



Canal de  
Isabel II

## CUADERNOS DE I+D+i

# 11

Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid





© Canal de Isabel II - 2010

Autores:

Charo Beamonte García  
Jesús Pimentel Conde  
Manuel Gómez Cristóbal  
Gabriel Herrero de Andrés  
Natalia Fernández Antón

Dirección del estudio:

Juan Carlos Ibáñez Carranza

Agradecimientos

La base cartográfica para este trabajo ha contado con la aportación de imágenes cedidas por el Centro Regional de Información Cartográfica de la Comunidad de Madrid por lo cual manifestamos especial agradecimiento a D. Rafael Herrero García.

ISBN: 978-84-936445-9-8  
M-27911-2010



CUADERNOS DE I+D+i

11

Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica  
para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior  
en la Comunidad de Madrid



## EXCLUSIÓN DE RESPONSABILIDAD



Las afirmaciones recogidas en el presente documento reflejan la opinión de los autores y no necesariamente la de Canal de Isabel II.

Tanto Canal de Isabel II como los autores de este documento declinan todo tipo de responsabilidad sobrevenida por cualquier perjuicio que pueda derivarse a cualesquiera instituciones o personas que actúen confiadas en el contenido de este documento, o en las opiniones vertidas por sus autores.

## PRESENTACIÓN

Los cuadernos de I+D+i de Canal de Isabel II forman parte de la estrategia de gestión del conocimiento de la Empresa y del desarrollo del Plan de Investigación, Desarrollo e Innovación.

Son elemento de difusión de proyectos e iniciativas desarrollados y auspiciados desde Canal de Isabel II para la innovación en las áreas relacionadas con el servicio de agua en el entorno urbano.

Exponen las diferentes problemáticas abordadas en cada proyecto junto con los resultados obtenidos. La intención al difundirlos mediante estas publicaciones es compartir las experiencias y conocimientos adquiridos con todo el sector de servicios de agua, con la Comunidad de Madrid científica y con cuantos desarrollan labores de investigación e innovación. La publicación de estos cuadernos pretende contribuir a la mejora y eficiencia de la gestión del agua y, en consecuencia, a la calidad del servicio prestado a los ciudadanos.

Los cuadernos de I+D+i ya publicados son los que figuran en la presente tabla.

Nº Colección	Cuadernos de I+D+i publicados
1	Transferencias de derechos de agua entre demandas urbanas y agrarias. El caso de la Comunidad de Madrid
2	Identificación de rachas y tendencias hidrometeorológicas en el ámbito del sistema de Canal de Isabel II
3	Participación de Canal de Isabel II en el Proyecto Internacional de Eficiencia en la Gestión (IDMF)
4	Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid
5	El agua virtual y la huella hidrológica en la Comunidad de Madrid
6	Estudio de potenciales de ahorro de agua en usos residenciales de interior
7	Investigación sobre potenciales de eficiencia con el empleo de lavavajillas
8	Precisión de la medida de los consumos individuales de agua en la Comunidad de Madrid
9	Proyecto de investigación para la definición y evaluación de la aplicabilidad de un bioensayo para la determinación de la toxicidad del agua utilizando embriones de Pez Cebra

## FICHA TÉCNICA

<b>Título del proyecto</b>	Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid.
<b>Línea de investigación</b>	Aseguramiento del equilibrio disponibilidades/demandas.
<b>Unidades de Canal de Isabel II implicadas</b>	Subdirección de I+D+i
<b>Participación externa</b>	TERRA XXI
<b>Objeto y justificación del proyecto</b>	Determinación de las demandas de agua por parte de instituciones públicas y usuarios privados para usos de exterior, y desarrollo de una metodología que permita el seguimiento y actualización periódica mediante el uso de las diversas fuentes de información disponibles.
<b>Contribución al estado del arte</b>	Aplicación de las técnicas más avanzadas de cartografía, teledetección y sistemas de información geográfica para el mantenimiento de una base de datos geográfica de usos de agua en exterior.
<b>Resumen del desarrollo del proyecto e hitos relevantes</b>	<p>Se ha realizado un inventario completo georreferenciado de parques, zonas verdes públicas y privadas, campos de golf, piscinas, estanques y fuentes ornamentales de toda la Comunidad de Madrid.</p> <p>Se ha definido una metodología para la actualización de la información mediante el uso de cartografía digital, ortofotografías e imágenes multispectrales de satélite.</p> <p>Estudio piloto de utilización de imágenes de satélite de alta resolución en el municipio de Rivas Vaciamadrid.</p> <p>Análisis del periodo de sequía 2004 - 2006 con imágenes de satélite de resolución media en todo el ámbito de la Comunidad de Madrid.</p>
<b>Resumen de resultados obtenidos</b>	<p>Se ha evaluado la demanda total de agua en usos de exterior urbanos en la Comunidad de Madrid en 188 hectómetros cúbicos anuales, de los que 70 corresponderían a usos de titularidad pública.</p> <p>En 2007 se han inventariado un total de 10.959 hectáreas de superficie de césped (incluyendo campos de golf) y 10.428 hectáreas de forestal; además, se han identificado 86.134 piscinas, con un volumen estimado de 6,9 hectómetros cúbicos.</p>
<b>Líneas de investigación abiertas para la continuación de los trabajos</b>	<p>Las técnicas de teledetección ensayadas en este proyecto han mostrado su potencial para el seguimiento periódico de la consolidación del desarrollo urbanístico en la Comunidad de Madrid, determinante de la evolución futura de la demanda de agua.</p> <p>Utilización de nuevos sensores hiperspectrales (tecnología láser y otros) para la observación y modelización detallada del uso del territorio y el desarrollo de zonas urbanas.</p>

## RESUMEN EJECUTIVO

Los trabajos que se exponen en este documento se enmarcan dentro de la línea de investigación de Aseguramiento del equilibrio disponibilidades/demandas del Plan de I+D+i de Canal de Isabel II. Su principal objetivo consiste en la evaluación de la utilización de agua en usos de exterior en el ámbito urbano dentro de la Comunidad de Madrid, y el establecimiento de una metodología para su periódica actualización.

Los usos de agua en exterior se refieren principalmente al riego de parques y jardines, tanto públicos como privados; al llenado y mantenimiento de piscinas, estanques y fuentes ornamentales, y al baldeo y limpieza de las vías públicas. Se consideran también las zonas deportivas y particularmente los campos de golf, si bien éstos, en la Comunidad de Madrid no utilizan agua potable para el riego.

El interés por la cuantificación del agua empleada en usos de exterior deriva no solamente de su importancia relativa, establecida en aproximadamente el 30 por ciento del suministro total en la región, sino también en el potencial de mejora de la eficiencia en su aplicación. Además, la mayor parte de estos usos podría atenderse con agua de inferior calidad (agua reciclada, no potable), por lo que la información sobre su cuantía y distribución temporal y geográfica es esencial para la implantación eficaz de un plan de utilización de agua regenerada.

La metodología que aquí se expone se basa en diferentes técnicas de observación del territorio, empleadas para identificar las posibles zonas urbanas consumidoras de agua, ya sea para riego de zonas verdes, o para el llenado de estanques, piscinas y fuentes ornamentales.

Para ello las técnicas de fotointerpretación y de análisis de imágenes de vuelos fotogramétricos, o las obtenidas por satélites de observación de la Tierra se han demostrado efectivas en la detección y medición de dichas zonas. Además, la disponibilidad de imágenes multispectrales y la posibilidad de analizar las distintas bandas, permite obtener una información que no es posible apreciar mediante una simple observación visual.

Figura a. Técnicas de fotointerpretación y de análisis de imágenes de vuelos fotogramétricos



Figura b. Imagen obtenida por satélites de observación de la Tierra



Se presentan en este documento la experiencia y resultados de distintos proyectos realizados en esta área por Canal de Isabel II:

- Año 2003: creación de una base de datos geográfica conteniendo el inventario de piscinas y zonas verdes públicas y privadas de la región. Realizado mediante técnicas de sistemas de información geográficos (SIG) sobre cartografía digital a escala 1:5000, complementadas con fotointerpretación de las ortofotos aéreas del vuelo de 1999
- Año 2005: revisión de este inventario utilizando la cartografía de Geomadrid (escala 1:1000) y el vuelo fotogramétrico de 2003
- Año 2007: actualización de la información de zonas verdes y láminas de agua, mediante fotointerpretación de las imágenes del vuelo de 2006, realizando el mapa de cambios en relación con la cartografía de 2003
- Años 2007 – 2008: proyecto de análisis de la viabilidad de utilización de imágenes de satélite para una actualización más frecuente de la información, mediante técnicas de teledetección. Consistente en estos dos trabajos:
  - Estudio piloto realizado sobre el municipio de Rivas Vaciamadrid con imágenes satelitales de muy alta resolución (Quickbird)
  - Análisis sobre toda la Comunidad de Madrid, con imágenes de resolución media (SPOT5) para evaluar los efectos de la sequía de los años 2005 – 2006 sobre las zonas verdes, urbanas y no urbanas, mediante comparación de imágenes obtenidas en los veranos de estos años

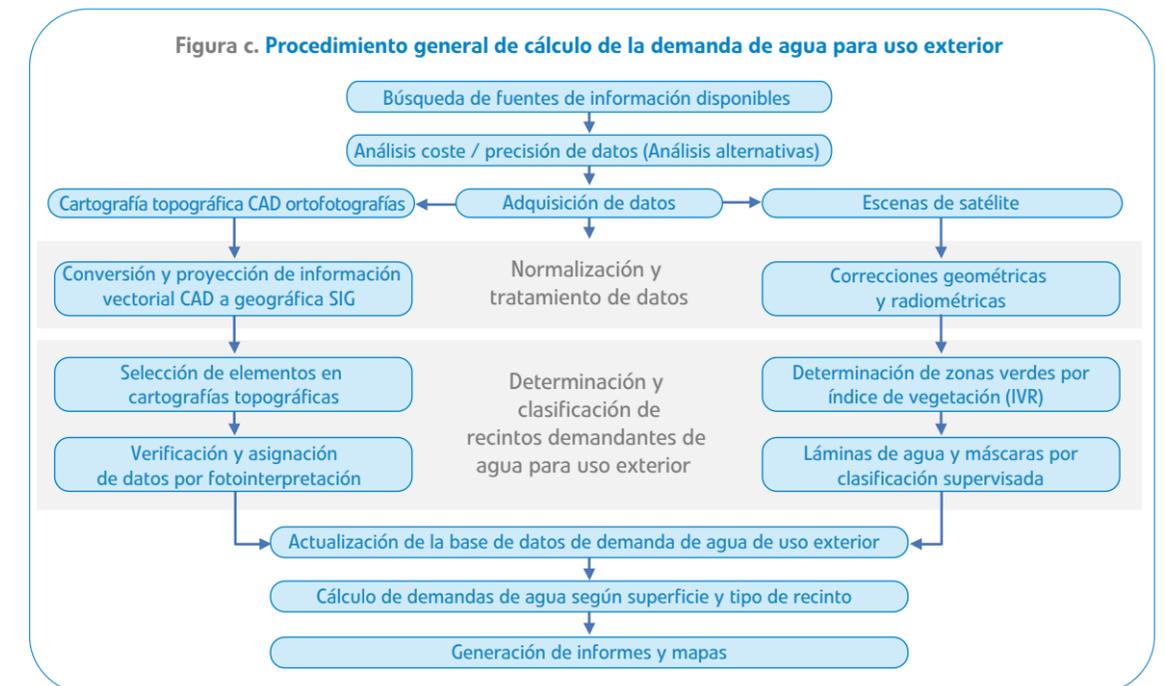
Con estos trabajos se ha definido una metodología para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior, en función de las distintas fuentes de información disponibles. Dichas fuentes de información pueden ser cartografías topográficas, fotografías aéreas o imágenes de satélite, cada una de ellas con distinto grado de precisión o resolución espacial y diferentes periodos de actualización.

Ensayando y comparando los diferentes métodos se ha podido atribuir un coeficiente de precisión o fiabilidad en dicha evaluación según sea la fuente de información y calidad de la misma.

Se describen en detalle en este documento las metodologías utilizadas y los principales resultados obtenidos, los cuales han sido incorporados al sistema de información geográfico corporativo de Canal de Isabel II (GAUDY).

#### Metodología general para la evaluación de la demanda con diferentes fuentes de información

Se ha desarrollado y probado una metodología de evaluación de la demanda de agua para uso exterior, partiendo de los datos más actualizados y accesibles en cada momento (figura c).



El proceso se inicia con la selección de la información en función de su disponibilidad, precisión, grado de actualización y coste. Esta información bruta se transformará, mediante una serie de pasos automáticos, manuales o semiautomáticos cuyo objeto final es la delimitación y clasificación de áreas o recintos susceptibles de demanda de agua. La demanda potencial se calcula según la superficie del recinto y su tipología: zonas verdes de césped, arbolado, arbustivas, piscinas, estanques, etc. Esta información se incluye en el SIG, relacionándola con otros tipos de información geográfica: parcela catastral, municipio, distrito, barrio, punto de suministro de agua, etc.

### Técnicas de fotointerpretación

En primer lugar se realiza la extracción de la cartografía digital, utilizando técnicas propias del SIG, de los recintos que ya se encuentran clasificados como susceptibles de ser demandantes de agua para uso exterior: zonas verdes, arbolado, piscinas, fuentes, estanques, etc.

Seguidamente, un equipo de operadores especialistas en fotointerpretación realiza un proceso de revisión visual de los recintos extraídos automáticamente comparándolos con las ortofotografías. En este proceso se asignan atributos no incluidos en cartografía, como porcentaje de césped en zonas verdes regadas, o una clasificación más detallada. Además, se corrigen los posibles errores que pudiera haber en la cartografía y se digitalizan los nuevos recintos.

### Proceso de imágenes de satélite

En los trabajos reseñados se han utilizado imágenes procedentes de dos satélites diferentes y correspondientes a distintas fechas:

- Imágenes de alta resolución del satélite Quickbird, con precisión de 0,6 metros por píxel en banda pancromática y 2,4 metros por píxel en multiespectral, con 70 kilómetros cuadrados de cobertura, sobre el municipio de Rivas Vaciamadrid, y correspondientes a las fechas 29 de abril de 2002, 14 de mayo de 2004 y 05 de agosto de 2006
- Imágenes de resolución media del satélite SPOT5, de 10 metros por píxel en las bandas G, R, NIR (verde, rojo e infrarrojo cercano) y 20 metros por píxel en MIR (infrarrojo medio), con cobertura sobre la práctica totalidad de la Comunidad de Madrid, y obtenidas en distintas fechas de 2005 y 2006, mayoritariamente en periodo de verano

Estas imágenes, antes de poder ser incorporadas al SIG, deben pasar por una serie de procesos que garanticen la comparabilidad entre las obtenidas en distintas fechas, y la consistencia con el resto de datos geográficos:

- Ortorrectificación: proyección de la imagen fotografiada, de acuerdo al sistema de coordenadas utilizado por el SIG. Como referencia horizontal se han utilizado las ortofotografías digitales más recientes, y para corregir los efectos del relieve, un modelo digital del terreno (MDT)
- Normalización relativa: para poder comparar imágenes obtenidas en distintas fechas es preciso realizar correcciones atmosféricas y radiométricas para minimizar el efecto de factores externos al cambio, tales como distintas condiciones atmosféricas, de iluminación solar, etc.
- Fusión de imágenes: consiste en combinar de una forma coherente la información espectral de la imagen multiespectral, con la espacial de la imagen pancromática, con objeto de que la calidad global (espacial-espectral) de la imagen fusionada sea muy alta

### Generación de recintos mediante índices de vegetación

El particular comportamiento radiométrico de la vegetación y su signature espectral característica, con un claro contraste en la respuesta en la banda roja y el infrarrojo cercano, permite el cálculo automático de índices representativos del vigor vegetal de la cubierta observada.

Para este trabajo, se ha utilizado el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) calculado a partir de los valores de radiación reflejada roja e infrarroja. En base a este índice, calculado para cada píxel, en las imágenes de satélite se han podido definir recintos clasificados en tres categorías:

NDVI < 0,25:	no hay vegetación
NDVI entre 0,25 y 0,50:	vegetación con vigor
NDVI > 0,50:	vegetación con alto vigor

Dado que el índice así calculado no discrimina entre la vegetación espontánea que crece por ejemplo en solares desnudos, de la que ha recibido aporte de agua de riego, estos resultados han debido ser filtrados utilizando una máscara que delimita las manzanas cartográficas que, mediante un procedimiento de clasificación supervisada, han sido categorizadas como consolidadas, es decir donde existen construcciones de edificación o ajardinamiento.

### Generación de recintos mediante clasificación supervisada

Para la delimitación de aquellos recintos demandantes de agua que no tienen respuesta al infrarrojo como son las láminas de agua (estanques, piscinas y fuentes ornamentales) se ha utilizado la técnica de clasificación supervisada con las imágenes de satélite.

La clasificación de una imagen consiste en la asignación más o menos automática de cada uno de los píxeles a una serie de categorías o grupos discretos. Esta asignación en clases se basa fundamentalmente en análisis cuantitativos de los valores contenidos en cada píxel, tomando como base teórica los propios de la estadística.

Este proceso requiere una fase previa de entrenamiento, el proceso de clasificación propiamente dicho, y una comprobación y verificación posterior.

### Base de datos geográfica

Todos los resultados y su representación geográfica se han incorporado al sistema de información geográfica de Canal de Isabel II GAUDY, con lo que las diferentes áreas de la Empresa pueden acceder a los estudios y resultados obtenidos en este trabajo.

Figura d. Elemento de cartografía digital procesada e incorporada al SIG de Canal de Isabel II GAUDY



El nivel de detalle alcanzado es el de la parcela catastral. Además, se han establecido atributos referidos a otras entidades geográficas como el municipio o sector del nomenclátor del IECM y operativas (punto de acometida de suministro de agua).

Es posible obtener informes y mapas temáticos para presentar información:

- Agregada a nivel de municipio, distrito, sector u otra entidad del Nomenclátor
- Clasificados por la naturaleza de la propiedad, en recintos públicos y privados
- Agregados por la categorización de cada clase de recintos, así las zonas verdes se han categorizado en zonas de césped, zonas forestales, zonas verdes de isletas y las láminas de agua en estanques, fuentes ornamentales y piscinas
- Parques y campos de golf

#### Estimación de la demanda de agua

Se han evaluado las necesidades hídricas de las plantas mediante el estudio del balance hídrico, en función de la climatología y de los diferentes tipos de cultivo considerados: césped, forestal y zonas arbustivas tipo isleta.

El cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se ha realizado por los métodos de FAO-Hargreaves y Thornwaite, adoptándose el valor promedio de ambos.

En la tabla a se resumen los valores calculados, para un año de climatología media y para los extremos seco y húmedo.

Tabla a. Necesidades hídricas para un año de climatología seca, media y húmeda

Tipo de recinto	Necesidades brutas (m <sup>3</sup> / ha año)		
	Año seco	Año medio	Año húmedo
Zonas verdes tipo césped	9.515	7.725	3.455
Zonas verdes tipo isleta	2.860	2.035	760
Zonas verdes tipo forestal	400	400	400

Es preciso subrayar que estos valores corresponden, estrictamente, a las necesidades hídricas de las plantas, sin considerar sobrerriego, que en muchos casos puede alcanzar entre un 50 y un 100 por ciento de las necesidades mínimas de riego.

Para las piscinas se ha supuesto una profundidad media de 1,60 metros, con un llenado al año y un consumo, por pérdidas y evaporación, de un metro cúbico de agua por metro cuadrado de superficie. En las duchas asociadas a piscinas se han considerado 1,20 metros cúbicos por metro cuadrado, que equivale a un gasto de 12 litros diarios (una ducha de un minuto de duración) durante 100 días al año.

#### Principales resultados de evaluación de la demanda de agua en usos de exterior

De todas las técnicas ensayadas, lógicamente, con la que mejor precisión se obtiene es mediante fotointerpretación de ortofotos de vuelos fotogramétricos, con ayuda de la cartografía digital, si bien el periodo de actualización es notablemente mayor que en el caso de imágenes de satélite.

Mediante fotointerpretación se han obtenido resultados en los trabajos realizados durante 2005 y 2007, utilizando los vuelos de 2003 y 2006, respectivamente y que se resumen en la tabla b.

**Tabla b. Evaluación de la demanda de agua en usos de exterior, estimada a partir de fotointerpretación de ortofotos de vuelos fotogramétricos**

Usos del agua	2005				2007			
	Titularidad pública		Titularidad privada		Titularidad pública		Titularidad privada	
	Superficie (ha)	Demanda anual estimada (hm <sup>3</sup> )						
Césped	2.370	19,62	7.320	60,61	2.986,00	24,73	7.973	66,02
Forestal	4.516	1,81	5.978	2,39	4.988,00	2,00	5.440	2,18
Isletas	160	0,34	0	0,00	310,00	0,66	0	0,00
Piscinas	16	0,62	376	14,28	16,00	0,61	413	15,71
Estanques	62	0,43	34	0,24	109,71	0,77	60	0,42
Fuentes ornamentales	3	0,03	0	0,00	5,00	0,05	0	0,00
Viales	10.888	13,61	0	0,00	n/d	n/d	n/d	n/d

El número total de piscinas identificadas fue de 86.079 en 2005 y 86.134 en 2007, con un volumen estimado de 6,27 y 6,87 hectómetros cúbicos respectivamente (considerando una profundidad media de 1,60 metros).

La demanda total para usos de exterior calculada con los datos más recientes (2007) en el total de la Comunidad de Madrid es de 126,76 hectómetros cúbicos al año. Considerando un coeficiente de sobrerriego de entre 1,5 y 2,0 para las zonas verdes, el consumo total de agua en estos usos en la Comunidad de Madrid podría alcanzar los 188 hectómetros cúbicos anuales. El incremento de la demanda potencial ha sido del 11 por ciento en tres años.

Las imágenes de satélite correspondientes a los años de sequía 2005 – 2006 no revelan que en las zonas urbanas se haya producido un descenso en cuanto al vigor de la vegetación, habiendo aumentado esta respuesta en 21.300 hectáreas, frente a las 6.085 hectáreas donde se presenta descenso. En áreas no urbanas se aprecia una cierta reducción de la vegetación en las vegas de los ríos Jarama y Tajo, en el sureste de la Comunidad de Madrid y en la zona norte del municipio de Alcalá de Henares.

#### Conclusiones del trabajo

Las principales conclusiones de este trabajo para Canal de Isabel II han sido:

- Se ha establecido una metodología para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior utilizando diversas fuentes de información, con distinta precisión, coste y periodos de actualización
- Es posible calcular con cierta precisión las áreas y demandas de agua sin realizar trabajo de campo
- La metodología de teledetección analizada se considera válida para el estudio del uso de agua en exterior, permitiendo actualizaciones de periodicidad anual o inferior

- Los resultados brutos obtenidos por teledetección deben pasar por un proceso de filtrado a fin de discriminar la vegetación que crece de forma espontánea, de la que se produce en zonas urbanizadas mediante aporte de riego
- Se ha podido establecer un rango de fechas (julio-agosto) en los cuales los datos tomados mediante satélite son más útiles para la detección de zonas verdes urbanas con necesidades de riego. A la hora de evaluar distintas alternativas de adquisición de imágenes de satélite, deberá tenerse en cuenta además de su coste, calidad y precisión, la factibilidad de obtener escenas que cubran la totalidad de la Comunidad de Madrid en esa época del año

#### Líneas de investigación abiertas

Las experiencias adquiridas durante la realización de estos trabajos han permitido identificar otras líneas de investigación para extender este tipo de técnicas a otros ámbitos de interés para Canal de Isabel II:

- El seguimiento de la consolidación del desarrollo urbanístico, de cara a una proyección más ajustada de la evolución de la demanda en escenarios de futuro y planificación del desarrollo y ampliación de las infraestructuras estratégicas de abastecimiento
- La utilización de sensores hiperespectrales, láser y otros, de reciente aparición, que abren nuevas perspectivas para la observación y modelización detallada del uso del territorio y desarrollo de zonas urbanas

**Figura e. Técnicas de observación y modelización detallada, basadas en la utilización de sensores hiperespectrales y láser**



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

## 1. INTRODUCCIÓN página 22

## 2. OBJETIVOS página 28

## 3. SISTEMÁTICA GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN USOS DE EXTERIOR página 32

## 4. FUENTES DE INFORMACIÓN DIGITAL página 36

- 4.1. Cartografía digital
- 4.2. Ortofotografías digitales
- 4.3. Imágenes de satélite
- 4.4. Fuentes de información corporativas
- 4.5. Otras fuentes de información
- 4.6. Análisis de costes de las diferentes fuentes de imágenes digitales

## 5. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE RECINTOS DEMANDANTES DE AGUA PARA USO EXTERIOR página 44

- 5.1. Generación de recintos mediante fotointerpretación
- 5.2. Generación de recintos mediante índices de vegetación
- 5.3. Generación de recintos mediante clasificación supervisada

## 6. BASE DE DATOS GEOGRÁFICA DE RECINTOS DE USOS DE AGUA EN EXTERIOR página 62

- 6.1. Actualización de la base de datos usos de agua en exterior
- 6.2. Asociación de información alfanumérica a los recintos gráficos

## 7. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA página 70

- 7.1. Cálculo de las necesidades hídricas de las zonas verdes
- 7.2. Consumo anual de piscinas, estanques y fuentes

## 8. RESULTADOS OBTENIDOS página 76

- 8.1. Resultados usando fotointerpretación
- 8.2. Resultados usando teledetección. Índices de vegetación
- 8.3. Resultados usando teledetección. Clasificación supervisada láminas de agua
- 8.4. Comparativa de resultados obtenidos mediante SPOT-5 y Quickbird

## 9. CONCLUSIONES página 98

- 9.1. Ciclo interanual de cálculo de la demanda
- 9.2. Estudio coste/calidad de la Prognosis
- 9.3. Líneas de investigación abiertas

## 10. ANEXOS página 104

- Anexo 1. Resultados de fotointerpretación agregados por municipio
- Anexo 2. Cálculo de las necesidades hídricas de las zonas verdes
- Anexo 3. Índice de figuras
- Anexo 4. Índice de tablas
- Anexo 5. Bibliografía

1

Introducción

Siguiendo la línea de investigación de aseguramiento del equilibrio disponibilidades/demandas del Plan de I+D+i de Canal de Isabel II, se han desarrollado diversos proyectos cuyo objetivo se centra en el conocimiento de las pautas de consumo de agua en distintos ámbitos sectoriales: doméstico, comercial, industrial o institucional y territoriales, y de evaluación de las demandas potenciales en diversos horizontes temporales.

La utilización de agua en usos de exterior en el ámbito urbano representa una proporción significativa del agua potable suministrada. Datos de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA) cifran el uso de agua en riegos de jardines en un tercio del total de agua para uso residencial. En nuestro país, sin disponer de cifras concretas, también puede suponerse una importancia notable y creciente de este tipo de uso, relacionado con el incremento del nivel de vida y una mayor preeminencia de los aspectos recreativos, paisajísticos y ornamentales en el uso del agua.

Los usos de agua en exterior se refieren principalmente al riego de parques y jardines, tanto públicos como privados, el llenado y mantenimiento de piscinas, estanques y fuentes ornamentales y al baldeo y limpieza de las vías públicas. Las zonas deportivas y particularmente los campos de golf, están adquiriendo mayor relevancia en los últimos tiempos, si bien estos últimos, en la Comunidad de Madrid no utilizan agua potable para el riego.

El interés por la cuantificación del agua empleada en usos de exterior no deriva solamente de su importancia relativa, sino también de las posibilidades de mejorar la eficiencia en este tipo de aplicaciones. Es sabido que buena parte del agua utilizada en riegos se pierde por evaporación, viento o vertido debido al sobrerriego. Además, la mayor parte de estos usos podría atenderse con agua de inferior calidad (agua reciclada, no potable), por lo que la información sobre su cuantía y distribución temporal y geográfica es esencial para la implantación eficaz de un plan de utilización de agua regenerada.

La utilización de agua en usos de exterior en la Comunidad de Madrid, en especial en los espacios públicos, no siempre está controlada, ya que en muchos casos, los servicios municipales, debido a distintos convenios con los ayuntamientos, no son susceptibles de facturación y en otros casos, la facturación se hace por estimación. Tampoco es descartable la utilización fraudulenta de las bocas de riego o incendio situadas en la vía pública.

Sin menoscabo de la información directa que puedan proporcionar los distintos sistemas de medida de caudales de agua suministrados, existe la posibilidad de determinar en la realidad, con cierta exactitud, mediante diferentes técnicas de observación del territorio, las posibles zonas urbanas consumidoras de agua, ya sea para riego de zonas verdes o para el llenado de estanques, piscinas y fuentes ornamentales.

Para ello, las técnicas de fotointerpretación y de análisis de imágenes de vuelos fotogramétricos, o las obtenidas por satélites de observación de la Tierra se han demostrado efectivas en la detección y medición de dichas zonas. Además, la disponibilidad de imágenes multispectrales y la posibilidad de analizar las distintas bandas permite obtener una información que no es posible apreciar mediante una simple observación visual: por ejemplo, la banda de infrarrojo, permite categorizar las zonas verdes por el vigor de la vegetación, que en cierta medida se puede relacionar con el aporte de agua habido o necesario.

**Figura 1. Ortofotografía correspondiente a un vuelo fotogramétrico en la Comunidad de Madrid en el año 1999**



Fotografía cedida por la Consejería de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes de la Comunidad de Madrid

En este documento se resumen los proyectos realizados por Canal de Isabel II para la evaluación de los usos de agua en exterior en la Comunidad de Madrid en los que se han ensayado diversas fuentes de información y métodos de análisis.

Estos trabajos se iniciaron en 2003, en que se realizó un inventario georreferenciado de las piscinas y zonas verdes públicas y privadas de la región, tomando como base la cartografía digital (escala 1:5000) de la Consejería de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes de la Comunidad de Madrid entonces disponible y que correspondía a un vuelo fotogramétrico de 1999. Se utilizaron para este trabajo técnicas propias de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) complementadas con fotointerpretación de las ortofotos aéreas.

Con la publicación por la Comunidad de Madrid en 2005 de la cartografía de Geomadrid, a mayor escala (1:1000) y basada en el vuelo de 2003, se procedió a la actualización de dicho inventario, obteniendo una información más detallada y reciente.

A partir de esas fechas, la Comunidad de Madrid viene realizando aproximadamente con periodicidad bienal vuelos fotogramétricos que cubren toda la región. Sin embargo, la producción de cartografía digital a partir de estos vuelos es un proceso laborioso que normalmente requiere varios años para su completa realización, periodo que se ve sobrepasado por el dinamismo que el desarrollo urbano adquiere en nuestra Comunidad. Por ello, durante 2007-2008 se procedió a una actualización de la información relativa a zonas verdes y láminas de agua, mediante fotointerpretación de las imágenes del vuelo de 2006, realizando el mapa de cambios en relación con la cartografía existente. A la vez, se abordó un proyecto de análisis de la viabilidad de utilización de imágenes de satélite para una actualización más frecuente de la información mediante técnicas de teledetección.

Este último proyecto se concretó en un estudio piloto realizado sobre el municipio de Rivas Vaciamadrid con imágenes satelitales de muy alta resolución (Quickbird) y un análisis sobre toda la Comunidad de Madrid, con imágenes de resolución media (SPOT5) con el que se pretendía evaluar los efectos de la sequía de los años 2005-2006 sobre las zonas verdes urbanas y no urbanas mediante comparación de imágenes obtenidas en los veranos de estos años.

En los siguientes capítulos se describen las diferentes técnicas utilizadas, resultados alcanzados y una evaluación de la precisión, coste y disponibilidad de las distintas fuentes de información. El documento está organizado como sigue:

- Resumen ejecutivo: al principio del documento
- El capítulo 1 es esta introducción
- En el capítulo 2 se exponen los objetivos del proyecto
- En el capítulo 3 se define una sistemática general para la evaluación de los usos de exterior
- En el capítulo 4 se detallan las fuentes de información utilizadas
- En el capítulo 5 se desarrollan las técnicas de teledetección utilizadas comparando su adecuación

- En el capítulo 6 se describe, de forma resumida, la base de datos de usos de agua para exterior, así como los métodos de incorporación de información y actualización de la misma
- En el capítulo 7 se describen las técnicas de cálculo de la demanda de agua
- En el capítulo 8 se detallan los principales resultados de los trabajos
- Por último, en el capítulo 9 se mencionan las principales conclusiones de los trabajos y las líneas de investigación que quedan abiertas
- En el anexo 1 se presentan los resultados detallados obtenidos por municipios
- El anexo 2 describe en más detalle la metodología de cálculo de necesidades hídricas de las plantas
- En el anexo 5 se acompaña una relación de referencias bibliográficas

2

Objetivos

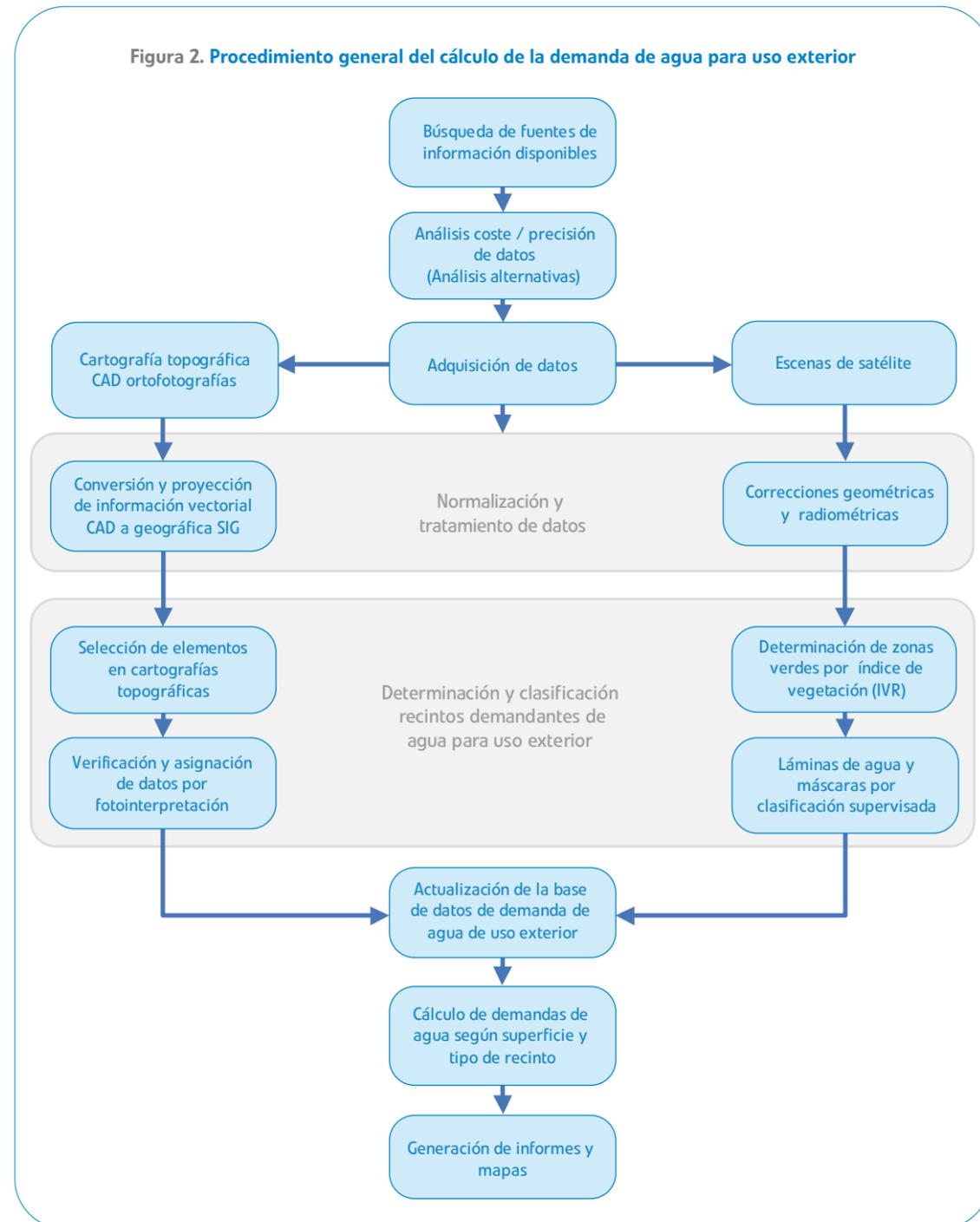
El presente trabajo y sus actividades se han enfocado a cubrir los siguientes objetivos:

- a. Disponer de información actualizada sobre la demanda de agua para uso de exterior en la Comunidad de Madrid, con el mayor detalle posible. Se entiende por uso de exterior la utilización de agua para riego de zonas verdes, llenado y mantenimiento de piscinas, estanques y fuentes, ya sean públicas o privadas y el baldeo de viales
- b. Definir una sistemática periódica que permita seleccionar las fuentes de información más adecuadas en función de disponibilidad, precisión y coste
- c. Establecer los mecanismos y procesos necesarios, para que la información recopilada pueda ser integrada en el sistema de información geográfica corporativo de Canal de Isabel II

# 3

Sistemática general para la  
evaluación de la demanda de agua  
en usos de exterior

En la figura 2 se resume el procedimiento general del cálculo de la demanda de agua para uso exterior independientemente de las técnicas utilizadas para su determinación:



El proceso comienza con el análisis de la información disponible y elección de la más adecuada a los objetivos perseguidos, por precisión, grado de actualización y coste.

La transformación de la información bruta a un formato utilizable por un GIS es diferente en el caso de información cartográfica digital que en el de imágenes de satélite. Estas últimas requieren un proceso de ortorrectificación, normalización geométrica y radiométrica y fusión si se utilizan escenas de diferente resolución para una misma área.

El siguiente paso es la delimitación de los recintos con demanda de agua, que en la cartografía pueden estar ya definidos por el proceso de fotointerpretación realizado durante su elaboración. Puede ser preciso utilizar de nuevo la fotointerpretación para verificar la información o para clasificar con más detalle estos recintos (por ejemplo si se trata de zonas verdes de césped, arbustivas, forestales, etc.). En el caso de imágenes de satélite, la delimitación de estos espacios se realiza mediante procesos semiautomáticos (clasificación supervisada) que utilizan técnicas estadísticas basadas en la información proporcionada por las distintas bandas espectrales de la imagen.

En ambos casos, el resultado es una base de datos geográfica en la que quedan representados los recintos identificados como demandantes de agua, a los que se asigna una determinada clasificación: zona verde de césped, zona forestal, piscina, estanque, etc. Mediante procedimientos propios del SIG será posible cruzar esta información con otro tipo de información geográfica: parcela catastral, municipio, distrito, barrio, punto de suministro de agua, etc.

El cálculo de la demanda de agua de cada recinto se realiza según su superficie y el tipo que se le ha asignado al clasificarlo.

4

Fuentes de información digital

La información geográfica para la estimación de la demanda puede ser muy variada. Así, la selección de las diferentes fuentes se relaciona directamente con su coste y precisión. Atendiendo a los criterios de innovación definidos por Canal de Isabel II para este proyecto se han seleccionado las fuentes de información geográfica más actualizadas y disponibles en la Comunidad de Madrid.

Asimismo, se han adquirido diferentes escenas de satélite que han permitido comprobar su bondad como fuente de información alternativa de la sistemática. En los siguientes epígrafes se describen las informaciones utilizadas.

## 4.1. Cartografía digital

### 4.1.1. Cartografía topográfica

Se ha utilizado cartografía digital a escala 1:1000 de todas las zonas urbanas. Dicha cartografía fue producida por la Comunidad de Madrid a partir del año 2003. En dicha cartografía era posible diferenciar y estructurar las entidades que representaban recintos demandantes de agua, esto es, zonas verdes de césped y arbolado, piscinas, estanques y fuentes ornamentales.

### 4.1.2. Cartografía catastral

Se ha utilizado la última revisión de la cartografía catastral urbana de los distintos municipios de la Comunidad de Madrid para enlazar los recintos identificados en el análisis, con las parcelas catastrales y éstas a su vez, con las acometidas o puntos de suministro de agua.

### 4.1.3. Callejero geográfico digital

Para la asignación de las divisiones administrativas oficiales en los cálculos realizados se ha utilizado la última versión disponible del callejero de la Comunidad de Madrid que se publica en Internet con el nombre de NOMECALLES.

## 4.2. Ortofotografías digitales

Asimismo, como fuente de comprobación y posteriormente de actualización se han utilizado vuelos fotogramétricos y ortofotografías digitales a escala 1:2.000 de los años 2003 y 2006. Dicha información ha permitido actualizar la base de datos de recintos demandantes de agua mediante la fotointerpretación asistida de los recintos nuevos y/o modificados.

Figura 3. Zonas con ortofotografías disponibles (malla o vuelo). Malla E: 1 : 2.000, años 2003 y 2006

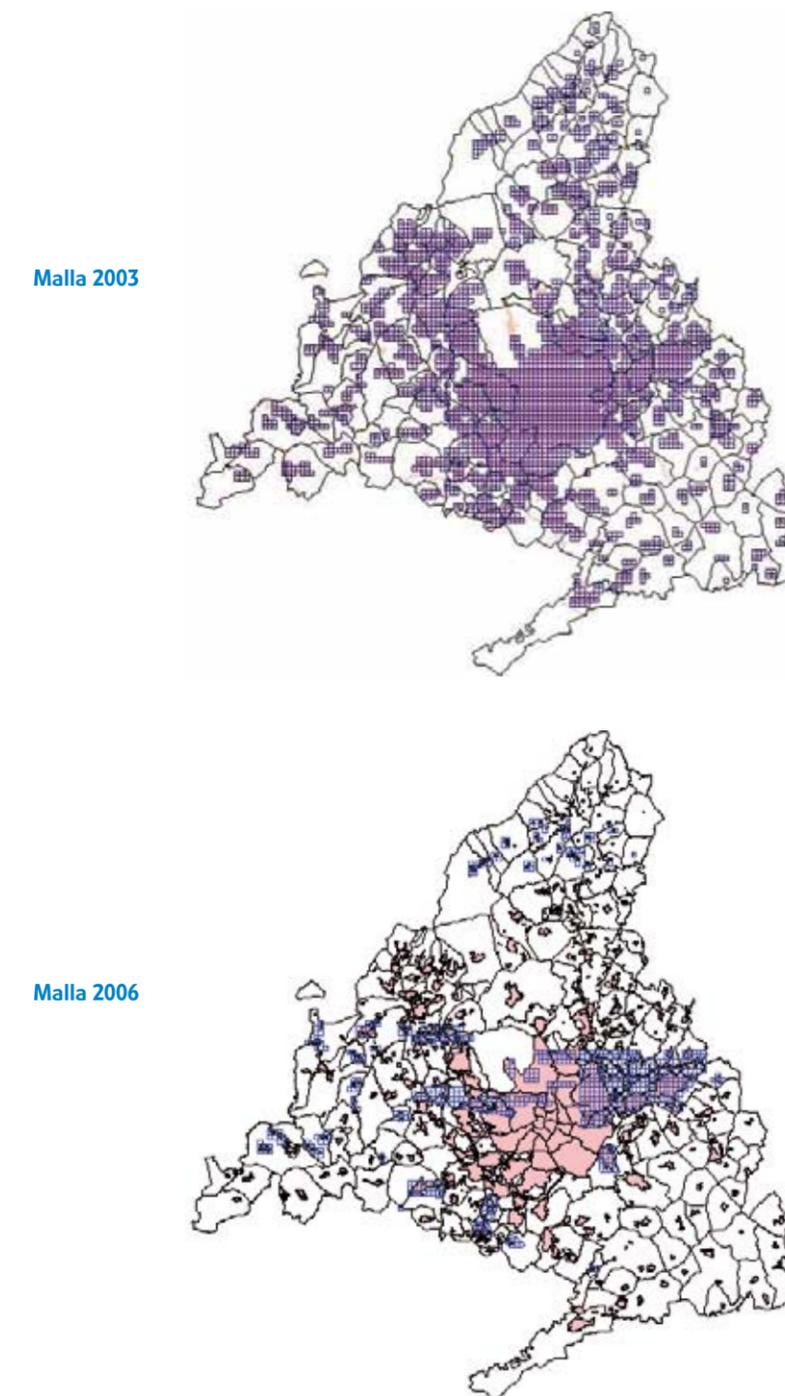


Figura 4. Ortofotografías - vuelo - 2003 y 2006<sup>1</sup>

Vuelo 2003



Vuelo 2006



### 4.3. Imágenes de satélite

#### 4.3.1. Análisis de disponibilidad y adecuación de imágenes de satélite

A continuación se presenta un resumen del análisis realizado, en cuanto a disponibilidad y adecuación de la imagerie de satélite, que se puede adquirir en el mercado.

<sup>1</sup> En las zonas donde no se dispone de ortofotografía se han utilizado las imágenes del vuelo.

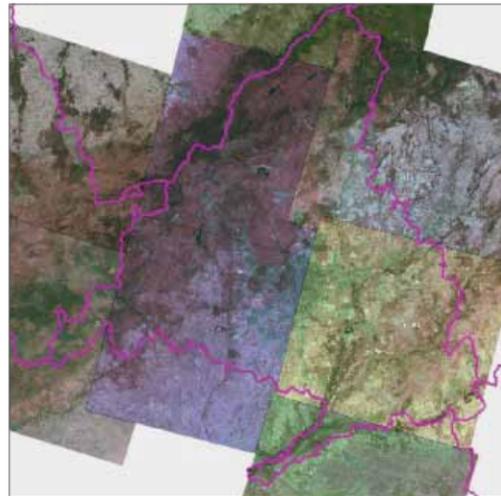
Tabla 1. Análisis de disponibilidad y adecuación de la imagerie de satélite que se puede adquirir en el mercado

Sensores	Resolución (m)	Altitud (m)	Inclinación (grados)	Tamaño de la escena (km)	Tiempo de revisita (días)	Tiempo de la órbita (min)	Instrumentos / Sensores	Bandas espectrales
QUICKBIRD	0,7	450	98,0	16,5x16,5	1 a 4	93,40	Pancromático	Pan
	2,8	450	98,0	16,5x16,5	1 a 4	93,40	Multiespectral	RGB y Infrarrojo cercano
IKONOS 2	1,0	680	98,1	13x13	2,9	98,00	Pancromático	Pan
	4,0	680	98,1	13x13	1,5	98,00	Multiespectral	RGB y Infrarrojo cercano
ORBIW 3	1,0	470	97,0	8x8	<3	--	Pancromático	Pan
	4,0	470	97,0	8x8	<3	--	Multiespectral	RGB y Infrarrojo cercano
SPOT 1	10,0	822	98,7	60x60	26	104,40	Pancromático	Pan
	20,0	822	98,7	60x60	26	104,40	Multiespectral	RGIR
SPOT 2	10,0	822	98,7	60x60	26	104,40	Pancromático	Pan
	20,0	822	98,7	60x60	26	104,40	Multiespectral	RGIR
SPOT 3	10,0	822	98,7	60x60	26	104,40	Pancromático	Pan
	20,0	822	98,7	60x60	26	104,40	Multiespectral	RGIR
SPOT 4	10,0	822	98,7	60x60	3 a 4	104,40	HRV-PAN	Pan
	20,0	822	98,7	60x60	3 a 4	104,40	HRV-XS	RG e Infrarrojo cercano
	20,0	822	98,7	60x60	3 a 4	104,40	HRVIR-XI	Infrarrojo Mediano
	20,0	822	98,7	60x60	3 a 4	104,40	HRVIR-M	RGB e Infrarrojo cercano
SPOT 5	2,5	832	98,7	60x60	3 a 5	104,00	Pancromático	Pan
	5,0	832	98,7	60x60	3 a 5	104,00	Pancromático	Pan
	10,0	832	98,7	60x60	3 a 5	104,00	Multiespectral	RGB
IRSI D	5,8	900	99,0	70x70	48	100,50	Pancromático	Pan
LANSDAT 5	30,0	705	98,2	185x185	16	99,00	TM (Thematic Mapper)	Banda 1,2,3,4,5,6,7
	75,0	705	98,2	185x185	16	99,00	Multi-Spectral Scanner	Banda 1,2,3,4
LANSDAT 7	15,0	705	98,2	185x185	16	99,00	TM (Thematic Mapper)	Banda 1,2,3,4,5,6,7
	30,0	705	98,2	185x185	16	99,00	ETM + (Enhanced Thematic Mapper Plus)	Pan
CBERS	20,0	778	98,5	113x113	26	100,20	CCD	Pan
	80,0	778	98,5	120x120	26	100,30	IR-MSS	Pan
	260,0	778	98,5	890x890	26	100,30	WFI	Wide Field Image
ERS 1	100,0	800	98,0	100x100	35	100,50	AMI / SAR / ATSR	Microondas/Radar/Infrarrojo
ERS 2	100,0	800	98,0	100x100	35	100,50	AMI / SAR / ATSR	Microondas/Radar/Infrarrojo
EROS A	1,8	480	97,0	12,5x12,5	4	90,00	CCD /TDI	Pan
RESURS 01	170,0	680	98,0	600x600	4	98,00	MSU-SK	Banda 1,2,3,4,5
RESOURCESAT 1 IRS-P6	23,0	817	98,7	141x141	24	101,35	LISS-III	Banda 1,2,3,4
	5,0	817	98,7	70x70	5	101,35	LISS-IV	Banda 1-P & B
	55,0	817	98,7	700x700	5	101,35	AWIFS	Banda 1,2,3,4
RADARSAT	10,0	--	--	50x50	24	101,00	SAR	Banda C
KOMPSAT	6,6	685	--	17x17	--	--	EOC (Electro-Optical Camera)	--
	1.000,0	685	--	800x800	--	--	OSMI (Ocean Scanning Multi-Spectral Imager)	Banda 1,2,3,4,5,6
	--	685	--	--	--	--	Space Physics Sensor	--

### 4.3.2. Imágenes de satélite de media resolución

A partir del estudio de las diferentes fuentes alternativas de imaginería de satélite, se han seleccionado la imaginería del satélite SPOT, con una resolución espacial de 10 metros en multiespectral, por su adecuación y disponibilidad para los años 2002, 2004 y 2006 con cobertura completa de la Comunidad de Madrid (figura 5).

Figura 5. SPOT-5 - Cobertura de la Comunidad de Madrid



### 4.3.3. Imágenes de satélite de alta resolución

Se han utilizado tres escenas, de años consecutivos, del satélite Quickbird que ofrece una resolución a un tamaño de píxel de 2,5 metros en modo multiespectral, que es imprescindible para la clasificación supervisada en teledetección (figura 6).

Figura 6. Quickbird - Cobertura del municipio de Rivas Vaciamadrid



### 4.4. Fuentes de información corporativas

Como principal fuente de información corporativa de Canal de Isabel II se ha utilizado, el sistema de información geográfico de las infraestructuras de abastecimiento (GAUDY), que proporciona las localizaciones geográficas de las acometidas, que relacionadas con sus datos de uso específico, han permitido establecer la correspondencia de las áreas demandantes con los puntos de suministro de agua.

### 4.5. Otras fuentes de información

También se han utilizado las siguientes fuentes de información:

- Atlas geocientífico del medio natural de la Comunidad de Madrid. Editado por el IGME
- Atlas: El medio ambiente en la Comunidad de Madrid. Editado por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio
- Datos meteorológicos y climáticos: Instituto Nacional de Meteorología, AEMET

### 4.6. Análisis de costes de las diferentes fuentes de imágenes digitales

En la tabla 2 se presentan los resultados del análisis realizado de las fuentes de información con mayor disponibilidad en la Comunidad de Madrid. Uno de los objetivos de los trabajos del proyecto es definir un umbral de error en el cálculo de demandas en función de la fuente de información utilizada.

Tabla 2. Resumen del estudio/coste para la adquisición de fuentes de información y posterior tratamiento

Fuente de información	Precisión en multiespectral	Coste medio del dato	Coste medio del proceso
	m <sup>2</sup> / píxel	por km <sup>2</sup>	por km <sup>2</sup>
Ortofotografía 1 : 2.000	0,20 x 0,20	700,00 €	100,00 €
Ortofotografía 1 : 5.000	1,00 x 1,00	100,00 €	100,00 €
Satélite QUICKBIRD	2,40 x 2,40	22,25 €	77,50 €
Satélite IKONOS	4,00 x 4,00	20,50 €	44,75 €
Satélite SPOT-5	10,00 x 10,00	1,12 €	1,50 €

# 5

Técnicas utilizadas para la determinación  
de recintos demandantes de agua  
para uso exterior

## 5.1. Generación de recintos mediante fotointerpretación

### 5.1.1. Extracción de recintos de cartografía digital

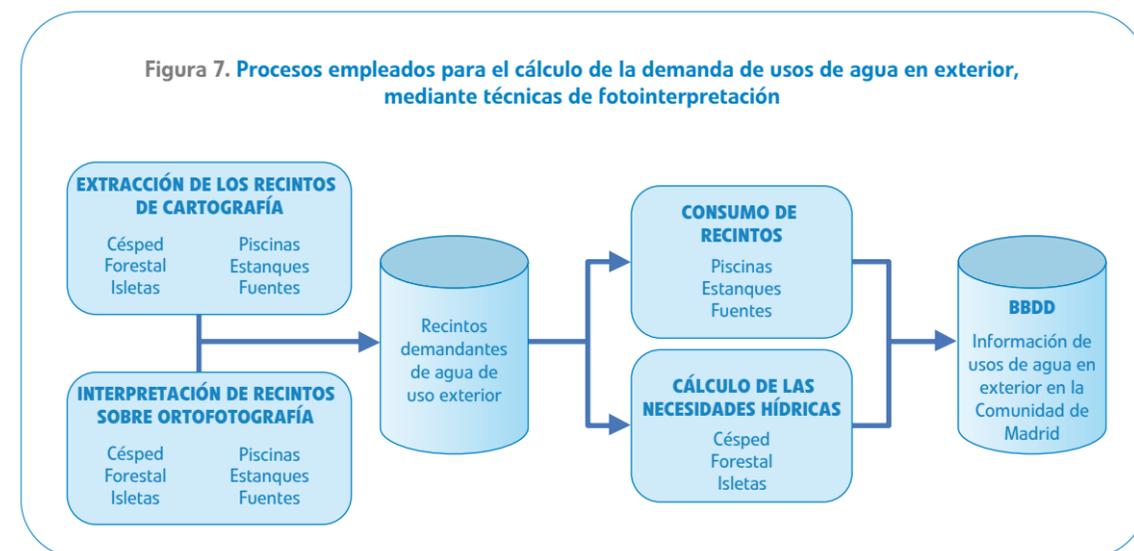
Para la determinación de las demandas de agua para usos de exterior se han obtenido los recintos clasificados objeto de estudio y poder así asignarles sus correspondientes consumos de agua. Estos recintos se obtuvieron de la cartografía topográfica a escala 1:1 000, bien por extracción directa, para el caso de recintos clasificados como tales en la cartografía (zonas verdes tipo forestal, piscinas, estanques, fuentes) o bien, mediante análisis, para el caso de los recintos cuya extracción requirió de algún proceso para su obtención (selección, diferencia y unión de elementos, etc.) como las zonas verdes tipo césped y las zonas verdes tipo isleta.

### 5.1.2. Revisión asistida y caracterización de recintos

Una vez obtenidos los recintos, se realizó un proceso de revisión exhaustivo comparando dichos recintos obtenidos automáticamente de la cartografía con la ortofotografía a escala 1:2.000, con los siguientes criterios de revisión:

- En las zonas verdes se identifica el porcentaje de césped, la estimación del porcentaje se realiza por un operador en aquellas superficies mayores a 1.000 metros cuadrados; en recintos inferiores la revisión se realiza de forma menos exhaustiva
- Las superficies que comprenden zonas arboladas y césped se encuentran perfectamente diferenciadas, y el solape existente se tiene en cuenta al realizar la estimación de la demanda
- No se incorporan las piscinas ni elementos no fijos que no aparecen reflejados en la cartografía
- Se modifica la tipología de las construcciones: piscinas, estanques y fuentes clasificadas erróneamente en la cartografía

En la figura 7 se expone el esquema de los procesos empleados:



## 5.2. Generación de recintos mediante índices de vegetación

La delimitación de zonas verdes mediante el cálculo de los índices de vegetación se ha realizado mediante una cobertura completa del satélite SPOT-5 para la Comunidad de Madrid (para dos años), con una resolución multispectral de 10 metros, obteniendo los índices de vegetación y clasificando los píxeles según los valores de este índice. La fiabilidad del análisis a la escala de SPOT-5, a priori excesivamente grosera, con una superficie de píxel de 100 metros cuadrados, se ha contrastado comparando en el municipio de Rivas-Vaciamadrid unas clases de los índices de vegetación obtenidos a partir del SPOT-5, con el resultado de la misma clasificación de los índices obtenidos con una resolución mayor (próxima a 5 metros cuadrados) por el satélite Quickbird. Los resultados obtenidos con ambos satélites se comparan con los resultados de la fotointerpretación.

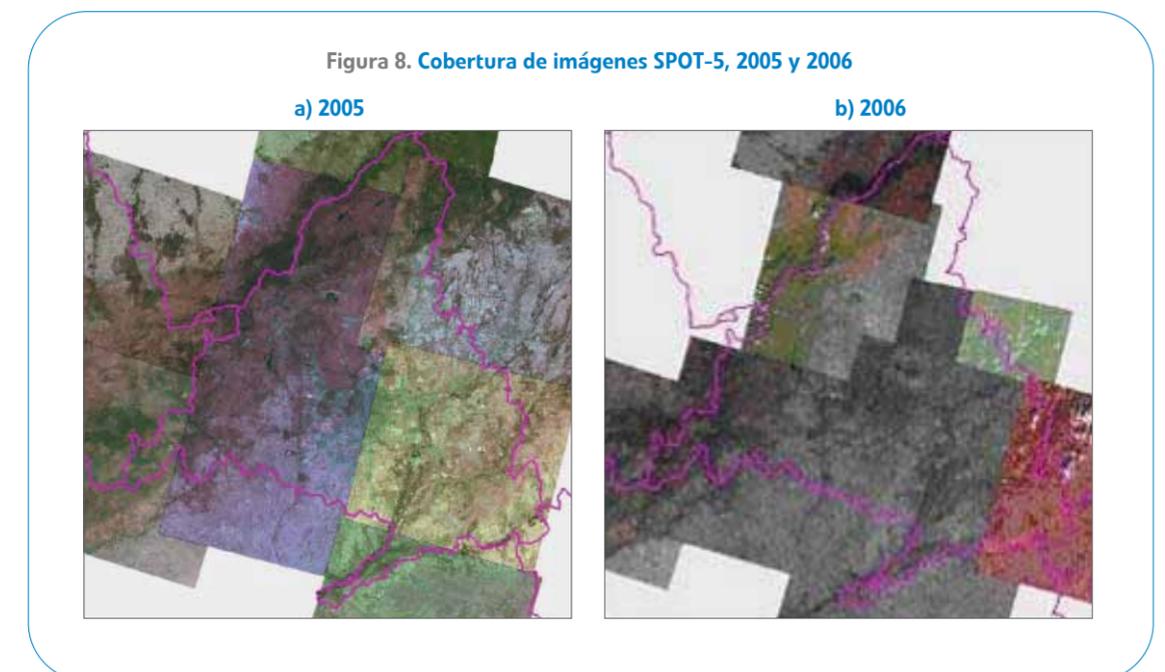
Se ha elegido Rivas-Vaciamadrid como zona piloto y de control de resultados, debido a que en ella confluyen varias características fundamentales, a saber:

- Un fuerte crecimiento urbanístico y poblacional
- Disponibilidad de una serie temporalmente homogénea con la serie SPOT-5 de una escena del satélite Quickbird

### 5.2.1. Imaginería de satélite utilizada

#### Imágenes del satélite SPOT-5

Se han utilizado dos series de imágenes SPOT-5 con cobertura completa de la Comunidad de Madrid para el año 2005 y con cobertura parcial para el año 2006. Las imágenes de satélite SPOT-5 multispectrales aportan resolución espacial 10 metros para las bandas G, R, NIR y 20 metros para la MIR. La figura 8 recoge las imágenes que muestran las coberturas disponibles para cada año.



### Ortorrectificación

El proceso de ortorrectificación garantiza la comparabilidad geométrica entre escenas de distintas fechas, así como la comparación espacial con los resultados obtenidos por fotointerpretación. Como referencia horizontal para la ortorrectificación de las imágenes, se utilizó la ortofotografía digital continua realizada a partir del vuelo fotogramétrico de primavera 2006. Esta ortofotografía es en color y tiene un tamaño de píxel de 0,5 metros. El modelo digital de terreno (o referencia 3D) utilizado para la ortorrectificación de las imágenes es el derivado del vuelo fotogramétrico anterior y que sirvió para generar esa misma ortofotografía. El paso de malla de este modelo es de cinco metros. La proyección cartográfica, tanto del MDT como de las ortofotografías de referencia es: UTM, Internacional 1909, European Datum 1950 (España, Portugal). Huso 30.

Las parejas de imágenes a comparar en el estudio y el mes de adquisición se reflejan en la tabla 3 y la figura 9.

**Tabla 3. Parejas de escenas a comparar. Identificadores de fechas y escenas**

Cobertura 2005		Cobertura 2006		2005-2006
Escena / Fecha	Satélite	Escena / Fecha	Satélite	Mes 2005-Mes 2006
33-269 / 2005-06-28	SPOT-5	33-269 / 2006-08-07	SPOT-5	junio-agosto
35-269 / 2005-06-28	SPOT-5	34-269 / 2006-08-12	SPOT-5	junio-agosto
35-269 / 2005-07-24	SPOT-5	34-269 / 2006-08-12	SPOT-5	julio-agosto
35-269 / 2005-07-24	SPOT-5	35-269 / 2006-12-10	SPOT-5	julio-diciembre
35-269 / 2005-07-24	SPOT-5	34-269 / 2006-08-12	SPOT-5	julio-agosto
35-270 / 2005-06-17	SPOT-5	34-270 / 2006-08-12	SPOT-5	junio-agosto
32-269 / 2005-07-23	SPOT-5	32-269 / 2006-08-22	SPOT-5	julio-agosto
33-268 / 2005-06-08	SPOT-5	1748-024678 / 2006-10-06	SPOT-5	junio-octubre
33-268 / 2005-06-28	SPOT-5	1746-024789 / 2006-11-09	SPOT-5	junio-noviembre
33-267 / 2005-08-30	SPOT-5	33-267 / 2006-08-07	SPOT-5	agosto-agosto
34-268 / 2005-10-04	SPOT-5	1749-0248 / 2006-10-30	SPOT-5	octubre-octubre
34-268 / 2005-10-04	SPOT-5	1750-0248 / 2006-11-11	SPOT-5	octubre-noviembre

**Figura 9. Distribución de imágenes a comparar en el estudio y mes de adquisición. Imagen mes 2005 – Imagen mes 2006**



### Normalización

Se han ensayado varios de los métodos de normalización relativa de imágenes, tales como el método de Chávez, métodos basados en histogramas, técnicas de regresión, etc. Los resultados que se obtienen de la normalización entre estas escenas, no han sido significativamente distintos de los procedentes de las imágenes sin normalizar. Por ello, se ha optado por trabajar sin la normalización entre escenas.

Entre las razones de estos resultados en la normalización se apunta a la excesiva diferencia entre fechas de las escenas a comparar (por ejemplo escenas de octubre o noviembre frente a escenas de junio) o alteraciones en los valores de los niveles digitales de las imágenes de partida.

### Imágenes del satélite Quickbird

Las escenas del satélite Quickbird disponían de la banda pancromática, con precisión de 0,6 metros por píxel y las bandas multispectrales, con precisión de 2,4 metros por píxel, con el menor ángulo de toma y de ausencia de cobertura nubosa. La tabla 4 recoge las características de las imágenes Quickbird.

**Tabla 4. Características imágenes Quickbird**

Satélite	Modo	Fecha	Ángulo de adquisición	Resampling	Resolución (pan/msi)	Bits/píxel (file)
QUICKBIRD	Bundle	29-04-02	17,4	NN	0,6/2,4	16 bits
QUICKBIRD	Bundle	14-05-04	14,4	NN	0,6/2,4	16 bits
QUICKBIRD	Bundle	05-08-06	11:06	NN	0,6/2,4	16 bits

La figura 10 muestra la cobertura recibida de 70 kilómetros cuadrados para cada fecha, en cuyo centro se encuentra la población de Rivas-Vaciamadrid.

**Figura 10. Cobertura del municipio de Rivas Vaciamadrid**



Una vez que las imágenes originales han pasado el control de calidad de la captura, se comienza el proceso de ortorrectificación. Este proceso garantiza la comparabilidad geométrica entre escenas de distintas fechas.

## 5.2.2. Procesamiento previo de imágenes de satélite

### 5.2.2.1 Imágenes del satélite Quickbird

#### Normalización relativa entre escenas satélite

Cuando se trata de determinar los cambios producidos entre dos fechas, para evaluar la dinámica de un fenómeno determinado, las imágenes suelen adquirirse en un lapso temporal (varios años) pero en la misma estación (Chuvieco, 1998). El objetivo de esto es minimizar el efecto de factores externos al cambio (por ejemplo la evolución fenológica propia de las especies vegetales, las condiciones de iluminación solar, condiciones atmosféricas, etc.).

En nuestro caso concreto la disponibilidad de fechas de archivo no permite trabajar con fechas de la misma época del año. Así, para los años 2002 y 2004, se han obtenido unas fechas muy próximas dentro de cada año, como son 29 de abril y 14 de mayo respectivamente. Pero para la pareja 2004 y 2006 se cuenta con las fechas 14 de mayo y 05 de agosto respectivamente, casi 3 meses de diferencia y en 2 estaciones distintas. Esta diferencia en fechas dificulta los análisis comparativos de cubiertas vegetales que se han abordado en este trabajo.

Una sincronización fenológica basada en los días de crecimiento y precipitación acumulados permite minimizar las diferencias fenológicas durante la selección de imágenes de varias fechas (Théau, 2006).

Los datos de precipitación y temperatura analizados han sido los procedentes de la estación meteorológica del parque del Retiro, por su proximidad geográfica.

Todo lo anterior justifica la realización de una normalización u homogenización radiométrica para hacer comparables las imágenes entre sí, puesto que los niveles digitales que componen una determinada imagen se refieren a unas condiciones específicas de adquisición, no siendo directamente extrapolables a otra (Chuvieco, 1998).

#### Metodología de normalización

La normalización realizada se ha apoyado en el método de Chávez o método del objeto oscuro (Chávez, 1988). Este método asume que la respuesta que presentan cuerpos oscuros en la imagen (tipo agua profunda) es debida a la interferencia de la atmósfera. Así se determinan los valores que presentan estos cuerpos oscuros y son restados del histograma de cada banda.

Para el trío de imágenes con las que se trabaja en este estudio, se han evaluado previamente los histogramas de las imágenes, tanto para el modo pancromático como para el modo multiespectral, concluyéndose que la fecha 2006 de agosto de 05, es la que presenta una atmósfera más limpia (menores valores de los niveles digitales en los cuerpos oscuros). De esta forma, se han restado los valores de diferencia entre las fechas 2002-2006 y 2004-2006, para equiparar los valores de la imágenes a la fecha de referencia tomada, es decir se han normalizado los datos de las imágenes de 2002 y 2004 para trabajar a la escala de la fecha 2006.

#### Fusión datos multiespectrales y pancromático

La fusión de imágenes se puede entender como la combinación sinérgica de información proporcionada por varios sensores o por el mismo sensor en diferentes escenarios (espaciales, espectrales y temporales).

En particular, la fusión de imágenes multiespectrales y pancromáticas consiste en combinar de una forma coherente la información espectral de la imagen multiespectral (figura 11), con la espacial de la imagen pancromática (figura 12), con objeto de que la calidad global (espacial-espectral) de la imagen fusionada sea muy alta (Gonzalo-Martín et al., 2007).

Figura 11. Imagen multiespectral 19 abril 2002 combinación RGB, ajuste 8 bits

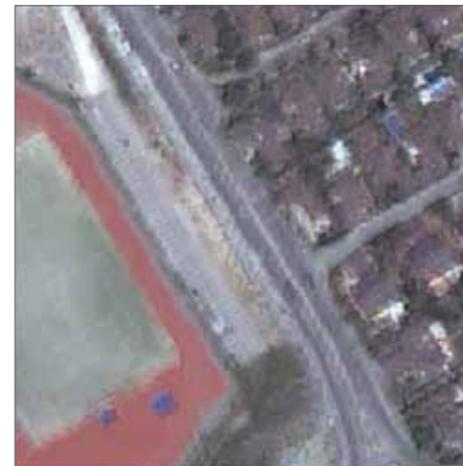


Figura 12. Imagen pancromática 19 abril 2002, ajuste 8 bits



Se han evaluado numerosos algoritmos de fusión entre bandas de distinta resolución. Entre los algoritmos analizados se pueden citar fusión mediante análisis de componentes principales, IHS modificado, Wavelet y UNB.

Figura 13. Imagen fusión 19 abril 2002 combinación RGB, ajuste 8 bits



Obviamente el objetivo de esta fusión no ha sido generar un producto visual RGB, sino potenciar las posibilidades de seguimiento de la vegetación mediante las imágenes Quickbird. Así para cada uno de los algoritmos ensayados se han comparado los histogramas de la imagen fusionada frente a los de las imágenes multiespectrales de las que proceden. Cabe aquí reseñar que existen varias opciones de procesado que pueden ocasionar variaciones de las estadísticas resultado, tales como el resampleo utilizado en la generación de la ortoimágenes o el método de ventana móvil para el cálculo del algoritmo de fusión (ERDAS, 1995).

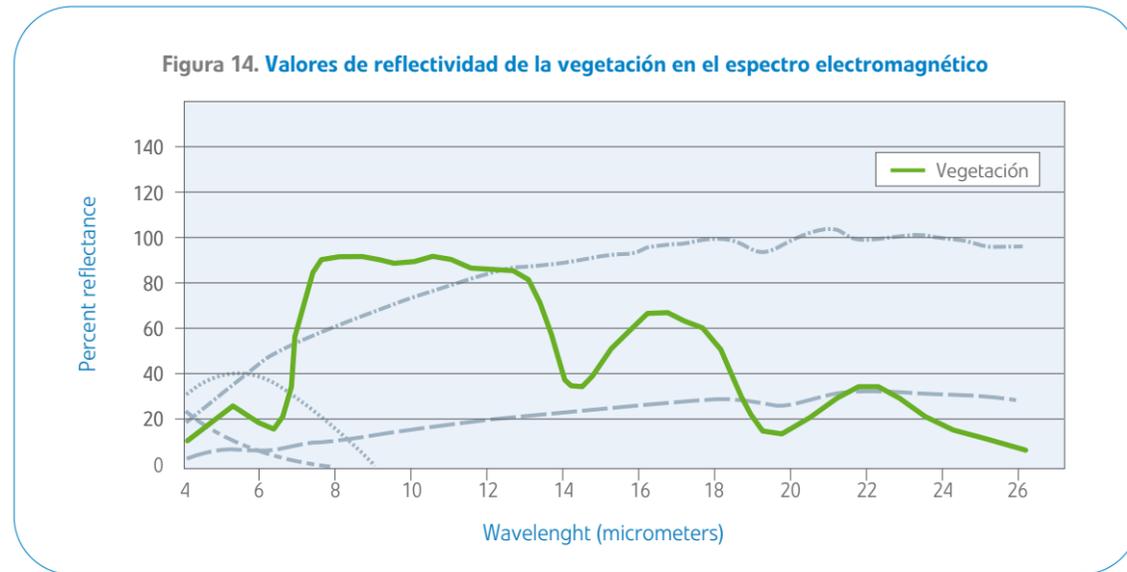
El algoritmo elegido para generar los ficheros fusión, ha sido el Wavelet (o método de transformada discreta de ondículas).

La figura 13 muestra una imagen fusionada obtenida por este método.

### 5.2.3. Generación de índices de vegetación

#### 5.2.3.1. Respuesta de la vegetación a la radiación electromagnética

Cualquier objeto de la superficie terrestre responde a las radiaciones del espectro electromagnético en función de sus características. La respuesta de la vegetación es específica y diferente de la de otros objetos de la superficie terrestre, en función de la longitud de onda. Según los distintos intervalos de longitud de onda, existen varias zonas con respuesta característica, como se observa en la figura 14.



Fuente: Chuvieco E., Teledetección ambiental. Ed. Ariel Ciencia. 2006

#### Respuesta espectral en el dominio visible

El dominio visible abarca el intervalo de longitudes de onda entre 0,38 a 0,72 micrómetros, que corresponden al azul, verde y rojo. La respuesta de los vegetales a la luz visible es única entre los diversos materiales de la cubierta terrestre y se debe a la clorofila y a otros pigmentos presentes en las hojas. La mayor parte de la luz visible que llega a una hoja verde es absorbida, un 10 por ciento se refleja, y otro tanto se transmite. La vegetación sana y verde tiene dos bandas de absorción muy marcadas, en el azul y en el rojo, a 0,45 y 0,65 micrómetros, respectivamente. Entre ambas queda la banda verde, a 0,55 micrómetros, en la que es mayor la reflexión y menor la absorción. Si la planta no está sana la producción de clorofila se reduce, absorbiéndose menos energía y reflejando más luz, particularmente en la banda del rojo, presentando entonces la planta un color amarillento.

Otros pigmentos, además de la clorofila, importantes a efectos de absorción de la energía lumínica son los carotenos, las xantofilas (pigmentos amarillos) y las antocianinas (pigmentos rojos). Los carotenos y las xantofilas están también presentes en las hojas verdes, presentando una banda de absorción en el azul, a 0,45 micrómetros, pero la clorofila también es absorbente en esa longitud de onda, enmascarando los pigmentos amarillos la absorción de la clorofila. De este modo, en otoño, antes de la caída de la hoja, al desaparecer antes la clorofila, dominan los carotenos y las xantofilas, y los árboles de hoja caduca muestran en sus hojas el color amarillo. Del mismo modo, cuando decrece la producción de clorofila ciertas especies producen antocianina que al reflejar la parte roja del espectro, nos ofrecen una intensa apariencia de color rojo.

#### Respuesta espectral en el infrarrojo cercano

La vegetación tiene una respuesta notablemente mayor en el infrarrojo cercano que en el visible. Este cambio se produce aproximadamente a 0,7 micrómetros, en el límite de la visión humana.

En el infrarrojo cercano la vegetación sana se caracteriza por una reflectancia muy alta, una transmitancia también muy alta y una absorción muy baja en comparación con el visible. En la mayor parte de los tipos de vegetación hay un 45-50 por ciento, tanto de reflexión como de transmisión y menos del 5 por ciento de absorción. La reflectancia de la vegetación en el infrarrojo cercano se debe a la estructura interna de las hojas y a causa de su variabilidad hay grandes diferencias de reflexión entre diversas especies. En cuanto a la reflectancia, en esta longitud de onda en la vegetación natural es de gran importancia la cantidad de materia verde con una alta actividad. Por esta razón, encinares y pinares presentan una baja reflectancia en el infrarrojo próximo.

En la reflexión, la presencia de varias capas de hojas superpuestas en una cubierta produce un efecto aditivo, pudiéndose alcanzar, de este modo, hasta el 85 por ciento frente a la que correspondería a una sola hoja que sería menor del 50 por ciento.

#### Respuesta espectral en el infrarrojo medio

Este intervalo incluye las longitudes de onda comprendidas entre los 1,3 y los 2,6 micrómetros. Los picos de reflectancia se producen a 1,6 y 2,2 micrómetros, situados entre las bandas de absorción que corresponden al agua (1,4; 1,9 y 2,7 micrómetros). Si el contenido de agua es bajo, la reflectancia en el infrarrojo medio aumenta de manera notable. En el infrarrojo medio la reflectancia de la vegetación presenta valores inversos a los de la absorción por una lámina de agua.

#### Ventanas atmosféricas

Para el análisis de las imágenes procedentes de sensores remotos se utilizan las bandas espectrales asociadas a las "ventanas atmosféricas", que son las zonas del espectro en las que las interacciones atmosféricas (producidas por el agua, el anhídrido carbónico, el polvo, etc.) permiten el paso de la energía reflejada. Las ventanas más importantes corresponden: entre 0,3 y 1,3 micrómetros (visible e infrarrojo cercano); entre 1,5 y 1,8 micrómetros (infrarrojo medio); y entre 2,0 y 2,6 micrómetros. En el infrarrojo medio, estas ventanas se corresponden con las regiones de mayor reflexión.

#### Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada

Considerando la potente respuesta de la vegetación vigorosa a la radiación correspondiente al ancho de banda del infrarrojo cercano, resulta conveniente el uso de la información obtenida a partir de sensores multispectrales. A partir de la combinación y las relaciones de la información de determinadas bandas espectrales se van a obtener los índices de vegetación.

El índice de vegetación normalizado (NVDI) resulta de dividir el valor de la diferencia de la radiación reflejada infrarroja cercana menos la roja, entre la suma del infrarrojo cercano y el rojo.

$$NVDI = (reflect. INFRARROJO - reflect. ROJO) / (reflect. INFRARROJO + reflect. ROJO)$$

Esta combinación expresa, con alta correlación, el valor de la biomasa vegetal.

### 5.2.3.2. Generación de índices de vegetación sobre imágenes SPOT-5

El índice utilizado en este estudio ha sido el índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), por su amplia difusión y su facilidad de interpretación de los resultados (varía entre -1 y +1).

Para las cubiertas vegetales puede señalarse, como umbral mínimo, valores de NDVI cercanos a 0,1; mientras que el máximo es generalmente 0,5 y corresponde a vegetación muy densa. (Fracassi et al., 2006).

#### Umbral NDVI: mapas de vegetación

A partir de las imágenes NDVI y para cada una de las fechas de las escenas disponibles se ha determinado de forma empírica el valor umbral de NDVI que discrimina vegetación frente a no vegetación.

Como es de esperar, este umbral es diferente para cada fecha ya que las condiciones tanto ambientales, como de fenología, de la vegetación son influyentes.

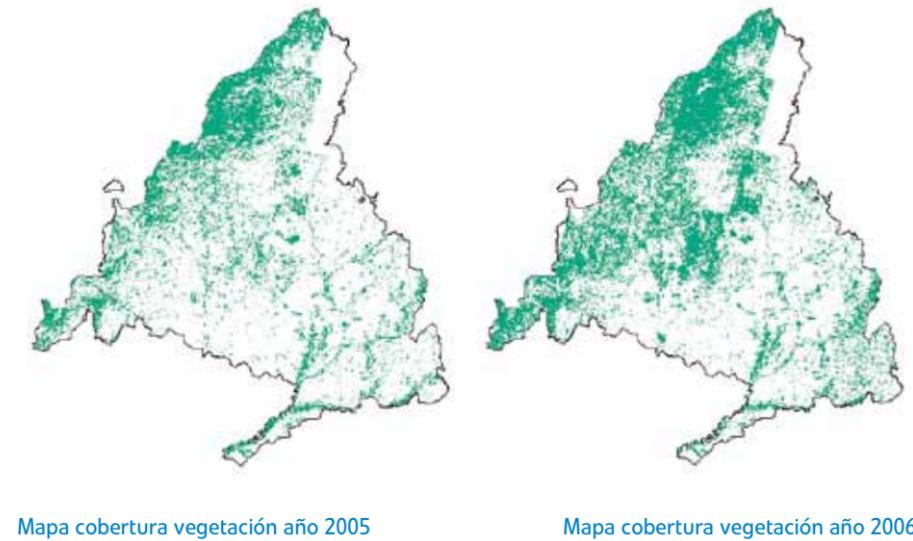
La determinación empírica de este umbral se ha realizado mediante comparación visual con la correspondiente imagen en combinación de bandas de falso color. Se han ensayado varios umbrales para cada fecha teniendo en cuenta los datos de pluviometría previa a la adquisición de la imagen. La tabla 5 muestra los valores umbrales de NDVI obtenidos.

**Tabla 5. Valores umbrales de NDVI para discriminar vegetación frente a no vegetación**

Cobertura 2005			Cobertura 2006		
Satélite	Fecha de la escena	Umbral NDVI	Satélite	Fecha de la escena	Umbral NDVI
SPOT-5	28-06-05	0,05	SPOT-5	07-08-06	0,10
SPOT-5	24-07-05	0,05	SPOT-5	12-08-06	0,05
SPOT-5	17-06-05	0,05	SPOT-5	10-12-06	0,20
SPOT-5	23-07-05	0,10	SPOT-5	22-08-06	0,12
SPOT-5	30-08-05	0,17	SPOT-5	06-10-06	0,12
SPOT-5	04-10-05	0,12	SPOT-5	09-11-06	0,13
--	--	--	SPOT-5	30-10-06	0,13
--	--	--	SPOT-5	11-11-06	0,05

Como resultado de esta fase se obtiene una cobertura de vegetación para cada una de las fechas. Esta cobertura es almacenada como imagen o grid, cuyo valor del píxel indica si el píxel es considerado como ocupado por vegetación o no. La figura 15 muestra la cobertura de vegetación para los años de estudio 2005 y 2006.

**Figura 15. Mapas de cobertura de vegetación para los años de estudio 2005 y 2006**



La superficie ocupada por vegetación que recogen cada uno de los mapas obtenidos es de 218.661 hectáreas, para el año 2005 y de 303.401 hectáreas, para el año 2006, lo que supone un incremento en superficie de un 38,7 por ciento. Cabe señalar aquí que éste es un dato global para todo el ámbito de estudio (764.792 hectáreas, casi el total de la Comunidad de Madrid).

### 5.2.3.3. Generación de índices de vegetación sobre imágenes Quickbird

Se han utilizado las mismas técnicas de generación de índices de vegetación que para las imágenes SPOT, con la salvedad de la precisión que implica este tipo de imágenes.

#### Segmentación de NDVI

Las imágenes NDVI generadas se han segmentado en tres categorías de vigor vegetal. La determinación del umbral entre categorías para variables continuas como es el caso que nos ocupa, es siempre un problema complejo. Para resolverlo se han ensayado distintas combinaciones de umbral y se ha interpretado el resultado sobre combinaciones imagen RGB y NIR. La tabla 6 muestra la interpretación asignada a cada intervalo de valores del índice NDVI:

**Tabla 6. Valores del índice de vegetación**

Menor de 0,250	Se considera no vegetación o no vegetación de interés (respuesta de vegetación residual)
Entre 0,250 y 0,5	Vegetación con vigor
Mayor de 0,5	Vegetación con vigor alto

### Mapa de cambios en la vegetación

Este proceso de segmentación de las imágenes permite realizar cruces entre las parejas de años consideradas de forma que se obtienen mapas de cambio con un atributo de sentido del cambio.

La leyenda considerada que se obtiene del cruce se muestra en la tabla 7.

**Tabla 7. Valores de la leyenda que se obtienen por el cruce entre las parejas de años consideradas**

Valor (variable discreta)	Leyenda
0	No existe vegetación ni en 2004 ni 2006
1	Desaparece vegetación vigor en 2006 respecto a 2004
2	Desaparece vegetación de alto vigor
3	Aparece vegetación de vigor
4	Permanece vegetación vigor
5	Disminuye desde vegetación alto vigor a vigor
6	Aparece vegetación de alto vigor
7	Aumenta desde vegetación vigor a vegetación de alto vigor
8	Permanece vegetación alto vigor

#### 5.2.3.4. Ajuste de resultados y justificación

Según la estructura de la cartografía 1:1 000 origen de la base de datos de usos de agua en exterior realizada en 2005, se entiende por manzana cartográfica a las áreas no cubiertas por los recintos de vial, trazas de ferrocarriles y recintos de hidrografía. Podemos decir que la manzana cartográfica representa a los "negativos" de las mencionadas superficies.

Para la depuración de los resultados se han extraído de la cartografía, los recintos clasificados como manzanas cartográficas para el municipio de Rivas-Vaciamadrid (figura 16) y se han clasificado las manzanas, en dos tipos: consolidadas (color morado) y no consolidadas (color gris) para los años 2002, 2004, 2006 con las ortofotos disponibles para estos años (figura 17, 18 y 19 respectivamente).

**Figura 16. Manzanas cartográficas**



**Figura 17. Clasificación año 2002**



**Figura 18. Clasificación año 2004**



**Figura 19. Clasificación año 2006**

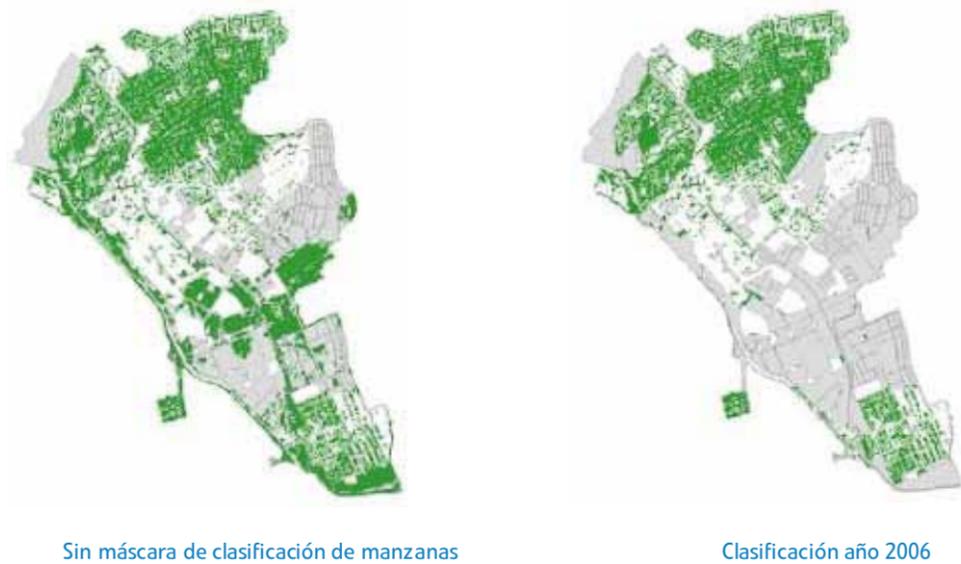


Consolidada: Manzanas consolidadas por la ejecución de obras de construcción o ajardinamiento.

No consolidada: Suelos pendientes de ejecución de obras de construcción o ajardinamiento.

Una vez realizada esta clasificación, se ha procedido a filtrar los resultados obtenidos por teledetección aplicando una máscara con la clasificación de manzanas, considerando sólo los recintos que se encuentran en manzanas clasificadas como "consolidadas" (figura 20).

Figura 20. Manzanario de Rivas Vaciamadrid y filtrado con manzanas consolidadas



Además, se han incluido los recintos coincidentes con las isletas de viario, procedentes también de la cartografía, y se han eliminando los resultados de NDVI en manzanas “no consolidadas”, las superficies obtenidas para los distintos años se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Tabla resumen de superficies obtenidas para los distintos años

Segmentación imagen satélite en manzanas consolidadas e isletas de viario		Digitalización de fotografía aérea	
Fecha	Superficie (ha)	Fecha	Superficie (ha)
29-abr-02	185,79	ago-03	186,50
14-may-04	227,88	abr-06	192,36
5-ago-06	188,60		

Para analizar los resultados filtrados hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los recintos obtenidos de la cartografía (2003) o digitalizados (2006) tienen la precisión propia de la escala de trabajo 1:1 000, es decir, 20 centímetros
- La resolución del píxel para las imágenes Quickbird es de 2,4 metros, por lo tanto las superficies obtenidas por teledetección en principio pueden estar sobreestimadas. Sin embargo, intervienen otros factores cuya influencia puede provocar mayores diferencias entre los dos métodos que la propia de la precisión y es la fecha de adquisición de las imágenes
- En 2002 el resultado difiere muy poco del obtenido por fotointerpretación en 2003. Sería esperable que la diferencia fuera mayor, puesto que hay más de un año de diferencia y el crecimiento urbano de estos años en Rivas-Vaciamadrid es significativo. Sin embargo, en 2003 el vuelo es de agosto, frente a la imagen de satélite tomada en abril, evidentemente la respuesta de NDVI siempre será mayor en esta época primaveral
- En 2004 se produce un incremento con respecto a 2003, aunque se considera que está sobreestimada igualmente por diferencia estacional
- Esta circunstancia se revela igualmente para el año 2006, donde los resultados comparados muestran un descenso de superficie con teledetección frente a la fotointerpretación. En este caso, la imagen de satélite es de agosto, frente al vuelo fotogramétrico de primavera
- Las superficies obtenidas por fotointerpretación consideran recintos “regados”. La máscara aplicada a los resultados obtenidos por teledetección de clasificación de manzanas minimiza las diferencias, pero es necesario realizar una revisión visual para detectar posibles recintos obtenidos por teledetección que no son apropiados para el estudio. Este es el caso de parcelas que se encuentran en manzanas clasificadas como consolidadas según el método expuesto anteriormente y cuya vegetación crece espontáneamente, sin necesidad de riego, por tratarse de solares vacantes

Como conclusión, para obtener resultados óptimos será necesario tener:

- a) Fechas de adquisición de imágenes, coincidentes, en la misma estación del año. Debido a la caracterización del fenómeno estudiado, la fecha apropiada sería en verano (julio y agosto) para obtener resultados comparables con los obtenidos por fotointerpretación
- b) Aplicación de una máscara para filtrar los resultados obtenidos por teledetección y una revisión visual por un operador

### 5.3. Generación de recintos mediante clasificación supervisada

Para la delimitación de aquellos recintos demandantes de agua que no tienen respuesta al infrarrojo, como son las láminas de agua (estanques, piscinas y fuentes ornamentales), se ha utilizado la técnica de clasificación supervisada con las imágenes de satélite Quickbird y SPOT-5. Debido a la baja precisión de las imágenes de SPOT-5 (10 metros por píxel), algunos recintos no han podido ser detectados, por lo que solo parecen adecuadas para obtener una estimación grosera de este tipo de superficies.

La clasificación de una imagen consiste en la asignación, más o menos automática, de cada uno de los píxeles de una imagen a una serie de categorías o grupos discretos. Esta asignación en clases se basa fundamentalmente en análisis cuantitativos de los valores contenidos en cada píxel, tomando como base teórica los propios de la estadística (Ormeño S., 2004).

Como fruto de la clasificación digital se obtiene la cartografía o inventario de categorías objeto de estudio. En la imagen clasificada que se obtiene, el nivel digital que define cada píxel no tiene ya relación con la radiancia detectada por el sensor, sino que se trata de una etiqueta que identifica la categoría asignada a ese píxel (Chuvienco, 1994).

En el caso que nos ocupa se ha realizado una clasificación supervisada de la imagen. La clasificación supervisada parte de un conocimiento previo de la zona de estudio y de las categorías a obtener. Las fases que se siguen en la clasificación digital son:

- definición digital de las categorías o fase de entrenamiento
- agrupación de los píxeles de la imagen en cada una de las categorías o fase de asignación
- resultados: comprobación y verificación

### 5.3.1. Fase de entrenamiento

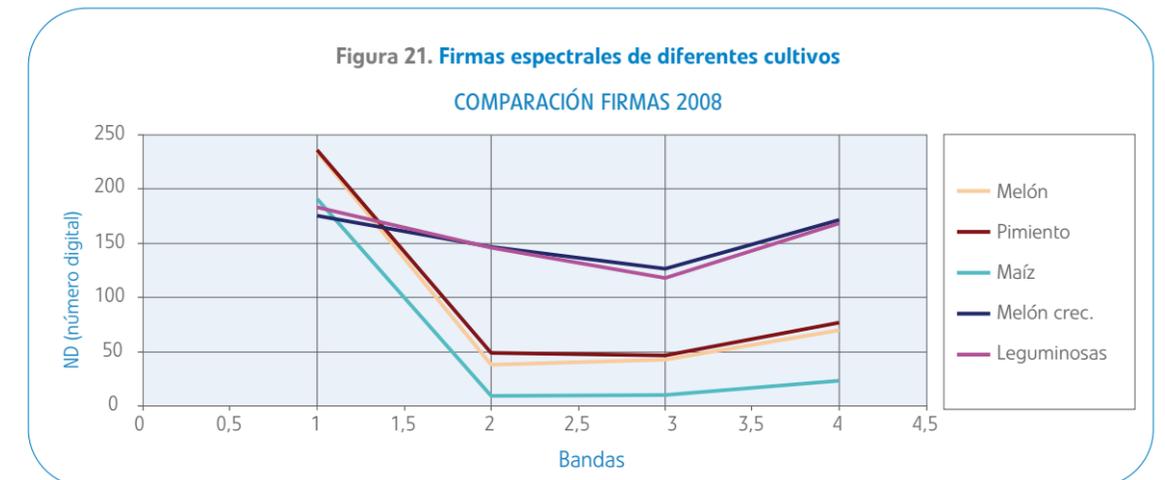
Durante la fase de entrenamiento se han definido unas 30 categorías para cada una de las fechas de estudio (2002, 2004 y 2006). Estas categorías han sido delimitadas, de forma independiente, para cada una de las fechas, ya que características como fecha y ángulo de adquisición, cambios en el territorio y presencia de sombras afectan en la selección de las áreas de entrenamiento.

Estas categorías están constituidas por coberturas tales como láminas de agua (realizando el muestreo sobre 5 tipos de piscinas, representativas en nuestra área de estudio); tejados (se han definido entre 8 y 10 tipos de tejado en función de color, material de la cubierta, exposición, etc.); suelos sin cobertura vegetal, vegetación con distintos grados de vigor, carreteras y sombras.

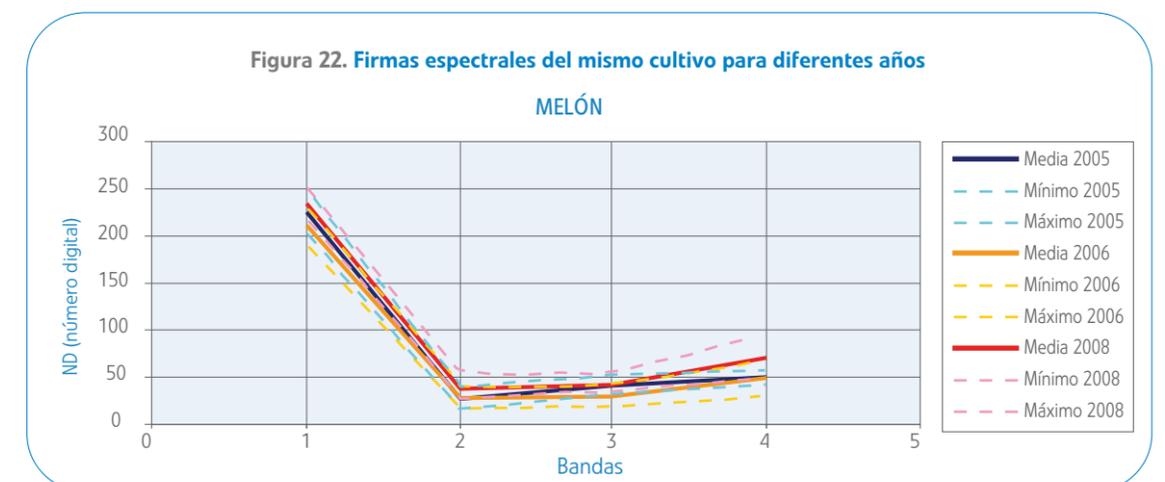
Tras el muestreo de cada una de las categorías antes descritas, se ha realizado una evaluación previa de su posible separabilidad mediante evaluación de homogeneidad y solapamiento estadístico con respecto al resto de las clases.

El proceso de entrenamiento es, pues, un método para mejorar la correlación entre las respuestas espectrales de determinado tipo de objetos (suelos, vegetación, cubiertas, etc.). Dicha correlación se denomina firma espectral y es el valor estadístico que mejor ajusta dichas respuestas de cada tipo de objeto.

En la figura 21 se muestran algunos ejemplos de firmas espectrales de diferentes cultivos.



El refinamiento de cada firma espectral se realiza tomando varias muestras espectrales en diferentes fechas y realizando una correlación completa de todos los valores. En la figura 22 se muestran algunos ejemplos de firmas espectrales del mismo cultivo para diferentes años.



Esto significa que con alta probabilidad, cualquier respuesta espectral incluida en el intervalo definido provendrá del mismo tipo de superficies.

### 5.3.2. Fase de asignación

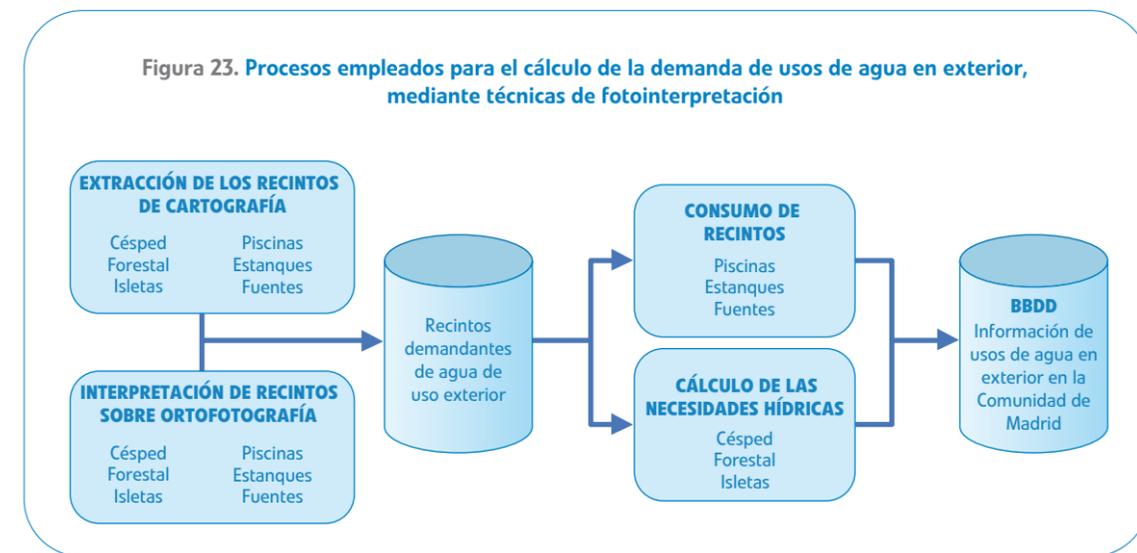
Para la fase de asignación se ha utilizado el clasificador de máxima verosimilitud (en inglés *maximum likelihood*) ya que ensayos previos aportan los mejores resultados para la detección de láminas de agua al implementarlo. Este clasificador se basa en la probabilidad, para cada uno de los píxeles, de pertenecer a la categoría en cuestión. Para ello, se parte de la premisa de que las probabilidades son iguales para todas las clases y que todas las bandas muestran una distribución normal.

# 6

Base de datos geográfica de recintos  
de usos de agua en exterior

La base de datos de usos de agua en exterior realizada en el año 2005 contiene los recintos demandantes de agua clasificados como: zonas verdes, piscinas, estanques y fuentes ornamentales. Estos recintos se obtuvieron mediante las técnicas de fotointerpretación que se describen en este trabajo (ver apartado 5.1. Generación de recintos mediante fotointerpretación).

En la figura 23 se expone el esquema de los procesos empleados.



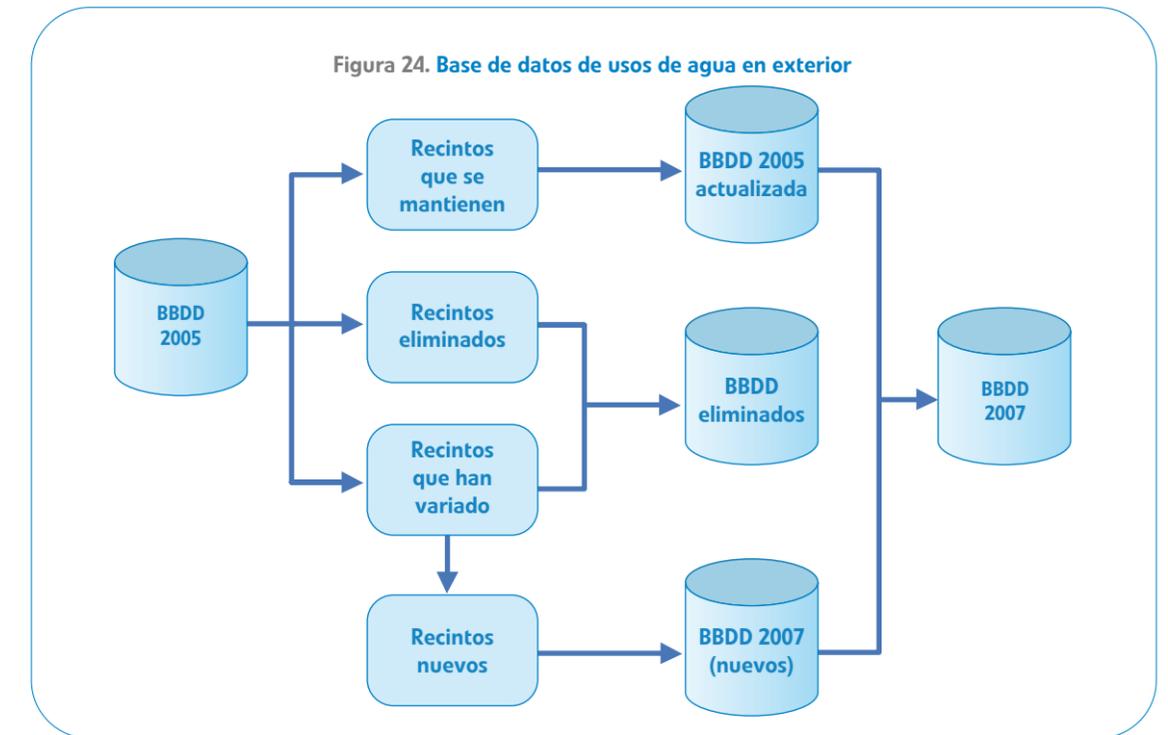
### 6.1. Actualización de la base de datos usos de agua en exterior

La base de datos *usos de agua en exterior* se ha actualizado en el año 2007 y contiene los cambios que se han producido en el intervalo de estos años (2005-2007). Para ello, se han identificado los cambios habidos y se han delimitado los recintos sobre ortofotografías a escala 1:2000 (según disponibilidad) y de los vuelos fotogramétricos de la Comunidad de Madrid. Además de identificar elementos nuevos, se han revisado manualmente los recintos existentes en la base de datos, en los siguientes aspectos:

- Eliminación de recintos y su información asociada que han dejado de existir
- Modificación de aquellos recintos con cambios significativos en su forma y/o dimensiones y/o superficie regable

- Los recintos modificados del punto anterior son incorporados a las nuevas capas generadas, por considerarse estos elementos actualizados
- Delimitación de los parques y campos de golf

En resumen, el resultado de la actualización permite mantener la información histórica de su anterior estado. La figura 24 expone la metodología de actualización de la base de datos de usos de agua en exterior.

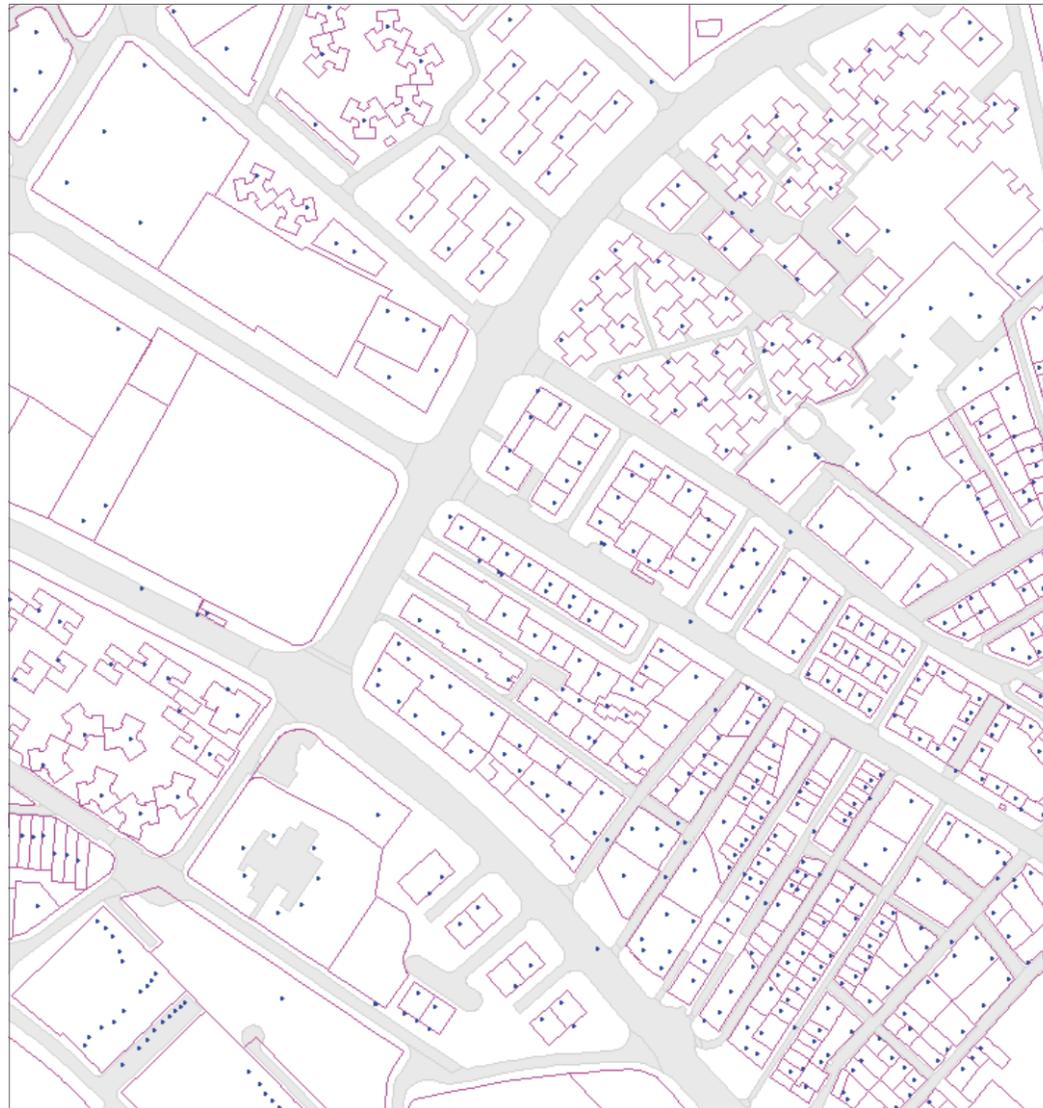


Una vez obtenidos los recintos, gráficamente se procede a asociar la información relativa a los mismos que completan la base de datos de uso de exterior.



Ajuste alfanumérico con catastro: Corrige la posición de las acometidas fuera de parcelas catastrales a la posición del centro de de parcela de catastro con igual dirección (figura 27).

Figura 27. Ajuste geométrico con catastro



Por último, se asocia a cada parcela catastral el código de la acometida que se encuentra en su interior según los siguientes criterios:

- a) Si la parcela contiene una sola acometida, se le asocia ésta
- b) Si contiene más de una acometida, pero todas ellas en el mismo punto, se asocia a la parcela una de ellas (si una de las acometidas tiene asociado un contrato con tarifa tipo "riego" se elige ésta)

La tabla 9 recoge un resumen del ajuste de acometidas al parcelario catastral.

Tabla 9. Ajuste de acometidas al parcelario catastral

Acometidas		Acometidas ajuste			Resultado	
Número total	Fuera de parcelas catastrales	Geométrico	Alfanumérico con acometidas	Alfanumérico con catastro	Asociadas total	Fuera de parcelas catastrales
581.887	59.592	14.331	11.822	1.315	549.763	32.124

### 6.2.3. Asignación de parcela y acometida al recinto de uso de exterior

Una vez asignadas las acometidas al parcelario catastral, se ha realizado un análisis espacial con los recintos de usos de exterior determinados. El objetivo de este cruce es asignarles la información correspondiente a la parcela catastral donde se encuentra y por consiguiente el código de acometida asociado a ésta en el proceso anterior.

### 6.2.4. Asignación del código de sector del nomenclátor oficial de la Comunidad de Madrid

Posteriormente se han intersectado los recintos de usos de exterior con los recintos correspondientes a los sectores del nomenclátor oficial del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, asociando el código de sector en el que se encuentra situado. De este modo es sencillo realizar mapas temáticos utilizando una unidad territorial relativamente pequeña (inferior al municipio).

### 6.2.5. Asignación del nombre de parque y campos de golf

Para enriquecer la base de datos, a todos los recintos que se encuentran en el Interior de parques y campos de golf se les asocia el nombre del mismo.

7

Estimación de la demanda de agua

## 7.1. Cálculo de las necesidades hídricas de las zonas verdes

Este punto aborda el cálculo de las necesidades hídricas anuales de cada una de las tipologías de recintos de zonas verdes identificadas en la cartografía, siendo éstas las siguientes:

- Zonas verdes tipo césped: se han identificado como tales aquellas zonas obtenidas, que según la fotointerpretación sobre el vuelo realizado poseen cubierta vegetal tipo césped
- Zonas verdes tipo forestal: en este grupo se han delimitado todas aquellas zonas que según la fotointerpretación contienen cubierta vegetal de tipo leñoso, arbóreo o arbustivo
- Zonas verdes tipo isleta: son superficies con cubierta vegetal escasa tipo arbustiva o tipo parterre, situadas fundamentalmente en los alrededores de los viales

La metodología, datos y formulación utilizada se exponen con más detalle en el anexo 2.

### 7.1.1. Balance hídrico

Las necesidades hídricas de las zonas verdes se estiman mediante el estudio del balance hídrico anual en los tres tipos de zonas verdes consideradas.

Las necesidades netas de riego ( $N_n$ ) se deducen a partir de la diferencia entre la evapotranspiración de cultivo ( $ET_c$ ) y la precipitación efectiva ( $Pe$ ), lo que matemáticamente se refleja en la siguiente ecuación:

$$N_n = ET_c - Pe$$

*Cálculo de las necesidades netas de riego.*

A continuación se describe el proceso de obtención de las variables que intervienen en la determinación de las demandas de riego comenzando por las variables meteorológicas y climáticas para, seguidamente, estimar la evapotranspiración propia de los tipos de zonas verdes consideradas.

### 7.1.2. Datos climáticos: estaciones meteorológicas

Los datos climáticos utilizados en el presente trabajo se corresponden con los recogidos en seis estaciones meteorológicas de la Comunidad de Madrid (figura 28). Cinco de estas estaciones presentan una serie de datos correspondientes al período comprendido entre 1971-2000, y la estación de Madrid (El Retiro) presenta una serie de datos del período 1901-2007.

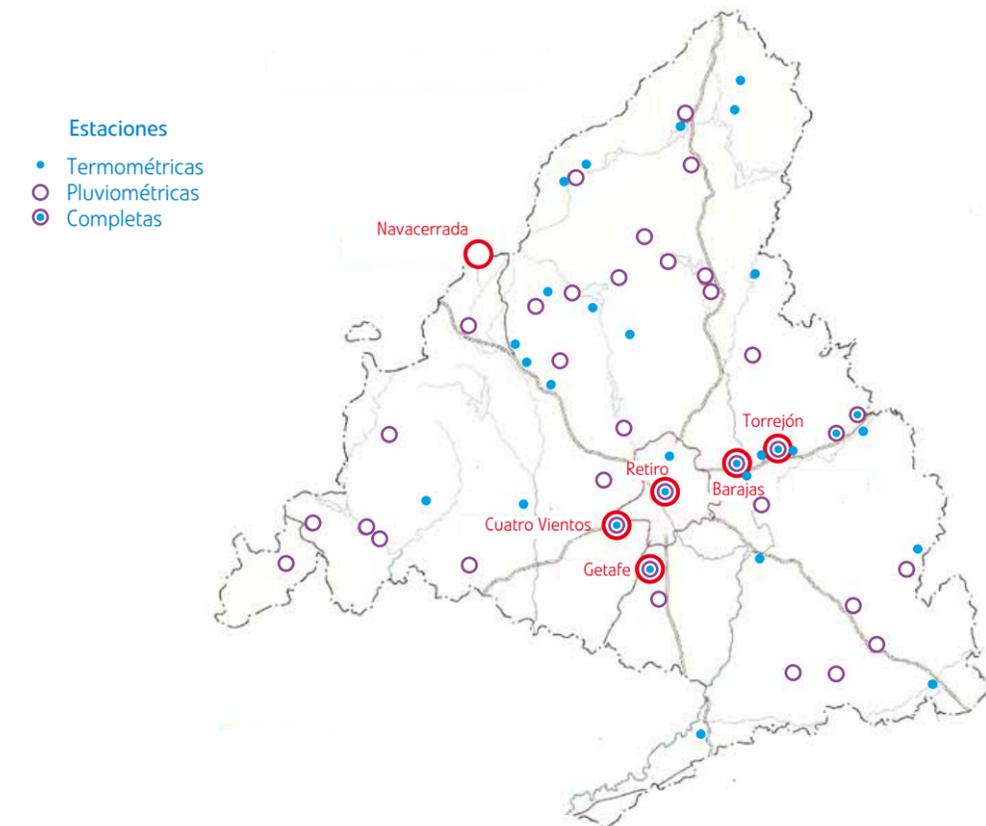
Las estaciones escogidas y sus ubicaciones geográficas, se exponen en la tabla 10.

Tabla 10. Estaciones meteorológicas

Estación	Periodo	Altitud (m)	Latitud	Longitud
Madrid (Aeródromo de Cuatro Vientos)	1971-2000	687	40 22 40	3 47 21
Madrid (Barajas)	1971-2000	582	40 27 15	3 32 39
Madrid (Base aérea de Getafe)	1971-2000	617	40 18 00	3 43 21
Madrid (Base aérea de Torrejón de Ardoz)	1971-2000	611	40 29 00	3 27 01
Madrid (Puerto de Navacerrada)	1971-2000	1.890	40 46 50	4 00 37
Madrid (El Retiro)	1901-2007	667	40 24 40	3 40 41

Fuente: I.N.M

Figura 28. Observatorios meteorológicos



Fuente: I.N.M

### 7.1.3. Evapotranspiración

Se denomina evapotranspiración a la evaporación en superficies cubiertas de vegetales unida a la transpiración de estos vegetales.

La evapotranspiración depende de los siguientes factores:

- Tipo de planta y ciclo de crecimiento de la planta
- Tipo de suelo y humedad del suelo
- Factores climatológicos: insolación, temperatura, humedad atmosférica, etc.

Para el cálculo de la evapotranspiración específica de cada tipo de vegetal (evapotranspiración del cultivo) se emplea la expresión siguiente:

$$ET_c = ET_o \times K_c$$

*Cálculo de la evapotranspiración del cultivo.*

Siendo:

ET<sub>c</sub>: evapotranspiración del cultivo (milímetros) es la cantidad de agua que un cultivo puede evaporar cuando se encuentra en buenas condiciones de alimentación hídrica y con el suelo próximo a su capacidad de campo.

ET<sub>o</sub>: Evapotranspiración de referencia (milímetros) puede ser calculada por distintos métodos, directos o indirectos. Se define como la tasa de evapotranspiración de un cultivo hipotético, de altura 12 centímetros, resistencia superficial de 70 siemenes por metro y un albedo del 23 por ciento, en una superficie extensa de hierba verde con una altura uniforme, activo crecimiento y con condiciones óptimas de humedad del suelo (Comisión Internacional de Riego y Drenaje, mayo 1990).

K<sub>c</sub>: Coeficiente de cultivo, es el coeficiente que depende del cultivo para la estimación de sus necesidades máximas. Se determina experimentalmente mediante mediciones con lisímetros, según el balance hídrico o por métodos micrometeorológicos.

La estimación de la evapotranspiración de referencia, se puede realizar por diversos métodos: hidrológicos, micrometeorológicos, empíricos, etc., en función de los fundamentos físicos o matemáticos de los procedimientos empleados para su determinación.

Para este estudio, se han utilizado dos métodos empíricos diferentes con objeto de poder establecer una comparación entre los resultados finales obtenidos, acotando así los valores de las necesidades reales de riego en las zonas verdes objeto de estudio.

Los métodos empíricos empleados son:

- Fao-Hargreaves (Allen et al. 1998)
- Thornthwaite (1948)

Debe destacarse, que el método de FAO Hargreaves sobrestima ligeramente la evapotranspiración de referencia, por lo que la evapotranspiración calculada por este método se ajustará multiplicándola por el coeficiente 0,8. Por el contrario, el método de Thornthwaite subestima la evapotranspiración de referencia durante los meses de verano, cuando se da la radiación máxima del año.

Los datos utilizados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y posteriormente para el cálculo de las necesidades hídricas, son los correspondientes a las 6 estaciones meteorológicas objeto de estudio.

Los resultados obtenidos, promediando ambos métodos y para diferentes condiciones meteorológicas, correspondientes a un año medio, al extremo seco y al extremo húmedo, se resumen en la tabla 11.

Tabla 11. Valores medios de necesidades hídricas para el clima extremo húmedo

Tipo recinto	Necesidades brutas (m <sup>3</sup> / ha año)		
	Año seco	Año medio	Año húmedo
Zonas verdes tipo césped	9.515	7.725	3.455
Zonas verdes tipo isleta	2.860	2.035	760
Zonas verdes tipo forestal	400	400	400

### 7.2. Consumo anual de piscinas, estanques y fuentes

Ante la imposibilidad de determinar el consumo anual de agua de cada una de las piscinas, estanques y fuentes ornamentales detectadas en fotointerpretación, se procede a realizar las siguientes estimaciones del consumo anual, basándose en valores usuales de las magnitudes que intervienen en su cálculo.

Se considera una profundidad media de las piscinas de 1,6 metros, un llenado anual y un consumo por pérdidas por evaporación de un metro al año. Así, la demanda anual de las piscinas se valora en 26.000 metros cúbicos por hectárea.

En las duchas, el consumo anual de agua estimado es de 1,2 metros cúbicos por metro cuadrado de superficie de piscina, que equivale a un gasto de 12 litros diarios (una ducha de un minuto), durante 100 días al año en que se supone que se encuentra la piscina en funcionamiento (entre los meses de junio y agosto), por lo que la demanda anual de las piscinas y duchas se valora en 38.000 metros cúbicos por hectárea.

Realizando una estimación similar en cuanto a rellenado y evaporación para los estanques, contando con una media de 0,5 metros de profundidad y 0,2 metros por pérdidas por evaporación, resulta un consumo anual de 7.000 metros cúbicos por hectárea.

Los valores estimados para las fuentes ornamentales son de 0,5 metros de profundidad y 0,5 metros de pérdidas por evaporación, con lo que resulta una demanda de 10.000 metros cúbicos por hectárea y año.

Tabla 12. Necesidades hídricas para piscinas, estanques y fuentes

Tipo recinto	Necesidades brutas (m <sup>3</sup> / ha año)
Piscinas	38.000
Estanques	7.000
Fuentes	10.000

8

Resultados obtenidos

## 8.1. Resultados usando fotointerpretación

El resumen de los resultados globales obtenidos para el conjunto de la Comunidad de Madrid se presenta en las tablas de los apartados siguientes.

En el anexo 1 se presentan estos mismos resultados por municipios. Los valores de demanda calculados para las zonas verdes, corresponden a las necesidades hídricas de las plantas para un año medio evaluadas según la metodología expuesta en el apartado 7.1. y sin considerar sobrerriego, que según diversas fuentes puede oscilar entre un 50 y un 100 por ciento de las estrictas necesidades de riego.

### 8.1.1. Tabla resumen de valores

Los resultados globales usando fotointerpretación se recogen en la tabla 13.

Tabla 13. Resumen de resultados

Clase	Tipo	Titular	Superficie 2005 (ha)	Superficie 2007 (ha)	Demanda 2005 (hm <sup>3</sup> /año)	Demanda 2007 (hm <sup>3</sup> /año)	Incremento superficie	Incremento demanda
Zonas verdes	Césped	Privado	7.319,77	7.972,9100	60,61	66,02	9%	9%
Zonas verdes	Césped	Público	2.370,02	2.986,3600	19,62	24,73	26%	26%
Zonas verdes	Forestal	Privado	5.978,49	5.440,1600	2,39	2,18	-9%	-9%
Zonas verdes	Forestal	Público	4.516,33	4.988,3000	1,81	2,00	10%	10%
Zonas verdes	Isletas	Privado	0,00	0,0300	0,00	0,00	0%	0%
Zonas verdes	Isletas	Público	159,87	310,1100	0,34	0,66	94%	94%
Láminas de agua	Piscinas	Privado	375,66	413,3600	14,28	15,71	10%	10%
Láminas de agua	Piscinas	Público	16,26	16,2616	0,62	0,61	-1%	-2%
Láminas de agua	Estanques	Privado	33,99	59,9100	0,24	0,42	76%	75%
Láminas de agua	Estanques	Público	62,03	109,7100	0,43	0,77	77%	79%
Láminas de agua	Fuentes	Privado	0,00	0,0200	0,00	0,00	0%	0%
Láminas de agua	Fuentes	Público	3,46	4,5800	0,03	0,05	32%	67%
<b>Total</b>			<b>20.835,88</b>	<b>22.301,6100</b>	<b>100,37</b>	<b>113,15</b>	<b>7%</b>	<b>13%</b>

## 8.1.2. Clasificación de resultados

En la tabla 14 se clasifican los resultados globales según tipo de recinto, zona y titularidad.

Tabla 14. Clasificación de resultados

	Superficie 2005 (ha)	Superficie 2007 (ha)	Incremento superficie	Demanda 2005 (hm <sup>3</sup> /año)	Demanda 2007 (hm <sup>3</sup> /año)	Incremento demanda
<b>Total</b>	<b>20.835,88</b>	<b>22.301,61</b>	<b>7%</b>	<b>100,37</b>	<b>113,15</b>	<b>13%</b>
<b>Titularidad</b>						
Privado	13.707,91	13.886,39	1%	77,52	84,33	9%
Público	7.127,97	8.415,22	18%	22,85	28,82	26%
<b>Clasificación zona</b>						
Zonas verdes	20.344,48	21.697,87	7%	84,77	95,59	13%
Láminas de agua	491,40	603,74	23%	15,60	17,56	13%
<b>Tipo de recinto</b>						
Césped	9.689,79	10.959,27	13%	80,23	90,75	13%
Forestal	10.494,82	10.428,46	-1%	4,20	4,18	0%
Isletas	159,87	310,14	94%	0,34	0,66	94%
Piscinas	391,92	429,52	10%	14,90	16,32	10%
Estanques	96,02	169,62	77%	0,67	1,19	78%
Fuentes	3,46	4,60	33%	0,03	0,05	67%

La tabla 15 recoge los resultados particularizados para el tipo de recinto piscinas.

Tabla 15. Resultados piscinas

Número piscinas	2005		2007	
	Superficie (ha)	Demanda anual (hm <sup>3</sup> )	Superficie (ha)	Demanda anual (hm <sup>3</sup> )
86.079	391,92	14,9	86.134	16,32

En la tabla 16 pueden observarse los distintos resultados desagregados según el tipo de recinto.

**Tabla 16. Desagregación de resultados 2005 y 2007 por tipo y titularidad del recinto**

	Recintos 2005 (ha)	Demanda 2005 (hm <sup>3</sup> /año)	Recintos 2007 (ha)	Demanda 2007 (hm <sup>3</sup> /año)
<b>Titular</b>	<b>Césped</b>	<b>Césped</b>	<b>Césped</b>	<b>Césped</b>
Privado	7.319,77	60,61	7.972,91	66,02
Público	2.370,02	19,62	2.986,36	24,73
<b>Total</b>	<b>9.689,79</b>	<b>80,23</b>	<b>10.959,26</b>	<b>90,74</b>
<b>Titular</b>	<b>Forestal</b>	<b>Forestal</b>	<b>Forestal</b>	<b>Forestal</b>
Privado	5.978,49	2,39	5.440,16	2,18
Público	4.516,33	1,81	4.988,30	2,00
<b>Total</b>	<b>10.484,82</b>	<b>4,20</b>	<b>10.428,46</b>	<b>4,17</b>
<b>Titular</b>	<b>Isletas</b>	<b>Isletas</b>	<b>Isletas</b>	<b>Isletas</b>
Privado	0,00	0,00	0,03	0,00
Público	159,87	0,34	310,11	0,66
<b>Total</b>	<b>159,87</b>	<b>0,34</b>	<b>310,14</b>	<b>0,66</b>
<b>Titular</b>	<b>Piscinas</b>	<b>Piscinas</b>	<b>Piscinas</b>	<b>Piscinas</b>
Privado	375,66	14,28	413,36	15,71
Público	16,26	0,62	16,16	0,61
<b>Total</b>	<b>391,92</b>	<b>14,90</b>	<b>429,53</b>	<b>16,32</b>
<b>Titular</b>	<b>Estanques</b>	<b>Estanques</b>	<b>Estanques</b>	<b>Estanques</b>
Privado	33,99	0,24	59,91	0,42
Público	62,03	0,43	109,71	0,77
<b>Total</b>	<b>96,02</b>	<b>0,67</b>	<b>169,62</b>	<b>1,19</b>
<b>Titular</b>	<b>Fuentes</b>	<b>Fuentes</b>	<b>Fuentes</b>	<b>Fuentes</b>
Privado	0,00	0,00	0,02	0,00
Público	3,46	0,03	4,58	0,05
<b>Total</b>	<b>3,46</b>	<b>0,03</b>	<b>4,61</b>	<b>0,05</b>

## 8.2. Resultados usando teledetección. Índices de vegetación

### 8.2.1. Resultados regionales usando imágenes SPOT

#### 8.2.1.1. Zonas de vegetación en la Comunidad de Madrid

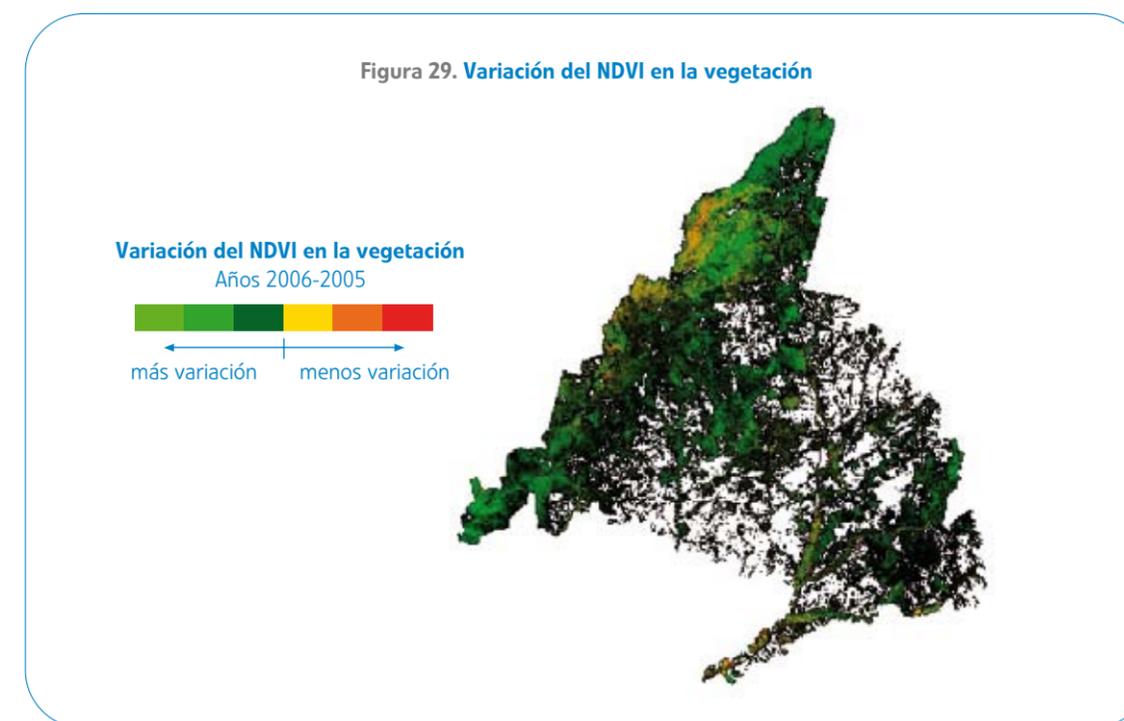
Para evaluar cómo varía el vigor de la vegetación en términos de NDVI se realiza una comparación por parejas de escenas en los años de estudio, 2005 y 2006. Esta comparación consiste en la resta entre las imágenes NDVI de 2006 y 2005, obteniéndose el sentido del cambio además de una medida de la variación. Debe señalarse que

sería deseable que la comparación se realizase entre imágenes tomadas aproximadamente en la misma fecha de ambos años, lo cual no ha sido posible en todo el ámbito de la Comunidad de Madrid.

Cabe recordar aquí que el NDVI está relacionado directamente con los parámetros de la vegetación: contenido en clorofila y agua de hojas, flujo de CO<sub>2</sub>, radiación fotosintética, producción fotosintética, índice de área foliar, etc. (Chuvienco, E. 1994).

Este análisis está centrado solo en los píxeles de respuesta vegetación en ambas fechas, de forma que cambios de categoría, por ejemplo categoría vegetación en 2005 que se convierte en zona en construcción en 2006, no son tenidos en cuenta. El objetivo es analizar cómo se modifica la respuesta de la vegetación entre las fechas de estudio, así solo los píxeles que permanecen como vegetación son comparados.

La figura 29 muestra el mapa de variación de NDVI en la vegetación. Este resultado es una composición de todas las parejas de escenas analizadas.



La paleta de color utilizada muestra, como variable continua, la diferencia entre el vigor de vegetación para las fechas analizadas. La gama de los verdes muestra aumento del vigor de la vegetación mientras que la gama de los amarillos-rojo muestra descenso. Los resultados presentan un aumento en el vigor de la vegetación para 137.290 hectáreas frente a la superficie de 41.089 hectáreas que muestran un descenso.

Existen tres zonas claramente diferenciadas con un comportamiento particular desde el punto de vista de la variación en el NDVI:

1. Vegas de los ríos Jarama y Tajo, zona sureste de la Comunidad de Madrid, donde las rotaciones en cultivos de regadíos tienen alta influencia en las diferencias de vigor de la vegetación

2. Sierra de Madrid, franja noroeste límite de la Comunidad de Madrid, en las que las fechas disponibles para el estudio son junio para año 2005 (imágenes de verano) frente a octubre-noviembre para el año 2006 (imágenes de otoño). Se aprecia una disminución en el vigor de la vegetación que coincide tanto en estacionalidad como en delimitación, con la distribución de las especies forestales caducifolias del mapa de vegetación de la Comunidad de Madrid
3. Norte de la localidad de Alcalá de Henares, zona de aproximadamente 10 x 10 kilómetros. Las fechas disponibles para éste área son octubre de 2005, frente a noviembre de 2006. La diferencia en la respuesta de vigor de la vegetación no sigue la tendencia de zonas adyacentes. Entre las razones de este comportamiento se apunta a que la fecha de octubre de 2005 esta fuera del año hidrológico 2004-2005 considerado con situación de sequía y que la imagen para 2006 es muy tardía

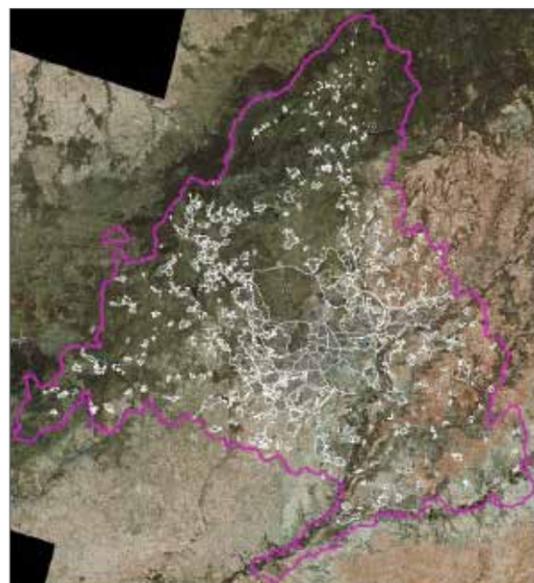
### 8.2.2. Resultado sobre núcleos urbanos de Imágenes SPOT, para el periodo de sequía 2005-2006

Se presentan a continuación los resultados obtenidos con respecto al ámbito urbano de la Comunidad de Madrid.

Como núcleo urbano se ha delimitado la envolvente al núcleo urbano que presenta construcciones, ya sean de uso residencial, polígono industrial o parque comercial (figura 30).

Así, la superficie asignada a vegetación, para el año 2005 es de 35.382,6 hectáreas, frente a las 53.601 hectáreas para el 2006.

Figura 30. Delimitación de zonas urbanas en la Comunidad de Madrid



La tabla 17 muestra un resumen de las superficies deducidas.

Tabla 17. Superficies de vegetación para los dos años de estudio

Año	Superficie vegetación	% total (máscara núcleo urbano)	% variación
2005	35.382,60	24,9	-
2006	53.601,00	37,8	12,9

La figura 31 muestra, sobre la máscara de núcleos urbanos, las zonas donde se presenta un aumento de la superficie de vegetación y, la figura 32, muestra las zonas donde se presenta un descenso de la misma.

Analizando el mapa de variación de NDVI para la superficie correspondiente al ámbito urbano de la Comunidad de Madrid se obtiene, de forma global, un aumento en la respuesta de vigor de la vegetación, tal y como se observa en la figura 33.

Figura 31. Aumento de la superficie de vegetación sobre la máscara de núcleos urbanos

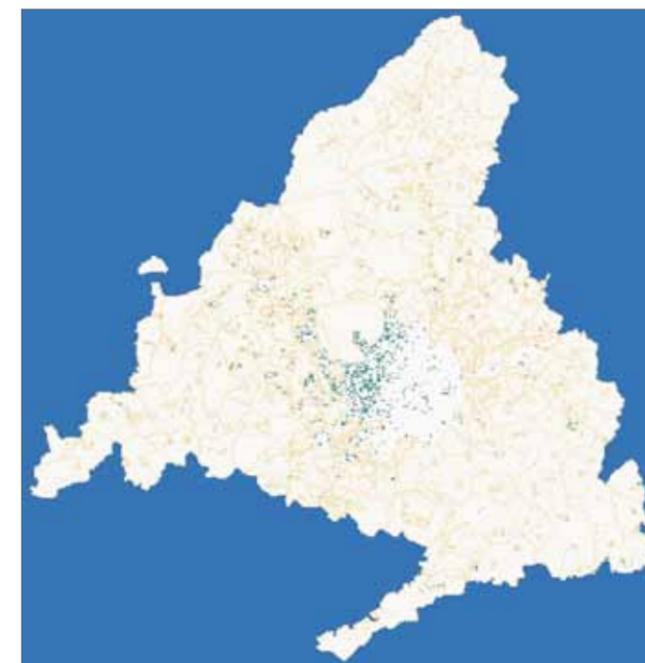


Figura 32. Descenso de la superficie de vegetación sobre la máscara de núcleos urbanos

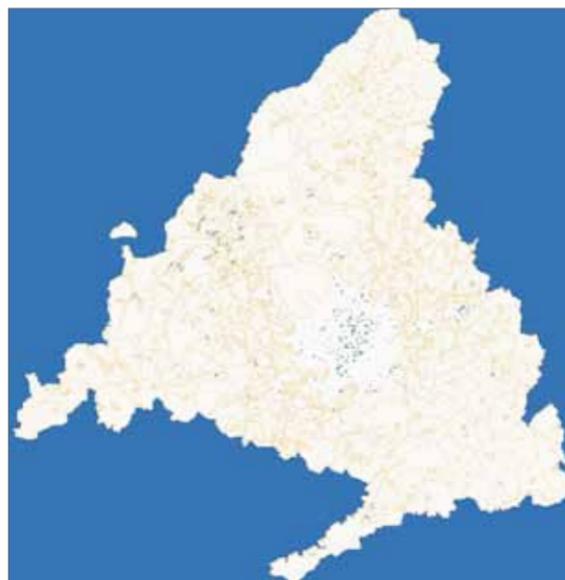
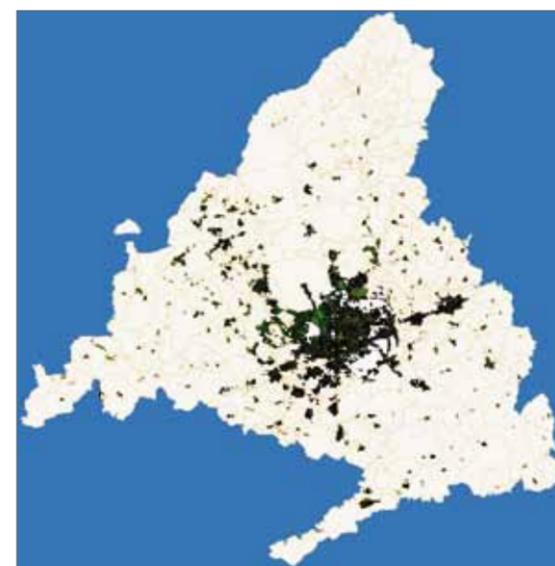


Figura 33. Mapa de variación de NVDI de núcleos urbanos



Variación del NVDI  
Años 2006-2005

más variación      menos variación

La paleta de color utilizada muestra, como variable continua, la diferencia entre el vigor de vegetación para las fechas analizadas. La gama de los verdes muestra aumento del vigor de la vegetación mientras que la gama de los amarillos-rojos muestra descenso.

La superficie dentro del área de interés que se analiza es aquella que presenta vegetación en 2005 y en 2006, tal y como se justificó anteriormente. Esta superficie es de 27.384,8 hectáreas en las cuales, el mapa de variación del NDVI muestra aumento en la respuesta de la vegetación en 21.300,17 hectáreas frente a las 6.084,63 hectáreas donde muestra descenso. Al analizar de forma particular cada uno de los recintos que componen la máscara de núcleos urbanos, sólo presentan descenso en los valores de variación de NDVI promedio correspondiente, los municipios de Cercedilla, Ribatejada, Fresno de Torote, Valdeavero, Camarma de Esteruelas, Meco, Daganzo de Arriba, Alcalá de Henares, Aranjuez y Pinto.

### 8.2.3. Resultado sobre núcleos urbanos de imágenes Quickbird

Las imágenes de alta resolución del satélite Quickbird corresponden al municipio de Rivas Vaciamadrid, elegido como zona piloto para este análisis.

El interés de los resultados se centra sobre la superficie que se considera como urbana. Esta superficie se ha delimitado como la envolvente al núcleo urbano que presenta construcciones, ya sean de uso residencial, polígono industrial o parque comercial. La superficie así delimitada recoge un área de 1.355 hectáreas.

La tabla 18 recoge las superficies de cambio entre 29 de abril de 2002 y 14 de mayo de 2004.

Tabla 18. Superficies de cambio entre el 29 de abril de 2002 y el 14 de mayo de 2004

Leyenda	Superficie (ha)
No zonas verdes. No presentes zonas verdes en ninguna de las fechas estudiadas	885,6
Desaparece zona verde de vigor	86,9
Desaparece zona verde de alto vigor	9,1
Aparece zona verde de vigor	124,4
Permanece zona verde de vigor	107,1
Disminuye desde vegetación alto vigor a vegetación vigor	18,9
Aparece vegetación alto vigor	20,2
Aumenta desde vegetación vigor hasta vegetación alto vigor	62,9
Permanece vegetación alto vigor	39,6

La tabla 19 recoge las superficies de cambio, entre el 14 de mayo de 2004 y el 05 de agosto de 2006.

**Tabla 19. Superficies de cambio entre el 14 de mayo de 2004 y el 5 de agosto de 2006**

Leyenda	Superficie (ha)
No zonas verdes. No presentes zonas verdes en ninguna de las fechas estudiadas	919,7
Desaparece zona verde de vigor	164,2
Desaparece zona verde de alto vigor	55,4
Aparece zona verde de vigor	50,8
Permanece zona verde de vigor	59,8
Disminuye desde vegetación alto vigor a vegetación vigor	31,5
Aparece vegetación alto vigor	11,1
Aumenta desde vegetación vigor hasta vegetación alto vigor	26,3
Permanece vegetación alto vigor	35,8

Como información de base para validar las superficies obtenidas, se dispone del recintado procedente de la fotointerpretación realizada sobre los vuelos fotogramétricos de los años 2003 y 2006. De estas bases se pueden extraer superficies ocupadas por las cubiertas de vegetación, separadas en césped, forestal e isletas y por láminas de agua, separadas en estanques, fuentes y piscinas.

Agrupando las categorías de vegetación para la segmentación realizada sobre las imágenes de satélite (vegetación vigor y vegetación alto vigor) y agrupando las categorías de vegetación para el recintado sobre la ortofotografía aérea (capas forestal, isletas y césped), obtenemos la tabla 20 con valores de superficies de vegetación.

**Tabla 20. Valores de superficie de vegetación para las tres fechas de estudio por segmentación sobre imagen de satélite y digitalización sobre fotografía aérea**

Segmentación imagen satélite		Digitalización fotografía aérea	
Fecha	Superficie (ha)	Fecha	Superficie (ha)
29 de abril de 2002	324.783	agosto de 2003	186,50
14 de mayo de 2004	373.320		
05 de agosto de 2006	215.585	abril de 2006	192,36

Para el periodo 2002-2004 es de destacar que se obtiene prácticamente el doble de superficie en vegetación, a partir de la imagen de satélite, que la obtenida de fotografía aérea.

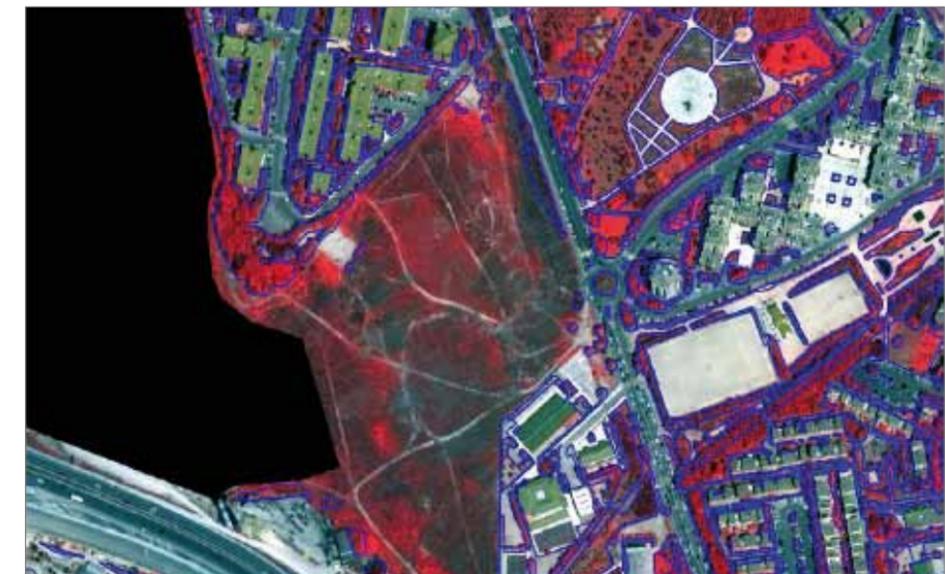
Entre las razones generales del desacuerdo en superficie global se apuntan:

- La distinta fecha o época de base en cada fuente; se compara abril y mayo, frente a agosto
- Distinto aporte de agua de lluvia en semanas previas a la toma de la imagen o a la realización del vuelo. Un aporte de lluvia en primavera provoca una rápida aparición de herbáceas en zonas de suelo desnudo, dando una respuesta de vegetación que los índices recogen. Así, para las fechas de las imágenes analizadas y con el estudio de los datos de pluviometría, se comprueba que en las fechas previas a la toma de las imágenes de 2002 existieron precipitaciones de 53 y 47 milímetros en los meses de marzo y abril respectivamente y en las de 2004 se produjeron precipitaciones de 46 y 58 milímetros en los meses de abril y mayo
- La digitalización realizada por fotointerpretación usa, como criterio de delimitación, la vegetación "regada" (sólo vegetación con aportes artificiales de agua) frente la metodología seguida para las imágenes de satélite que detecta cualquier tipo de vegetación que dé respuesta fotosintética (vegetación natural de márgenes, herbáceas anuales en parcelas sin construir, etc.)

Se ha realizado un exhaustivo chequeo, mediante superposición del recintado generado sobre ortofotografía aérea y la imagen resultado de los cambios en vegetación, para la pareja 2002-2004, detectándose frecuentemente zonas que presentan superficies con vegetación importante, pero que no tienen correspondencia con el recintado. Algunas de estas zonas se presentan a continuación.

En la figura 34 se aprecian, sobre la imagen satélite del 14 de mayo de 2004 en falso color, los recintos en azul procedentes de la fotointerpretación. Existen zonas no digitalizadas porque quedan fuera del objeto de estudio (zona en el centro de la imagen).

**Figura 34. Imagen de satélite del 14 de mayo de 2004. El color rojo indica la presencia de vegetación**



En la figura 35 se puede observar que la generación del NDVI detecta respuesta en la zona comentada anteriormente.

Figura 35. Imagen de satélite del 14 de mayo de 2004. Categorización del NDVI (tonalidades verdes)



En la figura 36 se aprecia, sobre la ortofoto de 2003, los solares libres de construcción, o ya en construcción y los recintos resultados de la generación del NDVI con imagen satélite de 2002.

Figura 36. Respuesta del NDVI (imagen derecha) en manzanas no consolidadas (ortofoto izquierda)



Estos ejemplos expuestos, evidencian la necesidad de depurar los resultados obtenidos para que sean comparables. Para la depuración de los resultados, se ha realizado un filtrado aplicando una máscara con la clasificación de manzanas cartográficas y considerando sólo los recintos que se encuentran en manzanas consolidadas. Se han incluido también los recintos coincidentes con las isletas de viario procedentes de la cartografía. Las superficies así obtenidas se resumen en la tabla 21.

Tabla 21. Tabla resumen de superficies obtenidas para los distintos años

Segmentación imagen satélite en manzanas consolidadas + isletas de viario		Digitalización de fotografía aérea	
Fecha	Superficie (ha)	Fecha	Superficie (ha)
29 de abril de 2002	185,79	agosto de 2003	186,50
14 de mayo de 2004	227,88		
05 de agosto de 2006	188,60	abril de 2006	192,36

### 8.3. Resultados usando teledetección. Clasificación supervisada de láminas de agua

El resultado de la clasificación supervisada lo compone una nueva imagen clasificada (segmentada) en la que el valor del píxel representa una de las categorías. De la imagen obtenida se extraen las categorías láminas de agua, que son las categorías de interés para esta etapa del trabajo. Sobre el resultado procedente de esta asignación automatizada se ha realizado una depuración manual que ha consistido en la eliminación de errores por comisión. El procedimiento seguido en la depuración ha sido la digitalización en pantalla.

Para la verificación de los resultados se han delimitado tres zonas de chequeo, representativas del total del área de interés:

- a) zona 01: residencial, torre de pisos
- b) zona 02: residencial, casas unifamiliares con arbolado
- c) zona 03: residencial, casas unifamiliares sin arbolado o arbolado poco desarrollado

Cada una de las zonas de chequeo está compuesta por un cuadrado de 0,5 kilómetros de lado. En cada una de las zonas de chequeo se ha realizado una revisión a escala 1:1000 usando como base la propia ortoimagen de satélite fusionada y se han generado distintas capas, en función del año a evaluar.

#### 8.3.1. Año 2006

Las capas generadas para la evaluación de resultados de la fecha de imagen satélite de 05 de agosto 2006 son:

- a) Capa de centroides de láminas de agua procedentes de la fotointerpretación realizada sobre la ortofotografía aérea (vuelo 2006)
- b) Capa de centroides de láminas de agua procedentes de una nueva fotointerpretación realizada sobre la ortoimagen de satélite fusionada (fecha de adquisición: 05 de agosto de 2006)
- c) Capa de centroides de láminas de agua procedentes de la clasificación supervisada de la imagen satélite (fecha de adquisición 05 de agosto de 2006)

Se asume como real "verdad terreno" la nueva fotointerpretación realizada sobre la ortoimagen de satélite fusionada.

Los resultados obtenidos en esta fase de chequeo se muestran en la tabla 22.

**Tabla 22. Evaluación de resultados en imagen de satélite agosto 2006<sup>2</sup>**

Zonas de evaluación	Fotointerpretación imagen satélite	Fotointerpretación fotografía aérea				Clasificación imagen satélite			
	Observaciones	Observaciones	Coincidencias	Omisión /Real	Comisión /Real	Observaciones	Coincidencias	Omisión /Real	Comisión /Real
Zona 1	9	11	9	0	2	24	9	0	15
Zona 2	222	211	201	10	0	262	196	26	66
Zona 3	168	158	154	14	0	210	164	4	46

Omisión/Real: (número de láminas no localizadas frente a la real. Error de omisión)  
Comisión/Real: (número de láminas localizadas que no están presentes en el real. Error de comisión)

A modo de resumen, la tabla 23 muestra los errores de omisión y comisión de la fotointerpretación sobre imagen satélite fusionada frente a la fotointerpretación sobre ortofotografía aérea y también frente a la clasificación de la imagen satélite.

**Tabla 23. Resumen de errores (omisión/comisión) de fotointerpretación sobre imagen de satélite fusionada frente a fotointerpretación sobre ortofoto y clasificación de la imagen**

Fotointerpretación imagen satélite 2006	Error	Fotointerpretación ortofoto	Clasificación imagen satélite
Zona 01	Omisión	0,00%	0,00%
	Comisión	18,20%	62,50%
Zona 02	Omisión	4,70%	11,70%
	Comisión	0,00%	25,20%
Zona 03	Omisión	8,30%	2,40%
	Comisión	0,00%	21,90%

Cabe recordar aquí que el objetivo perseguido con la clasificación de la imagen satélite ha sido obtener una capa en la que el error de omisión sea lo más bajo posible, para de esta forma disponer de una capa que se pueda usar como máscara donde concentrar posteriores esfuerzos de fotointerpretación de láminas de agua, fundamentalmente piscinas. De esta forma, estos resultados arrojan altos valores por errores de comisión al corregir la metodología para la inclusión de todos los píxeles probables de ser lámina de agua. Se pretende reducir al mínimo el número de láminas de agua no detectadas.

<sup>2</sup> La diferencia entre los resultados de la fotointerpretación realizada sobre la ortofotografía aérea y la ortoimagen satélite puede ser debida a las distintas fechas de toma de estas coberturas.

Estos resultados han permitido, de forma adicional, comprobar la fiabilidad de la capa fotointerpretación sobre ortofotografía aérea del año 2006, sin bien sería deseable aumentar el tamaño del muestreo para tal fin. Así, el error de omisión promedio para las zonas es de 4,3 por ciento (que da una idea del porcentaje de piscinas que no han sido detectadas por la fotointerpretación de la ortofoto) y un error de comisión de 0 por ciento (se desprecia el valor de error de comisión de la zona 01, ya que se ha estimado que se debe a las reducidas dimensiones de las láminas de agua que hace imposible la fotointerpretación sobre la imagen fusionada).

Los resultados obtenidos para la cobertura "lámina de agua" obtenida por clasificación de imágenes satélite aportan prácticamente el mismo error promedio de omisión que el obtenido por fotointerpretación, tan solo 4,7 por ciento, pero con un error promedio de comisión de 36,5 por ciento. Este error de comisión se considera alto ya que se producen frecuentes confusiones de otras coberturas con láminas de agua. Esto es debido a la heterogeneidad reflectiva que presentan alguna de las láminas de agua objetivo de la detección, tales como piscinas vacías, piscinas cubiertas por una lona, piscinas sin tratamiento de mantenimiento agua, etc.

La no realización de trabajo de campo cercano a las fechas de adquisición de las imágenes satélite imposibilita profundizar en el análisis de las causas de estos errores de comisión.

### 8.3.2. Año 2004

Las capas generadas para la evaluación de resultados de la fecha de imagen satélite de 14 de mayo de 2004 son:

- Capa de centroides de láminas de agua procedentes de una nueva fotointerpretación realizada sobre la ortoimagen de satélite fusionada (fecha de adquisición: 14 de mayo de 2004)
- Capa de centroides de láminas de agua procedentes de la clasificación supervisada de la imagen satélite (fecha de adquisición: 14 de mayo de 2004)

Los resultados obtenidos en esta fase de chequeo se muestran en la tabla 24.

**Tabla 24. Evaluación de resultados en imagen de satélite mayo 2004<sup>3</sup>**

Zonas de evaluación	Fotointerpretación imagen satélite	Clasificación imagen satélite			
	Observaciones	Observaciones	Coincidencias	Omisión/Real	Comisión/Real
Zona 1	9	20	4	5	16
Zona 2	209	219	174	35	45
Zona 3	155	141	122	14	19

Omisión/Real: número de láminas no localizadas frente a la real. Error de omisión  
Comisión/Real: número de láminas localizadas que no están presentes en el real. Error de comisión  
Nota: se asume como real "verdad terreno" la nueva fotointerpretación realizada sobre la ortoimagen de satélite fusionada

<sup>3</sup> Para el año 2004 no se cuenta con datos de fotointerpretación de ortofotografía aérea.

A modo de resumen, la tabla 25 muestra los errores de omisión y comisión de la fotointerpretación sobre imagen satélite fusionada y clasificación de la imagen para cada zona de chequeo.

**Tabla 25. Resumen de errores (omisión/comisión) de fotointerpretación sobre imagen de satélite fusionada frente a clasificación de la imagen**

Fotointerpretación imagen satélite 2004	Error	Clasificación imagen satélite
Zona 01	Omisión	55,60%
	Comisión	80,00%
Zona 02	Omisión	16,70%
	Comisión	20,50%
Zona 03	Omisión	10,30%
	Comisión	13,50%

La reducción de la fiabilidad para la clasificación obtenida para la imagen 2004, tanto por el aumento de errores de omisión, como de comisión, parece ser debida al aumento de la heterogeneidad de las cubiertas de estudio y como principal causa de ello, se apunta a la temprana fecha de adquisición (14 de mayo de 2004). Como ya se ha comentado anteriormente, las fuentes de heterogeneidad para piscinas que van a influir en los resultados (piscinas vacías, cubiertas por lona, sin tratamiento de mantenimiento, etc.) son lógicamente mayores para una época de primavera, ya que no se está en época de uso. El error promedio de omisión para la clasificación 2004 sube hasta el 27,5 por ciento y el de comisión llega al 38 por ciento.

### 8.3.3. Año 2002

Las capas generadas para la evaluación de resultados de la fecha de imagen satélite de 29 de abril de 2002 son:

- Capa de centroides de láminas de agua procedentes de una nueva fotointerpretación realizada sobre la ortoimagen de satélite fusionada (fecha de adquisición: 29 de abril de 2002)
- Capa de centroides de láminas de agua procedentes de la clasificación supervisada de la imagen satélite (fecha de adquisición: 29 de abril de 2002)

Los resultados obtenidos en esta fase de chequeo se muestran en la tabla 26.

**Tabla 26. Evaluación de resultados en imagen de satélite abril 2002<sup>4</sup>**

Zonas de evaluación	Fotointerpretación imagen satélite	Clasificación imagen satélite			
	Observaciones	Observaciones	Coincidencias	Omisión/Real	Comisión/Real
Zona 1	9	14	7	2	5
Zona 2	199	207	175	24	32
Zona 3	122	122	109	13	13

Omisión/Real: número de láminas no localizadas frente a la real. Error de omisión  
Comisión/Real: número de láminas localizadas que no están presentes en el real. Error de comisión  
Nota: se asume como real "verdad terreno" la nueva fotointerpretación realizada sobre la ortoimagen de satélite fusionada

A modo de resumen, la tabla 27 muestra los errores de omisión y comisión de la fotointerpretación sobre imagen satélite fusionada y clasificación de la imagen para cada zona de chequeo.

**Tabla 27. Resumen de errores (omisión/comisión) de fotointerpretación sobre imagen de satélite fusionada frente a clasificación de la imagen**

Fotointerpretación imagen satélite 2002	Error	Clasificación imagen satélite
Zona 01	Omisión	22,20%
	Comisión	41,70%
Zona 02	Omisión	12,10%
	Comisión	15,50%
Zona 03	Omisión	10,70%
	Comisión	10,70%

El error promedio de omisión es del 15 por ciento y el promedio de comisión es del 22,6 por ciento. Estos errores promedios, para la clasificación obtenida para la imagen de 29 de abril de 2002, siguen la línea de los obtenidos con la anterior imagen de 14 de mayo de 2004. Estos valores son lógicos si tenemos en cuenta que de nuevo estamos utilizando una fecha de primavera para detección de láminas de agua que fundamentalmente consisten en superficies de piscinas.

Por otro lado, se han cuantificado también los errores de láminas de agua considerando la superficie de las piscinas. El objetivo es estudiar si los errores se concentran en piscinas pequeñas o por el contrario se debe a la clasificación realizada.

<sup>4</sup> Para el año 2002 no se cuenta con datos de fotointerpretación de ortofotografía aérea.

La tabla 28 muestra la clasificación de piscinas no detectadas en función de su tamaño.

**Tabla 28. Piscinas no detectadas en función de su tamaño**

Láminas de agua no clasificadas en función de su tamaño				
Año	Zona	Nº de láminas grandes	Nº de láminas pequeñas	Total
2006	01	0	0	0
	02	0	26	26
	03	0	4	4
2004	01	4*	1	5
	02	0	35	35
	03	0	14	14
2002	01	0	2	2
	02	0	24	24
	03	0	13	13

\* Se corresponde con piscinas comunitarias que en ese momento se encontraban vacías

El error de omisión se debe fundamentalmente a piscinas pequeñas, como era de esperar por la propia resolución de la imagen; por otro lado, para evitar errores en láminas grandes es aconsejable que la época de toma de la imagen sea en verano (julio - agosto) con el objetivo de evitar la existencia de piscinas vacías, cubiertas por lona, sin tratamiento de mantenimiento, etc., que según se ha comentado anteriormente son lógicamente, mayores para una época de primavera.

#### 8.4. Comparativa de resultados obtenidos mediante SPOT-5 y Quickbird

A continuación, se comparan los resultados obtenidos para el estudio de la vegetación, del satélite Quickbird frente a SPOT-5, para el núcleo urbano de Rivas-Vaciamadrid.

Las fechas de adquisición de las imágenes 2006, para ambos sensores, se muestran en la tabla 29.

**Tabla 29. Tipos de sensores utilizados y fechas de adquisición de imágenes**

Sensor	Escena	Fecha
SPOT-5	34-269	12/08/2006
QUICKBIRD		05/08/2006

En la tabla 30 se destacan las diferencias de resolución de ambos satélites dada la gran influencia de este parámetro en el estudio.

**Tabla 30. Tamaño de píxel de las imágenes de cada satélite**

Sensor	Resolución (m)	Superficie píxel (m²)
SPOT-5	10,0	100,00
QUICKBIRD	2,4	5,76

Esta circunstancia se puede apreciar en las figuras 37 y 38. La figura 39 es el resultado de la superposición de los dos mapas de coberturas.

**Figura 37. Quickbird, Mapa de cobertura NDVI Rivas Vaciamadrid**



**Figura 38. SPOT-5, mapa de cobertura NDVI Rivas Vaciamadrid**

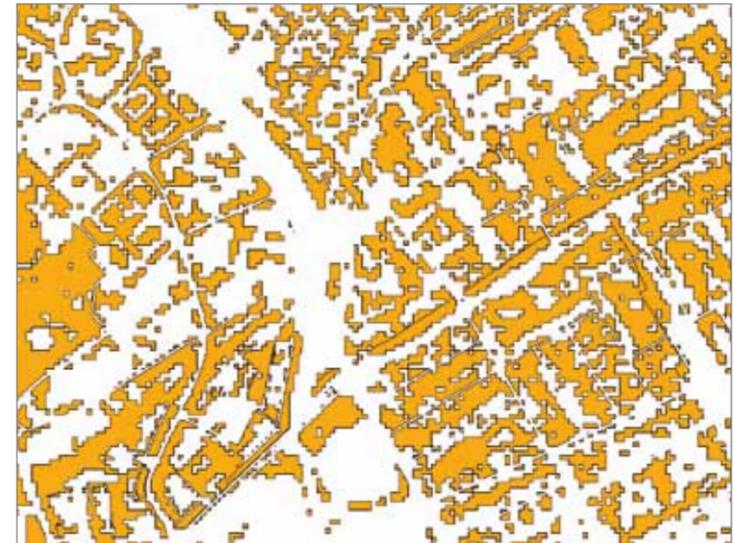


Figura 39. Superposición de coberturas



El resultado de la superposición puede apreciarse, con mayor detalle, en la figura 40.

Figura 40. Superposición de coberturas (ampliación)



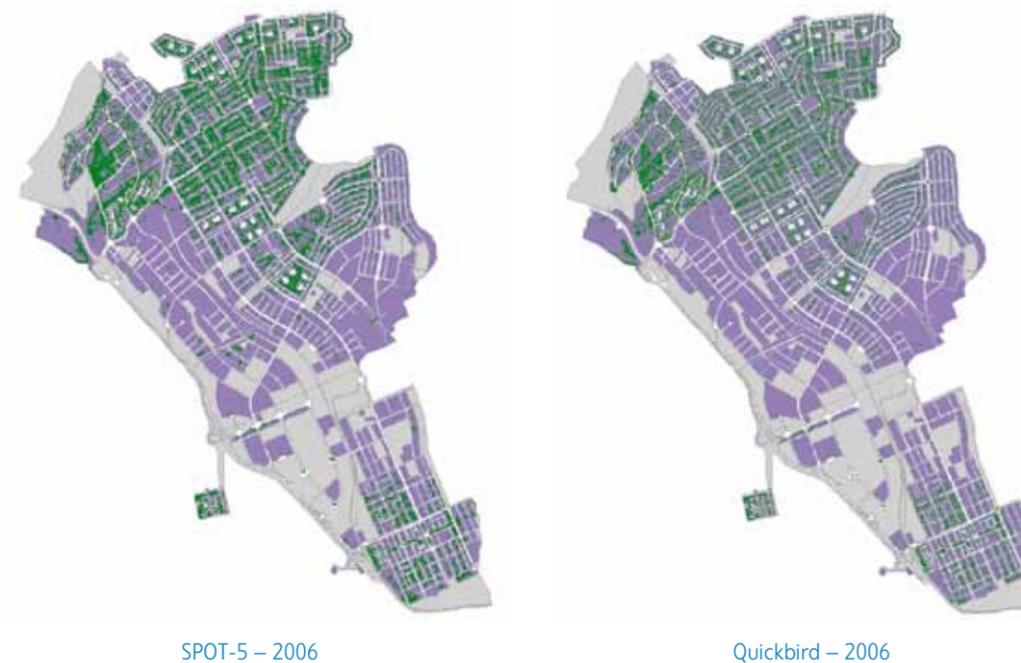
La cobertura de vegetación obtenida con SPOT-5 ha sido filtrada con la máscara de manzanas para el año 2006, obteniéndose los resultados recogidos en la tabla 31.

Tabla 31. Superficie ocupada por vegetación filtrada

Segmentación de imagen satélite en manzanas consolidadas + isletas de viario	
Sensor	Superficie (ha)
QUICKBIRD	188,60
SPOT-5	234,29

En la figura 41 se puede apreciar que la distribución de la vegetación detectada por ambos sensores es la misma, aunque la superficie obtenida con SPOT-5 difiera en 45 hectáreas. Si tomamos la superficie obtenida por fotointerpretación para el año 2006 como la real "verdad terreno", la resolución del sensor para SPOT-5 en el caso de Rivas Vaciamadrid ha sobreestimado la superficie de vegetación en un 23 por ciento.

Figura 41. Distribución de la vegetación



9

Conclusiones

## 9.1. Ciclo interanual de cálculo de la demanda

A continuación se detallan los principales fundamentos deducidos de los proyectos ejecutados, que se pueden extrapolar, para el establecimiento de una metodología estable.

### 9.1.1. Fundamentos deducidos

En resumen, podemos concluir que la metodología de teledetección aplicada y explicada en este documento es una alternativa válida para el estudio de usos de agua en exterior, si bien es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La fecha de adquisición de imágenes más apropiada, tanto para el estudio de zonas verdes, como para las láminas de agua, sería mediados o final del verano (julio - agosto) para obtener resultados comparables con los obtenidos por fotointerpretación
- Los resultados brutos obtenidos por teledetección deben pasar por un proceso de depuración o filtrado porque el satélite no discrimina la vegetación espontánea, que crece en solares desnudos o donde no existen construcciones consolidadas; esta circunstancia es más frecuente en época de primavera, lo que reafirma la época de verano como la más apropiada para la toma de imágenes, según se ha explicado en el punto anterior. Además, en esta época se reducirá el error de omisión de láminas de agua, provocado en mayor parte, por piscinas vacías, cubiertas por lonas o sin tratamiento de mantenimiento
- En este documento se propone, como ejemplo, una máscara constituida por la clasificación de manzanas urbanas realizada por un operador, si bien puede utilizarse cualquier otra que se considere y que facilite dicha clasificación
- Las ventajas de la utilización del sensor SPOT-5 frente al sensor Quickbird es el coste económico de las imágenes; si bien, no hay que olvidar que los resultados se sobreestiman debido a la resolución propia del este sensor

### 9.1.2. Mantenimiento periódico de la base de datos de zonas de usos de agua en exterior

Se mantendrán y actualizarán tanto las fuentes de datos, utilizadas para el cálculo de la demanda de agua para uso exterior, como los datos y estimaciones de demanda resultantes de las actualizaciones anteriores al objeto de disponer de registros históricos que permitan observar tendencias y pautas de crecimiento. El proceso de actualización se ejecutará periódicamente, incluso será posible realizarlo varias veces al año, si se dispone de datos cartográficos o de satélite actualizados. En concreto, esto puede ocurrir para las imágenes de satélite de baja o media resolución (píxel mayor de un metro cuadrado de territorio) y menos habitualmente, con las de alta resolución (un píxel menor de un metro cuadrado de territorio).

#### Evaluación de alternativas en función de la disponibilidad de datos

Teniendo en cuenta que el método más preciso para calcular las demandas de agua mediante sensores aerotransportados y satelitales es el que utiliza ortoimágenes de sensores aerotransportados y cuya información se obtiene por fotointerpretación, podemos concluir que el resto de métodos serán de menor precisión y que se elegirán por criterios de disponibilidad de la información, error estimado y coste aproximado del cálculo. Por ello, en cualquier situación, será necesario realizar un estudio previo de disponibilidad de fuentes de información. Este estudio incluirá la comprobación de la disponibilidad de datos para fotointerpretación:

- a) Cartografía actualizada. Conociendo las características de los vuelos usados para su restitución y en concreto, la fecha de captura de dichos vuelos
- b) Ortofotografías actualizadas. Conociendo las características de los vuelos usados para su creación y en concreto, la fecha de captura de dichos vuelos

En el caso de analizar la disponibilidad de imágenes de satélite, siempre habrá que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Catálogo de imágenes de satélite

Las imágenes de satélite se pueden obtener de un catálogo de imágenes tomadas (por otros clientes) o programarse para ser tomadas en un rango de fechas concreto. Esta última opción es algo más cara, pero asegura que se obtendrán las imágenes en el rango de fechas definido. Para algunos estudios no es necesario que las imágenes de satélite se tomen en fechas concretas, sobretodo en zonas donde las condiciones climáticas son parecidas todo el año. En el caso del cálculo de la demanda de agua en la Comunidad de Madrid es especialmente importante que las imágenes se tomen en la época del año cuando el césped es regado y las piscinas están en funcionamiento (no tapadas con una lona, por ejemplo). Así, la fecha más adecuada, según el historial de precipitaciones en la región, es el mes de agosto.

- b) Factibilidad de la programación de imágenes

Teóricamente, cualquier satélite puede obtener en cualquier fecha del año las imágenes necesarias para cubrir la Comunidad de Madrid y, en concreto, las áreas urbanas consolidadas y en consolidación. Sin embargo, será necesario solicitar un estudio de factibilidad al proveedor de imágenes, pues este mercado funciona según la oferta y la demanda, siendo modificado el ángulo de las tomas en cada órbita para cubrir los pedidos realizados por los clientes. Así pues y dado que no existe coste asociado a este estudio de factibilidad, se deberán solicitar al menos un estudio de factibilidad para un satélite de alta precisión y otro de baja precisión. En la actualidad no es posible programar la cobertura de la Comunidad de Madrid en el mes de agosto para los satélites de alta precisión IKONOS y Quickbird. Sin embargo, es posible obtenerlas de los satélites de media resolución FORMOSAT y SPOT-5.

- c) Evaluación de la calidad de la estimación de demanda de agua para uso de exterior, según la imagen de satélite utilizada

En este proyecto se ha determinado experimentalmente la relación que existe entre la precisión del satélite utilizado y el error cometido en el cálculo de la demanda en las mejores condiciones posibles.

Existe una tercera alternativa en cuanto a imágenes de satélite de alta precisión aunque evidentemente, lo más conveniente sería realizar este tipo de estudios con una cobertura completa del satélite de alta precisión (por ejemplo Quickbird, cuya resolución en el sensor multiespectral es de 2,4 metros), siendo necesario efectuar una programación del satélite para asegurarnos una cobertura total. El coste de una cobertura completa supera, hoy por hoy, el de un vuelo fotogramétrico a escala 1:30000. Este vuelo permite obtener ortofotografías con una resolución de 0,50 metros por píxel, a partir de las que se fotointerpreta, con unos resultados sumamente precisos, aunque con un coste elevado, por el tiempo necesario para la detección de las parcelas objeto de riego. También es posible la realización de un vuelo con cámara apta para la recogida de datos infrarrojos y con ellos y con los del rojo elaborar los índices de vegetación de modo automático, con un coste bastante más moderado.

## 9.2. Estudio coste/calidad de la prognosis

La tabla 32 resume los resultados empíricos de los proyectos de cálculo de demanda de agua para uso exterior. En dicha tabla se estiman los costes medios de mercado, tanto para la adquisición de las fuentes, como para su tratamiento.

Por último, se ofrece una media del error asociado a cada uno de los métodos y fuentes de información.

Tabla 32. Relación entre la precisión de cada satélite con el error cometido en el cálculo de la demanda

Fuente de información	Precisión en multispectral m <sup>2</sup> /píxel	Coste medio del dato por km <sup>2</sup>	Coste medio del proceso por km <sup>2</sup>	Error medio en la superficie de recintos
Ortofotografía 1:2.000	0,20 x 0,20	700,00 €	100,00 €	0,00% <sup>[1]</sup>
Ortofotografía 1:5.000	1,00 x 1,00	100,00 €	100,00 €	
Teledetección satélite QUICKBIRD	2,40 x 2,40	22,25 €	77,50 €	± 1,95% <sup>[2]</sup>
Teledetección satélite IKONOS	4,00 x 4,00	20,50 €	44,75 €	± 12,75% <sup>[3]</sup>
Teledetección satélite SPOT-5	10,00 x 10,00	1,12 €	1,50 €	± 26,18% <sup>[4]</sup>

[1] Aunque puede tener cierto error, pero se toma como la referencia más precisa

[2] Estimado según valores experimentales

[3] Estimado por interpolación lineal

[4] Estimado según valores experimentales

## 9.3. Líneas de investigación abiertas

A partir de los resultados obtenidos se han podido establecer dos líneas adicionales de investigación, a saber:

### Técnicas de teledetección para la determinación de áreas urbanas consolidadas y en crecimiento

Las técnicas de clasificación, supervisada por firma espectral, utilizadas en este trabajo para la identificación de láminas de agua, podrían ser aplicadas en el seguimiento de la consolidación de zonas urbanas en desarrollo.

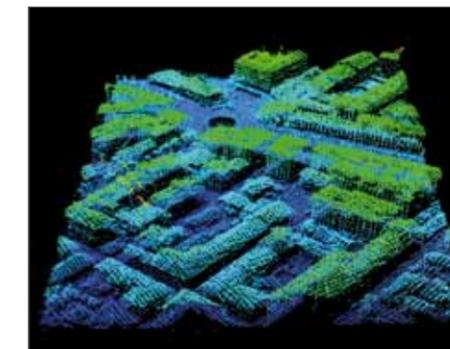
La identificación por estos procedimientos, de recintos con construcciones consolidadas (tejados, azoteas, zonas ajardinadas) o en distinto grado de consolidación (movimientos de tierras, obras de urbanización, obras de construcción), puede resultar de gran utilidad para realizar un seguimiento, prácticamente en tiempo real, de la evolución del uso del territorio y el contraste con las previsiones de desarrollo contenidas en los planes urbanísticos municipales.

Figura 42. Ortofotografía de zona urbana



Utilización de sensores hiperespectrales y láser: la aparición en el mercado de nuevos tipos de sensores con mayores y más potentes capacidades, abre nuevas perspectivas para la modelización detallada del uso del territorio en zonas urbanas y en desarrollo.

Figura 43. Imágenes obtenidas mediante nuevas técnicas basadas en la utilización de sensores hiperespectrales y láser



# 10

Anexos

## ANEXO 1. Resultados de fotointerpretación agregados por municipio

Tabla A. Datos año 2005. Resumen por municipios

Municipio	Césped	Forestal	Isletas	Piscinas	Estanques	Fuentes	Demanda total
Año 2005	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(hm³)
Acebeda (La)	0,6955	0,7587	0,0071	0,0081	0,0000	0,0000	0,006385
Ajalvir	7,5945	6,1399	0,1845	0,2415	0,0975	0,0013	0,075606
Alameda del Valle	4,5577	6,7099	0,0012	0,0661	0,0038	0,0000	0,042963
Álamo (El)	20,6595	15,0601	0,3421	4,9515	0,0165	0,0044	0,366133
Alcalá de Henares	133,6922	197,8748	11,5783	4,5842	0,6294	0,0716	1,390220
Alcobendas	428,0678	274,2782	0,1428	11,1625	3,1313	0,1305	4,101817
Alcorcón	136,4956	69,8886	4,6904	3,5823	1,1001	0,1270	1,313275
Aldea del Fresno	19,4443	33,3924	0,0062	2,8740	1,7969	0,0000	0,296159
Algete	107,3373	68,0657	0,8377	5,0862	0,3220	0,0244	1,113545
Alpedrete	74,1933	73,6347	0,2540	3,6573	0,1465	0,0000	0,784321
Ambite	4,8128	12,9052	0,0000	0,4032	0,0405	0,0000	0,060617
Anchuelo	1,6461	5,6378	0,0000	0,1122	0,0000	0,0000	0,020148
Aranjuez	74,5141	126,6162	1,4930	1,5782	0,5158	0,0000	0,734400
Arganda del Rey	44,1949	100,4655	0,3009	2,5126	0,4104	0,0000	0,505115
Arroyomolinos	20,5705	17,0141	0,2824	2,2778	0,1062	0,0611	0,265645
Atazar (El)	0,0415	0,3488	0,0000	0,0000	0,0017	0,0000	0,000495
Batres	9,9725	42,7839	0,0273	2,1539	0,0253	0,0000	0,181770
Becerril de La Sierra	63,5613	78,9864	0,2791	3,0029	0,0528	0,0000	0,672959
Belmonte de Tajo	0,7778	5,3793	0,0011	0,0993	0,0319	0,0000	0,012591
Berruoco (El)	2,2569	8,2320	0,0086	0,2850	0,0070	0,0000	0,032877
Berzosa del Lozoya	0,9777	1,8511	0,0000	0,0114	0,0045	0,0000	0,009300
Boadilla del Monte	389,0674	175,5082	9,6809	15,4527	0,4279	0,0042	3,902638
Brajos	1,7360	1,2568	0,0000	0,0213	0,0000	0,0000	0,015686
Brea de Tajo	0,8910	14,3711	0,0025	0,1693	0,0712	0,0000	0,020063
Brunete	20,5523	27,9806	0,1662	2,0038	0,1677	0,0000	0,259039
Buitrago del Lozoya	10,5375	13,7224	0,0449	0,1002	0,5116	0,0000	0,100224
Bustarviejo	13,0900	20,6052	0,0100	0,4181	0,0210	0,0000	0,132683
Cabanillas de la Sierra	5,3882	19,0525	0,0083	0,6526	0,0119	0,0000	0,077135
Cabrera (La)	25,5181	27,6008	0,0348	0,9945	0,0054	0,0000	0,260233
Cadalso de los Vidrios	9,6145	53,8740	0,0017	0,9668	0,0374	0,0000	0,138161
Camarma de Esteruelas	9,8291	19,8753	0,2269	1,4629	0,1163	0,0000	0,146225
Campo Real	6,5030	12,6527	0,2585	0,4934	0,0377	0,0205	0,078677

Continúa en la página siguiente

Municipio	Césped	Forestal	Isletas	Piscinas	Estanques	Fuentes	Demanda total
Año 2005	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(hm³)
Canencia	1,5564	3,4637	0,0273	0,0909	0,0110	0,0000	0,017862
Carabaña	6,2662	19,4696	0,0000	0,6346	0,0484	0,0000	0,084126
Casarrubuelos	1,9170	0,5291	0,2117	0,2119	0,0074	0,0000	0,024641
Cenicientos	1,3857	5,4841	0,0698	0,1896	0,0017	0,0000	0,021033
Cercedilla	46,3945	124,3206	0,0782	2,3056	0,0470	0,0000	0,521984
Cervera de Buitrago	0,2121	1,1059	0,0000	0,0242	0,0028	0,0000	0,003138
Chapinería	4,1708	12,8417	0,0000	0,8015	0,0193	0,0000	0,070263
Chinchón	8,2310	23,1234	0,0201	1,3097	0,0987	0,0000	0,127905
Ciempozuelos	12,9816	19,0698	0,3678	0,8985	0,1683	0,0000	0,151224
Cobeña	8,3382	8,4986	0,0061	0,6446	0,0059	0,0000	0,096989
Collado Mediano	52,0668	37,2643	0,0845	2,0030	0,0779	0,0000	0,522859
Collado Villalba	108,9439	103,8841	0,9662	4,4039	1,7657	0,0000	1,125385
Colmenar de Oreja	28,5251	27,0902	0,1308	3,4030	0,0992	0,0000	0,377312
Colmenar del Arroyo	8,8739	22,4862	0,0354	0,9919	0,0163	0,0000	0,120352
Colmenar Viejo	102,2937	38,6240	0,4030	3,4334	0,1204	0,0052	0,994668
Colmenarejo	17,0771	33,8446	0,1591	1,9984	0,0232	0,0000	0,231378
Corpa	0,4230	2,4618	0,0000	0,0220	0,0012	0,0000	0,005332
Coslada	65,9072	83,7974	4,0266	2,9475	0,9289	0,0000	0,706355
Cubas de la Sagra	15,7366	22,6372	0,0333	1,1184	0,0077	0,0000	0,181978
Daganzo de Arriba	8,4283	11,2933	0,1115	0,4692	0,0508	0,0000	0,092727
Escorial (El)	166,0816	170,0250	0,4672	5,7317	0,2986	0,0422	1,664482
Estremera	8,1493	9,9601	0,0064	0,6541	0,1112	0,0000	0,097108
Fresnedillas de la Oliva	2,2912	17,5947	0,0089	0,3474	0,0087	0,0000	0,039290
Fresno de Torote	6,7295	20,7128	0,0862	1,3678	0,0565	0,0000	0,116562
Fuenlabrada	102,6424	96,5820	2,3352	2,4561	1,1486	0,0597	0,995478
Fuente El Saz de Jarama	20,3520	17,2600	0,1632	1,3821	0,0812	0,0000	0,228856
Fuentidueña de Tajo	1,1864	21,4673	0,0055	0,6982	0,0846	0,0000	0,045546
Galapagar	97,1219	223,6632	0,5013	8,6042	0,3044	0,0000	1,223798
Garganta de los Montes	1,4789	5,3280	0,0080	0,1472	0,0050	0,0000	0,020022
Gargantilla del Lozoya y Pinilla de Buitrago	3,7488	10,9009	0,0000	0,1977	0,0295	0,0000	0,043120
Gascones	1,3167	2,2486	0,0034	0,0181	0,0158	0,0000	0,012607
Getafe	118,8731	175,9809	6,5579	2,6080	2,5843	0,1870	1,187760
Griñón	35,4784	25,7978	0,0041	3,5389	0,0631	0,0000	0,439009
Guadalix de la Sierra	19,6790	11,8954	0,1250	0,9592	0,0104	0,0000	0,204490

Continúa en la página siguiente

Municipio	Césped	Forestal	Isletas	Piscinas	Estanques	Fuentes	Demanda total
Año 2005	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(hm³)
Guadarrama	130,2266	89,4311	0,8604	4,0608	0,1545	0,0000	1,271282
Hiruela (La)	0,1032	0,2315	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000947
Horcajo de la Sierra	0,9940	1,6099	0,0000	0,0113	0,0077	0,0000	0,009358
Horcajuelo de la Sierra	0,7315	0,8063	0,0000	0,0126	0,0000	0,0000	0,006858
Hoyo de Manzanares	30,1102	87,6507	0,1940	3,0336	0,2142	0,0000	0,401564
Humanes de Madrid	11,1127	7,2751	0,1090	0,7902	0,1369	0,0000	0,126142
Leganés	158,2972	105,7099	2,4565	1,7868	7,9116	0,0000	1,481521
Loeches	5,8422	9,8429	0,0560	0,4249	0,0769	0,0000	0,069115
Lozoya	5,4343	11,2121	0,0006	0,2808	0,0222	0,0000	0,060308
Lozoyuela-Navas-Sieteiglesias	15,0433	22,3413	0,0654	0,5417	0,0325	0,0000	0,154447
Madarcos	0,2550	0,1897	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,002187
Madrid (Arganzuela)	70,7763	48,5694	0,0000	1,2926	2,8325	0,4504	0,678906
Madrid (Barajas)	134,9655	185,7145	0,0000	2,9492	15,6657	0,1208	1,414738
Madrid (Carabanchel)	149,6882	81,4269	0,0000	1,6205	0,7891	0,0925	1,340017
Madrid (Centro)	43,0478	37,0965	1,6454	0,1067	0,5496	0,1868	0,384565
Madrid (Chamartín)	109,6929	91,2930	1,8334	3,0478	0,3232	0,1259	1,068036
Madrid (Chamberí)	42,1306	43,8976	1,0747	0,6964	0,0698	0,0219	0,395871
Madrid (Ciudad Lineal)	161,7982	151,0877	6,7260	4,6666	0,2954	0,1416	1,595332
Madrid (Fuencarral-El Pardo)	390,4193	627,7384	7,4419	10,1402	3,3918	0,0089	3,908852
Madrid (Hortaleza)	227,8153	140,9639	0,0167	8,3908	1,8357	0,1305	2,275737
Madrid (Latina)	293,1729	231,2264	4,3161	2,3608	1,4177	0,0137	2,628970
Madrid (Moncloa-Aravaca)	634,6679	1327,9800	7,2329	13,3325	5,5260	0,0237	6,347274
Madrid (Moratalaz)	75,3492	57,2491	0,0000	1,4520	0,2424	0,0075	0,703739
Madrid (Puente Vallecas)	104,4574	140,1819	0,0000	0,5518	0,8459	0,0846	0,948716
Madrid (Retiro)	93,2694	93,4304	0,0099	0,8054	4,7497	0,0128	0,873645
Madrid (Salamanca)	26,2121	39,6376	1,5156	0,6493	0,0234	0,0441	0,261413
Madrid (San Blas)	79,0897	113,9852	1,6360	3,4148	0,3821	0,0031	0,836426
Madrid (Tetuan)	28,4765	38,9621	2,7798	0,3667	0,0916	0,2084	0,273979
Madrid (Usera)	68,4971	49,4519	0,0000	0,7702	3,0851	0,0000	0,637800
Madrid (Vicálvaro)	28,6995	23,4920	0,3623	1,1256	0,8922	0,0396	0,297218
Madrid (Villa de Vallecas)	38,6357	44,0749	2,3758	0,4130	0,5337	0,0150	0,362198
Madrid (Villaverde)	72,2788	46,7316	0,0000	0,9828	1,0021	0,0661	0,662183
Majadahonda	182,5745	52,1424	4,4637	7,2173	0,0413	0,0000	1,816673

Continúa en la página siguiente

Municipio	Césped	Forestal	Isletas	Piscinas	Estanques	Fuentes	Demanda total
Año 2005	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(hm³)
Manzanares El Real	52,2563	39,7862	0,0146	3,7549	0,0576	0,0000	0,591717
Meco	11,2068	6,5938	0,1246	1,3092	0,0010	0,0000	0,145453
Mejorada del Campo	14,6013	24,5325	0,3257	1,2656	0,0737	0,0000	0,180017
Miraflores de la Sierra	26,1536	80,8713	0,0077	2,2436	0,0812	0,0000	0,334742
Molar (El)	14,9590	5,5953	0,0025	0,7849	0,0095	0,0000	0,155997
Molinos (Los)	46,8646	63,4090	0,0566	2,3494	0,0741	0,0000	0,503320
Montejo de la Sierra	0,6512	2,2062	0,0000	0,0483	0,0029	0,0000	0,008130
Moraleja de Enmedio	10,8343	10,6589	0,0723	1,2986	0,0232	0,0026	0,143661
Moralzarzal	61,1086	32,2609	0,3781	2,9664	0,0443	0,0000	0,632726
Morata de Tajuña	5,7961	12,0397	0,0721	0,6106	0,0336	0,0021	0,076421
Móstoles	143,5673	116,8772	2,1813	4,7695	1,0714	0,0460	1,429357
Navacerrada	101,2010	90,0162	0,2109	4,6920	0,4810	0,0000	1,056065
Navalafuente	10,2755	30,4771	0,0266	0,9614	0,0166	0,0000	0,133978
Navalagamella	7,1142	15,9694	0,0382	0,5912	0,0642	0,0000	0,088290
Navalcarnero	12,4873	27,0474	0,6103	1,1783	0,1404	0,0027	0,161305
Navarredonda y San Mamés	1,2057	4,5815	0,0000	0,0459	0,0093	0,0000	0,013625
Navas del Rey	11,4991	27,6029	0,0866	0,7215	0,0191	0,0042	0,134032
Nuevo Baztán	67,0056	65,6208	0,2590	4,8979	0,0517	0,0000	0,768091
Olmeda de las Fuentes	0,4663	5,7907	0,0000	0,0641	0,0084	0,0000	0,008672
Orusco de Tajuña	4,5192	10,6205	0,0000	0,4098	0,0713	0,0000	0,057739
Paracuellos de Jarama	41,6959	36,4871	1,0609	2,3404	0,1353	0,0000	0,451990
Parla	29,7867	25,9609	1,0616	1,8565	1,6599	0,0083	0,341539
Patones	0,5438	2,2470	0,0000	0,1311	0,0098	0,0000	0,010452
Pedrezuela	31,9537	7,1399	0,2455	0,8568	0,0281	0,0000	0,300713
Pelayos de la Presa	35,5007	53,3451	0,2457	2,8522	0,0817	0,0079	0,424844
Perales de Tajuña	4,3928	11,1719	0,0017	0,3958	0,0179	0,0000	0,056010
Pezuela de las Torres	2,8959	8,2532	0,0000	0,4836	0,0179	0,0000	0,045781
Pinilla del Valle	1,0726	2,6178	0,0000	0,0141	0,0027	0,0000	0,010483
Pinto	32,9539	24,3243	1,0366	0,7870	1,7767	0,2581	0,329730
Piñuécar-Gandullas	0,6640	2,7015	0,0008	0,0182	0,0110	0,0000	0,007349
Pozuelo de Alarcón	499,6209	305,2689	15,9144	21,5309	4,8856	0,0000	5,145399
Pozuelo del Rey	0,2582	2,9169	0,0439	0,0432	0,0039	0,0000	0,005068
Prádena del Rincón	2,0524	1,7089	0,0000	0,0110	0,0009	0,0000	0,018102

Continúa en la página siguiente

Municipio	Césped	Forestal	Isletas	Piscinas	Estanques	Fuentes	Demanda total
Año 2005	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(hm <sup>3</sup> )
Puebla de la Sierra	0,0496	1,1069	0,0039	0,0000	0,0000	0,0000	0,000862
Puentes Viejas	4,8476	6,5125	0,0000	0,1346	0,1130	0,0000	0,048649
Quijorna	5,7102	13,8247	0,0000	0,8487	0,0025	0,0000	0,085078
Rascafría	23,2062	25,8348	0,1683	0,3292	0,3539	0,0000	0,217828
Redueña	1,0162	1,1027	0,0000	0,0804	0,0006	0,0000	0,011915
Ribatejada	6,1040	12,7280	0,0000	0,9018	0,0435	0,0000	0,090205
Rivas-Vaciamadrid	148,4134	35,7322	2,3488	10,2555	0,8278	0,1985	1,645671
Robledillo de la Jara	0,6418	0,7615	0,0000	0,0213	0,0072	0,0000	0,006479
Robledo de Chavela	36,6320	98,8776	0,0038	2,1265	0,0474	0,0000	0,424011
Robregordo	1,8261	2,0510	0,0000	0,0068	0,0000	0,0000	0,016199
Rozas de Madrid (Las)	408,5332	295,8358	6,3921	16,8229	1,2730	0,0000	4,162850
Rozas de Puerto Real	1,5233	16,4345	0,0000	0,2328	0,0161	0,0000	0,028146
San Agustín de Guadalix	51,6509	22,2241	0,1603	1,7760	0,0665	0,0000	0,504856
San Fernando de Henares	20,0046	38,4501	2,4913	0,7025	0,0596	0,0089	0,213551
San Lorenzo de El Escorial	46,9515	114,1159	0,2284	2,6252	0,5705	0,0377	0,539022
San Martín de la Vega	21,5063	37,8661	0,4874	1,4856	0,3351	0,0000	0,253060
San Martín de Valdeiglesias	43,6409	192,0021	0,2408	1,7482	0,0805	0,0000	0,505658
San Sebastian de los Reyes	216,0835	200,3970	0,6211	7,3325	0,3119	0,0655	2,152133
Santa María de la Alameda	34,1587	24,9956	0,0108	0,5959	0,0495	0,0000	0,315846
Santorcaz	1,4791	10,5400	0,0092	0,4204	0,0078	0,0000	0,032512
Santos de la Humosa (Los)	1,4700	8,5583	0,0000	0,2254	0,0093	0,0000	0,024225
Serna del Monte (La)	0,5031	0,5845	0,0000	0,0042	0,0006	0,0000	0,004563
Serranillos del Valle	11,8775	7,7899	0,0030	1,6006	0,0133	0,0000	0,162384
Sevilla la Nueva	18,0791	33,4265	0,1126	2,2153	0,1314	0,0000	0,248408
Somosierra	0,5083	0,6066	0,0000	0,0016	0,0000	0,0000	0,004512
Soto del Real	81,5606	26,3956	0,2629	3,8177	0,1923	0,0000	0,832861
Talamanca de Jarama	9,5364	13,2842	0,0021	0,6825	0,0039	0,0000	0,110242
Tielmes	1,4093	5,2192	0,0139	0,2661	0,0333	0,0000	0,024131
Titulcia	0,6093	3,0612	0,0000	0,1085	0,0039	0,0000	0,010420
Torrejón de Ardoz	50,6161	67,6967	2,0257	1,8510	1,1231	0,1180	0,529895
Torrejón de la Calzada	7,2716	7,3633	0,3445	0,6017	0,0053	0,0056	0,086849
Torrejón de Velasco	3,1036	3,3597	0,0000	0,2762	0,0053	0,0000	0,037574
Torrelaguna	4,5845	5,3672	0,0000	0,3684	2,0425	0,0000	0,068403

Continúa en la página siguiente

Municipio	Césped	Forestal	Isletas	Piscinas	Estanques	Fuentes	Demanda total
Año 2005	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(ha)	(hm <sup>3</sup> )
Torrelodones	70,0362	189,3065	0,4501	7,8286	0,1079	0,0092	0,954920
Torremocha de Jarama	1,7677	4,9022	0,024	0,2585	0,0192	0,0000	0,026606
Torres de la Alameda	7,2440	12,8512	0,5951	0,4561	0,0223	0,0000	0,083882
Tres Cantos	107,1672	53,3212	15,4788	2,5333	0,2547	0,0638	1,040484
Valdaracete	0,2337	3,1598	0,0000	0,0336	0,0164	0,0000	0,004591
Valdeavero	4,6883	29,2146	0,0998	0,7818	0,0418	0,0000	0,080720
Valdelaguna	2,3277	2,5388	0,0000	0,3289	0,0271	0,0000	0,032977
Valdemanco	6,9077	12,4512	0,0000	0,3559	0,0172	0,0000	0,075821
Valdemaqueda	3,9522	22,7209	0,0000	0,6110	0,0107	0,0000	0,065105
Valdemorillo	43,5493	168,5876	0,2233	7,9968	0,1496	0,0000	0,733427
Valdemoro	31,0305	38,6758	0,8171	1,4279	0,5418	0,0519	0,332723
Valdeolmos-Alalpardo	15,3695	10,1054	0,0814	0,9581	0,0169	0,0000	0,168002
Valdepiélagos	0,5160	3,8182	0,0000	0,0858	0,0054	0,0000	0,009098
Valdetorres de Jarama	16,6105	14,7059	0,1803	1,5673	0,3106	0,0000	0,205535
Valdilecha	1,1788	9,0304	0,0000	0,2514	0,0735	0,0000	0,023440
Valverde de Alcalá	0,5646	5,1319	0,0026	0,1483	0,0037	0,0000	0,012395
Velilla de San Antonio	15,7884	10,4691	0,3868	0,5849	0,0000	0,0116	0,158086
Vellón (El)	1,6686	5,0255	0,0068	0,1673	0,0191	0,0000	0,022332
Venturada	36,9799	44,3342	0,4098	1,0683	0,0472	0,0000	0,365730
Villa del Prado	48,1307	49,6769	0,1227	2,8107	0,1907	0,0000	0,526797
Villaconejos	1,8527	2,6688	0,0012	0,0922	0,0221	0,0000	0,020069
Villalbilla	40,8745	82,0403	0,9636	3,6493	0,0958	0,0025	0,512688
Villamanrique de Tajo	0,9346	5,4846	0,0000	0,3784	0,0204	0,0000	0,024454
Villamanta	5,3825	12,3243	0,0502	1,2308	0,0328	0,0000	0,096604
Villamantilla	0,5815	1,6861	0,0581	0,2723	0,0000	0,0000	0,015961
Villanueva de la Cañada	185,1994	112,8905	1,5651	7,0769	1,9940	0,0000	1,864837
Villanueva de Perales	1,2226	0,8649	0,0137	0,5044	0,0008	0,0000	0,029671
Villanueva del Pardillo	23,6138	21,6802	1,1469	1,5746	0,1453	0,0174	0,267675
Villar del Olmo	9,8961	7,9385	0,0000	1,0880	0,0116	0,0000	0,126540
Villarejo de Salvanes	6,2544	8,5516	0,0197	0,5511	0,1499	0,0000	0,077240
Villaviciosa de Odón	292,2922	91,3968	2,1172	12,6406	1,6544	0,0000	2,953193
Villavieja del Lozoya	2,8448	4,1432	0,0000	0,1292	0,0006	0,0000	0,030126
Zarzalejo	3,3455	16,4500	0,0018	0,4323	0,0281	0,0000	0,050909

## ANEXO 2. Cálculo de las necesidades hídricas de las zonas verdes

### Balance hídrico

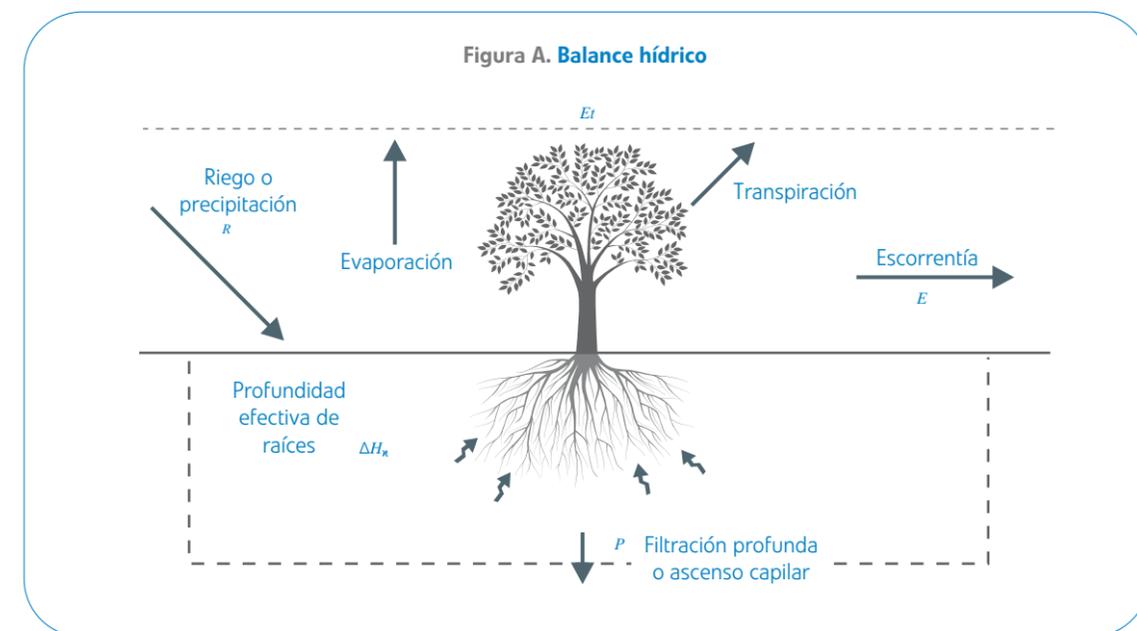
Las necesidades hídricas de las zonas verdes se estiman mediante el estudio del balance hídrico anual en los distintos tipos de cultivo.

El balance hídrico consiste en la aplicación del principio de conservación de la materia de agua en una zona concreta y en un período de tiempo determinado. Su planteamiento se basa en expresar el equilibrio entre los procesos del ciclo del riego, que son: la precipitación o riego, la evapotranspiración de cultivo, la filtración profunda o ascenso capilar, y la reserva de agua almacenada en el suelo.

En el presente estudio, debido a la incertidumbre en su determinación y sus magnitudes relativamente pequeñas, se considera despreciable el valor de la filtración profunda y de la reserva de agua en el suelo. Por lo que las necesidades netas de riego (Nn) se deducen a partir de la diferencia entre la evapotranspiración de cultivo (ETc) y la precipitación efectiva (Pe), lo que matemáticamente se expresa de la forma siguiente:

$$Nn = ETc - Pe$$

El esquema representado en la figura A describe el balance hídrico.



Fuente: A. Losada Villasante. El riego II. Fundamentos de su hidrología y de su práctica. Ed. Mundiprensa. Madrid. 2005

A continuación se describe el proceso de obtención de las variables que intervienen en la determinación de las demandas de riego. Comenzando por las variables meteorológicas y climáticas para, seguidamente, estimar la evapotranspiración propia de los tipos de zonas verdes consideradas.

### Meteorología y climatología

La situación geográfica de la Comunidad de Madrid en el centro peninsular y su variedad de territorios tan diferentes como las elevaciones del Sistema Central, la depresión del Tajo y la zona de transición entre ambas condiciona y da lugar a una gran variedad climática.

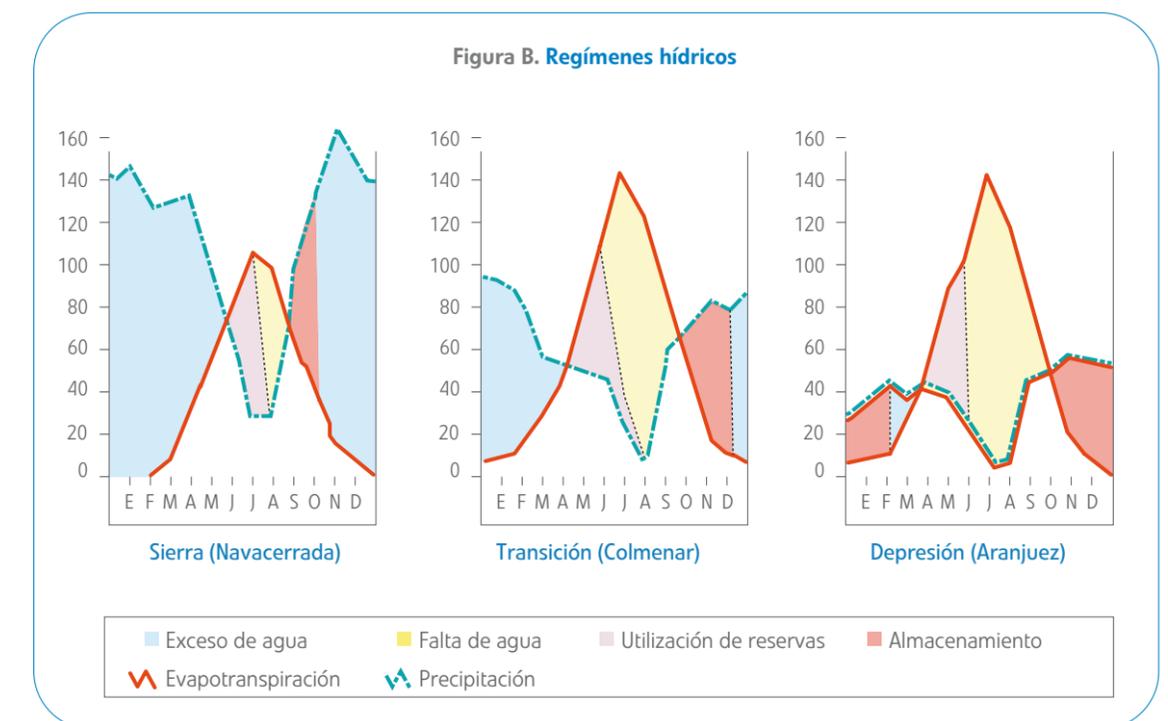
A grandes rasgos, el clima de la Comunidad de Madrid depende de la latitud geográfica en la que se encuentra (entre los 40° y 41° de latitud Norte) y de su posición central, a mitad de camino entre el océano Atlántico y el mar Mediterráneo.

La Comunidad de Madrid, como la mayoría de la Península, pertenece al dominio de los climas mediterráneos, cuyos rasgos más destacados son la estacionalidad de las temperaturas, la sequía estival y la irregularidad de las precipitaciones. A nivel local, los parámetros climáticos tienen grandes contrastes: precipitación anual media entre 400 y casi 2.000 milímetros; temperaturas medias entre 7° y 15° C y absolutas entre -8° y 44° C.

### Pluviometría

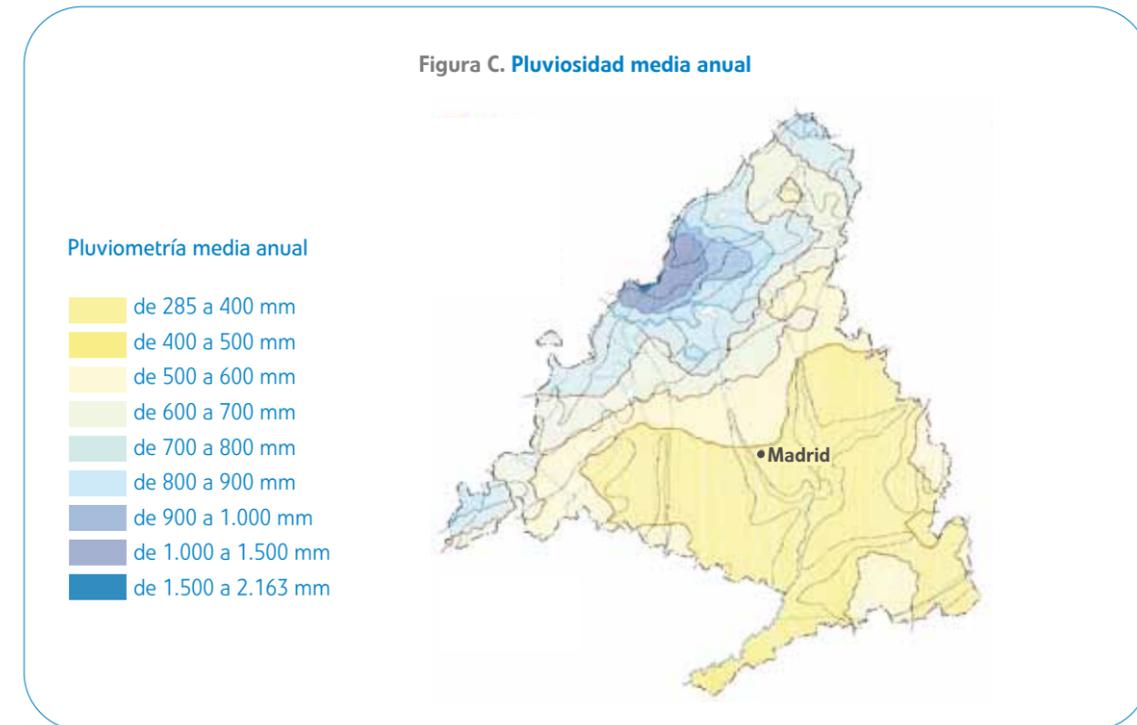
Las zonas de sierra presentan excedentes de agua durante casi todo el año, mientras que la zona de transición acusa fuertes necesidades de agua en verano, aunque durante cinco meses tiene excedentes de agua. Por último, la zona de depresión muestra una marcada carencia de agua a lo largo del año, muy acusada en verano y con suficiente agua en un período de sólo tres meses.

Estos regímenes hídricos característicos de las zonas de sierra, de transición y de depresión se exponen en los distintos gráficos de la figura B.



Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1985)

La pluviosidad media anual presenta fuertes variaciones de unas zonas de la Comunidad de Madrid respecto a otras, tal y como se aprecia en la figura C.

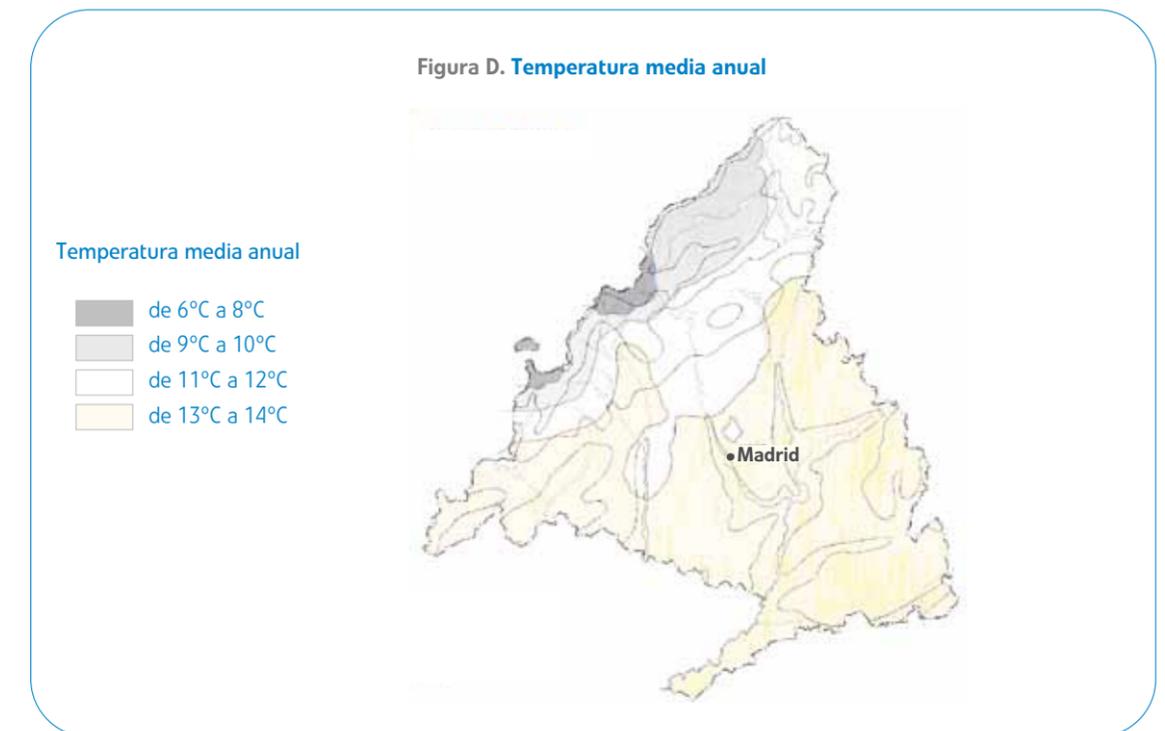


## Temperatura

La elevada altitud media de la Comunidad de Madrid y su carácter continental dan lugar a una fuerte oscilación térmica y a rápidos calentamientos y enfriamientos del suelo, según la insolación recibida.

La altitud topográfica tiene una estrecha relación con las condiciones térmicas de las distintas zonas de la Comunidad de Madrid. Así, en las zonas de montaña se dan temperaturas medias anuales de 6° a 8°C, con período libre de heladas de dos a cuatro meses. En la zona de transición, las medias anuales oscilan entre los 11° y 13°C, presentando períodos libres de heladas de cuatro a seis meses. Por último, en la zona de depresión, las temperaturas medias anuales llegan a los 15° a 18°C, con períodos libres de heladas superiores a los seis meses.

Las distintas zonas, según su temperatura media anual se presentan en la figura D.



## Datos climáticos utilizados: Estaciones meteorológicas

Los datos climáticos utilizados en el presente trabajo se corresponden con los recogidos en seis estaciones meteorológicas de la Comunidad de Madrid. Cinco de estas estaciones presentan una serie de datos correspondientes al período comprendido entre 1971-2000, y la estación de Madrid (El Retiro) presenta una serie de datos del período 1901-2007.

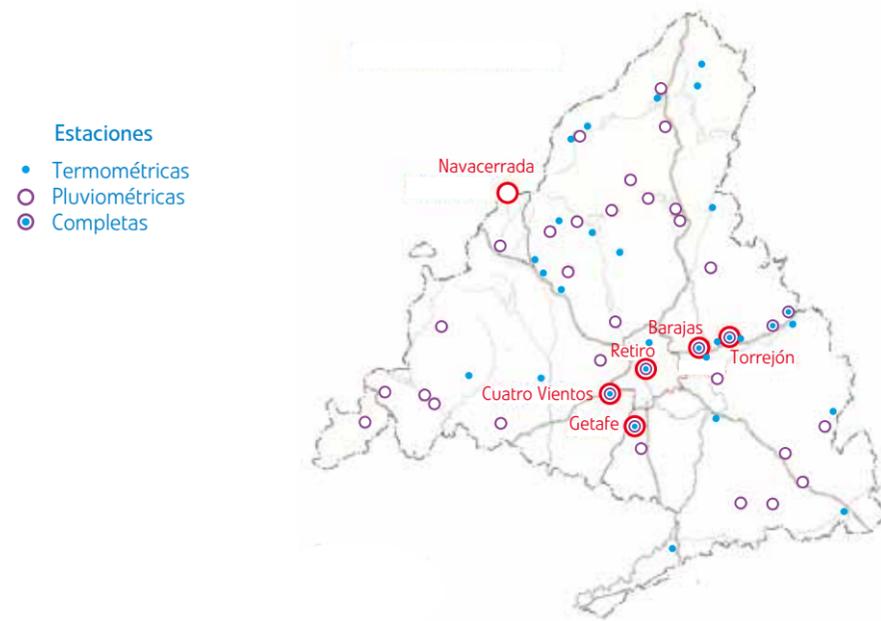
Las estaciones escogidas se exponen en la tabla B y sus ubicaciones geográficas se muestran en la figura E.

**Tabla B. Estaciones meteorológicas**

Estación	Período	Altitud (m)	Latitud	Longitud
Madrid (Aeródromo de Cuatro Vientos)	1971-2000	687	40 22 40	3 47 21
Madrid (Barajas)	1971-2000	582	40 27 15	3 32 39
Madrid (Base aérea de Getafe)	1971-2000	617	40 18 00	3 43 21
Madrid (Base aérea de Torrejón de Ardoz)	1971-2000	611	40 29 00	3 27 01
Madrid (Puerto de Navacerrada)	1971-2000	1.890	40 46 50	4 00 37
Madrid (El Retiro)	1971-2007	667	40 24 40	3 40 41

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología

Figura E. Observatorios meteorológicos



Fuente: Instituto Nacional de Meteorología

## Evapotranspiración

Se denomina evapotranspiración a la evaporación en superficies cubiertas de vegetales unida a la transpiración de estos vegetales. La transpiración o evaporación del agua por las plantas se debe a la necesidad de agua que tienen las plantas para incorporarla a su estructura celular. Además, la utilizan como elemento de transporte de alimentos y de eliminación de residuos. La circulación del agua en las plantas no es un circuito cerrado, sino por el contrario es una circulación abierta: el agua penetra por la raíz, circula por la planta y gran parte de ella se evapora por las hojas.

La evapotranspiración depende de los siguientes factores:

- Tipo de planta y ciclo de crecimiento de la planta
- Tipo de suelo y humedad del suelo
- Factores climatológicos: insolación, temperatura, humedad atmosférica, etc.

Para el cálculo de la evapotranspiración específica de cada tipo de vegetal (evapotranspiración del cultivo) se emplea la siguiente expresión:

$$ET_c = ET_o \times K_c$$

Siendo:

ET<sub>c</sub>: Evapotranspiración del cultivo (milímetros): cantidad de agua que un cultivo puede evaporar cuando se encuentra en buenas condiciones de alimentación hídrica y con el suelo próximo a su capacidad de campo.

ET<sub>o</sub>: Evapotranspiración de referencia (milímetros): puede ser calculada por distintos métodos directos o indirectos. Se define como la tasa de evapotranspiración para un cultivo hipotético con altura de 12 centímetros, resistencia superficial de 70 siemens por metro y un albedo<sup>5</sup> del 23 por ciento, en una superficie extensa de hierba verde con una altura uniforme, activo crecimiento y con condiciones óptimas de humedad del suelo (Comisión Internacional de Riego y Drenaje, mayo 1990).

K<sub>c</sub>: Coeficiente de cultivo: coeficiente que depende del cultivo para la estimación de sus necesidades máximas. Se determina experimentalmente, mediante mediciones con lisímetros, según el balance hídrico o por métodos micrometeorológicos.

La estimación de la evapotranspiración de referencia, se puede realizar por diversos métodos en función de los fundamentos físicos o matemáticos de los procedimientos empleados para su determinación. A continuación se exponen diversos métodos para la determinación de la ET<sub>o</sub>:

- Métodos hidrológicos: Se basan en el balance hídrico y exigen el uso de estaciones lisimétricas. Una estación lisimétrica es una zona de terreno natural, de superficie del orden de cuatro metros cuadrados, en la que se realiza un cultivo en condiciones reales, pero con dispositivos de medida del agua suministrada, percolada y sobrante. Por diferencia de estas medidas, se obtiene el agua evapotranspirada
- Métodos micrometeorológicos: Se basan bien en el transporte aerodinámico del vapor de agua, bien en el balance de energía o en una combinación de los dos
- Método de la sonda de neutrones: Se basa en la absorción de neutrones por el agua, lo que permite evaluar el contenido de humedad del suelo objeto de estudio
- Métodos empíricos: Se basan en expresiones que estiman la ET<sub>o</sub> sobre la base de correlaciones estadísticas, con datos meteorológicos normalmente disponibles. Los métodos empíricos requieren, en general, datos de localización (altitud y latitud), temperatura, humedad, radiación y velocidad del viento. Los métodos empíricos más comunes para la estimación de la ET<sub>o</sub> son:

- Blaney-Criddle modificado por FAO
- Thornthwaite
- Hargreaves
- Penman-FAO
- Penman-Monteith

Debe destacarse que ninguno de los métodos, tanto empíricos como directos, goza de preferencia absoluta. Su empleo depende de la precisión requerida y del coste de utilización.

Para el año 2005 se realizó por el método de FAO-Hargreaves; se incluye el cálculo por el método de Thornthwaite para comparar resultados.

<sup>5</sup> El albedo es la relación, expresada en porcentaje, de la radiación que cualquier superficie refleja sobre la radiación que incide sobre la misma. Las superficies claras tienen valores de albedo superior a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo medio de La Tierra es del 30-32 por ciento de la radiación que proviene del Sol.

### Cálculo de la evapotranspiración de referencia ETo y de necesidades hídricas de zonas verdes

El cálculo de la evapotranspiración de referencia ETo se realiza mediante dos métodos empíricos con objeto de poder establecer una comparación entre los resultados finales obtenidos, acotando así los valores de las necesidades reales de riego en las zonas verdes objeto de estudio.

Los métodos empíricos empleados son:

- Fao-Hargreaves (Allen et al. 1998)
- Thornthwaite (1948)

Debe destacarse, que el método de FAO-Hargreaves sobrestima ligeramente la evapotranspiración de referencia, por lo que la evapotranspiración calculada por este método, se ajustará multiplicándola por el coeficiente 0,8. Por el contrario, el método de Thornthwaite subestima la evapotranspiración de referencia durante los meses de verano, cuando se da la radiación máxima del año.

Los datos necesarios para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y posteriormente para el cálculo de las necesidades hídricas, son los correspondientes a las 6 estaciones meteorológicas objeto de estudio.

Se presentan en las tablas C, D, E, F, G y H los resultados, por ambos métodos y la media aritmética. Puesto que los resultados son similares y considerando que para el año 2005 se utilizó el método de Fao-Hargreaves para el cálculo de las necesidades hídricas y de la demanda de usos de agua en exterior, la base de datos de actualización contemplará también los resultados por este método.

#### Clima medio

Tabla C. Resumen de necesidades hídricas para el clima medio

Tipo de recinto	Necesidades brutas (m <sup>3</sup> /ha año)
Zonas verdes tipo césped-Hargreaves	8.280
Zonas verdes tipo isleta- Hargreaves	2.140
Zonas verdes tipo césped-Thornthwaite	7.170
Zonas verdes tipo isleta- Thornthwaite	1.930
Zonas verdes tipo forestal	400

#### Valor medio

Tabla D. Valores medios de necesidades hídricas para el clima medio

Tipo de recinto	Necesidades brutas (m <sup>3</sup> /ha año)
Zonas verdes tipo césped	7.725
Zonas verdes tipo isleta	2.035
Zonas verdes tipo forestal	400

#### Año seco

Tabla E. Resumen de necesidades hídricas para el clima extremo seco

Tipo de recinto	Necesidades brutas (m <sup>3</sup> /ha año)
Zonas verdes tipo césped-Hargreaves	10.500
Zonas verdes tipo isleta- Hargreaves	3.170
Zonas verdes tipo césped-Thornthwaite	8.530
Zonas verdes tipo isleta- Thornthwaite	2.550
Zonas verdes tipo forestal	400

#### Valor medio

Tabla F. Valores medios de necesidades hídricas para el clima extremo seco

Tipo de recinto	Necesidades brutas (m <sup>3</sup> /ha año)
Zonas verdes tipo césped	9.515
Zonas verdes tipo isleta	2.860
Zonas verdes tipo forestal	400

#### Año húmedo

Tabla G. Resumen de necesidades hídricas para el clima extremo húmedo

Tipo de recinto	Necesidades brutas (m <sup>3</sup> /ha año)
Zonas verdes tipo césped-Hargreaves	3.320
Zonas verdes tipo isleta- Hargreaves	740
Zonas verdes tipo césped-Thornthwaite	3.590
Zonas verdes tipo isleta- Thornthwaite	780
Zonas verdes tipo forestal	400

#### Valor medio

Tabla H. Valores medios de necesidades hídricas para el clima extremo húmedo

Tipo de recinto	Necesidades brutas (m <sup>3</sup> /ha año)
Zonas verdes tipo césped	3.455
Zonas verdes tipo isleta	760
Zonas verdes tipo forestal	400

### ANEXO 3. Índice de figuras

- Figura a. Técnicas de fotointerpretación y de análisis de imágenes de vuelos fotogramétricos - pág. 11
- Figura b. Imagen obtenida por satélites de observación de la Tierra - pág. 12
- Figura c. Procedimiento general de cálculo de la demanda de agua para uso exterior - pág. 13
- Figura d. Elemento de cartografía digital procesada e incorporada a SIG de Canal de Isabel II GAUDY - pág. 16
- Figura e. Técnicas de observación y modelización detallada, basadas en la utilización de sensores hiperespectrales y láser - pág. 19
- Figura 1. Ortofotografía digital correspondiente a un vuelo fotogramétrico en la Comunidad de Madrid en el año 1999 - pág. 25
- Figura 2. Procedimiento general del cálculo de la demanda de agua para uso exterior - pág. 34
- Figura 3. Zonas con ortofotografías disponibles (malla o vuelo). Malla E 1: 2.000, años 2003 y 2006 - pág. 39
- Figura 4. Ortofotografías digitales a escala 1:2000 de los años 2003 y 2006 - pág. 40
- Figura 5. SPOT-5; Cobertura de la Comunidad de Madrid - pág. 42
- Figura 6. Quickbird; Cobertura del municipio de Rivas-Vaciamadrid - pág. 42
- Figura 7. Procesos empleados para el cálculo de la demanda de usos de agua en exterior, mediante técnicas de fotointerpretación - pág. 46
- Figura 8. Cobertura de imágenes SPOT-5, 2005 y 2006 - pág. 47
- Figura 9. Distribución de imágenes a comparar en el estudio y mes de adquisición. Imagen mes 2005 – Imagen mes 2006 - pág. 48
- Figura 10. Cobertura del municipio de Rivas-Vaciamadrid - pág. 49
- Figura 11. Imagen multiespectral 19 abril 2002, combinación RGB, ajuste 8 bits - pág. 51
- Figura 12. Imagen pancromática 19 abril 2002, ajuste 8 bits - pág. 51
- Figura 13. Imagen fusión 19 abril 2002, combinación RGB, ajuste 8 bits - pág. 51
- Figura 14. Valores de reflectividad de la vegetación en el espectro electromagnético - pág. 52
- Figura 15. Mapas de cobertura de vegetación para los años de estudio 2005 y 2006 - pág. 55
- Figura 16. Manzanas cartográficas - pág. 57
- Figura 17. Clasificación año 2002 - pág. 57
- Figura 18. Clasificación año 2004 - pág. 57
- Figura 19. Clasificación año 2006 - pág. 57
- Figura 20. Manzanario de Rivas –Vaciamadrid y filtrado con manzanas consolidadas - pág. 58
- Figura 21. Firmas espectrales de diferentes cultivos - pág. 61
- Figura 22. Firmas espectrales del mismo cultivo para diferentes años - pág. 61
- Figura 23. Procesos empleados para el cálculo de la demanda de usos de agua en exterior mediante técnicas de fotointerpretación - pág. 64
- Figura 24. Base de datos de usos de agua en exterior - pág. 65
- Figura 25. Ajuste geométrico de acometidas - pág. 67
- Figura 26. Ajuste alfanumérico de acometidas - pág. 67
- Figura 27. Ajuste geométrico con catastro - pág. 68
- Figura 28. Observatorios meteorológicos - pág. 73
- Figura 29. Variación del NDVI en la vegetación - pág. 81
- Figura 30. Delimitación de zonas urbanas en la Comunidad de Madrid - pág. 82
- Figura 31. Aumento de la superficie de vegetación sobre la máscara de núcleos urbanos - pág. 83
- Figura 32. Descenso de la superficie de vegetación sobre la máscara de núcleos urbanos - pág. 84
- Figura 33. Mapa de variación de NVDI de núcleos urbanos - pág. 84
- Figura 34. Imagen de satélite de 14 de mayo de 2004. El color rojo indica la presencia de vegetación - pág. 87
- Figura 35. Imagen de satélite de 14 de mayo de 2004. Categorización del NDVI (tonalidades verdes) - pág. 88
- Figura 36. Respuesta del NDVI (imagen derecha) en manzanas no consolidadas (ortofoto izquierda) - pág. 88
- Figura 37. Quickbird, Mapa de cobertura NDVI - Rivas Vaciamadrid - pág. 95
- Figura 38. SPOT-5, Mapa de cobertura NDVI - Rivas Vaciamadrid - pág. 95
- Figura 39. Superposición de coberturas - pág. 96
- Figura 40. Superposición de coberturas (Ampliación) - pág. 96
- Figura 41. Distribución de la vegetación - pág. 97
- Figura 42. Ortofotografía de zona urbana - pág. 103
- Figura 43. Imágenes obtenidas mediante nuevas técnicas basadas en la utilización de sensores hiper-espectrales y láser - pág. 103
- Figura A. Balance hídrico - pág. 112
- Figura B. Regímenes hídricos - pág. 113
- Figura C. Pluviosidad media anual - pág. 114
- Figura D. Temperatura media anual - pág. 115
- Figura E. Observatorios meteorológicos - pág. 116

## ANEXO 4. Índice de tablas

- Tabla a.** Necesidades hídricas para un año de climatología seca, media y húmeda - pág. 17
- Tabla b.** Evaluación de la demanda de agua en usos de exterior, estimada a partir de fotointerpretación de ortofotos de vuelos fotogramétricos - pág. 18
- Tabla 1.** Análisis de disponibilidad de adecuación de la imagería de satélite que se puede adquirir en el mercado - pág. 41
- Tabla 2.** Resumen del estudio/coste para la adquisición de fuentes de información y su posterior tratamiento - pág. 43
- Tabla 3.** Parejas de escenas a comparar. Identificadores de fechas y escenas - pág. 48
- Tabla 4.** Características imágenes Quickbird - pág. 49
- Tabla 5.** Valores umbrales de NDVI para discriminar vegetación, frente a no vegetación - pág. 54
- Tabla 6.** Valores del Índice de vegetación - pág. 55
- Tabla 7.** Valores de la leyenda que se obtienen por el cruce entre las parejas de años consideradas - pág. 56
- Tabla 8.** Tabla de resumen de superficies obtenidas para los distintos años - pág. 58
- Tabla 9.** Ajuste de acometidas al parcelario catastra - pág. 69
- Tabla 10.** Estaciones meteorológicas - pág. 73
- Tabla 11.** Valores medios de necesidades hídricas para el clima extremo húmedo - pág. 75
- Tabla 12.** Necesidades hídricas para piscinas, estanques y fuentes - pág. 75
- Tabla 13.** Tabla de resumen de resultados - pág. 78
- Tabla 14.** Clasificación de resultados - pág. 79
- Tabla 15.** Resultados piscinas - pág. 79
- Tabla 16.** Desagregación de resultados 2005 y 2007 por tipo y titularidad del recinto - pág. 80
- Tabla 17.** Superficies de vegetación para los dos años de estudio - pág. 83
- Tabla 18.** Superficies de cambio entre el 29 de abril de 2002 y el 14 de mayo de 2004 - pág. 85
- Tabla 19.** Superficies de cambio entre el 14 de mayo de 2004 y el 5 de agosto de 2006 - pág. 86
- Tabla 20.** Valores de superficie de vegetación para las tres fechas de estudio por segmentación sobre imagen de satélite y digitalización sobre fotografía aérea - pág. 86
- Tabla 21.** Tabla resumen de superficies obtenidas para los distintos años - pág. 89
- Tabla 22.** Evaluación de resultados en imagen de satélite agosto 2006 - pág. 90
- Tabla 23.** Resumen de errores (omisión/comisión) de fotointerpretación sobre imagen de satélite fusionada, frente a fotointerpretación sobre ortofoto y clasificación de la imagen - pág. 90
- Tabla 24.** Evaluación de resultados en imagen de satélite mayo 2004 - pág. 91
- Tabla 25.** Resumen de errores (omisión/comisión) de fotointerpretación sobre imagen de satélite fusionada, frente a clasificación de la imagen - pág. 92
- Tabla 26.** Evaluación de resultados en imagen de satélite abril 2002 - pág. 93
- Tabla 27.** Resumen de errores (omisión/comisión) de fotointerpretación sobre imagen de satélite fusionada, frente a clasificación de la imagen - pág. 93
- Tabla 28.** Piscinas no detectadas en función de su tamaño - pág. 94
- Tabla 29.** Tipos de sensores utilizados y fechas de adquisición de imágenes - pág. 94
- Tabla 30.** Tamaño de píxel de las imágenes de cada satélite - pág. 94
- Tabla 31.** Superficie ocupada por vegetación filtrada - pág. 97
- Tabla 32.** Relación entre la precisión de cada satélite con el error cometido en el cálculo de la demanda - pág. 102
- Tabla A.** Datos año 2005. Resumen por municipios - pág. 106
- Tabla B.** Estaciones meteorológicas - pág. 115
- Tabla C.** Resumen de necesidades hídricas para el clima medio - pág. 118
- Tabla D.** Valores medios de necesidades hídricas para el clima medio - pág. 118
- Tabla E.** Resumen de necesidades hídricas para el clima extremo seco - pág. 119
- Tabla F.** Valores medios de necesidades hídricas para el clima extremo seco - pág. 119
- Tabla G.** Resumen de necesidades hídricas para el clima extremo húmedo - pág. 119
- Tabla H.** Valores medios de necesidades hídricas para el clima extremo húmedo - pág. 119

## ANEXO 5. Bibliografía

- Allen, R. G.; L.S. Pereira; D. Raes y Smith, M. 1998.  
"Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements". FAO Irrigation and drainage paper 56.
- Ayuntamiento de Madrid.  
Sistema de información del Ayuntamiento de Madrid ([www.munimadrid.es](http://www.munimadrid.es)).
- Cachorro, V. E., Durán, P., Vergaz, R., y de Frutos, A.M. 2000.  
"Estudio de la influencia de los aerosoles sobre la reflectancia de los canales 1 y 2 del sensor aVHRR NOAA y el NDVI". Revista de Teledetección.
- Campbell, J. B. 1996.  
"Introduction to Remote Sensing". Segunda edición. The Guilford Press. New York.
- Canadian Aeronautics and Space Institute (CASI), Ontario, Canada.  
Canadian Journal of Remote Sensing.
- Casanova Roque, José Luís y Sanz Justo, Julia.  
"Teledetección: usos y aplicaciones". Universidad de Valladolid.
- Castro Ríos, Roberto y Castillo, Enrique, 2004.  
"TeleSAT, Aplicaciones para la enseñanza de los cambios y análisis de los recursos naturales". 4ª Jornada de Educación en Sensoramiento Remoto en el ámbito de Mercosur. Brasil.
- Chuvieco, E. 1998.  
El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. Nº 10 diciembre. Revista de Teledetección.
- Chuvieco, E. 1994.  
Fundamentos de la Teledetección Espacial. Ed. Rialp S.A. Madrid-España.
- Chuvieco, E. 1997.  
Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Ed. Ariel S.A.
- Comunidad de Madrid.  
Sistema de Información de la Comunidad de Madrid ([www.madrid.org](http://www.madrid.org)).
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2006.  
Atlas: El Medio Ambiente en la Comunidad de Madrid.
- Conway, E. 1997.  
"An introduction to satellite image interpretation". Maryland, Johns Hopkins Univ Pr.
- Cristóbal Rossell, J. y Ninyerola Casals, M.  
"Determinación de la evapotranspiración en Cataluña mediante el uso de la teledetección y los sistemas de información geográfica". Universidad Autónoma de Barcelona.
- Curran, P. J. 1985.  
"Principles of Remote Sensing". Ed. Longman.
- Eduardo Martínez Marín, 2005.  
Hidrología práctica. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Elódio S. et al., 2005.  
"Aportación del NDVI y los sistemas expertos en la mejora de la clasificación temática de imágenes multispectrales". XII Simposio Brasileiro de sensoriamento remoto, INPE, p. 2763-2771. Brasil.
- Elsevier Science Publishing Company Inc.  
Remote Sensing of Environment, 52, New York.
- ERDAS, 1995.  
ERDAS field guide. 3rd Edition, Inc. Atlanta, Georgia. 627 p.
- FAO, 1987.  
La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO. Riego y Drenaje 29 Rev. 1. Roma.
- Gandía, Soledad y Meliá Joaquín.  
"La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Climatología y desertificación". Universidad de Valencia.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J. y García-Haro, J. 1997.  
"Acerca de los Índices de Vegetación". Revista de Teledetección. España.
- Girard, M.C. y Girard, C.M., 1989.  
"Télé-détection Appliquée. Zones tempérées et intertropicales". Ed. Masson. Paris.
- Gonzalo-Martín C., Lillo-Saavedra M. Marzo 2007.  
Fusión de imágenes Quickbird mediante una representación conjunta multirresolución-multidireccional. IEEE Latin America Transactions, Vol 5, Nº 1.
- Harris, R. 1987.  
"Satellite Remote Sensing. An Introduction". Ed. Routledge and Kegan Paul. London.
- Harwood Academic Publishers.  
Remote Sensing Reviews, New York.
- Hoobs, R.J. y Mooney, H.A., 1990.  
"Remote Sensing of Biosphere Functioning". Ed. Springer Verlag. New York.
- IGME. 1988.  
Atlas Geocientífico del Medio Natural de la Comunidad de Madrid.
- International Journal of Geographical Information Science, Taylor and Francis Ltd., Hampshire, Reino Unido.
- Institute of The University of North Carolina.  
Water Resources Research.

- Instituto Nacional de Meteorología.  
Datos Meteorológicos y Climáticos.
- Jensen, J.R., 1996.  
"Introductory Digital Image Processing. A remote Sensing Perspective". Segunda edición. Ed. Prentice Hall.
- Lillesand, T.M. y Kiefer, R.W., 1994.  
"Remote Sensing and Image Interpretation". Tercera edición. Ed., John Wiley and Sons. New York.
- Lo, C.P., 1986.  
"Applied Remote Sensing". Ed. Longman. New York.
- Losada Villasante, 2005.  
El riego II. Fundamentos de su hidrología y de su práctica. Mundiprensa. Madrid.
- Mather. P., 1999.  
"Computer Processing of Remotely Sensed Data". Segunda edición. Ed. John Wiley and Sons. London.
- Ormeño Villajos S., septiembre 2004.  
Apuntes Teledetección Fundamental. Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid.
- Otero Pastor, Isabel., 1999.  
"Paisaje, Teledetección y SIG.". Fundación Conde del Valle de Salazar.
- Pinilla, C., 1995.  
"Elementos de teledetección". RAMA, Madrid.
- Richards, J.A., 1993.  
"Remote Sensing Digital Image Analysis. An introduction". Segunda edición. Ed., Springer-Verlag.
- Romero, J.M., Albizua, L., Zalba, M.  
"La teledetección aplicada a la gestión urbanística del Ayuntamiento de Madrid". Área de Gobierno de Urbanismo, Vivienda e Infraestructuras del Ayuntamiento de Madrid.
- Sabins, F.F., 1996.  
"Remote sensing: Principles and interpretation". Tercera edición. Ed., Freeman. San Francisco.
- Sánchez Martín Nilda., 2003.  
"Panorama actual de las técnicas mixtas de clasificación de imágenes mediante segmentación espectral y por texturas. Aplicación a las imágenes de alta resolución espacial". Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno. Universidad de Salamanca.
- Schowengerdt, R.A., 1997.  
"Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing". Segunda edición. Ed., Academic Press. New York.
- Shuttleworth, W.J., 1992.  
"Evapotranspiration". Handbook of Hidrology, (Maidment, D.R., editor). McGraw-Hill: 4.1-4.53.0

- Smith Randall., 2001.  
"Introducción a la percepción remota del ambiente".
- Smith W. Estephen, 1997.  
Landscape Irrigation. Design and management. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Sobrino, J.A et al., 1998.  
"Aplicación de la técnica de composición del Máximo NDVI al seguimiento de la cobertura terrestre en la Península Ibérica". Revista de Teledetección.
- Soria Ruíz, J., Granados Ramírez R., 2005.  
"Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat". Ciencia Ergo Sum, julio-octubre, año/vol. 12, número 002. México.
- Speranza F.C et al.  
Speranza F.C. y Zerda, H.R. "Potencialidad de los Índices de vegetación para la discriminación de coberturas vegetales". Proyecto Picto 12931, INTA.
- Szekiolda, K.H., 1988.  
"Satellite monitoring of the Earth". Ed. John Wiley and Sons. New York.
- Théau, J., 2006.  
Detection of changes using remote sensing: an overview of principles and applications. Geo-Spatial and range sciences conference. August 2-3. 2006.
- University of Nebraska at Omaha  
Remote sensing quarterly, Nebraska.
- Uriel Pérez, G., 2005.  
"La percepción remota". Facultad de Ingeniería Forestal. Departamento de Ingeniería. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica LabSIG. Universidad de Tolima.
- Vicente Serrano, Sergio, 2004.  
"Evaluación de las consecuencias ambientales de las sequías en el sector central del valle del Ebro mediante imágenes de satélite: posibles estrategias de mitigación". Consejo Económico y Social de Aragón.
- [www.caece.edu.ar/tea](http://www.caece.edu.ar/tea).  
Cálculo de NDVI con multiespec.
- [www.vtt.fi/aut/rs/virtual](http://www.vtt.fi/aut/rs/virtual).  
Links a fuentes de datos satelitales, journals y publicaciones online, sociedades y compañías y otras organizaciones relacionadas con percepción remota.
- Goddard Space Flight Center.  
[www.rst.gsfc.nasa.gov](http://www.rst.gsfc.nasa.gov). Manual de percepción remota. Tutorial on-line orientado a aplicaciones que cubren todos los aspectos de la percepción remota, incluyendo imágenes termales y de radar, con muchas imágenes de muestra.
- Canada Centre for Remote.  
Sensing [www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/educate.html](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/educate.html). Tutoriales de remote sensing. Tutoriales on-line con los fundamentos de la percepción remota, radar y estereoscopia, y análisis digitales de imágenes.

Canal de  Isabel II

Canal de  Isabel II

[www.cyii.es](http://www.cyii.es)

Canal de Isabel II  
Santa Engracia, 125. 28003 Madrid