regular con el magnesio, nitrito, nitrógeno total y sulfato.

El oxígeno disuelto destaca por tener una muy baja correlación negativa con el resto de parámetros, como era de esperar, tan sólo tiene una correlación negativa regular con el nitrito y la temperatura.

El sodio se correlaciona positivamente muy bien con el caudal, conductividad, potasio, cloruro, calcio, fósforo total y sulfato. Se correlaciona positivamente regular con los iones fosfato, nitrato, magnesio, bicarbonato, y con la temperatura. En la naturaleza forman compuestos frecuentes principalmente con los iones bicarbonato, sulfatos y cloruros y se encuentran asociados.

El potasio se correlaciona positivamente muy bien con el caudal, la conductividad, sodio, calcio, cloruro, nitrato, fósforo total y sulfato. Se correlaciona positivamente regular con el bicarbonato, nitrógeno total y fosfato.

El ión cloruro se correlaciona positivamente muy bien con la conductividad, sodio, potasio, calcio y sulfato. Se correlaciona positivamente regular con el caudal, magnesio, nitrato y compuestos de fósforo.

El ión bicarbonato se correlaciona positivamente muy bien con la conductividad, calcio y fósforo total. Se correlaciona positivamente regular con el caudal, sodio, potasio, magnesio, nitrato, nitrógeno total y fosfato.

El ión calcio se correlaciona positivamente muy bien con la conductividad, sodio, potasio, cloruro, bicarbonato y compuestos de fósforo. Se correlaciona positivamente regular con el caudal, temperatura, magnesio, nitrato y sulfato.

El ión magnesio se correlaciona regular con la conductividad, sodio, cloruro, bicarbonatos y calcio.

El ión nitrito se correlaciona positivamente regular con los fosfatos. Se correlaciona negativamente regular con el oxígeno disuelto. Destaca la baja correlación de los nitritos con los demás parámetros.

El ión nitrato se correlaciona positivamente muy bien con el caudal, potasio y sulfato. Se correlaciona positivamente regular con la conductividad, sodio, cloruro, bicarbonatos, calcio, compuestos de fósforo y el nitrógeno total.

Destaca el ión amonio por tener ninguna correlación muy pobre con los restantes parámetros químicos.

El nitrógeno total se correlaciona positivamente regular con el caudal, conductividad, potasio, bicarbonato, nitrato y fósforo total.

El ión fosfato se correlaciona positivamente muy bien con la conductividad, calcio y fósforo total. Se correlaciona positivamente regular con el caudal, sodio, potasio, cloruro, bicarbonato, nitrito, nitrato y sulfato.

El fósforo total se correlaciona positivamente muy bien con la conductividad, sodio, potasio, bicarbonato, calcio y fosfato. Se correlaciona positivamente regular con el caudal, temperatura, cloruro, nitrato, nitrógeno total y sulfato.

El ión sulfato se correlaciona positivamente muy bien con el caudal, sodio, potasio, cloruro y nitrato. Se correlaciona positivamente regular con la conductividad, calcio, compuestos de fósforo.

Las denominaciones positiva o muy positiva son para valores de coeficiente de correlación mayor de 0,9; el término regular indica valores de coeficiente de correlación entre 0,9 y 0,8.

Puesto que la correlación existente entre el caudal y las diversas especies químicas de nitrógeno y fósforo es baja, se postpone la realización de un análisis más riguroso, tal como se estudiará en el siguiente apartado 4.3.1.

 **Tabla 19: Correlación de Spearman entre los parámetros considerados**

	Q	T	pH	Condu.	O ₂ dis	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Nt	PO ₄ ⁻	Pt	SO ₄ ²⁻	
Q	1																		
T	0,684848	1																	
pH	-0,309091	-0,696970	1																
Condu.	0,915152	0,781818	-0,539394	1															
O₂dis	-0,660606	-0,878788	0,696970	-0,709091	1														
Na⁺	0,903030	0,818182	-0,515152	0,951515	-0,696970	1													
K⁺	0,975758	0,745455	-0,418182	0,963636	-0,660606	0,963636	1												
Cl⁻	0,866667	0,745455	-0,503030	0,915152	-0,660606	0,963636	0,927273	1											
HCO₃⁻	0,842424	0,733333	-0,442424	0,927273	-0,745455	0,806061	0,854545	0,793939	1										
Ca²⁺	0,866667	0,818182	-0,575758	0,987879	-0,757576	0,939394	0,927273	0,903030	0,939394	1									
Mg²⁺	0,684848	0,696970	-0,551515	0,842424	-0,636364	0,806061	0,757576	0,890909	0,842424	0,866667	1								
NO₂⁻	0,721212	0,757576	-0,660606	0,733333	-0,818182	0,696970	0,696970	0,684848	0,709091	0,709091	0,648485	1							
NO₃⁻	0,975758	0,648485	-0,236364	0,890909	-0,612121	0,854545	0,951515	0,842424	0,866667	0,842424	0,696970	0,672727	1						
NH₄⁺	0,600000	0,769697	-0,381818	0,636364	-0,793939	0,612121	0,600000	0,600000	0,745455	0,672727	0,600000	0,709091	0,660606	1					
Nt	0,806061	0,745455	-0,406061	0,806061	-0,660606	0,721212	0,806061	0,733333	0,866667	0,781818	0,745455	0,721212	0,878788	0,757576	1				
PO₄⁻	0,890909	0,672727	-0,406061	0,927273	-0,684848	0,866667	0,890909	0,830303	0,890909	0,903030	0,745455	0,806061	0,866667	0,709091	0,733333	1			
Pt	0,890909	0,830303	-0,563636	0,975758	-0,733333	0,915152	0,939394	0,842424	0,915152	0,963636	0,757576	0,745455	0,878788	0,696970	0,842424	0,903030	1		
SO₄²⁻	0,951515	0,696970	-0,381818	0,890909	-0,636364	0,939394	0,951515	0,939394	0,757576	0,842424	0,757576	0,757576	0,903030	0,551515	0,733333	0,866667	0,830303	1	

4.2.3 Evolución de los parámetros considerados

La red de muestreo se distribuye a lo largo de la cuenca del río Guadarrama, en un total de 10 puntos, aunque los puntos muestreados en cada periodo dependen del caudal del río. En conjunto se tienen datos del periodo Febrero 2006 - Enero 2007; exceptuando en los meses de agosto, septiembre y octubre del 2006 en el punto nº 4. Guadarrama (pueblo); lo que permite analizar la evolución espacial y temporal de los parámetros físico-químicos en las aguas superficiales del río Guadarrama.

A continuación se establece la evolución anual de los parámetros físico – químicos en todos los puntos de muestreo de la cuenca de estudio.

4.2.3.1 Punto Nº. 1- E. Navalmedio.

El caudal presenta una evolución regular. Se observa que la máxima descarga se produce en febrero, presenta caudales máximos en primavera coincidiendo con el deshielo, mínimos en época de estiaje y aumenta de nuevo con las lluvias otoñales.

La conductividad permanece estable prácticamente todo el año salvo en el periodo otoñal donde la conductividad disminuye por efecto de dilución de las lluvias, alcanza el valor mínimo en noviembre coincidiendo con un aumento de caudal.

El pH varía entre 6,15 y 8,30, aumenta en verano y disminuye en primavera y otoño. La acidificación del agua puede ser debida a la pérdida de las acículas de los pinos existentes en el punto de estudio.

El oxígeno disuelto presenta valores altos, alcanza valores máximos en los meses de febrero y marzo, disminuye a medida que vamos hacia la época de estiaje presentando un valor mínimo en octubre coincidiendo con la disminución de los caudales y pudiendo coincidir con algún tipo de vertidos en la zona.

Las concentraciones más altas de los nitritos y nitratos coinciden con los meses estivales, donde se produce más contaminación por concentración. Sin embargo, las concentraciones más altas de amonio y nitrógeno total se producen en marzo coincidiendo con el lavado del suelo.

Los ortofosfatos (PO_4^{3-}) y el fósforo total presentan valores máximos en primavera coincidiendo con el lavado de las copas de los árboles o del terreno con el incremento de la precipitación, con un valor máximo en abril, teniendo valores estables el resto del año.

La temperatura presenta una gran homogeneidad con las distintas estaciones, alcanzando el valor máximo en agosto y mínimo en febrero.

En general, los parámetros presentan valores alternantes, no sujetos a régimen estacional, propios de cuencas próximas a núcleos urbanos.

Figura 19.1: Evolución de los parámetros en el punto n° 1 - E. Navalmedio

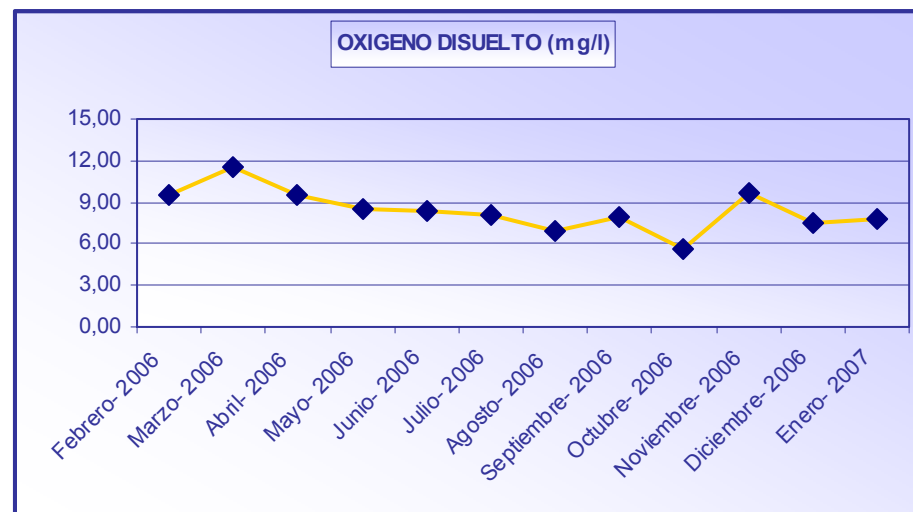
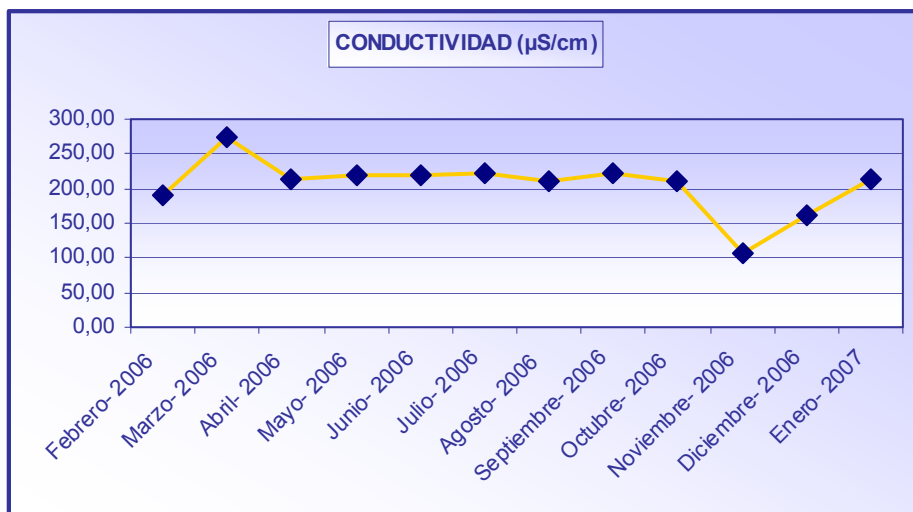
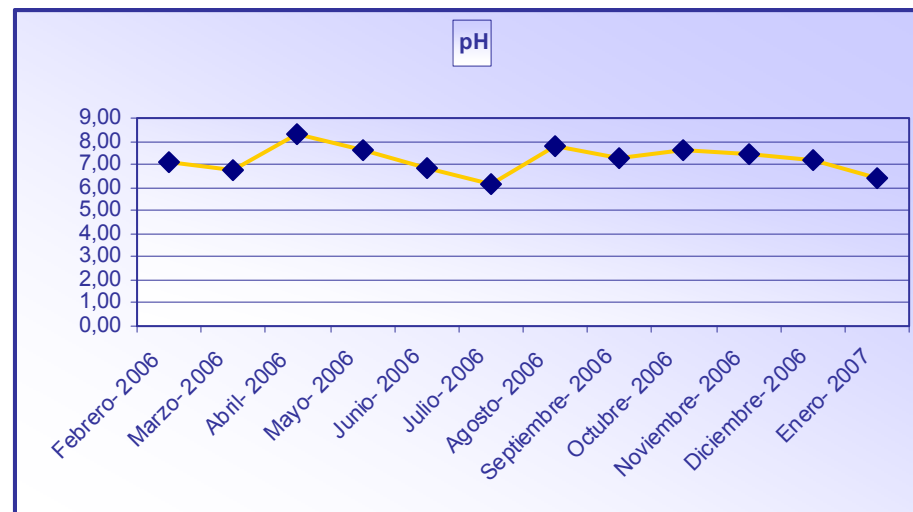
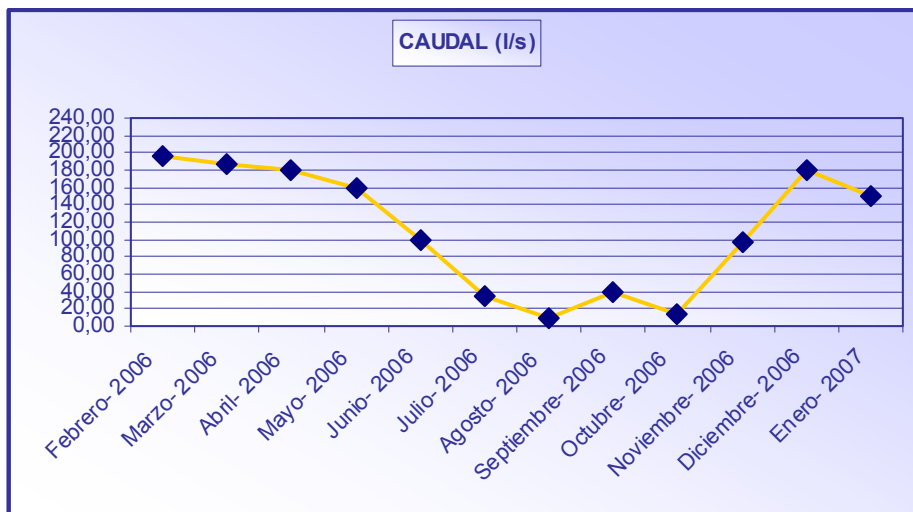


Figura 19.2: Evolución de los parámetros en el punto n° 1 - E. Navalmedio

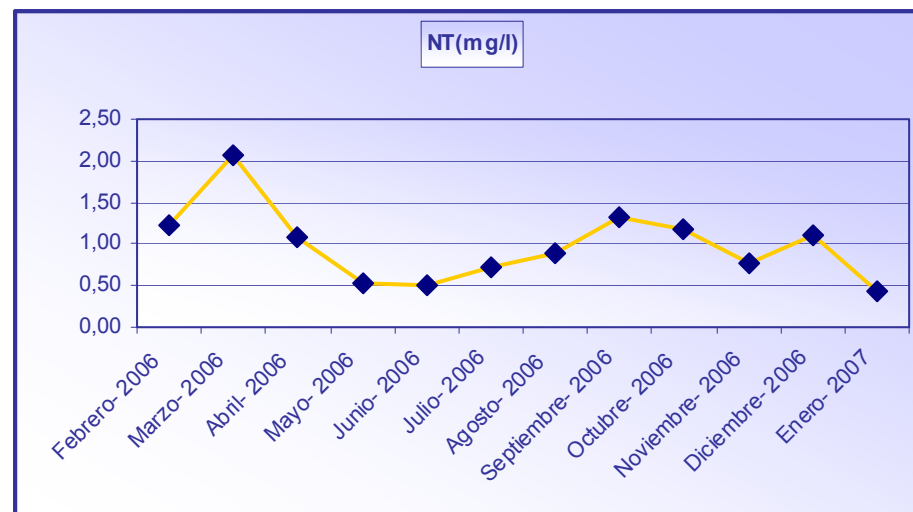
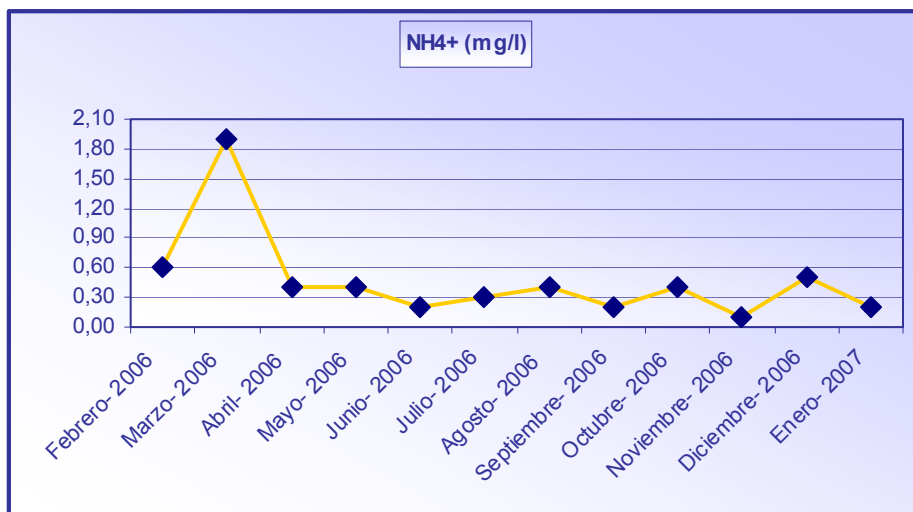
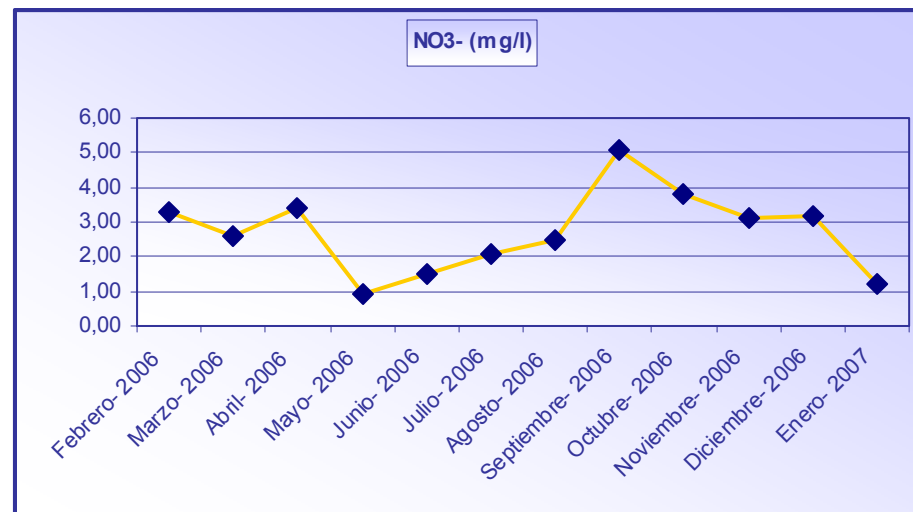
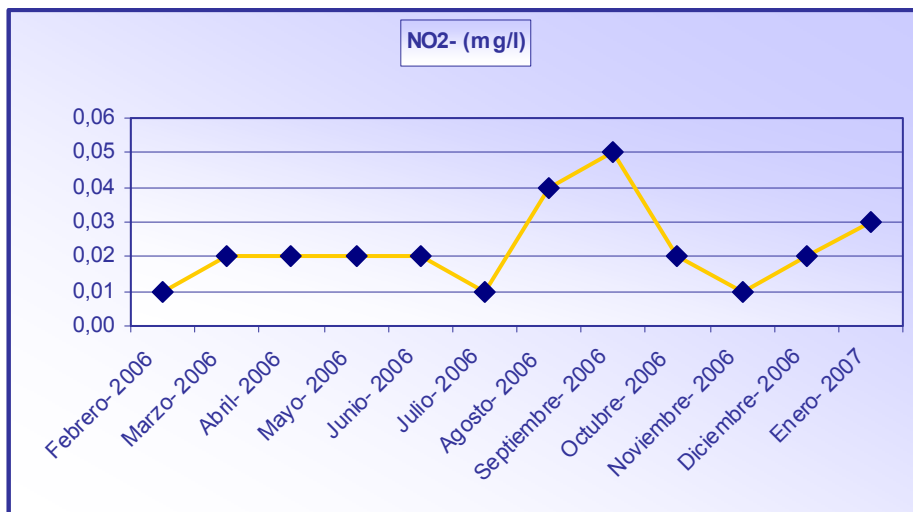
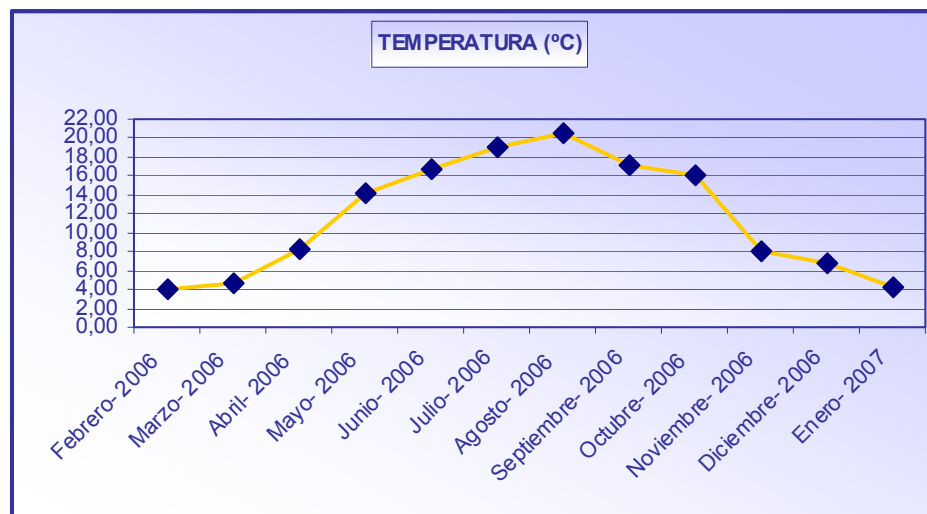
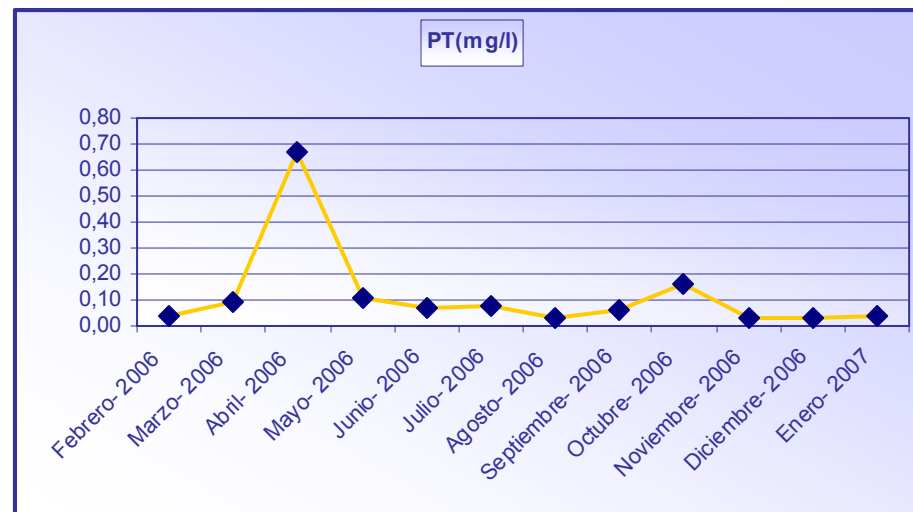
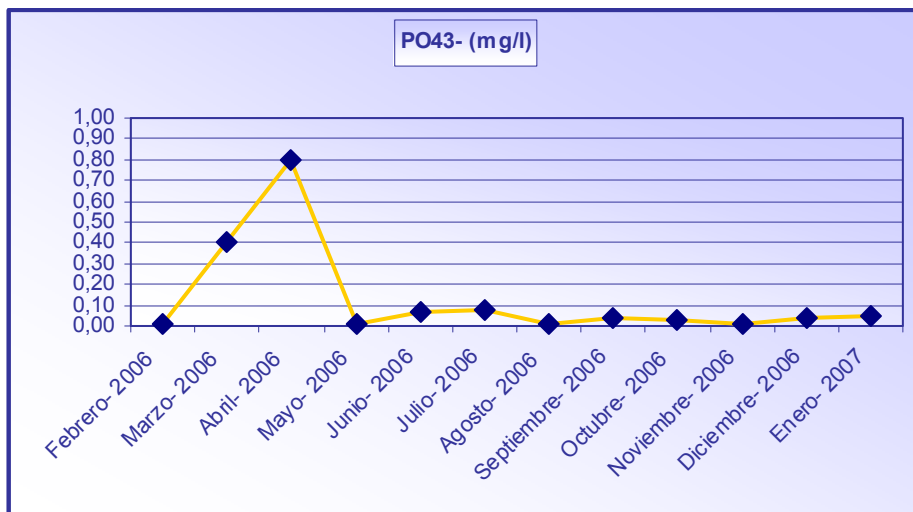


Figura 19.3: Evolución de los parámetros en el punto nº 1 - E. Navalmedio



4.2.3.2 - Punto N°. 2- Arroyo de la Venta (V.Fuenfría-Cercedilla)

La máxima descarga que presenta éste arroyo se produce en mayo, presentando caudales máximos en primavera coincidiendo con el deshielo, mínimos en época de estiaje y aumentando de nuevo con las lluvias otoñales.

La conductividad varía regularmente todo el año salvo en el periodo otoñal donde la conductividad disminuye por efecto de dilución de las lluvias, alcanzando el valor mínimo en noviembre coincidiendo con un aumento de caudal. Presenta valores máximos a partir de mayo hacia la época estival, esta evolución es lógica si se considera que el agua superficial llega a los puntos más bajos en las épocas de máximo caudal, lo que supone un agua con menor salinidad.

El pH varía entre 7,1 y 8,5, permanece estable prácticamente todo el año presentando pequeñas oscilaciones, disminuye en primavera y otoño. La acidificación del agua puede ser debida a la pérdida de las acículas de los pinos existentes en el punto de estudio.

El oxígeno disuelto presenta valores medios - altos, alcanza valores máximos en los meses de febrero y marzo, disminuye a medida que vamos hacia la época de estiaje presentando un valor mínimo en septiembre coincidiendo con la disminución de los caudales y pudiendo responder a una baja contaminación orgánica en la zona.

La evolución de las concentraciones de los nitritos, nitratos y nitrógeno total es bastante irregular. Los nitritos y nitratos alcanzan máximos valores en agosto y septiembre respectivamente, pudiendo relacionarse con procesos de contaminación ganadera en la zona. Las concentraciones más altas de nitrógeno total se producen en febrero coincidiendo con el deshielo. Los valores de amonio son bajos y homogéneos, excepto para el mes de febrero donde se alcanza una concentración máxima debido al mayor lavado.

Los valores de ortofosfato (PO_4^{3-}) son bajos y homogéneos, excepto para el mes de marzo donde se alcanza una concentración máxima producida por una máxima descarga durante este mes. El fósforo total presenta valores máximos en primavera coincidiendo con el deshielo, con un valor máximo en junio y disminuyendo sus concentraciones en el periodo estival.

La temperatura presenta una gran homogeneidad con las distintas estaciones, alcanzando el valor máximo en agosto y mínimo en febrero.

Figura 20.1: Evolución de los parámetros en el punto nº 2 - Arroyo de la Venta (V.Fuenfría-Cercedilla)

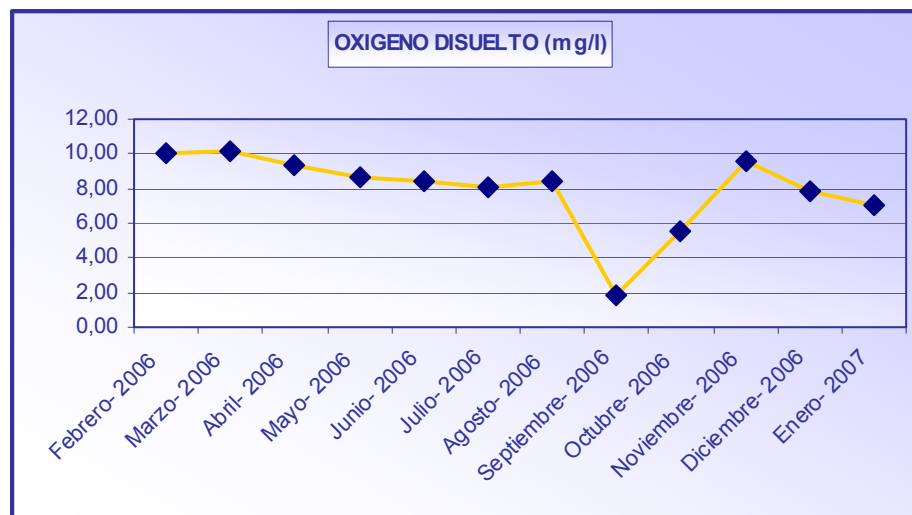
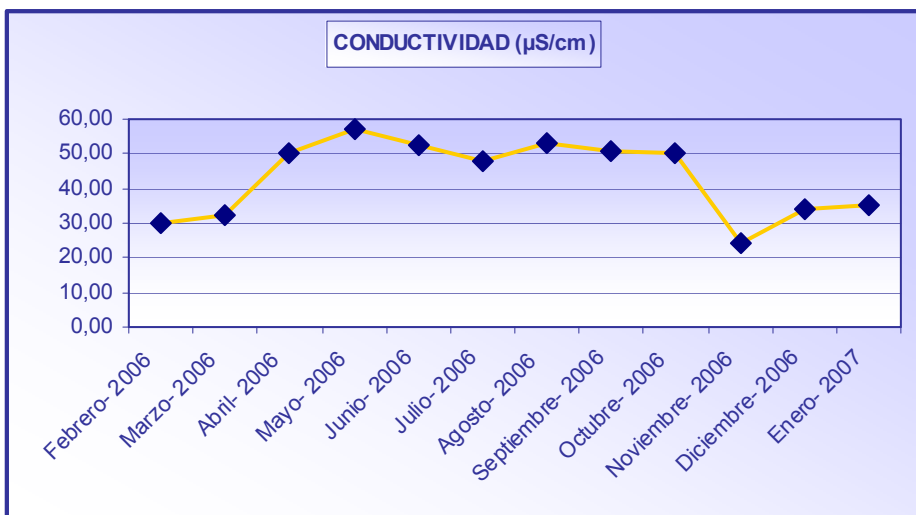
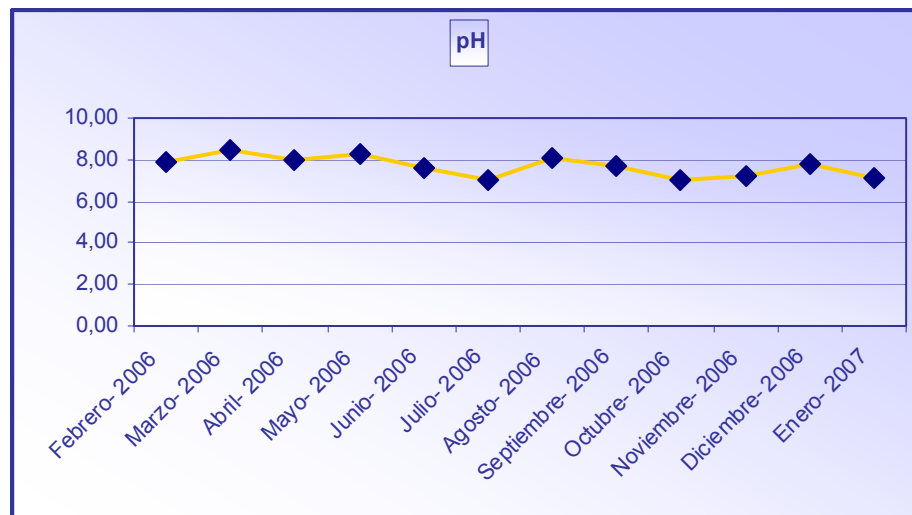
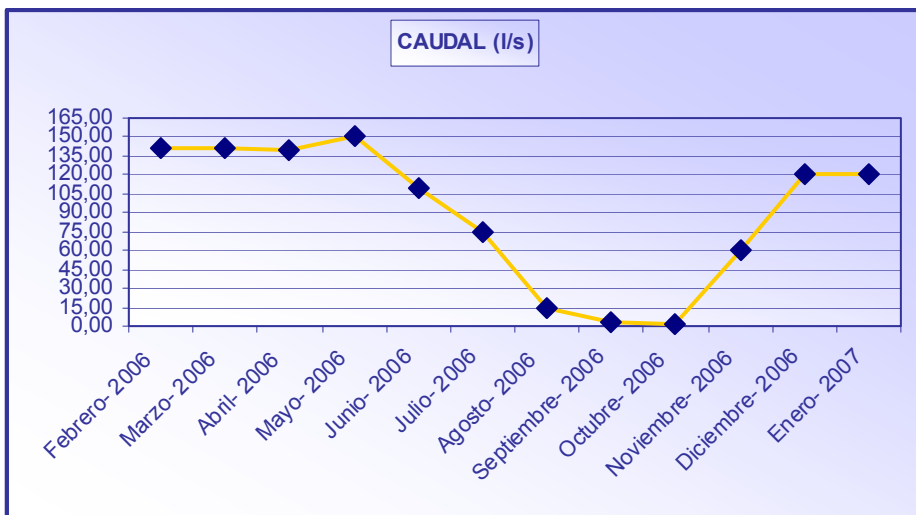


Figura 20.2: Evolución de los parámetros en el punto nº 2 - Arroyo de la Venta (V.Fuenfría-Cercedilla)

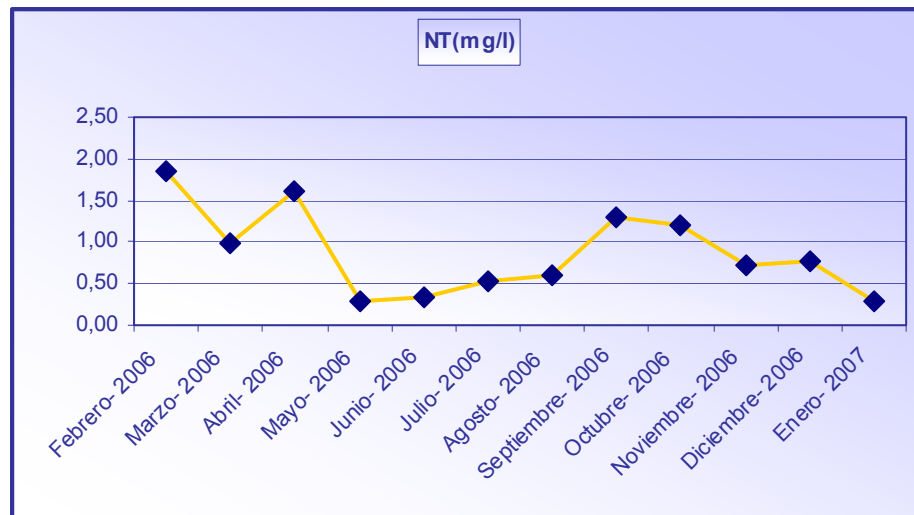
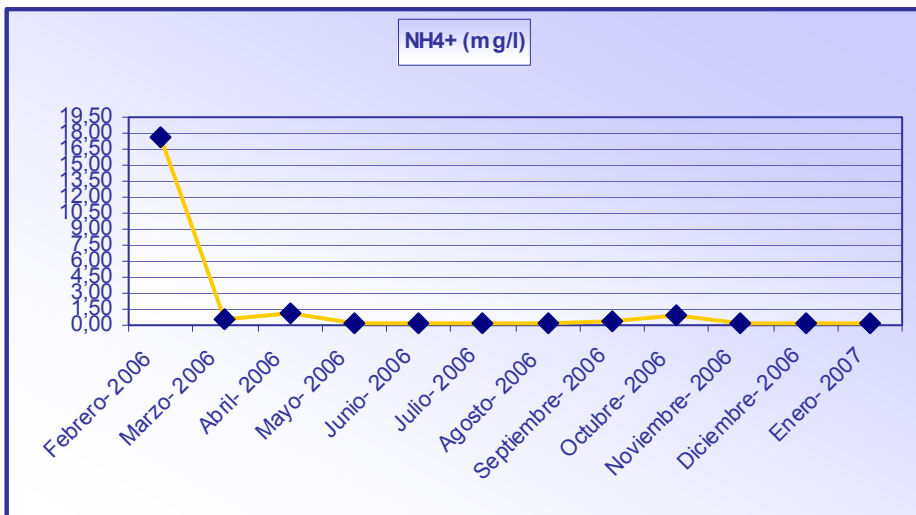
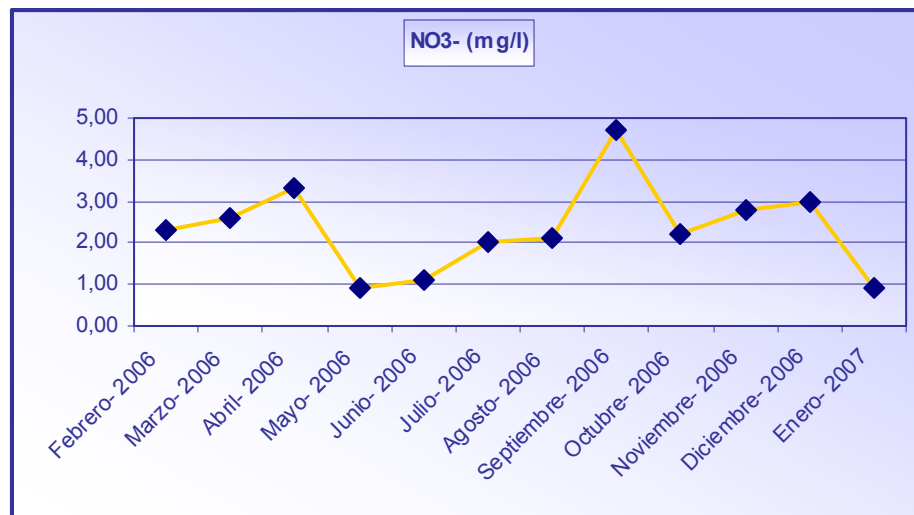
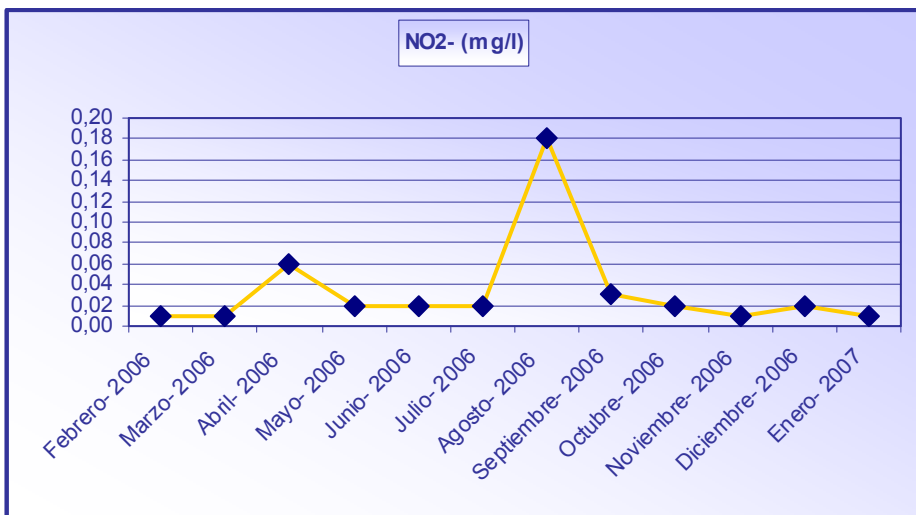
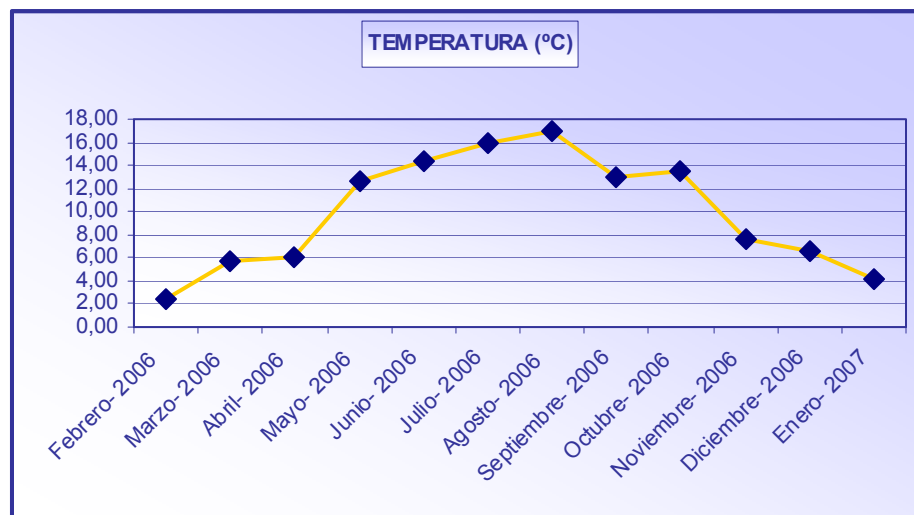
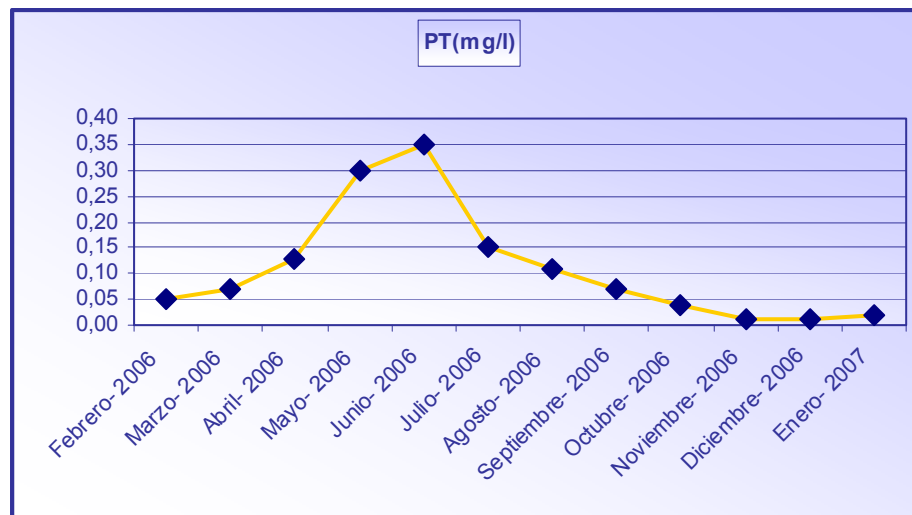
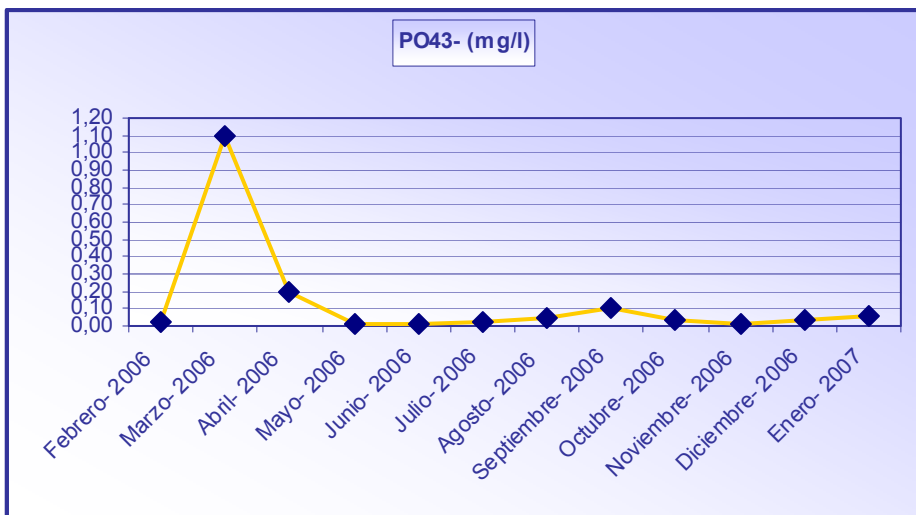


Figura 20.3: Evolución de los parámetros en el punto nº 2 - Arroyo de la Venta (V.Fuenfría-Cercedilla)



4.2.3.3 - Punto N°. 3- Cercedilla (Pueblo)

El caudal presenta caudales máximos en primavera coincidiendo con el deshielo, mínimos en época de estiaje y aumentando de nuevo con las lluvias otoñales. La máxima descarga se produce en febrero.

La conductividad evoluciona irregularmente, presenta valores máximos hacia la época estival, concentrándose el mayor contenido salino en agosto. En el periodo otoñal la conductividad disminuye por efecto de dilución de las lluvias, alcanzando el valor mínimo en noviembre coincidiendo con un aumento de caudal.

El pH varía entre 6,55 y 8,01, permanece estable prácticamente todo el año presentando pequeñas oscilaciones.

El oxígeno disuelto presenta valores altos, alcanza valores máximos en los meses de febrero y marzo, disminuye a medida que vamos hacia la época de estiaje presentando un valor mínimo en septiembre coincidiendo con la disminución de los caudales y pudiendo coincidir con la existencia de vertidos urbanos en la zona.

La evolución de las concentraciones de los nitritos, nitratos y nitrógeno total es bastante irregular. Los nitritos y nitratos alcanzan máximos valores en agosto y septiembre respectivamente, pudiendo coincidir con la existencia de vertidos urbanos en la zona. Las concentraciones más altas de nitrógeno total se producen en febrero coincidiendo con el deshielo. Los valores de amonio son bajos y homogéneos, excepto para el mes de febrero donde se alcanza una concentración máxima debido al mayor lavado.

Los valores de ortofosfato (PO_4^{3-}) son bajos y homogéneos, excepto para los meses de marzo y abril donde se alcanza una concentración máxima producida por una máxima descarga. El fósforo total presenta valores máximos en primavera coincidiendo con el deshielo, con un valor máximo en mayo y disminuyendo sus concentraciones en el periodo estival y otoñal.

La temperatura presenta una gran homogeneidad con las distintas estaciones, alcanzando el valor máximo en agosto y mínimo en febrero.

En general, los parámetros presentan valores alternantes, no sujetos a régimen estacional, propios de cuencas próximas a núcleos urbanos.

Figura 21.1: Evolución de los parámetros en el punto n° 3 - Cercedilla (pueblo)

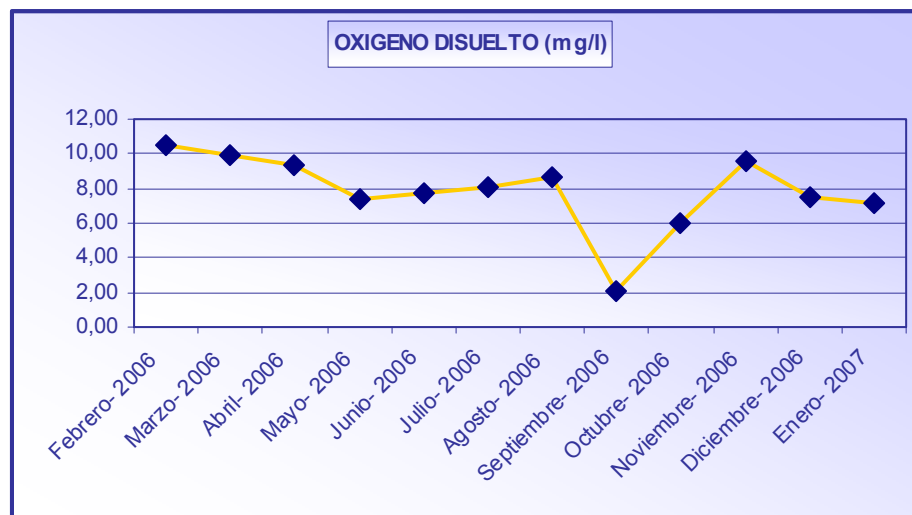
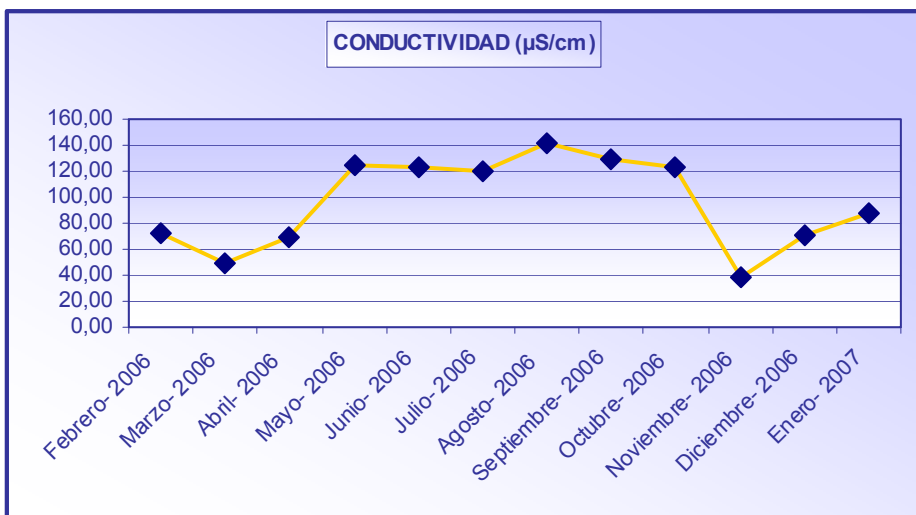
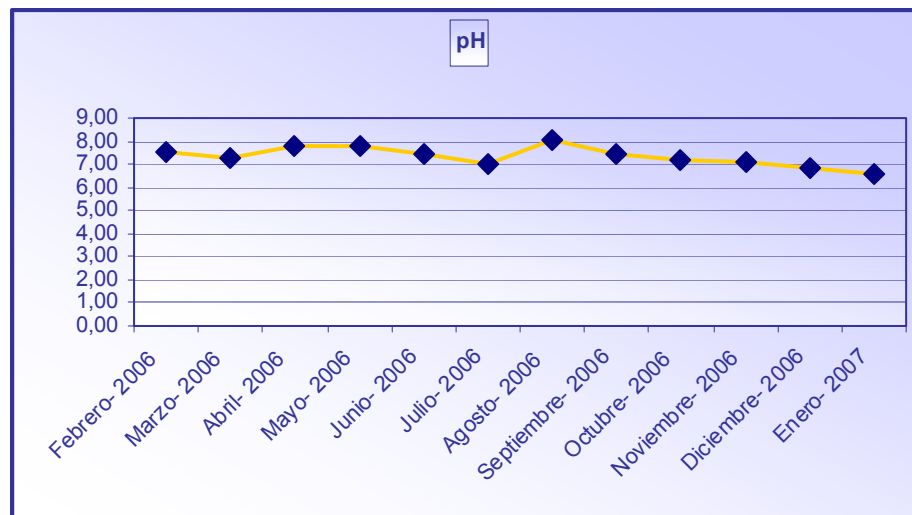
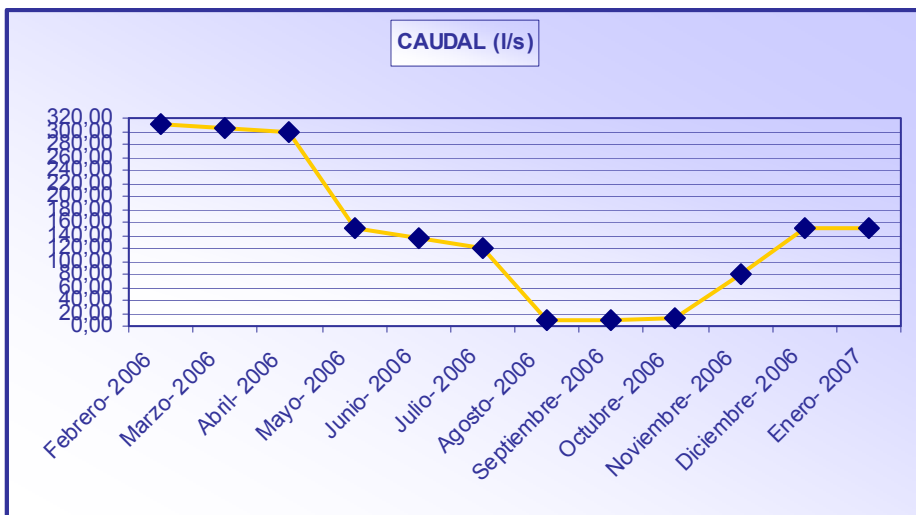


Figura 21.2: Evolución de los parámetros en el punto nº 3 - Cercedilla (pueblo)

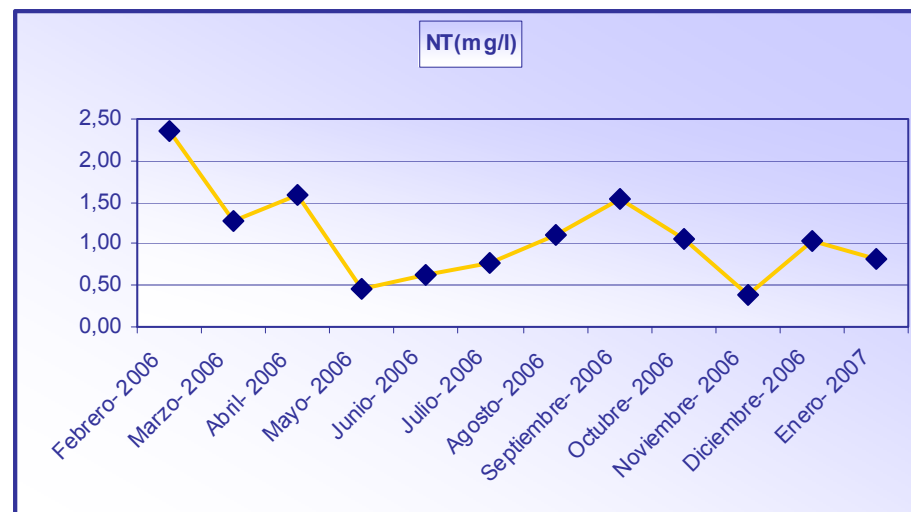
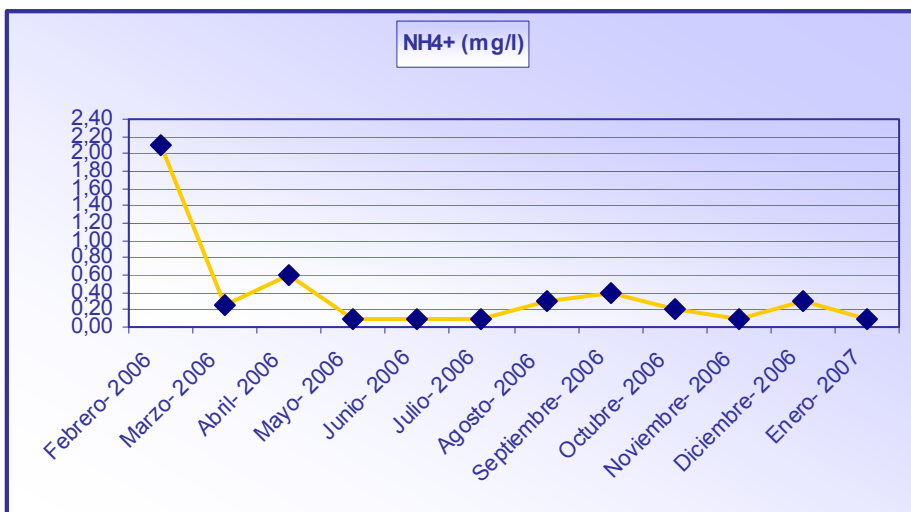
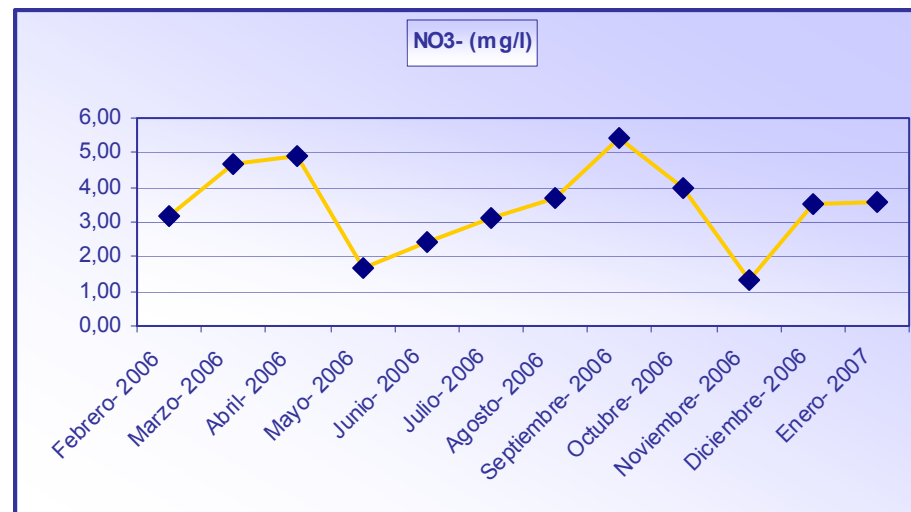
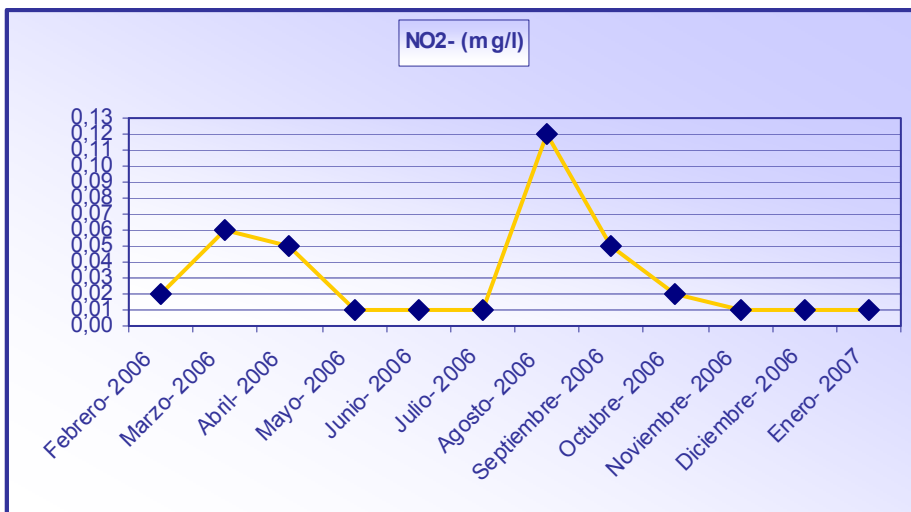
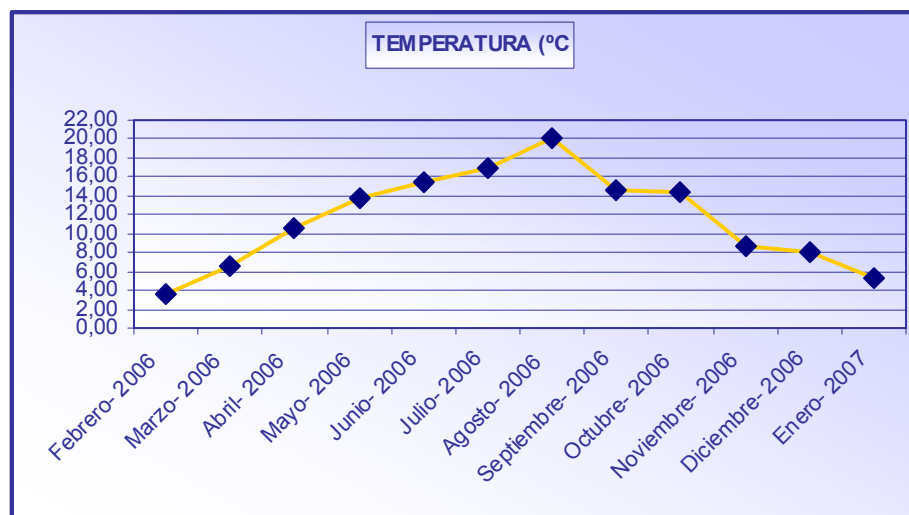
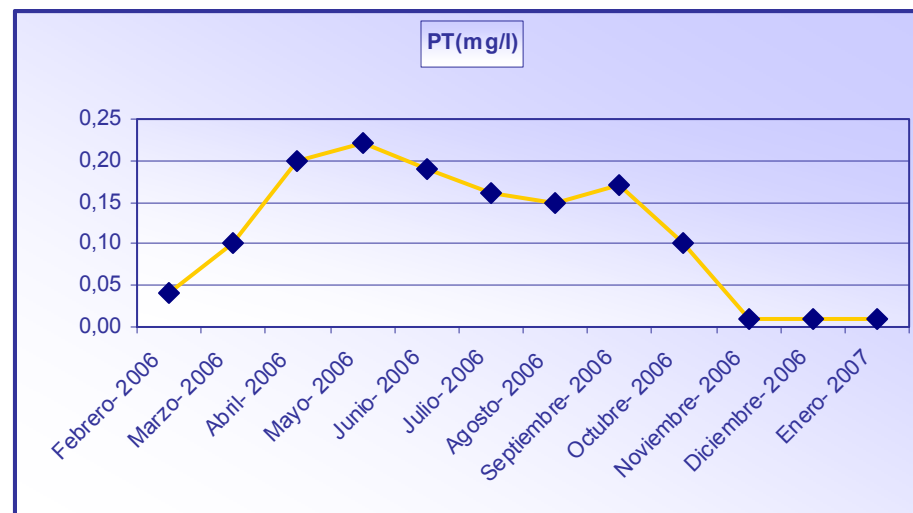
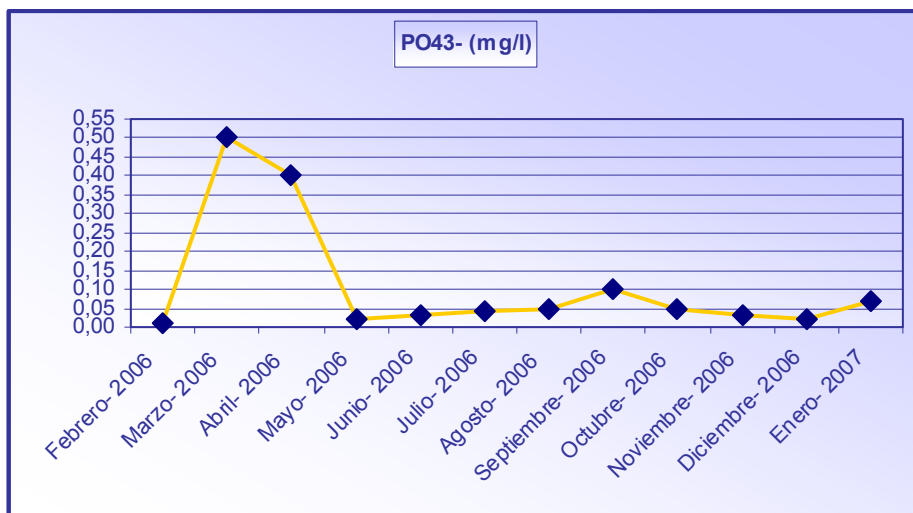


Figura 21.3: Evolución de los parámetros en el punto nº 3 - Cercedilla (pueblo)



4.2.3.4 - Punto N°. 4 - Guadarrama (Pueblo)

En este punto durante los meses de agosto, septiembre y octubre no se pudo muestrear debido a que el río estaba seco.

La máxima descarga se produce en abril, presenta caudales máximos en febrero y marzo coincidiendo con el deshielo, mínimos en época de estiaje y aumenta de nuevo a partir de noviembre con el comienzo invernal.

La conductividad disminuye en los meses de febrero, marzo y abril, por efecto de dilución de las lluvias, alcanzando el valor mínimo en noviembre coincidiendo con un aumento de caudal. Presenta valores máximos a partir de mayo, alcanzando el valor máximo en julio coincidiendo con las mínimas descargas.

El pH varía entre 6,29 y 8,06, permanece estable prácticamente todo el año presentando pequeñas oscilaciones.

Los valores de oxígeno disuelto son altos en general, llegando a alcanza valores máximos en los meses de febrero, marzo y abril, disminuye a medida que vamos hacia la época de estiaje coincidiendo con la disminución de los caudales y pudiendo coincidir con algún tipo de vertidos urbanos en la zona.

La evolución de las concentraciones de los nitritos, nitratos, nitrógeno total y amonio es irregular. Los nitritos y nitratos alcanzan máximos valores en febrero y abril respectivamente, pudiendo coincidir con la existencia de vertidos urbanos en la zona. Las concentraciones más altas de nitrógeno total se producen en febrero, marzo y abril coincidiendo con el deshielo. Los valores de amonio son bajos, destaca el mes de febrero donde se alcanza una concentración máxima debido al mayor lavado.

Los valores de ortofosfato (PO_4^{3-}) son bajos, excepto para el mes de abril donde se alcanza una concentración máxima producida por la máxima descarga durante este mes. El fósforo total presenta valores máximos en primavera coincidiendo con el deshielo, con un valor máximo en mayo y disminuyendo sus concentraciones en el periodo estival.

La temperatura presenta una gran homogeneidad con las distintas estaciones, alcanzando el valor máximo en julio y mínimo en febrero.

En general, los parámetros presentan valores alternantes, no sujetos a régimen estacional, propios de cuencas próximas a núcleos urbanos.

Figura 22.1: Evolución de los parámetros en el punto nº 4 - Guadarrama (pueblo)

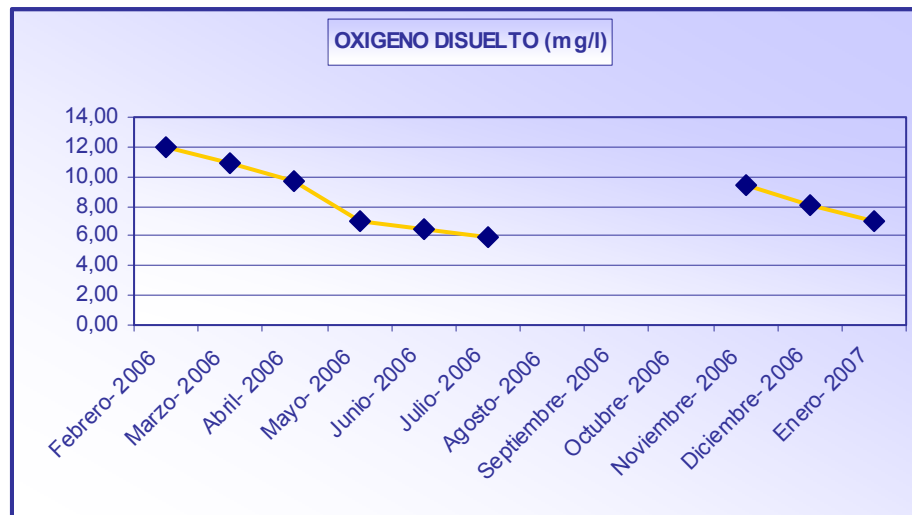
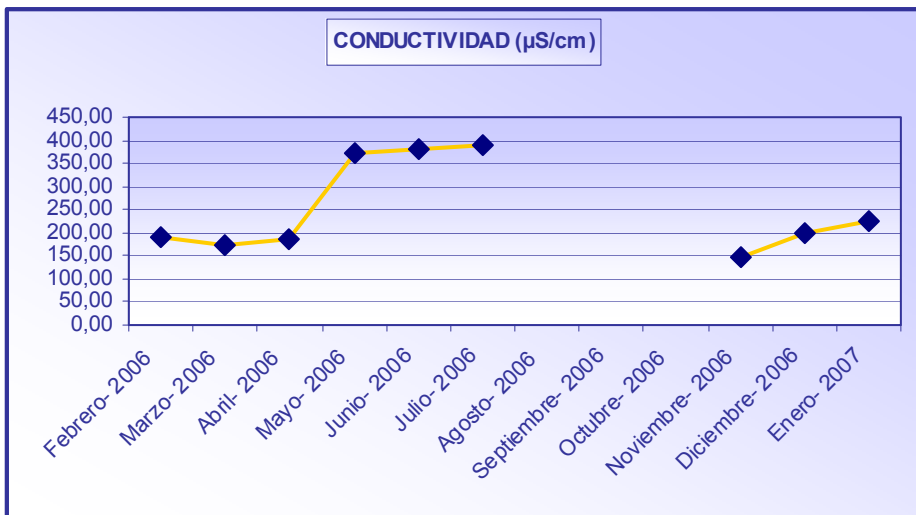
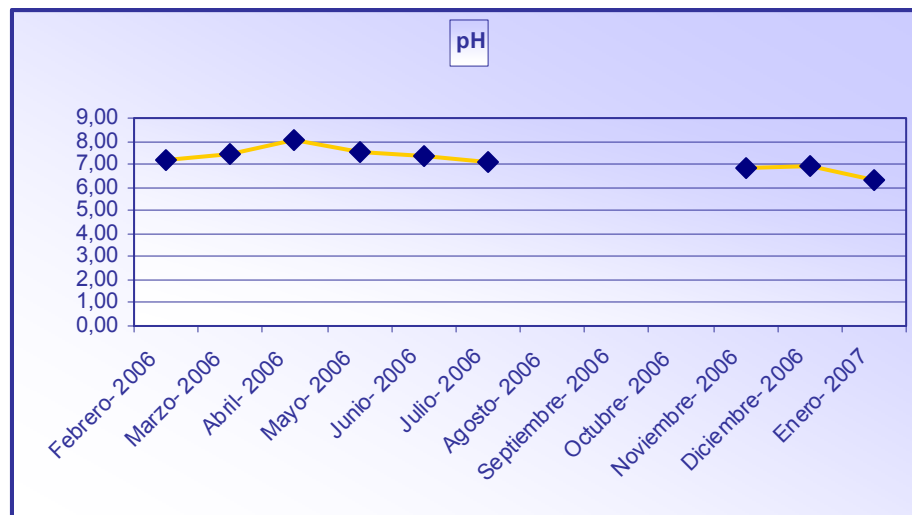
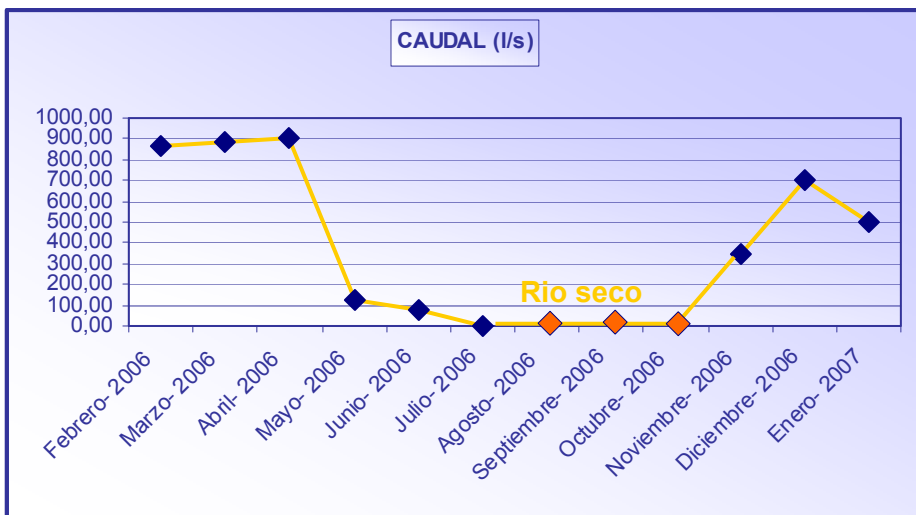


Figura 22.2: Evolución de los parámetros en el punto nº 3 - Cercedilla (pueblo)

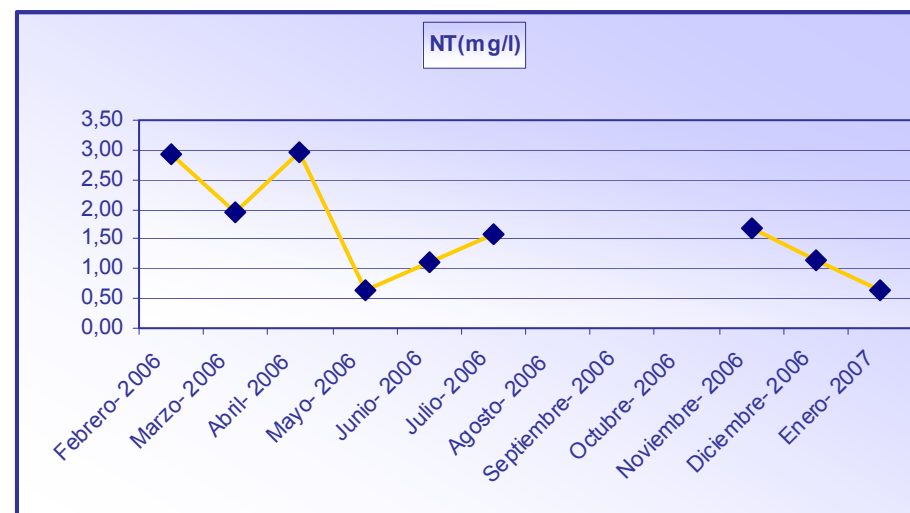
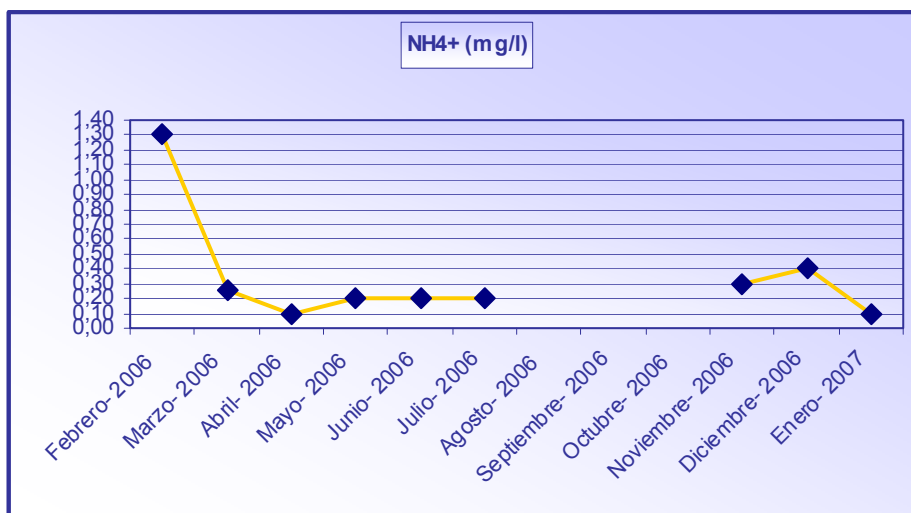
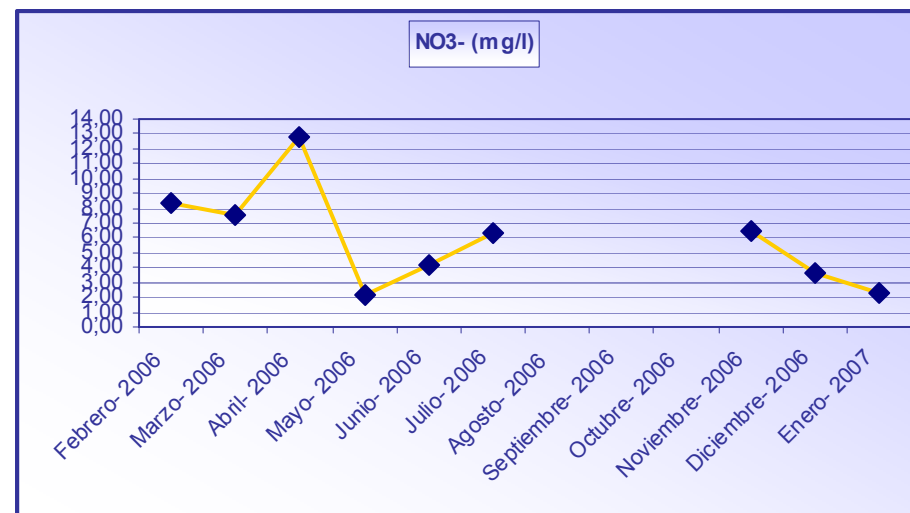
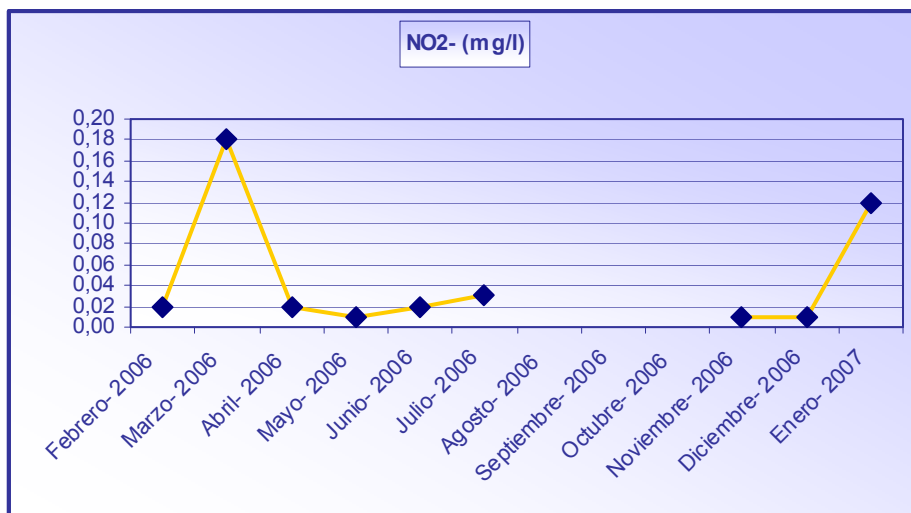
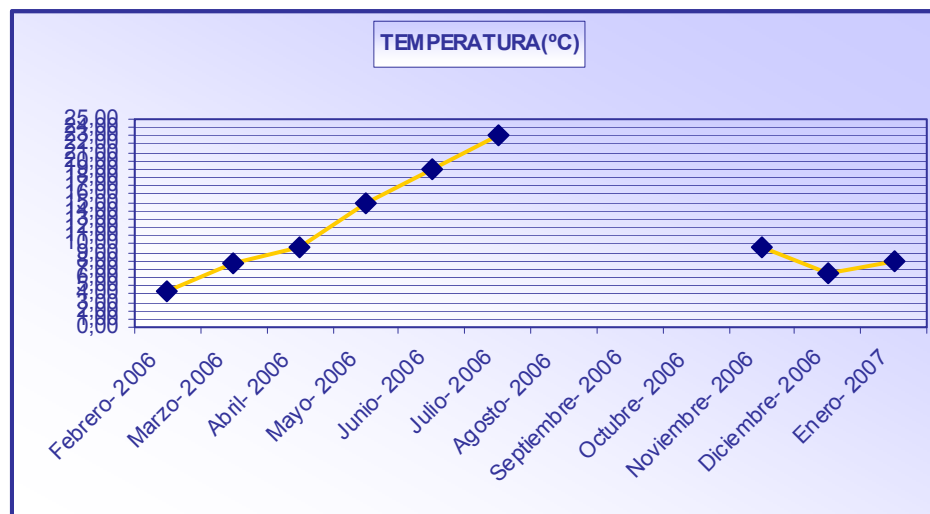
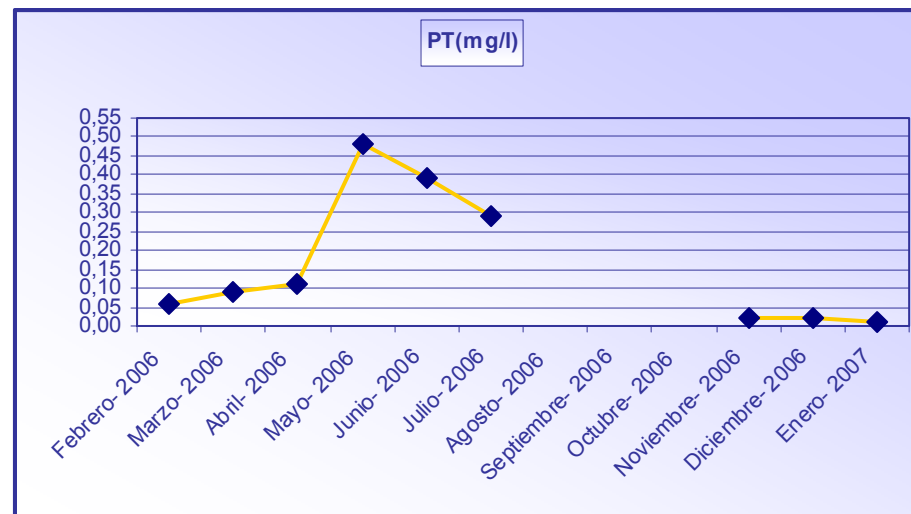
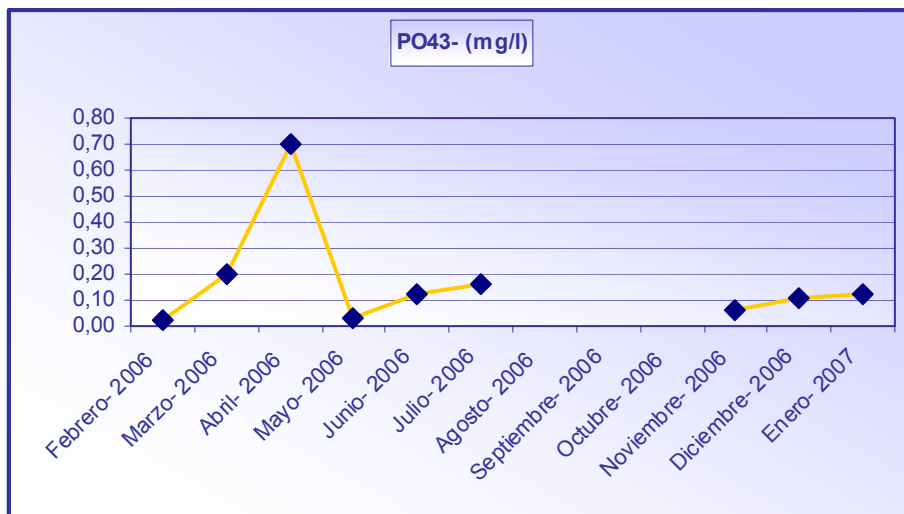


Figura 22.3: Evolución de los parámetros en el punto nº 3 - Cercedilla (pueblo)



4.2.3.5 - Punto N°. 5 - Puerto de la Cruz Verde (El Escorial)

El caudal presenta valores bajos debido a que se toma la muestra de agua en un arroyo de montaña (Arroyo del Batán), presenta caudales máximos en febrero, marzo y abril coincidiendo con el deshielo, mínimos en época de estiaje y aumentando de nuevo con las lluvias otoñales. La máxima descarga se produce en diciembre.

La conductividad permanece estable prácticamente todo el año salvo en el periodo otoñal donde la conductividad disminuye por efecto de dilución de las lluvias, alcanzando el valor mínimo en noviembre coincidiendo con un aumento de caudal.

El pH varía entre 6,3 y 8, permanece estable prácticamente todo el año presentando pequeñas oscilaciones, presenta el valor máximo en abril.

El oxígeno disuelto presenta valores medio-altos, alcanza valores máximos en los meses de febrero y marzo, disminuye a medida que vamos hacia la época de estiaje presentando un valor mínimo en septiembre coincidiendo con la disminución de los caudales y pudiendo responder a un uso ganadero en la zona.

Los valores de nitrito son bajos y homogéneos, excepto para el mes de octubre. Los nitratos alcanzan máximos valores en octubre y abril respectivamente, pudiendo relacionarse con procesos de contaminación ganadera en la zona. Las concentraciones más altas de nitrógeno total se producen en febrero coincidiendo con el deshielo. Los valores de amonio son bajos y homogéneos, excepto para el mes de febrero donde se alcanza una concentración máxima debido al mayor lavado.

La evolución de las concentraciones de los ortofosfatos (PO_4^{3-}), fósforo total es bastante irregular, alcanzan máximos valores en septiembre, pudiendo responder a un origen urbano.

La temperatura presenta una gran homogeneidad con las distintas estaciones, alcanzando el valor máximo en julio y mínimo en febrero.

Figura 23.1: Evolución de los parámetros en el punto n° 5 – Puerto de la Cruz Verde (El Escorial)

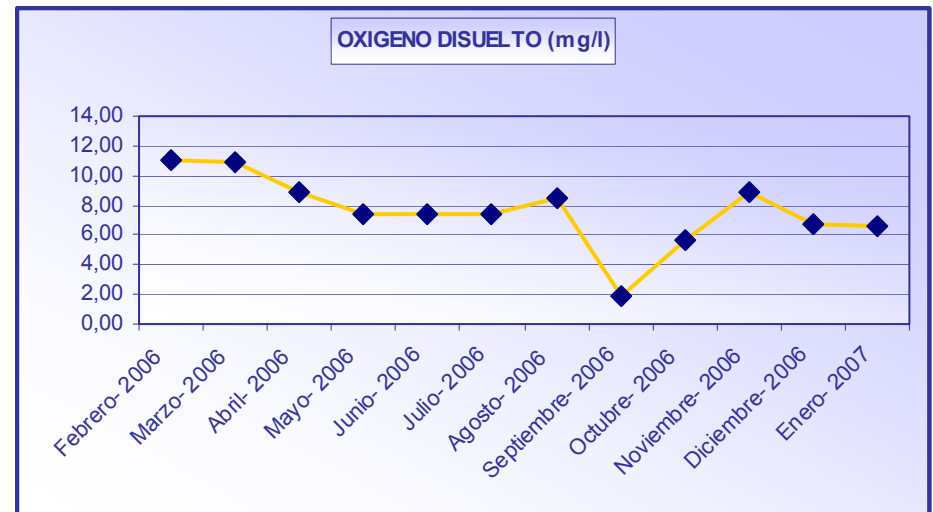
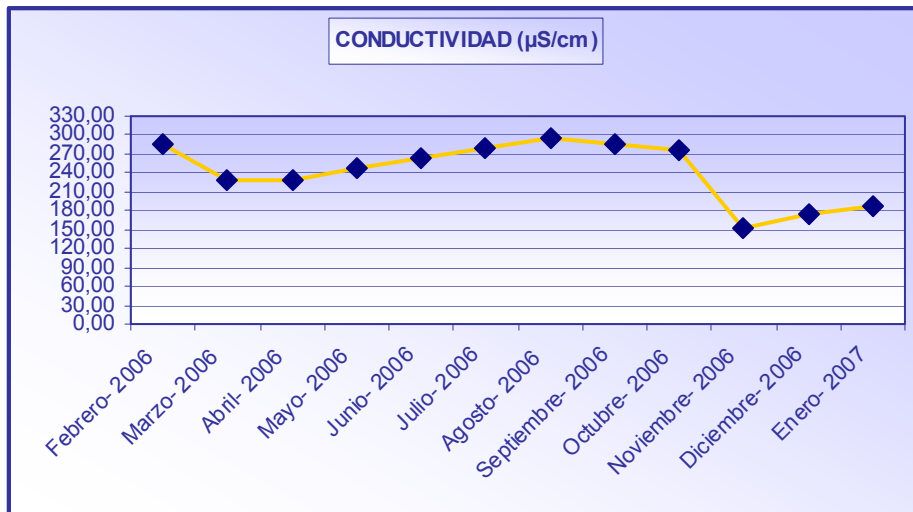
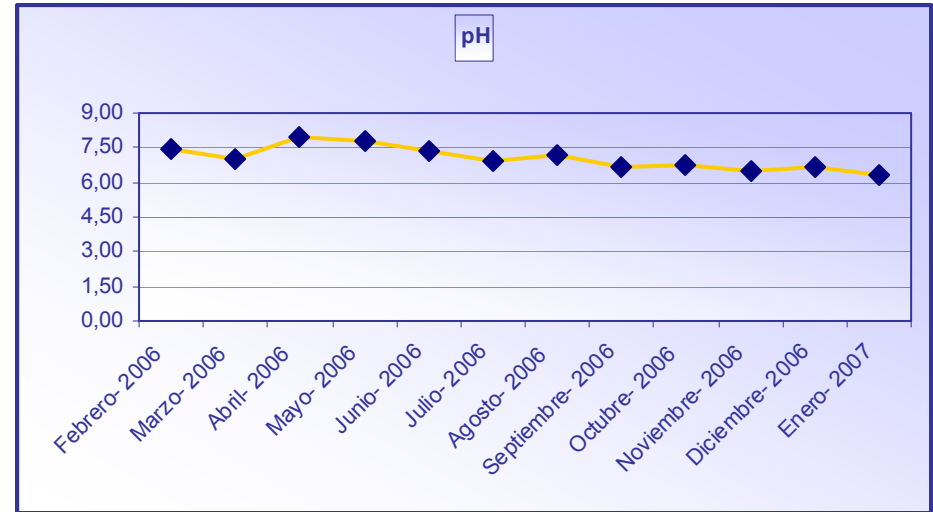
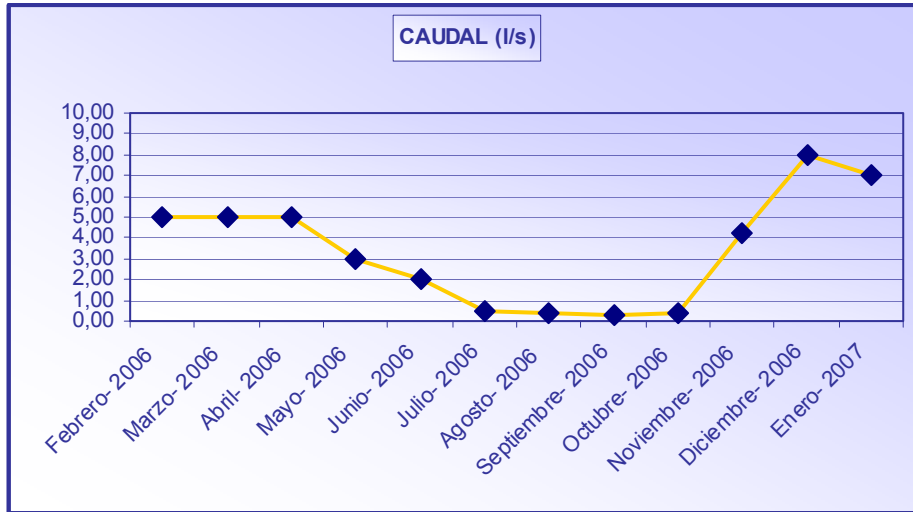


Figura 23.2: Evolución de los parámetros en el punto n° 5 – Puerto de la Cruz Verde (El Escorial)

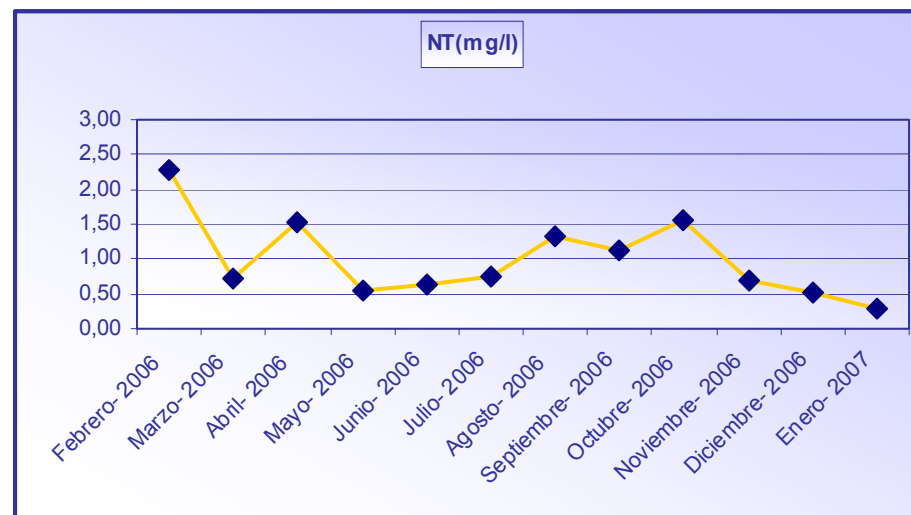
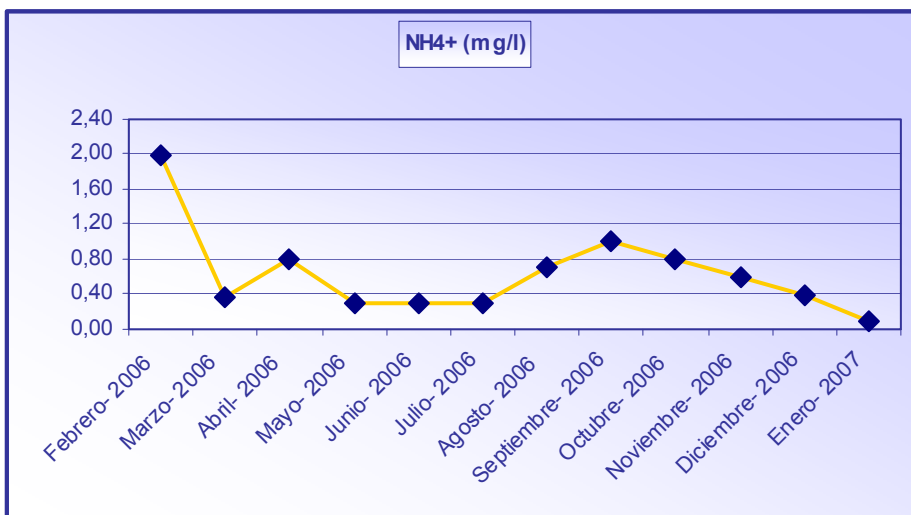
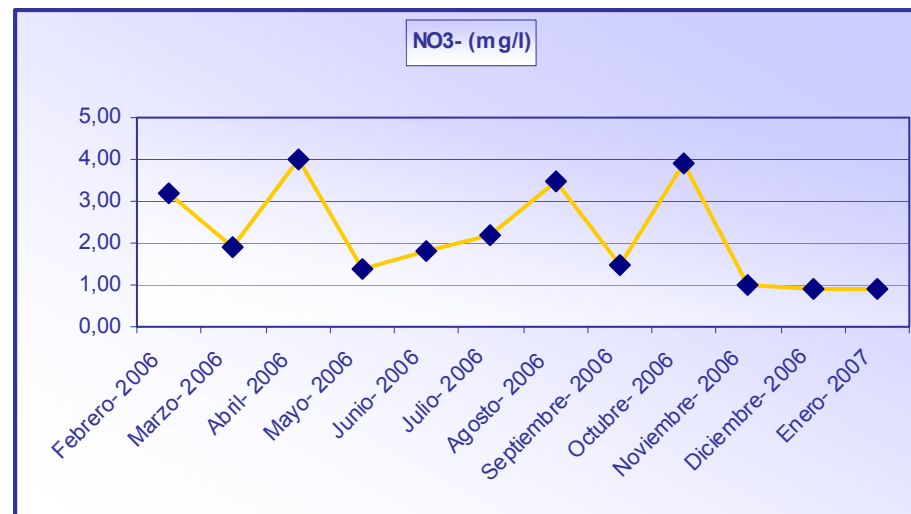
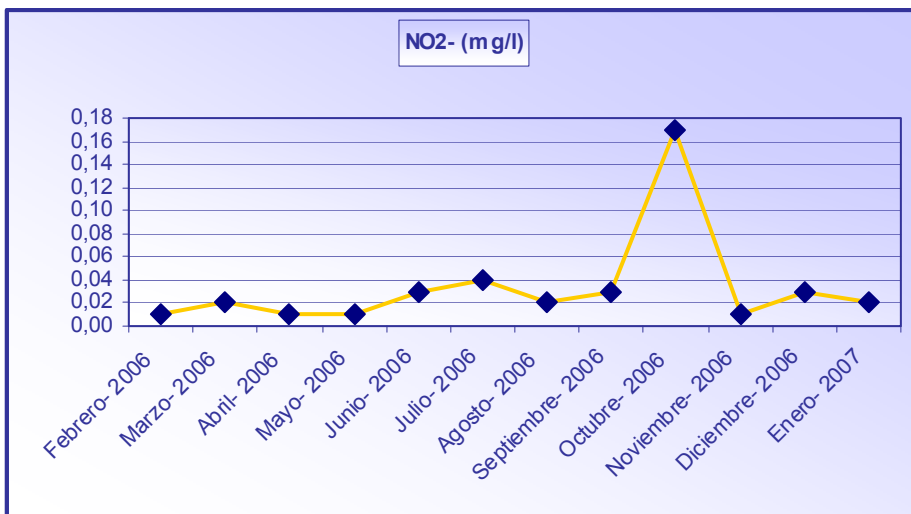
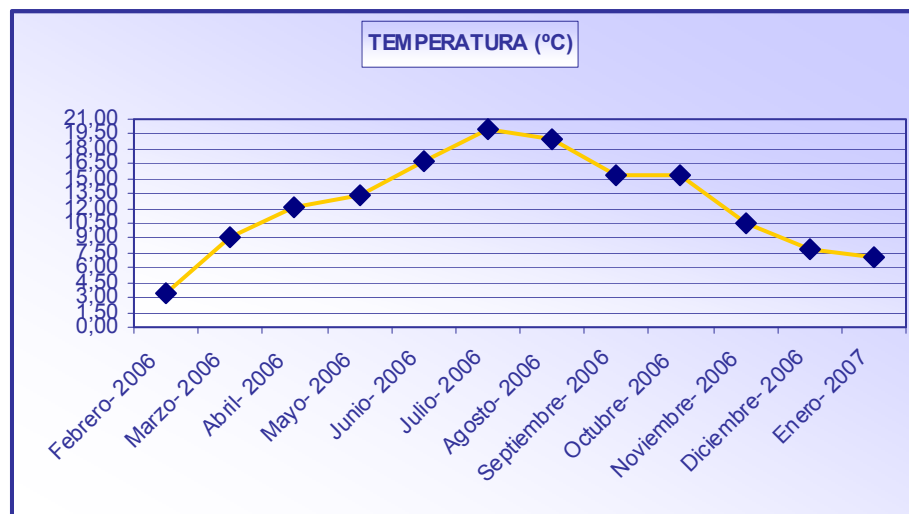
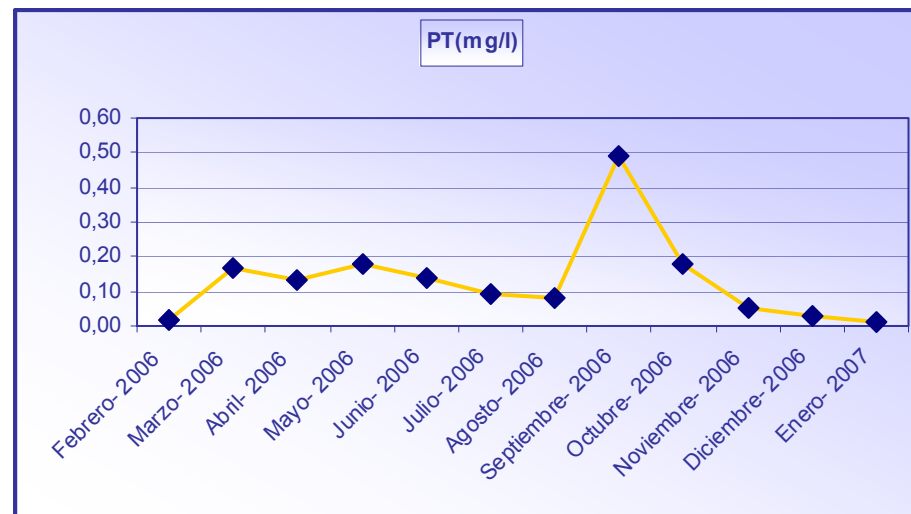
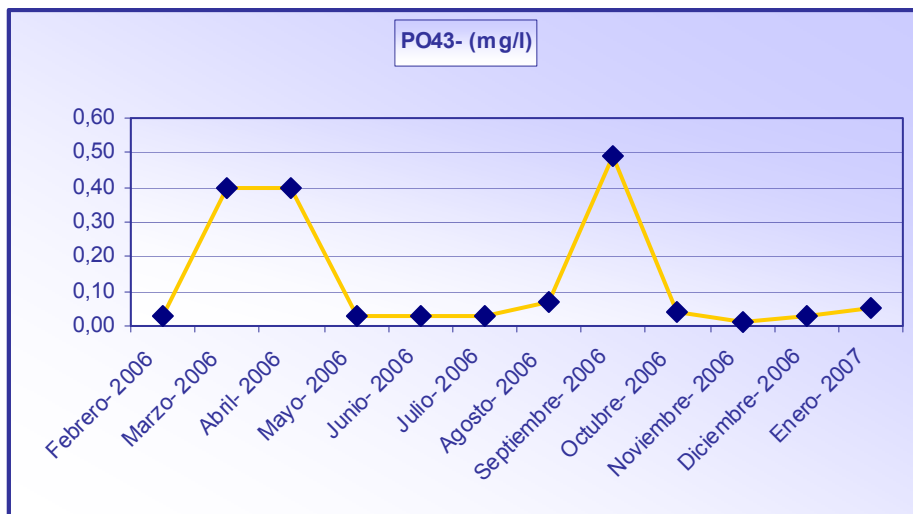


Figura 23.3: Evolución de los parámetros en el punto nº 5 – Puerto de la Cruz Verde (El Escorial)



4.2.3.6 - Punto N° 6 - Galapagar-La Navata

El caudal presenta una evolución irregular, esto puede estar relacionado con la existencia del embalse de las Nieves aguas arriba de éste punto. La máxima descarga se produce en diciembre y presenta caudales mínimos en época de estiaje.

La conductividad evoluciona irregularmente, presenta valores máximos hacia la época estival, concentrándose el mayor contenido salino en agosto. En el periodo otoñal la conductividad disminuye por efecto de dilución de las lluvias, alcanzando un valor mínimo en noviembre coincidiendo con un aumento de caudal.

El pH varía entre 6,32 y 8,04, permanece estable prácticamente todo el año presentando pequeñas oscilaciones.

Los valores de oxígeno disuelto son medio-altos en general, alcanza valores máximos en los meses de agosto y septiembre coincidiendo con la disminución de los caudales, pudiendo coincidir con algún tipo de vertidos urbanos en la zona.

El oxígeno disuelto presenta valores medio-altos, alcanza valores máximos en los meses de febrero y marzo, disminuye a medida que vamos hacia la época de estiaje presentando un valor mínimo en octubre coincidiendo con la disminución de los caudales, pudiendo coincidir con algún tipo de vertidos urbanos en la zona.

La evolución de las concentraciones de los nitritos, nitratos, nitrógeno total y amonio es irregular, alcanzan máximos valores en septiembre, pudiendo coincidir con la existencia de vertidos urbanos en la zona. Destaca la concentración máxima de nitratos que puede ser debida a la actividad agrícola (huertas) que se desarrolla en las inmediaciones del cauce, pudiendo producir procesos de contaminación agrícola por solubilización de fertilizantes.

La evolución de las concentraciones de ortofosfato (PO_4^{3-}) y fósforo total es irregular, alcanzan máximos valores en abril y octubre respectivamente, presumiblemente de origen urbano.

La temperatura presenta una gran homogeneidad con las distintas estaciones, alcanzando el valor máximo en agosto y mínimo en febrero.

En general, los parámetros presentan valores alternantes, no sujetos a régimen estacional, propios de cuencas próximas a núcleos urbanos. Así mismo, esto puede estar relacionado con la existencia de un embalse aguas arriba de éste punto, en el que tienen lugar procesos oxidación-reducción, sedimentación, etc.

Figura 24.1: Evolución de los parámetros en el punto n° 6 - Galapagar-La Navata

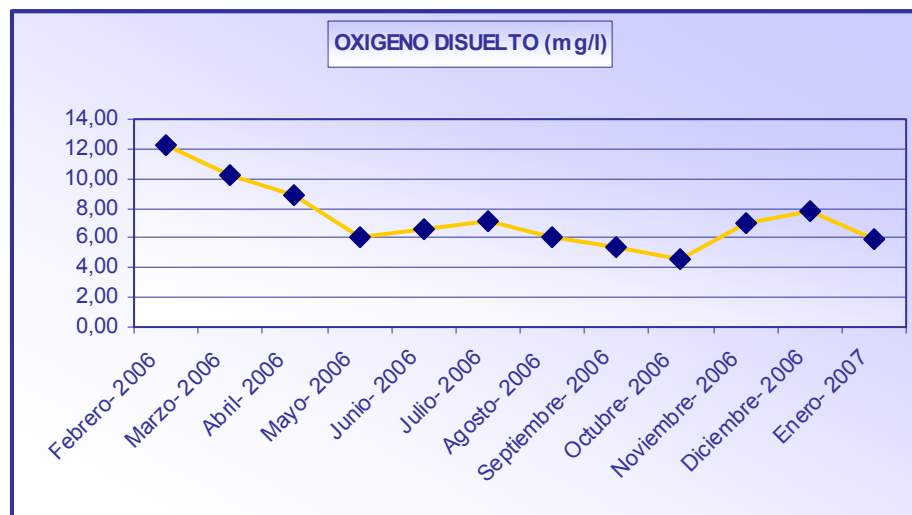
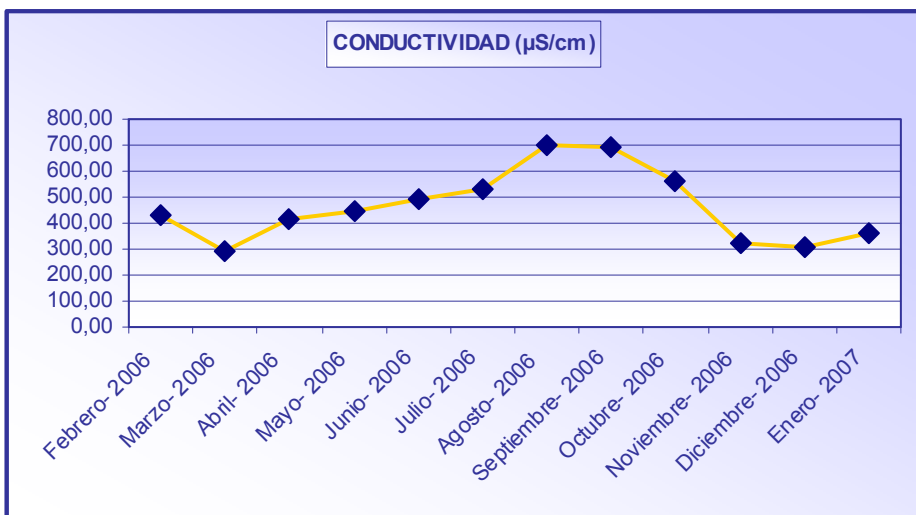
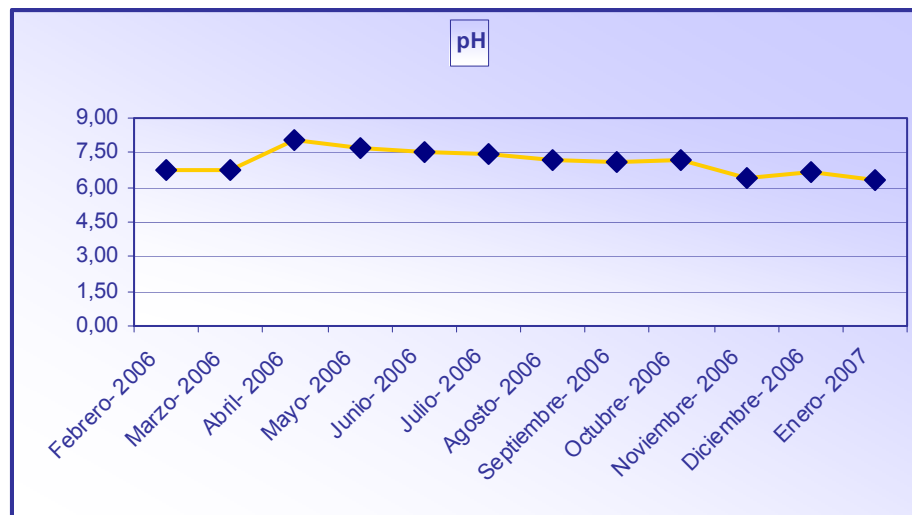
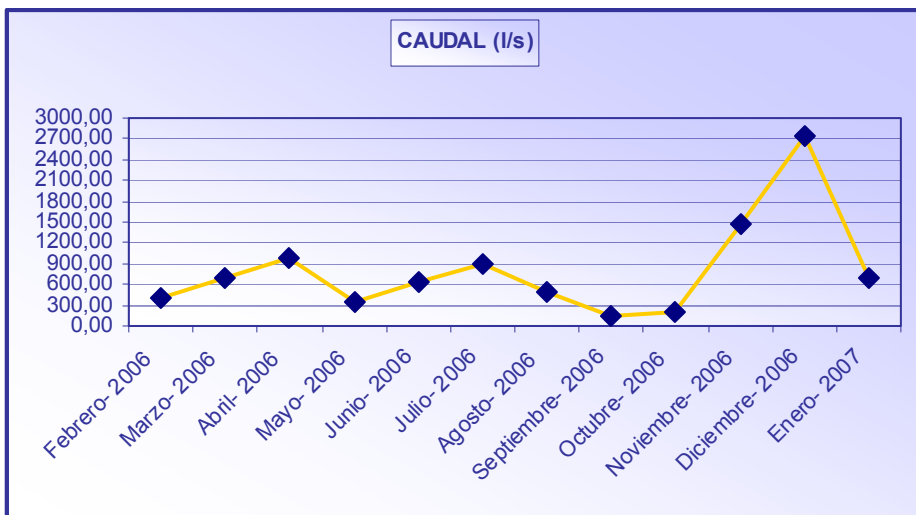


Figura 24.2: Evolución de los parámetros en el punto nº 6 - Galapagar-La Navata

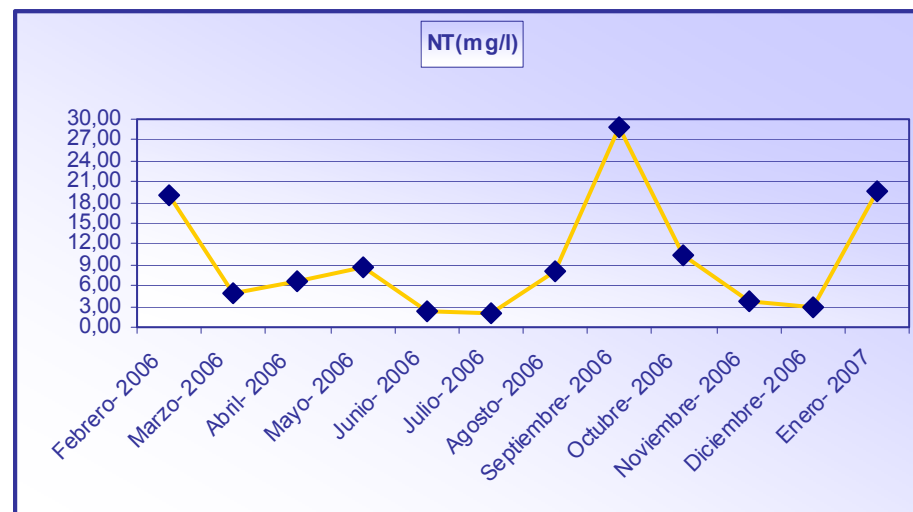
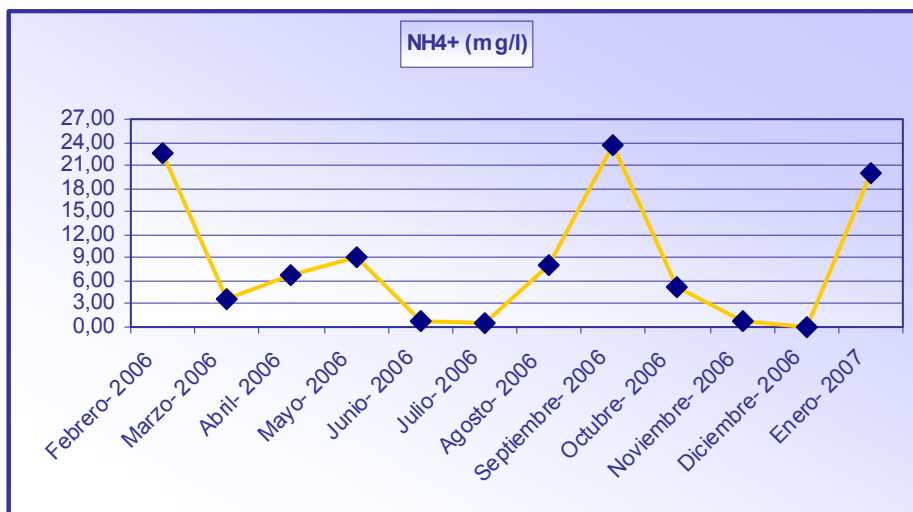
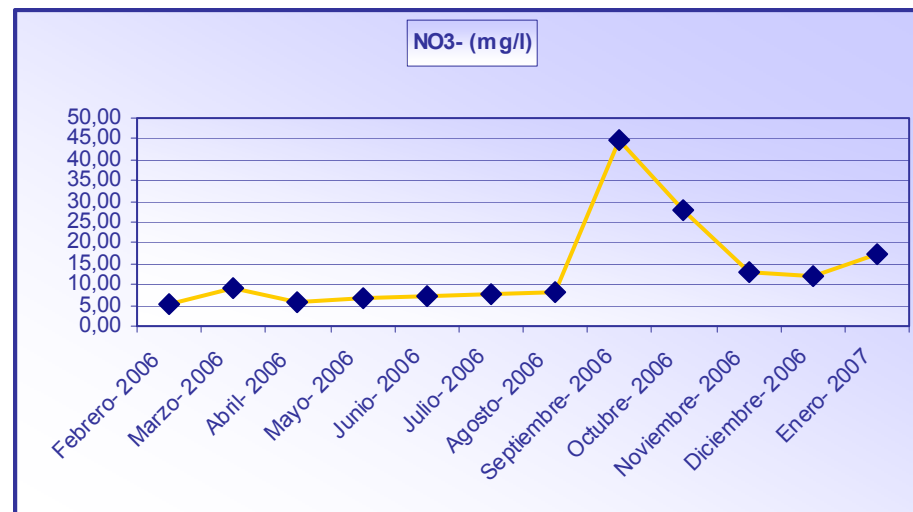
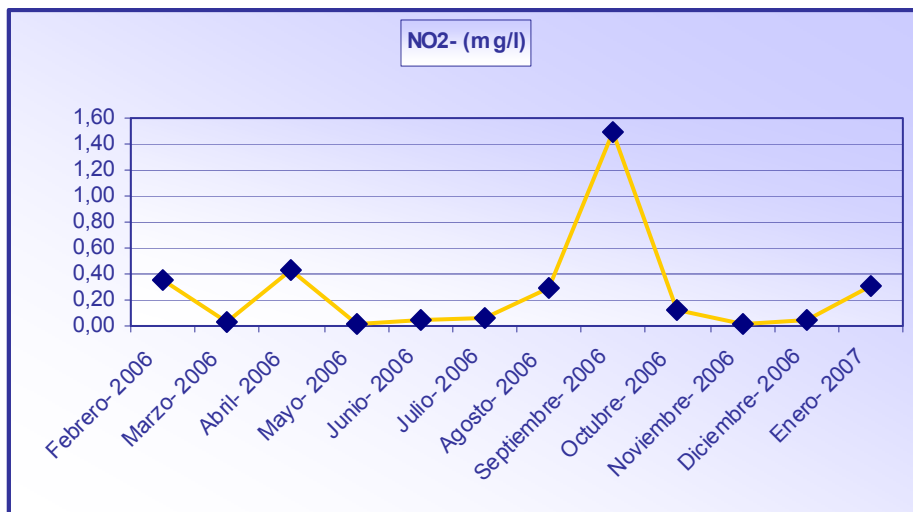
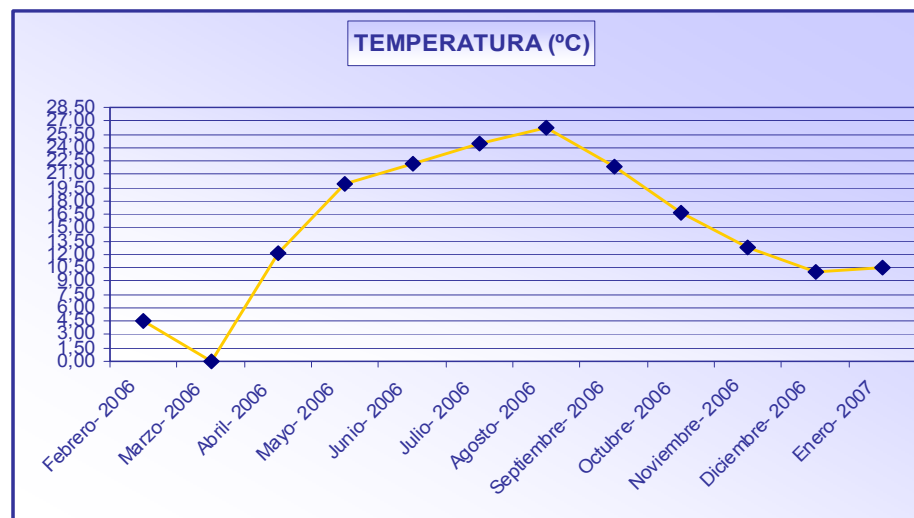
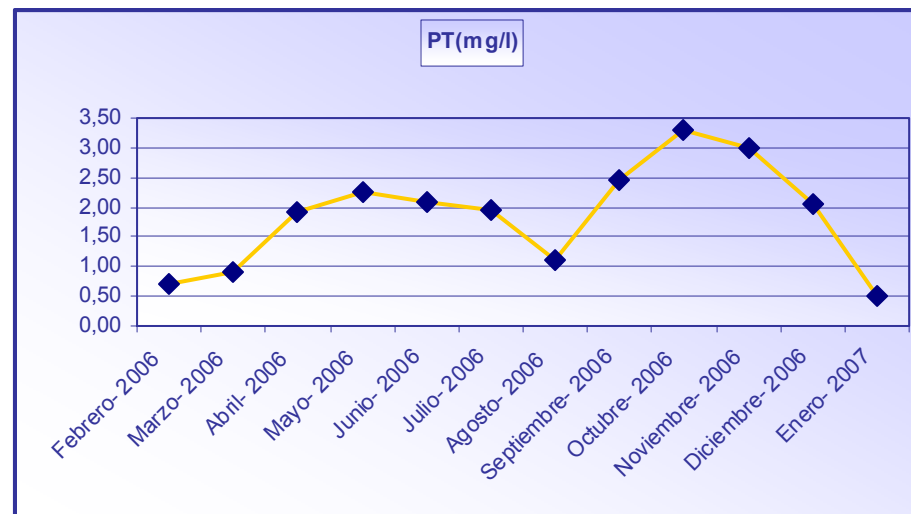
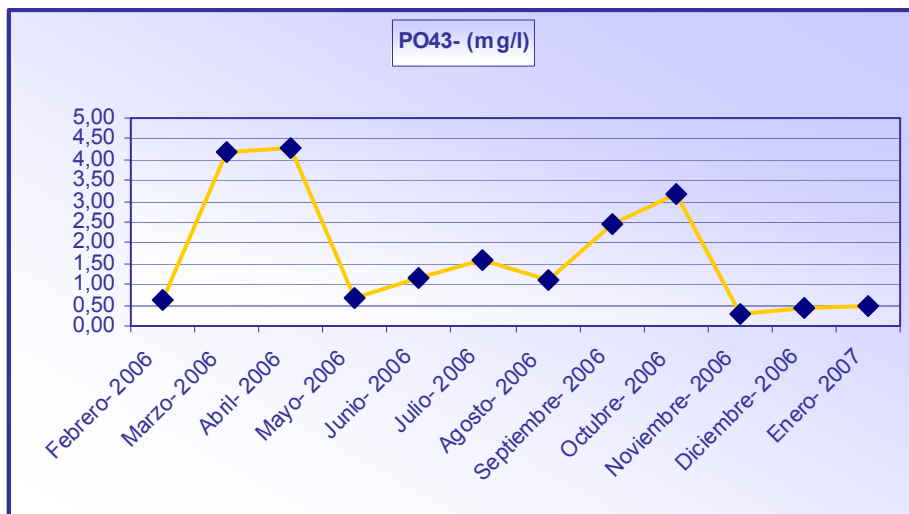


Figura 24.3: Evolución de los parámetros en el punto nº 6 - Galapagar-La Navata



4.2.3.7 - Punto N° 7 - E. Molino de la Hoz (Pte. Romano)

El caudal presenta una evolución prácticamente constante desde febrero hasta octubre, esto puede estar relacionado con la existencia del embalse del Molino de la Hoz aguas arriba de éste punto. La máxima descarga se produce en diciembre.

La conductividad evoluciona regularmente, presenta valores máximos hacia la época estival, concentrándose el mayor contenido salino en septiembre. En el periodo otoñal la conductividad disminuye por efecto de dilución de las lluvias, el valor mínimo se produce en enero del 2007.

El pH varía entre 6,25 y 7,58, permanece estable prácticamente todo el año presentando pequeñas oscilaciones.

Los valores de oxígeno disuelto son medio-altos en general, alcanza valores máximos en los meses de febrero, marzo y abril, disminuye a medida que vamos hacia la época de estiaje presentando un valor mínimo en octubre coincidiendo con la disminución de los caudales, pudiendo coincidir con algún tipo de vertidos urbanos en la zona.

La evolución de las concentraciones de los nitritos, nitratos y nitrógeno total es irregular, alcanzan máximos valores en septiembre, pudiendo coincidir con la existencia de vertidos urbanos en la zona y por el nivel bajo del embalse. El amonio presenta valores medios a lo largo del curso del río, alcanza el valor máximo en enero.

La evolución de las concentraciones de ortofosfato (PO_4^{3-}) y fósforo total es irregular, alcanzan máximos valores en abril y mayo respectivamente, presumiblemente de origen urbano.

La temperatura presenta una gran homogeneidad con las distintas estaciones, alcanzando el valor máximo en julio y mínimo en febrero.

En general, los parámetros presentan valores alternantes, no sujetos a régimen estacional, propios de cuencas próximas a núcleos urbanos. Así mismo, esto puede estar relacionado con la existencia de un embalse aguas arriba de éste punto, en el que tienen lugar procesos oxidación-reducción, sedimentación, etc.

Figura 25.1: Evolución de los parámetros en el punto n° 7 - E. Molino de la Hoz (Pte. Romano)

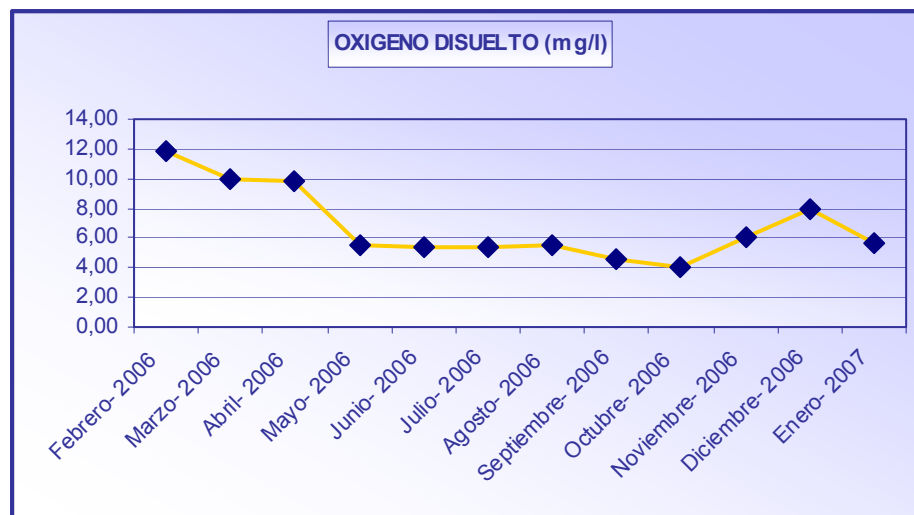
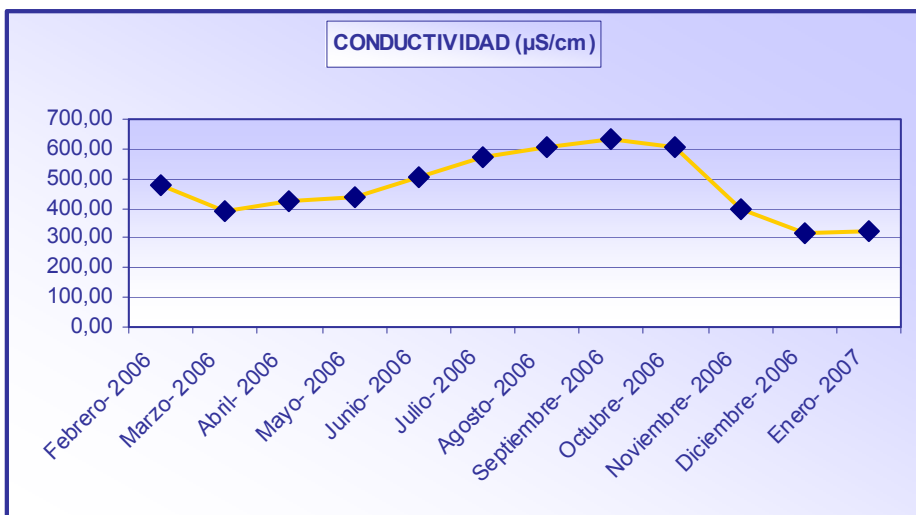
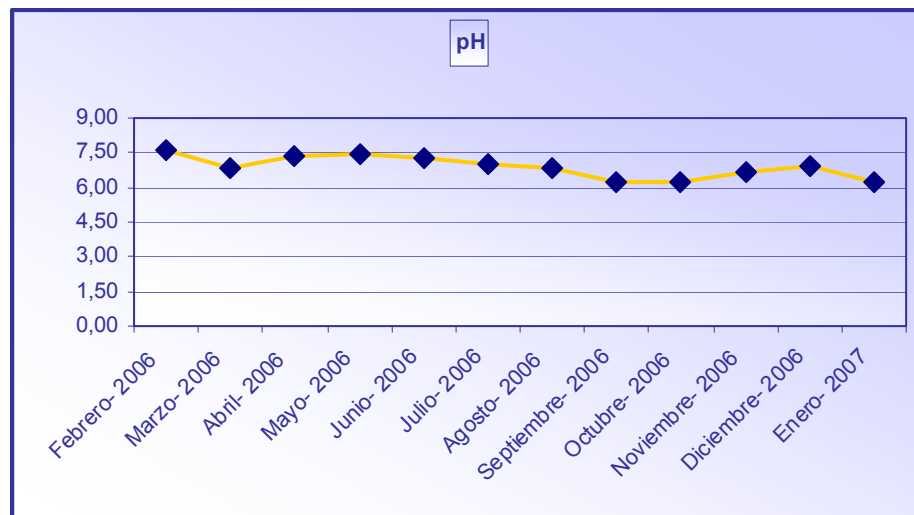
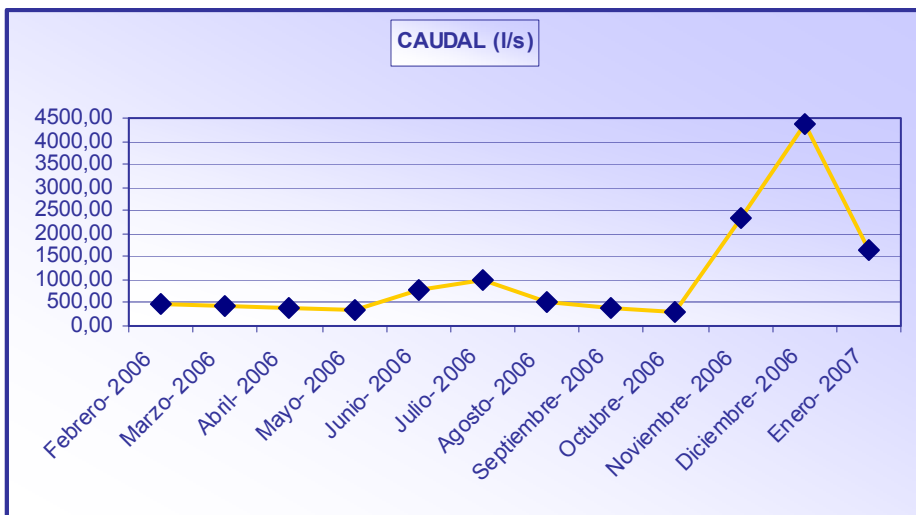


Figura 25.2: Evolución de los parámetros en el punto nº 7 - E. Molino de la Hoz (Pte. Romano)

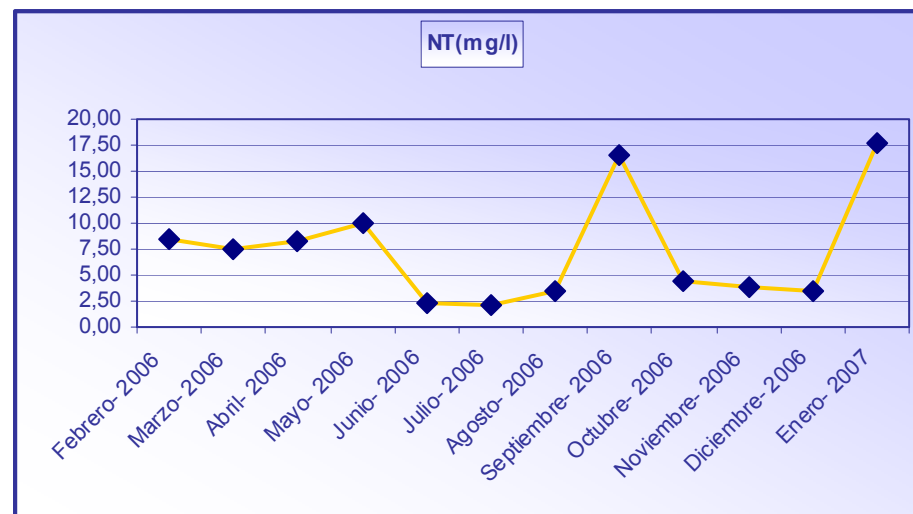
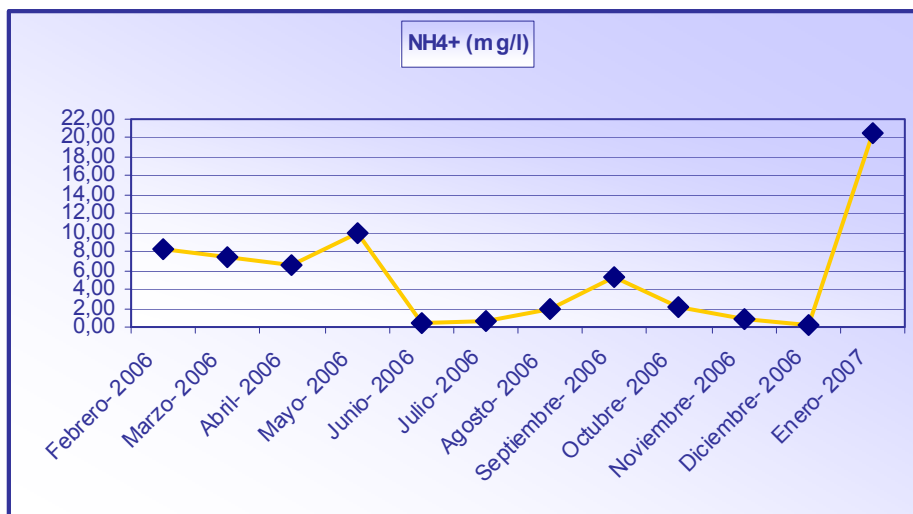
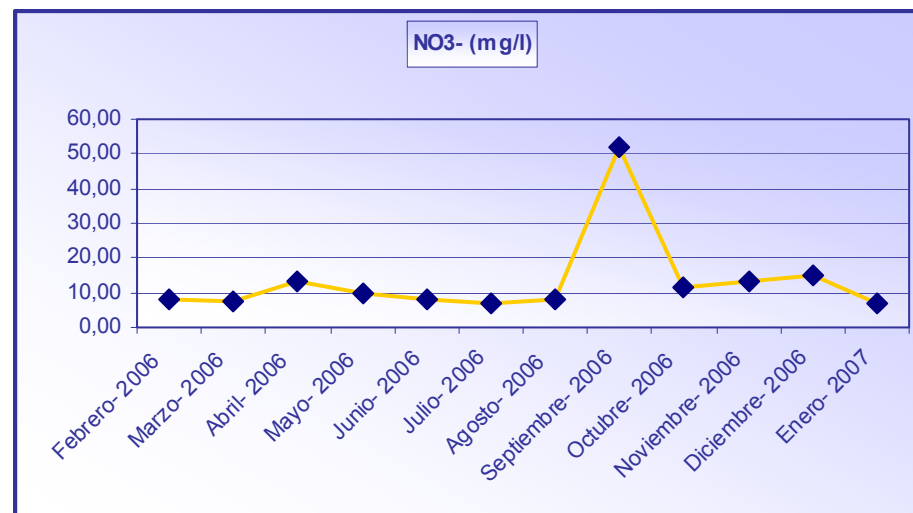
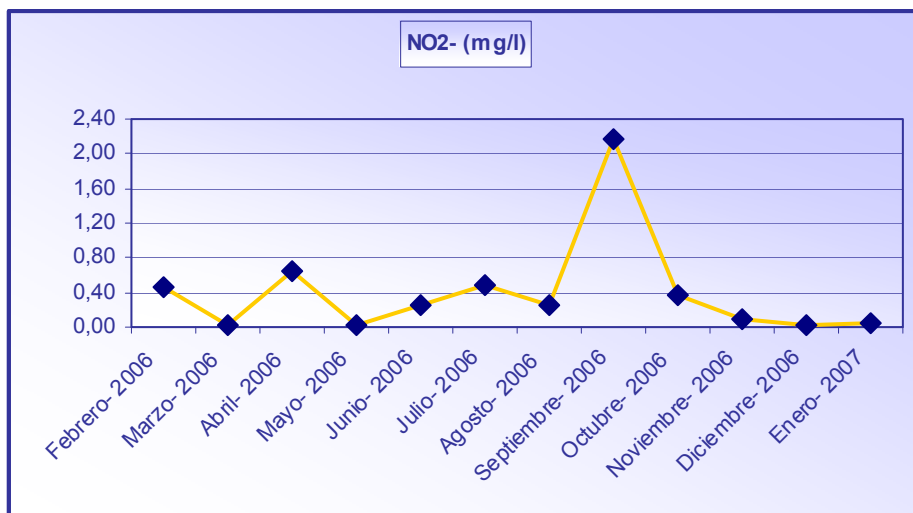
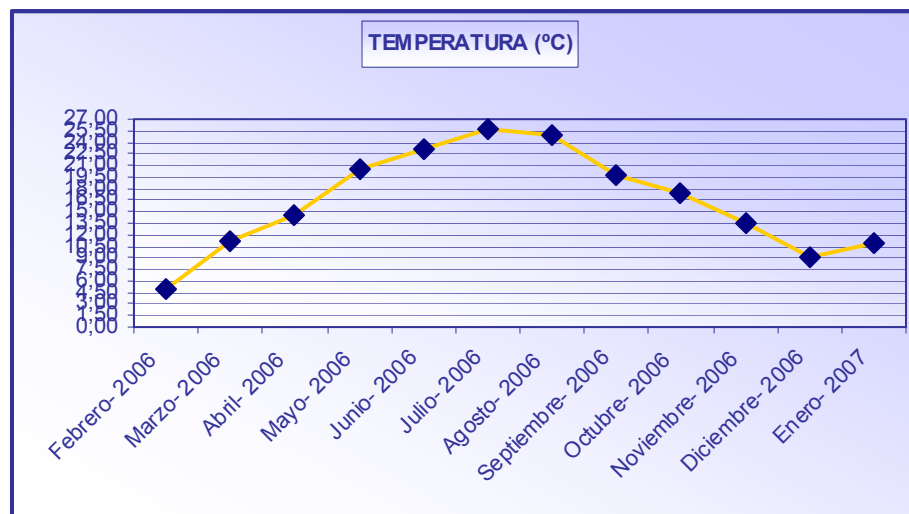
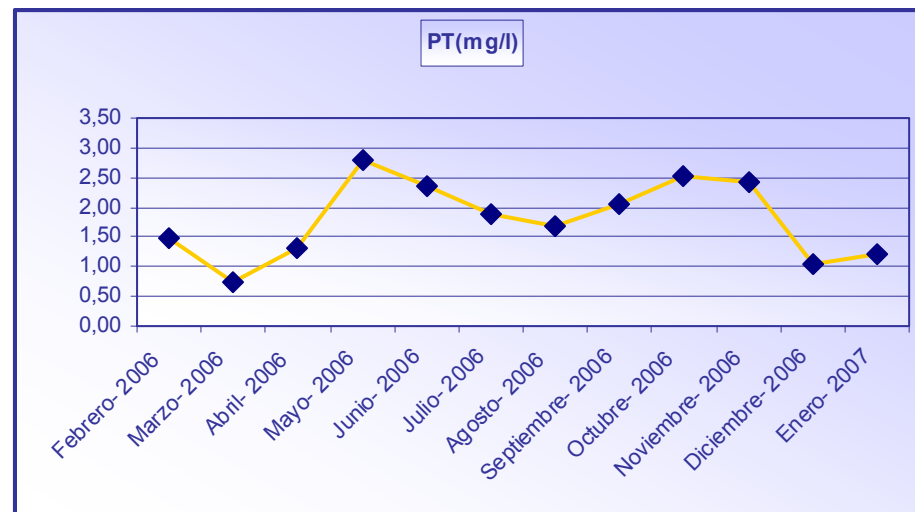
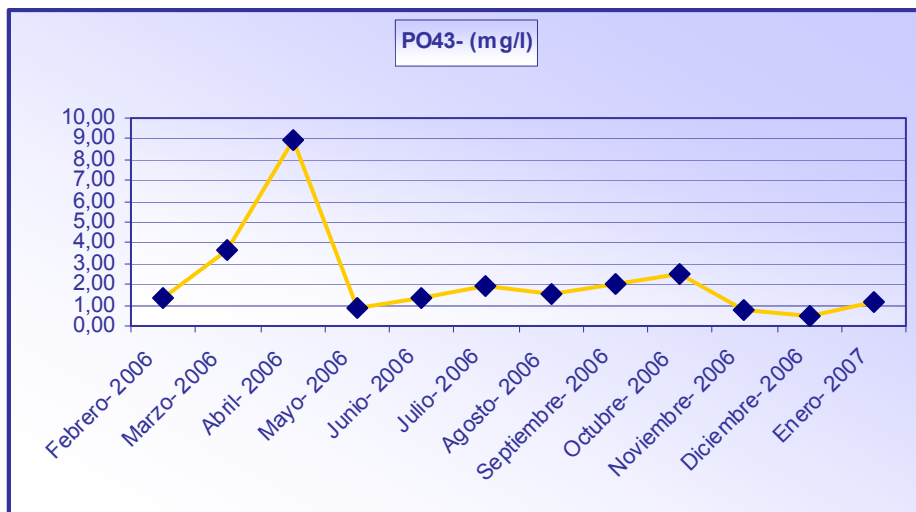


Figura 25.3: Evolución de los parámetros en el punto nº 7 - E. Molino de la Hoz (Pte. Romano)



4.2.3.8 - Punto N° 8 - Móstoles (Urbanización Guadarrama)

El caudal presenta una evolución regular. La máxima descarga se produce en abril, presenta caudales máximos en febrero y marzo coincidiendo con el lavado de suelos, mínimos en época de estiaje y aumenta de nuevo con las lluvias otoñales.

La conductividad presenta valores máximos a partir de mayo hacia la época estival, esta evolución es lógica si se considera que el agua superficial llega a los puntos más bajos en las épocas de máximo caudal, lo que supone un agua con menor salinidad debida a una mayor dilución.

El pH varía entre 6,53 y 7,69, permanece estable prácticamente todo el año presentando pequeñas oscilaciones.

Los valores de oxígeno disuelto son medio-altos en general, alcanza valores máximos en los meses de febrero y marzo, disminuye a medida que vamos hacia la época de estiaje presentando un valor mínimo en septiembre, pudiendo coincidir con algún tipo de vertidos urbanos en la zona.

La evolución de las concentraciones de los nitritos, nitratos, nitrógeno total y amonio es irregular, alcanzan máximos valores en enero, pudiendo coincidir con la existencia de vertidos urbanos o procesos de contaminación agrícola por solubilización de fertilizantes debido a la actividad agrícola (huertas) que se desarrolla en las inmediaciones del cauce.

La evolución de las concentraciones de ortofosfato (PO_4^{3-}) y fósforo total es irregular, alcanzan máximos valores en abril y agosto respectivamente, presumiblemente de origen urbano.

La temperatura presenta una gran homogeneidad con las distintas estaciones, alcanzando el valor máximo en julio y mínimo en febrero.

En general, los parámetros presentan valores alternantes, no sujetos a régimen estacional, propios de cuencas próximas a núcleos urbanos e industriales.

Figura 26.1: Evolución de los parámetros en el punto n° 8 - Móstoles (Urb. Guadarrama)

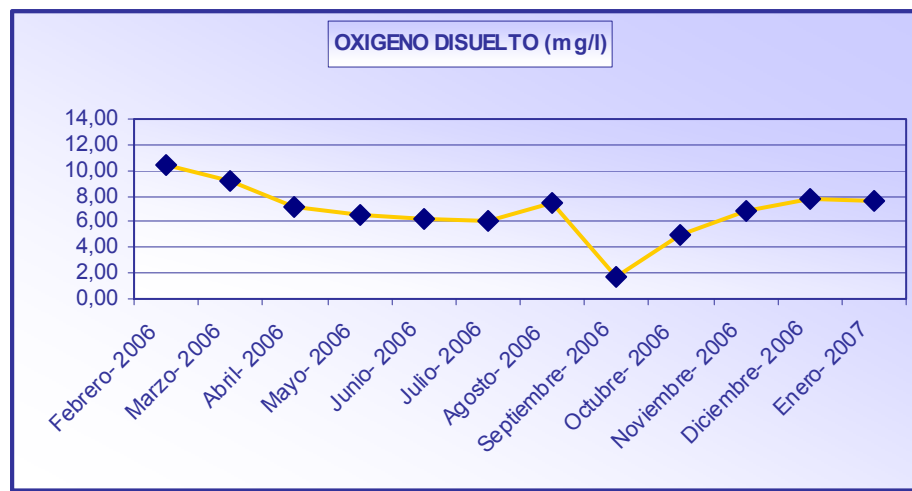
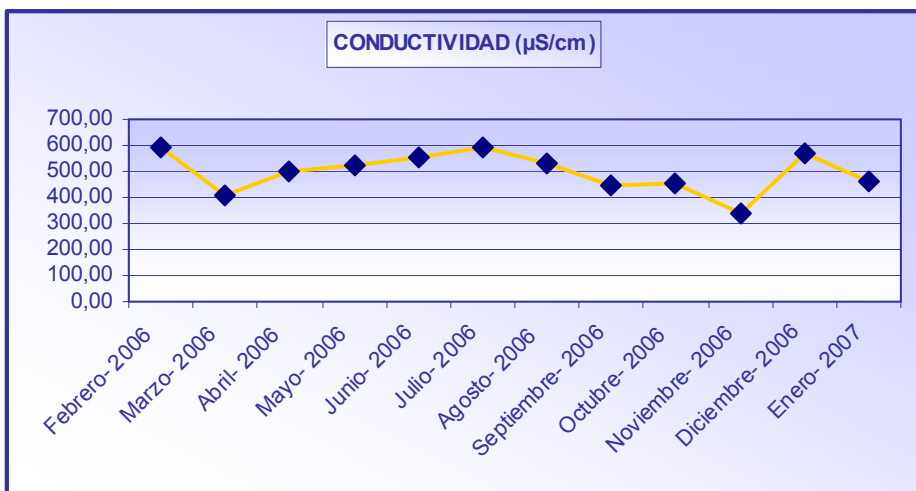
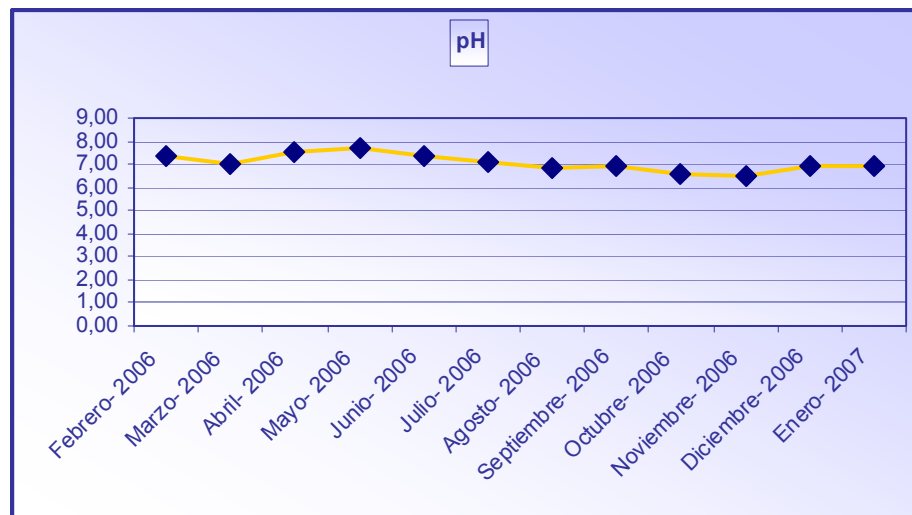
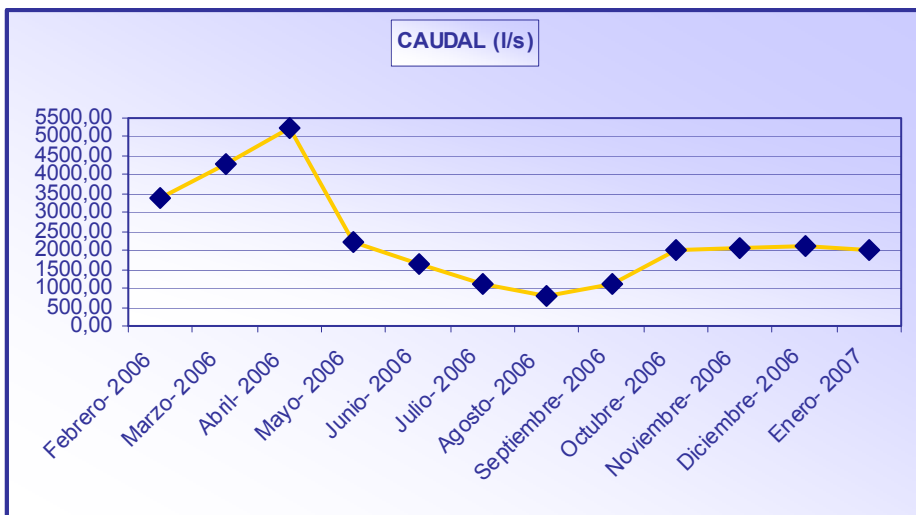


Figura 26.2: Evolución de los parámetros en el punto nº 8 - Móstoles (Urb. Guadarrama)

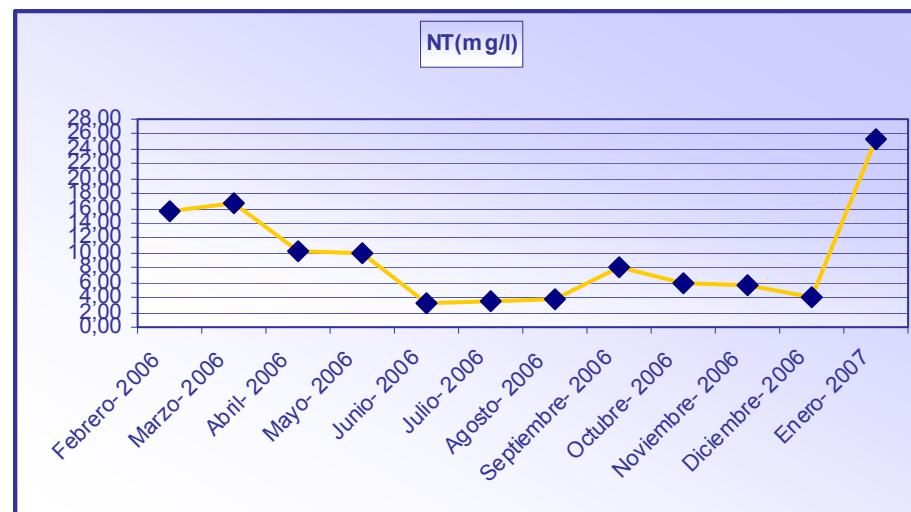
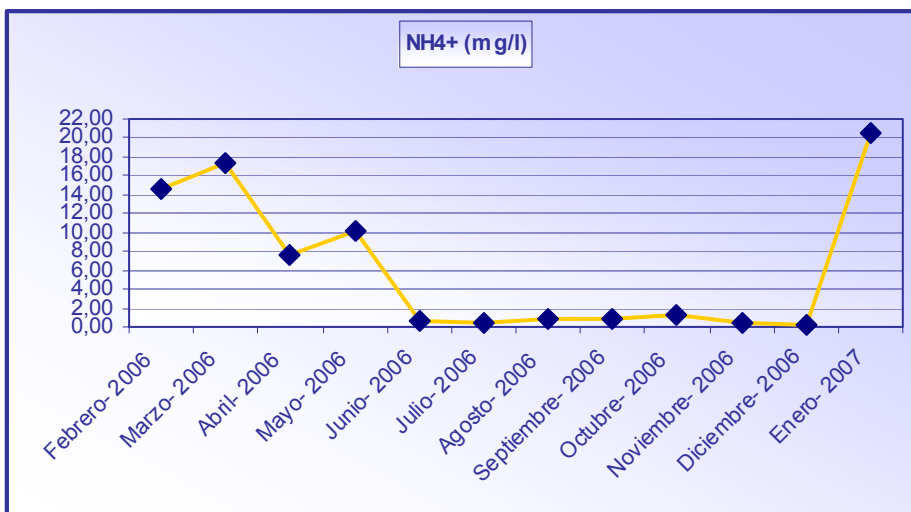
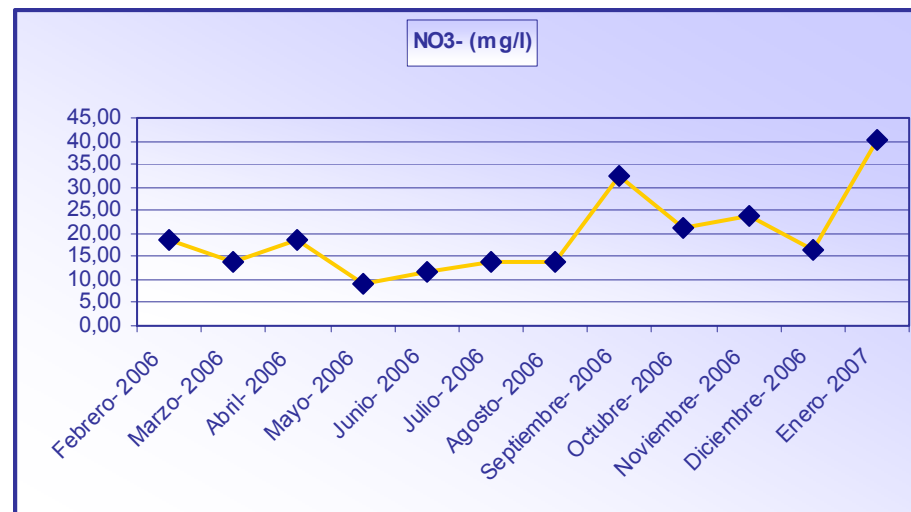
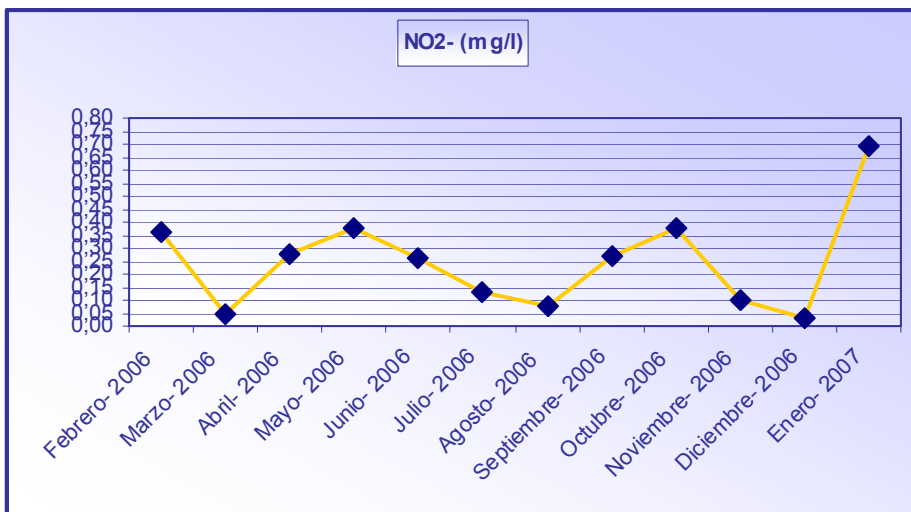
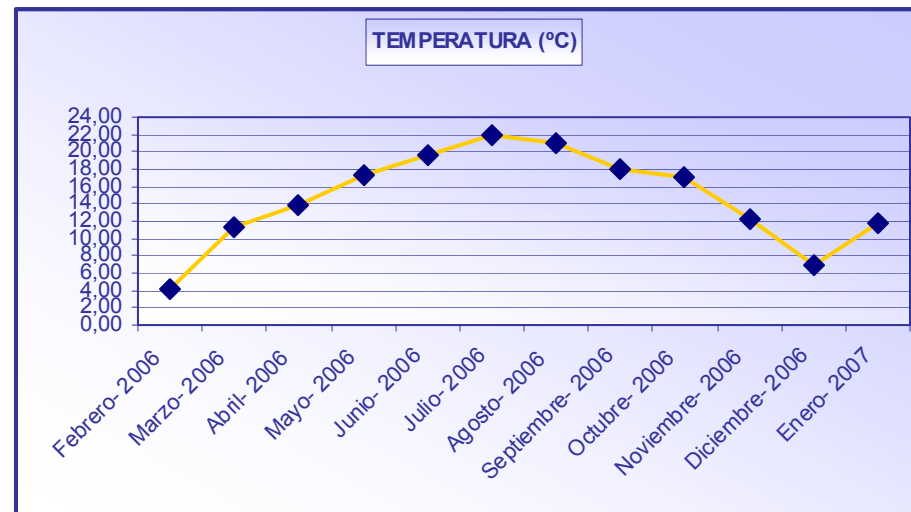
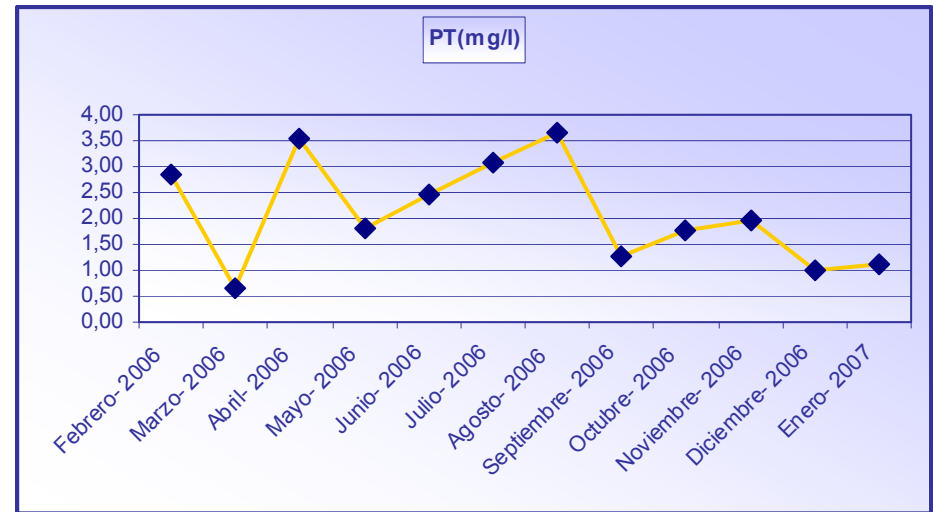
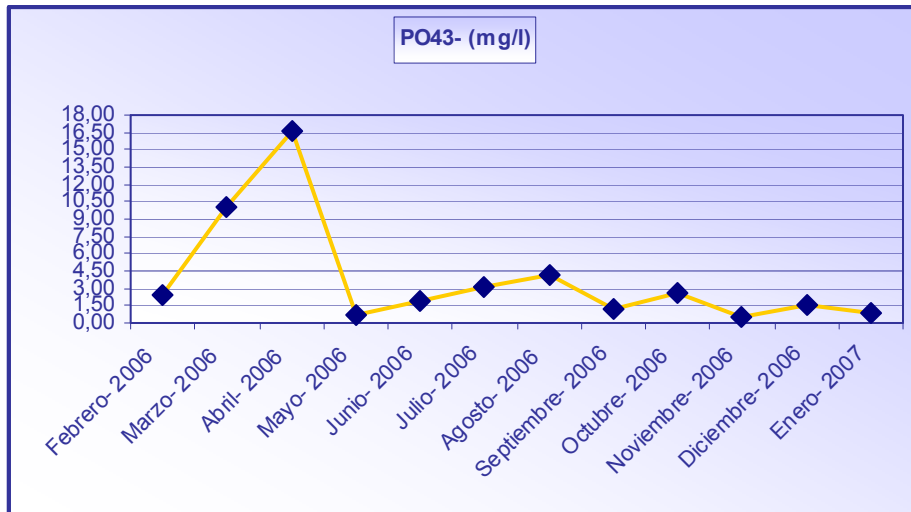


Figura 26.3: Evolución de los parámetros en el punto nº 8 - Móstoles (Urb. Guadarrama)



4.2.3.9 - Punto N°. 9 - Batres (Ctra. El Alamo a Griñón)

El caudal presenta una evolución regular. La máxima descarga se produce en abril, mínimos en época de estiaje y aumenta de nuevo con las lluvias otoñales.

La conductividad presenta valores máximos a partir de mayo hacia la época estival, esta evolución es lógica si se considera que el agua superficial llega a los puntos más bajos en las épocas de máximo caudal, lo que supone un agua con menor salinidad. Alcanza el valor mínimo en noviembre coincidiendo con un aumento de caudal.

El pH varía entre 6,21 y 7,69, permanece estable prácticamente todo el año presentando pequeñas oscilaciones.

Los valores de oxígeno disuelto son medios en general, alcanza valores máximos en los meses de febrero y marzo, disminuye a medida que vamos hacia la época de estiaje presentando un valor mínimo en agosto, pudiendo coincidir con algún tipo de vertido agrícola en la zona.

La evolución de las concentraciones de los nitritos, nitratos y nitrógeno total es irregular, alcanzan máximos valores en septiembre, pudiendo coincidir con la existencia de vertidos urbanos o procesos de contaminación agrícola por solubilización de fertilizantes debido a la actividad agrícola que se desarrolla en las inmediaciones del cauce. Las concentraciones más altas de amonio se producen en febrero coincidiendo con el deshielo.

La evolución de las concentraciones de ortofosfato (PO_4^{3-}) y fósforo total es irregular, alcanzan máximos valores en abril y mayo respectivamente, presumiblemente de origen urbano.

La temperatura presenta una gran homogeneidad con las distintas estaciones, alcanzando el valor máximo en agosto y mínimo en enero.

En general, los parámetros presentan valores alternantes, no sujetos a régimen estacional, propios de cuencas próximas a núcleos urbanos e industriales.

Figura 27.1: Evolución de los parámetros en el punto nº 9 – Batres

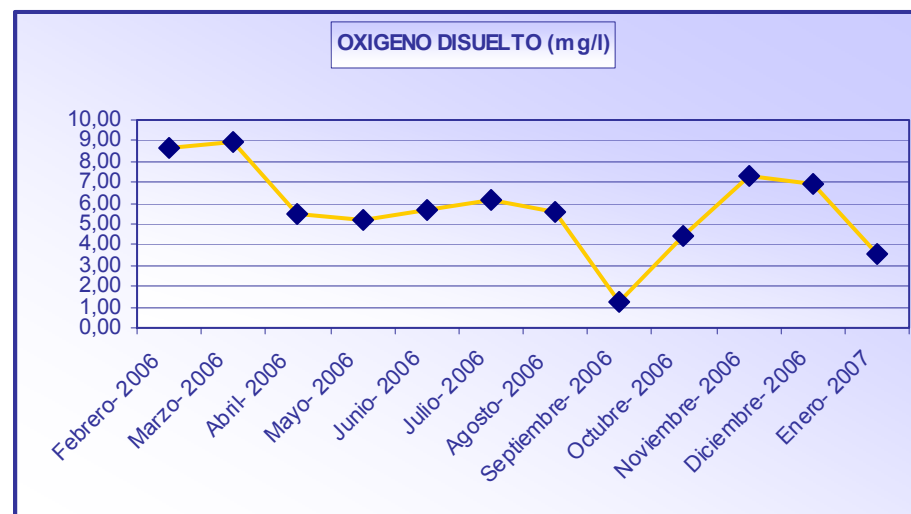
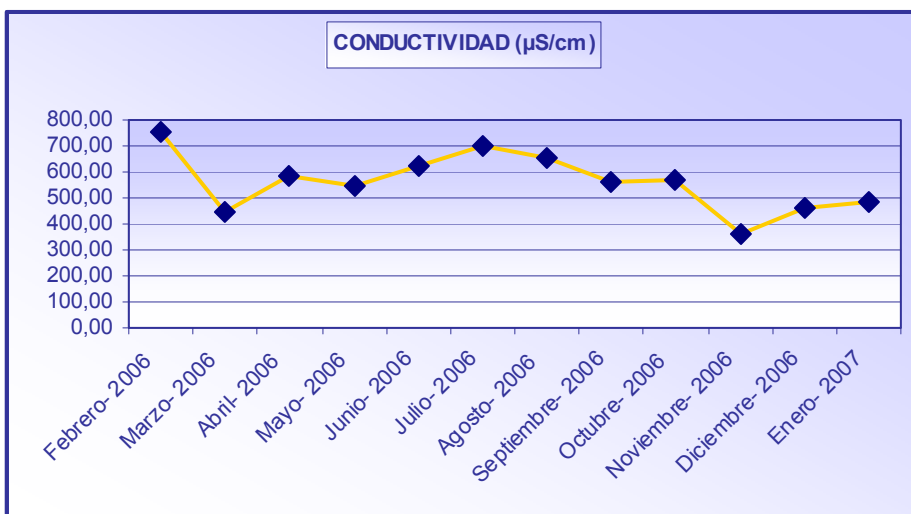
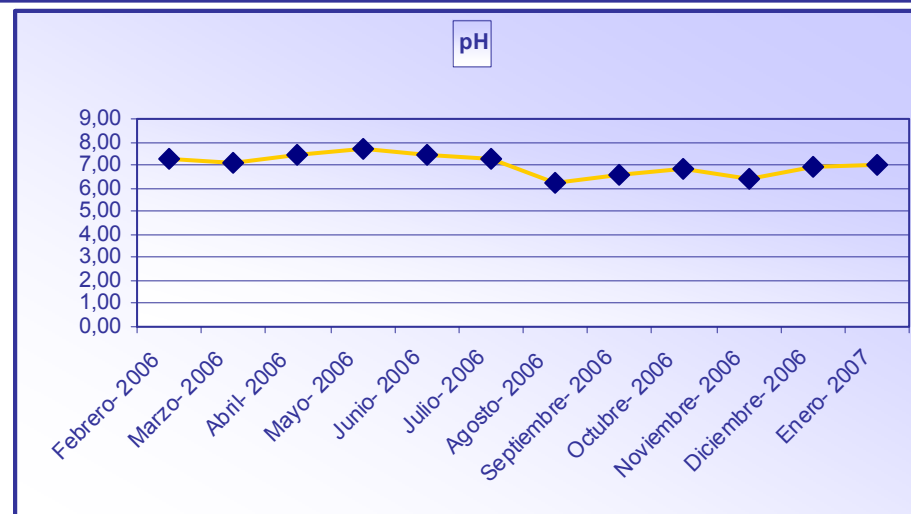
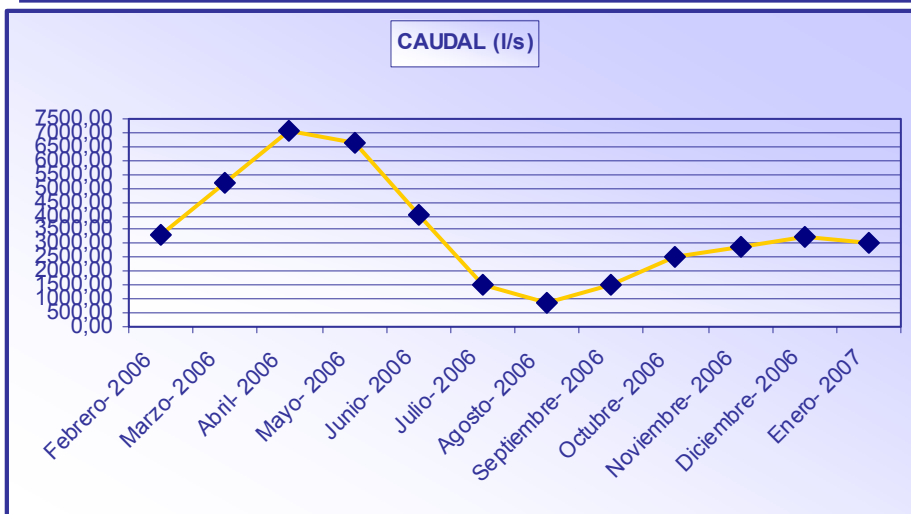


Figura 27.2: Evolución de los parámetros en el punto nº 9 – Batres

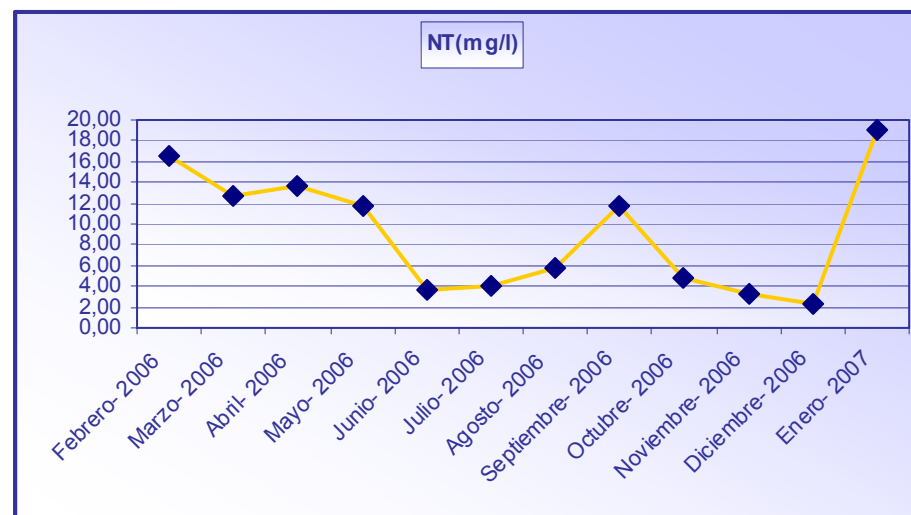
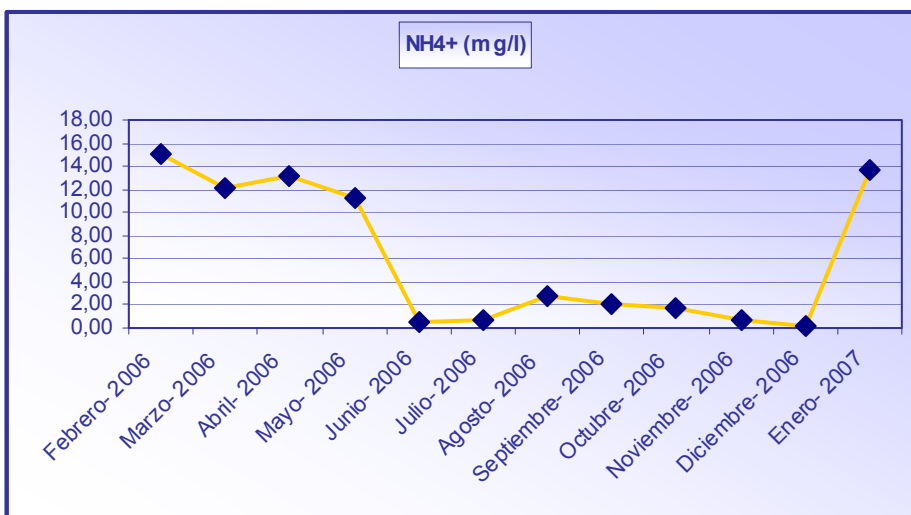
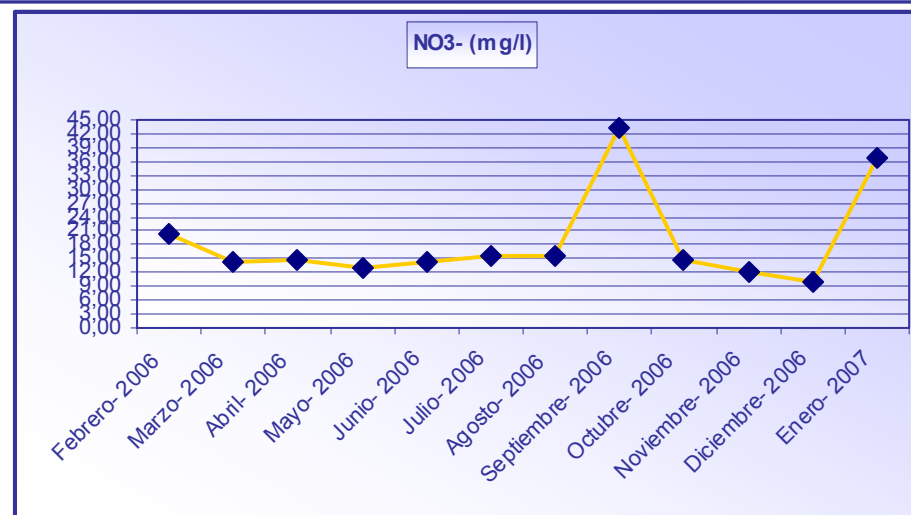
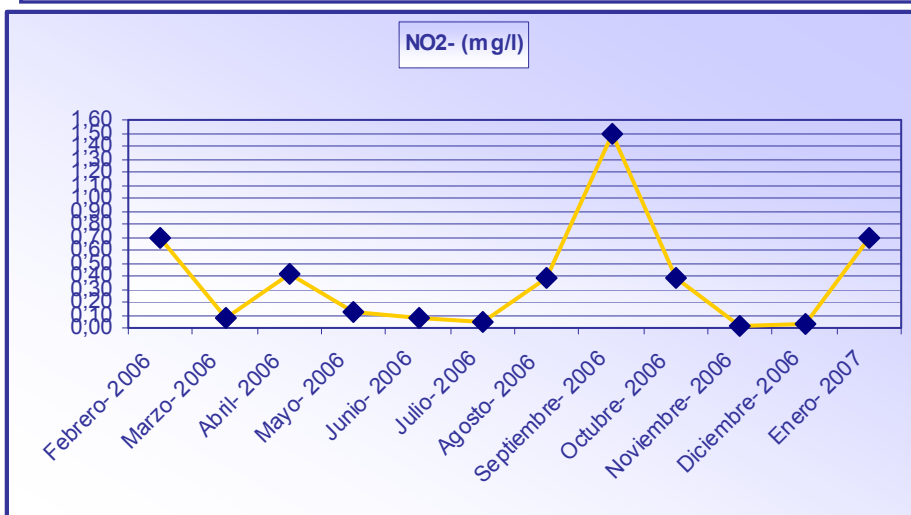
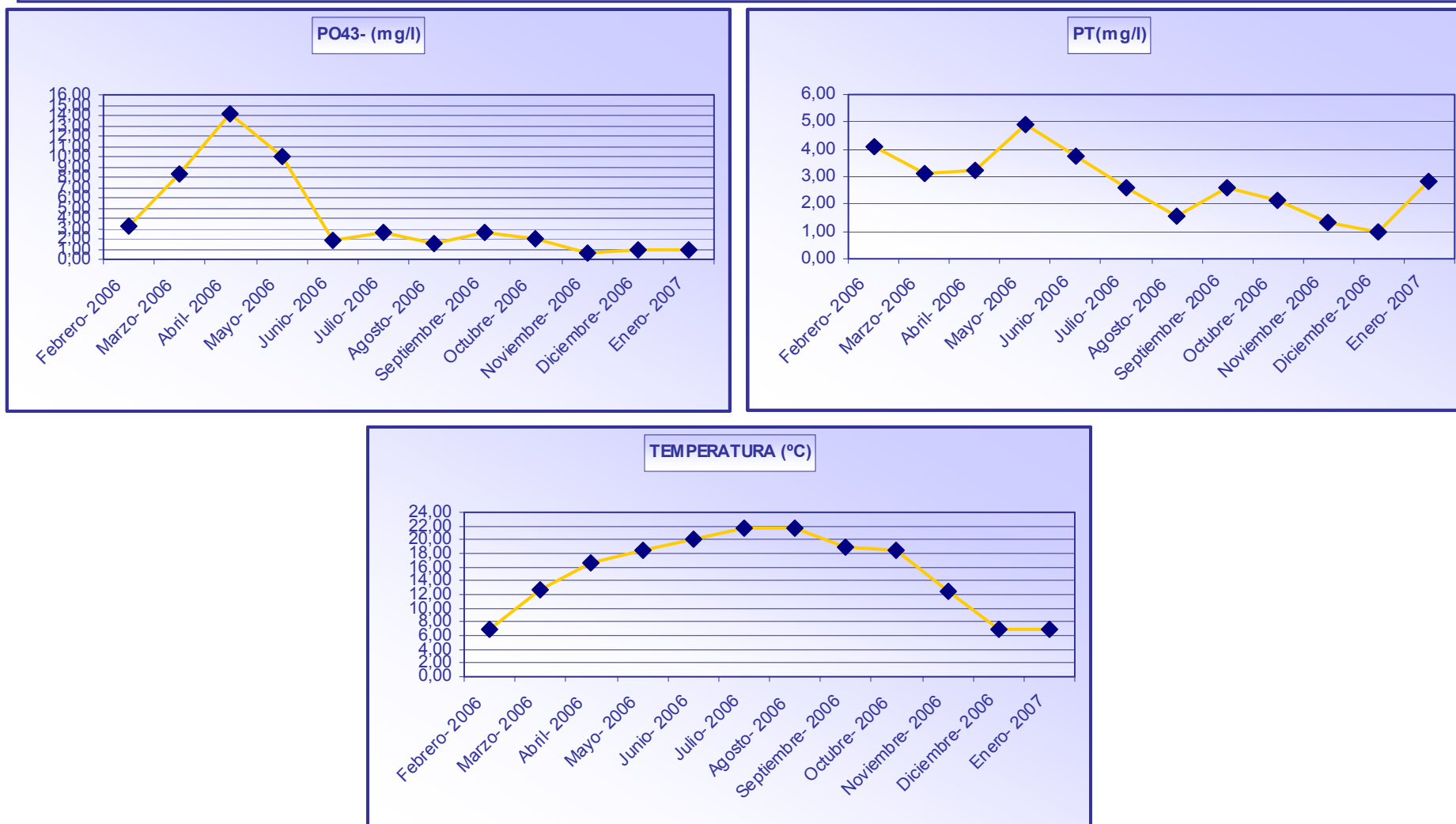


Figura 27.3: Evolución de los parámetros en el punto nº 9 – Batres



4.2.3.10 - Punto N°. 10 - Bargas Cruce M-403 con C.M 4006)

El caudal presenta una evolución regular. Se observa que la máxima descarga se produce en febrero, presenta caudales máximos en primavera coincidiendo con el deshielo, mínimos en época de estiaje y aumenta de nuevo con las lluvias otoñales.

La conductividad evoluciona irregularmente, presenta valores máximos hacia la época estival. En el periodo otoñal la conductividad disminuye por efecto de dilución de las lluvias, alcanzando el valor mínimo en noviembre coincidiendo con un aumento de caudal.

El pH varía entre 6,28 y 8,20, permanece estable prácticamente todo el año presentando pequeñas oscilaciones.

Los valores de oxígeno disuelto son medios en general, alcanza valores máximos en los meses de febrero y marzo, disminuye a medida que vamos hacia la época de estiaje presentando un valor mínimo en septiembre, pudiendo coincidir con algún tipo de vertido agrícola en la zona.

La evolución de las concentraciones de los nitritos, nitratos, nitrógeno total y amonio es irregular, alcanzan máximos valores en febrero, septiembre, abril y diciembre respectivamente, pudiendo coincidir con la existencia de contaminación agrícola o ganadera, debido a la actividad agrícola y ganadera que se desarrolla en las inmediaciones del cauce.

La evolución de las concentraciones de ortofosfato (PO_4^{3-}) y fósforo total es irregular, alcanzan máximos valores en abril y mayo respectivamente.

La temperatura presenta una gran homogeneidad con las distintas estaciones, alcanzando el valor máximo en agosto y mínimo en enero.

En general, los parámetros presentan valores alternantes, no sujetos a régimen estacional, propios de cuencas próximas a núcleos urbanos e industriales.

Figura 28.1: Evolución de los parámetros en el punto n° 10 – Bargas (Toledo)

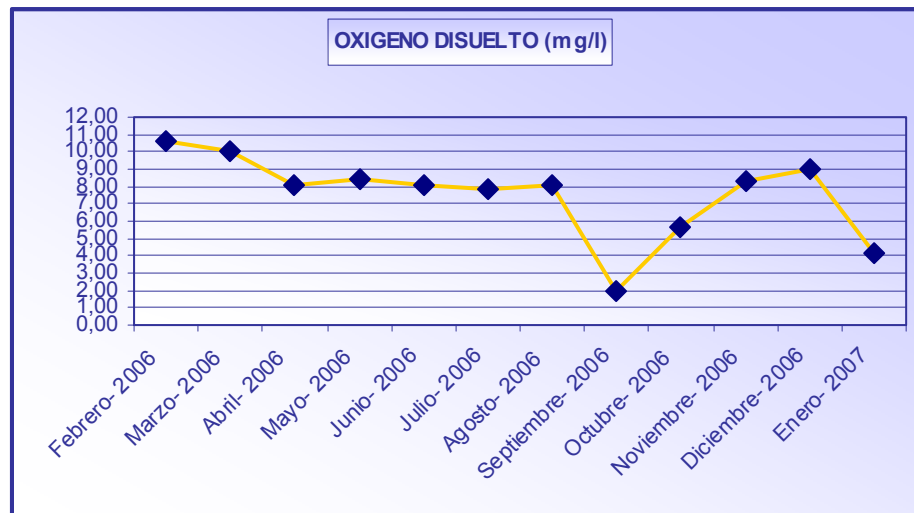
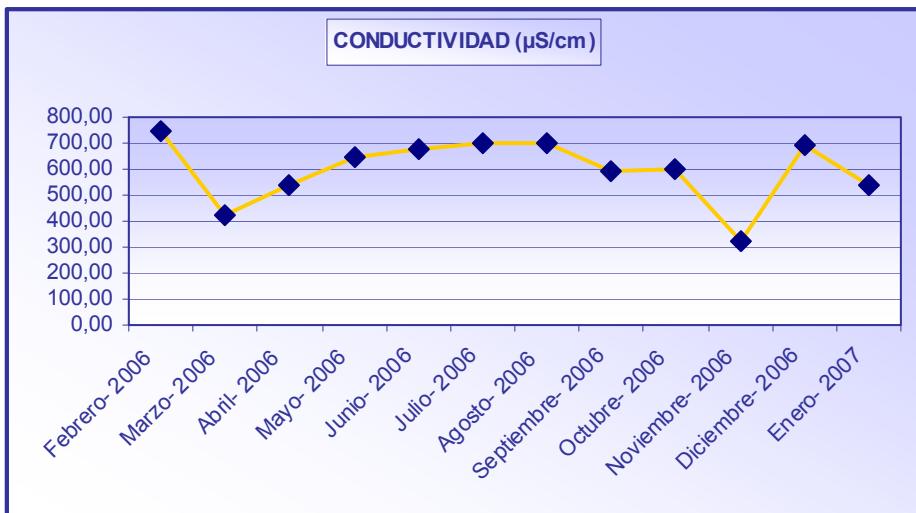
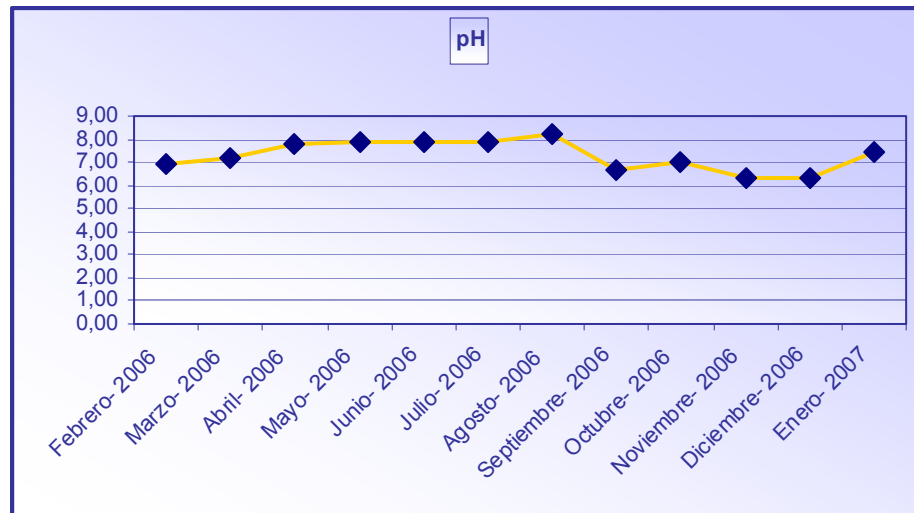
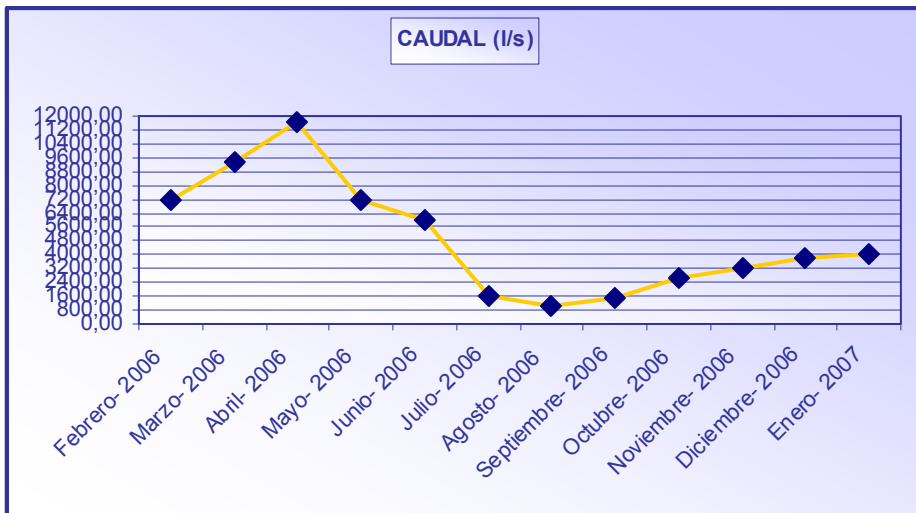


Figura 28.2: Evolución de los parámetros en el punto n° 10 – Bargas (Toledo)

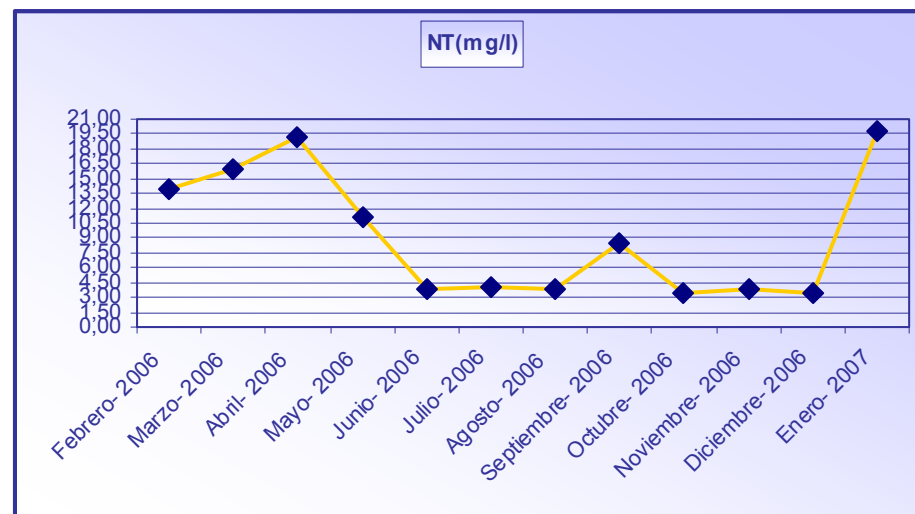
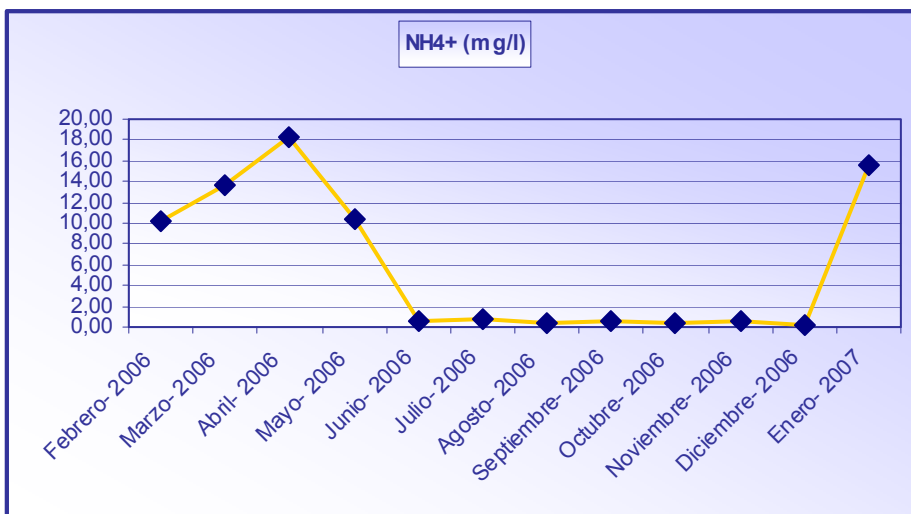
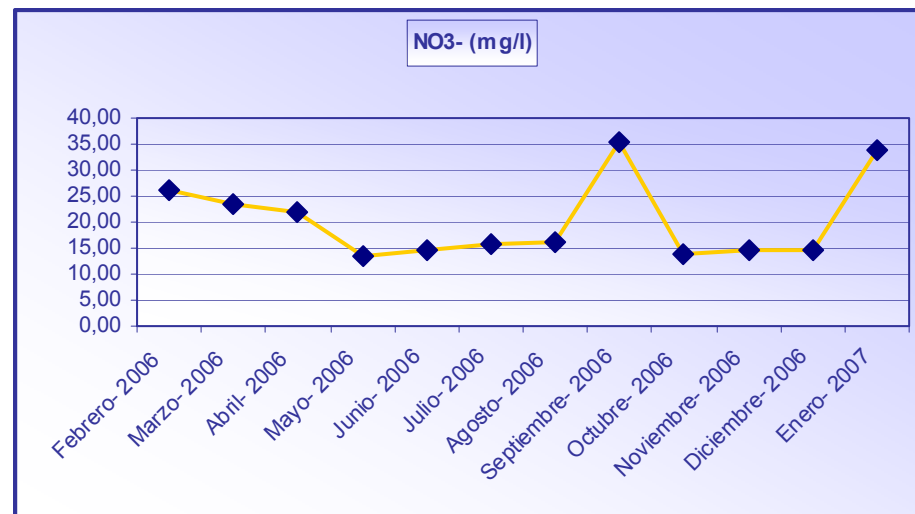
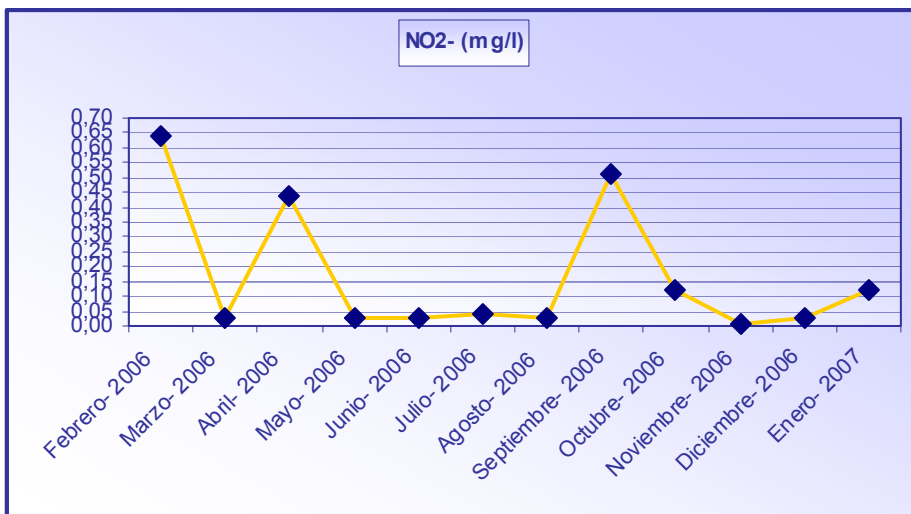
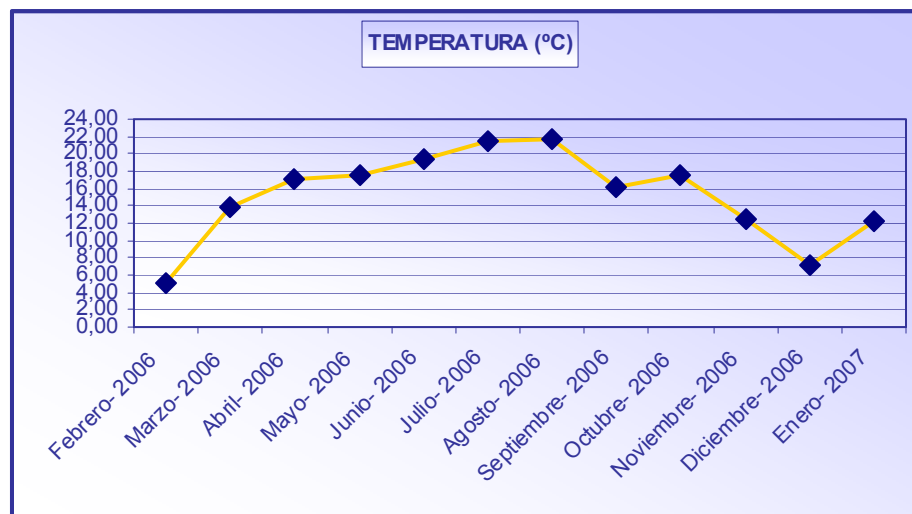
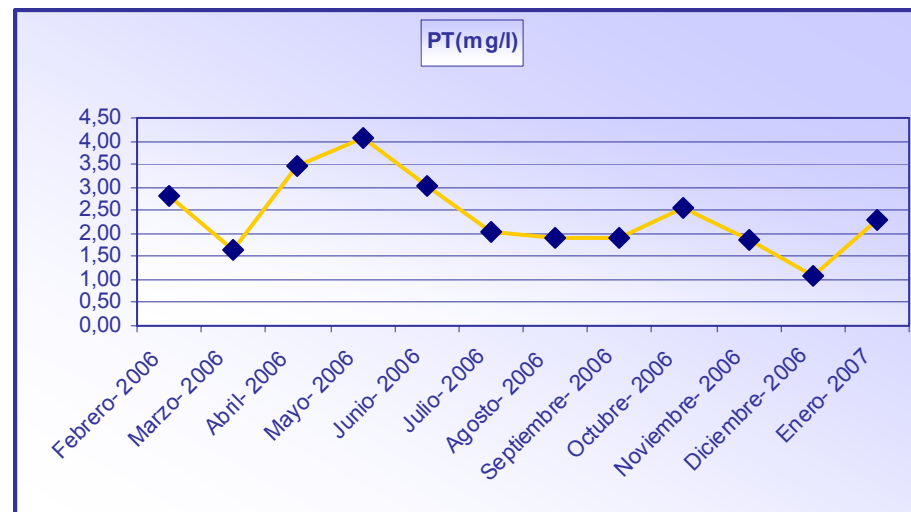
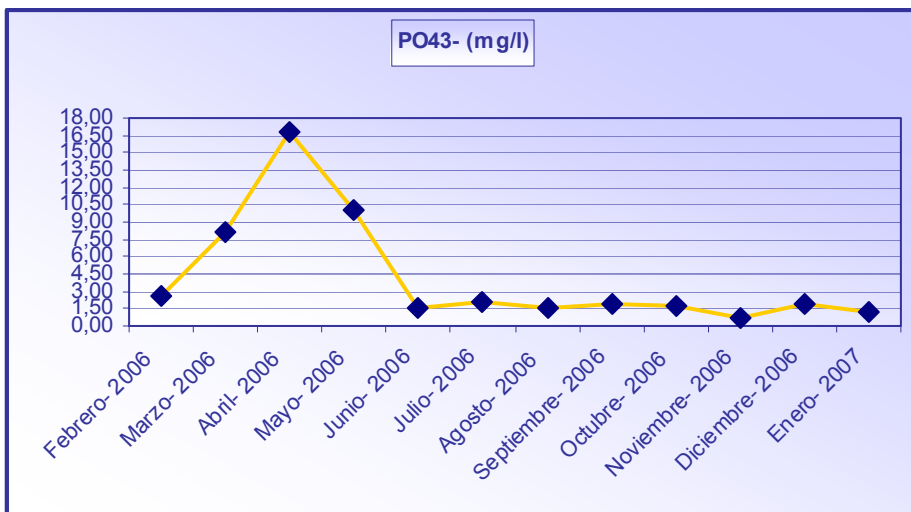


Figura 28.3: Evolución de los parámetros en el punto n° 10 – Bargas (Toledo)



4.2.4 Clasificación de las aguas

La evolución del tipo de agua en el área de estudio se ha llevado a cabo siguiendo el criterio de los iones mayoritarios, con los datos (valores medios) que aparecen en la tabla 18.1 para la clasificación anual en cada punto de las aguas de la cuenca de estudio, y con los datos que aparecen en el anejo 1.12 para la clasificación mensual en cada punto de las aguas de la cuenca de estudio, mediante la utilización del programa Microsoft Excel.

Los iones mayoritarios se han representado en un diagrama de Piper. Este diagrama ternario permite ver el tipo dominante de las aguas y de esta manera, clasificarlas dentro de un contexto químico. Los iones mayoritarios utilizados son Na^+ , Ca^{2+} , k^+ y Mg^{2+} , como cationes; así como HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^- , como aniones.

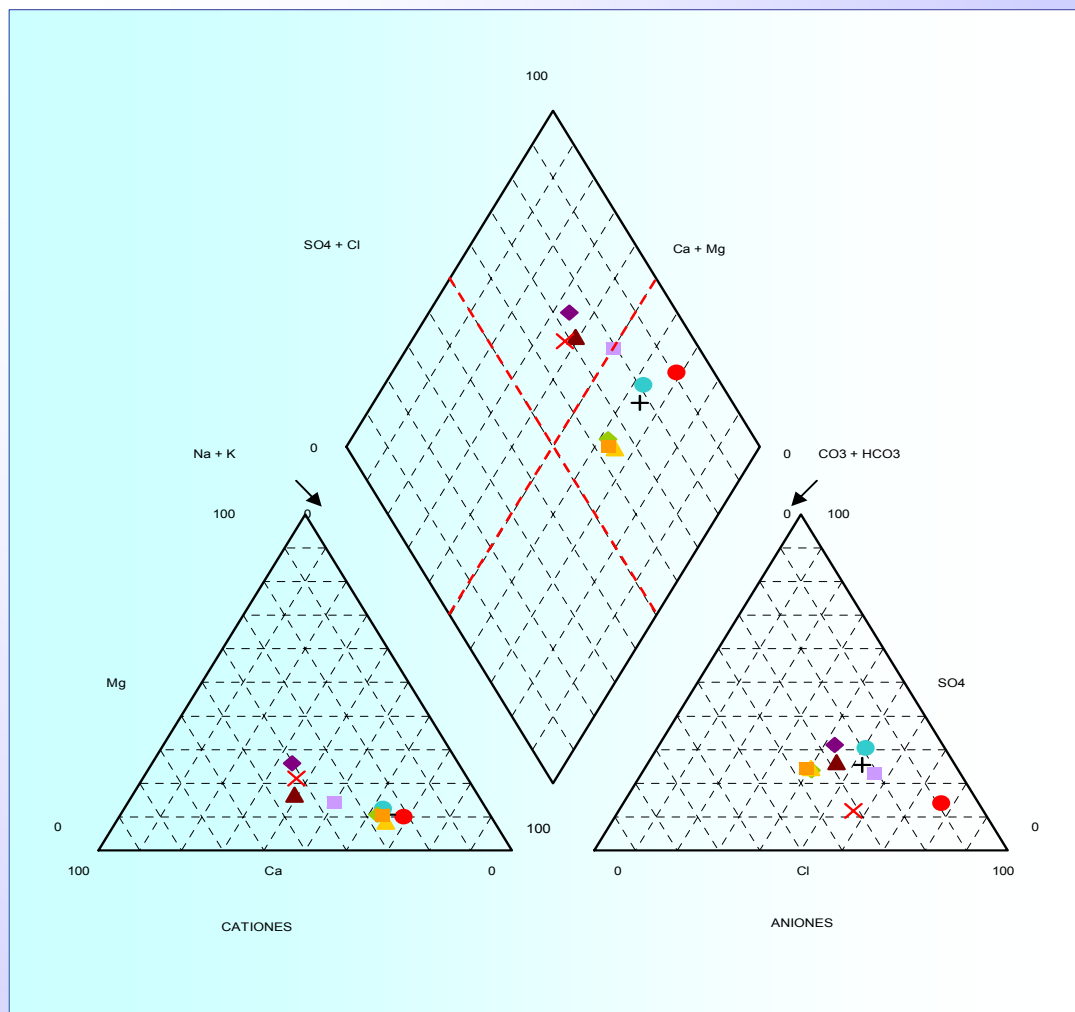
Según la representación en el diagrama de Piper (figura 29), la clasificación anual en cada punto de las aguas de la cuenca de estudio queda reflejada en la tabla 20, se observa que existen dos familias de aguas, una primera familia de aguas sulfatadas (puntos nº. 2, 3 y 5) y una segunda familia de aguas cloruradas puntos (nº. 1, 4, 6, 7, 8, 9 y 10). Las aguas cloruradas coincidiendo con el origen de las mismas indican otro tipo de clasificación y coincide con los puntos a priori con mayor contaminación antrópica.

Tabla 20: Clasificación de las aguas de la cuenca del río Guadarrama

Punto de Muestreo	Clasificación del agua según su contenido químico
1- E. Navalmedio	Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas
2- Arroyo de la Venta (Valle de la Fuenfría-Cercedilla)	Aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas
3- Cercedilla (Pueblo)	Aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas
4- Guadarrama (Pueblo)	Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.
5- El Escorial-Puerto de la Cruz Verde)	Aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas
6- Galapagar-La Navata)	Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas
7- E. de Molino de la Hoz-Pte. Romano)	Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas
8- Móstoles (Urbanización Guadarrama)	Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas
9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón)	Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas
10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006)	Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas

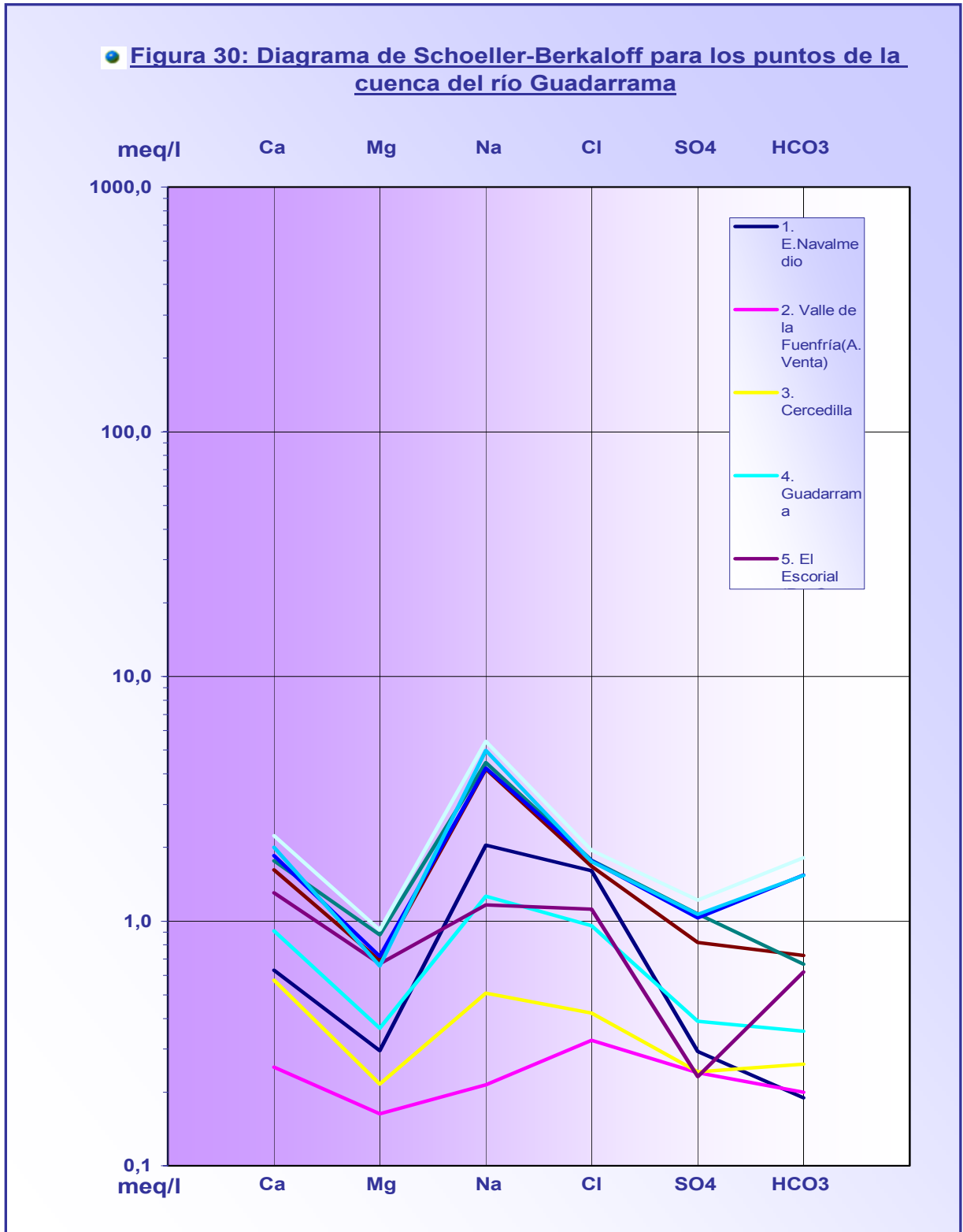
La evolución de las aguas a medida que bajamos desde el punto n.º. 1 al n.º. 10 aumenta el porcentaje de los iones sulfatos, bicarbonato, sodio y potasio, y disminuye el porcentaje de los iones calcio, magnesio y cloruro (Figura 29). En general, el tipo de aguas en la cuenca de estudio son cloruradas y/o sulfatadas sódicas.

Figura 29: Clasificación de las aguas de la cuenca del río Guadarrama



- 1. E. Navalmedio
- ◆ 2. Valle de la Fuenfría(A.Venta)
- ▲ 3. Cercedilla
- 4. Guadarrama
- ✕ 5. El Escorial (Pto.Cruz Verde)
- + 6. Galapagar-La Navata
- 7. E. Molino de la Hoz (pte.Retamar)
- ◆ 8. Móstoles (urb.Guadarrama)
- ▲ 9. Batres
- 10. Bargas

Asimismo, los iones mayoritarios se han representado en un diagrama de Schoeller-Berkaloff, en el cual puede apreciarse claramente los iones dominantes (Figura 30).



En la figura 30, puede observarse que las aguas de los puntos n°. 6, 7, 8, 9 y 10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar.

Destaca el comportamiento diferente del punto n°. 1, con concentraciones de los iones cloruro y sodio superiores a los puntos n°. 2, 3 y 4, situados aguas arriba; con una significativa reducción de los iones sulfato y magnesio y un ligero descenso del ión bicarbonato.

En el punto n°. 5 la concentración de bicarbonato se incrementa de forma más acentuada que en los cuatro primeros puntos, pero este comportamiento independiente está justificado porque está situado fuera del curso del río Guadarrama.

Las demás concentraciones iónicas aumentan en los puntos según bajamos hacia la desembocadura del río Guadarrama.

Según la representación del diagrama de Riverside (Figura 31) y siguiendo las normas de Riverside (anexo 1.14), se desprende que la clasificación anual en cada punto de las aguas para riego (S.A.R) de la cuenca de estudio es la siguiente:

- ✚ En los cinco primeros puntos las aguas para riego son C_1S_1 , es decir, son aguas de baja salinidad y con bajo contenido en sodio, aptas para el riego en la mayoría de los casos. Pudiendo existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad, y también pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
- ✚ En los cinco últimos puntos las aguas para riego son C_2S_1 , es decir, son aguas de salinidad media y con bajo contenido en sodio, aptas para el riego en la mayoría de los casos. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad, y también pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.

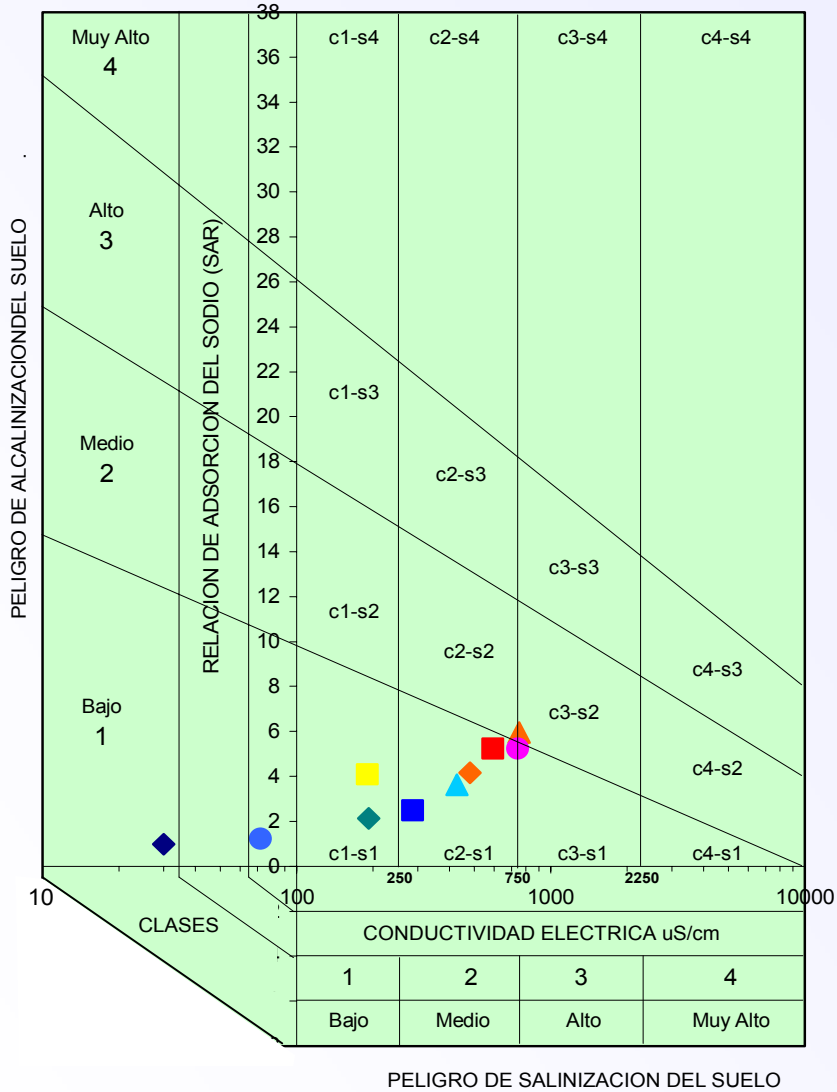
Concluyendo, las aguas estudiadas son de buena calidad aptas para el riego.

Figura 31: DIAGRAMA DE RIVERSIDE

CLASIFICACION DE LAS AGUAS PARA RIEGO

PUNTOS DE LA CUENCA DEL RIO GUADARRAMA

FECHA: Febrero 2006



- 1. E. Navalmedio
- ◆ 2. Valle de la Fuenfría(A.Venta)
- 3. Cercedilla
- ◆ 4. Guadarrama
- 5. El Escorial (Pto. Cruz Verde)
- ▲ 6. Galapagar-La Navata
- ◆ 7. E. Molino de la Hoz (pte. Retamar)
- 8. Móstoles (urb. Guadarrama)
- ▲ 9. Batres
- 10. Bargas

✓ Clasificación mensual en cada punto de las aguas de la cuenca del río Guadarrama

De los diagramas de Piper (Anejo 1.13); clasificación mensual en cada punto de las aguas de la cuenca de estudio; se observa que:

- ✚ Para el mes de Febrero, en todos los puntos las aguas son cloruradas y/o sulfatadas sódicas. La evolución de las aguas a medida que bajamos desde el punto n°.1 al n°.10 aumenta el porcentaje de los iones bicarbonato, sodio y potasio, y disminuye el porcentaje de los iones calcio, magnesio y cloruro. La tendencia de las aguas es ir hacia la zona de aguas bicarbonatadas sódicas.
- ✚ Para el mes de Marzo, en todos los puntos las aguas son cloruradas y/o sulfatadas sódicas. La tendencia de las aguas es ir hacia la zona de aguas bicarbonatadas sódicas.
- ✚ Para el mes de Abril, en todos los puntos las aguas son cloruradas y/o sulfatadas sódicas. La evolución de las aguas a medida que bajamos desde el punto n°.1 al n°.10 aumenta el porcentaje de los iones bicarbonato, sulfato y cloruro. La tendencia de las aguas es ir hacia la zona de aguas bicarbonatadas sódicas.
- ✚ Para el mes de Mayo, en el punto n°. 5 las aguas son sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas, en los restantes puntos las aguas son cloruradas y/o sulfatadas sódicas. La evolución de las aguas a medida que bajamos desde el punto n°.1 al n°.10 es primero aumenta el porcentaje de los iones sulfato y cloruro, a continuación disminuye el porcentaje de los iones calcio, magnesio. La tendencia de la aguas es ir hacia zonas más salinas.
- ✚ Para el mes de Junio, en los puntos n°. 4 y 5 las aguas son sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas, en los restantes puntos las aguas son cloruradas y/o sulfatadas sódicas. La evolución de las aguas a medida que bajamos desde el punto n°.2 al n°.10 es primero aumenta el porcentaje de los iones sulfato, bicarbonato y cloruro, a continuación disminuye el porcentaje de los iones calcio, magnesio, y tercero disminuye el porcentaje de los iones sulfato, cloruro, calcio, magnesio y bicarbonato. La tendencia de las aguas es ir hacia zonas más cloruradas y/o sulfatadas sódicas.
- ✚ Para el mes de Julio, en los puntos n°. 4 y 5 las aguas son sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas, en los restantes puntos las aguas son cloruradas y/o sulfatadas sódicas. La evolución de las aguas a medida que bajamos desde el punto n°.2 al n°.10 es primero aumenta el porcentaje de los iones sulfato y cloruro, a continuación disminuye el

porcentaje de los iones calcio, magnesio, y tercero disminuye el porcentaje de los iones sulfato y cloruro, aumentando el porcentaje del ión bicarbonato. La tendencia de las aguas es ir hacia la zona de aguas bicarbonatadas sódicas.

- ✚ Para el mes de Agosto, en los puntos n°. 1, 2, 3 y 5 las aguas son sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas, en los restantes puntos las aguas son cloruradas y/o sulfatadas sódicas. La evolución de las aguas a medida que bajamos desde el punto n°.1 al n°.10 es primero aumenta el porcentaje de ión cloruro y disminuye el porcentaje de los iones calcio y magnesio, a continuación desde el punto n°. 7 disminuye el porcentaje de los iones sulfato y cloruro, aumentando el porcentaje del ión bicarbonato. La tendencia de las aguas es ir hacia la zona de aguas bicarbonatadas sódicas.
- ✚ Para el mes de Septiembre los puntos se agrupan por familias, la primera son aguas de montaña (puntos n°. 2, 3 y 5) sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas, la segunda familia son aguas cercanas a embalses (puntos n°. 1, 6 y 7) son cloruradas y/o sulfatadas sódicas, y la tercera familia son aguas del cauce bajo del río (puntos n°. 8, 9 y 10) cloruradas y/o sulfatadas sódicas. La tendencia de las aguas es ir hacia la zona de aguas bicarbonatadas sódicas.
- ✚ Para el mes de Octubre, en los puntos n°. 2 y 3 las aguas son sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas, en el punto n°. 5 las aguas tienden de ir hacia la zona de aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas, para los puntos n°. 1, 6, 7 y 9 las aguas son cloruradas y/o sulfatadas sódicas, en los puntos n°. 8 y 10 las aguas tienden de ir hacia la zona de aguas bicarbonatadas sódicas.
- ✚ Para el mes de Noviembre, en los puntos n°. 1, 2 y 4 las aguas son cloruradas y/o sulfatadas sódicas, en los puntos n°. 3, 5, 6 y 7 las aguas son sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas, destaca en el diagrama un descenso del porcentaje de los iones sulfato y cloruro y un aumento del porcentaje del ión bicarbonato en los puntos últimos del río (puntos n°. 8, 9 y 10) donde las aguas están más contaminadas.
- ✚ Para el mes de Diciembre, en los puntos n°. 2, 3, 4, 5, 6 y 7 las aguas son sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas, en los puntos n°. 1, 8, 9 y 10 las aguas son cloruradas y/o sulfatadas sódicas. La tendencia de las aguas es ir hacia la zona de aguas bicarbonatadas sódicas.
- ✚ Para el mes de Enero, en los puntos n°. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9 las aguas son sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas, en los puntos n°.

9 y 10 las aguas son cloruradas y/o sulfatadas sódicas. La tendencia de las aguas es ir hacia la zona de aguas bicarbonatadas sódicas.

Concluyendo, principalmente las aguas estudiadas son aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas. En la cuenca alta del río Guadarrama (puntos n.º. 1, 2, 3 y 5) predomina el quimismo de las aguas, dado por la geología de la zona o las aguas subterráneas. En la cuenca media-baja del río Guadarrama (puntos n.º. 8, 9 y 10) aumenta el contenido en sales y la contaminación de sus aguas. El comportamiento de las aguas del embalse de Navalmedio (punto n.º. 1) es de manera diferente al resto de los puntos de muestreo, esto es porque es posiblemente por estar afectado por algún tipo de contaminación urbana procedente del Puerto de Navacerrada, incrementándose el porcentaje de los iones sodio y cloruro durante los meses de febrero, marzo y abril.

De los diagramas de Schoeller-Berkaloff (Anejo 1.13), en los cuales puede apreciarse claramente los iones dominantes, se observa que:

- ✚ En el mes de Febrero, destaca el comportamiento diferente del punto n.º. 1, con concentraciones de los iones cloruro y sodio superiores a los puntos n.º. 2, 3 y 4, con una significativa reducción de los iones sulfato y magnesio y un ligero descenso del ión bicarbonato. En el punto n.º. 5 la concentración de bicarbonato se incrementa de forma más acentuada que en los cuatro primeros puntos, pero este comportamiento independiente está justificado porque está situado fuera del curso del río Guadarrama. La concentración de magnesio es inferior a 0,1 meq/l en los puntos n.º. 2 y 3. Las aguas de los puntos n.º. 8, 9 y 10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar. Se aprecia la dominancia de los iones sodio y cloruro. Las demás concentraciones iónicas aumentan en los puntos según bajamos hacia la desembocadura del río Guadarrama.
- ✚ En el mes de Marzo, destaca el punto n.º. 1 por sus elevadas concentraciones de los iones cloruro y sodio superiores a los demás puntos. La concentración de magnesio es inferior a 0,1 meq/l en los puntos n.º. 2 y 3. Las aguas de los puntos n.º. 8, 9 y 10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar.
- ✚ En el mes de Abril, destaca el comportamiento diferente del punto n.º. 1, con concentraciones de los iones cloruro y sodio superiores a los puntos n.º. 2, 3 y 4, con una significativa reducción de los iones sulfato y magnesio y un ligero descenso del ión bicarbonato. La concentración de magnesio es inferior a 0,1 meq/l en los puntos n.º. 2 y 3. Se aprecia la dominancia del ión sodio. Las aguas de los puntos n.º. 6, 7, 8, 9 y 10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar.
- ✚ En el mes de Mayo, destaca una significativa reducción del ión bicarbonato en los puntos n.º. 8, 9 y 10. Las aguas de los puntos n.º. 8, 9 y

10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar. La concentración de magnesio es inferior a 0,1 meq/l en los puntos n°. 2 y 3. El punto n°. 1, tiene concentraciones de los iones cloruro y sodio superiores a los puntos n°. 2, 3 y 5, con una significativa reducción de los iones sulfato y magnesio y un ligero descenso del ión bicarbonato.

- ✚ En el mes de Junio, el punto n°. 1, tiene concentraciones de los iones sulfato, cloruro y sodio superiores a los puntos n°. 2 y 3, con una significativa reducción de los iones sulfato y magnesio y un ligero descenso del ión bicarbonato, en el punto n°. 6 la concentración de bicarbonato se incrementa. La concentración de magnesio es inferior a 0,1 meq/l en los puntos n°. 1, 2 y 3. Las aguas de los puntos n°. 6, 7, 8, 9 y 10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar.
- ✚ En el mes de Julio, el punto n°. 1, tiene concentraciones de los iones sulfato, cloruro y sodio superiores a los puntos n°. 2 y 3. La concentración de magnesio es inferior a 0,1 meq/l en los puntos n°. 2 y 3. Las aguas de los puntos n°. 6, 7, 8, 9 y 10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar.
- ✚ En el mes de Agosto, destaca el punto n°. 8 por el descenso de los iones sodio, magnesio; el punto n°. 2 por el descenso de los iones sodio y de tener la misma concentración de ión calcio y magnesio; el punto n°. 5 por el descenso de los iones sodio. El punto n°. 1 tiene concentraciones de los iones sulfato, cloruro y sodio superiores a los puntos n°. 2 y 3, y desciende bruscamente las concentraciones de los iones magnesio y bicarbonato. La concentración de magnesio es inferior a 0,1 meq/l en los puntos n°. 1 y 9. Las aguas de los puntos n°. 6, 7 y 10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar.
- ✚ En el mes de Septiembre, destaca el punto n°. 2 por tener concentraciones de sodio y magnesio inferiores a 0,1 meq/l. El punto n°. 1 tiene concentraciones de los iones sulfato, cloruro y sodio superiores a los puntos n°. 2 y 3, y desciende bruscamente las concentraciones de los iones magnesio y bicarbonato. El punto n°. 7 tiene concentración de bicarbonato inferior al punto n°. 6. Las aguas de los puntos n°. 6, 8, 9 y 10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar.
- ✚ En el mes de Octubre, destaca el punto n°. 2 por el descenso de las concentraciones de los iones cloruro y sodio (<0,1 meq/l) y el aumento de la concentración del ión magnesio. El punto n°. 1 tiene la misma concentración de ión sodio y cloruro siendo estas superiores a los puntos n°. 2 y 3, al igual que el sulfato. En el punto n°. 5 la concentración del ión bicarbonato es superior a los puntos n°. 1, 2, 3, 6 y 7, desciende ligeramente la concentración de ión sodio y bruscamente la del ión sulfato, aumentando el ión magnesio. El punto n°. 7 tiene concentración de

bicarbonato inferior al punto n.º 6. Las aguas de los puntos n.º 6, 8, 9 y 10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar.

- ✚ En el mes de Noviembre, destaca por el agrupamiento de los puntos en dos familias, las aguas de los puntos n.º 6, 7, 8, 9 y 10 pertenecen a una y la otra está formada por los puntos n.º 1, 4 y 5. En el punto n.º 3 disminuye las concentraciones de los iones sodio y magnesio ($<0,1$ meq/l), y el punto n.º 2 disminuye la concentración del ión calcio, tendencias opuestas al incremento general para el caso del sodio y calcio.
- ✚ En el mes de Diciembre, el punto n.º 1, tiene concentraciones de los iones cloruro y sodio superiores a los puntos n.º 2, 3, 4 y 5, desciende la concentración del ión sulfato y aumenta ligeramente la concentración de ión bicarbonato. En el punto n.º 2 disminuye las concentraciones de los iones cloruro y sodio ($<0,1$ meq/l), y tiene la misma concentración de ión magnesio y calcio. En el punto n.º 3 disminuye la concentración del ión sodio. Las aguas de los puntos n.º 8, 9 y 10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar.
- ✚ El mes de Enero, destaca por el comportamiento diferente en todos los puntos al resto de los meses analizados. El descenso de la concentración del ión magnesio es muy brusco para el punto n.º 10, aumentando en los puntos n.º 2, 3 y 7, en este último punto destaca el aumento de la concentración del ión sulfato. En el punto n.º 10 aumenta bruscamente la concentración del ión calcio y ligeramente el ión bicarbonato. En el punto n.º 1 las concentraciones de magnesio, sodio y cloruro son iguales, y muy similares para el punto n.º 5. En el punto n.º 4 las concentraciones de magnesio y calcio son iguales. No existe ninguna familia.

Concluyendo, destaca el comportamiento diferente del punto n.º 1, con concentraciones de los iones cloruro y sodio superiores a los puntos de cabecera del río. Se aprecia la dominancia de los iones sodio y cloruro, tendencia al incremento general del contenido salino en prácticamente todos los meses y puntos analizados.

En el punto n.º 5 la concentración de bicarbonato se incrementa de forma más acentuada que en los cuatro primeros puntos, pero este comportamiento independiente está justificado porque está situado fuera del curso del río Guadarrama.

Destaca las concentraciones bajas del ión magnesio en casi todos los meses muestreados. Las demás concentraciones iónicas aumentan en los puntos según bajamos hacia la desembocadura del río Guadarrama.

El mes de Enero, destaca por el comportamiento diferente en todos los puntos al resto de los meses analizados.

Prácticamente en todos los meses muestreados, las aguas de los puntos n°. 8, 9 y 10 pertenecen a una misma familia, con comportamiento similar.

De los diagramas de Riverside (Anejo 1.15), y siguiendo las normas de Riverside (anejo 1.14), se desprende que la clasificación mensual en cada punto de las aguas para riego (S.A.R) de la cuenca de estudio es la siguiente:

✚ *Para los meses de marzo, abril, noviembre, diciembre y enero:*

- Los cinco primeros puntos de muestreo las aguas para riego son C_1S_1
- Los cinco últimos puntos de muestreo las aguas para riego son C_2S_1

✚ *Para los meses de mayo y junio:*

- Los puntos de muestreo n°. 1, 2, 3 y 5 las aguas para riego son C_1S_1
- Los puntos de muestreo n°. 4, 6, 7, 8, 9 y 10 las aguas para riego son C_2S_1

✚ *Para el mes de febrero:*

- Los puntos de muestreo n°. 1, 2, 3 y 4 las aguas para riego son C_1S_1
- Los puntos de muestreo n°. 5, 6, 7, 8, 9 y 10 las aguas para riego son C_2S_1

✚ *Para el mes de julio:*

- Los puntos de muestreo n°. 1, 2 y 3 las aguas para riego son C_1S_1
- Los puntos de muestreo n°. 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 las aguas para riego son C_2S_1

✚ *Para el mes de agosto:*

- Los puntos de muestreo n°. 1, 2 y 3 las aguas para riego son C_1S_1
- Los puntos de muestreo n°. 5 y 8 las aguas para riego son C_2S_1
- Los puntos de muestreo n°. 6, 7, 9 y 10 las aguas para riego son C_2S_2

✚ *Para el mes de septiembre:*

- Los puntos de muestreo n°. 1, 2 y 3 las aguas para riego son C_1S_1
- Los puntos de muestreo n°. 5 las aguas para riego son C_2S_1
- Los puntos de muestreo n°. 6, 7, 8, 9 y 10 las aguas para riego son C_2S_2

✚ *Para el mes de octubre:*

- Los puntos de muestreo n°. 1, 2 y 3 las aguas para riego son C_1S_1
- Los puntos de muestreo n°. 5, 6, 7, 8, 9 y 10 las aguas para riego son C_2S_1

Las aguas para riego tipo C_1S_1 , son aguas de baja salinidad y con bajo contenido en sodio, aptas para el riego en la mayoría de los casos. Pudiendo existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad, y también pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.

Las aguas para riego tipo C_2S_1 , son aguas de salinidad media y con bajo contenido en sodio, aptas para el riego en la mayoría de los casos. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad, y también pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.

Las aguas para riego tipo C_2S_2 , son aguas de salinidad media y con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario. Son aguas utilizables para el riego con precauciones.

Concluyendo, en los meses de agosto y septiembre los seis últimos puntos de muestreo las aguas para riego son C_2S_2 , es decir, son aguas utilizables para el riego con precauciones. Exceptuando el punto n°. 8 en agosto donde las aguas para riego son del tipo C_2S_1 , es decir, son aguas de buena calidad aptas para el riego.

Para el resto de meses las aguas estudiadas son de buena calidad aptas para el riego.

4.2.5 Metales pesados en las aguas

El estudio de la presencia de metales pesados en aguas de ríos, constituye un aporte de información a la disposición de carácter ambiental de dichos ríos y contribuirá al diagnóstico de cada una de sus cuencas. La investigación de la presencia de metales pesados en determinadas aguas, permite conocer las rutas de contaminantes y su interacción con otras sustancias presentes en las aguas.

En el presente trabajo de investigación se estudia el contenido de distintos elementos contaminantes (cobre, cadmio, níquel, cromo, zinc y plomo) en las aguas del río Guadarrama, de una forma general, el nivel de contaminación de sus aguas por estos seis elementos, sin estudiar las causas que condicionan la existencia de contaminación en dichas muestras, dejando para posteriores investigaciones.

Los criterios que se han utilizado para discriminar los datos ha sido el nivel de potabilidad del agua reflejado en el R.D 140/2003 para aguas de abastecimiento a la población, para el cobre, cadmio, níquel, cromo y plomo. En el caso del cinc se ha utilizado la Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público (Real Decreto 1.138/1990)

Los resultados de la determinación de metales pesados obtenidos son valores medios anuales (Tabla 21), están representados en la figura 32. De la observación de dichos datos se deduce lo siguiente:


Los elementos estudiados que superan las concentraciones máximas admisibles, según la legislación vigente, son el cadmio en los puntos nº. 3, 5, 8, 9 y 10, y plomo en los puntos nº. 4, 6, 7, 8, 9 y 10.

Según los datos recogidos en la literatura muestran que los casos en que se han detectado niveles elevados de cadmio y plomo en aguas, estos están relacionados con actividad minera o industrial importante. Asimismo es posible que la fuente de contaminación de estos metales este condicionada por las características geológicas del terreno, para ello consideramos como fondo geoquímico su concentración en los puntos de cabecera de la cuenca.

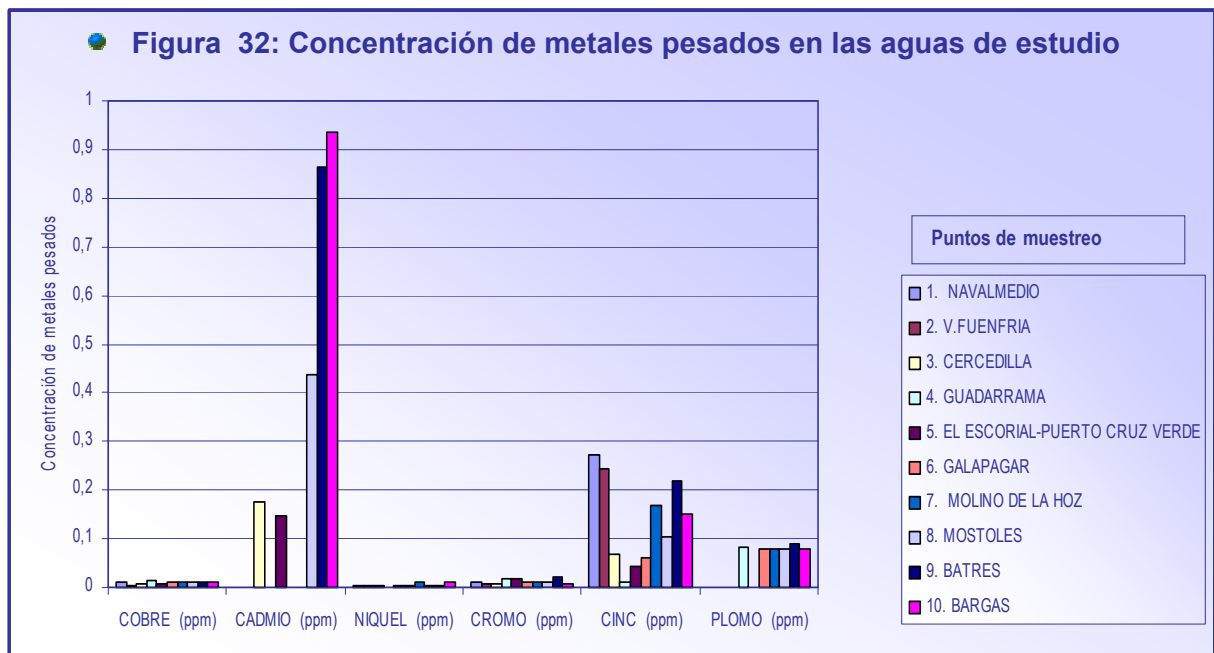
En la cuenca de estudio estos niveles de cadmio y plomo pueden producirse por contaminación industrial. También puede estar relacionado con el desarrollo de los suelos a lo largo de la cuenca.

Asimismo, en todos los puntos de muestreo los metales pesados más significativos son el cadmio, cinc y plomo respectivamente.

En general, los niveles de concentración de metales pesados son bajos estos se explican por la baja solubilidad de estos metales en el agua y la tendencia natural de estos a precipitar y acumularse en los sedimentos.

 Tabla 21: Concentración de Metales Pesados presentes en el río Guadarrama y límites permisible según legislación española						
Puntos de muestreo	COBRE (ppm)	CADMIO (ppm)	NIQUEL (ppm)	CROMO (ppm)	CINC (ppm)	PLOMO (ppm)
1- E. Navalmedio	0,01	<L.D	0,003	0,009	0,274	<L.D
2- Arroyo de la Venta (Valle de la Fuenfria-Cercedilla)	0,004	<L.D	0,004	0,007	0,244	<L.D
3- Cercedilla (Pueblo)	0,007	0,177	0,003	0,008	0,068	<L.D
4- Guadarrama (Pueblo)	0,015	<L.D	<LD	0,0167	0,010	0,083
5- El Escorial-Puerto de la Cruz Verde)	0,006	0,147	0,005	0,018	0,044	<L.D
6- Galapagar-La Navata)	0,01	<L.D	0,004	0,009	0,061	0,08
7- E. de Molino de la Hoz-Pte. Romano)	0,01	<L.D	0,01	0,012	0,168	0,08
8- Móstoles (Urbanización Guadarrama))	0,009	0,439	0,005	0,009	0,103	0,08
9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón))	0,01	0,864	0,005	0,021	0,22	0,09
10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006))	0,01	0,934	0,011	0,008	0,152	0,08
Límites según R.D 140/2003- R.D 1138/1990	2	0,005	0,02	0,05	5	0,03

NOTA : <L.D = por debajo del límite de detección



4.2.6 Datos obtenidos de la determinación del Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQUA)

La determinación del Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQUA) en la cuenca de estudio se ha llevado a cabo siguiendo los criterios formulados en el apartado 3.2.3, y se han utilizado los datos que aparecen en el anejo 1.12 para el cálculo del ISQUA en los diez puntos de muestreo. Los resultados obtenidos (Tabla 22) se representan en la figura 33, esta cuenta con líneas marcadas de un color respectivo que categorizan la calidad del agua de acuerdo a los rangos en los que se ubican los valores del ISQUA propuestos por Rubió, S. (2000).

Al evaluar los resultados del ISQUA con los rangos de calidad establecidos para los diferentes usos (Tabla 16), es posible identificar puntos con características similares de calidad del agua.

Los puntos n°. 1, 3 y 4, presentan prácticamente para todos los meses de muestreo una calidad del agua apta, según la clasificación del ISQUA, para abastecimiento para el consumo humano, la recreación por contacto directo y la piscicultura.

Destaca el punto n°. 2 por presentar prácticamente para todos los meses de muestreo una calidad del agua apta para todos los usos, exceptuando los meses de septiembre y diciembre donde la calidad del agua es apta para abastecimiento para el consumo humano, la recreación por contacto directo y la piscicultura.

El punto n°. 5 presenta para los meses de febrero y marzo una calidad del agua apta para todos los usos, en septiembre la calidad del agua es apta para el riego, industria, abastecimiento para consumo humano con tratamiento especial, y para el resto la calidad del agua es apta para abastecimiento para el consumo humano, la recreación por contacto directo y la piscicultura.

Durante el periodo de estudio, los puntos n°. 6, 7, 8, 9 y 10, presentan una calidad del agua apta, para abastecimiento para el consumo humano, la recreación por contacto directo y la piscicultura; o para riego, industria, abastecimiento para consumo humano con tratamiento especial. Destacando el punto n°. 6 por presentar en los meses de febrero y septiembre una calidad del agua apta para Recreación por contacto indirecto (navegación) y refrigeración industrial.

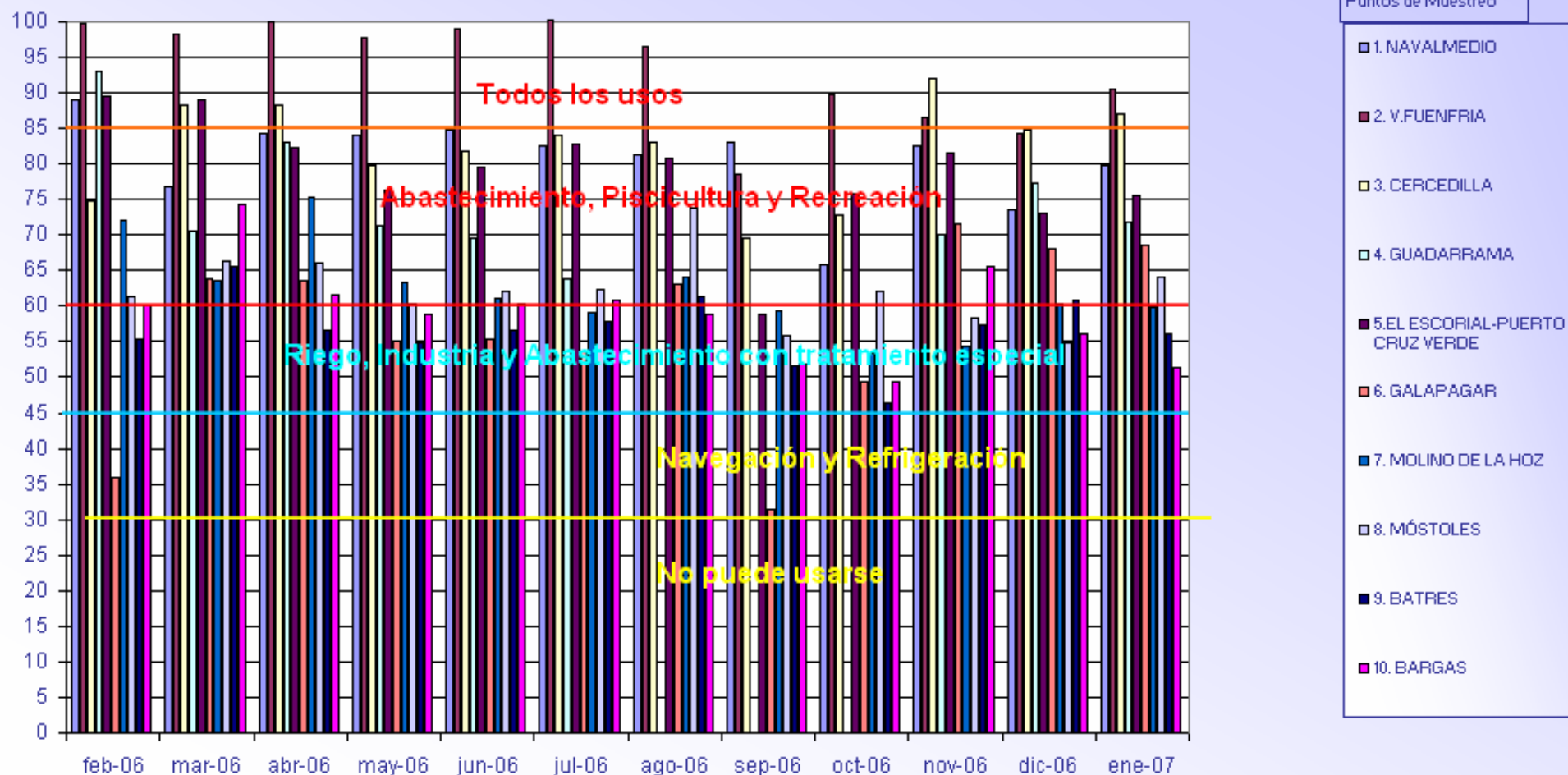
Concluyendo, destaca el punto n°. 2 por presentar los mayores valores del índice ISQUA, que reflejan la mejor calidad del agua y siendo esta apta para todos los usos, esto se debe muy posiblemente a la escasa influencia de la actividad humana existente en la zona.

A partir del punto n°. 6 hasta su desembocadura la calidad de las aguas va empeorando, se observan asentamientos urbanos (urbanizaciones y chabolas),

asentamientos industriales (viveros, industria papelera, etc.) y ganaderos que contribuyen a su deterioro, reflejándose en la disminución del ISQUA.

Tabla 22: Resultados obtenidos de la determinación del Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQUA) en la cuenca del río Guadarrama												
Puntos de muestreo	feb-06	mar-06	abr-06	may-06	jun-06	jul-06	ago-06	sep-06	oct-06	nov-06	dic-06	ene-07
1- E. Navalmedio	89,05	76,76	84,24	84,01	84,84	82,66	81,28	83,09	65,75	82,51	73,48	79,79
2- Arroyo de la Venta (Valle de la Fuenfría-Cercedilla)	99,63	98,29	100	97,86	99,03	100	96,62	78,45	89,77	86,60	84,25	90,40
3- Cercedilla (Pueblo)	74,77	88,33	88,20	79,69	81,89	84,08	82,97	69,47	72,83	92,02	84,88	87,05
4- Guadarrama (Pueblo)	93,11	70,67	82,98	71,31	69,69	63,73	Río Seco	Río Seco	Río Seco	70,18	77,40	71,78
5- El Escorial- Puerto de la Cruz Verde)	89,48	89,04	82,25	76,35	79,63	82,69	80,89	58,88	75,91	81,58	73,04	75,62
6- Galapagar-La Navata)	35,97	63,88	63,65	55,20	55,36	53,52	63,06	31,39	49,50	71,69	68,17	68,67
7- E. de Molino de la Hoz-Pte. Romano)	72,06	63,65	75,22	63,23	61,02	59,23	63,98	59,36	53,31	54,27	60,39	59,74
8- Móstoles (Urbanización Guadarrama)	61,31	66,22	66,17	60,26	62,20	62,32	73,92	55,80	62,01	58,40	54,92	64,15
9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón)	55,36	65,59	56,65	54,89	56,53	57,86	61,42	51,66	46,40	57,39	60,77	55,99
10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006))	60,17	74,32	61,55	58,95	60,45	60,86	58,92	51,87	49,38	65,70	56,14	51,33

Figura 33: Clasificación de la calidad de las aguas según el Índice ISQUA en función de su uso en la cuenca de estudio



4.2.7 Longitud de la cuenca de estudio

Para medir la longitud total de la cuenca del río Guadarrama se ha seguido la metodología descrita en el apartado 3.1.4, de los resultados obtenidos (Tabla 23, 24 y 25), se representan las longitudes de las cuencas del río Guadarrama y Aulencia (Figuras 34 y 35).

La longitud total de la cuenca del río Guadarrama es de 135,377 km, la cuenca del río Navalmedio es de 10,3 km, la cuenca del río Aulencia es de 63,156 km.

Figura 34: Evolución de la longitud de la cuenca del río Guadarrama

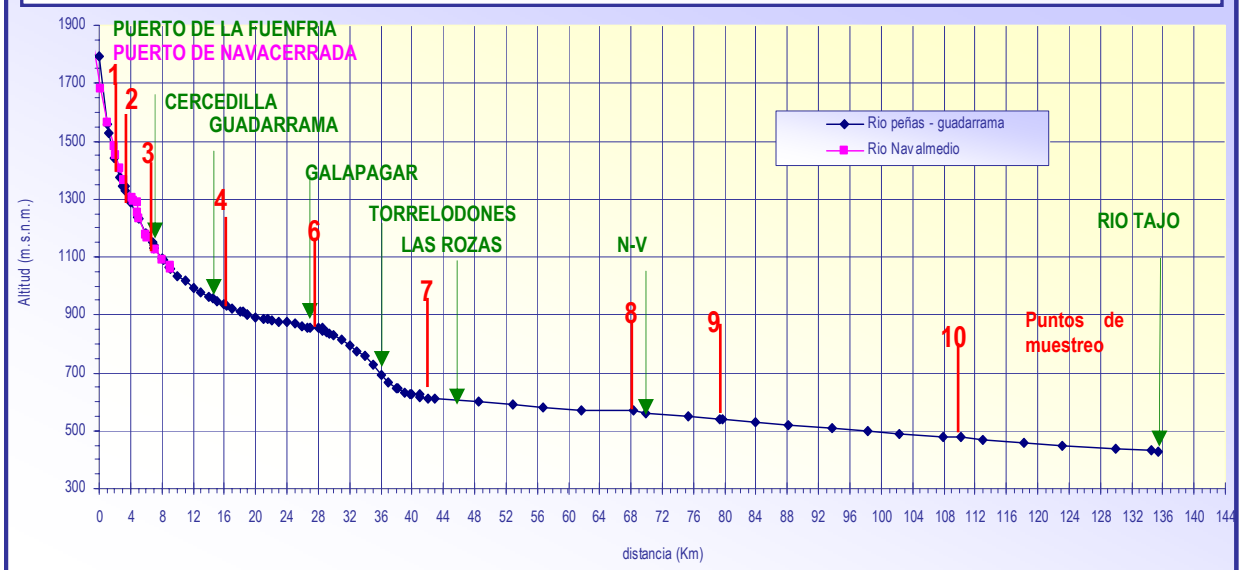
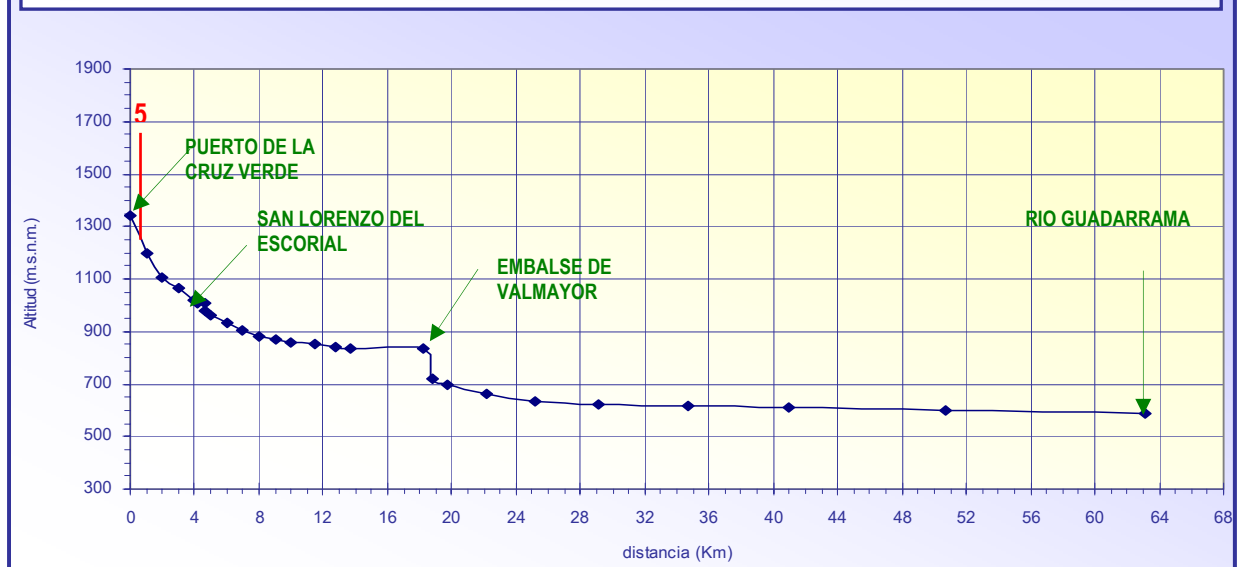


Figura 35: Evolución de la longitud de la cuenca del río Aulencia



 **Tabla 23: Longitud de la cuenca del río Navalmedio**

Cuenca-río Navalmedio	Longitud del río (km)	Altitud (m)	Observaciones
Punto inicial	0	1858	Punto inicial situado en el Puerto de Navacerrada
	1	1680	
	2	1565	
Nacimiento del río Navalmedio	2,725	1480	Punto situado en el nacimiento del río Navalmedio (confluencia del arroyo Matasalgado - regato del pto. Navacerrada)
	3	1450	
	3,455	1405	
	4	1365	
	5	1305	Punto de muestreo nº. 2 (E. Navalmedio)
	5,28	1292	Punto situado en el puente de la vía de servicio del Embalse de Navalmedio
	5,745	1290	Punto situado en el muro del Embalse de Navalmedio
	5,795	1252	Punto situado en el puente del Embalse de Navalmedio
	6	1235	
	6,785	1177	Punto situado en la ctra. Cercedilla - junta con río Pradillo
	7	1168	Punto situado en el río de las Fuentes
	8	1125	Punto situado en el puente de ferrocarril de Cercedilla
	9	1092	
	10	1069	
Punto final	10,03	1060	Punto situado en el nacimiento del río Guadarrama (confluencia del río de las Fuentes - río de la Venta)

 **Tabla 24: Longitud de la cuenca del río Aulencia**

Cuenca-río Aulencia	Longitud del río (km)	Altitud (m)	Observaciones
Punto inicial	0	1342	Punto situado en el Puerto de la Paradilla (cerca al puerto de la Cruz Verde)
	1,036	1200	Punto de muestreo nº.5 (El Escorial-puerto de la Cruz Verde)
	2	1105	Punto situado en el Arroyo del Batán
	3	1065	Punto situado junto a la M-505. km.33
	4	1020	Punto situado junto al paso del arroyo del Batán bajo la M-505
	4,15	1006	Punto situado en la cola del Embalse del Batán
	4,6	1006	Punto situado en el muro del Embalse del Batán
	4,605	981	Punto situado en la base del Embalse del Batán
	5	962	Punto situado en el Arroyo del Batán
	6	935	Punto situado en el Arroyo del Batán
	7	907	Punto situado en el Arroyo del Batán
	8	884	Punto situado en el Arroyo del Batán
	9	869	Punto situado en el Arroyo del Batán
	10	860	Punto situado en el Río Aulencia
	11,461	850	Punto situado en el Río Aulencia

🌐 Tabla 24: Longitud de la cuenca del río Aulencia			
Cuenca-río Aulencia	Longitud del río (km)	Altitud (m)	Observaciones
	12,75	840	Punto situado en el Río Aulencia
	13,735	833	Punto situado en la reclusa o entrada del Embalse de Valmayor
	18,175	833	Punto situado en el muro del Embalse del Valmayor (desde la cola del río Aulencia hasta el muro)
	18,776	721	Punto inicial situado en la base del muro del E. Valmayor
	19,776	699	
	22,146	661	
	25,146	636	
	29,146	621	
	34,646	616	
	40,976	609	No hay referencia de línea de nivel topográfica, bajamos hasta 600 m
	50,706	600	
Punto final	63,146	590	Junta del río Aulencia con el río Guadarrama

🌐 Tabla 25: Longitud de la cuenca del río Guadarrama			
Cuenca-río Guadarrama	Longitud del río (km)	Altitud (m)	Observaciones
Punto inicial	0	1792	Punto inicial situado en el Puerto de la Fuenfría
	1	1560	
	1,203	1530	
	2	1440	Punto situado 45 m antes del punto de muestreo nº. 1 - confluencia del arroyo de los Acebos
	2,625	1375	Punto situado en el punto de muestreo nº. 1 (Las Berceas - Valle de la Fuenfría)
	3	1343	Punto situado en la cola del Embalse de la Venta a las Berceas
	3,27	1343	Punto situado en el muro del Embalse de la Venta a las Berceas
	3,32	1330	Punto situado en la base del Embalse de la Venta a las Berceas
	3,9	1297	Punto situado en el punto donde se realizó el evento de tormenta
	4	1290	
	4,891	1240	Punto situado en puente de la Venta (ctra. M-906)
	5	1235	
	6	1183	
	6,17	1175	
	6,87	1150	Punto situado en el puente bajo la estación de cercanías (RENFE) de Cercedilla
	6,95	1140	Punto situado en el puente viejo de piedra (ctra. M-622)
	7	1133	
	7,05	1130	Punto de muestreo nº.3 (Cercedilla)
	8	1097	
	8,27	1088	Punto situado en la confluencia del río de la Venta - arroyo de la Teja (Guadarrama alto)
	9	1065	
Nacimiento del río	9,15	1060	Punto situado en el nacimiento del río Guadarrama (confluencia del

 **Tabla 25: Longitud de la cuenca del río Guadarrama**

Cuenca-río Guadarrama	Longitud del río (km)	Altitud (m)	Observaciones
Guadarrama			rió de las Fuentes - río de la Venta)
	10	1035	
	11	1017	
	12	995	
	13	980	
	14	963	
	14,62	958	Punto situado en la junta con el arroyo del Tejo
	15	949	
	16	938	
	16,325	931	Punto de muestreo nº.4 (Guadarrama)
	17	923	
	18	913	
	18,33	911	Punto situado en la Depuradora de el Chaparral (T.M Guadarrama)
	18,92	903	
	19	902	
	20	892	
	21	886	
	21,52	885	Punto situado en la junta con el arroyo Guaten Segundo
	22	880	
	23	878	
	24	874	
	25	870	
	26	859	
	26,635	855	Punto situado en la cola del Embalse de las Nieves
	27	855	Punto situado en el Embalse de las Nieves
	28	855	Punto situado en el Embalse de las Nieves
	28,555	855	Punto situado en el muro del Embalse de las Nieves
	28,565	845	Punto situado en la base del Embalse de las Nieves
	29	840	
	29,49	835	Punto de muestreo nº. 6 (Galapagar - La Navata)
	30	830	
	31	814	
	32	792	Punto situado a unos 170 m de la confluencia del arroyo de Peregrinos
	33	776	
	34	760	Se encaja el río en un cañón
	35	730	Se encaja el río en un cañón
	36	693	
	37	667	
	38	649	
	38,12	646	Punto situado en la Presa del Gasco (ruinas), (muro de la presa a unos 700 m y base a 645 m aproximadamente)
	39	633	
	39,7	626	Punto situado en la cola de la presa del Embalse Molino de la Hoz
	40	626	Punto situado en el Embalse Molino de la Hoz
	40,995	626	Punto situado en el muro del Embalse Molino de la Hoz (cota superior)

Tabla 25: Longitud de la cuenca del río Guadarrama			
Cuenca-río Guadarrama	Longitud del río (km)	Altitud (m)	Observaciones
	41	616	Punto situado en la base del Emblase Molino de la Hoz
	42,05	613	Punto de muestreo nº. 7 (E. Molino de la Hoz)
	43	610	
	48,45	600	(frente a colegio)
	52,865	590	Punto situado en la junta con el río Aulencia que viene de El Escorial
	56,683	580	
	61,745	570	
	68,39	570	Punto de muestreo nº.8 (Móstoles-urb. Guadarrama)
	69,975	560	Punto situado en el puente N-V
	75,387	550	Punto situado justo en la línea topográfica de nivel
	79,33	541	Punto de muestreo nº. 9 (Batres- junto al pozo de Batres del mapa)
	79,645	540	Punto situado justo en la línea topográfica de nivel
	83,947	530	
	88,196	520	
	93,769	510	
	98,346	500	
	102,252	490	
	107,914	480	
	110,259	478	Punto de muestreo nº.10 (Bargas- debajo del puente de la CM-4003)
	113,031	470	
	118,293	460	
	123,126	450	
	130,05	440	
	134,556	430	
Desembocadura del río Guadarrama	135,377	429	Punto situado en la desembocadura del río Guadarrama con el río Tajo

4.3 Determinación del coeficiente de exportación de nutrientes en la cuenca de estudio

4.3.1 Variación de la concentración de nutrientes con el caudal

En el apartado 4.2.2 se realizó una primera aproximación en el análisis de la relación existente entre los distintos parámetros analizados de una manera indiscriminada, se vio la baja correlación existente entre el caudal y los nutrientes en sus distintas formas químicas, posponiendo para éste apartado un análisis de correlación más riguroso.

El estudio de la variación de la concentración de nutrientes con el caudal en la cuenca de estudio se ha llevado a cabo siguiendo los criterios formulados en el apartado 3.3.1, se han utilizado los datos que aparecen en el anejo 1.12 para la realización del modelo estadístico entre el nitrógeno total y el fósforo total con el caudal en los diez puntos de muestreo.

En la tabla 26.1 se presentan las ecuaciones de regresión del N_T y P_T sobre el caudal en los distintos puntos de muestreo.

La cuantificación de los usos del suelo en cada subcuenca de estudio (Tabla 9) va a ser de gran utilidad a la hora de interpretar los resultados obtenidos (Tabla 26.1) del análisis de regresión, que junto con la observación de las distintas agrupaciones morfológicas de las curvas de regresión (Figura 36), y de acuerdo con lo explicado en la figura 14, y según las matrices de correlación obtenidas (Tabla 26.2), se deduce lo siguiente:

- ✚ Un primer grupo de las curvas de regresión nos asocia los puntos nº 1, 2 y 5, como puntos situados en subcuencas con un claro predominio de fuentes difusas, presentando en época de estiaje fuentes difusas de contaminación. Las subcuencas que representan están caracterizadas con un uso de suelo predominante forestal.
- ✚ Un segundo grupo de las curvas de regresión nos asocia los puntos nº 3 y 4, como puntos situados en subcuencas con un claro predominio de fuentes mixtas, es decir participan tanto fuentes puntuales como difusas.

En estos puntos de cabecera de la cuenca de estudio (nº 1, 2 y 5), el coeficiente de correlación entre el N_T , P_T y caudal es muy bajo, y cuyas gráficas vienen asociadas a fuentes de origen difusas lo cual resulta razonable debido a la vegetación existente en el área de estos puntos y a los propios manantiales de la zona que dan un aporte constante de nutrientes, y en el caso de los puntos nº 3 y 4 además vienen asociadas a fuentes de origen puntual debido a los vertidos urbanos de la segunda residencia

existente en la zona. Destaca el punto nº 4 con un valor de 0,6 en el caso del nitrógeno y cuya gráfica viene asociada a fuentes de origen puntual lo cual resulta razonable ya que en este punto se recogen los vertidos urbanos procedentes del pueblo de Guadarrama.

- ✚ Un tercer grupo de las curvas de regresión nos asocia los puntos nº 6 y 7, como puntos situados en cuencas con un claro predominio de fuentes puntuales. En estos puntos el coeficiente de correlación entre el N_T , P_T y caudal es muy bajo. El punto nº 6 presenta un valor de -0,6 en el caso del nitrógeno y cuya gráfica viene asociada a fuentes de origen puntual lo cual resulta razonable ya que en este punto se recogen los vertidos urbanos procedentes fundamentalmente de urbanizaciones de la zona.
- ✚ Un cuarto grupo de las curvas de regresión nos asocia los puntos nº 8, 9 y 10, como puntos situados en subcuencas con un claro predominio de fuentes mixtas. Las subcuencas que representan están caracterizadas con un uso de suelo predominante agrícola, asimismo destaca el punto nº 8 por el uso de suelo urbano (urbanizaciones y chabolas cercanas al río Guadarrama) e industrial (papelera, etc.).

En estos puntos el coeficiente de correlación entre el N_T , P_T y caudal es muy bajo, destacan el punto nº 8 presenta un valor de 0,6 en el caso del nitrógeno y según la gráfica nos indica un predominio de fuentes mixtas, el punto nº 9 presenta un valor de 0,6 en el caso del fósforo y cuya gráfica viene asociada a fuentes mixtas, y por último el punto nº 10 presenta un valor de 0,5 en el caso del nitrógeno y según la gráfica nos indica un predominio de fuentes mixtas. Estos valores nos resultan razonables ya que en estos puntos se recogen los vertidos urbanos procedentes de los pueblos y urbanizaciones de la zona, y se producen pérdidas de fertilizantes de las explotaciones agrícolas.

En general, las curvas de regresión obtenidas (Figura 36) para cada uno de los puntos de muestreo, se corresponden con las expresadas en el modelo teórico de la figura 14, por tanto puede predecirse el origen de éstos nutrientes en cada caso, si bien en los puntos nº 1, 2, 3, 4 y 8 para el caso del nitrógeno las gráficas se ajustan mejor a una ecuación polinomial de orden 4 que a una ecuación potencial.

Según la bibliografía consultada existen tres tipos de curvas teóricas (Figura 14) dadas por Fricker (1980), se ha observado que en los puntos de cabecera (nº 1, 2 y 5) durante los periodos de lluvias intensas la concentración de nutrientes aumenta rápidamente al aumentar el caudal, presenta un pico definido y disminuye rápidamente, para finalmente quedar una concentración constante de nutrientes en suspensión. Esta evolución estaría provocada por arrastres de material derivados de eventos de precipitación intensa y su disolución durante el transporte de los materiales arrastrados o sedimentos.

Para finalizar, citar que tanto en este estudio como en los citados en la bibliografía se coincide en encontrar una línea de regresión cuya ecuación es:

$$y = a \cdot x^b$$

Los coeficientes de exportación crecen de forma potencial con el caudal, obteniendo el factor de multiplicación “a” y el exponente “b” en cada subcuenca para cada situación identificada.


 Tabla 26.1: Ecuaciones de regresión del N_T y P_T sobre el caudal en los distintos puntos de muestreo		
Puntos de muestreo	Fósforo total	Nitrógeno total
1- E. Navalmedio	$y = 0,0539x^{0,0619}$	$y = 0,9593x^{-0,0159}$
2- Valle de la Fuenfría (Arroyo de la Venta)	$y = 0,0511x^{0,0566}$	$y = 1,1915x^{-0,1272}$
3- Cercedilla (Pueblo)	$y = 0,1714 x^{-0,2024}$	$y = 0,9935 x^{-0,0076}$
4- Guadarrama (Pueblo)	$y = 0,5965 x^{-0,3729}$	$y = 1,0688 x^{0,0522}$
5- Puerto de la Cruz Verde (El Escorial)	$y = 0,119 x^{-0,518}$	$y = 0,9742 x^{-0,1786}$
6- Galapagar-La Navata	$y = 2,1024 x^{-0,0411}$	$y = 864,64 x^{-0,7538}$
7- E. de Molino de la Hoz (Pte. Romano)	$y = 3,1249 x^{-0,0948}$	$y = 29,868 x^{-0,248}$
8- Móstoles (Urb. Guadarrama)	$y = 9,8424 x^{-0,22}$	$y = 0,0278 x^{0,7351}$
9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón)	$y = 0,1288 x^{0,3714}$	$y = 0,4386 x^{0,3517}$
10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006)	$y = 0,4555 x^{0,194}$	$y = 0,0641 x^{0,5728}$

Tabla 26.2: Matrices de correlación del N_T y P_T con el caudal en los distintos puntos de muestreo

Puntos de muestreo		Caudal	Fósforo total	Nitrógeno total
1- Navalmedio E.	Caudal	1		
	Fósforo total	0,081274115	1	
	Nitrógeno total	0,248686895	0,038802214	1
2- Valle de la Fuenfría (Arroyo de la Venta)	Caudal	1		
	Fósforo total	0,20210928	1	
	Nitrógeno total	-0,04203159	-0,24210675	1
3- Cercedilla (Pueblo)	Caudal	1		
	Fósforo total	-0,092362493	1	
	Nitrógeno total	0,274654686	0,04232969	1
4- Guadarrama (Pueblo)	Caudal	1		
	Fósforo total	-0,38494059	1	
	Nitrógeno total	0,66666669	-0,15062894	1
5- Pto. de la Cruz Verde (El Escorial)	Caudal	1		
	Fósforo total	-0,65195972	1	
	Nitrógeno total	-0,43035182	0,21015795	1
6- Galapagar- La Navata	Caudal	1		
	Fósforo total	-0,223776221	1	
	Nitrógeno total	-0,657342672	-0,111888111	1
7- E. de Molino de la Hoz (Pte. Romano)	Caudal	1		
	Fósforo total	-0,36363637	1	
	Nitrógeno total	-0,38461539	-0,08391608	1
8- Móstoles (Urb. Guadarrama)	Caudal	1		
	Fósforo total	-0,22456278	1	
	Nitrógeno total	0,62807405	-0,40559441	1
9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón)	Caudal	1		
	Fósforo total	0,67600805	1	
	Nitrógeno total	0,28021058	0,59440559	1
10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006)	Caudal	1		
	Fósforo total	0,423818499	1	
	Nitrógeno total	0,563923836	0,31468531	1

Figura 36.1: Curvas de regresión (Concentración de N_T y/o P_T frente al Caudal)

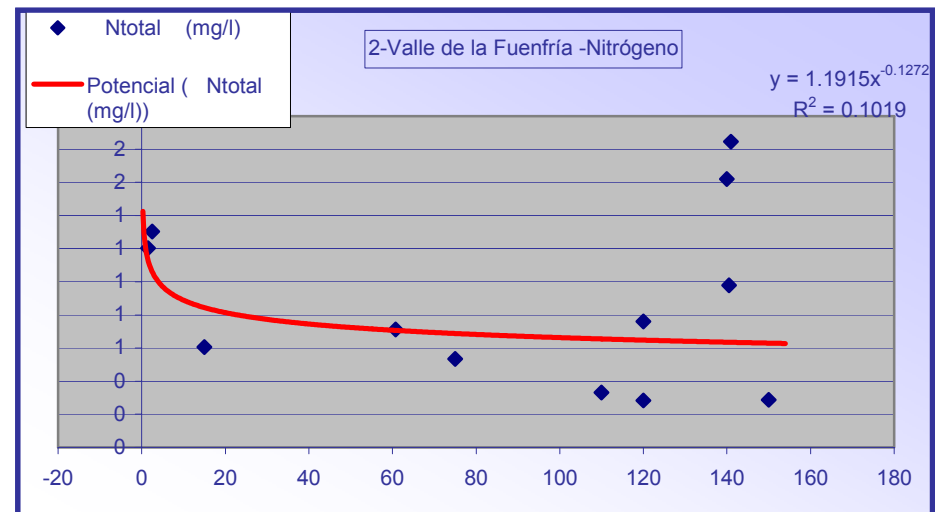
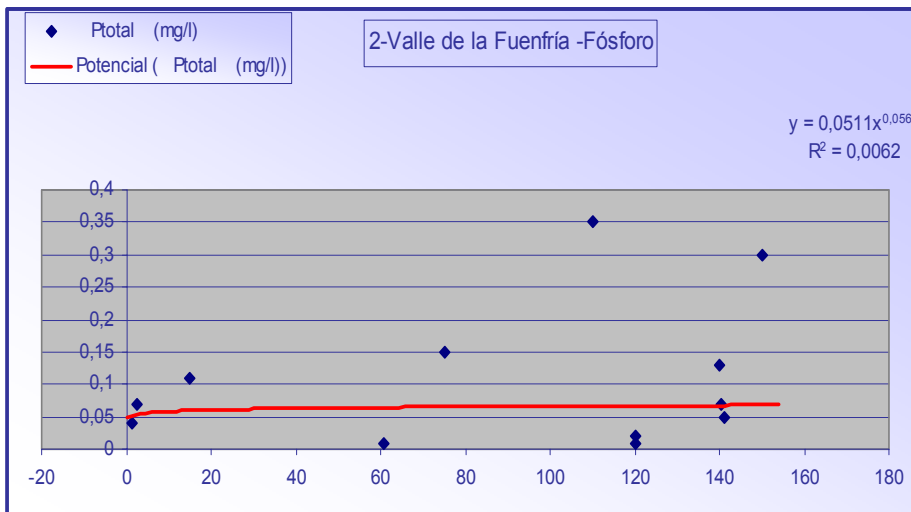
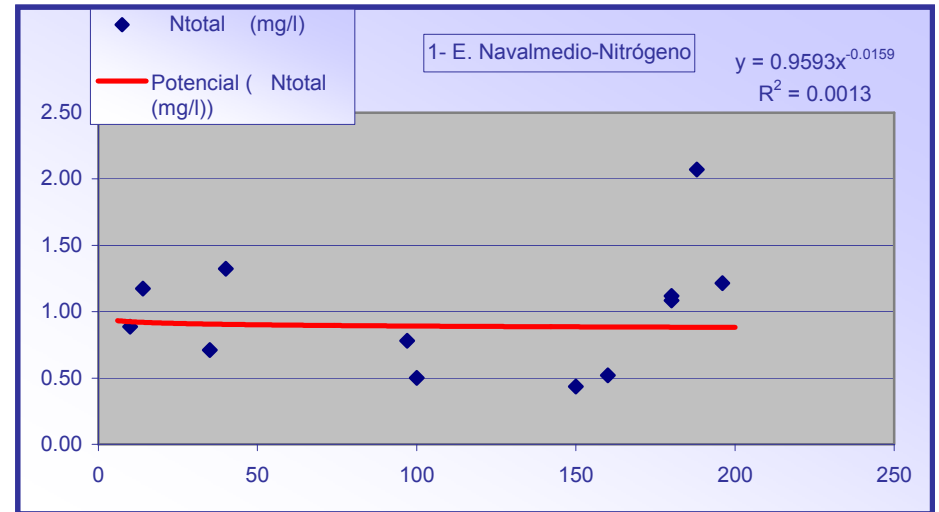
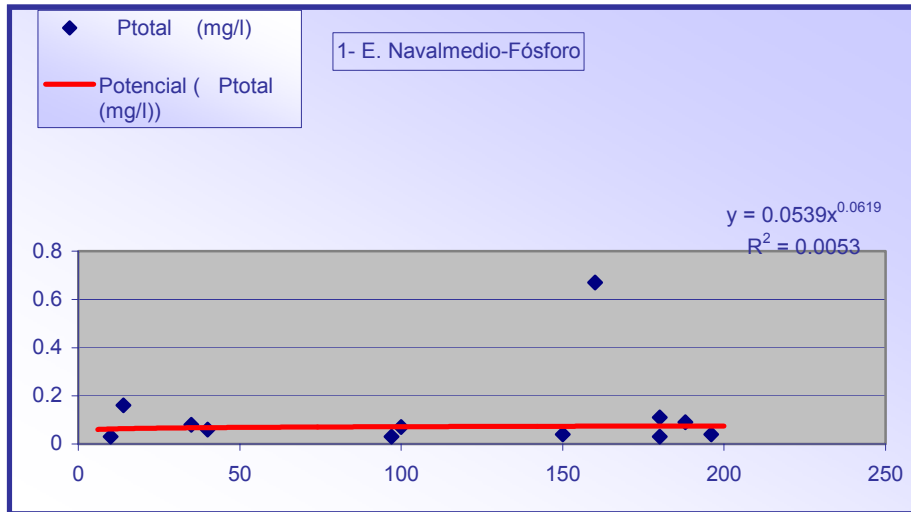


Figura 36.2: Curvas de regresión (Concentración de N_T y/o P_T frente al Caudal)

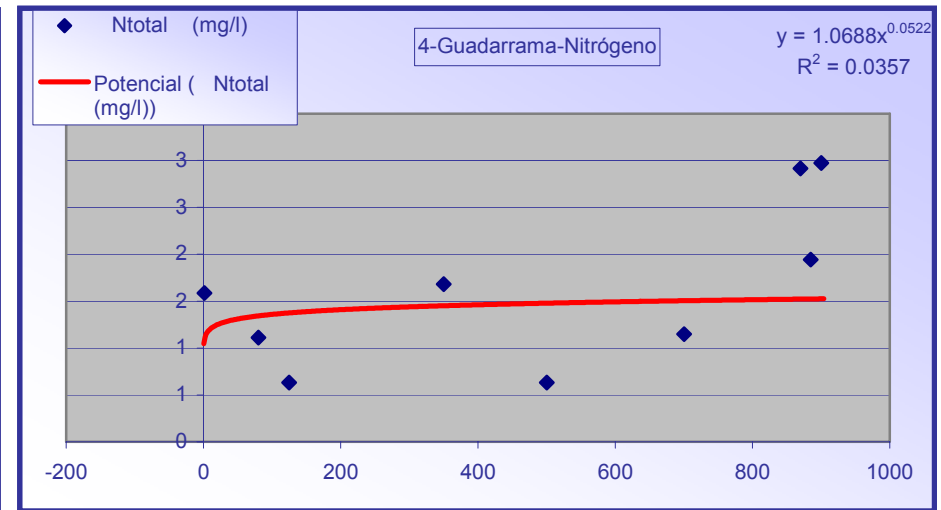
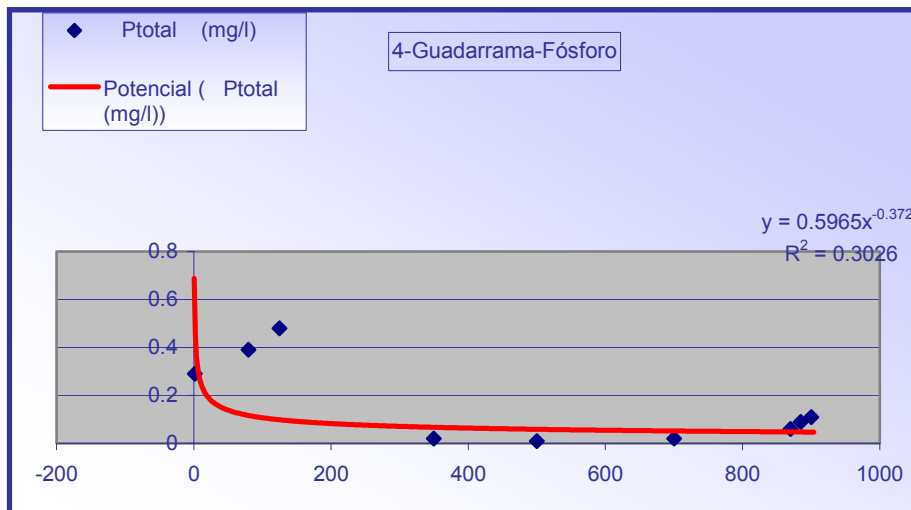
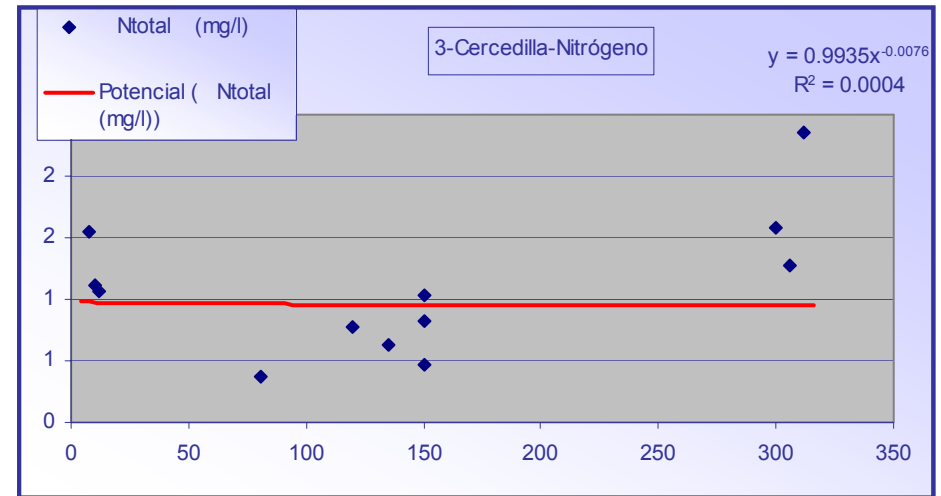
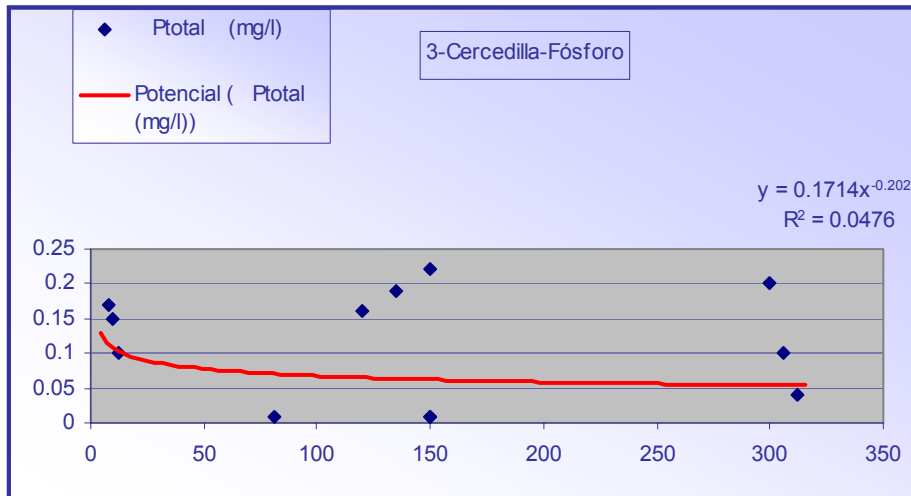


Figura 36.3: Curvas de regresión (Concentración de N_T y/o P_T frente al Caudal)

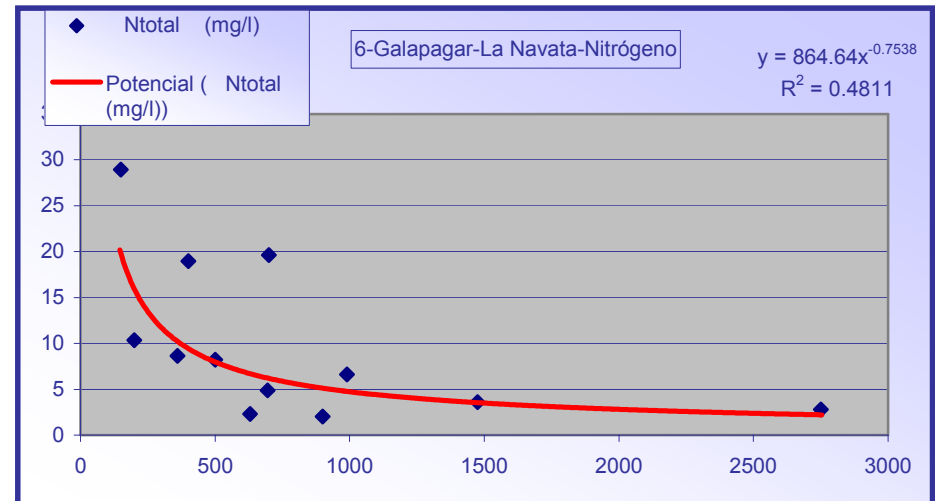
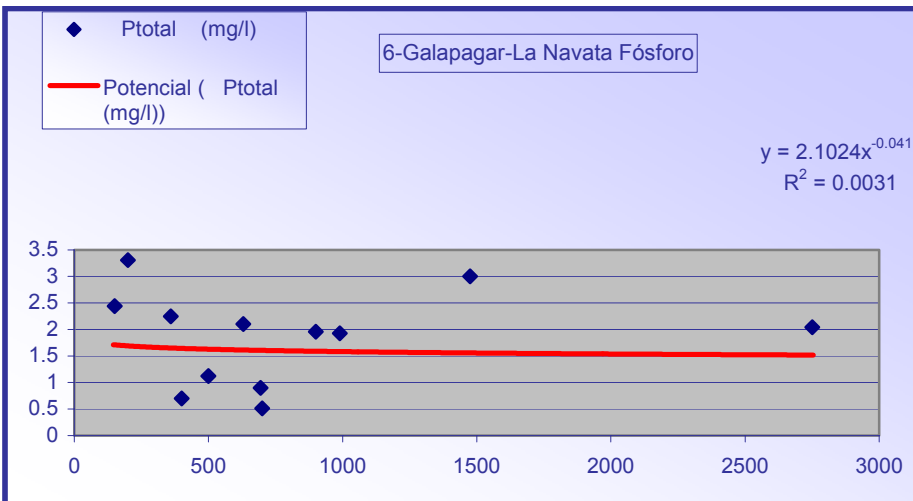
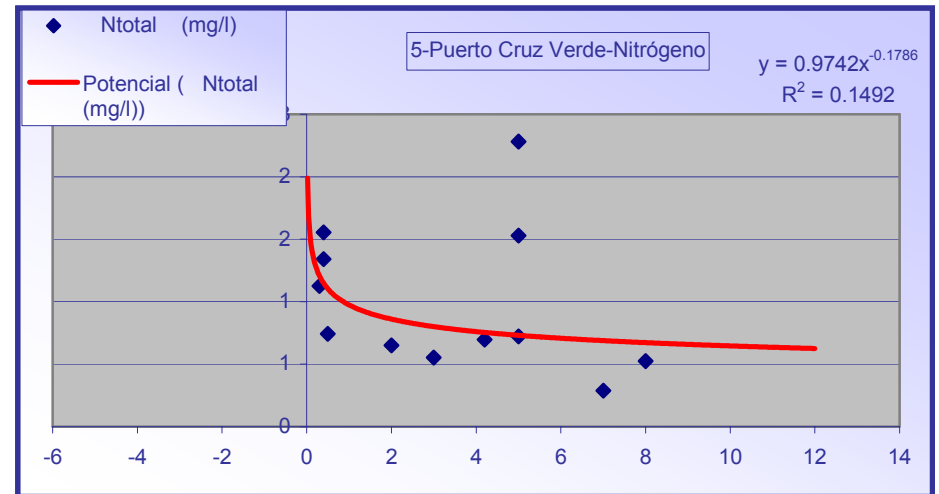
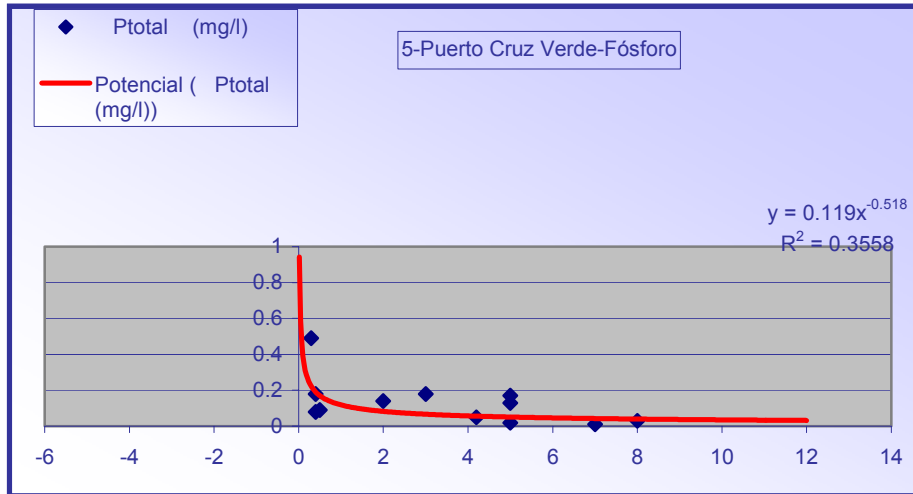


Figura 36.4: Curvas de regresión (Concentración de N_T y/o P_T frente al Caudal)

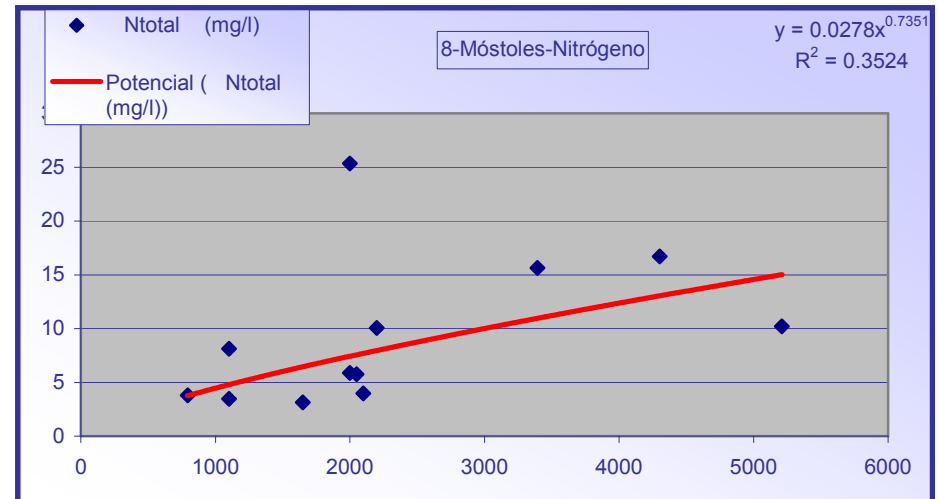
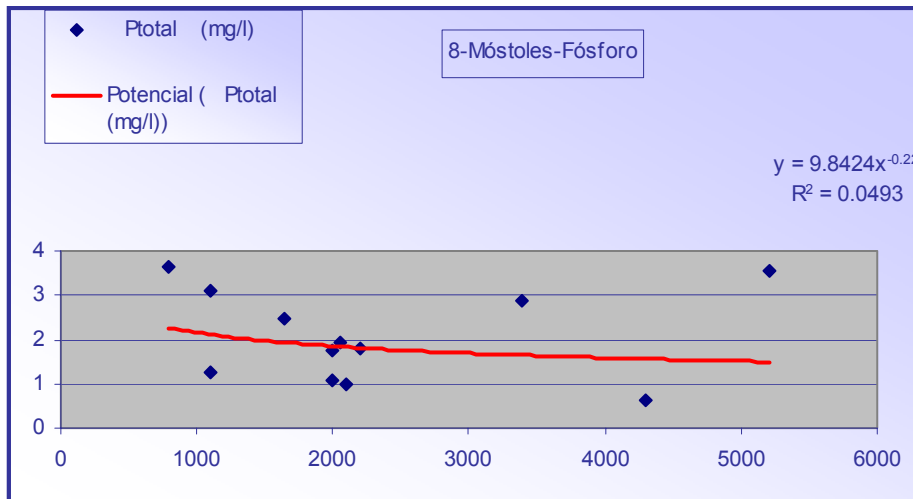
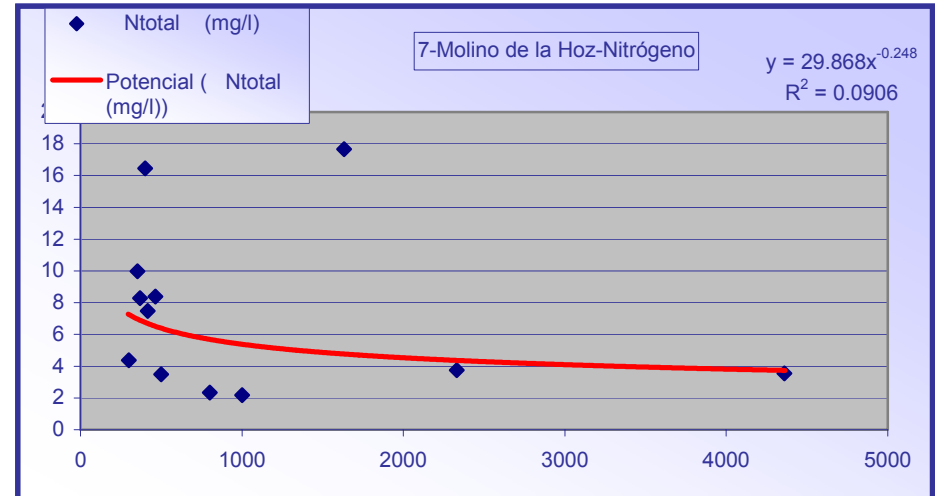
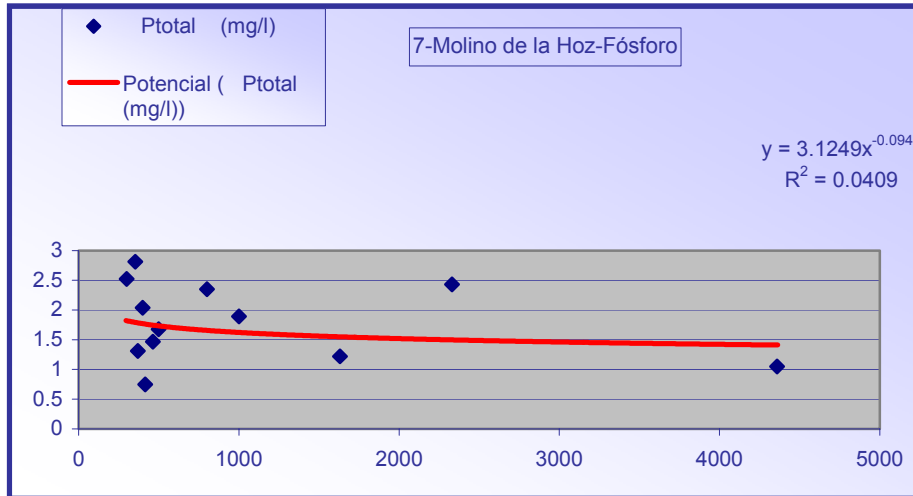
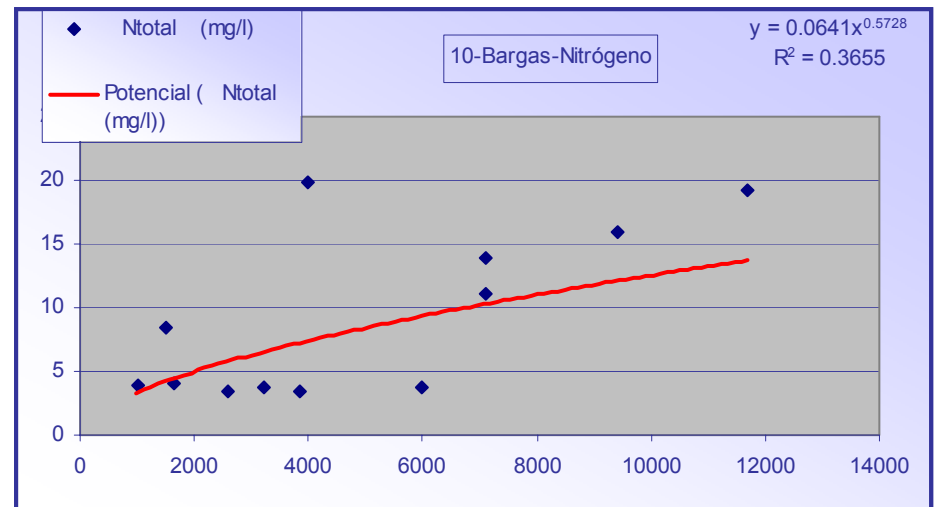
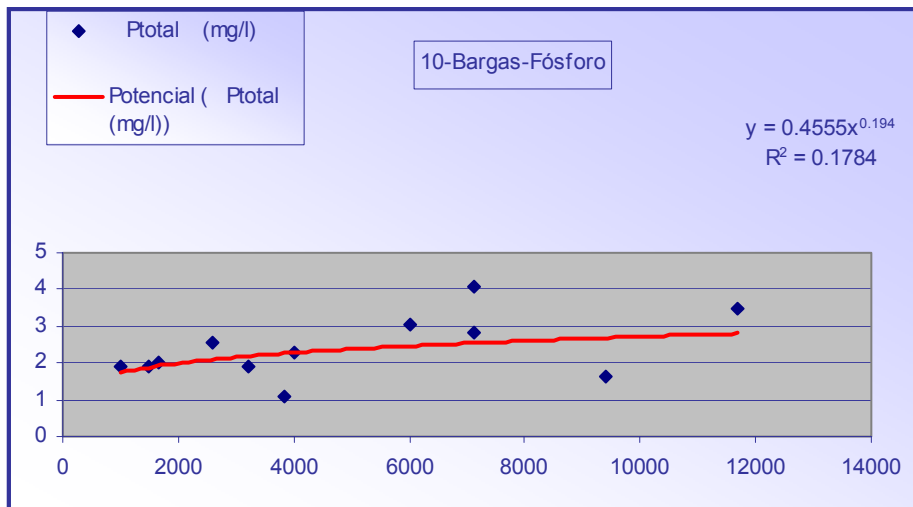
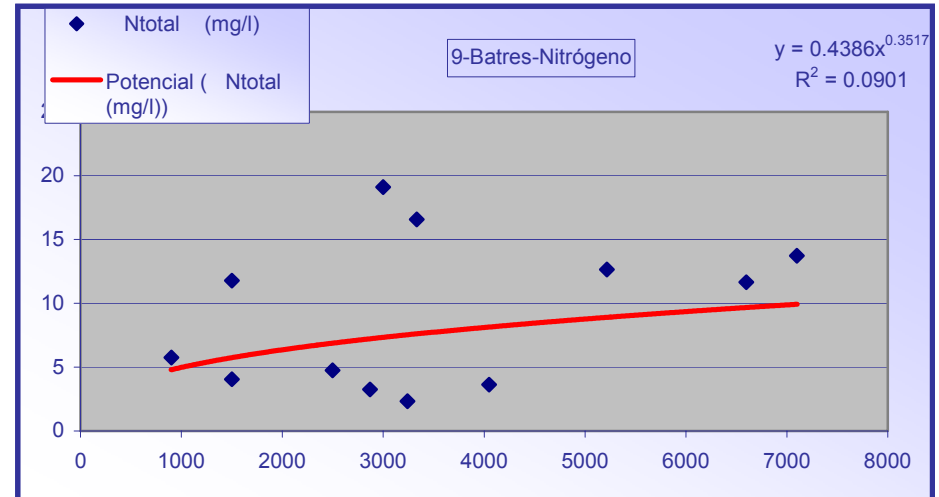
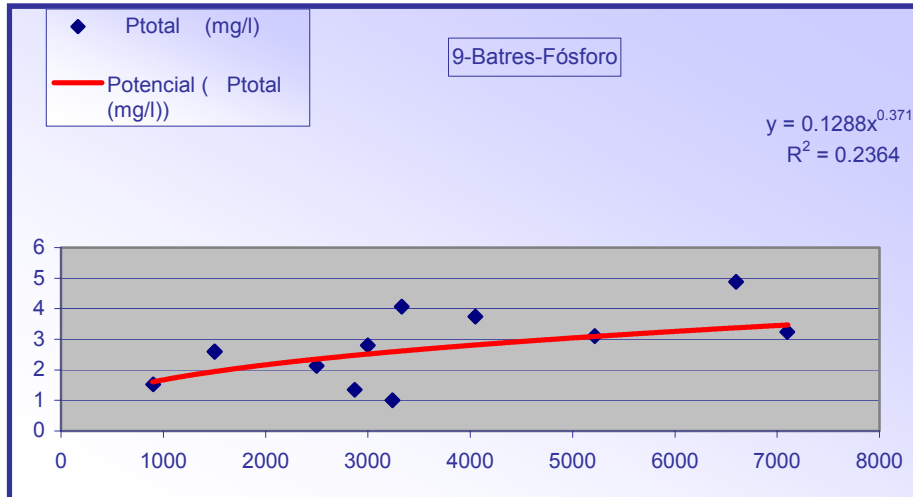


Figura 36.5: Curvas de regresión (Concentración de N_T y/o P_T frente al Caudal)



4.3.2 Cargas y coeficientes de exportación de nutrientes

La estimación de los aportes de nutrientes en una cuenca es por lo general una tarea delicada y costosa por lo que se ha extendido el uso de los coeficientes de exportación a pesar de que el uso de estos coeficientes sin unos criterios bien definidos pueden introducir un factor de error importante (Gómez Elvira et al, 1983 y 1985).

Los resultados correspondientes a las distintas cuencas unitarias en que se ha dividido la cuenca del río Guadarrama se recogen en la tabla 27. En ella queda reflejada la superficie de las subcuencas (km^2), la carga (kg/año) y los coeficientes de exportación de N_T y P_T ($\text{g/m}^2/\text{año}$) para cada subcuenca. De dichos resultados se deduce que:

✚ A) Variación espacial para la justificación del coeficiente de exportación para cada subcuenca de la cuenca del río Guadarrama.

Las cargas de nutrientes de N_T y P_T obtenidas en cada uno de los puntos de muestreo y/o subcuencas nos indican que, a medida que nos alejamos en altitud y vamos hacia zonas más bajas con un mayor desarrollo de suelos aumenta la producción de nitrógeno y fósforo. Los valores más altos de éstas cargas de nutrientes se produce en los puntos nº 8, 9 y 10, y los valores más bajos en los puntos nº 1, 2 y 5 donde la presión antrópica es escasa.

De la relación entre ambas cargas de nitrógeno y fósforo, aparece un factor (N/P) que nos indica el nutriente limitante de la producción en cada caso. La relación N/P en todas las subcuencas es menor que 16, el nutriente limitante es el nitrógeno, menos en la subcuenca IV que se considera como cuenca de referencia, la menos alterada, donde es mayor de 16, siendo el nutriente limitante el fósforo. Las subcuencas III y V presentan valores medios mayores de 10, las subcuencas I y II entorno a 7, y desde la subcuenca VI a la desembocadura entorno a 4, indicándonos la existencia de vertidos de aguas residuales, lo cual resulta razonable ya que en estos puntos “in situ” se localizó vertidos de aguas residuales directos al cauce del río Guadarrama.

El incremento en la concentración de nitrógeno puede deberse a diferentes factores, tales como la extensión de la frontera agrícola, la deforestación y la pérdida de cobertura vegetal de los suelos, mientras que la disminución del fósforo se debe a su fijación por reacciones químicas a los suelos (Rivas et col., 2009).

En lo referente a los coeficientes de exportación de nutrientes, tanto en el caso del nitrógeno total como el del fósforo total, según nos alejamos de las

subcuencas de cabecera y vamos hacia zonas topográficamente más bajas se sitúan los valores más altos.

En las subcuencas III, IV y V el uso del suelo predomina el forestal, presentan los valores más bajos de coeficientes de exportación de N_T y P_T ($g/m^2/año$). Estas subcuencas presentan valores de $(0,34 N_T - 0,03 P_T)$, $(0,28 N_T - 0,01 P_T)$ y $(0,38 N_T - 0,03 P_T)$ respectivamente, siendo la subcuenca IV la menos alterada.

Las subcuencas I, II, VI y VII presentan valores intermedios de coeficientes de exportación de N_T y P_T ($g/m^2/año$). Estas subcuencas presentan valores de $(0,46 N_T - 0,06 P_T)$, $(0,51 N_T - 0,07 P_T)$, $(0,48 N_T - 0,15 P_T)$ y $(0,52 N_T - 0,13 P_T)$ respectivamente. La subcuenca I recoge el agua de fusión de la estación de ski de Navacerrada, lo cual puede incrementar la exportación de nutrientes respecto al fondo natural, éste hecho justifica sus valores obtenidos de coeficiente de exportación.

Las subcuencas VIII, IX y X presentan los valores más altos de coeficientes de exportación de N_T y P_T ($g/m^2/año$). Estas subcuencas presentan valores de $(0,98 N_T - 0,19 P_T)$, $(1,14 N_T - 0,35 P_T)$ y $(1,43 N_T - 0,32 P_T)$ respectivamente, presentan un alto grado de alteración.

Al comparar los coeficientes de exportación obtenidos, en la tabla 27, se observa para el nitrógeno un intervalo de variación entre 0,28 y 1,43; mientras que para el fósforo se sitúa entre 0,01 y 0,35. El aumento mayor del nitrógeno es del orden de 1,15 y su tendencia regular es de aumento a lo largo de la cuenca, respecto al fósforo con un aumento de 0,34, y una tendencia más irregular puede deberse a suelos de tipo cuaternario, los cuales por su característica geológica tienden a acumular compuestos formados por la producción primaria autóctona, así como la deforestación de las cuencas altas y las descargas provenientes de las aguas domésticas y escorrentía. Este sería el caso del nitrógeno, ya que las mayores variaciones o lo que es lo mismo, los incrementos mayores del mismo se dan en las zonas de mayor desarrollo de suelos siendo los compuestos nitrogenados relativamente solubles y de fácil movilización.

Para el fósforo, este es fijado por los suelos por reacciones químicas, observándose esa disminución por este hecho salvo en zonas donde existen fuentes puntuales de tipo urbano que se traducen en un aumento de la concentración del mismo.

Según la bibliografía encontrada estas subcuencas no responden al modelo de cuencas inalteradas, es decir, aquellas con solo vegetación natural, poco eutrofizadas que representan el fondo geoquímico de nutrientes, ya que en pocos casos se pueden considerar los pinares, rebollares o encinares de estas subcuencas como libres de un efecto antrópico. Los rangos

encontrados en la bibliografía para éstas zonas varían entre 0,05 a 0,004 g/m²/año para el fósforo y entre 0,014 a 0,130 g/m²/año para el nitrógeno, sólo en las subcuencas III, IV y V presentan estos valores para el caso del fósforo, nos encontramos en las zonas más altas de la cuenca de estudio con escasa presión antrópica donde la fuentes de contaminación son difusas tal como se estudio en el apartado anterior.

✚ B) Variación temporal para la justificación del coeficiente de exportación para cada subcuenca de la cuenca del río Guadarrama.

Las subcuencas I, II, III, IV y V, presentan los valores más bajos de coeficientes de exportación de N_T y P_T (g/m²/mes) mensuales. Estas subcuencas presentan valores medios mensuales de (0,03 N_T – 0,004 P_T), (0,04 N_T – 0,005 P_T), (0,02 N_T – 0,002 P_T), (0,01 N_T – 0,001 P_T) y (0,03 N_T – 0,004 P_T) respectivamente, responden a zonas con predominio de uso forestal lo cual justifica los bajos valores encontrados.

Las subcuencas VI y VII presentan valores intermedios de coeficientes de exportación de N_T y P_T (g/m²/mes) mensuales. Estas subcuencas presentan valores medios mensuales de (0,06 N_T – 0,01 P_T) y (0,05 N_T – 0,01 P_T) respectivamente, valores que eran de esperar debido a la presión antrópica a que están sometidos, es decir, con predominio de fuente puntual tal como se estudio en el apartado anterior, y debido a que en esta zona predomina el uso forestal y urbano.

Las subcuencas VIII, IX y X presentan los valores más altos de coeficientes de exportación de N_T y P_T (g/m²/mes) mensuales. Estas subcuencas presentan valores medios mensuales de (0,07 N_T – 0,01 P_T), (0,08 N_T – 0,02 P_T) y (0,09 N_T – 0,02 P_T) respectivamente, valores que eran de esperar debido a la presión agrícola, urbana y ganadera. Dentro del modelo conceptual de cuencas se considera como una cuenca alterada, en la que intervienen tanto fuentes difusas como puntuales, tal como se estudio en el apartado anterior. En la subcuenca VIII predomina el uso agrícola y urbano, en la subcuenca IX predomina el uso agrícola y forestal y por último en la subcuenca X predomina el uso agrícola y ganadero.

Concluyendo, se diferencian tres áreas de mayor a menor grado de alteración de la cuenca, es decir, de mayor a menor producción de nutrientes.

- En primer lugar se observa un área con un alto grado de alteración correspondiente a las subcuencas VIII, IX y X, correspondientes a áreas topográficamente más bajas con un mayor desarrollo de suelos.
- En segundo lugar, un área con un grado medio de alteración e incluiría las subcuencas I, II, VI y VII.

- En tercer lugar, un área con un menor grado de alteración e incluiría las subcuencas III, IV y V.

Finalizando y como procedimiento de validación de los resultados obtenidos para los coeficientes de exportación se han comparado los datos de la cuenca de estudio con los que proponen otro autores que aparecen en la bibliografía y en el capítulo I (tabla 2 y 3).

Los valores obtenidos en la subcuenca IV ($0,3 N_T - 0,01 P_T$ (g/m²/año)) son concordantes con los valores encontrados en áreas de uso forestal que propone Rast and Lee., 1978 (Tabla 2).

Los valores obtenidos en la subcuenca VII ($0,5 N_T - 0,1 P_T$ (g/m²/año)) y para la subcuenca VI prácticamente ($0,48 N_T - 0,1 P_T$ (g/m²/año)), son concordantes con los valores encontrados en áreas de uso urbano que propone Rast and Lee, 1978 (Tabla 2).

Los valores obtenidos en la subcuenca V ($0,38 N_T - 0,03 P_T$ (g/m²/año)) son concordantes con los valores encontrados en áreas de uso forestal que propone Gómez., 1990, lo cual resulta razonable puesto que este punto se sitúa en la cuenca del embalse de Valmayor.

El valor de obtenido en la subcuenca VIII para el nitrógeno ($0,98 N_T$ (g/m²/año)) es concordante con los valores encontrados en áreas de uso rural/agrícola propuestos por U.S. EPA y Omemik, 1976 (Tabla 3).

El valor de obtenido en la subcuenca I para el nitrógeno ($0,46 N_T$ (g/m²/año)) es concordante con los valores encontrados en áreas de uso forestal propuestos por U.S.- EPA y Omemik, 1976 (Tabla 3).

Por otra parte, se ha calculado la carga contaminante de N_T y P_T producida en toda la cuenca de estudio, en el supuesto que esta estuviese libre de cualquier tipo de presión antrópica de acuerdo con Gomez, C. et al., 1995.

1) De la tabla 27, los coeficientes de exportación de N_T y/o P_T ($g/m^2/año$) del punto n°. 4 son:

$$(0,28 N_T - 0,01 P_T)$$

2) La Superficie total de la cuenca de estudio: 1306,74 km^2

3) Las cargas de N_T y/o P_T ($kg/año$) sin presión antrópica son:

$$(365.887,2 N_T - 13.067,4 P_T)$$

4) Las cargas de N_T y/o P_T ($kg/año$) en el punto n°. 10 son:

$$(1.868.638,2 N_T - 418.156,8 P_T)$$

5) La carga antrópica producida por la cuenca de estudio:

Carga contaminante de N_T y/o P_T ($Kg/año$) producida en toda la cuenca de estudio = Carga de N_T y/o P_T ($Kg/año$) en el punto último de la cuenca - Carga de N_T y/o P_T ($Kg/año$) producida en toda la cuenca sin presión antrópica

- **Para el N_T : $1.868.638,2 - 365.887,2 = 1.502.751$ ($Kg/año$) carga contaminante de N_T producida en toda la cuenca de estudio.**

- **Para el P_T : $418.156,8 - 13.067,4 = 405.089,4$ ($Kg/año$) carga contaminante de P_T producida en toda la cuenca de estudio.**

Esto representa que el 80,42% del nitrógeno tiene un origen antrópico, frente al 19,58% que puede considerarse como generado por las propias condiciones inalteradas de litología y vegetación de la cuenca. Mientras que para el fósforo los valores son mucho más extremos, 96,88 % de origen antropogénico y 3,12% natural.

Esto estaría de acuerdo con que los valores de la relación N/P se salgan de una pauta general señalada en la bibliografía, pues en esta cuenca hay un exceso de aportes de fósforo, lo que hace que el nitrógeno aparezca como limitante.

 **Tabla 27:** Resultados de las cargas y coeficientes de exportación de N_T y P_T en la Cuenca del río Guadarrama

SUBCUENCAS (Ptos. Muestreo)	SUPERFICIE (km ²)	Carga de nitrógeno Kg/año	Carga de fósforo Kg/año	N/P	Coficiente de exportación del N _T (g/m ² /año)	Coficiente de exportación del P _T (g/m ² /año)	Coficiente de exportación (N _T) máximo (g/m ² /mes)	Coficiente de exportación (N _T) medio (g/m ² /mes)	Coficiente de exportación (N _T) mínimo (g/m ² /mes)	Coficiente de exportación (P _T) máximo (g/m ² /mes)	Coficiente de exportación (P _T) medio (g/m ² /mes)	Coficiente de exportación (P _T) mínimo (g/m ² /mes)
SUBCUENCA I (Pto.1- E. Navalmedio)	8,035	3.696,1	482,1	7,66	0,46	0,06	1,33E-01	3,62E-02	1,42E-03	4,30E-02	4,32E-03	9,81E-05
SUBCUENCA II 2- Arroyo de la Venta (Valle de la Fuenfría- Cercedilla)	4,815	2.455,65	337,05	7,28	0,51	0,07	1,51E-01	4,27E-02	2,33E-04	2,87E-02	5,34E-03	8,19E-06
SUBCUENCA III (Pto.3- Cercedilla (Pueblo))	16,82	5.718,8	504,6	11,33	0,34	0,03	1,15E-01	2,45E-02	4,68E-04	1,07E-02	2,56E-03	1,25E-05
SUBCUENCA IV (Pto.4- Guadarrama (Pueblo))	83,7	23.436	837	28	0,28	0,01	8,40E-02	1,41E-02	2,98E-05	1,36E-02	1,89E-03	4,71E-07
SUBCUENCA V (Pto.5-Puerto de la Cruz Verde- El Escorial)	0,25	95	7,5	12,7	0,38	0,03	1,92E-01	3,58E-02	9,05E-04	4,12E-02	4,68E-03	3,15E-05
SUBCUENCA VI (Pto.6- Galapagar-La Navata)	331,57	159.153,6	49.735,5	3,2	0,48	0,15	6,31E-01	6,28E-02	2,40E-03	7,21E-02	1,19E-02	6,06E-04
SUBCUENCA VII (Pto.7- E. de Molino de la Hoz- Pte. Romano)	407,17	211.728,4	52.932,1	4	0,52	0,13	4,97E-01	5,09E-02	4,20E-03	7,91E-02	1,25E-02	1,45E-03

 **Tabla 27: Resultados de las cargas y coeficientes de exportación de N_T y P_T en la Cuenca del río Guadarrama**

SUBCUENCAS (Ptos. Muestreo)	SUPERFICIE (km ²)	Carga de nitrógeno Kg/año	Carga de fósforo Kg/año	N/P	Coeficiente de exportación del N _T (g/m ² /año)	Coeficiente de exportación del P _T (g/m ² /año)	Coeficiente de exportación (N _T) máximo (g/m ² /mes)	Coeficiente de exportación (N _T) medio (g/m ² /mes)	Coeficiente de exportación (N _T) mínimo (g/m ² /mes)	Coeficiente de exportación (P _T) máximo (g/m ² /mes)	Coeficiente de exportación (P _T) medio (g/m ² /mes)	Coeficiente de exportación (P _T) mínimo (g/m ² /mes)
SUBCUENCA VIII (Pto.8- Móstoles (Urbanización Guadarrama))	817,19	800.846,2	155.266, 1	5,16	0,98	0,19	4,25E-01	6,98E-02	8,03E-03	6,12E-02	1,57E-02	1,64E-03
SUBCUENCA IX (Pto.9- Batres (Ctra. El Alamo a Griñón))	981,06	1.118.408	343.371	3,26	1,14	0,35	3,63E-01	8,50E-02	5,60E-03	9,28E-02	2,57E-02	2,41E-03
SUBCUENCA X (Pto. 10- Bargas (Cruce M-403 con C.M 4006))	1306,74	1.868.638, 2	418.156, 8	4,47	1,43	0,32	4,67E-01	9,17E-02	6,81E-03	9,53E-02	2,37E-02	2,21E-03

4.4 Datos obtenidos en el evento de tormenta

La crecida del Arroyo de la Venta (Valle de la Fuenfría), nos va a dar una idea del aporte de nutrientes y variaciones del quimismo de la subcuenca 2 de la cuenca de estudio, dichas variaciones durante la crecida se recogen en las tablas 28.1 y 28.2, y la representación gráfica de los mismos se recoge en la figura 37. Por otra parte es imprescindible para calcular la exportación de nutrientes en las aguas de avenamiento.

La lluvia fue de origen frontal, prolongada y de baja intensidad en las primeras horas de crecida (20:00-22:00h) a continuación aumenta de intensidad produciendo un pico definido (22:00-2:00h), para luego disminuir hasta dejar de llover.

La Estación Meteorológica de Cercedilla registró unas precipitaciones durante el período de muestreo de 1,3 mm. Los valores de las precipitaciones recogidas cada hora aparecen representados en la figura 38, en la cual se enmarca la franja horaria del evento de tormenta, y es la que se utiliza como base de datos. De esta precipitación, 1,2 mm cayeron durante las 11 horas de análisis con viento dominante SW. El día anterior al evento de tormenta se obtuvieron precipitaciones de 3,8 mm.

Según se observa de la representación gráfica del caudal (Figura 37) este aumenta progresivamente hasta alcanzar un pico definido a las 2:00 horas, para luego disminuir con lentitud.

Durante el pulso de caudal se produjeron cambios importantes en el quimismo del arroyo, que se documenta con las 12 muestras tomadas cada hora (exceptuando la segunda muestra que fue tomada a la media hora de la primera).

En esta crecida, la mayor parte del aumento del caudal se debió a la precipitación sobre el cauce y a la escorrentía superficial de Horton generada en una franja estrecha alrededor de los márgenes del arroyo. Durante el resto de la recesión la precipitación fue menos intensa y por lo tanto no generó cantidades apreciables de escorrentía.

Durante la crecida aumentan notablemente el sulfato y cloruro, en general las variables varían significativamente en la franja horaria entre las 22:00-3:00h (Figura 38). El potasio presenta un máximo y el cloruro presenta un mínimo coincidentes con la punta de caudal. El nitrato presenta dos máximos coincidentes con el comienzo y el pico de crecida.

Se observa un aumento de los nutrientes durante la crecida (Tabla 28.2), por este motivo se ha calculado la carga de estos durante el tiempo que dura el evento de tormenta en ese punto, obteniendo unas cantidades de N_T y P_T de 15,24 y 1,38 kg.

Esto supone, considerando una exportación total media anual por este punto de 2433,46 kg un 0,62 % de la carga de nitrógeno y de 357 kg un 0,38 % de la carga de fósforo.


Estas 8 horas representan en tiempo un 0,09% sobre las 8.760 h/año, mientras que esta cantidad se multiplica por 7, un 700% en el caso del aporte de nitrógeno y en más de 4 veces, un 416% en el caso del fósforo.

De la tabla 28.1, se observa que la **conductividad** presenta un pico a las 20:00 h coincidiendo con la primera hora de crecida, para luego permanecer con un valor medio más o menos constante de 33,76 ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La temperatura del agua presenta un valor medio de 10,76 °C.

El **oxígeno disuelto** aumenta por movimientos y turbulencias en las horas primeras de crecida, y luego disminuye al incorporarse agua subterránea al arroyo.

El **pH** disminuye conforme va aumentando la intensidad de la lluvia, bajando a 6,35 a la 1:00 h., se acidifican las aguas porque se produce el paso de aguas más ricas en HCO_3^- a aguas más ricas en CO_2 .

Respecto al **caudal**, este presenta un máximo de 1470 l/s entre las 2,00 y las 3,00 desfasado en el tiempo con respecto al máximo de precipitación que se produjo entre las 22 y las 23 horas.

 Tabla 28.1: Parámetros analizados "in situ" durante el evento de tormenta					
Franja horaria	$\Omega(\mu\text{S}/\text{cm})$	T-H ₂ O(°C)	Oxígeno disuelto (mg/l)	pH	Caudal (l/s)
20:00 H	37,1	10,9	6,28	7,95	470
20:30 H	35	10,6	6,2	7,45	470
21:00 H	36	10,5	5,74	7,43	710
22:00 H	34	10,6	6,33	7,15	710
23:00 H	34	10,7	6,39	6,49	870
24:00 H	33	10,8	6,34	6,5	1190
1:00 H	33	10,9	6,21	6,35	1190
2:00 H	33	10,8	6,24	6,6	1470
3:00 H	32	11	6,23	6,62	1470
4:00 H	33	11	6,18	6,57	1190
5:00 H	32	10,8	6,18	6,53	1030
6:00 H	33	10,7	6,16	6,52	870
Valor máximo	37,10	11,00	6,39	7,95	1470
Valor medio	33,76	10,78	6,21	6,85	970
Valor mínimo	32,00	10,50	5,74	6,35	470

De la tabla 28.2, se observa que el **Na⁺** presenta poca variabilidad durante la crecida, revela que el agua nueva ha estado en contacto no sólo con materiales orgánicos (vegetación, hojarasca, etc.), sino también ha tenido suficiente contacto con la superficie del suelo mineral como para enriquecerse en **Na⁺**, presenta un valor medio de 5,08 mg/l y un valor mínimo de 3,0 mg/l debido este último al lavado de la superficie del suelo.

El **K⁺** tiene un valor máximo de 2,5 mg/l coincidiendo con el pico de caudal, para a continuación ir disminuyendo durante la recesión hasta producirse un agotamiento de **K⁺**.

El ión Cl^- al comienzo de las precipitaciones presenta un valor mínimo de 3,55 mg/l, aumenta su valor conforme va variando el caudal y precipitación, llegando a un valor máximo de 9,1 mg/l coincidiendo con el pico de caudal.

Respecto al HCO_3^- , su valor máximo es de 9,76 mg/l, tal como se esperaba, al comienzo del muestreo, que va disminuyendo a medida que produce la crecida, sustituyendo el agua "vieja" por agua "nueva" más pobre en este elemento.

El Ca^{2+} presenta un valor medio de 3,56 mg/l.

El Mg^{2+} presenta un valor máximo de 5,35 mg/l coincidente con la máxima precipitación, a continuación disminuye hasta alcanzar el valor mínimo de 0,97 mg/l.

El NO_2^- y el PO_4^- presentan un valor medio de 0,02 y 0,03 mg/l respectivamente, que permanece más o menos constante con la crecida.

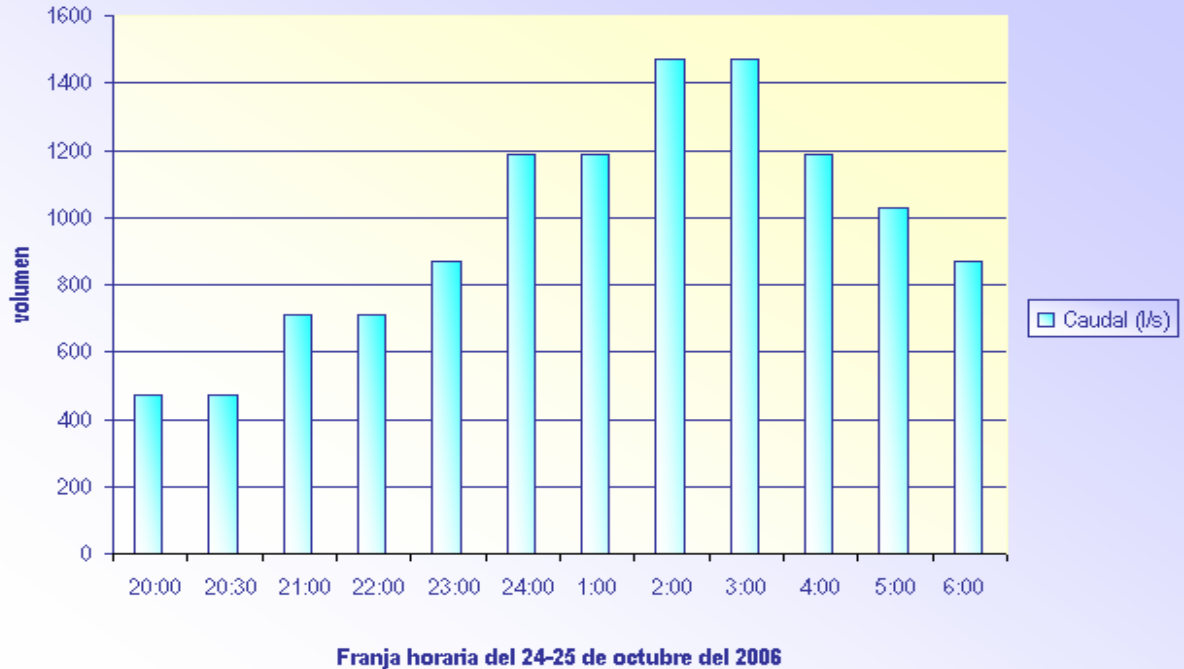
El NH_4^+ crece a medida que aumenta el caudal, presenta un valor máximo de 0,43 mg/l, se multiplica por 7, coincidiendo con el pico de caudal.

También coincide con el aumento del SO_4^{2-} debido al aporte de aguas de lluvias con enriquecimiento de sulfato amónico, estas son partículas de nucleación existentes en la estratosfera donde se acumula vapor de agua para generar lluvia.

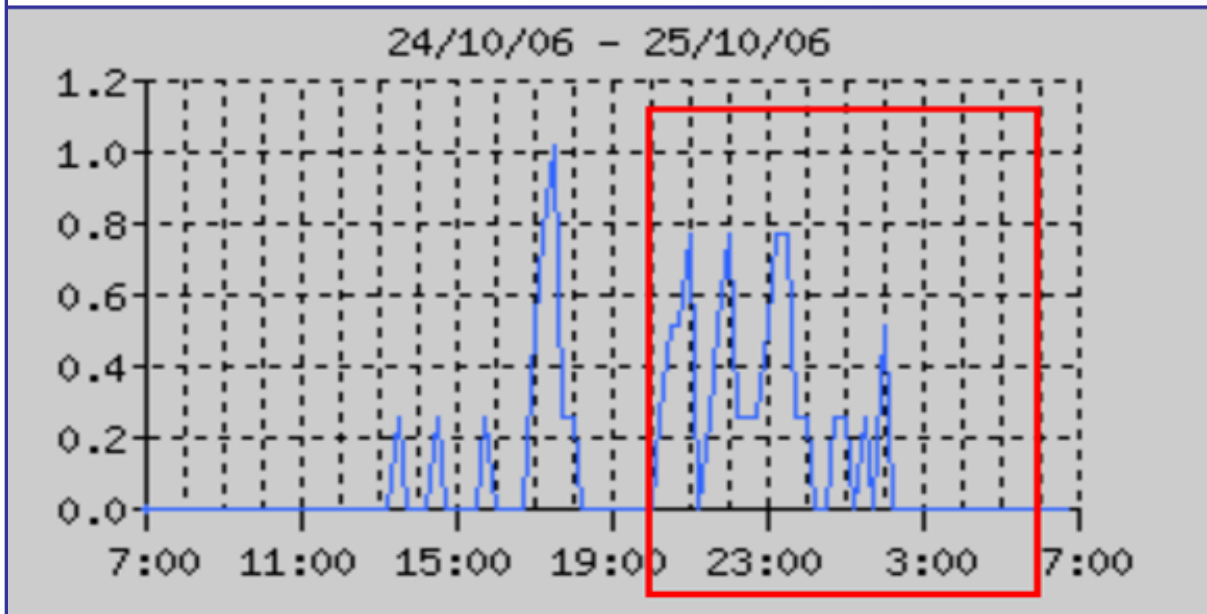
Tabla 28.2 : Parámetros analizados en laboratorio durante el evento de tormenta

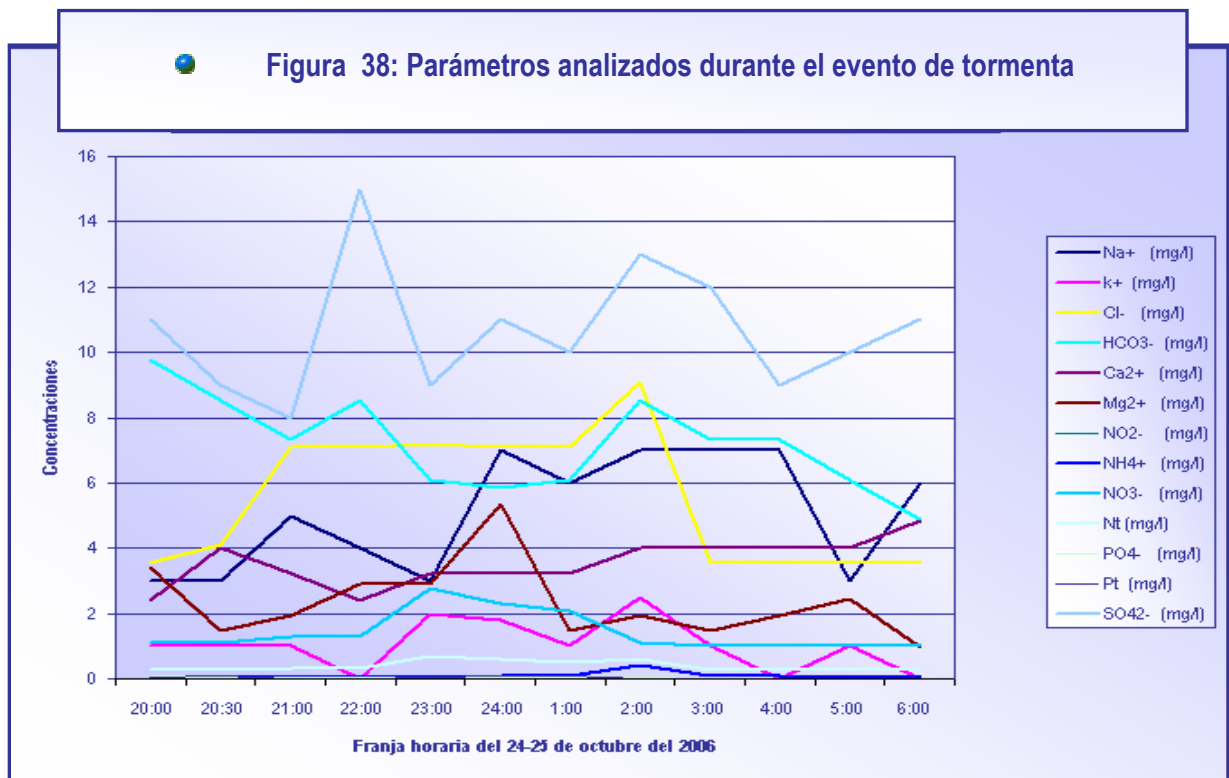
Franja horaria	Na^+ (mg/l)	k^+ (mg/l)	Cl^- (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	Ca^{2+} (mg/l)	Mg^{2+} (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	NH_4^+ (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	N_T (mg/l)	PO_4^- (mg/l)	P_T (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
20:00 H	3,00	1,00	3,55	9,76	2,42	3,40	0,01	0,06	1,10	0,30	0,07	0,06	11,00
20:30 H	3,00	1,00	4,10	8,54	4,03	1,46	0,01	0,06	1,10	0,28	0,03	0,07	9,00
21:00 H	5,00	1,00	7,10	7,32	3,22	1,95	0,01	0,05	1,28	0,33	0,03	0,01	8,00
22:00 H	4,00	0,00	7,10	8,54	2,42	2,92	0,01	0,05	1,30	0,34	0,03	0,01	15,00
23:00 H	3,00	2,00	7,20	6,10	3,22	2,92	0,03	0,06	2,76	0,68	0,06	0,05	9,00
24:00 H	7,00	1,80	7,10	5,86	3,22	5,35	0,03	0,10	2,30	0,61	0,03	0,07	11,00
1:00 H	6,00	1,00	7,10	6,10	3,22	1,46	0,02	0,07	2,06	0,53	0,04	0,11	10,00
2:00 H	7,00	2,50	9,10	8,54	4,03	1,95	0,04	0,43	1,10	0,60	0,03	0,01	13,00
3:00 H	7,00	1,00	3,55	7,32	4,03	1,46	0,01	0,07	1,00	0,28	0,02	0,01	12,00
4:00 H	7,00	0,00	3,55	7,32	4,03	1,95	0,01	0,07	1,00	0,28	0,01	0,01	9,00
5:00 H	3,00	1,00	3,55	6,10	4,03	2,43	0,01	0,06	1,00	0,28	0,01	0,01	10,00
6:00 H	6,00	0,00	3,55	4,88	4,84	0,97	0,01	0,06	1,00	0,28	0,01	0,01	11,00
Valor máximo	7,00	2,50	9,10	9,76	4,84	5,35	0,04	0,43	2,76	0,68	0,07	0,11	15,00
Valor medio	5,08	1,03	5,55	7,20	3,56	2,35	0,02	0,10	1,42	0,40	0,03	0,04	10,67
Valor mínimo	3,00	0,00	3,55	4,88	2,42	0,97	0,01	0,05	1,00	0,28	0,01	0,01	8,00

● **Figura 37.1: Variación del caudal (l/s) durante el evento de tormenta**



● **Figura 37.2: Precipitación producida en el periodo de muestreo del evento de tormenta (Datos facilitados por la Estación Meteorológica de Cercedilla)**





Muchas de las variables están muy correlacionadas entre sí, existe una fuerte redundancia en los datos (Tabla 29). De estas variables están correlacionadas con el caudal de forma negativa la conductividad (coeficiente de correlación ($r = -0,8$)).

De forma positiva el sodio ($r = 0,8$), cloruros ($r = 0,8$) y amonio ($r = 0,8$). Este hecho nos indica el principal proceso que ha tenido lugar durante esta crecida: la sustitución del agua "vieja" (rica en HCO_3^- , básica, relativamente rica en Ca^{2+} y Na^+ , de conductividad elevada, pobre en K^+ y en NO_3^-) por agua "nueva", de características contrarias.

El valor de correlación entre la conductividad ($\Omega(\mu\text{S}/\text{cm})$) y caudal ($r = -0,8$) nos indica que existe una relación significativa lineal inversa, y debido al efecto de dilución, al aumentar el caudal disminuye la conductividad.

Los valores de las correlaciones del Na^+ ($r = 0,8$) y NH_4^+ ($r = 0,8$) con el caudal, nos indica que se produce lavado de Na^+ y NH_4^+ de las capas superficiales del terreno.

El valor de correlación entre Cl^- y N_T ($r = 0,8$) nos indica contaminación y la sustitución del agua "vieja" por agua "nueva".

El valor de correlación entre SO_4^{2-} y NH_4^+ ($r = 0,8$) nos podría indicar la composición del agua de lluvia reciente, donde los núcleos de sulfato amónico son los responsables en la estratosfera de la condensación del vapor de agua que va a generar lluvia.

Los valores de las correlaciones entre NO_3^- ($r = 0,8$) y NH_4^+ ($r = 0,9$) con el N_T , nos indica que una buena parte del N_T existe en forma inorgánica como NO_3^- y NH_4^+ .

Tabla 27: Correlación de Spearman entre los parámetros considerados durante el evento de tormenta

	Caudal (l/s)	Ω (μ S/cm)	O ₂	Na ⁺ (mg/l)	k ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Ca ₂ ⁺ (mg/l)	Mg ₂ ⁺ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	PO ₄ ⁴⁻ (mg/l)	P _T (mg/l)	N _T (mg/l)
Caudal (l/s)	1															
Ω (μ S/cm)	-0,8069	1														
O ₂	0,0816	0,1258	1													
Na ⁺ (mg/l)	0,8054	-0,5312	-0,0546	1												
k ⁺ (mg/l)	0,3143	0,0000	0,5032	0,0176	1											
Cl ⁻ (mg/l)	0,1572	0,2481	0,4739	0,0653	0,6363	1										
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	-0,3255	0,5168	0,1539	-0,2190	-0,0077	0,0415	1									
Ca ₂ ⁺ (mg/l)	0,3937	-0,5897	-0,5675	0,3231	-0,1255	-0,3640	-0,3291	1								
Mg ₂ ⁺ (mg/l)	-0,1727	0,2884	0,6549	-0,2307	0,3326	0,2535	0,1597	-0,6998	1							
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,5921	-0,2110	0,5468	0,3564	0,6965	0,7047	-0,2948	-0,1858	0,3328	1						
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0,8338	-0,5657	0,2383	0,7225	0,4510	0,1277	-0,1683	0,3256	-0,0688	0,211	1					
NO ₃ ⁻ (mg/l)	-0,1543	0,4403	0,6321	-0,1713	0,4823	0,7882	-0,0842	-0,7176	0,4918	0,2048	-0,2022	1				
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	0,3201	-0,3088	0,4395	0,3322	-0,0115	0,0357	0,1960	-0,0734	0,1227	0,07195	0,8920	-0,1002	1			
PO ₄ ⁴⁻ (mg/l)	-0,3329	0,6540	0,6148	-0,3795	0,4953	0,5367	0,3434	-0,7660	0,4232	0,12462	-0,2670	0,7642	-0,0371	1		
P _T (mg/l)	-0,1697	0,2760	0,4140	-0,1944	0,3566	0,2267	-0,1036	-0,3964	0,1902	0,06163	0,7705	0,6077	-0,1981	0,6518	1	
N _T (mg/l)	0,3073	0,1278	0,6960	0,2187	0,6041	0,8048	-0,1040	-0,5797	0,5419	0,57561	0,9324	0,8131	0,1622	0,6086	0,2974	1

4.5 Datos obtenidos en la caracterización del suelo en la cuenca de estudio.

Los resultados obtenidos para las distintas muestras de suelo tomadas en los puntos de muestreo descritos en el apartado 2.2, y siguiendo la metodología del apartado 3.2.1, son los que a continuación se detallan.

4.5.1 Análisis granulométrico:

De los resultados obtenidos de la determinación granulométrica del suelo (Tabla 30), se observa que:

- En los puntos n°. 1, 4, 5 y 10 a medida que nos alejamos de la orilla del cauce del río, disminuye el porcentaje de arena y aumenta el porcentaje de arcilla.
- En los puntos n°. 6, 7, 8 y 9 a medida que nos alejamos de la orilla del cauce del río, disminuye el porcentaje de arena aumentando el porcentaje de arcilla y limo.

 Tabla 30.: Resultados de los análisis granulométrico (d=g/cc) en los distintos puntos de muestreo de estudio									
Puntos de muestreo	orilla			3m			10m		
	Arena	Arcilla	Limo	Arena	Arcilla	Limo	Arena	Arcilla	Limo
1. E.Navalmedio	100%	0%	0%	94%	4%	2%	90%	8%	2%
2. V.Fuenfría	98%	1%	1%	98%	1%	1%	88%	8%	4%
3. Cercedilla	96%	2%	2%	92%	4%	4%	92%	4%	4%
4. Guadarrama	94%	2%	4%	92%	2%	6%	90%	6%	4%
5. El Escorial	90%	2%	8%	96%	2%	2%	90%	6%	4%
6. Galapagar	100%	0%	0%	98%	1%	1%	94%	2%	4%
7. E. Molino de la Hoz	98%	1%	1%	94%	2%	4%	92%	2%	6%
8. Móstoles	94%	3%	3%	94%	3%	3%	90%	6%	4%
9. Batres	99%	1%	0%	99%	1%	0%	92%	2%	6%
10. Bargas	100%	0%	0%	100%	0%	0%	96%	4%	0%

Se extrapolan los porcentajes obtenidos de arena, arcilla y limo al triángulo de textura, figura 9, y a través de una serie de cálculos determinamos la clase textural del suelo, obteniendo en todos los 30 puntos de muestreo la clase textural franco arenosa.

Los suelos objetos de estudio, presentan escasa diferenciación textural, siendo la fracción arena la predominante en todos ellos, para algunos suelos el porcentaje de arena llega al 100%, siendo mínimo en el punto n°. 2, a una distancia máxima del cauce. Por lo cual estos suelos presentan una textura franco arenosa.

4.5.2 Determinación del color del suelo:

Los resultados de la determinación del color del suelo utilizando como referencia la carta de colores Munsell Soil Color Charts (Tabla 31).

● <u>Tabla 31.:</u> Color del suelo en los distintos puntos de muestreo de estudio			
Puntos de muestreo	orilla	3m	10m
1. E.Navalmedio	2.5Y/5/2	10YR/5/3	2.5Y/5/3
2. V.Fuenfría	2.5Y/5/1	10YR/5/2	2.5Y/5/3
3. Cercedilla	10YR/5/2	10YR/4/2	10YR/3/1
4. Guadarrama	2.5Y/5/1	2.5Y/5/2	2.5Y/5/4
5. El Escorial	2.5Y/6/1	2.5Y/5/3	2.5Y/5/4
6. Galapagar	5Y/5/1	10YR/4/1	2.5Y/4/2
7. E.Molino de la Hoz	10YR/6/1	10YR/6/2	10YR/5/2
8. Móstoles	2.5Y/5/2	2.5Y/5/3	2.5Y/5/4
9. Batres	10YR/3/1	10YR/5/2	10YR/6/2
10. Bargas	10YR/6/1	10YR/6/3	10YR/6/2

Los suelos objetos de estudio, no presentan casi diferenciación de color entre los diferentes puntos de muestreo. Mencionar que los suelos que nosotros hemos reconocido son suelos poco evolucionados edáficamente, ya que se desarrollan sobre depósitos aluviales recientes sin tiempo para alcanzar una mayor diferenciación genética, y por lo tanto, imposible de distinguir en cortes, calicatas o perfiles de estos suelos otras capas u horizontes que no sea uno superficial algo más oscuro por un mayor contenido en materia orgánica y mejor estructurado. Es el

denominado horizonte A, que según la nueva clasificación F.A.O., puede ser ócrico, móllico o úmbrico.

4.5.3 Determinación del pH del suelo:

Los resultados obtenidos de la medición del pH del suelo quedan recogidos en la tabla 32.

Tabla 32.: pH del suelo en los distintos puntos de muestreo de estudio			
Puntos de muestreo	orilla	3m	10m
1. E.Navalmedio	6,55	5,63	5,81
2. V.Fuenfría	6,87	5,36	5,37
3. Cercedilla	6,08	7,41	7,51
4. Guadarrama	6,68	7,46	6,48
5. El Escorial	6,69	7,1	6,1
6. Galapagar	6,26	6,87	7,09
7. E.Molino de la Hoz	7,17	7,06	7,44
8. Móstoles	7,41	7,31	7,52
9. Batres	6,84	7,2	7,8
10. Bargas	6,96	7,45	7,31

Prácticamente la totalidad de los suelos de estudio son de naturaleza ligeramente ácida, cercanos a la neutralidad, presentando los valores de pH más bajos los suelos del punto nº. 2, a una distancia media y máxima del cauce. Por otra parte, el valor de pH más alto corresponde al punto nº. 9, con pH ligeramente alcalino.

Los suelos de los puntos nº. 1 y 2 son zonas húmedas y ácidos, debido a la presencia de cervunales (prados de pasto cervuno), y de pinares de pino albar (*Pinus sylvestris*), teniendo en cuenta que las acículas del pino albar producen que la acidificación del suelo sea mayor. Así mismo, la erosión y el transporte de materiales desde las laderas produce que los suelos sean ricos y profundos, además de presentar una humedad edáfica significativa debido a la presencia del curso fluvial.

4.5.4 Determinación de la conductividad del suelo:

Los resultados obtenidos de la medición de la conductividad del suelo quedan recogidos en la tabla 33.

Tabla 33.: Conductividad del suelo en los distintos puntos de muestreo de estudio

Puntos de muestreo	orilla	3m	10m
1. E.Navalmedio	83,4	57,9	51,8
2. V.Fuenfría	58	74	245
3. Cercedilla	50,5	145,5	199
4. Guadarrama	192,8	245	60,3
5. El Escorial	103,5	136,9	51,6
6. Galapagar	396	208	145,2
7. E.Molino de la Hoz	94,2	59,7	120,1
8. Móstoles	174,3	57,1	72,8
9. Batres	237	93,2	148,7
10. Bargas	679	157	93,6

La conductividad mayoritariamente varía desde valores entorno a 50 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) a valores de 679 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), situándose los valores más bajos los de los punto nº. 3, junto a la orilla del cauce, y a continuación los puntos nº. 5 y 1, a una distancia máxima del cauce.

Destacando los puntos nº. 10 y 6, junto a la orilla del cauce, este aumento de la conductividad es debido fundamentalmente a que son dos zonas de descarga del acuífero detrítico de Madrid, afectando la salinidad a los cultivos de la zona y a los materiales arrastrados por el cauce.

4.5.5 Determinación del carbono total y la materia orgánica del suelo:

Los resultados obtenidos de la determinación del carbono total y la materia orgánica del suelo quedan recogidos en la tabla 34.

Tabla 34.: Carbono total y materia orgánica del suelo en los distintos puntos de muestreo de estudio						
Puntos de muestreo	Carbono total (mg C/kg suelo)			Materia orgánica (%)		
	orilla	3m	10m	orilla	3m	10m
1. E.Navalmedio	1,96	10,52	3,21	0,34	1,81	0,55
2. V.Fuenfria	1,28	6,14	11,08	0,22	1,06	1,91
3. Cercedilla	0,14	3,45	3,07	0,02	0,59	0,53
4. Guadarrama	5,83	2,75	4,69	1,01	0,47	0,81
5. El Escorial	9,18	2,01	2,95	1,58	0,35	0,51
6. Galapagar	5,38	2,43	2,72	0,93	0,42	0,47
7. E.Molino de la Hoz	3,02	11,47	4,02	0,52	1,98	0,69
8. Móstoles	4,73	1,66	1,96	0,82	0,29	0,34
9. Batres	13,69	6,48	1,55	2,36	1,12	0,27
10. Bargas	1,19	1,89	1,62	0,21	0,33	0,28

El porcentaje de materia orgánica es bajo o muy bajo en la mayoría de los casos, pero está dentro de lo que cabría esperar según las características de los suelos de nuestro país, endémicamente pobres en materia orgánica. Aunque se observa una variación entre los distintos suelos, así en el punto n°. 3 presenta el menor porcentaje de materia orgánica junto a la orilla del cauce. Los puntos que presentan mayor porcentaje de materia orgánica son el punto n°. 9, 5, 4 y 6, destacando el punto n°. 9 donde hay mayor porcentaje de materia orgánica, todos junto a la orilla del cauce.

En los puntos n°. 1 y 3 se produce mayor lavado y porcentaje de arena en la zona de la orilla donde el contenido de materia orgánica es menor, esta se va acumulando a medida que nos alejamos de la orilla, y sin embargo la mayor materia orgánica se acumula a partir del punto n°. 4 al 10 en la orilla, puede ser debido a los arrastres de materia orgánica por el cauce o a los vertidos antrópicos próximos.

Si comparamos las tablas 30, 34 y 23, se observa que algunos metales como el cadmio aparecen en concentraciones mayores en el agua, correspondiendo a zonas donde hay suelos con mayor contenido en materia orgánica y arcillas, tal como sucede en los puntos n°. 3 y 9.

4.5.6 Determinación del pH del nitrógeno total y la relación C/N:

Los resultados obtenidos de la determinación del nitrógeno total y la relación C/N en el suelo quedan recogidos en la tabla 35.

● Tabla 35.: Nitrógeno total y C/N del suelo en los distintos puntos de muestreo de estudio						
Puntos de muestreo	Nitrógeno total (mg/kg suelo)			Relación C/N		
	orilla	3m	10m	orilla	3m	10m
1. E.Navalmedio	0,10	0,22	0,06	19,60	47,82	53,50
2. V.Fuenfria	0,07	0,26	0,22	18,29	23,62	50,36
3. Cercedilla	0,013	0,42	0,39	10,08	8,21	7,87
4. Guadarrama	0,14	0,11	0,19	41,64	25,00	24,68
5. El Escorial	0,10	0,12	0,10	91,80	16,75	29,50
6. Galapagar	0,18	0,18	0,15	29,89	13,50	13,40
7. E.Molino de la Hoz	0,20	0,09	0,11	15,10	127,44	36,55
8. Móstoles	0,13	0,09	0,09	36,38	18,44	21,78
9. Batres	0,05	0,20	0,11	304,22	32,40	14,09
10. Bargas	0,14	0,05	0,04	8,50	37,80	27,00

La relación C/N desciende progresivamente desde la orilla hasta los 10 m., en los puntos nº. 3, 4 y 6. Se observan importantes alteraciones a esta tendencia en los puntos nº. 7 y 9, presentando ambos un valor muy alto de la relación C/N, lo cual nos indica la existencia de depósitos importantes de materia orgánica, (C), no mineralizada en los bordes del cauce en estos puntos.

En los puntos nº. 1, 2 y 3 la cantidad de nitrógeno total en el suelo es pequeña, esto es debido a la existencia de materiales muy silíceos en los bordes del cauce, se acumula poca materia orgánica junto a la orilla, y hay poca contaminación antrópica.

En el punto nº. 10 disminuye el nitrógeno total del suelo conforme nos alejamos de la orilla hacia los 10 m., disminuyendo la cantidad de materia orgánica en el suelo.

4.5.7 Determinación de los metales traza:

En el suelo los metales pesados aparecen como elementos minoritarios que se encuentran en concentraciones muy bajas. Son muy estables en el suelo y suelen concentrarse en el proceso natural de transformación de las rocas para originar los suelos. Los resultados obtenidos de la determinación de los metales pesados en el suelo quedan recogidos en la tabla 36.

Tabla 36.: Concentración de los metales pesados (mg/kg de suelo) en las distintas muestras de estudio

Punto de muestreo	Cu	Cd	Ni	Cr	Zn	Pb
1.1 (orilla)	0,33	0,20	0,20	N.D	14,40	0,13
1.2 (a 3 m)	0,40	0,20	0,27	N.D	19,47	0,13
1.3 (a 10 m)	0,67	0,20	0,33	N.D	16,33	0,13
2.1 (orilla)	0,27	0,20	0,27	N.D	17,60	0,20
2.2 (a 3 m)	0,27	0,20	0,40	N.D	11,73	0,27
2.3 (a 10 m)	0,40	0,40	0,33	N.D	15,07	0,40
3.1 (orilla)	0,53	0,33	0,27	N.D	26,80	0,73
3.2 (a 3 m)	1,80	0,20	0,33	N.D	38,93	2,40
3.3 (a 10 m)	1,40	0,47	0,27	N.D	34,73	1,07
6.1 (orilla)	88,80	102,80	44,13	80,67	195,80	9,40
6.2 (a 3 m)	14,73	28,24	3,40	9,13	80,60	5,40
6.3 (a 10 m)	13,33	73,33	2,40	7,80	60,67	3,80
7.1 (orilla)	13,13	144,87	2,73	6,20	50,67	0,00
7.2 (a 3 m)	13,07	31,13	2,33	16,40	32,67	5,07
7.3 (a 10 m)	11,80	88,73	2,33	5,93	76,20	0,00
8.1 (orilla)	5,67	79,07	3,67	8,93	113,40	4,87
8.2 (a 3 m)	7,87	110,60	3,27	9,27	106,87	5,60
8.3 (a 10 m)	4,60	106,93	2,33	6,13	97,47	3,47
9.1 (orilla)	8,20	110,67	3,73	8,07	107,33	5,07
9.2 (a 3 m)	6,33	106,87	3,33	9,13	98,07	4,80
9.3 (a 10 m)	5,73	89,33	2,67	7,40	81,87	4,73
10.1 (orilla)	8,93	129,33	5,33	9,53	114,87	5,80
10.2 (a 3 m)	6,67	120,00	4,67	9,40	109,93	4,87
103 (a 10 m)	5,07	109,47	4,20	7,47	101,27	4,60

(NOTA: N.D = menor del límite de detección)

Para el reconocimiento de la contaminación por metales pesados en suelos, se utilizan los niveles de referencia que conllevan sistemas de alerta, vigilancia y control. Por encima de estas guías se encuentran los niveles de intervención que obligan ya a tomar medidas correctoras (Tabla 37).

Tabla 37.: Niveles de referencia para metales pesados en varias comunidades españolas		
Metales pesados	Niveles de referencia ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Niveles de intervención ($\mu\text{g g}^{-1}$)
Cu	50 suelo pH<7, Andalucía (CMAJA 1999) 100 suelo pH>7, Andalucía (CMAJA 1999) 10 País Vasco (IHOBE, 1994)	300 suelo pH<7, Andalucía (CMAJA 1999) 500 suelo pH>7, Andalucía (CMAJA 1999) 250 País Vasco (IHOBE, 1994)
Cd	2 suelo pH<7, Andalucía (CMAJA 1999) 0,8 País Vasco (IHOBE, 1994)	15 Andalucía (CMAJA 1999) 18 País Vasco (IHOBE, 1994)
Zn	200 Andalucía (CMAJA 1999) 50 País Vasco (IHOBE, 1994)	600 suelo pH<7, Andalucía (CMAJA 1999) 840 País Vasco (IHOBE, 1994)
Pb	100 Andalucía (CMAJA 1999) 16 País Vasco (IHOBE, 1994)	350 Andalucía (CMAJA 1999) 330 País Vasco (IHOBE, 1994)

También, los resultados obtenidos de la determinación de los metales pesados en el suelo se comparan con los valores límite de concentración de metales pesados en los suelos (mg/Kg), Anexo 1 A, del Real Decreto 1310/1990, de 29 de Octubre de 1990 (Tabla 38).

Tabla 38.: Valores límite de concentración de metales pesados (mg/Kg) según el R.D 1310/1990		
Metales pesados	Suelos con pH<7	Suelos con pH>7
Cu	50	210
Cd	1	3
Ni	30	112
Cr	100	150
Zn	150	450
Pb	50	300

Los valores de concentración de cobre en el punto nº. 6.1, supera los valores límites de concentración establecidos en el R.D 1310/1990 y los niveles de referencia establecidos en Andalucía y País Vasco.

Respecto a las concentraciones de cadmio en la cuenca media (excepto el punto nº. 6.2) y baja del río Guadarrama supera los valores límites de concentración establecidos en el R.D 1310/1990 y los niveles de referencia establecidos en Andalucía y País Vasco.

En el punto nº. 6.1 la concentración de níquel supera los valores límites de concentración establecidos en el R.D 1310/1990. Así mismo, en este mismo punto la concentración de zinc supera los valores límites de concentración establecidos en el R.D 1310/1990 y los niveles de referencia establecidos en el País Vasco, pero no los establecidos en Andalucía.

Los valores de concentración de cromo en toda la cuenca del río Guadarrama no supera los valores límites de concentración establecidos en el R.D 1310/1990.

También se observa que las concentraciones de plomo en toda la cuenca del río Guadarrama no supera los valores límites de concentración establecidos en el R.D 1310/1990 ni los niveles de referencia establecidos en Andalucía y País Vasco.

Resumiendo, la cuenca alta del río Guadarrama presenta unos valores de concentración de metales pesados inferiores a los valores límites de concentración establecidos en el R.D 1310/1990 y a los niveles de referencia establecidos en Andalucía y País Vasco. Por lo tanto, se puede establecer que son suelos no contaminados, tanto en suelos ácidos como en suelos básicos.

Y a partir de la cuenca media del río Guadarrama, los valores de concentración de estos metales pesados aumenta a lo largo del cauce del río, debido a los distintos vertidos que se realizan en diferentes puntos de éste, así como también los distintos cationes procedentes de la descomposición de los aluminosilicatos, etc.

Destacando el punto nº. 6.1 (junto a la orilla) donde el suelo presenta contaminación prácticamente por todos los metales estudiados, a excepción del Cr y Pb, pudiéndose deber a vertidos realizados en la zona.

Si comparamos las tablas 36 y 23, se observa que los resultados de metales pesados en el suelo tienen poca relación con los obtenidos en el agua en esos mismos puntos, salvo para el caso del cadmio que aparecen en concentraciones mayores a los valores límites de concentración establecidos en la legislación correspondiente, tanto para el agua y suelo, tal como sucede en el punto nº. 8, y esto es atribuible a vertidos antrópicos próximos.

4.6 Datos obtenidos en el estudio de las formas de fósforo en la zona de estudio

4.6.1 Curso medio del río Guadarrama

Se realizó un estudio previo para la determinación del fósforo (fósforo disuelto y particulado), realizándose una comparación entre los diferentes métodos de extracción de fósforo particulado, entre dos puntos de muestreo del curso medio del río Guadarrama:

- Punto de muestreo: Galapagar-La Navata (junto a la estación de RENFE)
- Punto de muestreo: Embalse de Molino de la Hoz (puente del Retamar)

√ Métodos de determinación de fósforo particulado

Los resultados obtenidos de P ortofosfato (dil), P total (dil), Portofosfato y P total en extracto acuoso, para las dos muestras tomadas en los puntos de Galapagar y Embalse Molino de la Hoz, por diferentes métodos empleados descritos en el apartado 3.5.2, quedan recogidos en las tablas 39 y 40.

Tabla 39.: Resultados en extracto acuoso para las muestras de Galapagar

Método	Solución extractora			Factor de dilución	P Ortofosfato (dil) (mg/l)	P total (dil) (mg/l)	P Ortofosfato (mg/l)	P Total (mg/l)
	Disolvente	Concentración	Relación					
Olsen modificado	NaHCO ₃	0,5 N	1:10	3	2,77	3,16	8,31	9,49
	EDTA	0,01M						
Bray 1	HCl	0,025N	1:7	3	2,68	3,37	8,04	10,11
	NH ₄ F	0,03N						
Bray 2	HCl	0,1N	1:7	3	2,77	3,08	8,31	9,24
	NH ₄ F	0,03N						
Truog	H ₂ SO ₄	0,002N	1:200	1	2,35	2,97	2,35	2,97
Mehlich	HCl	0,05N	1:4	6	3,04	3,3	18,24	19,8
	H ₂ SO ₄	0,025N						

Tabla 40.: Resultados en extracto acuoso para las muestras de E. Molino de la Hoz

Método	Solución extractora			Factor de dilución	P Ortofosfato (dil) (mg/l)	P total (dil) (mg/l)	P Ortofosfato (mg/l)	P Total (mg/l)
	Disolvente	Concentración	Relación					
Olsen modificado	NaHCO ₃	0,5 N	1:10	3	3,39	4,175	13,58	16,7
	EDTA	0,01M						
Bray 1	HCl	0,025N	1:7	3	3,53	3,87	14,12	15,48
	NH ₄ F	0,03N						
Bray 2	HCl	0,1N	1:7	3	1,82	2,12	7,28	8,48
	NH ₄ F	0,03N						
Truog	H ₂ SO ₄	0,002N	1:200	1	1,86	2,15	1,86	2,15
Mehlich	HCl	0,05N	1:4	6	4,16	4,45	24,99	26,67
	H ₂ SO ₄	0,025N						

Los resultados obtenidos de Portofosfato y P total en kg/g de suelo para las dos muestras tomadas en los puntos de Galapagar y Embalse Molino de la Hoz quedan recogidos en las tablas 41 y 42.

Tabla 41.: Medidas de fósforo referidas a gramos de suelo para las muestras de Galapagar		
Método	P Ortofosfato (mg/g de suelo)	P total (mg/g de suelo)
Olsen modificado	0,083	0,095
Bray 1	0,056	0,071
Bray 2	0,058	0,064
Truog	0,47	0,594
Mehlich	0,072	0,079

Tabla 42.: Medidas de fósforo referidas a gramos de suelo para las muestras de E. Molino de la Hoz		
Método	P Ortofosfato (mg/g de suelo)	P total (mg/g de suelo)
Olsen modificado	0,136	0,167
Bray 1	0,099	0,108
Bray 2	0,051	0,059
Truog	0,37	0,43
Mehlich	0,099	0,106

En condiciones naturales, la litología de la zona, dominada por los granitos guadarrámicos, no tendría que generar fosfatos en las aguas de escorrentía.

Antiguamente, en la vega del río, había huertas familiares, pero su uso ha sido ya abandonado, y tampoco hay cultivos que puedan producir unos lixiviados de los abonos fosfatados que nos incrementen la concentración de fosfatos de esta manera.

El uso del terreno como urbano, y la escasez de asentamientos industriales, hace pensar que el origen de la concentración de fosfatos se debe a la existencia de vertidos en las aguas, que van haciendo que las condiciones del río empeoren y se vaya cargando de materiales y compuestos como el fósforo.

√ Fósforo disuelto y particulado

❖ 1.- Cantidad anual de fósforo en el punto de Galapagar

Gracias a la medida del caudal en este punto, de 1255 l/s, podemos establecer el caudal anual, que sería de $3,95 \cdot 10^{10}$ l/año.

a) Cantidad anual de fósforo disuelto transportado en este punto.

Si la concentración de ortofosfatos en el agua es de 0,46 mg/l, en un año, con el caudal del río, se transportarán 18.770 kg/año de ortofosfatos.

Para el fósforo total, cuya concentración en las aguas es de 0,51 mg/l, en un año tendremos 20.200 kg/año de fósforo total.

b) Cantidad anual de fósforo particulado transportado en este punto

En la toma de muestra se recogió 35,57 g de material litológico en 5 s, luego el río transporta 7,114 g de suelo/s.

Con este dato se calculo los gramos de materiales transportados al año, que son $22,43 \cdot 10^7$ g de suelo/año. La cantidad de fósforo total y de ortofosfatos que transporta el río como material particulado para cada uno de los métodos, en el punto de estudio de Galapagar (Tabla 43).

Tabla 43.: Resultados obtenidos de kg de fósforo transportados al año por los diferentes métodos para el punto de Galapagar		
Método	P Ortofosfato (mg/g de suelo)	P total (mg/g de suelo)
Olsen modificado	18,62	21,31
Bray 1	12,56	15,92
Bray 2	13,01	14,35
Truog	105,42	133,23
Mehlich	16,15	17,72

❖ **2.- Cantidad anual de fósforo en el punto del Embalse Molino de la Hoz.**

Gracias a la medida del caudal en este punto, de 1189 l/s, podemos establecer el caudal anual, que sería de $3,75 \cdot 10^{10}$ l/año.

a) Cantidad anual de fósforo disuelto transportado en este punto

Si la concentración de ortofosfatos en el agua es de 1,12 mg/l, en un año, con el caudal del río, se transportarán 42.000 kg/año de ortofosfatos .

Para el fósforo total, cuya concentración en las aguas es de 1,22 mg/l, en un año tendremos 45.7 00 kg/año de fósforo total.

b) Cantidad anual de fósforo particulado transportado en este punto

En la toma de muestra se recogió 32,14 g de material litológico en 5 s, luego el río transporta 6,428 g de suelo/s.

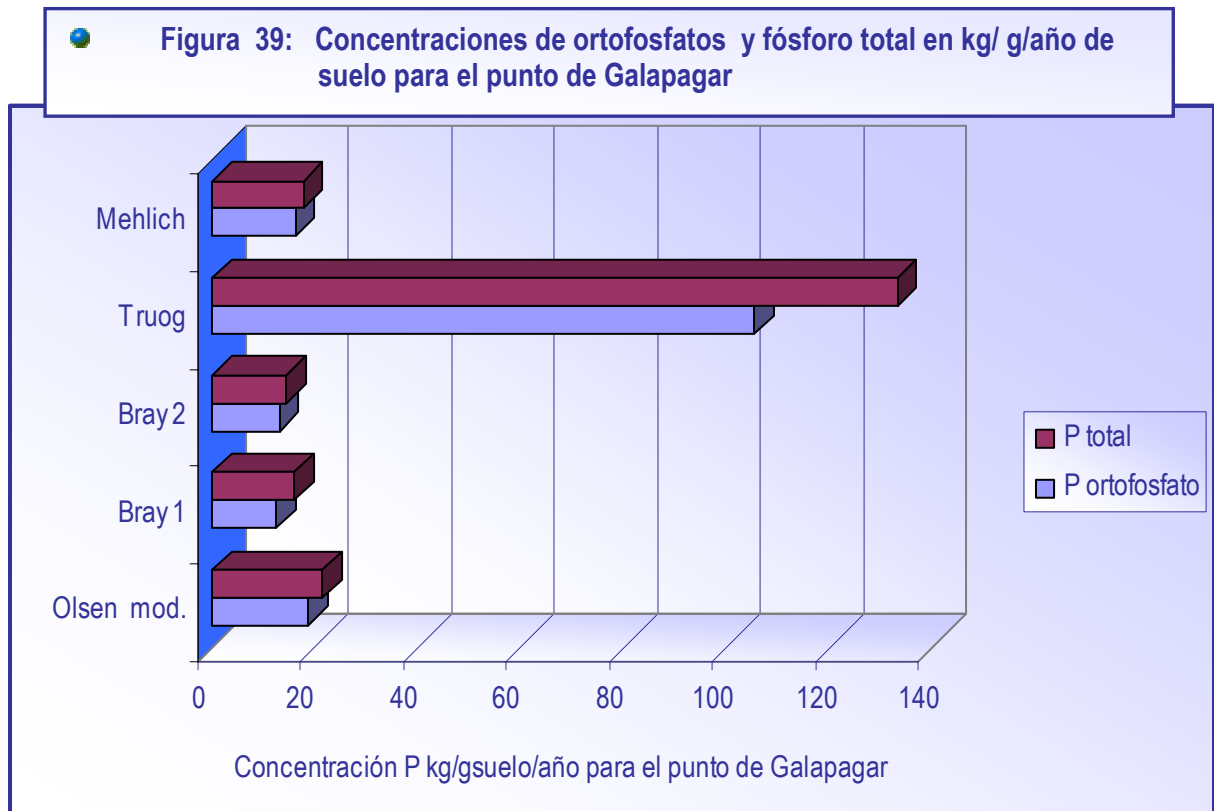
Con este dato se calculo los gramos de materiales transportados al año, que son $20,27 \cdot 10^7$ g de suelo/año.

Con el dato anterior se calculo la cantidad de fósforo total y de ortofosfatos que transporta el río como material particulado para cada uno de los métodos, en el punto de estudio del Embalse Molino de la Hoz (Tabla 44).

Tabla 44.: Resultados obtenidos de kg de fósforo transportados al año por los diferentes métodos para el punto de E. Molino de la Hoz		
Método	P Ortofosfato (mg/g de suelo)	P total (mg/g de suelo)
Olsen modificado	27,56	33,85
Bray 1	20,07	21,89
Bray 2	10,33	11,96
Truog	75,40	87,16
Mehlich	20,07	21,49

❖ **3.- Comparación entre las soluciones extractoras de fósforo.**

Con los resultados obtenidos para cada método de determinación de fósforo particulado en los puntos de muestreo se realizó las siguientes representaciones gráficas, quedan recogidos en las figuras 37 y 38.



El orden en la magnitud de extracción varió de la siguiente forma:

Truog >> Olsen modificado > Mehlich > Bray 1 > Bray 2

Las cantidades extraídas con Truog fueron entre 4 y 5 veces mayores que para las otras soluciones, e incluso hasta 9 veces mayores en el caso de compararlo con el Bray 2.

Sin embargo, para otros grupos de suelos, con otros tipos de fosfatos dominantes, la situación es diferente. Sánchez et al. (1991). En un Oxisol de Manaus (Brasil) obtuvieron la siguiente secuencia:

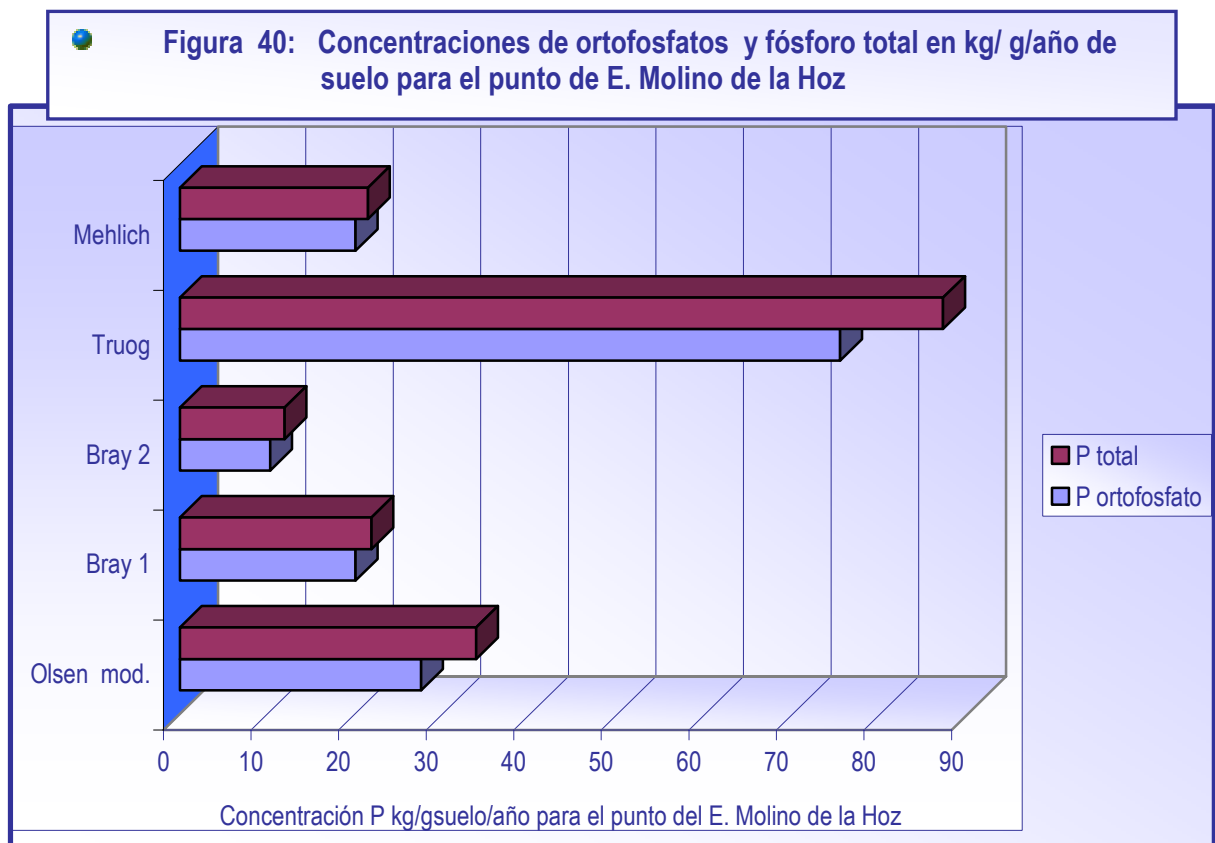
Bray 1 > Olsen modificado > Mehlich

En cambio, Vargas et al. (1992) en su estudio de vertisoles de Guanacaste (Costa Rica), encontraron la secuencia que a continuación se detalla, con unos valores hasta 5 veces más altos para el Truog que para los otros métodos.

Truog >> Bray 2 > Mehlich > Olsen modificado > Bray 1

Posiblemente, los factores que más han influido para que el método de Truog extrajera las mayores cantidades de fósforo fueron la naturaleza fuerte del ácido que constituye la solución extractante, la alta relación suelo-solución (1:200), el tiempo de agitación y la propiedad del sulfato de evitar la reabsorción de los fosfatos.

Así mismo, la relación suelo-solución y el tiempo de agitación mucho menores para Bray 2, podrían explicar los bajos valores de fósforo disponible obtenidos con éste método.



❖ **4.- Porcentaje correspondiente a cada una de las forma de fósforo.**

Se calcula del total de fósforo que llevan las aguas qué porcentaje corresponde a fósforo particulado y cuánto a fósforo disuelto. Para realizar dicha comparación se utilizó el método de Truog para la cantidad de fósforo particulado, ya que de los cinco métodos seguidos, es en el que se ha conseguido una mayor cantidad de fósforo extraído.

Las cantidades de porcentajes de ortofosfatos y fósforo total, en forma de fósforo disuelto y particulado, en estos puntos quedan reflejadas en la tablas 45.

Tabla 45.: Porcentajes de ortofosfatos y fósforo total (fósforo disuelto y particulado) para los puntos de muestreo

Puntos de muestreo	Pdisuelto				Pparticulado (Método Truog)				Total de ortofosfatos kg/año	Total de fósforo total kg/año
	Concentración de Ortofosfato		Concentración de Fósforo total		Concentración de Ortofosfato		Concentración de Fósforo total			
	kg/año	%	kg/año	%	kg/año	%	kg/año	%		
6-Galapagar – LaNavata	18.77	99,44	20.20	99,39	105,42	0,55	133,23	0,60	18.875,4	22.132,3
7- E.Molino de la Hoz	42.00	99,82	45.70	99,80	75,4	0,18	87,16	0,19	42.075,4	45787,1

Por lo tanto, según se ha podido determinar, el porcentaje de fósforo disuelto corresponde casi a la totalidad de fósforo que es transportado por el cauce del río, correspondiendo al fósforo particulado una cantidad que no sobrepasa en algunos casos el 0,5 % del total transportado.

Como afirman Ramírez et al. (1988), la cuantificación de la toma de muestras es muy difícil y presenta unos errores elevados, que se han llegado a determinar hasta del 90 %, y pese a los intentos en diferentes experimentos por muchos autores, no se ha conseguido solventar este problema.

4.6.2 Curso alto y bajo del río Guadarrama

√ Fósforo disuelto y particulado

Para calcular la cantidad anual de fósforo disuelto en los distintos puntos del curso alto y bajo de la cuenca del río Guadarrama, se ha utilizado la metodología de cálculo seguida en el apartado anterior y el caudal del río en estos puntos es el correspondiente al mes de enero de 2007. Los resultados obtenidos de Ortofosfato y P orgánico en estos puntos quedan recogidos en la tabla 46.

● Tabla 46.: Resultados del fósforo disuelto en los puntos de E.Navalmedio, Cercedilla, Móstoles y Bargas				
Puntos de muestreo	Concentración de Ortofosfato (mg/l)	Concentración de fósforo orgánico (mg/l)	Concentración de Ortofosfato (kg/año)	Concentración de fósforo orgánico (kg/año)
1- Embalse de Navalmedio	0,05	0,04	221	176
3- Cercedilla	0,07	0,01	286	4,0
8- Móstoles	0,79	1,1	41.700	58.000
10- Bargas	1,22	2,3	81.200	1,53 10 ⁶

Para calcular la cantidad anual de fósforo particulado en los distintos puntos del curso alto y bajo de la cuenca del río Guadarrama, se ha utilizado el método Truog, la cantidad de material litológico fue recogido durante el mes de enero de 2007 en los distintos puntos se resume en el Anejo 1.16.

Los resultados obtenidos de ortofosfato y fósforo orgánico en estos puntos y sus porcentajes en forma de fósforo disuelto y particulado, quedan recogidos en las tabla 47 y 48.

Tabla 47: Resultados del fósforo particulado en los distintos puntos

Puntos de muestreo	Concentración de Ortofosfato (mg/l)	Concentración de fósforo orgánico (mg/l)	Concentración de ortofosfato (mg/g de suelo)	Concentración de fósforo orgánico (mg/g de suelo)	Concentración de ortofosfato (kg/año)	Concentración de fósforo orgánico (kg/año)
1- Embalse de Navalmedio	18,0	6,5	0,163	0,058	56,76	20,49
3- Cercedilla	5,0	3,0	0,104	0,062	15,76	9,46
8- Móstoles	19,5	6,4	0,056	0,018	61,49	20,18
10- Bargas	62,5	20,3	0,242	0,078	197,10	64,01

Tabla 48: Porcentajes de ortofosfatos y fósforo orgánico en los distintos puntos

Puntos de muestreo	Pdisuelto				Pparticulado (Método Truog)				Total de ortofosfatos	Total de fósforo orgánico
	Concentración de Ortofosfato		Concentración de Fósforo orgánico		Concentración de Ortofosfato		Concentración de Fósforo orgánico			
	kg/año	%	kg/año	%	kg/año	%	kg/año	%		
1- E. de Navalmedio	221	79,5	176	89,6	56,76	20,5	20,49	10,4	277,76	196,49
3- Cercedilla	286	94,8	4,0	81,25	15,76	5,2	9,46	18,75	301,76	50,5
8- Móstoles	41.700	99,8	5,8. 10 ⁴	99,9	61,49	0,2	20,18	0,1	41,7. 10 ³	58,1. 10 ³
10- Bargas	81.200	99,7	1,53. 10 ⁵	99,9	197,10	0,3	64,01	0,1	81,4. 10 ³	1,531. 10 ⁵

4.6.3 Comparación de las formas de fósforo del río Guadarrama

Se comparan las cantidades anuales transportadas por el río Guadarrama de fósforo disuelto y particulado obtenidas en los apartados 4.5.1 y 4.5.2 en los distintos puntos de muestreo (Figuras 39 y 40).

Figura 41: Concentraciones de Pdisuelto kg/gsuelo/año en los puntos del curso alto-medio-bajo de la cuenca del río Guadarrama

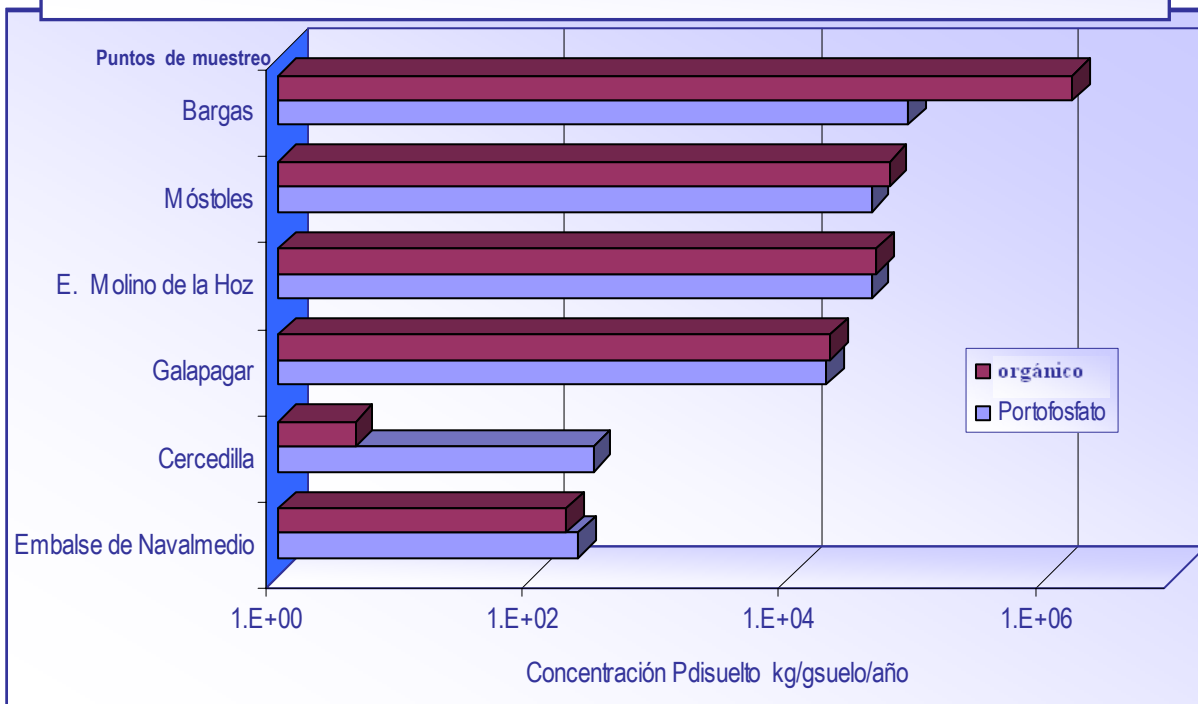
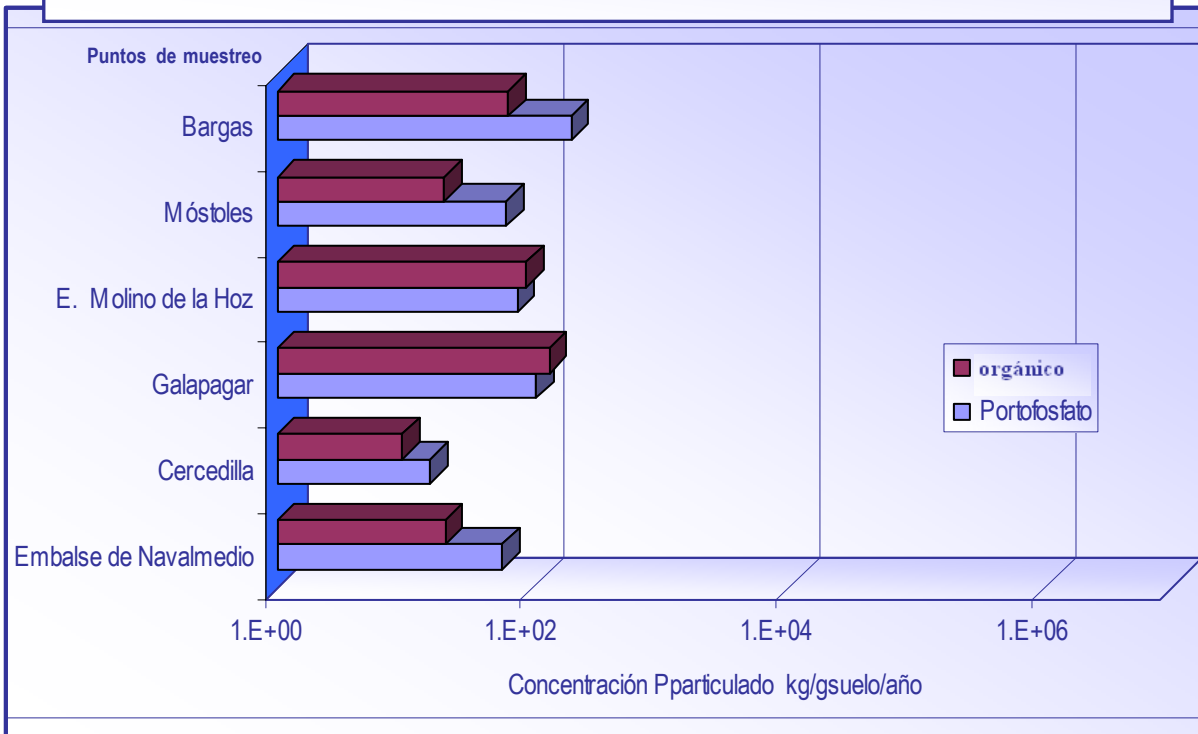


Figura 42: Concentraciones de Pparticulado kg/gsuelo/año en los puntos del curso alto-medio-bajo de la cuenca del río Guadarrama



En el curso alto del río Guadarrama (E. Navalmedio y Cercedilla), en condiciones naturales, la litología de la zona, dominada por los granitos guadarrámicos, no tendría que generar fosfatos en las aguas de escorrentía. Los resultados obtenidos nos indican la prácticamente inexistencia de fosfatos en las aguas.

A medida que se va descendiendo en el curso del río Guadarrama van aumentando las concentraciones de fósforo, en su curso bajo (Móstoles y Bargas) concretamente en el punto de muestreo de Móstoles se observan asentamientos urbanos (urbanizaciones y chabolas) en la zona, así mismo asentamientos industriales (papelera, chatarrerías, viveros, etc.), pequeñas huertas familiares junto al río, y vertidos ilegales; todo ello contribuye a un aumento considerable de la concentración de fosfatos y a un deterioro de la calidad de las aguas.

En el punto de muestreo de Bargas no existen asentamientos urbanos ni industriales cerca, pero sí hay granjas porcinas y cultivos de cereal que nos producen unos lixiviados de los abonos fosfatados que incrementan la concentración de fosfatos y todo unido a la existencia de vertidos aguas arriba hace que se dispare el contenido de fósforo en el agua del río Guadarrama.

4.6.4 Formas del fósforo en el suelo

Se realizó la determinación del fósforo particulado en el suelo, en seis zonas próximas al cauce de la cuenca del río Guadarrama. En cada zona de muestreo se tomaron tres muestras (junto a la orilla, a 3m, a 10m) de suelo, y a su vez en cada muestra de suelo se realizó una mezcla de los tres horizontes edáficos.

Para calcular la cantidad anual de fósforo asimilable en estos 18 puntos de muestreo se ha utilizado el método Truog descrito en el apartado 3.5.2. La metodología de cálculo es la seguida en el apartado 4.6.1, y la cantidad de material litológico recogido durante el mes de enero de 2007 en los distintos puntos se resume en el Anejo 1.17. Los resultados obtenidos de Portofosfato y P total en estos puntos quedan recogidos en la tabla 49.

Tabla 49: Concentraciones de las formas del fósforo en la zona de estudio			
Puntos de muestreo	Concentración de Ortofosfato (mg/l)	Concentración de fósforo total (mg/l)	Concentración de Ortofosfato (mg/g de suelo)
Embalse de Navalmedio - Orilla	15	4,8	0,06
Embalse de Navalmedio - 3M	3	1	0,03
Embalse de Navalmedio - 10M	2	8	0,01
Cercedilla - Orilla	5	1,8	0,01
Cercedilla - 3M	7	2,4	0,02
Cercedilla - 10M	15	5,1	0,03
Galapagar - Orilla	2	29,8	0,01
Galapagar - 3M	1	25,8	0,00
Galapagar - 10M	1	16,8	0,00
E.Molino de la Hoz - Orilla	2	9,2	0,00
E.Molino de la Hoz - 3M	1	26,6	0,00
E.Molino de la Hoz - 10M	1	22,9	0,00
Móstoles - Orilla	42,5	13,9	0,05
Móstoles - 3M	47,5	5,6	0,04
Móstoles - 10M	52,5	17,35	0,09
Barga s- Orilla	61,5	19,6	0,15
Bargas - 3M	39,5	12,9	0,04
Bargas - 10M	53	17,25	0,05

Los resultados obtenidos nos indican la prácticamente inexistencia de formas de fósforo en los suelos de la cuenca alta del río Guadarrama (E. Navalmedio y Cercedilla), aumentando las concentraciones de éstas a medida que vamos bajando hacia la cuenca baja del río Guadarrama (Móstoles, Bargas). El deterioro de la calidad del suelo es debido fundamentalmente a la fuerte acción antrópica (asentamientos urbanos, industriales y ganaderos) que sufren dichos suelos.

4.7 Datos obtenidos en la determinación de la edafofauna en la cuenca de estudio

4.7.1 En suelos naturales

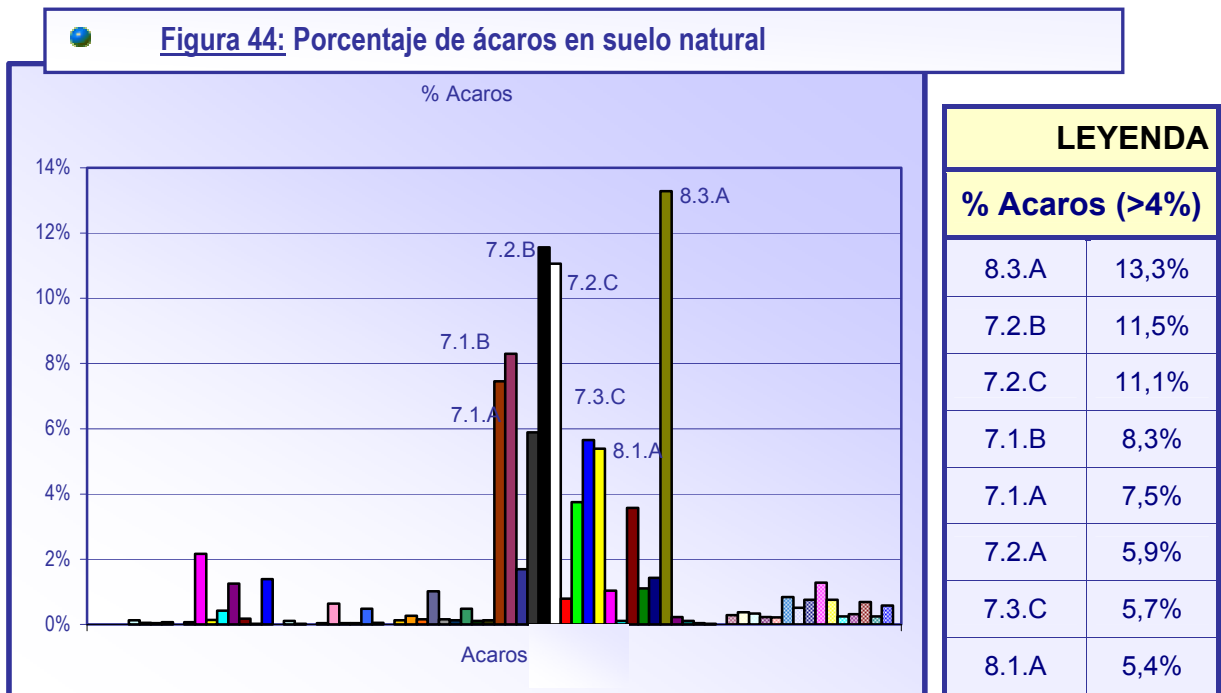
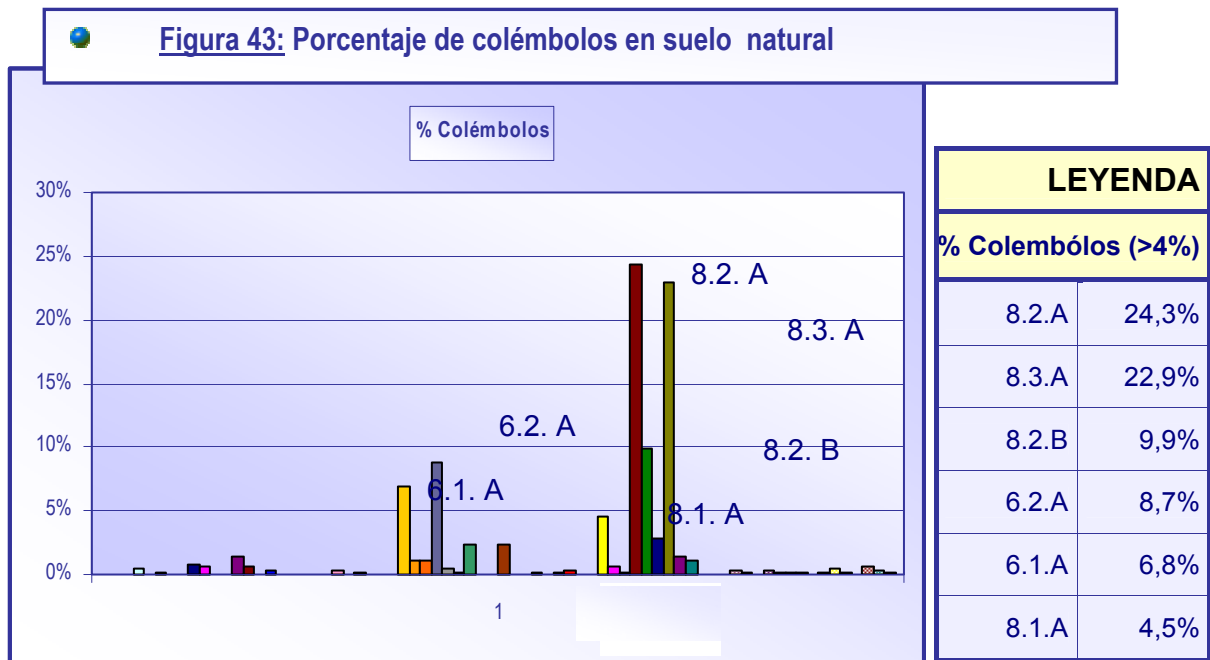
Mediante el método Berlesse- Tullgren, descrito en el apartado 3.5.1, se han extraído los especímenes de las muestras de suelo natural, y tras su recuento se han obtenido los siguientes resultados.

Las muestras de suelo tomadas para la determinación de la mesofauna corresponde a los puntos de muestreo descritos en el apartado 2.1, y siguiendo la metodología de muestreo del Anejo 1.6.

Los resultados de la determinación de la biodiversidad de la mesofauna en suelo natural, quedan recogidos en la tabla 50 y el porcentaje de todos los especímenes en el Anejo 1.17.

Tabla 50: Mesofauna encontrada en suelos naturales en la cuenca de estudio			
Especímenes	Cantidad (nº)	Especímenes	Cantidad (nº)
Colembola	3243,00	Heteroptera	5,00
Díptera	58,00	Isopoda	6,00
Acarina	5676,00	Coleoptera	23,00
Araneae	21,00	Chilopoda	14,00
Larva	45,00	Diplura	34,00
Symphyla	34,00	Lumbricidae	8,00
Hymenoptera	45,00	Proturo	16,00
Homoptera	6,00	Hormiga	37,00

Los especímenes más representativos obtenidos de la determinación de la biodiversidad de la mesofauna en suelo natural (Figuras 43, 44), son los colémbolos y los ácaros.



El porcentaje mayor de colémbolos se sitúa en los puntos de muestreo 8.2.A y 8.3.A, coincidiendo en este último punto también el porcentaje mayor de ácaros. El porcentaje menor de colémbolos y ácaros se sitúa en el punto 8.1.A.

Mediante la extracción y recuento de los especímenes en los suelos naturales estudiados, se observa que los grupos más representativos son los ácaros (61,22%)

y los colémbolos (34,98%) respectivamente. Siendo el número de especímenes mayor en el nivel A de cada punto, esto se debe a que el porcentaje de materia orgánica es mayor que en los niveles inferiores, existiendo una relación directamente proporcional entre la materia orgánica y el número de ejemplares de la mesofauna del suelo.

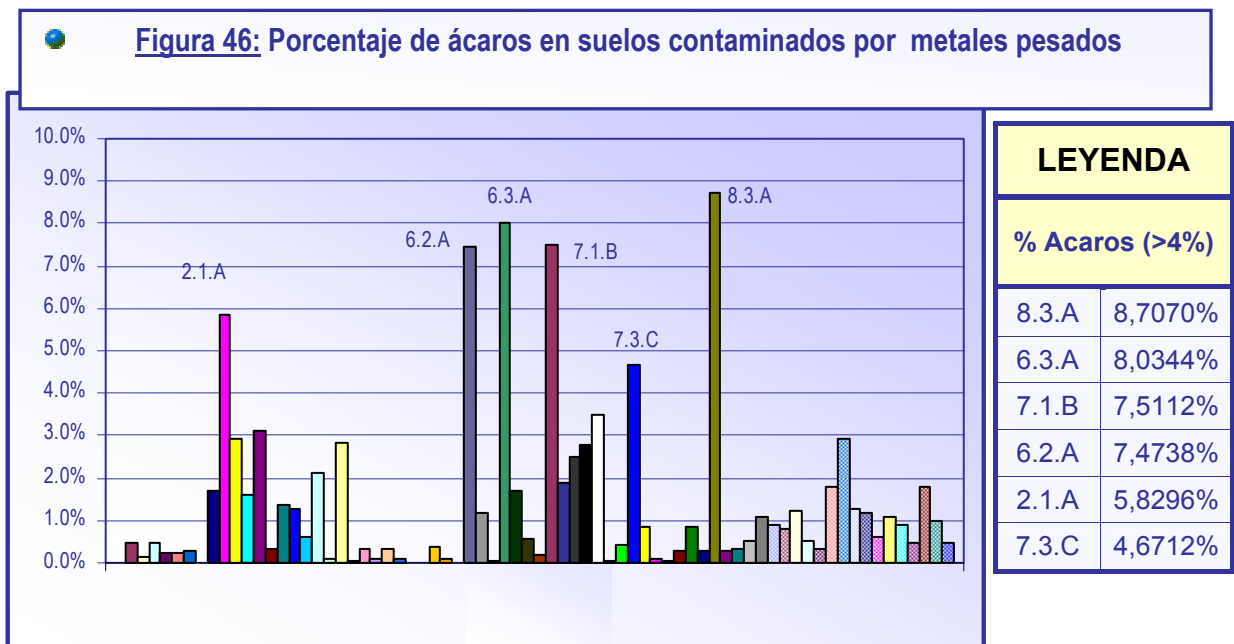
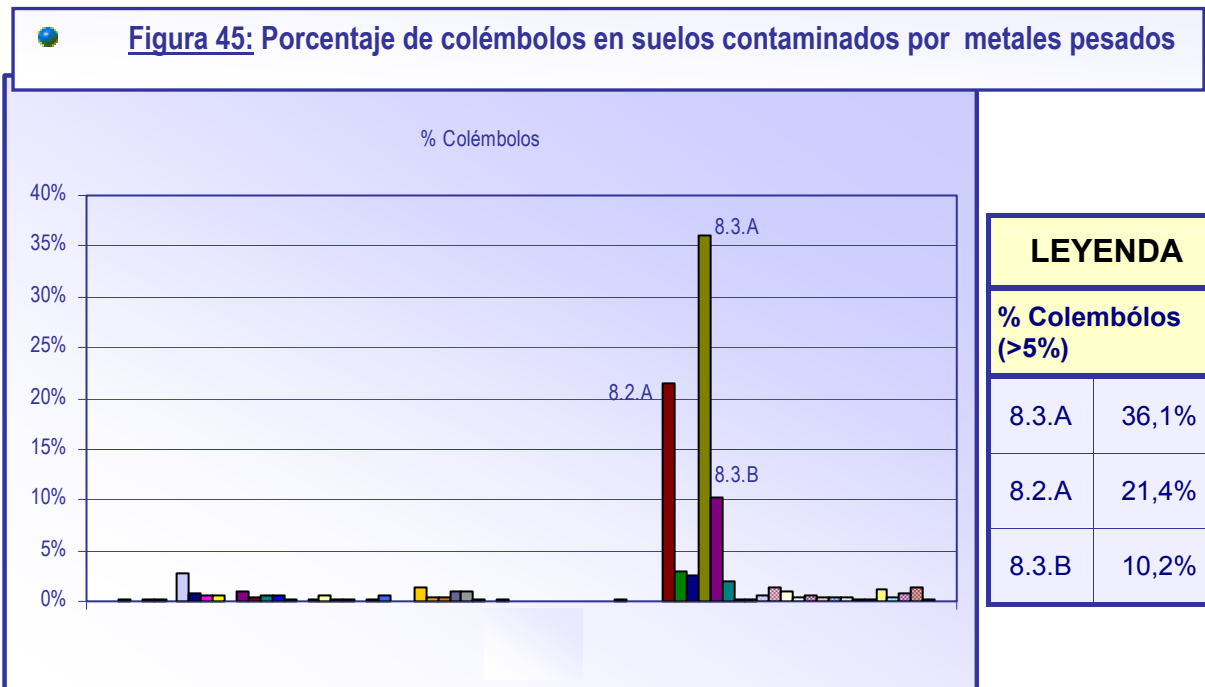
√ **En suelos contaminados por metales pesados**

Como ya se ha indicado en el apartado 3.5.2, para el estudio del impacto de los metales pesados sobre la edafofauna, se ha añadido 1.000 ppm. de metales pesados (Cu, Cd, Ni, Zn y Cr) en cada una de las macetas que contienen las muestras de suelo tomadas para la determinación de la mesofauna.

Los resultados de la determinación de la biodiversidad de la mesofauna en suelo contaminado por metales pesados, quedan recogidos en la tabla 51 y el porcentaje de todos los especímenes en el Anejo 1.17.

● Tabla 51:: Mesofauna encontrada en suelos contaminados por metales pesados en la cuenca de estudio			
Especímenes	Cantidad (nº)	Especímenes	Cantidad (nº)
Colembola	1510	Heteroptera	15
Díptera	30	Isopoda	15
Acarina	2676	Coleoptera	98
Araneae	1	Chilopoda	14
Larva	40	Diplura	14
Symphyla	20	Lumbricidae	1
Hymenoptera	92	Proturo	0
Homoptera	1	Hormiga	12

Los especímenes más representativos obtenidos de la determinación de la biodiversidad de la mesofauna en suelo contaminado (Figuras 45, 46), son los colémbolos y los ácaros.



El porcentaje mayor de colémbolos se sitúa en los puntos de muestreo 8.3.A y 8.2.A, coincidiendo en el punto 8.3.A también el porcentaje mayor de ácaros, al igual que sucedía en suelo natural. El porcentaje menor de colémbolos y ácaros se sitúa en los puntos 8.3.B y 7.3.C, respectivamente.

Tras el estudio de determinación de la biodiversidad de la mesofauna en las muestras de suelo contaminado por metales pesados, no se observan variaciones

en el número de especímenes obtenidos en las muestras tratadas con metales pesados, aunque si se observa una ligera disminución en el número de taxones encontrados.

Esto es un dato a tener en cuenta, ya que la diversidad es un factor importante, ya que según vayan aumentando la cantidad de factores limitantes esta irá disminuyendo. Por lo que, cuanta más diversidad se tenga en mejores condiciones se encontrará un suelo.

Los grupos más representativos siguen siendo los ácaros (58,96%) y los colémbolos (33,27%) respectivamente.

√ **Análisis estadístico de los resultados**

Los resultados se han tratado con el programa estadístico Statgraphics Plus 5.1, y se ha calculado la relación existente entre los diferentes parámetros del suelo y la concentración de metales pesados con la presencia de las dos especies más representativas: colémbolos y ácaros.

Para ello se refleja su cantidad en 100 g de suelo para calcular las correlaciones pertinentes con los parámetros del suelo y estudiar si se les puede atribuir el papel de bioindicadores.

Este programa encuentra el mejor modelo matemático que explique la correlación existente. Se ha utilizado como r (factor de correlación) aquellas que sean mayores de 0,60. Las correlaciones más significativas quedan recogidas en las tablas 52 y 53.

Tabla 52:: Correlaciones entre los diferentes parámetros del suelo y los colémbolos en suelo contaminado por metales pesados			
COLÉMBOLOS	Factor de Correlación (r)	Modelo	Ecuación del modelo
• nº de colémbolos y Ctotal	0,7715	Curva-s	$y = \exp(a + (b/x))$
• nº de colémbolos y M.O	0,8011	Inverso-x	$y = a + (b/x)$

Tabla 53:: Correlaciones entre los diferentes parámetros del suelo y los ácaros en suelo contaminado por metales pesados

ÁCAROS	Factor de Correlación (r)	Modelo	Ecuación del modelo
• nº de ácaros y pH	0,8141	Doble inverso	$y = 1/ (a + (b/x))$
• nº de ácaros y Conductividad	0,8162	Inverso	$y = 1/ (a + (b*x))$
• nº de ácaros y Ctotal	0,6416	Lineal	$y = a + (b*x)$
• nº de ácaros y Ntotal	0,6757	Inverso-y	$y = 1/ (a + (b*x))$
• nº de ácaros y M.O	0,6418	Lineal	$y = a + (b*x)$
• nº de ácaros y Zn	0,7317	Inverso-x	$y = a + (b/x)$
• nº de ácaros y Cu	0,7634	Inverso-y	$y = 1/ (a + (b*x))$
• nº de ácaros y Ni	0,7238	Inverso-y	$y = 1/ (a + (b*x))$

***Nota: en todas las ecuaciones de los diferentes modelos la y se corresponde a nº de individuos y la x a los diferentes parámetros analizados**

Las tablas anteriores nos indican que la población de colémbolos disminuye cuando la concentración de Ctotal y la M.O. aumenta. Esta relación es ilógica, ya que cuando el C y la M.O. aumentan, aumentarían los nutrientes y la población debería de aumentar. El resultado nos indica que hay otro factor que no hemos tenido en cuenta, y que nos determinaría esta relación anómala.

Los colémbolos no presentan relación alguna con los parámetros del suelo estudiados, ya que los factores de correlación obtenidos (r), son inferiores a 0,60.

En la población de ácaros observamos que éstos son muy sensible a cualquier cambio en los parámetros del suelo, y esto les hace ser muy buenos bioindicadores.

Respecto al pH, cuanto más ácido es el suelo, menor cantidad de cationes de cambio, por lo que la evolución del suelo es menor y debido a ello, el número de ácaros será más pequeño. Existe una orquilla de pH entre 4,5-8,5 donde los microorganismos se encuentran en las condiciones idóneas para la vida.

El número de ácaros disminuye a medida que aumenta la conductividad; ésta nos indica de manera indirecta que existe contaminación salina en el medio debido a la influencia antrópica, por lo que se produce alteración de habitats, influyendo negativamente en el medio biótico.

A medida que aumenta el C y la M.O., el número de ácaros también aumenta, esta es la relación lógica, ya que la biodisponibilidad de nutrientes también aumenta, mejorando las condiciones de vida de la biota.

Cuando aumenta la concentración de nitrógeno total, disminuye el número de ácaros, esto se debe a que un aumento de concentración de nitrógeno total conlleva un aumento de mineralización de la materia orgánica, reduciendo la biodisponibilidad de nutrientes.

A medida que aumenta la concentración por metales pesados, el número de ácaros disminuye considerablemente, por lo que este taxón es muy válido para indicar si existe contaminación por metales pesados en el suelo.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

❖ A.- EN RELACIÓN CON LOS USOS DEL TERRITORIO Y LA CALIDAD GLOBAL DEL AGUA:

- ✚ 1. La densidad de población ha crecido en los últimos 23 años en todos los municipios que integran su territorio. Cabe destacar Arroyomolinos, con un incremento de población de casi un 4800% sobre la existente en 1986, siendo muy corriente incrementos de entre un 400% y un 500%. Asimismo, señalar que hay 9 municipios, como son, Alpedrete, Collado Villalba, Torrelodones, Las Rozas de Madrid, Villanueva del Pardillo, Majadahonda, Boadilla del Monte, Móstoles y Arroyomolinos, con una densidad de población superior a 500 hab/km², considerado como el límite de presión acusada de la población sobre el medio.
- ✚ 2. Siguiendo el criterio del ISQUA (Índice Simplificado de Calidad del Agua), sólo los puntos del tramo alto, situados en cabecera y durante los meses de invierno y principio de primavera, presentan valores superiores a 85, lo que indica su empleo para todos los usos. Situándose el resto del año en valores entre 60 y 85, lo que corresponde a usos para abastecimiento, piscicultura y recreación. La mayoría de los puntos del tramo medio y bajo, presentan valores entre 55 y 60, que pertenecen a usos para riego, industria y abastecimiento con tratamientos especiales.
- ✚ 3. Las concentraciones de metales pesados en sus aguas superan los límites del R.D. 140/2003 para el abastecimiento de aguas a la población, en el caso del Plomo y del Cadmio, ambos a partir del tramo medio, es decir, de la subcuenca IV en adelante; atribuibles a actividades mineras o a un origen industrial; esto mismo sucede con las concentraciones de metales pesados en los suelos de la zona de protección de cauces, hasta los 100 m de distancia, no presentan contaminación de metales pesados en la zona de cabecera, destacando en el tramo medio y bajo la alta concentración de Cd (Cadmio), alcanzando valores por encima incluso de los de intervención superiores a 600 µg/g.
- ✚ 4. El fósforo es transportado por las aguas básicamente como fósforo disuelto, no alcanzándose más que un 18,75% de P particulado en el punto donde se ha detectado la mayor cantidad en los materiales arrastrados de fondo o en suspensión (punto nº. 3 (Cercedilla)). El resto ronda aproximadamente el 0,1% en la mayoría de los casos.

❖ **B.- RESPECTO A LA RELACIÓN DE LA MOVILIZACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO CON EL LAVADO DEL TERRITORIO:**

✚ 1. Se ha comprobado que sobre otros factores, las condiciones climáticas y en particular las expresadas como escorrentía de agua de la cuenca, constituyen el principal factor de removilización y transporte de estos elementos.

✚ 2. Los coeficientes de exportación de nitrógeno y fósforo, crecen de forma potencial con el caudal ($y = a \cdot x^b$) obteniéndose el factor de multiplicación "a" y el exponente "b" para cada una de las situaciones que se han identificado.

- Subcuencas con predominio de fuentes puntuales: VI y VII

- <u>Para el N_T:</u>	a = 447,254	b = - 0,5009
- <u>Para el P_T:</u>	a = 2,61365	b = - 0,06795

- Subcuencas con predominio de fuentes difusas: I, II y V

- <u>Para el N_T:</u>	a = 1,04167	b = - 0,10723
- <u>Para el P_T:</u>	a = 0,07467	b = - 0,3995

- Subcuencas con predominio de fuentes mixtas (puntuales y difusas): III, IV, VIII, IX y X

- <u>Para el N_T:</u>	a = 0,51856	b = 0,34084
- <u>Para el P_T:</u>	a = 2,23892	b = -0,04598

❖ C.- EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN DE NITROGENO Y FOSFORO EN CADA SUBCUENCA:

- ✚ 1. Según los usos actuales del suelo se han obtenido los coeficientes de exportación en $\text{g/m}^2/\text{año}$ se han obtenido para el conjunto de la cuenca los valores:

- **Para el $N_T = 1,43$ a $0,28 \text{ g/m}^2/\text{año}$**
 - **Para el $P_T = 0,35$ a $0,01 \text{ g/m}^2/\text{año}$**

- ✚ 2. El nutriente limitante de la producción de biomasa, que desencadena los procesos de eutrofización en toda la cuenca es el Nitrógeno. Sólo la subcuenca IV, presenta valores superiores a 16, considerando este como el límite de la relación N/P que indica que el nutriente limitante sería el Fósforo. Es de destacar que en la España silíceo los valores están alrededor de 20, como ocurre en esta subcuenca, quedando reservados los valores inferiores y sobre todo los próximos a 4, como en muchos tramos de la cuenca del Guadarrama, para caracterizar vertidos de aguas residuales.
- ✚ 3. Se ha comprobado que, el incremento en la concentración de nitrógeno en relación con el fósforo, puede deberse a diferentes factores, tales como la extensión de las áreas agrícolas, la deforestación y la pérdida de cobertura vegetal de los suelos, mientras que la disminución de fósforo se debe inicialmente a su fijación por reacciones químicas a los suelos.
- ✚ 4. Los coeficientes de exportación, producción por unidad de superficie que permite establecer comparaciones entre distintas subcuencas con respecto a la producción y aportes de N y P, presentan valores, que según la bibliografía se pueden asociar a usos forestales en la III, IV y V, para el nitrógeno ($< 0,4 \text{ g/m}^2/\text{año}$), y en la IV para el fósforo con valores ($< 0,01 \text{ g/m}^2/\text{año}$). Valores que corresponden a rural o agrícola para el N los presentan los coeficientes de exportación de las subcuencas I, II, VI y VII ($N \approx 0,05 \text{ g/m}^2/\text{año}$); y para el P, las subcuencas I, II, III y IV ($P \approx 0,03 - 0,07 \text{ g/m}^2/\text{año}$). El resto de las subcuencas, es decir, la VII, VIII, IX y X para el N y las VI, VII, VIII, IX y X para el P, con valores de $N > 0,5 \text{ g/m}^2/\text{año}$ y $P > 0,1 \text{ g/m}^2/\text{año}$, corresponden a producción de nutrientes de suelo urbano.
- ✚ 5. El aporte de nutrientes aparece muy asociado a eventos de precipitación de alta intensidad. Durante un período de 8 horas, 0,09 % del tiempo de un año, se produjo un 0,62 % de la carga anual de N y un 0,38 % de la carga anual de P, lo que representa incrementos de un 700 % en la producción del primero y un 416 % en el segundo.

❖ **D.- EN RELACIÓN CON LA CARACTERIZACIÓN DE SUELOS Y LA EDAFOFAUNA**

- ✚ 1. En la cuenca de estudio los suelos presentan una textura franco-arenosa, y son suelos poco evolucionados edáficamente, ya que se desarrollan sobre depósitos aluviales recientes sin tiempo para alcanzar una mayor diferenciación genética.
- ✚ 2. Algunos metales como el cadmio aparecen en concentraciones mayores en el agua, correspondiendo a zonas donde hay suelos con mayor contenido en materia orgánica y arcillas, tal como sucede en los puntos n°. 3 y 9.
- ✚ 3. Los resultados de metales pesados en el suelo tienen poca relación con los obtenidos en el agua en esos mismos puntos, salvo para el caso del cadmio que aparecen en concentraciones mayores a los valores límites de concentración establecidos en la legislación correspondiente, tanto para el agua y suelo, tal como sucede en el punto n°. 8, y esto es atribuible a vertidos antrópicos próximos.
- ✚ 4. Los especímenes más representativos obtenidos de la determinación de la biodiversidad de la mesofauna, tanto en suelo natural como en suelo contaminado por metales pesados, son los ácaros (61,22%) y los colémbolos (34,98%).
- ✚ 5. El empleo de la edafofauna como bioindicador de la situación de la cuenca del río Guadarrama frente a la contaminación por los metales pesados, nos indica que son los ácaros los más adecuados, presentando correlación inversa simple con incrementos en la concentración de Zn, Cr y Ni, ($r^2 > 0,7$). Es significativamente inversa su correlación también con el pH, Conductividad y N_T , disminuyendo el número de especímenes.
- ✚ 6. El resto de la mesofauna también es sensible a la contaminación, manifestándose una disminución más que en el número de especímenes, en el de taxones, lo que pone de manifiesto la influencia de la contaminación sobre la biodiversidad del medio.

❖ **E.- RESPECTO AL GRADO DE ALTERACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO GUADARRAMA EN RELACIÓN CON LOS COEFICIENTES DE EXPORTACIÓN:**

- ✚ 1. Considerando la subcuenca IV como la de menor desarrollo antrópico, menores coeficientes de exportación de nutrientes, y extrapolando esta producción al resto de la cuenca, se comprueba que el 19,58 % del N y el 3,12 % del P serían de origen natural mientras que el resto, 80,42 % para el

N y 96,88 % para el P tendrían un origen antropogénico, lo que constata el extremo grado de desarrollo de este territorio y la gran presión antrópica que soporta la masa de agua.

✚ **2.** Se han diferenciado tres zonas según el grado de alteración, obteniendo para cada una de ellas los valores:

- Zona muy antropizada: con un alto grado de alteración, en donde se incluyen las subcuencas VIII, IX y X en las que predominan todos los usos del territorio y corresponde a zonas más bajas de la cuenca con un mayor desarrollo de suelos.

- Para el N_T : 1,18 g/m²/año

- Para el P_T : 0,29 g/m²/año

- Zona parcialmente alterada: con un grado medio de alteración e incluiría las subcuencas I, II, VI y VII, donde existe un predominio de uso forestal y urbano, y con un desarrollo de suelos medio.

- Para el N_T : 0,49 g/m²/año

- Para el P_T : 0,10 g/m²/año

- Zona menos alterada: incluye a las subcuencas III, IV y V, donde existe un predominio de uso forestal y suelos poco desarrollados. Destaca la subcuenca II como la menos alterada, representaría el fondo natural de nutrientes en relación con la vegetación y la litología.

- Para el N_T : 0,33 g/m²/año

- Para el P_T : 0,02 g/m²/año

✚ **3.-** De acuerdo con los resultados obtenidos y contrastados con los de otros autores, consideramos que, el método utilizado basado en la cuantificación de la exportación de nutrientes generados en una cuenca en función con el uso de territorio, es el adecuado para tal fin, y pueden extrapolarse a cuencas de características climáticas y de usos del suelo homogéneas. A partir de ahí, se trata de establecer reglas de explotación adecuadas en la cuenca de cara a una gestión sostenible de la masa de agua superficial tal como indica la Directiva 2000/60/CE.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✚ Arnaiz, C. y Molina, J.A. (1985). "Vegetación acuática y helofítica de la cuenca alta del río Guadarrama (Madrid, España)". *Lazaroa*, 8. p.p. 221-240.
- ✚ Barrientos, J.A. y Rodríguez, R. (1993). "Curso práctico de Zoología. II Artrópodos". Ed. Oikos-tau. Barcelona.
- ✚ Behan-Pelletier, V.M. and Bisset, B. (1993). "Biodiversity of nearctic soil arthropods". *Canad. Biodiv.* 2. p.p. 5-14.
- ✚ Belzille, N.; Lecomte, P. and Tessier, A. (1989). "Testing readsorption of trace elements during partial chemical extractions of bottom sediments". *Environ. Sci. Technol.* 23 (8). p.p. 1015-1020.
- ✚ Bodega, M.I et al. (2006). "El crecimiento de la población extranjera en Madrid. Un episodio característico de la inmigración internacional en la España del cambio de siglo". *Estudios Geográficos* LXVII, 261. Madrid.
- ✚ C.I.E.M.A.T. (2007). "Procesos de degradación y recuperación de suelos". Serie Ponencias.: 243-251.
- ✚ Cabala Ruíz, J. (1966). "Estudio previo de regulación y aprovechamiento del río Guadarrama". En *Revista de Obras Públicas*, 3011. p.p. 153-170.
- ✚ Catalan, J. (1984). "Química del agua". Ed. Blume. Madrid. p.p. 355.
- ✚ Cobertera, E. (1993). "Edafología aplicada". Ed. Cátedra.
- ✚ Correll, D.L.; Jordan, T.E. and Weller, D.E. (1999). "Transport of nitrogen and phosphorus from Rhode River watersheds during storm events". *Water Resources Research*.35. p.p. 2513-2521.
- ✚ Corvera Gomringer, R. (2005). "Aportación de nitrógeno, fósforo y sedimentos suspendidos durante eventos de tormenta en microcuencas del río Grande de Añasco, Puerto Rico". Puerto Rico. Tesis Doctoral. Universidad de Puerto Rico.
- ✚ Cubillo, F. (1986). "Situación actual de la calidad de las aguas en los ríos de la comunidad de Madrid". Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Recursos Hidráulicos. Enero 1986. p.p. 161, 312.

- ✚ Custodio, E. y Llamas, M.R. (1976). "*Hidrología Subterránea*". Ed. Omega. Madrid.
- ✚ Davis, S. De Wiest (1966). "*Hidrogeología*". Editorial Ariel. Barcelona.
- ✚ Daza, J. y Muller, L. (1965). "*Comparación de cinco métodos químicos para la determinación de fósforo en algunos suelos tropicales*". Turrialba 15 (3). p.p. 249-251.
- ✚ De Miguel, E.; Callaba, A.; Arranz, J.C.; Cala, V.; Chacón, E.; Gallego, E.; Alberruche, E.; Alonso, C.; Fernández-Canteli, P.; Iribarren, I. y Palacios, H. (2002). "*Determinación de niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid*". I.G.M.E.
- ✚ Debels, P.; Barra, R.; Jaque, E. y Parra, O. (1999). "*Diagnóstico de la calidad del agua del río Damas: uso del suelo y producción hídrica*". VI Jornadas del CONAPHI-CHILE. p.p. 1. Unidad de Sistemas Acuáticas, Centro EULA. Universidad de Concepción.
- ✚ Douchaford, P. (1984). "*Edafología. 1. Edafogénesis y clasificación*". Edit. Masson. Barcelona.
- ✚ Evans, R. (1978). "*Soil erosion in north Norfolk*". J. Agric. Sci. Cambridge. 90. p.p. 185-192.
- ✚ Freeze and Cherry, (1979). "*Groundwater*". Englewood Cliffs; NJ. Prentice-Hall. p.p. 640.
- ✚ Fricker, H. (1980). "*Methods of Assessing Nutriente Loading. In: Restoration of Lakes and Inland Waters*". Int. Symp. on Inland Water and Lake Res. Portland 1980. E.P.A 440/5-81-010. Washington D.C.
- ✚ García Cacho, L. y Aparicio, A. (1986). "*Geología del Sistema Central Español. Comunidad de Madrid*". Consejería de Política Territorial. C.S.I.C. Madrid. p.p. 32.
- ✚ García Puertas, P. et al (1987). "*Estudio de la cuenca alta del Río Guadarrama*". I. Análisis físico-químico. Anal. Bromatol, XXXIX – núm. 1. p.p. 47-67.
- ✚ Garzón, G. y Alonso, A. (1996). "*El río Guadarrama, morfología y sedimentación actual en un cauce arenoso tipo braided*". Dpto. de Geodinámica, U.C.M.

28040, Madrid. Fac. de Ciencias. Campus da Zapateira, Univ. da Coruña, 15071, A Coruña. p.p. 373-374.

- ✚ Globler, D.C. and Silberbaver, M.J. (1985). "*The combined effect of geology, phosphate sources and runoff on phosphate export from drainage basing*". Water Res. V. 19. nº 8. p.p. 975-981. (U.K).
- ✚ Gómez Artola, C. (1990). "*Método Indirecto de evaluación de las Fuentes difusas de nutriente: Aplicación a la cuenca del Embalse de Valmayor*". Madrid. Tesis Doctoral. Fac. de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid.
- ✚ Gómez Artola, C.; Lacalle Pareja, B.; and Gonzalez García, (1995) "*Impact on hydrology and nutrients movements of developments in river basins draining into reservoirs*". Water Research. Vol.29. Issue 2. February 1995. Pages. 601-609, Elsevier Science. Great Britain. ISBN 0043-1354(94)00164-2.
- ✚ Gómez Elvira, F.J. y López Vera, F. (1983). "*Análisis preliminar de la incidencia del uso del suelo en la producción de nutrientes N/P y su influencia en la eutrofización de las aguas en la región de Madrid*". II Reunión de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Lerida. p.p. 339-457.
- ✚ Gómez Elvira, F.J.; Gómez Artola, C. y López Vera, F. (1985). "*Producción de nutrientes y su movilidad en las aguas de la Comunidad de Madrid*". I Congreso de Geoquímica. Inst. Col. Químicos de España. Soria. p.p. 46-46
- ✚ González del Tanago, M. (1985). "*Papel del bosque en la calidad de las agua. El campo*". Boletín de Información Agraria. Bosques y Montes de España. Abril-Junio. nº. 98.
- ✚ González García, M.P. (2008). "*Afección a los recursos hídricos de la unidad hidrogeológica 03-05 en la Comunidad de Madrid como consecuencia del desarrollo urbanístico*". Madrid. Tesis Doctoral. Fac. de Ciencias Universidad Autónoma de Madrid.
- ✚ Goula, M.; Ballester, M.; Blas, M.; De Sostoa, A.; Ferrer, X.; Serra, A. y Turon, X. (2000). "*Zoología. Ensenyament de Biología (Pràctiques de laboratori)*". Edicions de la Universitat de Barcelona.
- ✚ Haygarth, P.M. y Jarvis, S.C. (1999). "*Transfer of phosphorus from agricultural soil*". Adv. Agron. 66. p.p. 195-249.
- ✚ Haygarth, P.M. y Sharpley, A.N. (2000). "*Terminology for phosphorus transport*". J. Environ. Qual. 29. p.p. 10-15.

- ✚ Hem, J. (1970). *“Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water”*. Geological Survey Water-Supply. Washington.
- ✚ Holtan, H.; Kamp-Nielsen, L. y Stuanes, A. O. (1988). *“Phosphorus in soil, water and sediment: An overview”*. Hidrobiologia. 170. p.p. 19-34.
- ✚ I.N.T.E.C.S.A, (1975). *“Estudio de recopilación y síntesis de los recursos hidráulicos de las cuencas bajas de los ríos Guadarrama y Jaráma”*. Servicio Geológico de Obras Públicas, Comisaria de Aguas del Tajo. Madrid.
- ✚ Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid. <http://www.madrid.org/iestadis>
- ✚ Instituto Nacional de Estadística I.N.E. <http://www.ine.es/inebase>
- ✚ Jenne, E.A. (1968). *“Controls on Mn, Fe, Co, Ni, Cu and Zn concentrations in soils and water: the significant role of hydrous Mn and Fe oxides”*. p.p. 337-387. in R.F. Gould (ed.). *“Trace inorganics in water”*. Advances in chemistry series nº 73 Am. Chem. Soc Washington, D.C.
- ✚ Koehler, H.H. (1996). *“Soil animals and bioindication”*. In: Bioindicator systems for soil pollution 1996. Van Straalen, N.M. & Krivolutsky D.A. Eds. Kluwer Academic Publisher. p.p. 179-188.
- ✚ Lacalle Pareja, B.; López Vera, F. y González García, P. (1990). *“Aportaciones de Nitrógeno y Fósforo por las precipitaciones a la cuenca vertiente del embalse de Santillana. (Madrid)”*. Boletín C.E.A.L. Min. (en prensa) Madrid.
- ✚ Lacalle Pareja, B. (1989). *“Comportamiento de las fuentes difusas de nutrientes en la cuenca del Embalse de Santillana”*. Madrid. Tesis Doctoral. Fac. de Ciencias Universidad Autónoma de Madrid.
- ✚ Lacalle, B. y González, P. (1991). *“Aporte de nutrientes y variaciones del quimismo del río Navacerrada durante las crecidas”*. Artículos Técnicos. Revista: Tecnología del Agua. Septiembre. Nº. 86. p.p. 27.
- ✚ Lacalle Pareja, B.; González García, P. y López Vera, F. (2002). *“Aplicación de la metodología de la especiación química de metales en el estudio de la vulnerabilidad de acuíferos aluviales en la región de Madrid (España)”*. II Seminario-Taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación: caracterización y evaluación. Ciudad de La Habana, Cuba.
- ✚ Lee, G.F.; Jones, R.A. and Rast, W.C. (1980). *“Availability of phosphorous to phytoplacton and its implications for phosphorus management strategies for lakes”*. Ann Arbor. Science. Mich. U.S.A. p.p. 250-308.

- ✚ Lewis, W.M.J. and Grand, M.C. (1979). *"Relationships between steam discharge and yield of dissolved substances from a Colorado mountain Watershed"*. Soil Sci. 128. p.p. 253-363.
- ✚ Lewis, W.M.J.; Saunders, J.F. III.; Crumpacker, D.W.; Brendecke, C. (1984). *"Eutrophication and land use. Lake Dillon. Colorado"*. Ecological studies. 46. Edited by W.D. Billings. Durham (U.S.A) F. Golley, Athens (U.S.A). O.L. Lange, Würzburg (F.R.G) J.S. Alson, Oak Ridge (U.S.A) H. Remmende, Marburg (F.R.G).
- ✚ Likens, G.E.; Bormann, F.H.; Pierce, R.S.; Eaton, J.S. and Johnson, N.M. (1977). *"Biochemistry of a forest ecosystem"*. Springer -Verlag. p.p. 146.
- ✚ Loehr, R.C. (1974). *"Characteristics and comparative magnitude of non-point sources"*. Journal W.P.C.F. Vol. 46. Nº 8. August.
- ✚ López Cadenas de Llano, F.; Pérez-Soler, A. y Mondejar, C. (1982). *"Influencia de la deforestación de la Cuenca del Embalse de Vado en el Central del proceso de eutrofización de sus aguas"*. Comisión Forestal Europea. Grupo de Trabajo sobre ordenación de Cuencas hidrográficas de Montaña. XIII Palermo (Italia). p.p. 1.
- ✚ Matthes, G. (1982). *"The Properties of Groundwater"*. John Wiley and Sons. p.p. 461. New York.
- ✚ Mengel, K. (1985). *"Dynamics and Availability of major nutrients in soils"*. Springer-Verlag N. y Ins. Advances in soil Science. Vol. 2. p.p. 65-131.
- ✚ Moore, E. (1970). *"Furrow irrigation of lettuce resulting in water and nitrogen loss"*. J.A.M. Soc. Hort. Sci. 95.
- ✚ O.C.D.E. (1982). *"Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment, and Control"*. O.E.C.D. Paris. p.p. 154.
- ✚ Omernik, J.M. (1976). *"The influence of Land Use on Stream Nutrient Levels"*. U.S. – E.P.A. Report No. E.P.A – 600/3/76 – 104. Ecological Research Series, U.S. Environmental Protection Agency. Corvallis. Oregon. U.S.A.
- ✚ Ortiz Casa, J.L.; Peña, R.; Lee, G.F. y Jones, R.A. (1983). *"Aportación de nutrientes y eutrofización de embalses"*. Madrid. C.E.D.E.X-C.E.H. Publicación, nº. 144. p.p. 530.

- ✚ Ortíz Casas, J. L. (1984). *“Características Generales del proceso de Eutrofización. Cursillo sobre Eutrofización de Embalses”*. C.E.D.E.X-M.O.P.U. Madrid.
- ✚ Papadakis, J. *“Clasificación agroclimática”*. <http://www.Mapa.es/siga/inicio.htm>
- ✚ Peña Martínez, R. (1984). *“Evaluación de las aportaciones de nutrientes. Curso sobre Eutrofización de Embalses”*. C.E.D.E.X-M.O.P.U. Madrid.
- ✚ Peña, M.; Ortiz, C.; Fred, L. y Jonnes, A. (1983). *“Aportación de nutrientes y eutrofización de embalses”*. C.E.D.E.X-M.O.P.U. Madrid.
- ✚ Ramírez, R.; Tenías, J.; De Silva, L.C.; Rodríguez, T. y Chirinos, A. (1988). *“Calibración de cuatro métodos de análisis de suelo con la respuesta del mani a la fertilización del fósforo”*. Agronomía Tropical. 39: (1-3). p.p. 5-21.
- ✚ Rast, W. and Lee, G.F. (1978). *“Summary Analysis of the North American (U.S.Portion) O.E.C.D Eutrophication Project: Nutrient Loading-Lake. Response Relationships and Trophic State Indices”*. U.S-E.P.A, E.P.A-600/3-78-008, Envir. Res. Lab. Corvallis, OR. p.p. 454.
- ✚ Rivas, Z.; Sánchez, J.; Troncone, F.; Márquez, R.; Ledo de Medina, L.; Colina, M. y Gutiérrez, E. (2009). *“Nitrógeno y fósforo totales de los ríos tributarios al sistema lago de Maracaibo, Venezuela”*. Mayo, 2009, vol. 34 nº 5. Interciencia. p.p. 312.
- ✚ Rodríguez, O.Y. (2006). *“Evaluación nutricional de cinco tributarios del río Grande de Arecibo”*. Puerto Rico. Tesis Doctoral. Universidad de Puerto Rico.
- ✚ Rubió Soto, C. (2000). *“Ventajas y desventajas del índice simplificado de calidad de las aguas”*. Gabinete Técnico de la Secretaría General del Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya. Revista “Fuentes Estadísticas. Fuentes autonómicas” - Revista Nº 41 - Febrero 2000.
- ✚ Sadzawka, A. y Molina, R. (2004). *“Capacidad tampón de fósforo. Método de determinación en el laboratorio”*. XVI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo.
- ✚ Sánchez, F.; Aguilera, P. y Martínez, J. L. (1993). *“Consideraciones previas sobre la evolución de algunos parámetros físico-químicos en las aguas del río Andarax”*. Dpto. de Geodinámica. Universidad de Almería.
- ✚ Sande, P.; Mirás, J.M.; Vidal, E. y Paz, A. (2005). *“Formas de fósforo y su relación con la erosión en aguas superficiales bajo clima atlántico”*. Estudios de la zona no saturada del suelo. Vol. VII. Samper Calvete, F.J. y Paz González, A. p.p. 126-131.

- ✚ Seastedt, T.R. and Crossley, D.A. (1980). "Effects of microarthropods on the seasonal dynamics of nutrients in forest litter". *Soil Bio. J. Biochem.* 12: 377: 392.
- ✚ Seonaez Calvo, M. (1978). "Aprovechamiento y tratamiento agrario de las aguas residuales urbanas". Col. Monog. I.N.I.A. nº. 25. Ministerio de Agricultura. Madrid.
- ✚ Sharpley, A.N. y Menzel, R.G. (1987). "The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment". *Adv. Agron.* 41. p.p. 297-324.
- ✚ Sharpley, A.N.; Chapra, S.C.; Wedephol, R.; Sims, J.T.; Daniel, T.C. and Reddy, K.R. (1994). "Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options". *J. Environ. Qual.* 23.p.p. 437-451.
- ✚ Sharpley, A.N.; Foy, R.H. y Withers, P.J.A. (2000). "Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water: An overview". *J. Environ. Qual.* 29. p.p.176-181.
- ✚ Sharpley, A.N.; Smith, S.J.; Jones, O.R.; Berg, W.A. y Coleman, G.A. (1992). "The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff". *J. Environ. Qual.* 21. p.p. 30-35.
- ✚ Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA) del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <http://sig.mapa.es/siga>
- ✚ Socarrás, A. Rodríguez; M (2005). "Utilización de la mesofauna como indicador biológico en áreas recultivadas con *Pinus cubensis* en la zona minera de Moa, Holguín, Cuba". Cuba. ISBN. 959-250I- 156-4.
- ✚ Sonzogni, W.C. and Lee, G.F. (1974). "Nutrient sources for Lake Mendota 1972". *Trans. Wisc. Acad. Sci. Arts Lett.* LXII.
- ✚ Sposito, G.; Lund, L.J. and Chang, A.C. (1982). "Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46. p.p. 260-264.
- ✚ Steegen, A.; Govers, G.; Takken, I.; Nachtergaele, J.; Poesen, J. y Merckx, R. (2001). "Factors controlling sediment and phosphorus export from two belgian agricultural catchments". *J. Environ. Qual.* 30. p.p. 1249-1258.
- ✚ U.S-E.P.A. (1996). "Environmental indicators of water quality in the United States". E.P.A. 841-R-96-002. U.S-E.P.A. Office of water (4503. F) U.S. Gov. print Office, Washington, DC.

- ✚ Uttormerk, P.D.; Chapin, J.D. and Green, K.M. (1974). "*Estimating Nutrient Loading of Lakes from Non – Point Sources*". U.S - E.P.A – 660/3 – 74 -020. pp. 112.
- ✚ Vallentyne, J.R. (1975). "*The Algal Bowl. Lakes and Man*". Dep. Of the Env. Fish. And Mar. Serv. Miscel. Spec. Publi. 22 Ottawa. 186 p.p. (traducido al español por Ed. Omega, 1978, con el título "*Introducción a la Limnología. Los lagos y el hombre*").
- ✚ Van Straalen, N.M. and Krivolutsky, D.A. (1996). "*Bioindicador symstems for soil pollution*". Van Straalen, N.M & Krivoltsky D.A. Eds Kluwer Academia Publisher. p.p. 261.
- ✚ Vargas, M.; Bertsch, F. y Cordero, A. (1992). "*Comparación de métodos de extracción de fósforo, potasio, calcio y magnesio disponible en vertisoles de Guanacaste, Costa Rica*". Agronomía Costarricense 16 (1). p.p. 115-123.
- ✚ Wetzel, R.G. (1975). "*Limnology*". W.B. Saunders Company. Filadelfia. p.p. 743. (Trad. Española: Limnología. Ed. Omega, Barcelona 1981).