

Albizua, L., Barinagarrementeria, I. y Ibáñez, J.C. (2010): Seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid mediante técnicas de teledetección. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 625-639. ISBN: 978-84-472-1294-1

SEGUIMIENTO DE LA CONSOLIDACIÓN DEL DESARROLLO URBANO EN LA COMUNIDAD DE MADRID MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

Albizua, L.¹, Barinagarrementeria, I.² e Ibáñez, J.C.³

(1) Lourdes Albizua. TRACASA , 31621 Sarriguren (Navarra) labizua@tracasa.es

(2) Idurre Barinagarrementeria TRACASA , 31621 Sarriguren (Navarra) ibarinaga@tracasa.es

(3) Juan Carlos Ibañez CYII 28003 MADRID jci@cyii.es

RESUMEN

El proyecto “Seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid mediante técnicas de Teledetección” se enmarca dentro de las actuales líneas de investigación sobre Aseguramiento del equilibrio disponibilidades/demandas de agua del Plan I+D+i del Canal Isabel II, empresa pública responsable de la gestión del ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid.

El trabajo ha consistido en la puesta a punto de una metodología operativa para la definición y elaboración de una base de datos cartográfica para la Comunidad de Madrid y la realización de actualizaciones periódicas, a partir de imágenes del satélite SPOT5. En esta base de datos queda reflejada la evolución temporal de las zonas urbanizadas como consecuencia de la consolidación de los Planes de Desarrollo Urbano de los municipios, así como el estado y evolución de zonas verdes urbanas.

La información resultante se ha incorporado en el Sistema de Información Geográfica de Canal de Isabel II y servirá de base para la elaboración y actualización de los Planes de desarrollo de infraestructuras estratégicas de abastecimiento, que deben dar respuesta anticipada a las futuras demandas de agua ocasionadas por el proceso de expansión urbana en la Comunidad de Madrid.

Palabras clave: Planes urbanísticos, Cambios urbanos, Demanda de agua, Imágenes de satélite, Teledetección.

ABSTRACT

The present project “Monitoring urban development consolidation in the community of Madrid using remote sensing techniques” is within the current research lines for the Assurance of the water balance of availability/demands, in the frame of Canal Isabel II I+D+i Plan. Canal Isabel II is a public sector company responsible for the water management supply in the Community of Madrid.

The aim of this project is to develop an operative methodology, in order to define and develop a cartographic database in the Community of Madrid, which involves periodical updates, based on SPOT5 satellite imagery. This database should reflect the evolution of the urbanized areas as a result of the Urban Development Plannings’ consolidation in all municipalities, as well as the evolution and state of the green urban areas.

Resulting information has been integrated on the Canal de Isabel II's Geographical Information System and is intended to be the basis for the development and updating of the strategical supply infrastructure development plan that should anticipate to future water demands caused by urban expanding in the Community of Madrid.

Key Words: Urban planning, Urban changes, Water supply demands, Satellite images, Remote sensing.

INTRODUCCIÓN

El Canal de Isabel II (CYII) es la empresa responsable del abastecimiento de agua potable a la Comunidad de Madrid, con una población total suministrada de más de seis millones de personas, y ejerciendo su actividad en todas las fases del ciclo integral del agua, desde su captación hasta su devolución al medio natural en condiciones adecuadas de calidad.

El desarrollo y ordenación del territorio en las ciudades tiene como consecuencia un incremento y redistribución geográfica de la demanda de agua. Estos cambios se producen cada vez con mayor dinamismo y el Canal de Isabel II, como entidad responsable del abastecimiento debe programar con antelación suficiente las inversiones necesarias para disponer las infraestructuras que aseguren las condiciones del servicio a todas las propiedades que se incorporen al sistema, sin menoscabo de la garantía y calidad de servicio al conjunto del sistema.

Las predicciones de evolución de las demandas, tanto en su cuantía como en su distribución territorial tienen como principal referente las expectativas de crecimiento vinculadas al desarrollo del planeamiento urbano municipal. La velocidad a la que se produzca la consolidación del suelo urbano es determinante en los plazos requeridos para la construcción y puesta en servicio de las nuevas infraestructuras.

El Canal de Isabel II, en su plan de I+D+i dispone de una línea de investigación sobre Aseguramiento del equilibrio entre disponibilidades y demandas, y en ese marco se han llevado a cabo diversos proyectos de investigación sobre el comportamiento actual de la demanda de agua y previsiones de evolución futura a diversos horizontes. El proyecto que aquí se presenta tiene como objeto acotar la incertidumbre existente en cuanto a los plazos reales de consolidación de las previsiones de expansión urbana contenidas en los planes urbanísticos municipales.

Los satélites de observación de la Tierra y las técnicas más avanzadas de Teledetección se han propuesto como herramienta para el seguimiento periódico de la consolidación urbanística en la Comunidad de Madrid. Estas técnicas también se han mostrado útiles para la detección y cuantificación de las zonas verdes urbanas, que en la actualidad suponen un elemento importante de la demanda de agua potable.

El proyecto se ha concretado en la puesta a punto de una metodología operativa para la definición y elaboración de una base de datos cartográfica del ámbito geográfico de la Comunidad de Madrid y la realización de actualizaciones periódicas, a partir de imágenes de satélite. En esta base de datos queda reflejada la evolución temporal de las zonas urbanizadas de la región, así como el estado y evolución de zonas verdes urbanas públicas o privadas.

La empresa TRACASA, adjudicataria mediante concurso, ha sido la responsable de la ejecución del proyecto.

La información básica del proyecto ha sido las imágenes de satélite de alta resolución (SPOT XS de 10 m y PAN de 2,5 m) en toda la Comunidad de Madrid y de muy alta resolución en una zona piloto de 50 km² (QuickBird de 2,4 m) a las que se les ha realizado un pre-procesamiento básico (ortorrectificación, correcciones atmosféricas, fusión, mosaico) para posteriormente y mediante distintos algoritmos proceder a la detección de cambios entre imágenes de dos fechas distintas. Los dos periodos objeto de estudio han sido verano 2008 para el establecimiento de la metodología de definición de la base de datos cartográfica y de clasificación, y verano 2009 para la definición de la metodología correspondiente a la realización de actualizaciones periódicas.

Los planes urbanísticos, el mapa SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo Español) y el catastro han sido la información auxiliar más relevante utilizada en los procesos de estratificación, segmentación y clasificación de imágenes. Además para la detección y clasificación de los cambios acaecidos en zonas urbanas se han aplicado algoritmos de detección de cambios, entre los que se encuentran, la clasificación de imágenes, diferencia de imágenes, el análisis de componentes principales, transformaciones Tasseled Cap, segmentación, detección de sombras, etc,

La delimitación de las zonas verdes con demanda de agua de tipo urbano o cultivos de regadío se ha realizado mediante la generación de índices de vegetación. Asimismo estos índices han permitido evaluar el estado de la vegetación de superficies cultivadas de secano y las superficies forestales.

La información resultante se ha incorporado en el Sistema de Información Geográfica de Canal de Isabel II y servirá de base para la elaboración y actualización de los Planes de desarrollo de infraestructuras estratégicas de abastecimiento, que deben dar respuesta anticipada a las futuras demandas de agua ocasionadas por el proceso de expansión urbana en la Comunidad de Madrid.

Los resultados del proyecto son satisfactorios, fruto de ello es la continuidad del proyecto en 2010 con la ejecución de nuevas actualizaciones correspondientes a la adquisición de coberturas de imágenes de principio de primavera y final de verano.

La realización de este proyecto es de enorme interés por su temática: cambios urbanos y demanda de agua mediante con técnicas de Teledetección.

AREA DE ESTUDIO

El ámbito territorial de estudio cubre la totalidad de la Comunidad de Madrid, con una superficie de 8.021,80 km².

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar la evolución temporal del desarrollo de las zonas urbanizadas, por lo tanto los núcleos urbanos y sus alrededores requieren una atención especial, por ser zonas sujetas a un gran dinamismo en la evolución de los Planes de Desarrollo Urbanísticos de los municipios de la Comunidad de Madrid.

METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para el presente proyecto, de actualización de la base de datos cartográfica mediante la aplicación de técnicas de Teledetección a coberturas periódicas de imágenes de satélite SPOT5 de la comunidad de Madrid, contempla las siguientes fases:

- FASE 1: Recopilación y análisis de la información disponible
- FASE 2: Programación y Adquisición de las imágenes de satélite
- FASE 3: Diseño de la base de datos cartográfica
- FASE 4: Proceso de imágenes
 - Procesado básico
 - Procesos específicos de seguimiento urbano
 - Procesos específicos de la delimitación de la zona verde
 - Metodología de años posteriores
 - Verificación de metodología con imágenes Quickbird
- FASE 5: Estimación de la demanda de agua

Fase 1: Recopilación y análisis de la información disponible

De la información recibida por el Canal de Isabel II y aportada por TRACASA, la más relevante ha sido:

- Edición digital de la ortofotografía a escala 1:5000 del vuelo 2006 de toda la Comunidad de Madrid.
- Ortoimagen SPOT 2005 de la cobertura de la península del PNT.
- Cartografía digital de catastro urbano actualizada en 2009.
- Base de datos cartográfica de zonas verdes y usos de agua en exterior actualizada con el vuelo fotogramétrico de 2006.

- Planeamiento urbano en vigor 2005, y otra versión más elaborada del Planeamiento urbanístico vigente 2009 y en tramitación en formato digital.
- Modelo Digital del Terreno 25m procedente del IGN
- Mapa SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo Español) de la Comunidad de Madrid año de referencia 2005 a escala 1:25.000

Fase 2: Programación y Adquisición de las imágenes de satélite

Las imágenes utilizadas en el proyecto han sido adquiridas por el satélite SPOT 5, en modo multiespectral 10 m y pancromática 2.5 m, sobre toda la Comunidad de Madrid. Se han utilizado dos series de imágenes correspondientes a verano 2008 y verano 2009.

Las imágenes 2008 se seleccionaron del archivo de imágenes SPOT5 y Quickbird y se han utilizado para el diseño y generación de la base de datos cartográfica.

Las imágenes 2009 se adquirieron mediante programación específica, y se han utilizado para la actualización de la base de datos cartográfica.

También se han adquirido imágenes del satélite Quickbird, en modo multiespectral 2.4 m y pancromática 0.6 m, en una zona piloto de 50 km² en fechas similares a las de SPOT5 (10 de Agosto 2008, 13 de julio 2009). La distribución de imágenes y fechas de adquisición para las coberturas de verano 2008 y 2009 se presenta en la siguiente figura

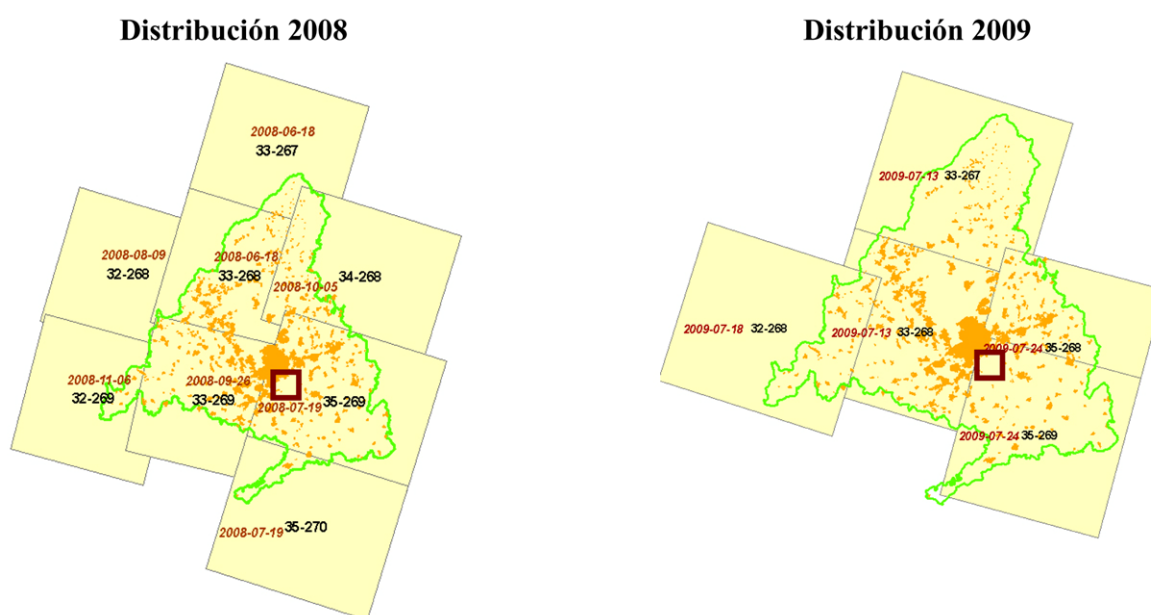


Figura 1. Distribución de imágenes para la cobertura SPOT5 de verano 2008 y verano 2009 (en rojo zona piloto Quickbird)

Fase 3: Diseño de la base de datos cartográfica

La definición y elaboración de una base de datos cartográfica, que integre la evolución temporal de las zonas urbanas en base a la consolidación de los planes urbanísticos, constituye el objetivo principal del presente proyecto. El diseño de la base de datos, definida por la leyenda de monitorización de los cambios, responde a la capacidad de discriminación de las imágenes SPOT5 en las diversas categorías de interés.

La base de datos cartográfica definitiva consta de las siguientes 6 capas:

- Estratos
- Ámbito urbano

- Recinto urbano
- Subestrato (verde)
- Ámbito verde
- Recinto verde

Estratos. Esta capa delimita las zonas con comportamientos homogéneos, dentro del ámbito territorial (ver Figura 2). Se han definido los siguientes 6 estratos:

1. *Suelo consolidado* integra el tejido urbano consolidado. Constituido por las edificaciones estables con cierta antigüedad y zonas donde no hay obras.
2. *Suelo en proceso de consolidación*: zona de obras, suelen ser amplias urbanizaciones bien en los suburbios o en pleno centro urbano.
3. *Agrícola secano*: definido a partir del estrato cultivo del mapa de ocupación SIOSE.
4. *Agrícola regadío*: definido a partir del estrato cultivo del mapa de ocupación SIOSE.
5. *Forestal*: definido a partir del estrato forestal del mapa de ocupación SIOSE.
6. *Otros*: resto de zonas: zonas rocosas, embalses etc..

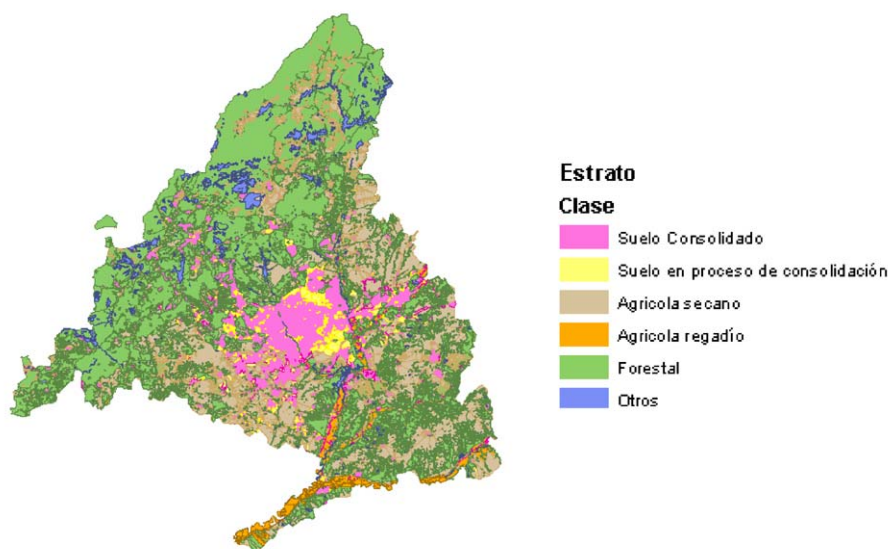


Figura 2. Estratos

Ámbito urbano: zonas con un grado de consolidación homogéneo, dentro del estrato suelo en proceso de consolidación (ver Figura 3). Cada uno de ellos, lleva una información asociada integrada en la base de datos mediante los siguientes atributos.

1. *Urbanización o Trama Urbana existente.*
 - *Urbanización:* Amplias urbanizaciones en construcción, en las que se pueden discriminar objetos (edificios, suelo, viales etc.) y localizadas generalmente en los suburbios.
 - *Trama:* Zonas generalmente de poca superficie donde no se discriminan objetos. Se pueden encontrar dentro o fuera de la masa urbana.
2. *Estado:* hace referencia a los diferentes estados de ejecución de las obras, en que se puede encontrar cada ámbito. Se contemplan las siguientes fases
 - En proceso de urbanización: los viales están sin asfaltar
 - Urbanización finalizada: los viales ya están asfaltados y aún no se ha empezado a edificar

- En proceso de edificación: ya se ha empezado a edificar
- Edificación finalizada: la edificación se encuentra finalizada. Este estado no existe en los datos del año 2008. Podría existir a partir de 2009.



Figura 3. Ámbitos urbanos

Recinto urbano: son los elementos de mayor detalle dentro los ámbitos urbanos y de la base de datos cartográfica (ver Figura 4). Se presentan las siguientes clases:

- Edificio
- Suelo pendiente de ejecución: todo aquello que no es edificio ni vial
- Viales asfaltados
- Viales no asfaltados



Recinto Urbano
Clase Recinto Urbano






	Edificio
	Suelo pendiente de ejecución
	Vial asfaltado
	Vial no asfaltado
	Lámina de agua

Figura 4. Recintos urbanos

Substrato (verde): integra la vegetación que inunda los estratos suelo consolidado y suelo en proceso de consolidación y se calcula a partir de los índices de vegetación.

Ámbito verde: está constituido por dos clases ámbitos: Los campos de golf y los parques y jardines.

Recinto verde: Constituidos por dos clases de recintos verdes: Árbol y césped

Fase 4 Proceso de imágenes

La metodología de trabajo elaborada para el proyecto se estructura en las tres siguientes categorías de procesos. Cada una de ellas integra todos aquellos procesos en cadena que hay que realizar para obtener un objetivo específico

1. Procesado básico
2. Procesos específicos de seguimiento urbano
3. Procesos específicos de delimitación de la zona verde.
4. Metodología de años posteriores
5. Verificación de metodología con imágenes Quickbird

1. Procesado básico: integra los tratamientos previos que hay que realizar sobre las imágenes de satélite para que estén disponibles para su utilización en los procesos de clasificación. Se consideran los siguientes tratamientos previos:

- *Control de calidad numérico y visual* de las imágenes adquiridas.
- *Ortorrectificación* realizado por triangulación en bloque (LPS), que presenta la ventaja de aportar una solución más robusta al modelo matemático permitiendo obtener mayores precisiones que en las realizadas por escena individual.
- *Normalización relativa* incluye correcciones atmosféricas y radiométricas que permitan comparar imágenes de diferentes fechas y trabajar en la generación de índices de vegetación.
- *Fusión*, proceso que combina el carácter espectral con el mayor detalle o resolución espacial de las bandas pancromáticas, obteniendo un producto que integra ambos potenciales. Se ha utilizado el método de fusión SRF acrónimo de Spectral Response Function, diseñado en la Universidad Pública de Navarra, y basado en las curvas de respuesta espectral de los sensores de SPOT5.
- *Mosaico*, realización para cada periodo de estudio de una imagen continua formada por el conjunto de imágenes necesarias para cubrir el ámbito territorial.

2. Procesos específicos de seguimiento urbano orientados a la identificación y clasificación de los recintos urbanos para su posterior integración en la base de datos cartográfica, incluye los siguientes procesos:

- *Estratificación*, delimitación de zonas con un comportamiento urbano y de ocupación del suelo homogéneo, a partir del Mapa SIOSE y de las coberturas de imágenes de satélite 2005 (fecha de referencia del SIOSE) y 2008 (fecha del proyecto). Este proceso ha requerido el desarrollo de herramientas específicas para explotar la compleja información que contiene el SIOSE, estratificar el territorio, y actualizar esta estratificación al año 2008 con técnicas de fointerpretación y de detección de cambios usando la herramienta DELTA CUE.
- *Segmentación de imágenes* que tiene como objetivo identificar los recintos urbanos que constituyen los ámbitos, para clasificarlos en la siguiente fase según su categoría (edificio, suelo pendiente de ejecución, vial asfaltado, vial no asfaltado), para posteriormente integrarlos en la base de datos cartográfica. Se distinguen dos actuaciones diferentes (ver Figura 5):
 - ámbitos a clasificar con catastro adecuado
 - ámbitos en los que no existe catastro adecuado
- *Clasificación orientada a objetos*: técnica de clasificación avanzada que se realiza sobre los objetos y tiene en cuenta la distribución espacial existente en la imagen (forma, textura y propiedades espectrales de los

objetos que la forman). Se ha realizado utilizando la herramienta Feature Analyst de Erdas que parte de diferentes patrones de búsqueda en función del elemento a representar y se basa en técnicas de aprendizaje, utilizando procesos iterativos e interactivos. Los resultados se revisan por fotointerpretación.

- *Detección de cambios* se utiliza para la actualización y delimitación de los estratos a fecha 2008, utilizando la herramienta Delta Cue (ERDAS) (Spot 2005-2008), que permite realizar cálculos comparativos entre imágenes de fechas diferentes con el fin de valorar los cambios acaecidos en el territorio entre ambas fechas. Integra un conjunto de algoritmos basados en la comparación entre las imágenes de trabajo, a partir de combinaciones de sus bandas originales y/o sintéticas.



Figura 5. Ejemplos de Clasificación orientada a objetos con catastro adecuado (imagen superior) y no adecuado (imagen inferior), sobre imagen SPOT5 fusionada 2.5m.

3. *Procesos específicos de la delimitación de la zona verde* engloba las zonas verdes urbanas o jardines, las zonas agrícolas y las zonas naturales. Los procesos para su seguimiento son:

- *Cálculo del NDVI.* Los índices de vegetación se basan en el comportamiento espectral característico que presenta la vegetación, y en general se definen como relaciones sencillas calculadas entre las bandas roja e infrarroja cercana, ofreciendo una medida cuantitativa de su estado. La delimitación de la superficie verde se ha realizado a partir del *Índice de Vegetación Normalizado (NDVI)*, que es el índice más ampliamente extendido, y que se define como la relación normalizada entre las reflectividades de las bandas infrarroja (ρ_{IRC}) y roja (ρ_R).

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$$

A partir del mosaico de reflectancias de las imágenes se ha calculado el NDVI para el ámbito de estudio.

- *Definición de umbrales de actividad vegetativa para cada estrato,* se establece el valor numérico del NDVI en la imagen a partir del cual se considera que ese píxel es vegetación, y se ha estimado dentro de cada estrato, teniendo en cuenta sus características (histogramas de valores de NDVI, inspección visual). En cada estrato se han determinado los siguientes rangos: el substrato verde que inunda el suelo consolidado y el Suelo en proceso de consolidación, (no vegetación, NDVI medio y NDVI alto); Suelo Agrícola seco y el Suelo Agrícola regadío (No cultivo y cultivo en pie); y Forestal (no vegetación, NDVI medio y NDVI alto).

- *Generación de subestrato verde: Segmentación. Clasificación de árbol y césped:* Integra la vegetación (NDVI medio + NDVI alto) que inunda los estratos suelo consolidado y suelo en proceso de consolidación, y está constituido por ámbitos verdes (parques y jardines y campos de golf) que a su vez se clasifican mediante procesos de segmentación y clasificación con la herramienta Feature Analyst en recintos verdes de árbol y césped.

4. *Metodología de años posteriores.* El proceso de imágenes de años posteriores tiene como objetivo actualizar la base de datos cartográfica elaborada el primer año. La metodología seguida queda estructurada igual que el primer año. El proceso básico de imágenes y los procesos específicos de la delimitación de la zona verde son idénticos. Sin embargo los procesos específicos de seguimiento urbano se centran en la actualización de la estratificación, en concreto del estrato suelo en proceso de consolidación, mediante la localización de nuevos ámbitos urbanos. Los nuevos ámbitos siguen el mismo proceso de clasificación que el primer año, mientras que los ámbitos existentes se procesan con técnicas de detección de cambios. Los resultados obtenidos actualizan la Geodatabase a 2009. En 2010 se harán dos nuevas actualizaciones con las imágenes de principio de primavera y final de verano.

5. *Verificación de metodología con imágenes Quickbird.* Con el fin de servir de contraste y control de calidad de la metodología desarrollada del proceso, se han adquirido imágenes del satélite Quickbird, en modo multiespectral 2.4 m y pancromática 0.6 m, en una zona piloto, Rivas-vaciamadrid, de 50 km² en fechas similares (10 de Agosto 2008, 13 de julio 2009).

La metodología aplicada a Quickbird ha sido la misma que la aplicada a SPOT aunque adaptada a sus características espaciales. De la verificación realizada, se concluye:

- Los resultados obtenidos con Quickbird son análogos a los obtenidos con SPOT.
- Se considera que la metodología desarrollada para SPOT es satisfactoria, y queda avalada por las pruebas realizadas con Quickbird.

Fase 5: Estimación de la demanda de agua

El objetivo de esta fase es calcular la estimación de la demanda de agua correspondiente al consumo de la consolidación de la zona urbana y las zonas verdes.

La hipótesis de partida para la *estimación de la demanda de agua en zona urbana* como producto derivado y complementario del seguimiento del desarrollo urbano en las zonas en proceso de consolidación se apoya en el conocimiento del consumo final previsto y el conocimiento de la superficie en planta a construir de los diferentes ámbitos de los planes urbanísticos. Combinando esta información con los resultados del proyecto, que proporciona la superficie construida en planta a fecha de adquisición de las imágenes, se obtendría la demanda actual esperada.

La *estimación de la demanda de agua en zonas verdes* se calcula en términos de necesidad de riego (NR_{mes}) a partir de la ecuación

$$NR_{mes} \equiv \frac{ET_{C(mes)} - P_{mes}}{EficienciaRiego}$$

En donde P_{mes} es la precipitación acumulada mensual y $ET_{C(mes)}$ es la evapotranspiración mensual de la zona verde y se estima a partir de la Evapotranspiración de referencia ET_0 calculada con los datos obtenidos de las estaciones agroclimáticas de las respectivas zonas climáticas corregido por un factor Kc proporcionado por la FAO y mediante la fórmula

$$ET_{C(mes)} = ET_0 \times K_0$$

Atendiendo a las condiciones climáticas la comunidad de Madrid, esta se ha dividido en tres zonas: la sierra, zona transición y la vega, estimándose para cada una de ellas la evapotranspiración de referencia a partir de datos de estaciones meteorológicas. Las necesidades anuales para cada zona se han estimado a partir de las necesidades de riego mensuales sobre las zonas verdes de césped y árbol.

RESULTADOS

Los resultados del proyecto incluyen: el diseño, generación y actualización de la Base de datos cartográfica, su explotación y la estimación de la demanda de agua.

El diseño y la generación de la base de datos cartográfica constituyen los resultados de 2008, que también incluye la superficie verde obtenida para cada estrato, municipio, y rango de actividad vegetativa. Los resultados e información del proyecto se han integrado en el SIG corporativo del Canal de Isabel II donde se generan informes, mapas temáticos, etc, y se relaciona con la información sus infraestructuras.

Asistencia técnica para el seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid mediante técnicas de teledetección

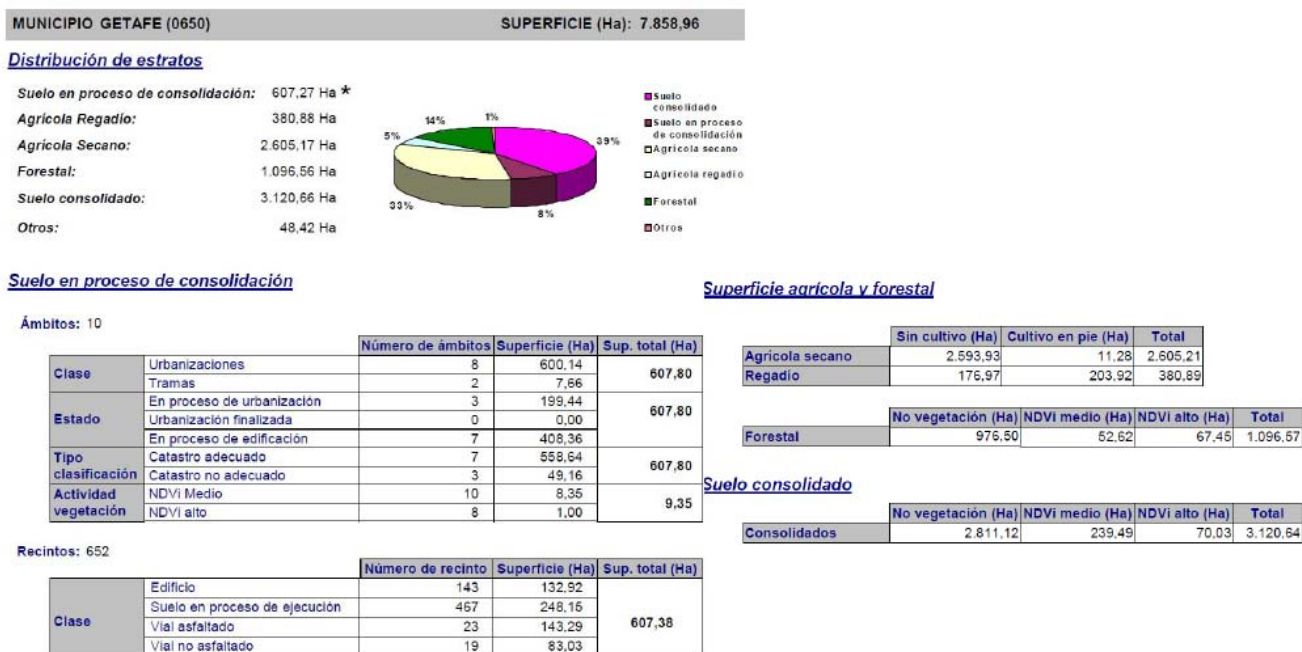


Figura 6. Ejemplo de Informe de resultados por municipio.

Respecto a la distribución de estratos cabe destacar que la superficie de la comunidad de Madrid se distribuye en un 79% de suelo natural (agrícola y forestal) y un 18% de suelo urbano (suelo consolidado y en proceso de consolidación).

El suelo en proceso de consolidación ocupa una superficie de 18.500 ha que representa el 2% de la superficie total y el 11% del suelo urbano. Se observa que la mitad de su superficie se encuentra en un grado de consolidación definido como "En proceso de edificación". Por otra parte, en lo que se refiere a la metodología de clasificación y teniendo en cuenta que aquellos ámbitos donde existe catastro los resultados son mejores que donde no lo hay, cabe destacar que el 67% de la superficie clasificada disponía de catastro adecuado.

Los resultados del proceso de la imagen adquirida en 2009, actualizan la base de datos cartográfica proporcionando la evolución del seguimiento del desarrollo urbano. Los procesos específicos realizados se centran en la actualización de la estratificación, en concreto en la localización de nuevos ámbitos que amplían el estrato de suelo en proceso de consolidación, y en la actualización de los ámbitos existentes. El suelo en proceso de consolidación se ve incrementado en un 2.5% respecto al año anterior. De estos nuevos ámbitos, el 72% se encuentran, como cabe esperar en sus inicios, en el grado de consolidación "urbanizando", el 9% en "urbanizado" y el 19% en "edificando".

En los ámbitos existentes ambos años, se puede realizar un análisis comparativo. Los ámbitos procesados con catastro adecuado se dan en zonas con un grado de consolidación avanzado, situándose en grandes urbanizaciones. En ellos los cambios principales corresponden con cambios de suelo a edificio (40%) y con cambios de vial no asfaltado a vial asfaltado (60%). Por otro lado, se observa que la metodología aplicada en ámbitos que no disponen

de información catastral adecuada, da respuesta al 75% de los cambios, correspondiendo con zonas con un grado de consolidación bajo (suelo a vial asfaltado; vial no asfaltado a vial asfaltado).

También se han detectado cambios dentro del suelo consolidado en 2008, que han pasado a suelo en proceso de consolidación en 2009. Corresponden generalmente con demoliciones u obras dentro del entramado urbano. Estos cambios se han localizado en 23 municipios y suman un total de 262 ha.

El grado de consolidación en 2008 su seguimiento y evolución en 2009 se detalla en la siguiente tabla. Se observa que la gran mayoría de los ámbitos mantienen su grado de consolidación, si bien es cierto que no se han establecido diferentes niveles dentro del mismo grado de consolidación.

GRADO CONSOLIDACION 2008	GRADO CONSOLIDACION 2009	Nº ámbitos	Superficie ha	%
Urbanizando	Urbanizando	166	4,093.50	22.67
Urbanizando	Urbanizado	18	1,146.02	6.35
Urbanizando	Edificando	15	1,248.01	6.91
Urbanizando	Edificado	2	5.39	0.03
Urbanizado	Urbanizado	46	1,371.57	7.60
Urbanizado	Edificando	21	650.31	3.60
Edificando	Edificando	331	9,481.85	52.52
Edificando	Edificado	9	57.64	0.32
		608	18,054.29	100.00

Tabla 1. Seguimiento del grado de consolidación de los ámbitos 2008-2009

Los resultados integrados en la base de datos cartográfica permiten realizar un seguimiento del grado de ejecución del desarrollo urbano reflejado en los planeamientos urbanísticos de los municipios, como marco de referencia de expectativas de crecimiento urbano. Este seguimiento se ha realizado mediante el cruce de los resultados obtenidos y archivados en la base de datos cartográfica contra el planeamiento vigente, en su versión más actual, y en sus diferentes categorías incluidas dentro del tipo Planeamiento Vigente: 1) Suelo urbano consolidado y ámbitos desarrollados 2) Ámbitos no desarrollados con informe de viabilidad 3) Ámbitos no desarrollados sin informe de viabilidad. El resultado se proporciona en una base de datos resumen que integra para cada sector de planeamiento y para cada año procesado un registro con la información correspondiente a la superficie clasificada de edificio, suelo, vial asfaltado y vial no asfaltado.

Otra muestra de explotación ha consistido en la elaboración de mapas temáticos por municipio en los que se refleja de forma cartográfica y numérica los cambios producidos entre los dos años. Sobre el mapa se simboliza la evolución del grado de consolidación durante los dos años de estudio y se incluye también una tabla resumen con la superficie de recintos clasificados para cada año. En la siguiente figura se muestra el mapa temático correspondiente al municipio de Getafe.

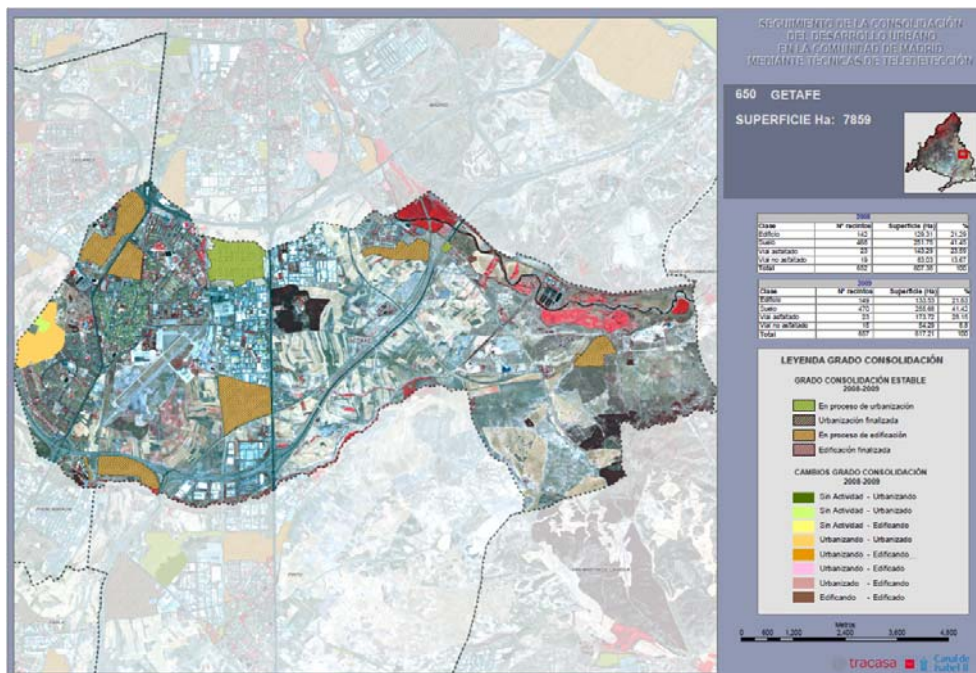


Figura 7. Explotación de resultados: Mapa temático de Getafe de seguimiento de consolidación 2008-2009

Con respecto a los resultados de la superficie verde, cabe destacar que coberturas de imágenes amplias en el tiempo presentan diferentes estados fenológicos en la vegetación, de forma que no se puede tratar toda la cobertura de manera homogénea y se complica la definición de un único umbral del índice de vegetación para la estimación de la superficie verde, este ha sido el caso de la cobertura 2008 adquirida en un periodo excesivamente amplio. Sin embargo, la cobertura 2009 adquirida en un periodo de diez días, proporciona resultados muy coherentes. Por otro lado hay que añadir que la estimación de la superficie verde mediante el NDVI ha requerido un ajuste para eliminar la sobreestimación producida en la zona arbolada causada por las copas de los árboles, la geometría de adquisición y la escala de la imagen.

Con respecto a los resultados de la estimación de la demanda de agua en zonas verdes, las características del proyecto han permitido zonificar Madrid en tres zonas climáticas: la sierra, zona transición y la vega, estimándose para cada una a de ellas la evapotranspiración de referencia a partir de datos de estaciones meteorológicas. Las necesidades anuales para cada zona se han estimado a partir de las necesidades de riego mensuales sobre las zonas verdes de césped y árbol. Teniendo en cuenta la superficie verde presente se ha calculado la demanda de agua de cada zona y sobre toda la comunidad de Madrid, en términos del consumo de agua mensual ($\text{hm}^3/\text{mensual}$) y anual (hm^3/anual). Se aprecia una evidente diferencia en lo que respecta a la demanda de agua del césped según la zona climática en la que se encuentre, siendo la zona de la sierra donde se da menor demanda de agua con un aumento gradual de ésta según nos vamos desplazando hacia el sureste. Para tener una visión más completa de la demanda de agua se proporciona la distribución espacial continua ($\text{m}^3/\text{año ha}$) sobre la comunidad de Madrid cuyo resultado se muestra en la siguiente figura.

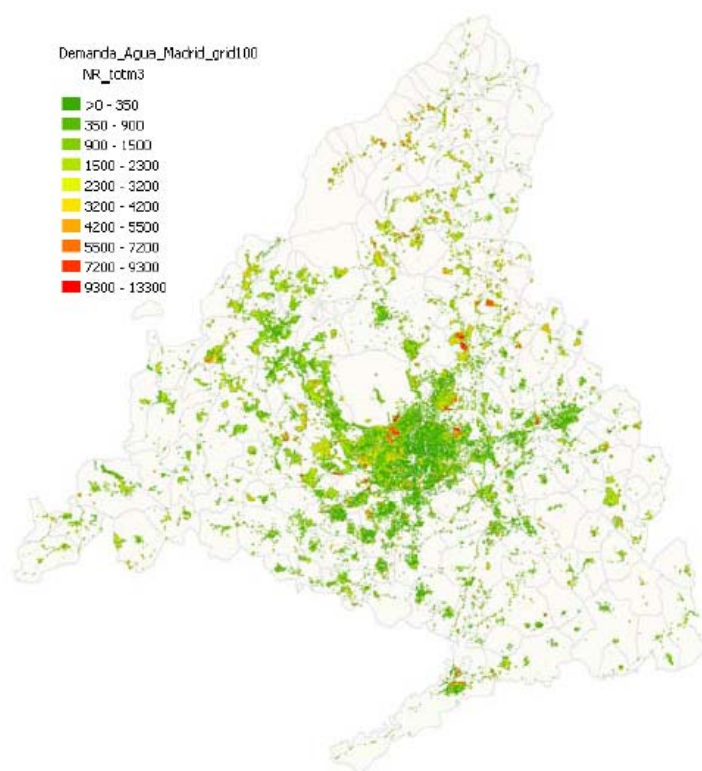


Figura 8. Distribución espacial de la Demanda de agua anual en la Comunidad de Madrid

Los resultados obtenidos para 2009 muestran una coherencia con los datos que maneja el Canal de Isabel II, siendo algo superiores a los obtenidos para un año medio tipo seco (la información de AEMET corrobora que el año 2009 se considera seco en la Comunidad de Madrid respecto los datos medios de los últimos 30 años).

Respecto a la demanda de agua urbana, la identificación de nuevas zonas urbanas en proceso de consolidación y la evaluación de la superficie edificada en relación con la prevista en los planes urbanísticos permitirá una estimación más precisa de la aparición de nuevas demandas, su distribución geográfica y velocidad de consolidación.

CONCLUSIONES

El planeamiento urbanístico es el principal marco de referencia de expectativas de crecimiento de las necesidades de la población en cuanto a infraestructuras y recursos, en particular en cuanto al indispensable abastecimiento de agua, en el caso que nos ocupa. Esta referencia está cargada de incertidumbre en cuanto a sus plazos de consolidación reales en el corto y medio plazo.

La metodología aquí expuesta se ha mostrado efectiva para un seguimiento prácticamente en tiempo real de la ejecución del desarrollo urbano, y un mejor conocimiento y pronóstico de la evolución real de la demanda de agua en el corto y medio plazo, acotando esas incertidumbres.

Las técnicas de teledetección utilizadas, en particular el cálculo de índices de vegetación a partir de las imágenes de satélite sirven para una evaluación actualizada y precisa de la utilización de agua en usos de exterior, de gran utilidad para la planificación de actuaciones en materia de suministro de agua regenerada.

Las imágenes satelitales de media resolución como las aportadas por SPOT, dada su disponibilidad y viabilidad de obtener una imagen completa de la Comunidad de Madrid en breve plazo (un mes en la época estival) parecen las más apropiadas para los objetivos establecidos. La comparación de los resultados con los obtenidos con imágenes de mayor resolución (Quickbird) muestra que la precisión alcanzada es adecuada para el objeto del trabajo.

La gran relevancia de disponer de información auxiliar como el SIOSE como apoyo para la delimitación de zonas con un comportamiento urbano e identificación del estrato en proceso de consolidación. Así mismo el disponer del catastro lo más actualizado posible resulta un elemento fundamental como base de apoyo en los procesos de segmentación y clasificaciones de recintos urbanos, dentro del diseño y ejecución de la metodología planteada

La presentación de resultados en formato de una geodatabase, proporciona una enorme potencialidad desde el punto de vista gráfico y numérico. Esta información incorporada en el Sistema de Información Geográfica de Canal de Isabel II, servirá de base para la elaboración y actualización de los Planes de desarrollo de infraestructuras estratégicas de abastecimiento y para la utilización por las distintas áreas responsables de la planificación.

Los resultados del proyecto son satisfactorios, fruto de ello es la continuidad del proyecto en 2010 con la ejecución de nuevas actualizaciones correspondientes a la adquisición de coberturas de imágenes de principio de primavera y final de verano.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto Geográfico Nacional (IGN) por proporcionarnos el mapa SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo Español) de la Comunidad de Madrid y la cobertura SPOT5 de 2008 del Plan Nacional de Teledetección.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Andaluza del Agua. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. (2008) Seguimiento de las medidas de ahorro de agua mediante técnicas de Teledetección y Gis en la provincia de Málaga. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/menuitem.d57ba3a565d2db10e849d04650525ea0/?vgnnextoid=1104fcb24550d110VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=ca87ee486a00a110VgnVCM1000000624e50aRCRD&vgnnextfmt=rediam&lr=lang_es
- Albizua; Leránóz ; Zalba (2005): Seguimiento detallado de los cambios urbanísticos que se producen en el termino municipal de Madrid, publicado en el libro del *XI Congreso Nacional de Teledetección* pp. 241-244.
- Albizua; Leránóz ; Zalba (2007): Tratamiento de imágenes del satélite spot 5 de la zona norte de España para el plan Nacional de Teledetección, publicado en el libro del *XII Congreso Nacional de Teledetección Argentina* pp. 471-479
- Beamonte García. C. et al. (2009): 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, Cuadernos de I+D+I N° 11, (en imprenta).
- FAO Irrigation and Drainage Papers: (2004) Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements (FAO56,FAO24). http://www.fao.org/icatalog/search/dett.asp?aries_id=100301 (FAO56,FAO24)
- Cubillo González, F. (2005) Desarrollo urbano y planificación de infraestructuras y demandas. http://grupo.us.es/ciberico/archivos_acrobat/sevilla1cubillo.pdf
- Gonzalez-Audicana, M.; Otazu, X.; Fors, O.; Alvarez-Mozos, J. (2006): A low computational-cost method to fuse IKONOS images using the spectral response function of its sensors. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Vol. 44, no. 6, June 2006. pp.1683-1691.
- Ibáñez Carranza, J. C. (2007): Accurate Assesment on Outdoor Use of Water in the Region of Madrid (Spain). Efficient 2007. *4th IWA Specialist Conference on Efficient Use and Management of Urban Water Supply*, May 2007 Jeju Island, Korea.
- Leránóz; Albizua; Zalba (2008): Seguimiento de las medidas de ahorro de agua mediante técnicas de Teledetección y Gis en la provincia de Málaga. Presentación *XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*.
- Miller, Jennifer Elizabeth, Nelson, Stacy A. C. and Hess, George R.(2009): An Object Extraction Approach for Impervious Surface Classification with Very-High-Resolution Imagery. *The Professional Geographer*, Vol 61:2 ,pp:250 – 264
- Yuan, F.(2008): Land-cover change and environmental impact analysis in the Greater Mankato area of Minnesota using remote sensing and GIS modelling, *International Journal of Remote Sensing*,29:4, pp.1169-1184