

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA



**MÁSTER EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER
CURSO 2016-2017**

**ANÁLISIS DE SELLADO DE SUELOS
MEDIANTE TÉCNICAS DE
TELEDETECCIÓN Y TECNOLOGÍA LIDAR**

Luis Fernando Antolín Peñacoba

Febrero 2017

Tutora: María del Pilar García Rodríguez

RESUMEN: En el presente Trabajo de Fin de Máster (TFM), se analizará de manera razonada la evolución del sellado antropogénico del suelo en varios municipios de la Comunidad de Madrid, situados en torno al río Guadarrama, en los últimos 29 años. Son municipios localizados muy cerca de Madrid capital, donde las dinámicas demográficas de los últimos años han propiciado que experimenten un gran aumento poblacional dando como resultado un notable sellado de suelo para satisfacer las nuevas demandas.

Para el estudio se utilizarán las tecnologías espaciales más actuales disponibles, como los nuevos satélites Sentinel, combinando técnicas de teledetección, fotointerpretación y tecnología LIDAR, que nos ayuden a determinar con exactitud el avance y el impacto del sellado del suelo y otras variables urbanísticas y territoriales de interés, como el número y localización de viviendas en suelo no urbanizable y la altura media edificada en cada uno de los municipios de estudio.

PALABRAS CLAVE: Teledetección, LIDAR, fotointerpretación, sellado del suelo, sentinel.

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	4
2. METODOLOGÍA.....	5
3. MATERIAL DE TRABAJO.....	6
4. ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	8
5. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE.....	13
5.1. Análisis visual.....	13
5.2. Análisis digital.....	14
5.2.1. Mejoras espaciales.....	14
5.2.2. Mejoras espectrales.....	15
6. ÍNDICES:.....	18
6.1. Clasificación y corrección de los índices.....	21
7. CLASIFICACIONES SUPERVISADAS.....	30
8. EVALUACIÓN DE EXACTITUD DEL SUELO SELLADO.....	31
9. VALORACIÓN DEL INCREMENTO DEL SELLADO DE SUELO.....	36
10. IDENTIFICACIÓN DE VIVIENDAS CONSTRUIDAS EN SUELO NO URBANIZABLE EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	38
11. CÁLCULO DEL NÚMERO MEDIO DE PLANTAS EDIFICADAS EN LOS MUNICIPIOS DE ESTUDIO.....	43
12. CONCLUSIONES.....	55
13. BIBLIOGRAFÍA.....	56

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS:

La población española durante el pasado y el actual siglo ha sufrido un gran incremento demográfico, pasando de los 18.616.630 habitantes en 1900 a superar los 46 millones en la actualidad. Estos cambios han propiciado importantes cambios en nuestras ciudades y una gran expansión urbanística, siendo más relevante sobre todo en las ciudades costeras y en algunas del interior como Madrid que han absorbido mucha población. En los últimos años, además, se ha ido produciendo un fenómeno de periurbanización, donde núcleos propiamente rurales debido a su cercanía con las ciudades se están convirtiendo en centros de gran dinamismo socioeconómico, dando lugar a que en ellos también se está experimentando durante las últimas décadas una gran expansión urbanística.

Estos cambios demográficos y urbanísticos han conllevado a su vez importantes cambios en los usos del suelo. Uno de los principales y más preocupantes es el sellado de suelo que lleva asociado. Por sellado de suelo se entiende “la acción de cubrir de forma permanente una superficie de terreno con material impermeable artificial, como cemento o asfalto”¹.

El sellado del suelo se ha convertido en una de las principales causas de la degradación del suelo en la Unión Europea. No obstante, y a pesar de que constituye un elemento natural clave en los ecosistemas, la atención recibida ha sido mínima, y se le reconoce poco valor y poca consideración pese a ser un recurso limitado y no renovable. Hay que tener en cuenta que revertir la degradación por causas antrópicas y devolver la productividad a los suelos es un proceso muy costoso y excesivamente lento.

Será en los últimos años cuando desde las instancias europeas se empiezan a hacer más eco del problema. Así, en el año 2012 la Comisión Europea publica el documento: “Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado de suelo”, intentando con ello que las administraciones nacionales, regionales y locales tomen cartas en el asunto. No obstante, a pesar de ello, hoy en día todavía hay una total falta de referencias en nuestra actual normativa y en la europea, más allá de vagas recomendaciones.

Es desde el ámbito científico y académico donde últimamente se ha puesto más atención al problema, con la realización de diferentes proyectos que buscan analizar los distintos métodos para evaluar el avance y la repercusión del sellado del suelo. Como los realizados desde la Universidad Complutense de Madrid por las profesoras María del Pilar Rodríguez y María Eugenia Pérez González, y que han servido de referencia para la realización de este proyecto.²

De esta manera el presente trabajo, se enmarca dentro de este contexto, en el que se tiene por objetivo analizar mediante técnicas de teledetección y con las últimas tecnologías a nuestro alcance, la evolución del sellado del suelo entre 1.987 y 2.016 en los municipios

¹ Definición dada por la Comisión Europea en su documento: directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar, o compensar el sellado del suelo.

² Se pueden consultar algunos de sus trabajos en la bibliografía adjunta al final del trabajo.

de Arroyomolinos, Boadilla del Monte, Brunete, Majadahonda, Móstoles, Navalcarnero, Villanueva de la Cañada y Villaviciosa de Odón.

Se elige esta zona, ya que estos municipios, por su cercanía a Madrid, en las últimas décadas han experimentado un crecimiento demográfico muy notable, por lo que será muy interesante ver en qué medida ha aumentado también el sellado del suelo.

2. METODOLOGÍA:

La metodología seguida se resume en el siguiente esquema:

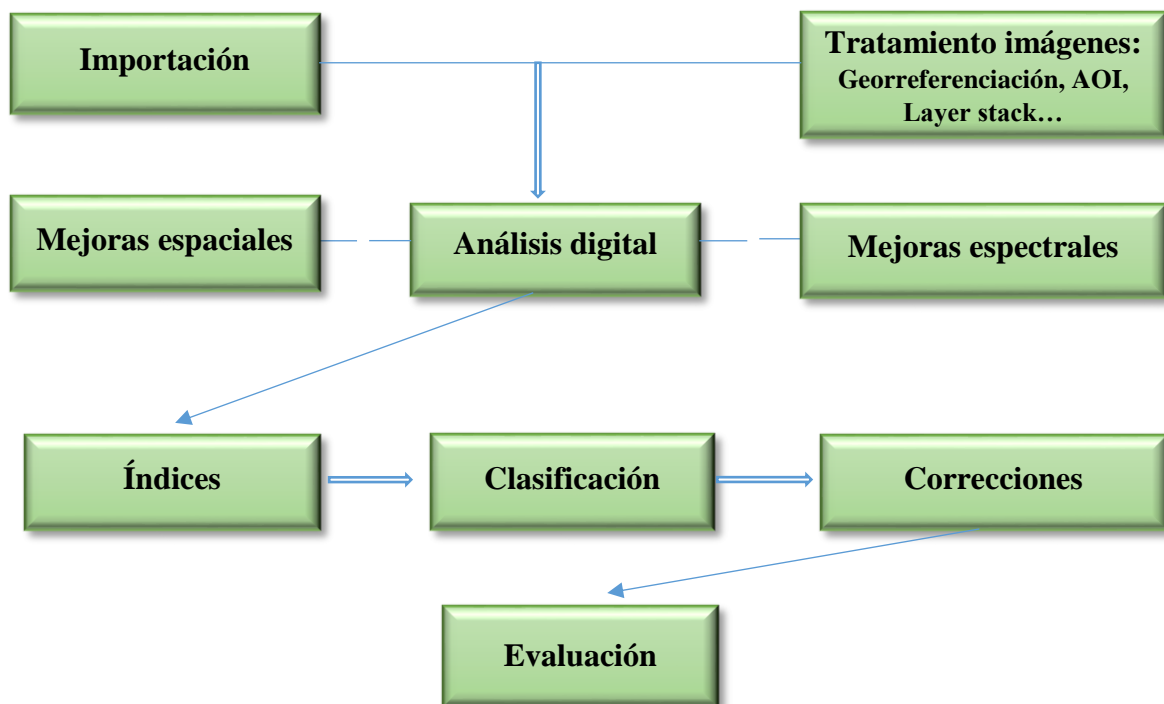


Fig.1. Metodología usada en el estudio

En primer lugar se han importado las imágenes de satélite necesarias de los correspondientes servidores de descarga. Esas imágenes se han sometido a diversos tratamientos: georreferenciarlas en el caso de que fuera necesario, crear un AOI de la zona de estudio y recortar las imágenes con él, utilizar la herramienta layer stack para quedarnos sólo con las bandas que nos interesen... Posteriormente se ha llevado a cabo un análisis digital de las imágenes, a las que se han realizado una serie de mejoras para que nos ayuden en su interpretación.

Una vez hecho, se han calculado diferentes índices que nos permitan identificar las zonas selladas en el año 1987 y en 2016, se han clasificado y se ha procedido a su corrección para cambiar los valores de pixel erróneos. También se han calculado clasificaciones supervisadas en ambas fechas para ver si daban mejor resultado que los índices. Con las correcciones terminadas se ha procedido a evaluar la precisión de cada clasificación y

quedarnos con la que mejor resultado dé para valorar el incremento del sellado del suelo en la zona de estudio.

Además, mediante técnicas de fotointerpretación se han identificado que viviendas están construidas en suelo no urbanizable, y mediante tecnología LIDAR se ha calculado el número de plantas y la altura media edificada por municipio.

3. MATERIAL DE TRABAJO:

Para la realización del presente proyecto se han utilizado imágenes de satélite, fotografías aéreas actuales e históricas, mapas temáticos de la Comunidad de Madrid e imágenes LIDAR. Los programas utilizados para el estudio han sido ERDAS Imagine 2016 y Arcgis 10.2.2.

En cuanto a la elección de satélites, se ha optado por imágenes de satélite Landsat 5-TM para la imagen de 1987 y Sentinel 2A para la de 2016. Se ha intentado cogerlas en fechas próximas, para que la respuesta espectral de ciertas cubiertas, como puede ser la vegetación caduca o los cultivos, fuera lo más similar posible. Así, para el Landsat 5 se ha cogido la imagen del 10 de Julio de 1987 de la escena 201-32, y para la del Sentinel el 16 de Julio de 2016 de la misma escena, ambas conseguidas a través de los servidores gratuitos de descarga USGS (United States Geological Survey).

La serie de satélites Landsat fueron lanzados por EEUU con el objetivo de conseguir una observación de la superficie terrestre a una alta resolución. Ha habido ocho generaciones, la primera, o Landsat 1, que fue lanzada en 1972 y la última que fue puesta en órbita en 2013 fue el Landsat 8.

Para nuestro estudio se ha escogido de la generación Landsat 5 puesto en órbita en 1985, debido a que era la tecnología más avanzada en la época del estudio (1987), ya que los satélites Spot apenas habían salido un año antes, tenían aún muy poco recorrido, y era la primera generación.

Además el Landsat 5 nos ofrece una mayor resolución espectral que la del spot, con siete bandas y una resolución espacial de 30 metros, excepto en el caso del infrarrojo térmico que sube hasta los 120 metros.

Satélite	Sensor	Bandas	Resolución espectral (longitud onda - micrómetros)	Resolución espacial (metros)
Landsat 5	Tm	1- Azul	0,45 - 0,52	30 m
		2- Verde	0,52 - 0,60	30 m
		3- Rojo	0,63 - 0,69	30 m
		4- Infrarrojo cercano (NIR)	0,76 - 0,90	30 m
		5- Infrarrojo de onda corta (SWIR)	1,55 - 1,75	30 m
		6- Infrarrojo térmico	10,40 - 12,50	120 m
		7- Infrarrojo de onda corta (SWIR)	2,08 - 2,35	30 m

Tabla 1. Características Landsat 5. Fuente: Agencia Espacial Europea (ESA). Elaboración propia.

Por su parte, para la imagen de 2016 la elección de Sentinel era óptima, ya que aún la resolución espectral del Landsat y la espacial del Spot. Es la tecnología más reciente a la

que se puede tener acceso, siendo por ello todavía poco utilizado en estudios de sellado de suelo. El proyecto Sentinel está siendo llevado a cabo por la Agencia Espacial Europea y consta de una serie de múltiples satélites, seis en total, cada uno con objetivo específico.

En nuestro caso el Sentinel 2A fue puesto en órbita en junio de 2015 y está sobre todo orientado al estudio y seguimiento de fenómenos naturales, así como destinado a proyectos de ordenación territorial, usos del suelo, sellado, etc.

Nos ofrece una gran resolución espectral con doce bandas, y también una gran resolución espacial con 10 metros en el espectro visible y 20 en el infrarrojo cercano.

Satélite	Bandas	Resolución espectral (longitud onda - nanómetros)	Resolución espacial (metros)
Sentinel 2A	1- Ultra Azul (Costa y Aerosol)	443	60 m
	2- Azul	490	10 m
	3- Verde	560	10 m
	4- Rojo	665	10 m
	5- Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	705	20 m
	6- Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	740	20 m
	7- Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	783	20 m
	8- Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	842	10 m
	8a- Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	865	20 m
	9- Onda corta infrarroja	940	60 m
	10- Onda corta infrarroja	1375	60 m
	11- Onda corta infrarroja	1610	20 m
12- Onda corta infrarroja	2190	20 m	

Tabla 2. Características Sentinel 2A. Fuente: Agencia Espacial Europea (ESA). Elaboración propia.

Para el estudio, se han escogido seis bandas: Azul (2), verde (3), rojo (4), una de infrarrojo próximo (8) y dos de infrarrojo medio (11 y 12). Asignándole una numeración del uno al seis, que se corresponden con las bandas una al cinco y la siete del Landsat 7, como se puede apreciar en el gráfico de abajo.

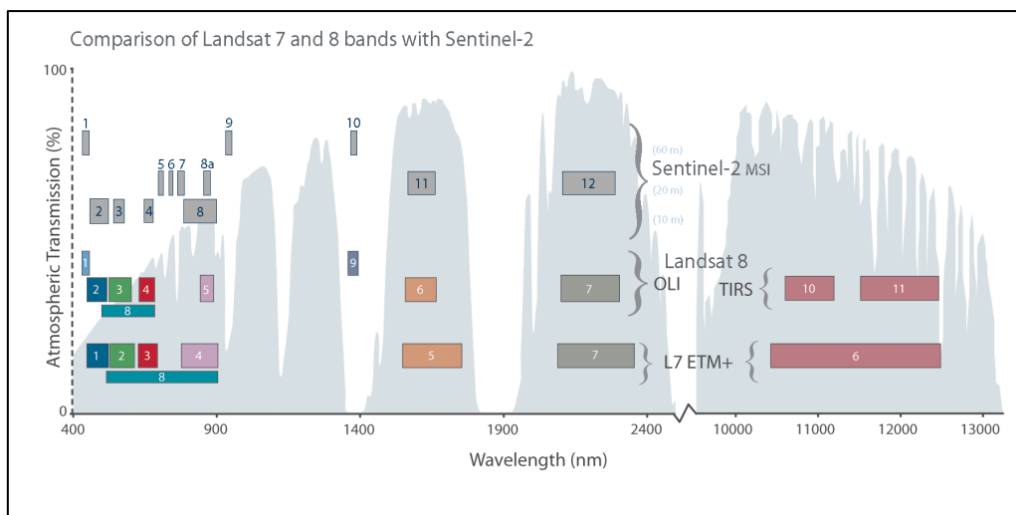


Fig.2. Comparación bandas Landsat 7 y 8 con Sentinel 2. Fuente: Laboratorio de Información Geográfica y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana (CSIC)

Se ha tenido que realizar de esta forma, ya que si se dejaran todas las bandas, el programa ERDAS imagine con el que se lleva a cabo el tratamiento de las imágenes, aún no reconoce los satélites Sentinel. Por ello, hay que coger las bandas que se corresponden

con el Landsat y que nos lo reconozca como tal, aunque en realidad estemos trabajando con Sentinel.

Para las labores de fotointerpretación se han utilizado ortofotos de máxima actualidad del PNOA, obtenidas a partir del centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional (CNIG), así como la utilización de diversas fotografías aéreas históricas a través del visor cartográfico de la Comunidad de Madrid (Planea Madrid) y mapas temáticos como el mapa de ocupación de suelos históricos. Las imágenes LIDAR han sido suministradas por la Consejería de Medio Ambiente, Administración Local y Ordenación del Territorio, del año 2010, puesto a que en la fecha en la que se ha realizado el proyecto eran las imágenes más actuales a las que se tenían disponibilidad.

4. ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO:

La zona elegida para el estudio son los municipios de Arroyomolinos, Boadilla del Monte, Brunete, Majadahonda, Móstoles, Navalcarnero, Villanueva de la Cañada y Villaviciosa de Odón. Todos ellos comparten la característica de situarse en torno al río Guadarrama, por lo que en principio un aumento del sellado del suelo podría incidir más en la calidad ambiental de la zona, en particular en los acuíferos subterráneos, ya que los terrenos próximos a ríos presentan una mayor permeabilidad, y uno de los mayores inconvenientes del sellado es una mayor escorrentía superficial y una menor infiltración.

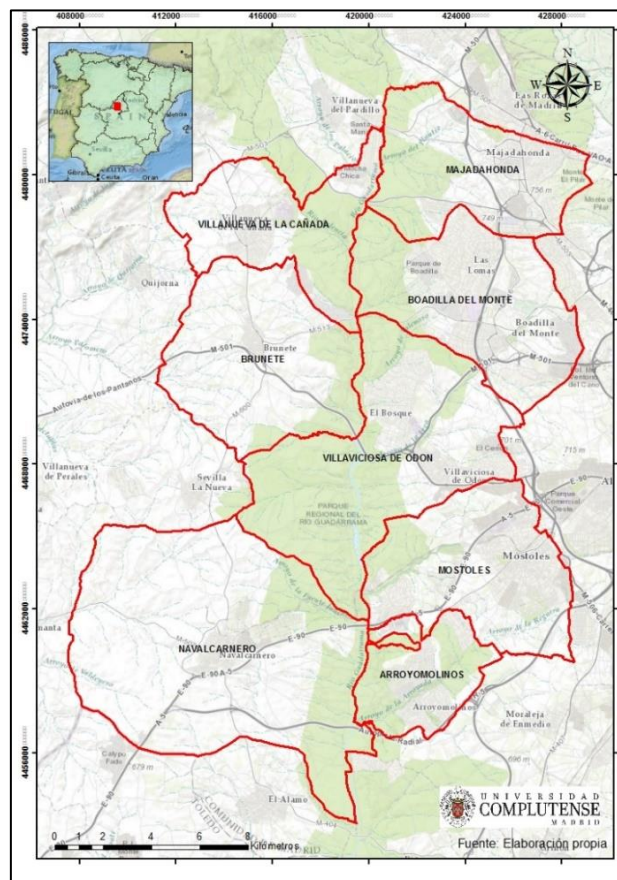


Fig.3. Mapa zona de estudio

Atendiendo a la clasificación que proporciona la Comunidad de Madrid, estamos hablando de municipios ubicados en la zona 3 o Urbana Sur (Villaviciosa, Navalcarnero, Móstoles y Arroyomolinos) y en la zona 4 o urbana Noroeste (Villanueva, Majadahonda, Boadilla del Monte y Brunete).

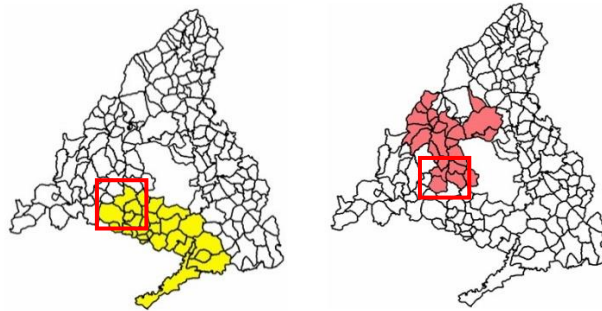


Fig.4.Localización municipios de estudio. Fuente: Comunidad de Madrid

Ambas son zonas con un fuerte carácter urbano residencial, que debido a la proximidad de Madrid capital y al incremento de la industrialización sobre todo por los municipios localizados más al sur de la Comunidad, han experimentado un fuerte crecimiento demográfico en las últimas décadas. En muchos municipios del estudio nos encontraremos con grandes zonas residenciales, distribuidas sobre todo en viviendas unifamiliares y urbanizaciones. Todo ello ha contribuido a que se haya convertido en una de las zonas con más densidad de población de la Comunidad de Madrid.

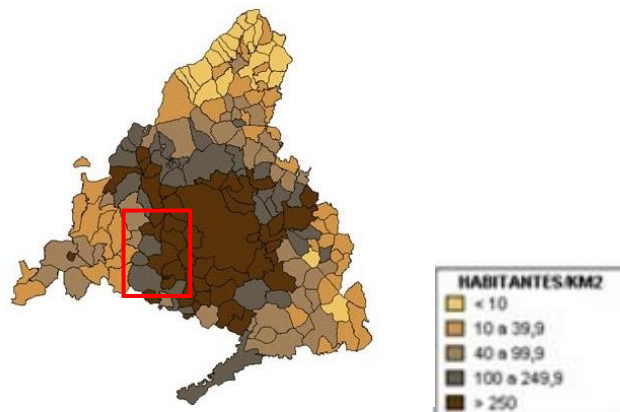


Fig.5. Habitantes por Km² .Fuente: Comunidad de Madrid

Así, en los municipios de estudio se refleja esta característica, donde se ve como desde el año 1987 el incremento poblacional ha sido más que notable, destacando sobre todo los casos de Boadilla del Monte y Majadahonda, con un incremento de más de cuarenta mil habitantes cada uno. O Arroyomolinos y Móstoles con incrementos superiores en ambos casos a veinticinco mil habitantes:

Esto es un elemento importante, ya que el acuífero detrítico de nuestra zona se va a recargar principalmente por “infiltración directa del agua de lluvia en las zonas de interfluvio, estableciéndose a partir de ellas un flujo descendente que se invierte en las proximidades de los valles, en los cuales se descarga”.³

El elemento natural más representativo, que tienen en común todos los municipios de estudio, es el río Guadarrama, uno de los afluentes principales del río Tajo, con un caudal aproximado de 164 hm³ cúbicos al año en la zona de estudio. En cuanto a sus afluentes, los más importantes en nuestra área, son Los Combos en Arroyomolinos, y los Sotos en Móstoles, ambos de carácter estacional. También hay algunos otros, pero ya de apenas relevancia.

En cuanto a la litología, es uno de los aspectos que más nos importan, pues dependiendo de los materiales se producirá mayor o menor infiltración, y determinará en gran parte el impacto que pueda provocar el sellado del suelo, así como las medidas de prevención y de corrección que deberán llevarse a cabo.

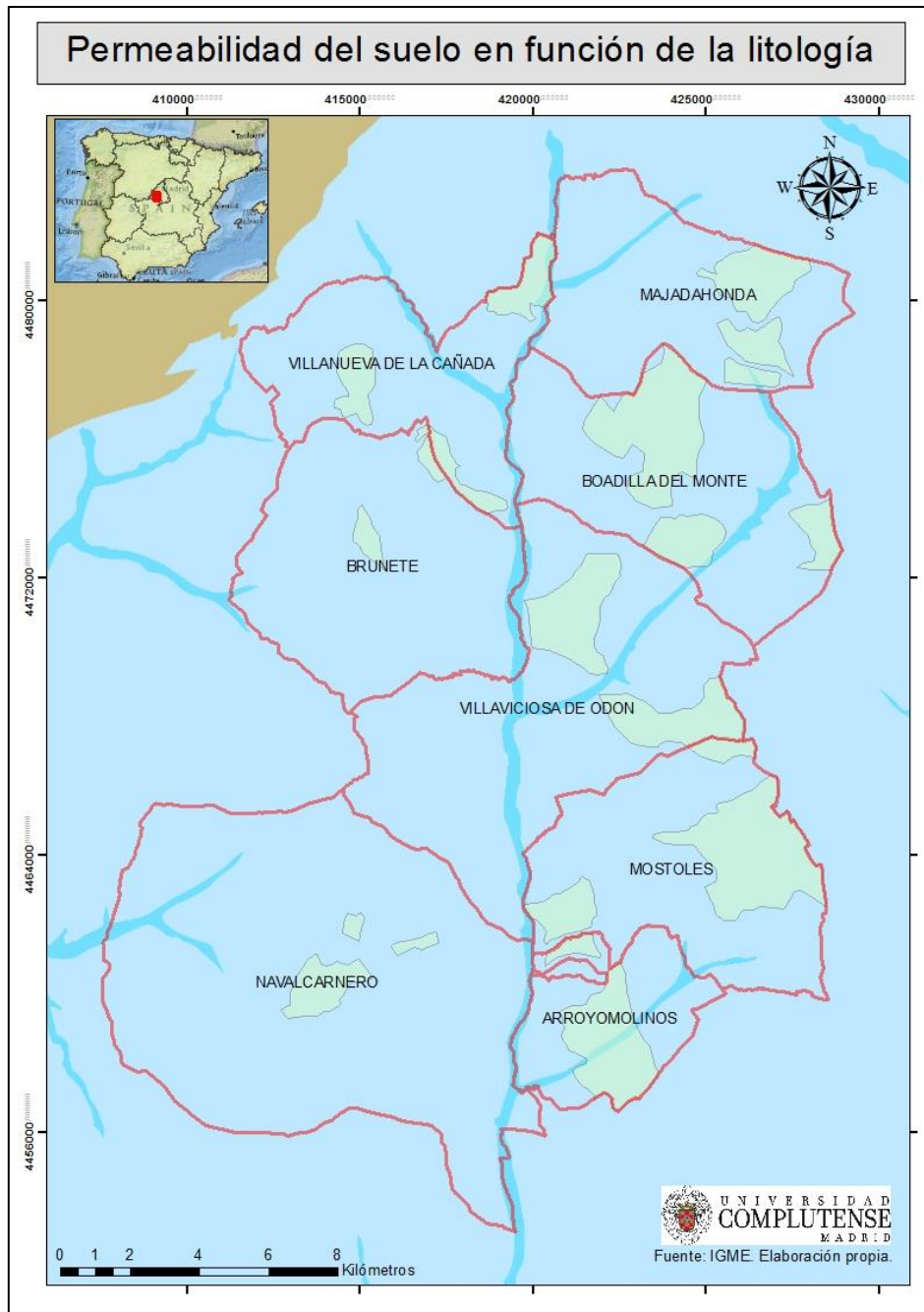
Desde un punto de vista hidrogeológico, la zona de estudio está incluida en la Unidad Hidrogeológica número 14, denominada “Terciario detrítico de Madrid-Toledo-Cáceres (IGME, 1971), unidad constituida fundamentalmente por los materiales terciarios detríticos del sector septentrional y occidental de la Cuenca de Madrid”.⁴

Nos encontramos sobre todo en una zona de permeabilidad alta-media, constituida por una litología formada por arenas, gravas finas, arenas fangosas, bloques y arcillas del terciario- mioceno inferior medio. En las zonas por donde discurre el Guadarrama nos encontramos con aluviones y terrazas bajas, arenas, limos y gravas ya del cuaternario. También nos encontramos pequeñas zonas de coluviones, conos de deyección, glaciares y terrazas altas también del cuaternario.

Con todo esto se puede elaborar un mapa con la permeabilidad de la zona. Donde en nuestra zona de estudio sobre todo nos encontramos con que los núcleos están asentados sobre formaciones detríticas o cuaternarias de permeabilidad media. A excepción de las zonas en torno al Guadarrama, que presentan también formaciones detríticas o cuaternarias pero esta vez de permeabilidad alta o muy alta.

³ Informe hidrogeológico. IGME (Instituto Geológico y Minero de España). Diciembre 1999

⁴ Informe hidrogeológico. IGME (Instituto Geológico y Minero de España). Diciembre 1999



Legenda	
	Límites Municipios
	Núcleos población
Hidrogeología	
	Ia Formaciones carbonatadas de permeabilidad alta o muy alta
	Ib Formaciones carbonatadas o volcánicas de permeabilidad media
	IIa Formaciones detríticas o cuaternarias de permeabilidad alta o muy alta, así como formaciones volcánicas de permeabilidad muy alta
	IIb Formaciones detríticas o cuaternarias de permeabilidad media. Formaciones volcánicas de alta permeabilidad
	IIIa Formaciones metadetríticas de permeabilidad alta. Formaciones detríticas, volcánicas, carbonatadas o cuaternarias de permeabilidad baja
	IIIb Formaciones generalmente impermeables o de muy baja permeabilidad. Formaciones metadetríticas, ígneas o evaporíticas de permeabilidad baja o media
	Masas de agua

Fig.7. Permeabilidad del suelo según la litología.

5. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE:

5.1. ANÁLISIS VISUAL:

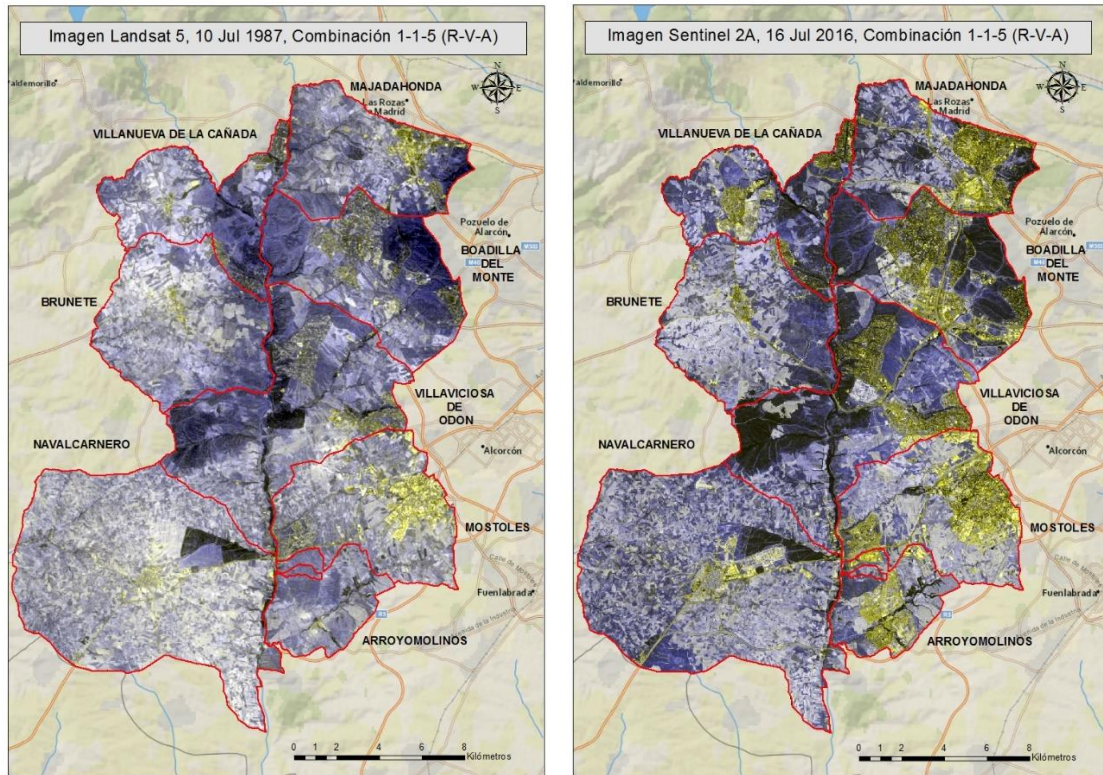


Fig.8. Imagen Landsat, combinación 1-1-5

En primer lugar para conocer un poco mejor la zona de estudio y los cambios que en ella se han producido durante estos años, se va a realizar un análisis visual, eligiendo para ello las bandas que mejor permitan discriminar las zonas selladas del resto de las coberturas. En general, las bandas que mejor discriminan los suelos son las del infrarrojo medio, así que se han tenido en cuenta y probando distintas combinaciones para ver cuál daba un mejor resultado. En nuestro caso la combinación 1-1-5 ha sido la más satisfactoria, ya que las zonas selladas las ha representado con una tonalidad amarilla, que se diferencia muy bien del resto de coberturas en tonalidades azules más oscuras.

Si comparamos la imagen de 1987 con la de 2016, podemos apreciar como los núcleos de población han expandido su radio de acción por el territorio, en consonancia con el aumento de población que como hemos visto se ha producido en ellos durante estos años. Llamativos en este aspecto son los casos de Móstoles, Boadilla del Monte o Villaviciosa de Odón, pero sobre todo Arroyomolinos, donde en 1987 apenas encontrábamos el núcleo histórico y en 2016 la expansión ha sido enorme, todo ello acompañado de nuevas infraestructuras, polígonos industriales... Las zonas de urbanización por su parte han sufrido menos cambios considerables, como es el caso de la urbanización el bosque en Villaviciosa de Odón, las Lomas en Boadilla del Monte, o Villafranca del Castillo en Villanueva de la Cañada.

Las zonas de vegetación no han cambiado tampoco demasiado en extensión, aunque en la imagen de 2016 sí que nos encontramos en ciertas zonas con tonalidades más oscuras,

lo que indicaría un aumento de la vigorosidad en ellas, como es el caso de las zonas de vegetación de Villaviciosa de Odón y Boadilla del Monte.

5.2. ANÁLISIS DIGITAL:

Con el fin de obtener una mayor información de las imágenes de satélite, éstas han sido objeto de varias mejoras que nos ayudarán a obtener una mejor visualización e interpretación.

- Mejoras espaciales:

Entre las mejoras espaciales, que nos ayudan a discriminar mejor las zonas selladas, he empleado en primer lugar el filtro *convolution- edge enhance* para obtener una mejora de los bordes. Con ello se logra una que haya una mejor transición entre los píxeles y eliminar los típicos dientes de sierra haciendo una transición más suave entre las distintas cubiertas, ayudando a su interpretación, ya que al hacer el recorte de una imagen originariamente más amplia se ha perdido cierta resolución espacial.

Detalle de la zona de Móstoles, con la imagen original, y después de haber realizado la mejora *edge enhance*, donde ya se puede observar una mejor resolución general, y sobre todo en las áreas urbanas.

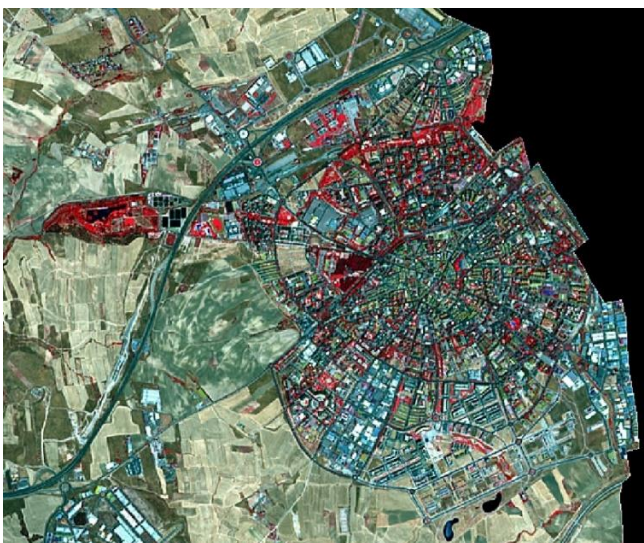


Fig.9. Detalle de la zona de Móstoles antes y después de aplicar la mejora espacial *edge enhance*.

En segundo lugar he aplicado un filtro *convolution-sharpen*, el cual nos ayuda a distinguir mejor las zonas de chalets o viviendas unifamiliares, trazando mejor los límites de estos para distinguirlos de la vegetación que los rodea.

Detalle de la zona de Las Lomas, una zona residencial de viviendas unifamiliares, con la imagen original, y después de haber realizado la mejora sharpen.



Fig.10. Detalle de la Las Lomas antes y después de aplicar la mejora espacial sharpen.

- Mejoras espectrales:

Las mejoras espectrales se basan en “combinar distintas porciones del espectro electromagnético mediante mezcla de canales u operaciones matemáticas entre ellos, ya que al ser estar formada cada imagen por una matriz, se pueden realizar sobre ella todo tipo de transformaciones y operaciones matemáticas”⁵.

⁵Aplicaciones de la teledetección y fotointerpretación al sellado de suelos (2014)

- Componentes principales:

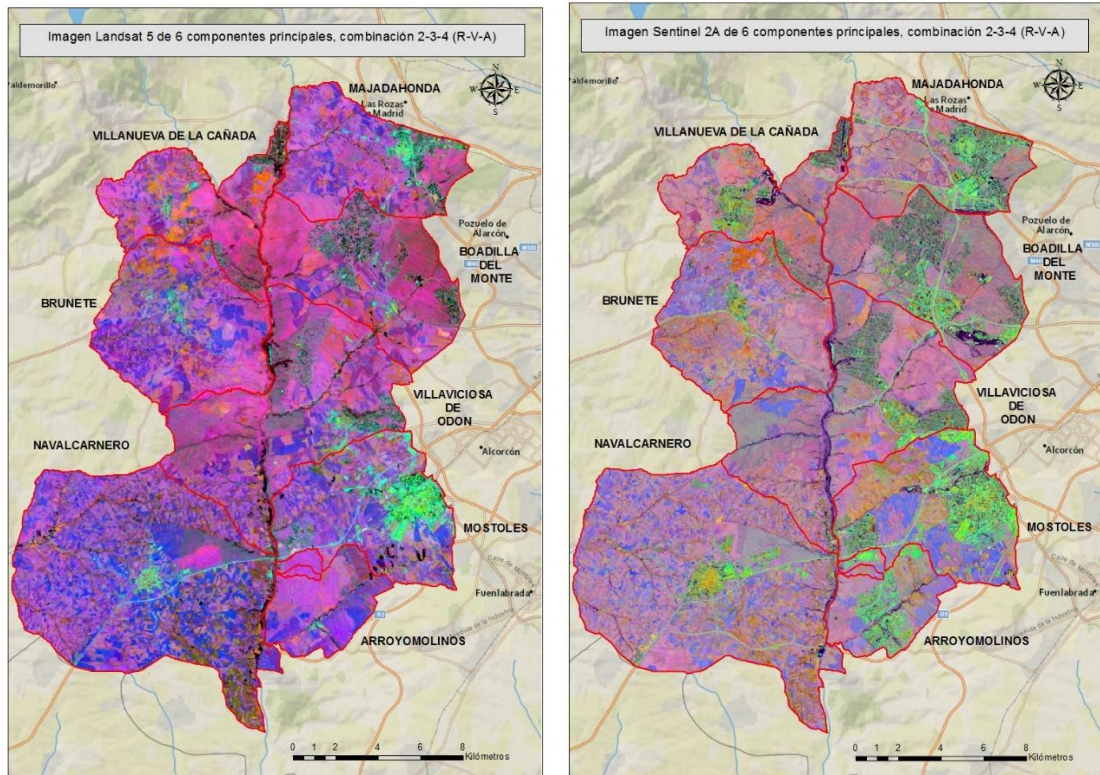


Fig.11. Mejora espectral de componentes principales.

El análisis de componentes principales permite realizar una labor de síntesis, en el sentido de que a partir de un conjunto de variables (las variables son las bandas de la imagen) lo transforma o resume en un conjunto menor (componentes principales) sin apenas perder información. Es muy útil ya que nos va a permitir visualizar en un número reducido de bandas las características de una imagen con muchas bandas.

El análisis se ha realizado con las seis bandas del satélite sentinel y con la imagen del Landsat 5 para comparar la evolución entre las dos fechas. Se puede observar como resulta bastante útil, ya que las zonas urbanas las ha delimitado muy bien, por una parte el sellado continuo aparece en verdes más brillantes, mientras que las zonas de sellado discontinuo pertenecientes a zonas de urbanización aparecen en verdes más oscuros. También ha captado bastante bien las vías de comunicación.

- Tasseled cap:

Mediante el tasseled cap lo que se consigue es destacar rasgos interesantes de la imagen, obteniendo nuevas bandas por combinación lineal de las originales. Lo que va a hacer es “reducir las bandas del sensor a tres nuevas bandas que representan el brillo o albedo (reflectividad de todas las bandas), el verdor (relación entre canales visibles e infrarrojo próximo) y la humedad (considerando el infrarrojo medio)”⁶. Además, permite un análisis

⁶ Aplicaciones de la teledetección y foteointerpretación al sellado de suelos (2014)

más preciso ya que reduce los componentes de ruido en las imágenes y las influencias atmosféricas.

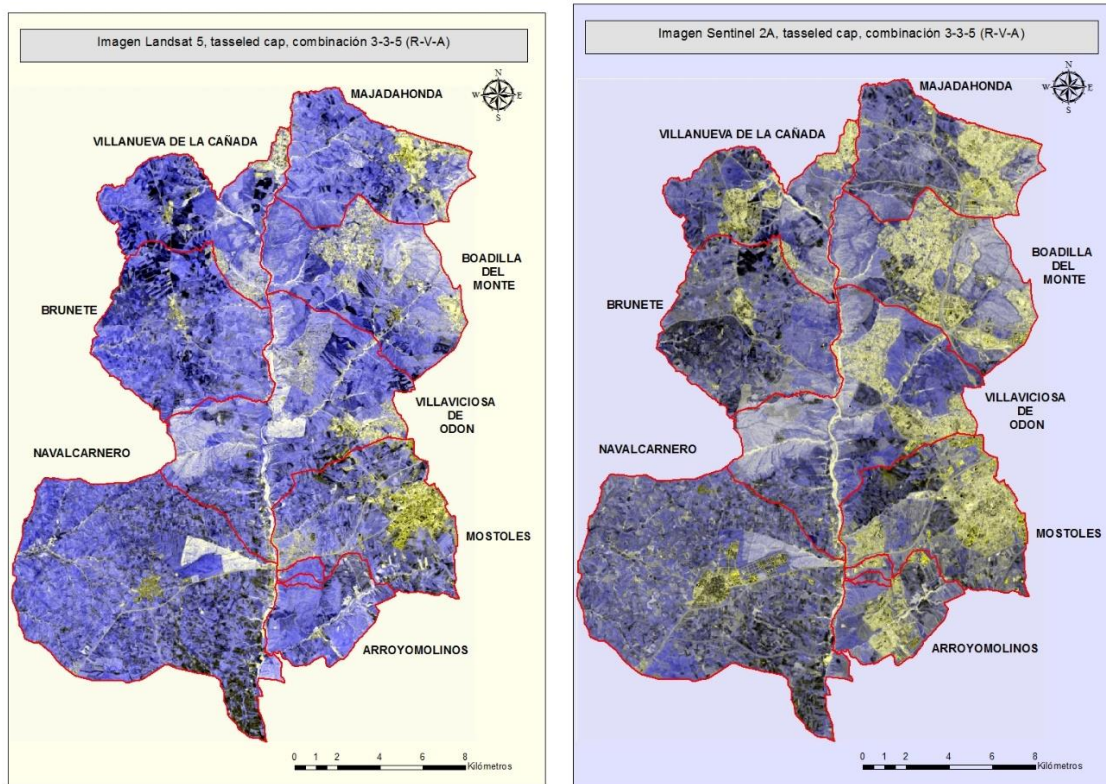


Fig.12. Mejora espectral Tasseled Cap.

En esta imagen las zonas selladas aparecen de un amarillo brillante, mientras que las zonas sin sellar aparecen en diferentes tonalidades de azul. También sirve para distinguir bastante bien los cursos de agua, así se puede ver en tonalidades muy claras, casi blancas, el río Guadarrama que discurre Norte-Sur a través de la zona de estudio.

Aparte de estas mejoras también se han aplicado las transformaciones RGB a IHS e IHS a RGB, pero no mostraban resultados significativos que ayudaran a interpretar mejor las zonas selladas, por lo que se ha decidido no incluirlas.

Para el tratamiento y clasificación posterior de las imágenes, no se han aplicado estas mejoras, ya que son muy buenas para el análisis visual pero no para hacer después tratamiento digital, porque los valores originales de los píxeles están modificados y por lo tanto se distorsionan. En la siguiente imagen se puede ver un índice realizado con mejoras espaciales, y cuando se hace zoom sobre él se ve como ha confundido la mayoría de los píxeles y resultaría imposible luego clasificar nada sobre él.



Fig.13. Zona ampliada de un índice con mejoras espaciales aplicadas.

6. ÍNDICES:

Para evaluar la expansión del sellado del suelo se han seleccionado varios índices que se han considerado idóneos para dicha función:

- **Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI):**

En primer lugar se ha calculado el índice NVDI (Normalized Difference Vegetation Index), aunque a priori es un índice de vegetación utilizado para evaluar el desarrollo y la calidad de la vegetación, en la práctica también es muy útil para diferenciar las zonas edificadas, como ocurrirá con el SAVI.

La fórmula utilizada es la siguiente: $NVDI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$.

El NVDI se sirve del infrarrojo cercano y de la banda roja del espectro visible. Esto es así porque la vegetación vigorosa refleja más en el infrarrojo cercano y muy poco en la banda roja, al contrario de lo que ocurre con la vegetación seca. Por lo que en un determinado pixel se nota mucha diferencia entre ambas bandas.

El índice resultante nos dará unos valores que oscilan entre -1 y +1. Significando valores próximos a uno la presencia de una vegetación densa, y valores en torno al cero o negativos ausencia de dicha vegetación.

- **Índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI):**

A continuación del NVDI se ha realizado un índice SAVI (Soil Adjusted vegetation Index), que también es uno de los principales índices de vegetación y de los que mejor resultados da a la hora de discriminar zonas urbanas.

Está sobre todo indicado para aquellas zonas donde la cobertura vegetal es baja (+/- <40%) y la superficie del suelo está al descubierto, ya que el índice SAVI ha sido desarrollado como una modificación del NVDI para corregir la influencia del brillo del suelo cuando la cobertura de vegetación es baja. Este índice puede ser muy óptimo para nuestra zona de estudio, ya que como hemos visto estamos en una zona de clima semiárido, con veranos muy secos, y no tenemos zonas de vegetación muy importante, más allá de la vegetación que se encuentra a lo largo de la ribera del Guadarrama, o en el monte de Boadilla al Noreste de la zona de estudio.

La fórmula utilizada es la siguiente: $SAVI = ((NIR - RED) / (NIR + RED + L)) \times (1 + L)$

Como se ve la estructura del SAVI es similar a la del NVDI, pero se añade un factor de corrección para el brillo del suelo (L). El valor de L varía en función de la cobertura de la vegetación: en zonas con mucha vegetación: L=0; y en zonas sin vegetación: L=1. Por lo general se suele utilizar un valor L de 0,5, ya que trabaja bien en la mayoría de las ocasiones y es el valor utilizado por defecto. Al igual que el NVDI nos da unos valores entre -1 y 1, en función de la densidad de la vegetación.

- **Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI):**

Por último se ha realizado el índice NBDI (Normalized Difference Built up Index). Este índice en principio puede parecer el más idóneo para nuestro estudio, ya que concretamente permite discriminar las zonas edificadas y suelos desnudos de las zonas con vegetación. Aunque como veremos a lo largo del estudio resulta ser un índice poco preciso y fiable. Como los anteriores nos darán valores entre -1 y 1, donde los valores cercanos a uno hacen referencia a zonas edificadas o superficies desnudas, y los valores en torno al cero o menores a zonas con vegetación.

La fórmula utilizada es la siguiente: $NDBI = (IRM - IRC) / (IRM + IRC)$

El NBDI, se sirve del infrarrojo medio donde tiene mayor reflectancia las cubiertas urbanas y superficies desnudas y del infrarrojo cercano donde tiene muy poca, y tiene más reflectancia la vegetación.

- **Clay minerals (materiales arcillosos):**

Al margen de los demás índices que se clasificarán y evaluarán, se ha decidido incluir el de clay minerals para ver en qué tipos de suelos se ha urbanizado, ya que con él podremos saber si son suelos más o menos permeables, un aspecto clave que se debería haber tenido en cuenta a la hora de llevar a cabo estudios hidráulicos previos a la construcción de infraestructuras. Se ha realizado sobre la imagen Sentinel del 2016. Este índice al igual que los otros nos dará valores entre -1 y 1, donde los valores cercanos a uno (representados en tonos más oscuros) nos indica la presencia de materiales muy arcillosos, y por lo tanto pocos permeables, ya que la arcilla es una roca sedimentaria que se caracteriza porque es prácticamente impermeable. Y los valores en torno al 0 o menores (representados en tonos más claros) nos indican zonas de materiales pocos arcillosos y por lo tanto muy permeables.

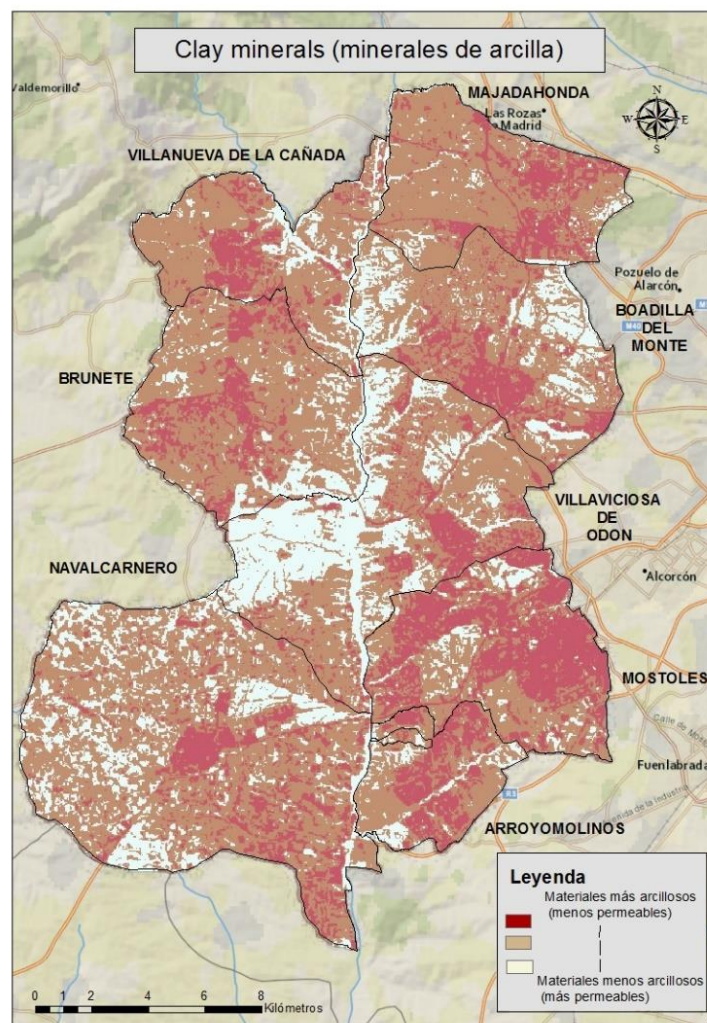


Fig.14. Índice Clay Minerals.

En la imagen se puede apreciar como las áreas más permeables se corresponden a las zonas por donde discurre el Guadarrama y donde hay presencia de vegetación forestal. Y las zonas poco permeables, es decir, aquellas compuestas por materiales muy arcillosos, son en las zonas donde aparentemente se han instalado los núcleos urbanos.

6.1. CLASIFICACIÓN Y CORRECCIÓN DE LOS ÍNDICES:

Para los demás índices, una vez calculados se ha procedido a su clasificación para intentar discriminar las áreas urbanas de nuestra zona de estudio. Para lo cual se generarán en cada índice signaturas de cada una de las clases presentes en nuestra área, aunque se pondrá una mayor atención y precisión en las zonas urbanas. Estas clases han sido definidas mediante la fotointerpretación del terreno, se han establecido las siguientes como las más representativas: erial/suelos desnudos, urbano, arbolado forestal, matorral, combinación de cultivos y vegetación, cultivos herbáceos y pastizal.

Una vez creadas las signaturas de cada clase, se ha procedido a hacer la clasificación supervisada de cada índice, utilizando para ello dos algoritmos clasificadores distintos para ver cuál de ellos clasificaba mejor las áreas urbanas. Se han elegido los algoritmos de máxima probabilidad y de mínima distancia, puesto que son los que suelen dar mejor resultados en este tipo de estudios.

Una vez clasificados los índices, hay que proceder a su corrección, puesto que en algunas clases el valor del pixel entre unas y otras es muy parecido y se confunden. Para ello me he valido de la herramienta recode, con la que se han digitalizado polígonos atribuyéndoles un valor correcto.

- Clasificación NDBI de 1987:

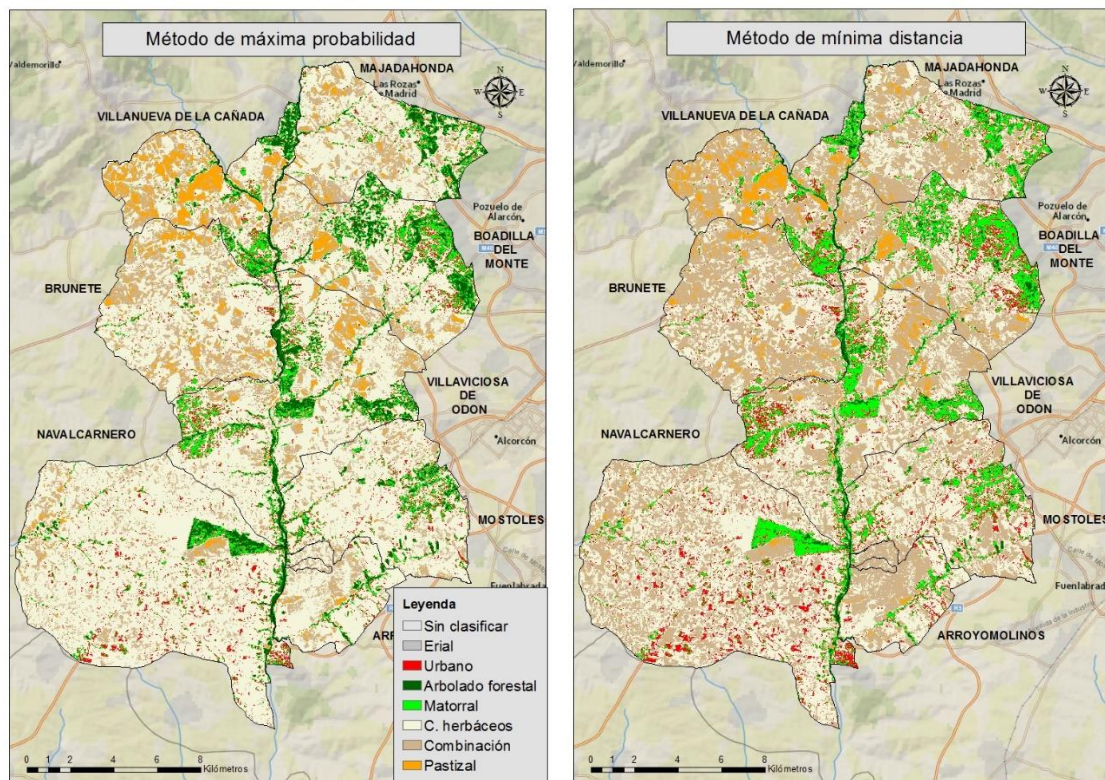


Fig.15. Clasificación NDBI 1987

En primer lugar se ha realizado la clasificación NBDI del año 1987. Aunque pudiera parecer que esta clasificación es la más idónea para este tipo de estudios, ya que es un índice específico para calcular el área construida, en la práctica los resultados son muy malos.

En este caso no se ha procedido a realizar ninguna corrección de las clasificaciones, ya que tanto como con el método de máxima probabilidad y el de mínima distancia no discrimina bien la clase de urbano, y para corregirlo habría que cambiar todo el resultado y digitalizar bien todas las zonas, lo que no tendría sentido para nuestro estudio, puesto que habría que ignorar totalmente los resultados obtenidos en el índice.

Como se aprecia, en el método de máxima probabilidad apenas reconoce las áreas urbanas, y las que reconoce son erróneas, confundiéndolas con la clase de cultivos herbáceos. En el de mínima distancia, reconoce más áreas urbanas, pero otra vez todas totalmente erróneas, confundiéndolas con cultivos herbáceos y con zonas de matorral.

- Clasificación NVDI de 1987:

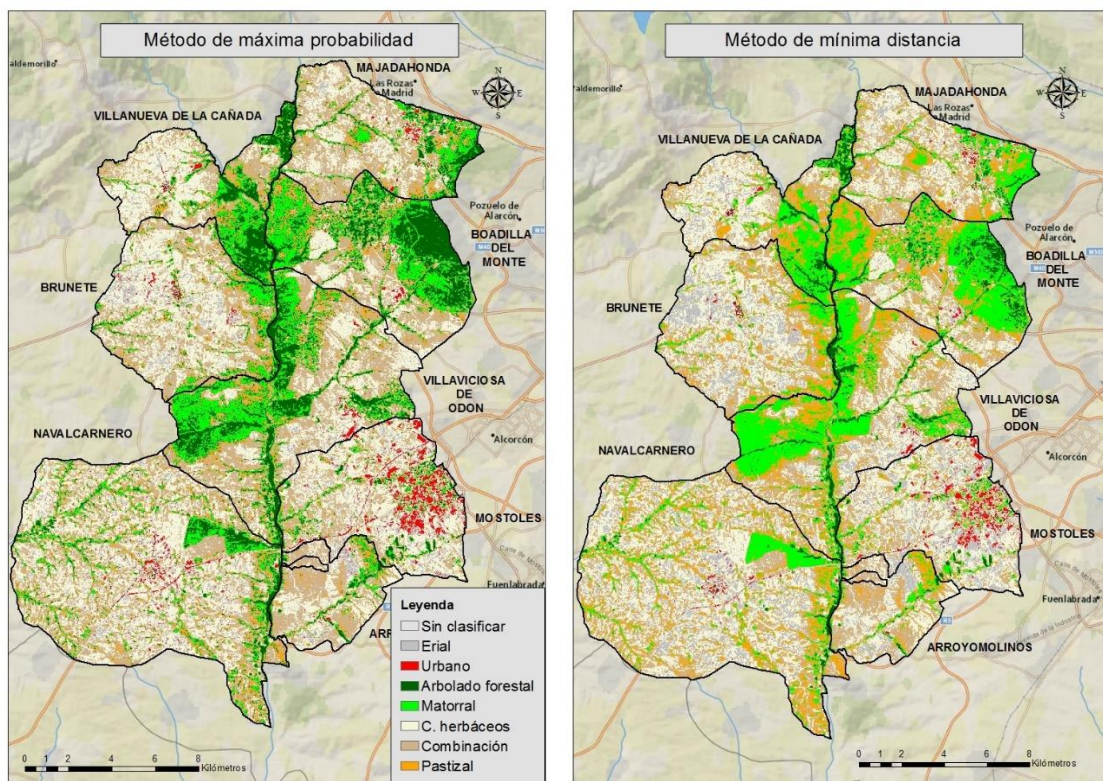


Fig.16. Clasificación NVDI 1987

En el caso del NVDI no había mucha diferencia entre los dos métodos, pero se ha decidido coger el de máxima probabilidad ya que las carreteras y algún núcleo les ha identificado mejor. También, y esto ha sido tónica general en todos los índices calculados, el método de máxima probabilidad reconoce mejor las zonas de vegetación, diferenciando con más precisión entre matorral y arbolado forestal en nuestro estudio. Mientras que en el caso del método de mínima distancia diferencia peor estas clases y generaliza más, aplicando

a casi todas las zonas la clase de matorral, apareciendo muy pocas zonas de arbolado forestal.

En cuanto a las correcciones ha habido que incidir sobre todo en los núcleos de población más pequeños, ya que pese a que sí había identificado píxeles de urbano en ellos, muchos se habían confundido sobre todo con cultivos herbáceos ya que el valor del píxel es próximo entre ellos. Este hecho también se ve claramente en zonas de erial, donde la diferencia del valor del píxel entre esta clase y la urbana son mínimos, por eso le cuesta distinguir entre zonas de eriales o suelos desnudos y algunas zonas de urbano.

Se ha puesto una mayor atención en corregir los píxeles alrededor de los núcleos de Majadahonda, Villanueva de la Cañada y Brunete. También las zonas de urbanizaciones, como son la urbanización El bosque en Villaviciosa de Odón y Las Lomas en Boadilla del Monte. Ya que estas zonas presentan un sellado discontinuo y le cuesta mucho discriminar el píxel de urbano, ya que está rodeado de mucha vegetación y suelo desnudo, a lo que hay que añadir que el satélite Landsat no tiene una gran resolución espacial. Se han corregido todos esos valores de píxel, y luego con la función recode se han puesto como clase de urbano en la tabla de atributos.

Corrección NVDI 1987:

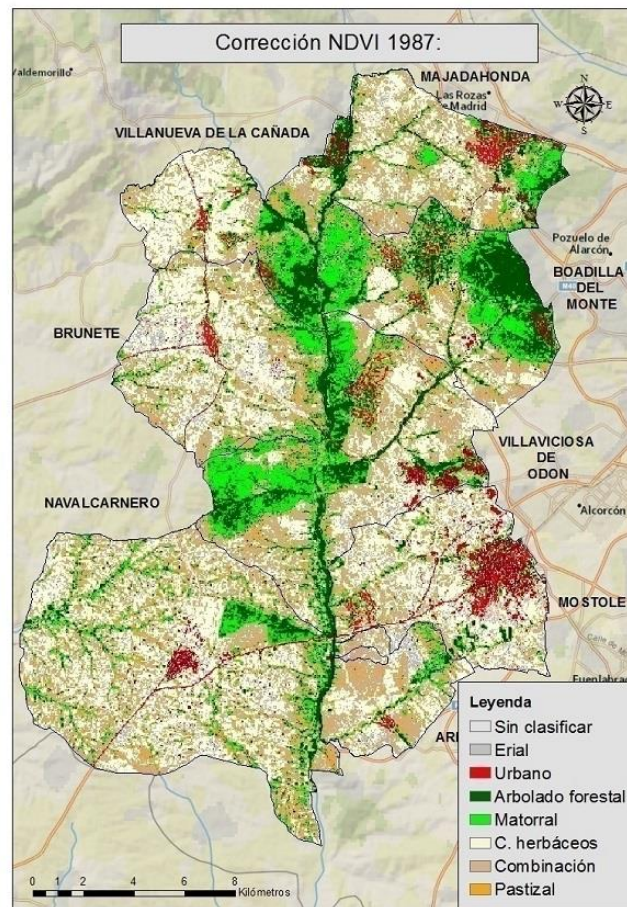


Fig.17. Corrección NVDI 1987

- Clasificación SAVI de 1987:

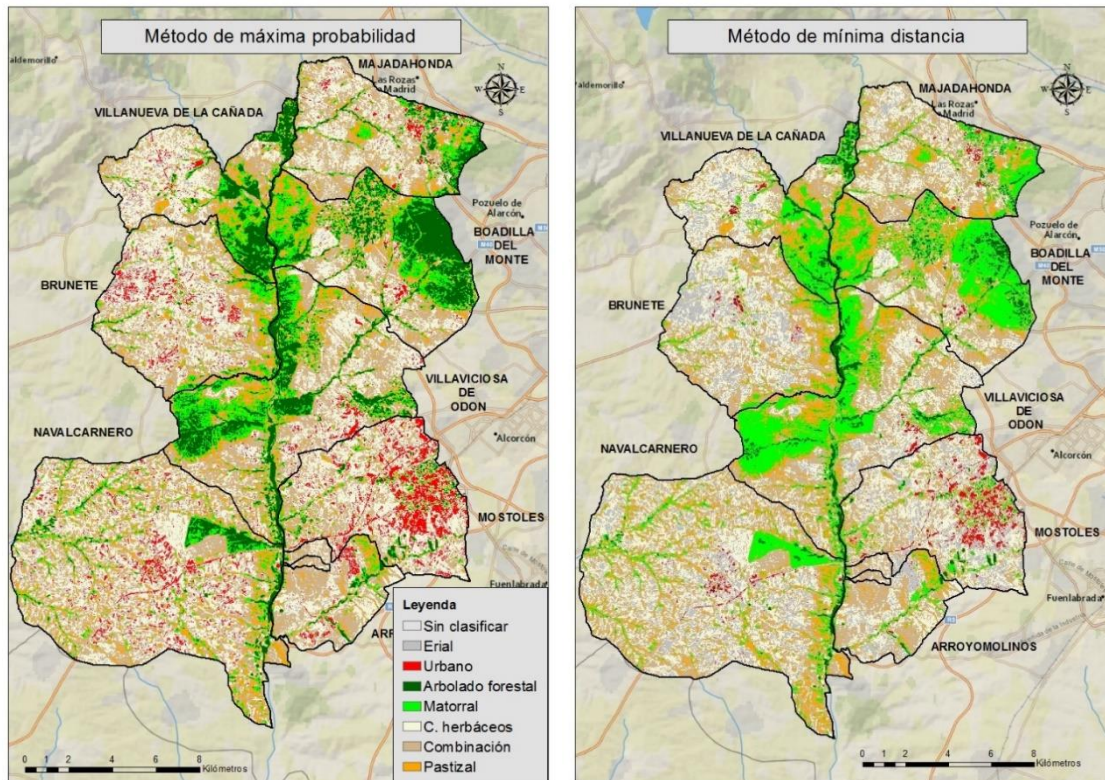


Fig.18. Clasificación SAVI 1987

En cuanto al SAVI, se ha escogido el método de mínima distancia, ya que en el de máxima probabilidad numerosos píxeles de urbano han sido confundidos con la clase de erial y supondría mucho más trabajo a la hora de realizar las correcciones. En éstas al igual que ocurría en el NVDI, se ha incidido más sobre los núcleos de población más pequeños, aunque esta vez sí que ha identificado mejor estas zonas, y las zonas de urbanizaciones, que como ocurría con el NVDI las sigue confundiendo. Así, podemos observar como el sellado discontinuo, correspondientes a zonas de urbanizaciones con chalets con mucha vegetación alrededor, no lo separa bien con ningún método, por lo que para su visualización se ha procedido a digitalizar estas zonas desde la imagen Landsat.

Por otro lado, en las clasificaciones se ha decidido separar el suelo sellado en varias clases, ya que por ejemplo entre unas zonas selladas y otras presentan distintos valores por sus materiales de edificación. Por ejemplo las zonas industriales tienen valores muy cercanos al -1, mientras que los núcleos urbanos o urbanizaciones tienen valores más altos. Luego ambas clases se han unido con la función recode.

Corrección SAVI 1987:

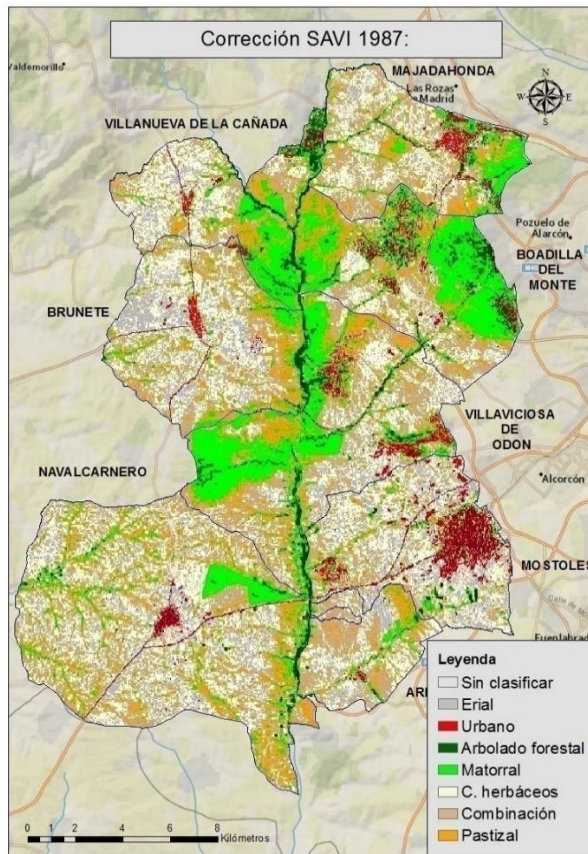


Fig.19. Corrección SAVI 1987

- Clasificación NBDI de 2016:

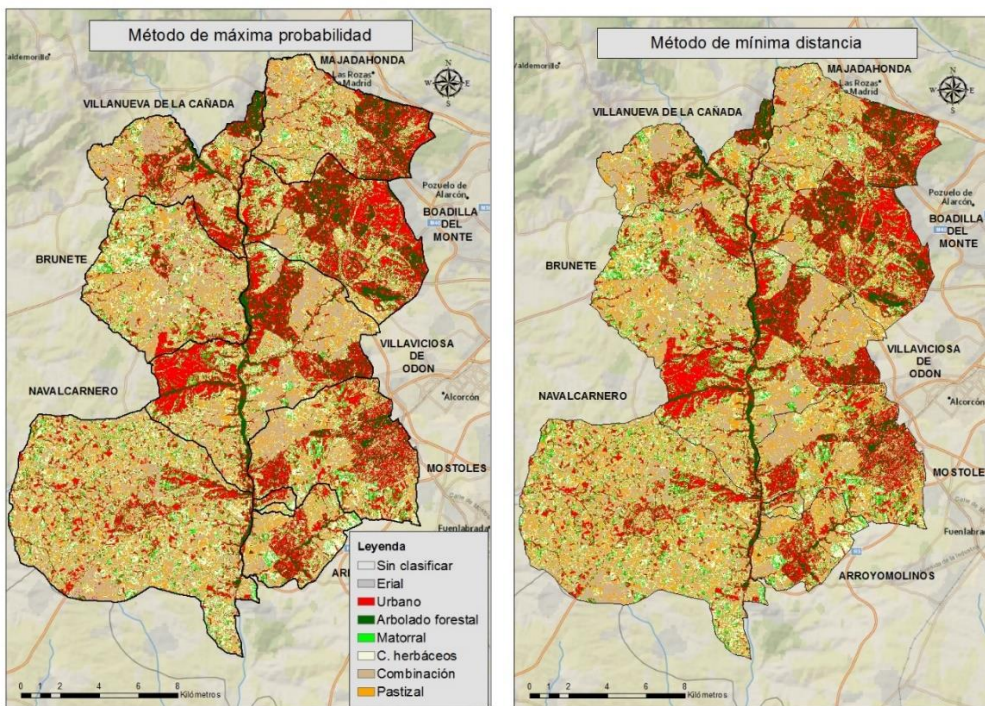


Fig.20. Clasificación NBDI 2016

Como ocurría en el año 1987 este índice no vale, puesto que las zonas urbanas están totalmente equivocadas. Si en el año 1987 con el satélite Landsat apenas encontraba zonas urbanas, en 2016 con el satélite Sentinel ocurre todo lo contrario, nos identifica muchísimas zonas urbanas, pero nuevamente totalmente erróneas, ya que en este caso se ha confundido con otras clases como la de matorral y arbolado forestal.

Por lo tanto, en este caso tampoco se procederá a realizar la corrección de la clasificación, ya que no merecería la pena por la cantidad de píxeles equivocados. En este punto, ya se puede establecer que en nuestro caso de estudio el índice NBDI no es una opción válida para estudiar la evolución del sellado del suelo.

- Clasificación NVDI 2016:

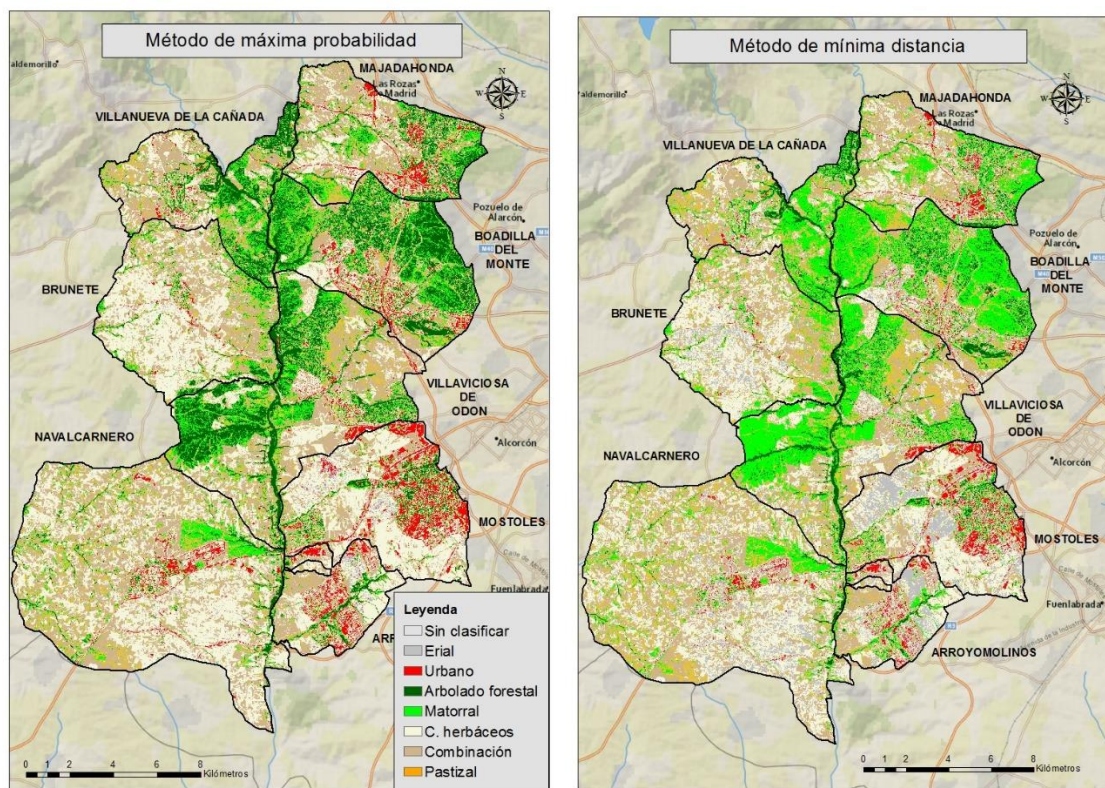


Fig.21. Clasificación NVDI 2016

En el NVDI del 2016, se podría pensar que el Sentinel al tener una mayor resolución espacial conseguiría discriminar en mayor medida las distintas clases mejor que el Landsat. Y aunque en parte es así, hay zonas como las de urbanización con sellado discontinuo en las que sigue sin discriminarlo bien y confundiéndolo con las cubiertas que tiene a su alrededor.

Esto se aprecia muy bien en las siguientes imágenes pertenecientes a la población de Villaviciosa de Odón, donde por una parte nos encontramos el núcleo histórico del pueblo que presenta un sellado continuo y lo discrimina bien. Y por otra parte a las afueras del pueblo nos encontramos una zona de urbanizaciones que presenta un sellado discontinuo

y lo confunde con vegetación, puesto que son zonas de chalets unifamiliares, con viviendas muy dispersas entre sí, con mucho suelo desnudo también, y le es imposible identificar el pixel, a no ser que sean estructuras muy grandes, como polideportivos, centro de salud... Por otra parte si nos fijamos en la parte inferior de la imagen vemos como con las zonas industriales son las que mejor reconoce.

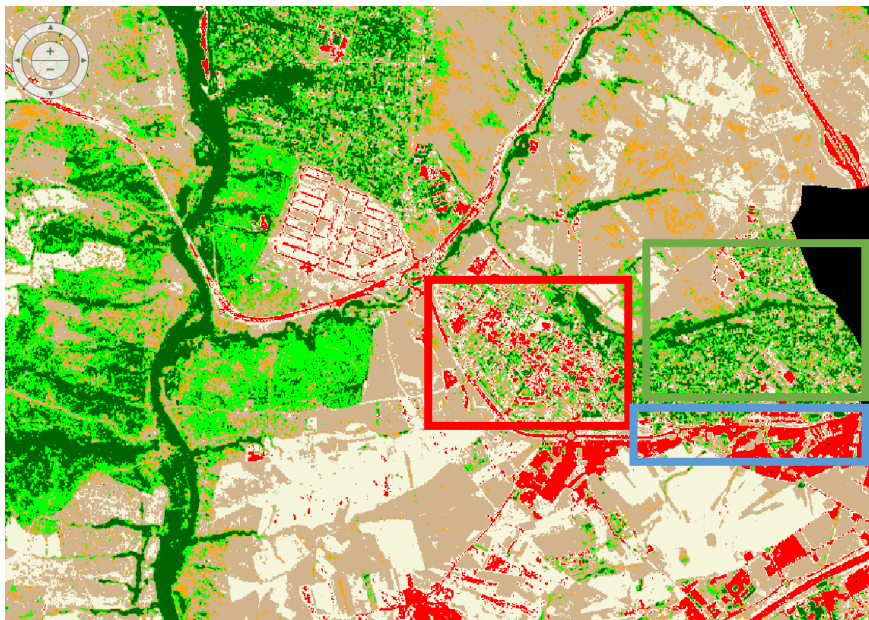
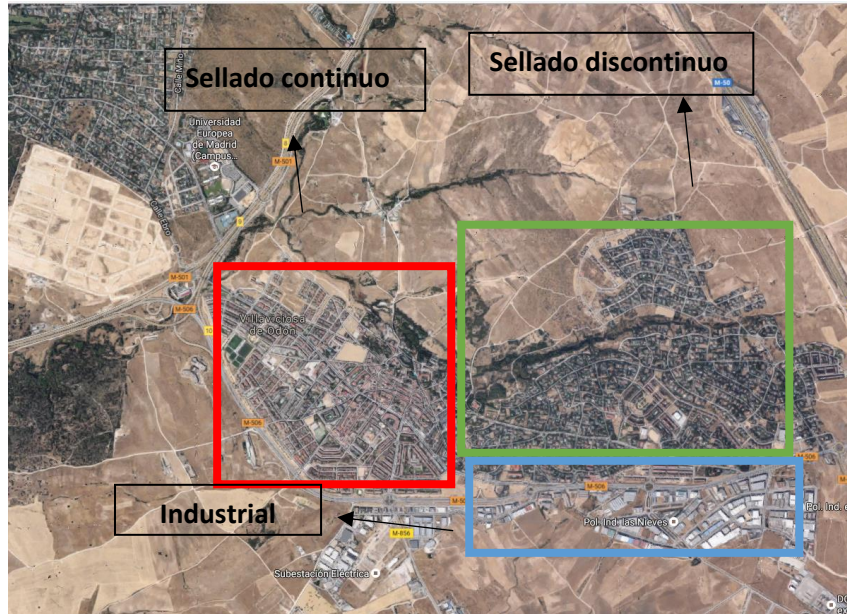


Fig.22. Zonas de sellado continuo y discontinuo



Fig.23. Ampliación zona de sellado discontinuo

Teniendo en cuenta que estos problemas se repiten tanto en el método de máxima probabilidad como en el de mínima distancia, se ha decidido coger el de máxima probabilidad, ya que ha identificado un poco mejor las vías de comunicación y las áreas urbanas. Aunque en las correcciones ha habido que incidir sobre todo en las zonas de sellado discontinuo, en las localidades de Brunete y Villanueva de la Cañada que se habían delimitado muy mal, también ha habido que cambiar algunas zonas de erial que se habían confundido con urbano.

Corrección NDVI 2016:

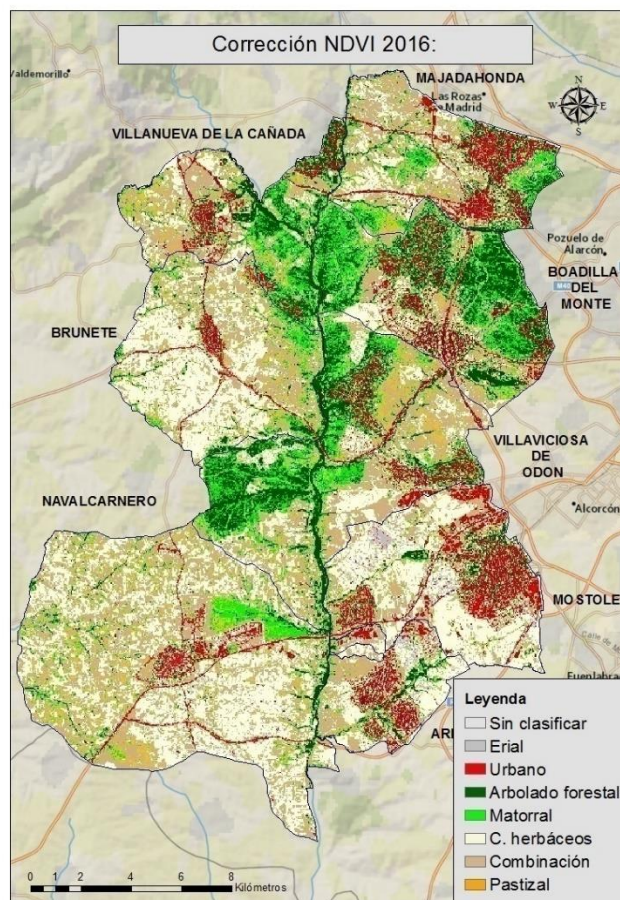


Fig.24. Corrección NDVI 2016

- Clasificación SAVI de 2016:

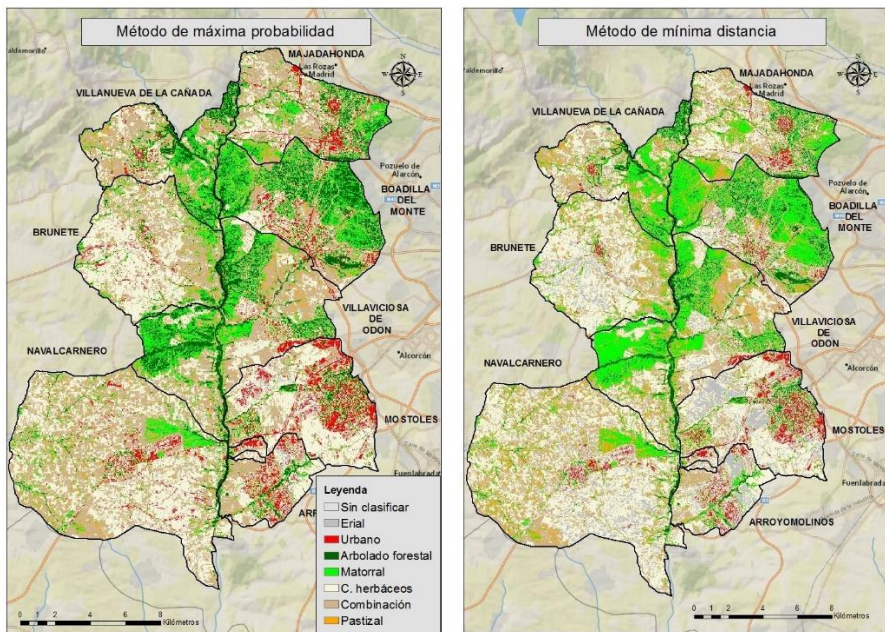


Fig.25. Clasificación SAVI 2016

Por último tenemos el Savi de 2016, en el que se ha decidido escoger el método de mínima distancia, ya que en el de máxima probabilidad muchas zonas de eriales las reconocía como urbano y hubiera sido más difícil luego a la hora de corregir. Se ha incidido sobre todo dentro de los núcleos, puesto que muchos pixeles se habían confundido con matorral y suelo desnudo, y en las zonas de urbanización nuevamente.

Corrección SAVI 2016:

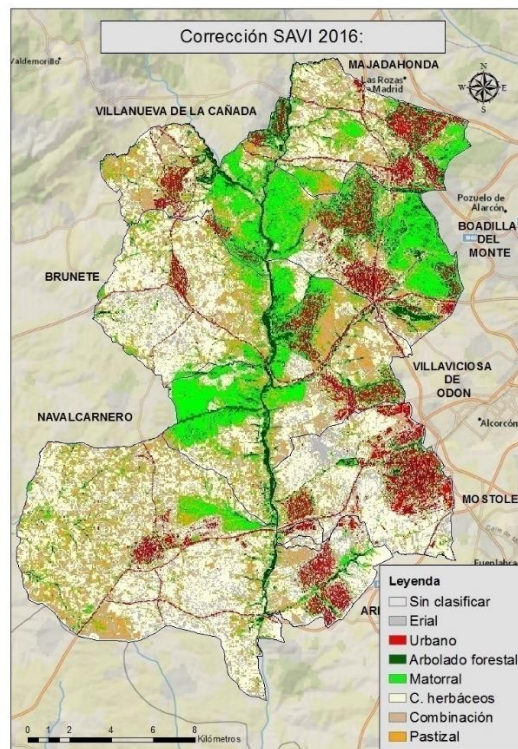


Fig.26. Corrección SAVI 2016

7. CLASIFICACIONES SUPERVISADAS:

Una vez clasificados y corregidos los índices, se ha realizado directamente una clasificación supervisada en ambas fechas para comprobar con cuál de los dos métodos se obtiene mejor resultado con el fin de realizar posteriormente una evaluación. Sobre estas clasificaciones no se ha realizado ninguna corrección, los resultados se han dejado tal cual se han obtenido después de crear las firmas de cada zona y realizar la clasificación, ya que estos han sido de por sí bastante precisos y no había necesidad de ello.

Tanto en el año 1987 como en el 2016 la clasificación se ha realizado por el método de máxima probabilidad, ya que apenas había diferencia entre éste y el de mínima distancia. Aunque al igual que sucede con los índices, el de mínima distancia diferencia peor entre las clases de arbolado forestal y matorral, pero para el estudio del sellado de suelo sería irrelevante uno u otro ya que apenas se encontraban diferencias a la hora de delimitar las zonas urbanas.

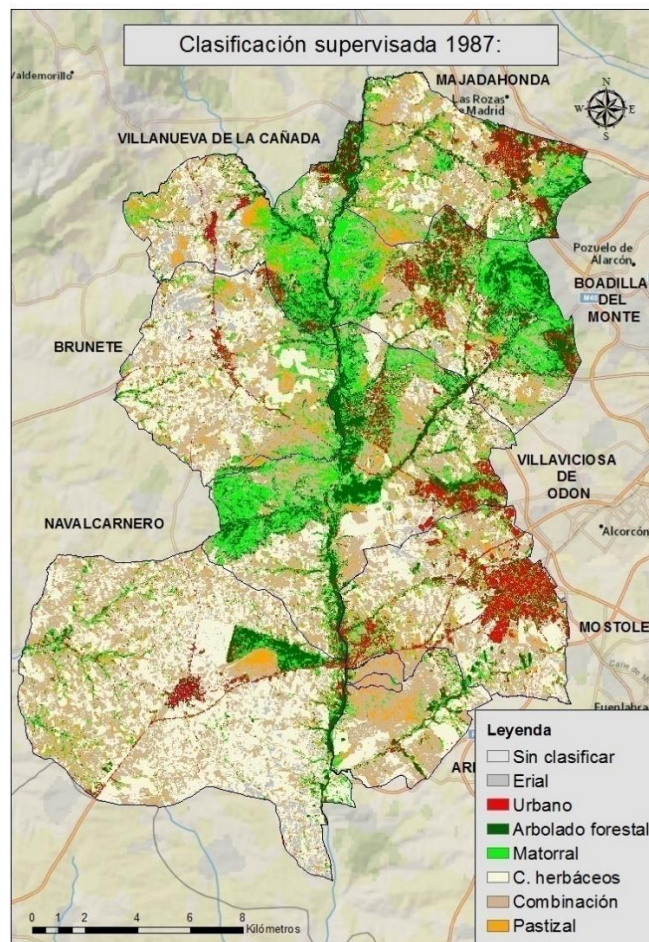


Fig.27. Clasificación supervisada 1987

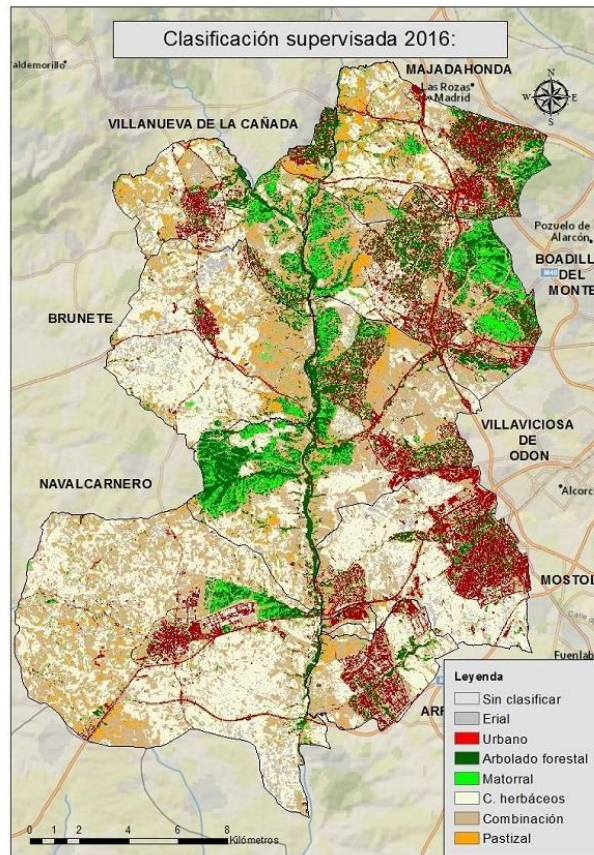


Fig.28. Clasificación Supervisada 2016

8. EVALUACIÓN DE EXACTITUD DEL SUELO SELLADO:

Por último, cuando ya se tienen todas las clasificaciones realizadas y corregidas, se va a proceder a evaluarlas para ver cuál de ellas da un resultado más preciso y acertado.

Para ello, el software ERDAS Imagine utilizado para el estudio, nos proporciona a la hora de evaluar varios métodos que nos pueden ayudar. En primer lugar mientras se hacían las clasificaciones supervisadas me he valido de *imágenes de alarma* para que mostrasen para cada una de las cubiertas si estaba cogiendo los píxeles que le estaba definiendo, o estaba cogiendo otros correspondientes a cubiertas distintas.

También han ayudado las *firmas espectrales*, mediante las cuales se puede observar el comportamiento de las distintas cubiertas a lo largo del espectro electromagnético, y comprobar si alguna clase tiene un comportamiento distinto al esperado, lo que indicaría que quizás se han cogido píxeles equivocados o pertenecientes a otra clase.

Por último, el método que nos ayudará a evaluar la exactitud con la que se ha clasificado el suelo sellado será la *matriz de confusión*. Mediante este método se ha generado un listado de puntos de verificación de la clase seleccionada (en nuestro caso urbano), para los que tengo tanto su cobertura real como la deducida por la clasificación. Con ello puede generarse una tabla, denominada matriz de confusión, que recoge los conflictos presentes entre categorías. De esta forma, podremos conocer la fiabilidad general de la clasificación. Una vez hecho esto, se comparará el resultado de cada clasificación, y las que mejor resultado den serán las que se utilicen para valorar el incremento de suelo sellado en la zona de estudio.

Para poder comparar los píxeles aleatorios clasificados con los reales nos podemos valer de ortofotos, fotografías aéreas, mapas temáticos... En el caso de la imagen del año 2016 no ha habido mucho problema, ya que la información disponible es mucho más abundante, pudiendo acceder a ortofotos del PNOA actualizadas, SIOSE (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España)...

Sin embargo, para la imagen de 1987 la información es mucho más escasa. Por una parte disponemos de las fotografías aéreas del vuelo nacional 1980-1986, pero estas imágenes no tienen demasiada calidad y resolución, además no ofrecen una imagen integral de toda la zona de estudio, sino que es presentada en pequeñas parcelas o zonas, por lo que se ha descartado su utilización.

También se dispone de un mapa topográfico de 1986 de la Comunidad de Madrid y de un mapa de ocupación del suelo de 1980. En principio, lo normal por fecha sería coger el mapa topográfico. No obstante, comparando uno y otro, el mapa de ocupación de suelo pese a ser de 1980 nos ofrece una mayor precisión a la hora de delimitar las zonas urbanas, como se puede apreciar en las siguientes imágenes de ejemplo de la zona de Villanueva de la Cañada, Brunete y Boadilla del Monte:

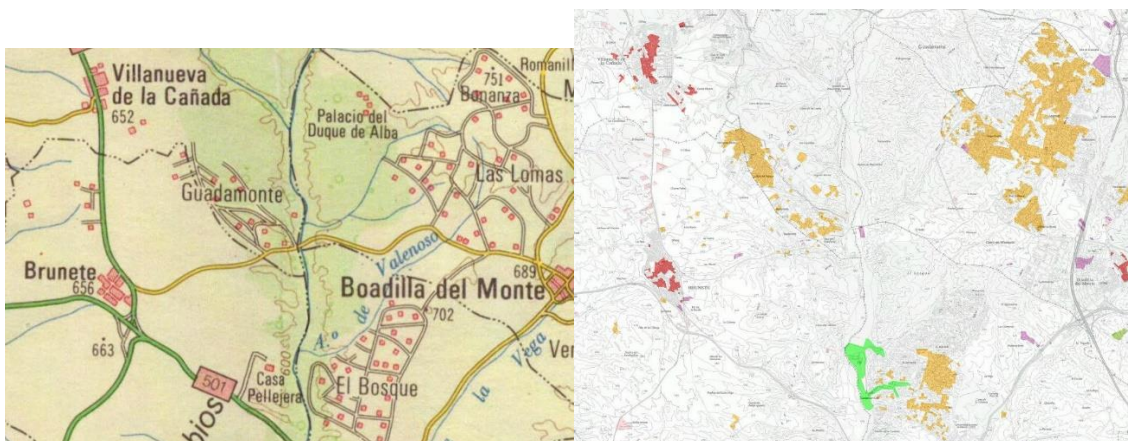


Fig.29. Mapa topográfico de 1986 a la izquierda y mapa de ocupación del suelo de 1980 a la derecha.

Con lo cual ya tenemos todo lo necesario para comenzar la evaluación. Por una parte las clasificaciones realizadas anteriormente, y por otra, las imágenes con las que comparar si los puntos que se generen aleatoriamente de la clase urbano pertenecen verdaderamente a esa clase:

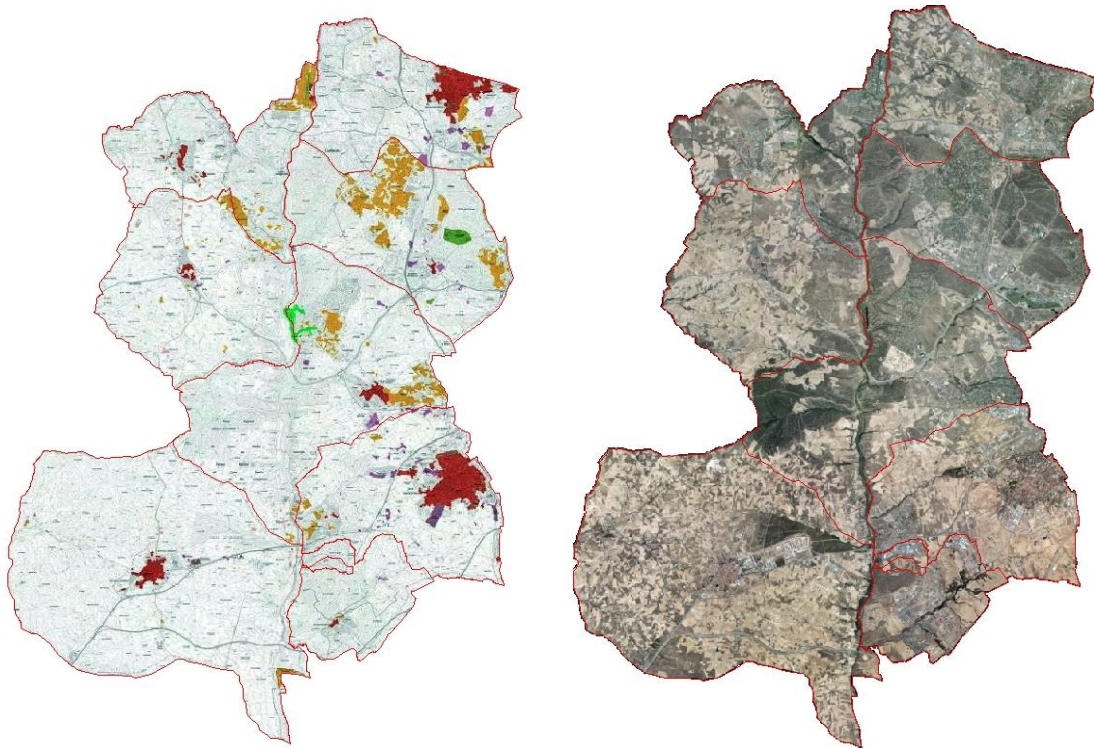


Fig.30. Mapa de ocupación del suelo de 1980 a la izquierda y ortofoto de 2016 a la derecha.

Una vez generados los puntos y comparados con las imágenes se generan unas tablas donde se recoge la precisión general de la clasificación en base a los resultados obtenidos. Las tablas generadas para las clasificaciones del año 1987 han sido las siguientes:

SAVI 1987					
Clase	Referencias totales	Clasificados totales	Número correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
Urbano	41	60	41	100%	68,3%
Erial/ suelo desnudo	19				
Arbolado forestal					
Matorral					
C.Herbáceos					
Combinación					
Pastizal					
TOTAL	60	60	41		
Precisión General de la clasificación: 68,3 %					

Tabla 4. Matriz de confusión SAVI 987

NVDI 1987					
Clase	Referencias totales	Clasificados totales	Número correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
Urbano	43	60	43	100%	71,7%
Erial/suelo desnudo	17				
Arbolado forestal					
Matorral					
C.Herbáceos					
Combinación					
Pastizal					
TOTAL	60	60	43		
Precisión General de la clasificación: 71,7%					

Tabla 5. Matriz de confusión NVDI 1987

Clasificación Supervisada 1987					
Clase	Referencias totales	Clasificados totales	Número correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
Urbano	47	60	47	100%	78,3%
Erial/suelo desnudo	13				
Arbolado forestal					
Matorral					
C.Herbáceos					
Combinación					
Pastizal					
TOTAL	60	60	47		
Precisión General de la clasificación: 78,3%					

Tabla 6. Matriz de confusión clasificación supervisada 1987

Las clasificaciones de 1987 en general no presentan una precisión muy alta. Esto es debido, sobre todo, a que lo estamos comparando con el mapa de suelos de 1980, por lo que hay una diferencia de siete años con nuestra clasificación. Esto hace que algunos puntos han podido caer en zonas urbanas, pero en el mapa de usos de suelo no aparecen como tal, ya que todavía no se había construido en esa zona.

Además, en muchas zonas de sellado discontinuo, como las zonas de urbanizaciones en las que se sabe que hay muchas áreas dispersas sin sellar, en el mapa aparecen como un polígono cerrado sin discriminarlas, lo que ha inducido también que aparecieran como error cuando un punto caía dentro de ellas.

Todo lo que ha caído fuera de las zonas urbanas se le ha dado la consideración de erial o suelo desnudo, ya que en el mapa de usos del suelo no se puede saber exactamente a qué clase corresponde porque no viene reflejado.

La que mejor resultado ha dado ha sido la clasificación supervisada, con una precisión general del 78,3%; siete puntos porcentuales por encima de la clasificación del índice NVDI, y diez por encima del SAVI, que ha sido el que peor resultado ha arrojado.

Las tablas generadas para las clasificaciones del año 2016 han sido las siguientes:

SAVI 2016					
Clase	Referencias totales	Clasificados totales	Número correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
Urbano	52	60	52	100%	86,7%
Erial/suelo desnudo	2				
Arbolado forestal					
Matorral	2				
C.Herbáceos	3				
Combinación	1				
Pastizal					
TOTAL	60	60	52		
Precisión General de la clasificación: 86,7%					

Tabla 7. Matriz de confusión SAVI 2016

NVDI 2016					
Clase	Referencias totales	Clasificados totales	Número correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
Urbano	53	60	53	100%	88,3%
Erial/suelo desnudo	2				
Arbolado forestal					
Matorral	3				
C.Herbáceos	1				
Combinación	1				
Pastizal					
TOTAL	60	60	53		
Precisión General de la clasificación: 88,3%					

Tabla 8. Matriz de confusión NVDI 2016

Clasificación supervisada 2016					
Clase	Referencias totales	Clasificados totales	Número correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
Urbano	57	60	57	100%	95%
Erial/suelo desnudo	1				
Arbolado forestal					
Matorral	2				
C.Herbáceos					
Combinación					
Pastizal					
TOTAL	60	60	57		
Precisión General de la clasificación: 95%					

Tabla 9. Matriz de confusión clasificación supervisada 2016

En las clasificaciones del 2016 nos encontramos con precisiones mucho mayores, debido sobre todo a dos factores: por una parte que estas clasificaciones han sido comparadas con una imagen de fecha similar, y por otra que el satélite Sentinel nos ofrece una mayor resolución espacial, lo que permite diferenciar mucho mejor los píxeles, y por lo tanto una clase de otra.

De nuevo la que mejor resultado da es la clasificación supervisada, con una precisión general del 95%; siete puntos porcentuales por encima de la clasificación del índice NVDI, y nueve del SAVI.

Casi todas las confusiones se han dado con la clase matorral o con la de suelo desnudo y eriales. Esto es debido a que como hemos visto en las zonas de urbanización con sellado discontinuo es difícil discriminar el píxel de urbano de las otras clases a su alrededor, sobre todo matorral, y de ahí esas confusiones. También con suelo desnudo y erial, ya que alrededor y dentro de los núcleos urbanos nos encontramos con mucho suelo sin

construir. Algunas también en cultivos herbáceos y combinación de cultivos y vegetación, debido a que son puntos que caen muy cerca o en los bordes de las zonas selladas y por la resolución de la imagen no se pueden ajustar más, siendo pequeños errores inevitables debido al tamaño del pixel.

9. VALORACIÓN DEL INCREMENTO DE SELLADO DE SUELO:

Una vez que ya se conocen cuáles son las clasificaciones que presentan una precisión mayor, que en este caso son las dos supervisadas, serán las que se utilicen para calcular el incremento de sellado de suelo en la zona de estudio. Para ello el programa ERDAS Imagine cuenta con la opción de calcular el área para cada una de las clases clasificadas, dándonos el total de hectáreas ocupadas por cada una de ellas.

En el caso de la clase urbano, y por tanto de las zonas selladas, en el año 1987 se contaban con 2.645 hectáreas, y en el 2016 se alcanzaron las 5.315 hectáreas de suelo sellado. Esto supone un aumento de 2.670 hectáreas de sellado de suelo durante estos años, lo que significa un aumento de éste del 6,6% sobre el total del suelo. Puede parecer un porcentaje no muy alto, pero estamos hablando de una zona muy extensa, con 40.438 hectáreas en total, donde algunos municipios como Navalcarnero tienen más de 10.000 hectáreas, por lo que ese porcentaje engloba mucha extensión. Así, desde 1987 hasta el 2016, el suelo sellado se ha llegado a duplicar, incrementándose un 101% durante estas fechas.

Todo ello queda reflejado en la siguiente tabla:

	Área	Variación sellado	Incremento sellado	Incremento respecto al total del suelo
Sellado 1987	2.645 ha	2.670 ha	101%	6,60%
Sellado 2016	5.315 ha			
Total de suelo (área de estudio)	40.438 ha			

Tabla 10. Incremento del sellado

Incremento sellado: $2.670 \text{ ha} / 2.645 \text{ ha} * 100 = 101\%$. Esto hace referencia al incremento de sellado suelo que se ha producido desde 1987 hasta 2016.

Incremento respecto al total del suelo: $2.670 \text{ ha} / 40.438 \text{ ha} * 100 = 6,60\%$. Este es el porcentaje de suelo sellado que nos encontramos a mayores en la zona de estudio. Es decir, en 1987 el suelo sellado representaba un 6,54% del suelo total de la zona de estudio (2.645 ha), mientras que en el 2016 representaba un 13,14 % (5.315 ha), por lo que ha habido un incremento del 6,60 % (2670ha) de la superficie total que ocupa el sellado de suelo.

Podemos establecer, por lo tanto, que el sellado del suelo entre 1987 y 2016 en nuestra zona de estudio ha aumentado un 101%, más del doble, y ha pasado a representar el 13,14% del total del suelo.

No es de extrañar este aumento, ya que se trata de municipios situados muy cerca de Madrid capital, en torno a unos 20-30 kilómetros, con un fuerte carácter urbano-residencial, en la que mucha población en los últimos años ha decidido instalarse en ellas por la cercanía con la capital, la posibilidad de acceder a viviendas más baratas, mejor calidad de vida... Y todo ello ha quedado reflejado como hemos visto en el aumento de sellado de suelo.

En general todos los núcleos urbanos han expandido su radio de acción, aunque llama la atención sobre todo Arroyomolinos, ya que si comparamos la evolución del sellado, en 1987 apenas se reconoce el núcleo tradicional donde vivían 298 habitantes, y en el 2016 podemos apreciar claramente su expansión, viviendo casi 27.000 personas. Además, han aparecido también nuevas zonas comerciales y polígonos industriales:

1987:

2016:

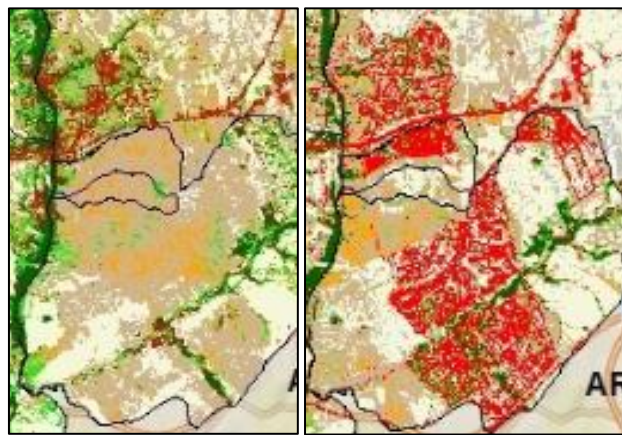


Fig.31. Comparativa entre las zonas selladas en Arroyomolinos en 1987 y en 2016

En este aspecto también destacar el caso de Boadilla del Monte:

1987:

2016:

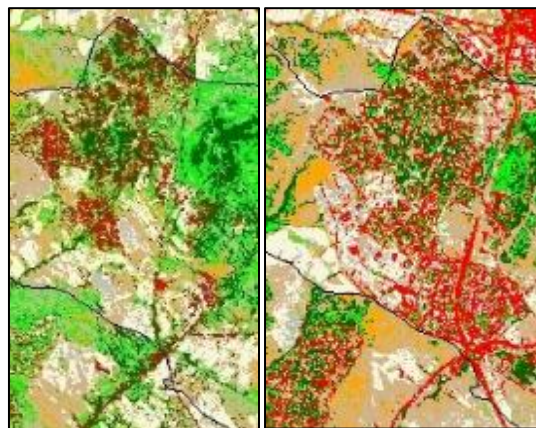


Fig.32. Comparativa entre las zonas selladas en Boadilla del Monte en 1987 y en 2016

Los espacios industriales y de servicios también se han incrementado, mencionar el caso de Majadahonda y el polígono industrial el Carralero, en Navalcarnero y el polígono industrial Alparrache II, o en Móstoles y el Polígono industrial Las Nieves.

Navalcarnero y el polígono industrial Alparrache II en 1987 a la izquierda, y en 2016 a la derecha:

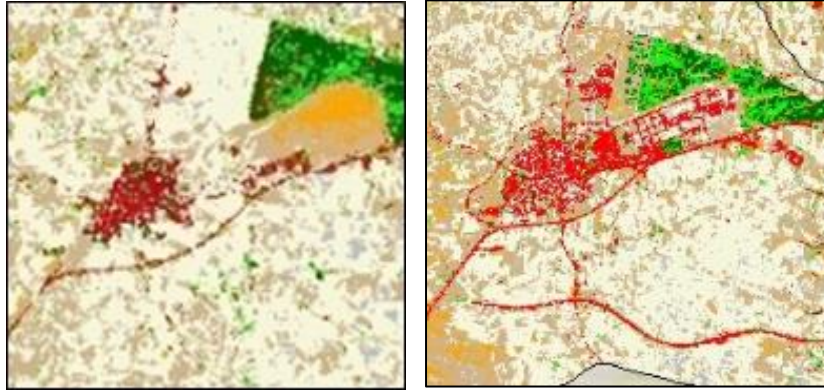


Fig.33. Comparativa entre las zonas selladas en Navalcarnero en 1987 y en 2016

Han aparecido nuevas vías de comunicación que buscan articular mejor el territorio, como la autopista radial 5, que parte de Madrid y finaliza en Navalcarnero. La carretera M-503 que comunica Villanueva de la Cañada con Majadahonda, o la autopista M-50 que atraviesa Majadahonda, Boadilla del Monte y Móstoles.

Las zonas, por su parte, que menos cambios han experimentado durante estos años han sido las de urbanizaciones y sellado discontinuo, ya que muchas estaban ya presentes en 1987. Como es el caso de las urbanizaciones de Villafranca del Castillo, las Lomas, el Bosque, Montepíncipe...

10. IDENTIFICACIÓN DE VIVIENDAS CONSTRUIDAS EN SUELO NO URBANIZABLE EN LA ZONA DE ESTUDIO:

Una vez que ya sabemos cómo ha avanzado el sellado del suelo, gracias a las tecnologías espaciales actuales podemos estudiar otras variables urbanísticas muy interesantes que complementan nuestro estudio. En nuestro caso, vamos a utilizar el programa Arcmap para valorar cuantas de las edificaciones presentes en nuestra zona de estudio se han realizado en suelo no urbanizable, y por lo tanto, no se adaptan a la legalidad vigente. También nos valdremos de la tecnología LIDAR para calcular la altura media de dichas edificaciones por municipio.

Para la identificación de las viviendas se ha recurrido a la fotointerpretación, y se han tenido en cuenta todas aquellas viviendas que estuvieran en suelo catalogado como suelo no urbanizable protegido o de protección, suelo urbanizable no sectorizado y suelo no urbanizable común. Por el contrario no se han tenido en cuenta aquellas viviendas que pertenecieran a los sistemas generales, suelo urbano/urbano consolidado, suelo urbano no

consolidado y suelo urbanizable sectorizado. Las capas necesarias para el estudio han sido suministradas por la Consejería de Medio Ambiente, Administración Local y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, dando su visto bueno para su utilización en este trabajo.

El suelo urbanizable no sectorizado también se ha tenido en cuenta, ya que aunque a priori es un suelo apto para ser urbanizable, todavía no entra dentro de la programación del Plan General de Ordenación Urbana. Por lo que en estos terrenos previsiblemente en un futuro serán aptos para urbanizar y serán aprovechados para satisfacer futuras demandas, pero a día de hoy no se puede construir nada en ellos.

Una vez que se cuenta con todas las capas de las clasificaciones urbanísticas del suelo, se ha elaborado un mapa, en el que se muestran en tonos azules-verdosos los suelos aptos para la urbanización y en rojos-anaranjados aquellos que no son aptos para urbanizar, y que por lo tanto no se debería encontrar ninguna edificación en ellos.

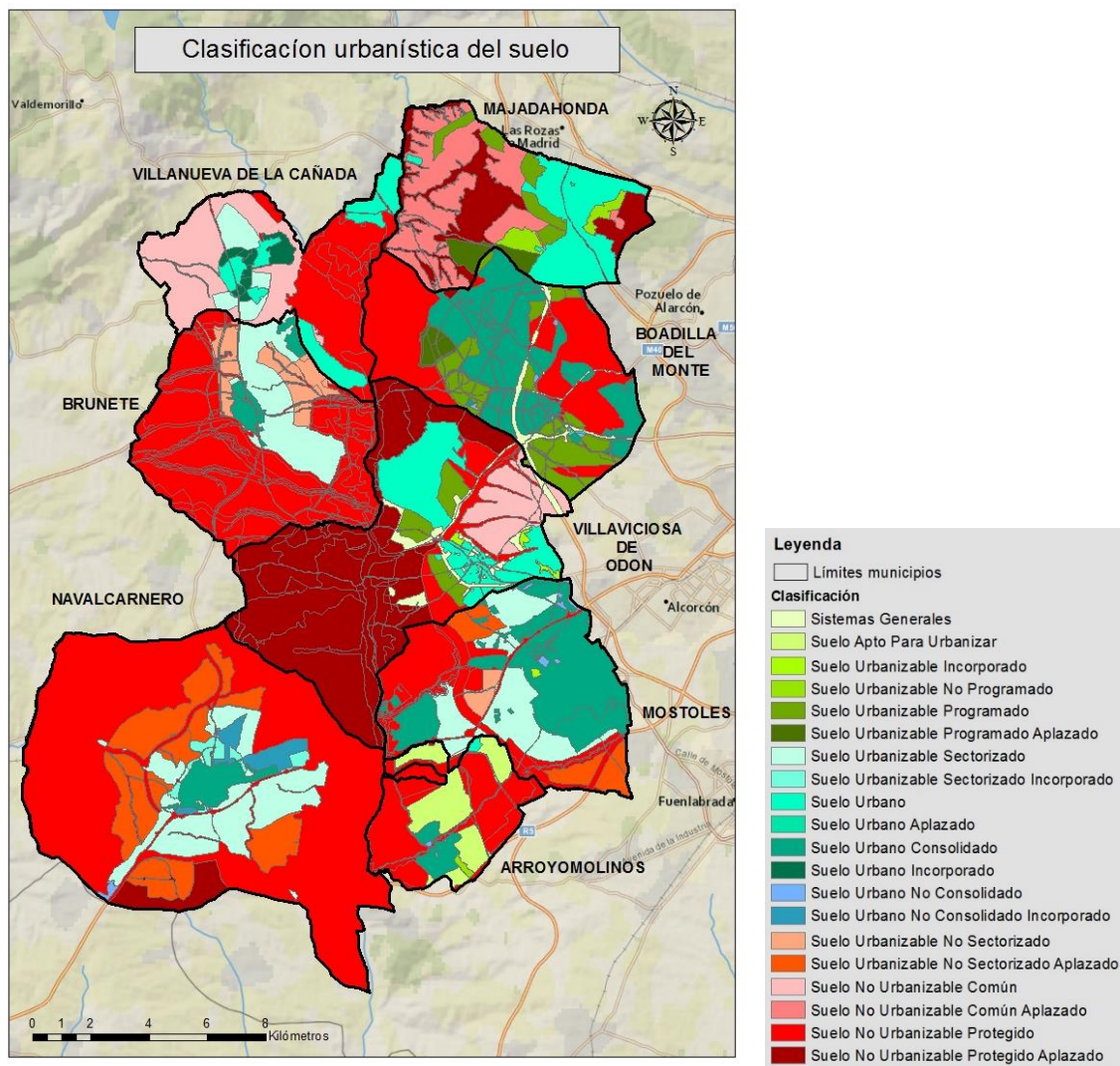


Fig.34. Clasificación urbanística del suelo

El siguiente paso ha sido quedarse solo con las capas en las que sabemos que son aptas para urbanizar, anteriormente mencionadas, y proceder al proceso de fotointerpretación para verificar que edificaciones quedaban fuera de dichas capas y por lo tanto se encuentran en suelo no urbanizable. Para ello me he valido de una ortofoto actual del PNOA.

Durante el proceso de fotointerpretación se ha ido teniendo en cuenta qué clase de edificación era (agropecuario, industrial, residencial, servicios, deportivo o equipamientos), el tipo de suelo sobre la que estaba construido (no urbanizable común, no urbanizable protegido o urbanizable no sectorizado), si estaba dentro de algún espacio natural, sus coordenadas y la fecha en la que fue construido. Para esto último, hubo que comparar con fotografías aéreas antiguas de distintas fechas de la zona de estudio. Para ello se recurrió al archivo fotográfico del que dispone la Consejería.

El resultado obtenido es el que se presenta a continuación, en el que hay que destacar que las construcciones han sido exageradas en su representación para que fueran más visibles, ya que si no sería imposible apreciarlas sin aumentar mucho la escala. Tanto es así, que muchas de estas edificaciones, al ser la mayoría muy pequeñas y encontrarse aisladas, ha sido imposible discriminarlas mediante teledetección, ya que se necesitaría una resolución espacial enorme y un tamaño de pixel muy pequeño.

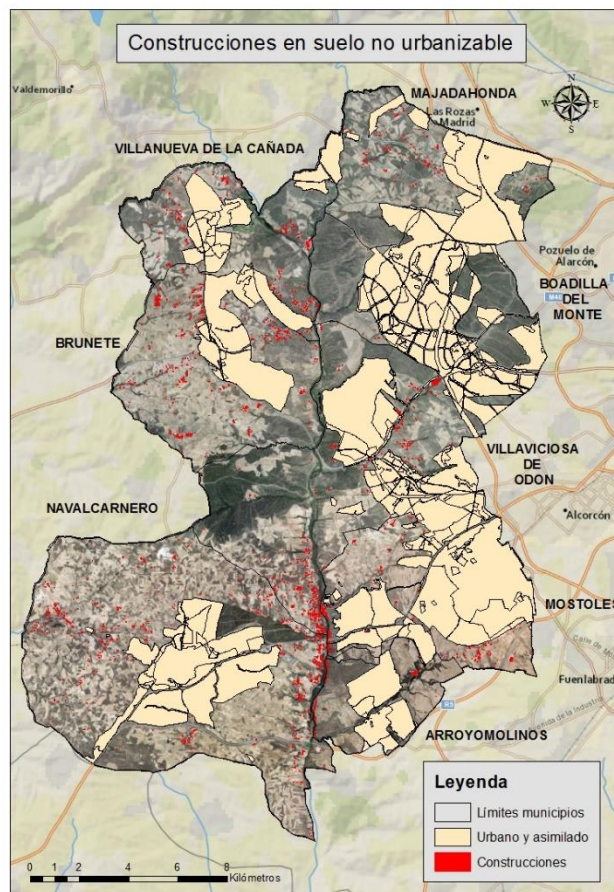


Fig.35. Construcciones en suelo no urbanizable

La tabla de atributos obtenida es muy completa, pero imposible de reflejar en el presente trabajo por su gran extensión, ya que estamos hablando de un total de 5.674 edificaciones. Por lo que se ha recurrido a resumir los datos obtenidos en las siguientes tablas:

Municipio	Total edificaciones	Usos					
		Agropecuario	Industrial	Residencial	Equipamiento	Deportivo	Servicios
Arroyomolinos	293	264	8	10	6	5	
Boadilla del Monte	22	21				1	
Brunete	1142	822	123	156		14	27
Majadahonda	353	299	25	20	6	3	
Móstoles	514	384	22	92	11	5	
Navalcarnero	1620	1512	64	16	19		9
Villanueva de la Cañada	565	421	27	32	34	1	50
Villaviciosa de Odón	1165	901	54	84	6	34	86
TOTAL	5674	4624	323	410	82	63	172
TOTAL (%)	100%	81,49%	5,69%	7,23%	1,45%	1,11%	3,03%

Tabla 11. Edificaciones en suelo no urbanizable por municipio

Municipio	Total edificaciones	Tipo de suelo			Espacios naturales
		SNUP	SUNS	SNUC	
Arroyomolinos	293	293			285
Boadilla del Monte	22	22			21
Brunete	1142	803	339		112
Majadahonda	353	215		138	95
Móstoles	514	391		123	189
Navalcarnero	1620	1620			767
Villanueva de la Cañada	565	383		182	315
Villaviciosa de Odón	1165	1079		86	839
TOTAL	5674	4806	339	529	2623
TOTAL (%)	100%	84,70%	5,97%	9,33%	46,23%

Tabla 12. Edificaciones en suelo no urbanizable por municipio

Municipio	Total edificaciones	Año construcción				Num plantas	Altura (m)
		< 1950	1950-1975	1975-2000	>2000		
Arroyomolinos	293		45	91	157	0,93	2,81
Boadilla del Monte	22		5	1	16	0,89	2,68
Brunete	1142	23	96	528	495	0,98	2,93
Majadahonda	353	3	71	163	116	0,85	2,55
Móstoles	514	4	78	233	199	0,85	2,56
Navalcarnero	1620	46	299	810	465	0,97	2,92
Villanueva de la Cañada	565		64	179	322	1,03	3,09
Villaviciosa de Odón	1165	4	219	382	560	1,02	3,06
TOTAL	5674	80	877	2387	2330	Media plantas	Media altura
TOTAL (%)	100%	1,41%	15,46%	42,07%	41,06%	0,94	2,82

Tabla 13. Edificaciones en suelo no urbanizable por municipio

Se puede observar como los municipios que tienen más construcciones en suelo no urbanizable son Brunete, Navalcarnero y Villaviciosa de Odón, superando las 1.000. Mientras que en el lado opuesto nos encontramos a Boadilla del Monte con sólo 22, seguido de Arroyomolinos, pero ya con 293 construcciones.

En general suelen aparecer esparcidas por el territorio sin ningún patrón de ordenación aparente, excepto en el caso de las que se encuentran al sur de la zona de estudio, en el margen del río Guadarrama, donde se ha ido formando una especie de corredor de estas edificaciones irregulares, estableciéndose todas ellas en suelo no urbanizable protegido y englobadas en el parque regional del curso medio del Río Guadarrama. La mayoría de este corredor se encuentra en Navalcarnero y Villaviciosa de Odón, lo que ha contribuido,

como hemos visto, a que estos dos municipios sean los que más construcciones irregulares presentan. Además, hay que tener en cuenta que la implantación de estas edificaciones se ha producido sobre áreas de alta permeabilidad por su cercanía al río Guadarrama.

La mayoría de ellas son de uso agropecuario, suponiendo el 81,49% del total. Por lo que se ha podido comprobar durante la fotointerpretación, muchas son las típicas construcciones pequeñas, fabricadas con materiales baratos, que pueden servir temporalmente de almacén o de otra función que sirva de apoyo a las actividades agropecuarias. Luego ya nos encontramos con el resto de usos en porcentajes mucho más bajos, pero por lo general, sobre todo en el caso del residencial y el industrial, son ya edificaciones más grandes y de construcción más sólida.

El 84,70% de las construcciones se encuentran en suelo no urbanizable protegido, el 9,33% en suelo no urbanizable común, y el 5,97% en suelo urbanizable no sectorizado. Así mismo, el 46,23% de ellas se emplazan dentro del parque regional del curso medio del Río Guadarrama, algunas incluso como se puede ver en la siguiente imagen en las zonas de máxima protección de este parque representadas en rojo. En verde son las zonas de mantenimiento de la actividad, y en naranja las zonas de protección y mejora de dicho parque.

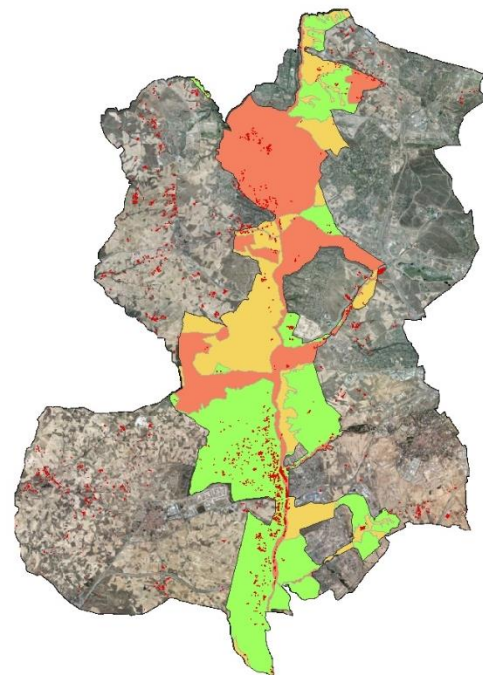


Fig.36. Extensión ocupada por el parque regional del curso medio del río Guadarrama y sus distintas zonas.

En cuanto a su año de construcción se han dividido en cuatro intervalos temporales. Así, se puede observar como las edificadas antes del año 1950 son muy escasas, sólo representando el 1,41% del total. Por su parte, las que se construyeron entre 1950 y 1975 engloban el 15,46%. Muchas de ellas, a pesar de que son edificaciones en suelo no urbanizable, pueden estar en una situación legal y regulada. Ya que hay que tener en cuenta que las viviendas anteriores a 1975, que fue cuando entró en vigor la Ley 19/1975, de 2 de mayo, de reforma de la Ley sobre el Régimen del Suelo y Ordenación Urbana, reconoce el supuesto en que “las construcciones que se encuentren aisladas y fueran construidas sin tener licencia, pero sigan manteniendo en la actualidad el uso y las características para las que fueron concedidas antes de la entrada en vigor de la ley y no se encuentren en situación de ruina, se reconoce su asimilación en su régimen a las construcciones con licencia”.

Las edificaciones realizadas entre el año 1975 y el 2000 suponen el 42,07% del total, y las construidas posteriormente al 2000 el 41,06%. Estas edificaciones sí que se encontrarían en una situación irregular por encontrarse en suelo no urbanizable, salvo en los casos muy excepcionales en los que se reconozca que la nueva construcción sea totalmente necesaria para la actividad de una explotación agropecuaria a la que se encuentre vinculada.

Por último, se ha tenido en cuenta el número de plantas y la altura media que presentan las edificaciones. En ningún municipio el número de plantas es superior a uno, con una altura media en todos ellos entre los 2,50 y los 3 metros. También se ha calculado el número medio de plantas para las viviendas en suelo urbanizable, con el fin de compararlas con las anteriores, y ver en qué municipios se ha crecido más en altura y cuales han apostado más por una expansión menor en altura y más extensa en el territorio.

11. CÁLCULO DEL NÚMERO MEDIO DE PLANTAS EDIFICADAS EN LOS MUNICIPIOS DE ESTUDIO:

Para calcular la altura media de las edificaciones y posteriormente el número medio de plantas se va a utilizar la tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging- Detección por luz y distancia).

El LIDAR es una técnica de teledetección consistente en: *“un sensor activo, donde él mismo genera la energía (el pulso láser) que permite hacer los cálculos y las medidas. Envía una señal a la superficie terrestre desde un sensor aerotransportado, que regresa al transporte aéreo; el tiempo que tarda en llegar hasta la superficie terrestre y regresar al transporte aéreo determina la distancia hasta los elementos de la superficie. El resultado es una densa red de puntos de elevación georreferenciados de elevada precisión, denominada nube de puntos”*⁷.

Los datos LIDAR necesarios para el estudio han sido obtenidos a través del centro de descargas del IGN (Instituto Geográfico Nacional) en formato .LAZ. Estos datos se han tenido que descomprimir y transformar a archivos .LAS mediante la herramienta Launch LasTask Tools, suministrada por el propio IGN, para poder trabajar con estos datos en ArcGis. LAS es un archivo abierto en el que podemos encontrar los metadatos del estudio LIDAR, así como los registros individuales de cada pulso láser registrado. En ellos se encuentran registrados los atributos de los puntos LIDAR: intensidad, valores RGB, valores de clasificación de puntos, información de ubicación x,y,z... Cada punto LIDAR tiene una clasificación asignada según el tipo de objeto que refleja el pulso láser.

Los datos LIDAR más actualizados que se han podido conseguir cuando se ha realizado este trabajo han sido del año 2010, por lo que los valores de altura y número de plantas corresponden a esa fecha y no al 2016 como el resto del estudio.

⁷ Definición según el IGN

Una vez que ya se tienen los archivos .LAS se crea un dataset de LAS en ArcGis, en el que se añaden los archivos .LAS correspondiente a la zona de estudio (en nuestro caso se ha hecho para cada municipio individualmente, ya que si no era muy pesado de procesar toda la zona de estudio). Añadidos los archivos correspondientes se calculan las estadísticas y se crea el dataset.

Una vez hecho vamos a conseguir una nube de puntos, cada uno con su clase y elevación:

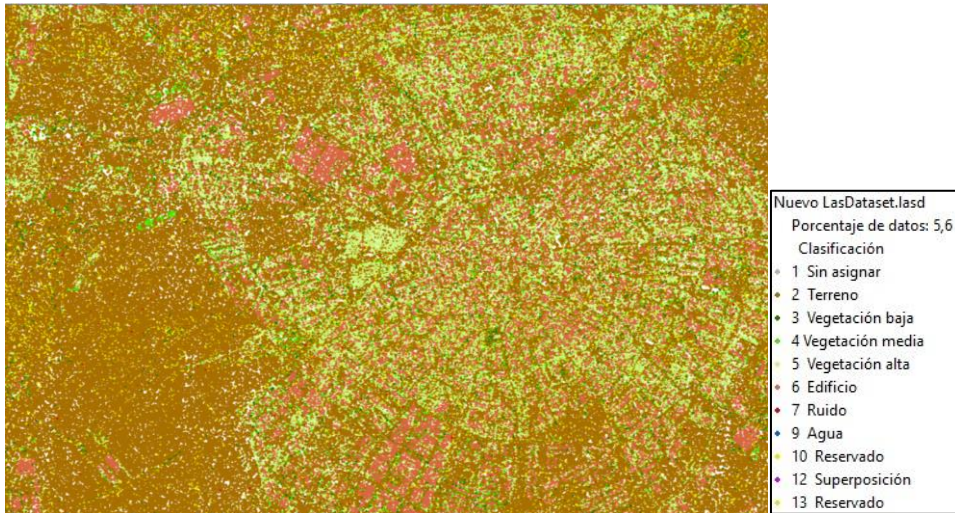


Fig.37. Nube de puntos LIDAR

Podemos abrir una vista de perfil de una zona seleccionada y luego una vista en 3D para verla en detalle:

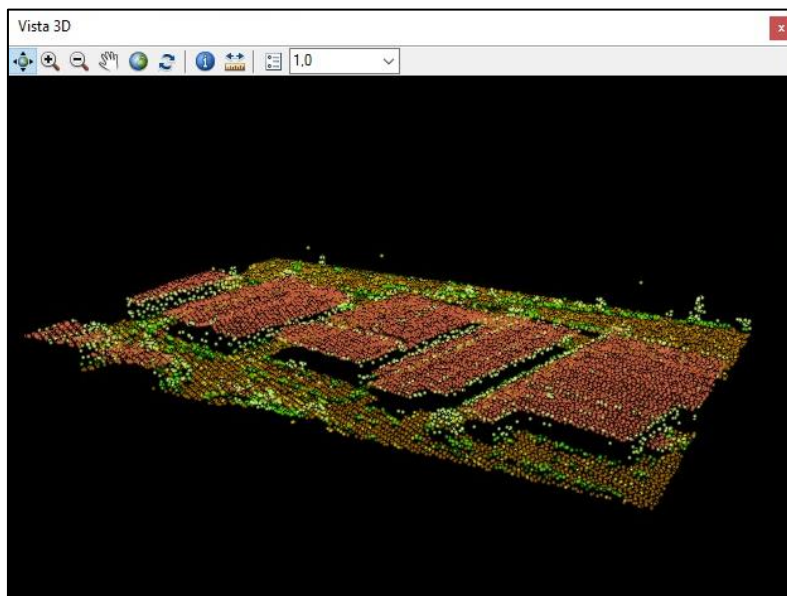
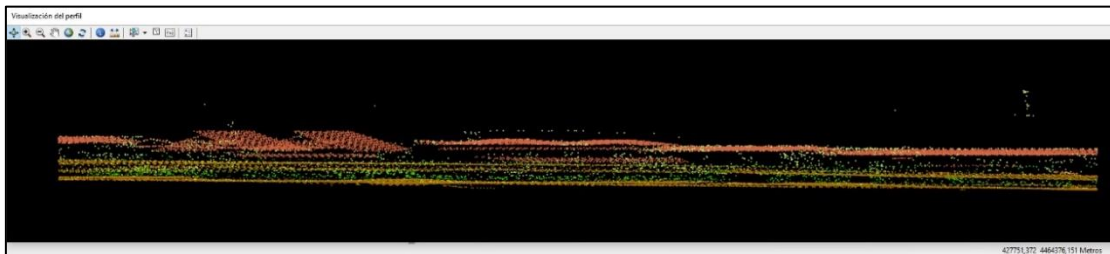
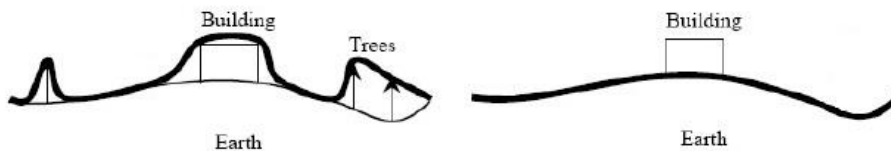


Fig.38. Perfil trazado sobre la nube de puntos LIDAR

Como se puede apreciar nos reconoce perfectamente las distintas cubiertas y su elevación. Además desde esta vista podremos manipular los códigos de clasificación LAS para aquellos puntos en los que haya podido haber error. Ya que, por ejemplo, puede pasar una bandada de pájaros por encima de algún edificio e inducir a equivocaciones cuando se haga el análisis.

Para el estudio sólo nos interesa quedarnos con la altura de las edificaciones, para ello desde las propiedades del LAS Dataset y en la pestaña filtros se seleccionan en primer lugar todas las clases. Luego se abre la herramienta LAS Dataset to raster y se calcula. En segundo lugar volvemos a las propiedades del LAS Dataset y ahora se seleccionan todos las clases menos las construcciones y de nuevo con la herramienta LAS Dataset to raster se calcula.



Con los dos raster creados, abrimos la calculadora raster y se resta el raster que contiene todas las clases (terreno, vegetación baja, vegetación media, vegetación alta, edificios, agua) menos el que tiene todas las clases excepto las edificaciones, para obtener como resultado un raster sólo con las alturas de las edificaciones, como se aprecia en la siguiente imagen. Los valores más altos están representados en tonos más oscuros y los más bajos en tonos más claros.

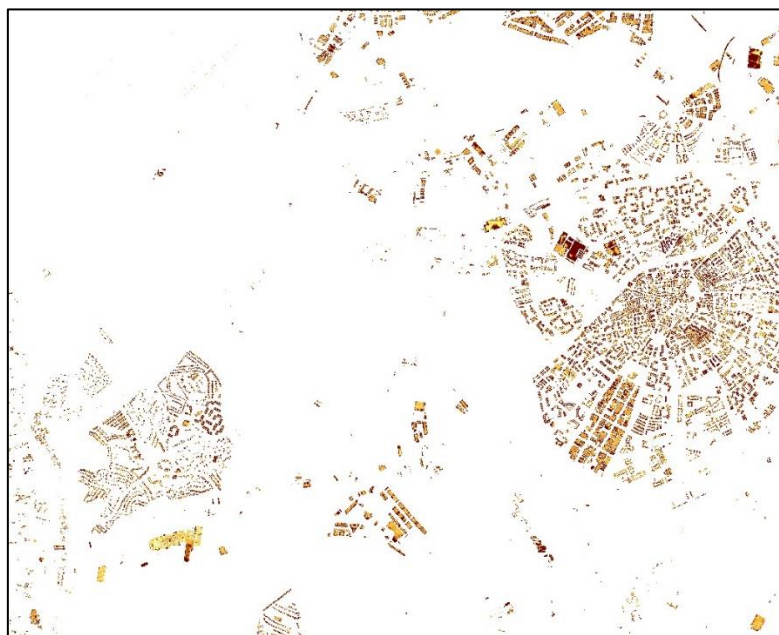


Fig.39.

Imagen aumentada para comprobar como sólo nos coge los puntos que caen en los tejados de los edificios:



Fig.40.

Una vez hecho este raster, se ha procedido a hacer un reclassify para calcular el número de plantas. Se ha establecido que a cada planta le corresponde una altura de tres metros. Con lo que ya tenemos un raster como el anterior, pero esta vez con el número de plantas.

Lo siguiente es saber cuántas plantas tiene cada edificio. Para ello, se pretendía cruzar el raster con los datos del catastro de cada edificación mediante la herramienta estadísticas zonales, y que cogiera el punto más alto que cayera dentro de él para saber exactamente su altura. El problema, como se observa en la siguiente imagen, es que, a pesar de que el LIDAR es muy preciso, algunos puntos caían fuera de la delimitación del edificio del catastro y cogía las parcelas contiguas en las que no había edificaciones:

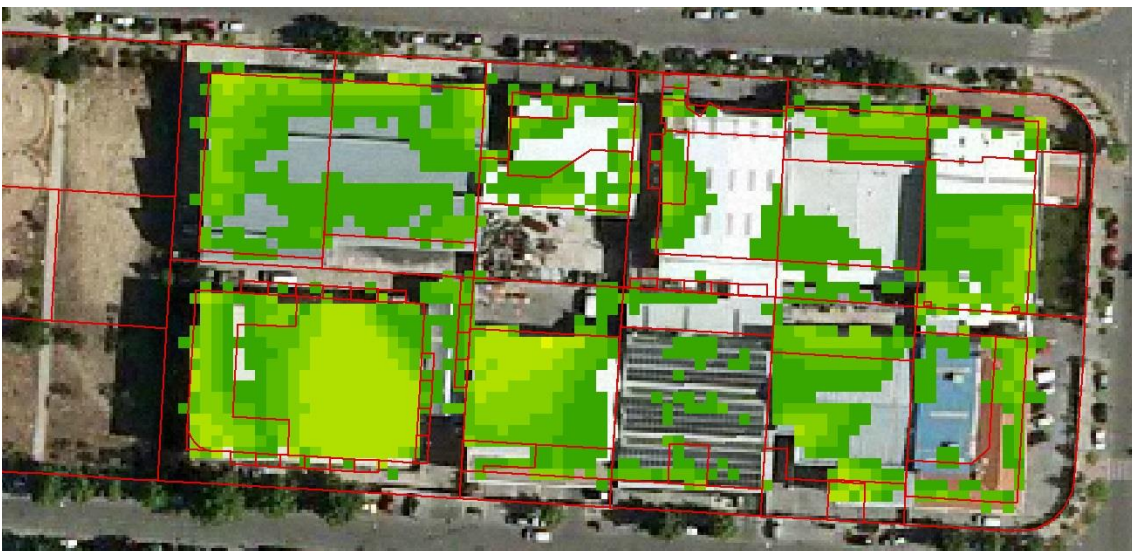


Fig.41.

Con lo cual, para solventar este problema se ha decidido coger las delimitaciones de las parcelas:

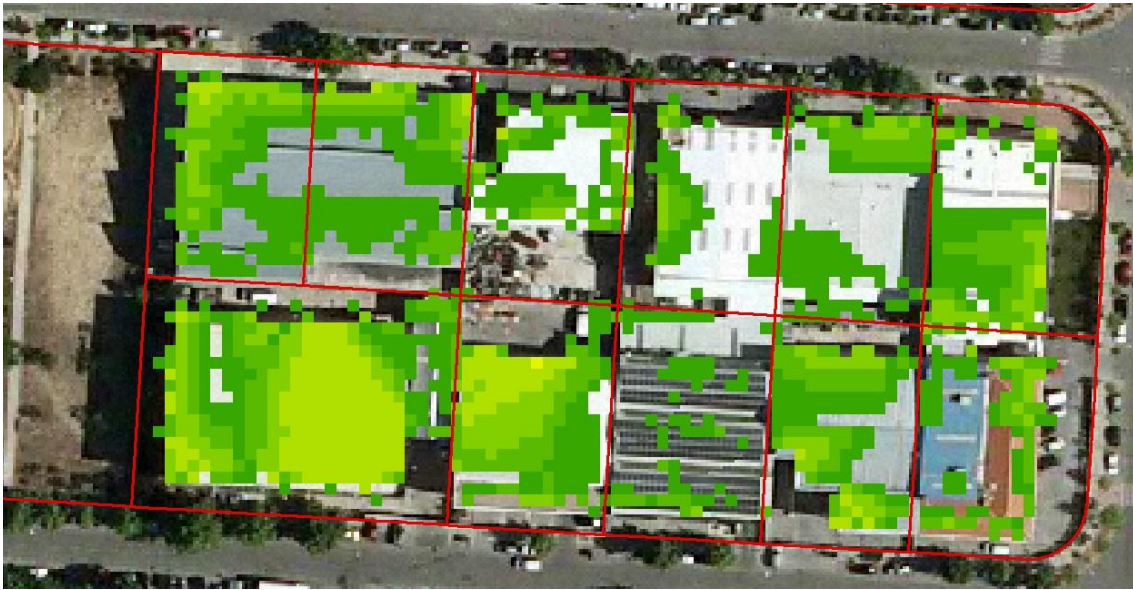


Fig.42.

Una vez cruzado con los polígonos de las parcelas los resultados han sido los siguientes:

- Número de plantas en Arroyomolinos:

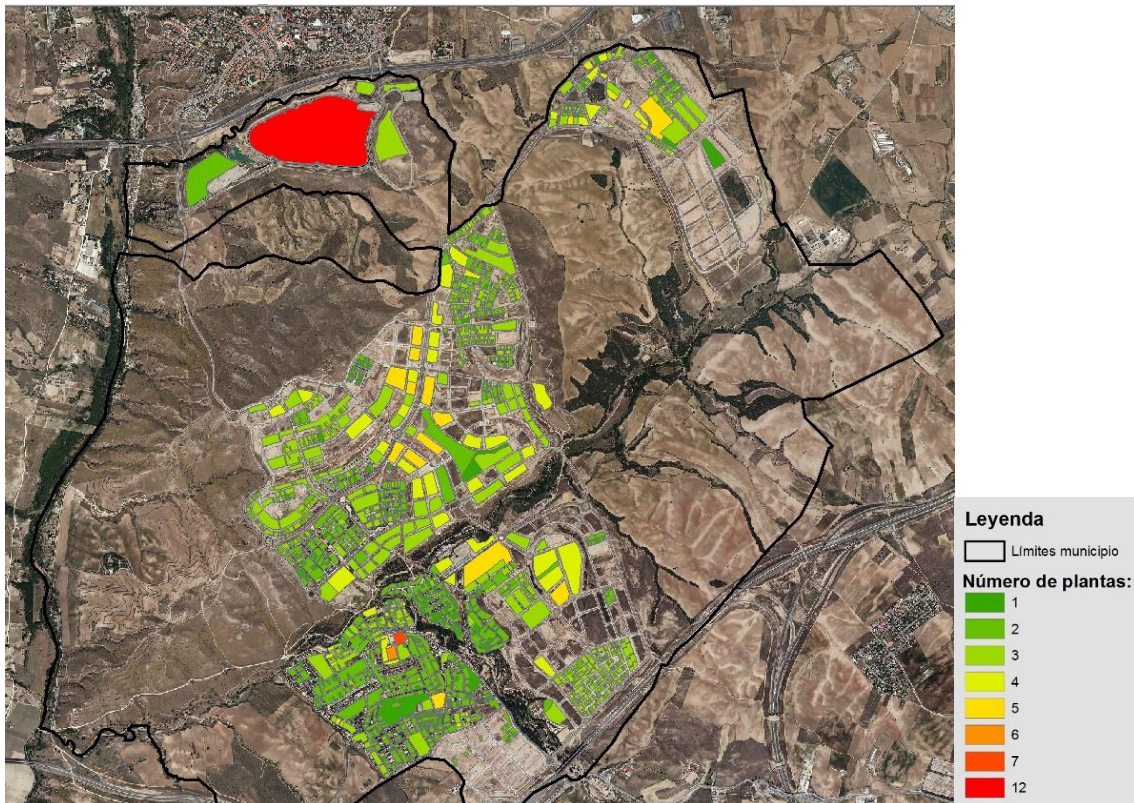


Fig.43. Número de plantas en Arroyomolinos

Como se puede apreciar en el casco urbano ninguna vivienda suele superar las cinco alturas, excepto algún caso aislado que nos encontramos con alturas superiores, correspondientes al torreón de Arroyomolinos y al Ayuntamiento. La edificación de

mayor altura se encuentra en la zona norte del municipio, se trata del Madrid Snowzone situada en el centro comercial Xanadú. Para comprobar que efectivamente estas edificaciones tienen esa altura y no se trata de un error, se ha procedido a revisarlo mediante fotografías de dichas edificaciones, o a través de la herramienta Street View de Google Maps. A continuación se muestran las imágenes de estas edificaciones como ejemplo, pero para el resto de municipios quien tenga interés en revisar alguna zona en concreto puede consultarlo a través de dichas fuentes, ya que si no el trabajo se extendería demasiado:

Ayuntamiento de Arroyomolinos:



Torreón de Arroyomolinos:



Fig.44.

Madrid Snowzone:



Fig.45.

- Número de plantas en Boadilla:

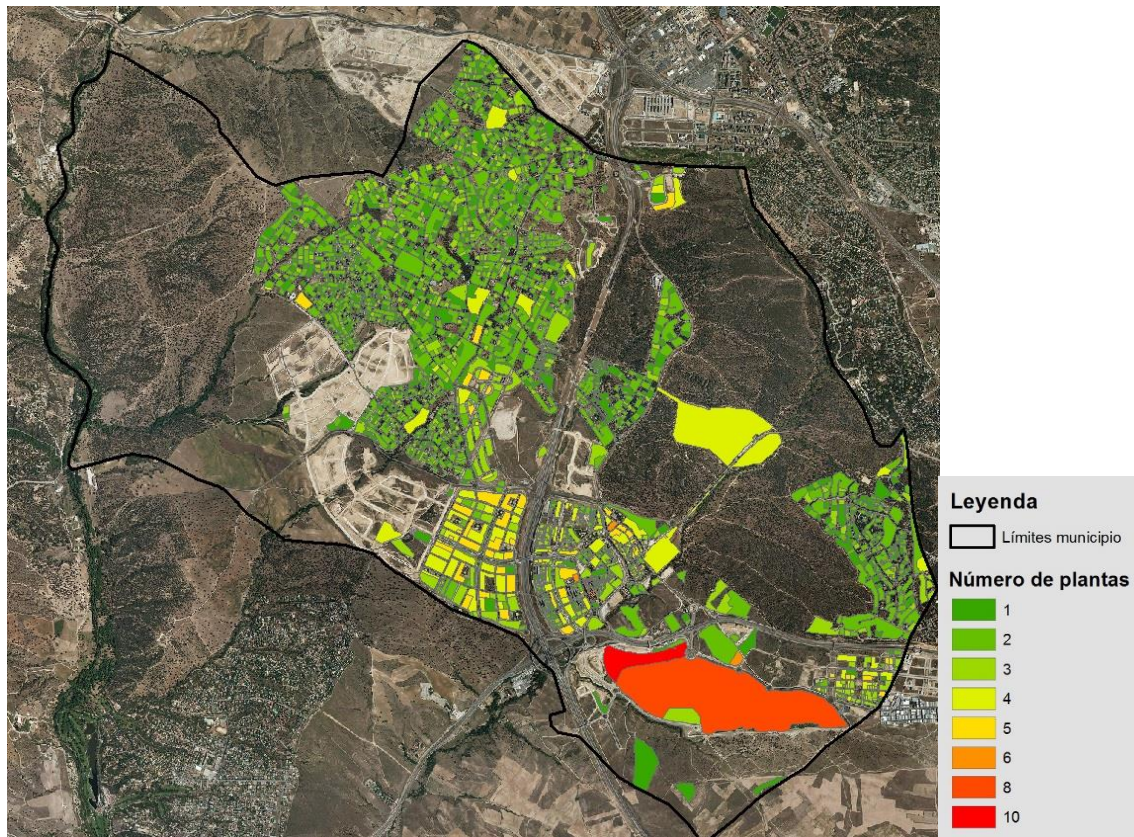


Fig.46. Número de plantas en Boadilla

En Boadilla del Monte nos encontramos tres zonas bien diferenciadas. En la zona norte del municipio se encuentra Las Lomas, Parque Boadilla, Bonanza y Valdecañabas, que son espacios enteros de urbanizaciones, con chalets unifamiliares en su mayoría, donde no se suele superar la planta o dos de altura, excepto en el caso de equipamientos, como polideportivos, escuelas, parroquias... Por otra parte, se encuentra el núcleo tradicional, donde los chalets dan paso a bloques de viviendas, pero tampoco de excesiva altura, en torno a las tres y cinco plantas. Y por último en la zona Sureste del municipio se localiza la ciudad financiera del banco Santander, donde algunos de sus edificios presentan las mayores alturas del municipio. Pegada a él se encuentran los polígonos industriales Prado del espino y Ventorro del Cano, y otra zona de urbanizaciones (Monte Príncipe).

- Número de plantas en Brunete:

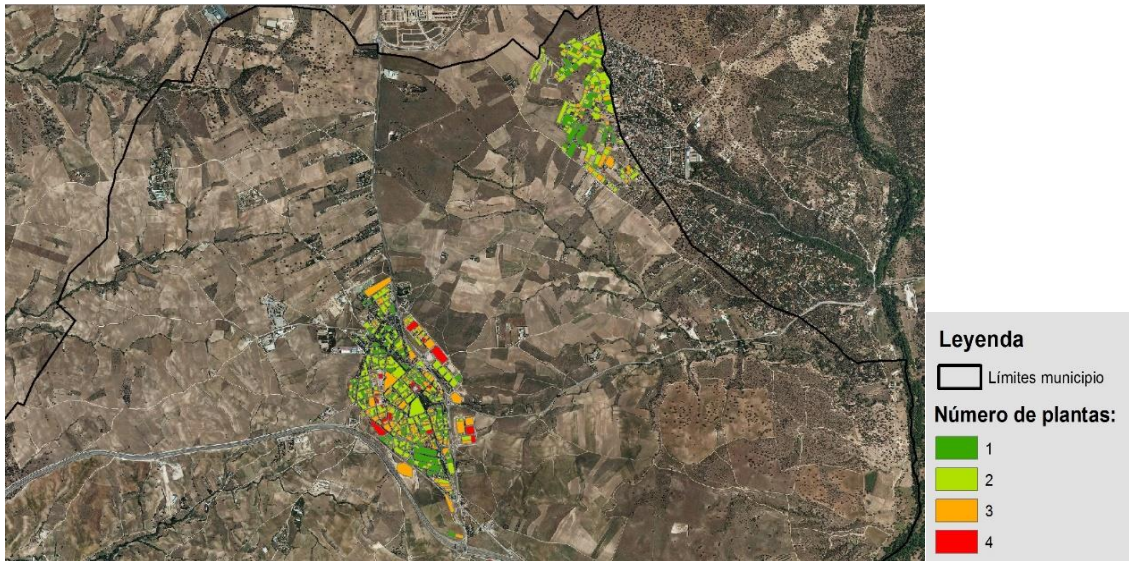


Fig.47.Número de plantas en Brunete

En el caso de Brunete, es el municipio donde el número de plantas es más bajo, ya que en él no se superan las cuatro alturas. Las mayores se encuentran en el centro urbano, mientras que en la parte noreste del municipio se encuentra una zona residencial de viviendas unifamiliares de una o dos alturas, y algún edificio un poco más alto correspondiente a centros educativos u hoteles de la zona.

- Número de plantas en Majadahonda:

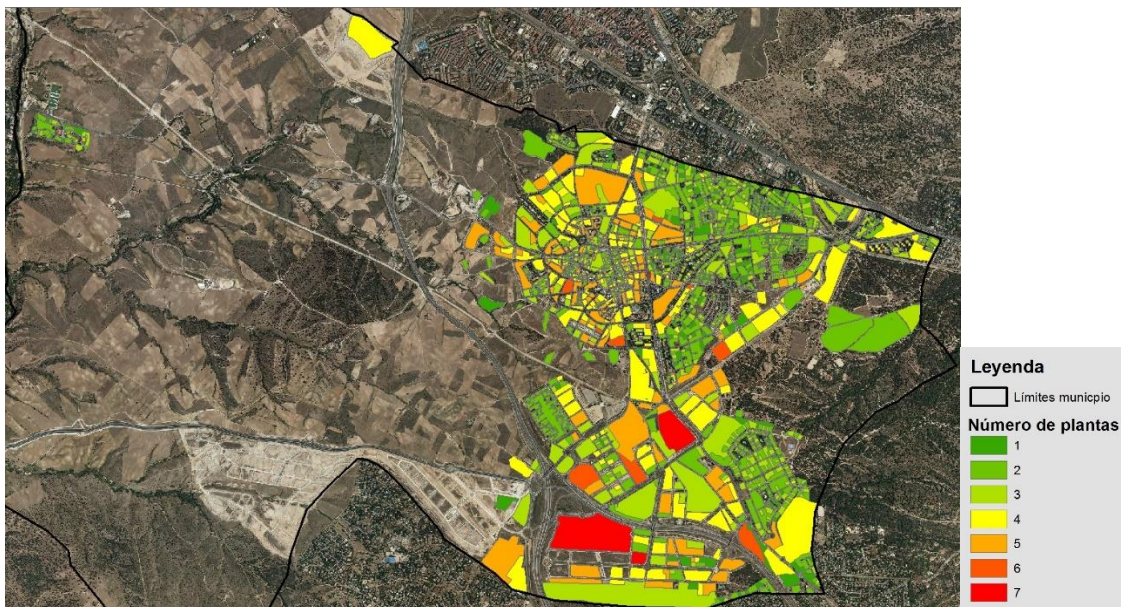


Fig.47.Número de plantas en Majadahonda

En Majadahonda en lo que es el casco urbano no nos encontramos edificios por encima de cinco alturas, pero en la parte sur del municipio que es donde se enclava el polígono industrial el Carralero, y zonas comerciales con grandes superficies, así como zonas de servicios, es donde se encuentran los edificios más altos. En este caso se corresponde con el hospital Puerta de Hierro y el instituto de salud Carlos III.

- Número de plantas en Móstoles:

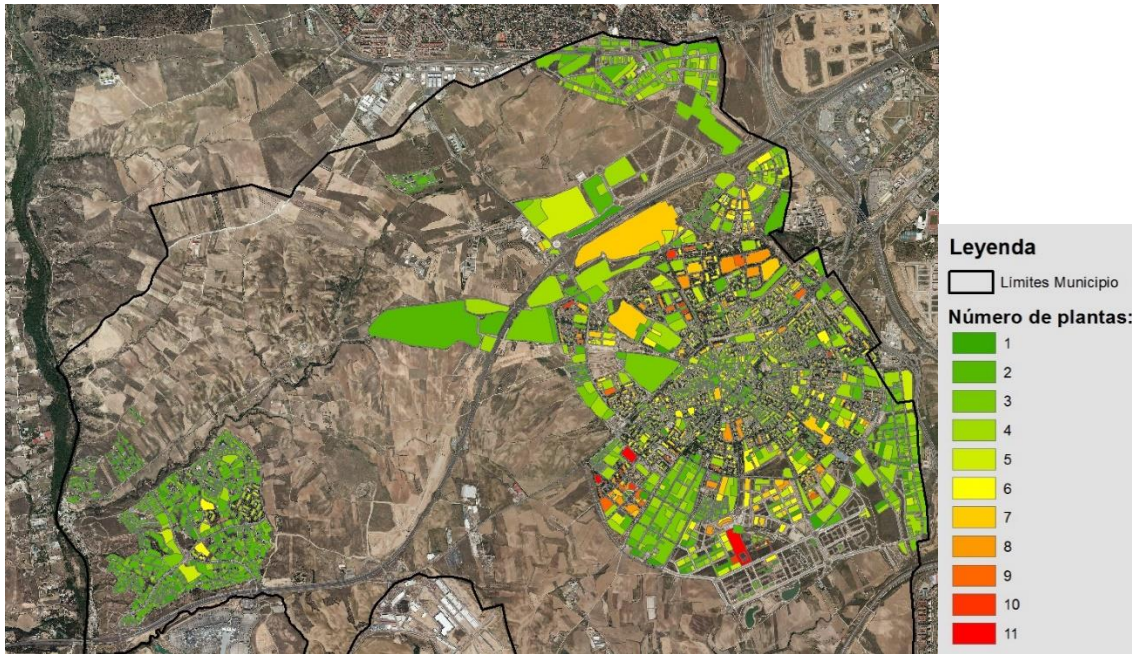


Fig.48. Número de plantas en Móstoles

En el caso de Móstoles en su núcleo histórico nos encontramos con edificios de menor altura que no suelen superar las seis o siete alturas, pero mientras avanzamos hacia las afueras ya se aprecian edificaciones más altas, pudiendo llegar a las once plantas en algunos edificios de apartamentos o en casos como el Hospital Universitario. En la zona suroeste del municipio se encuentra parque Coimbra y la urbanización Parque Guadarrama, es una zona fundamentalmente de viviendas unifamiliares y chalets adosados, que no suelen superar las dos plantas de altura, excepto algún caso de edificios de apartamentos o centros de salud de la zona. En cuanto a los dos polígonos industriales, el de Las Nieves y el Lucero al norte, y el de Fuensanta al Este, presentan edificaciones entre tres y cinco altura en su mayoría.

- Número de plantas en Navalcarnero:

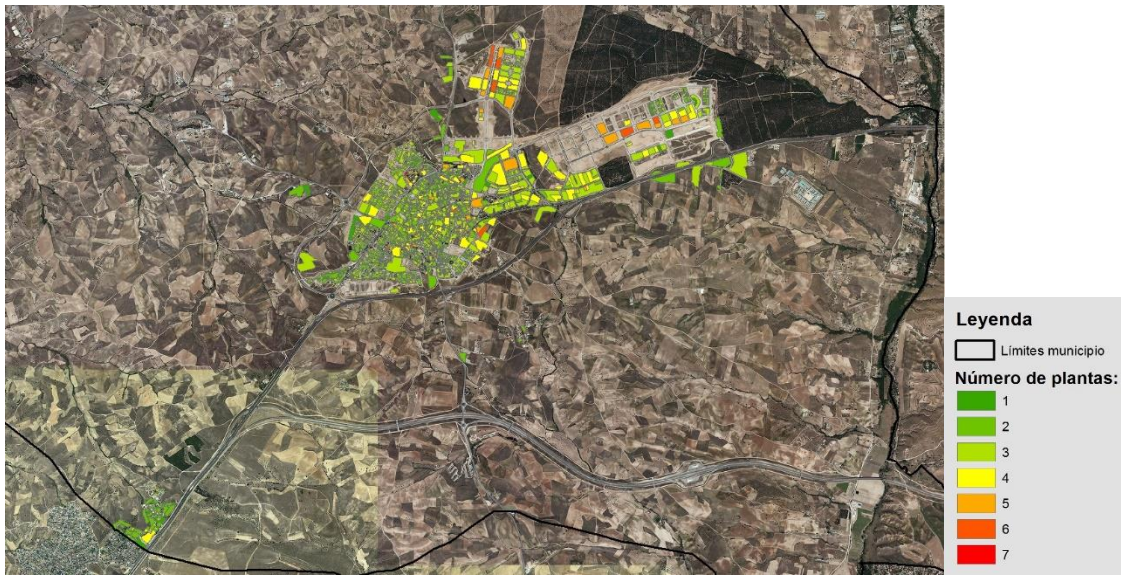


Fig.49.Número de plantas en Navalcarnero

En Navalcarnero no nos encontramos con alturas importantes, las más significativas se encuentran en barrios de nueva construcción a las afueras del núcleo tradicional, donde se han construido algunos apartamentos entre cinco o siete alturas. Al Suroeste también se aprecia una zona de urbanizaciones con una o dos plantas.

- Número de plantas en Villanueva de la Cañada:

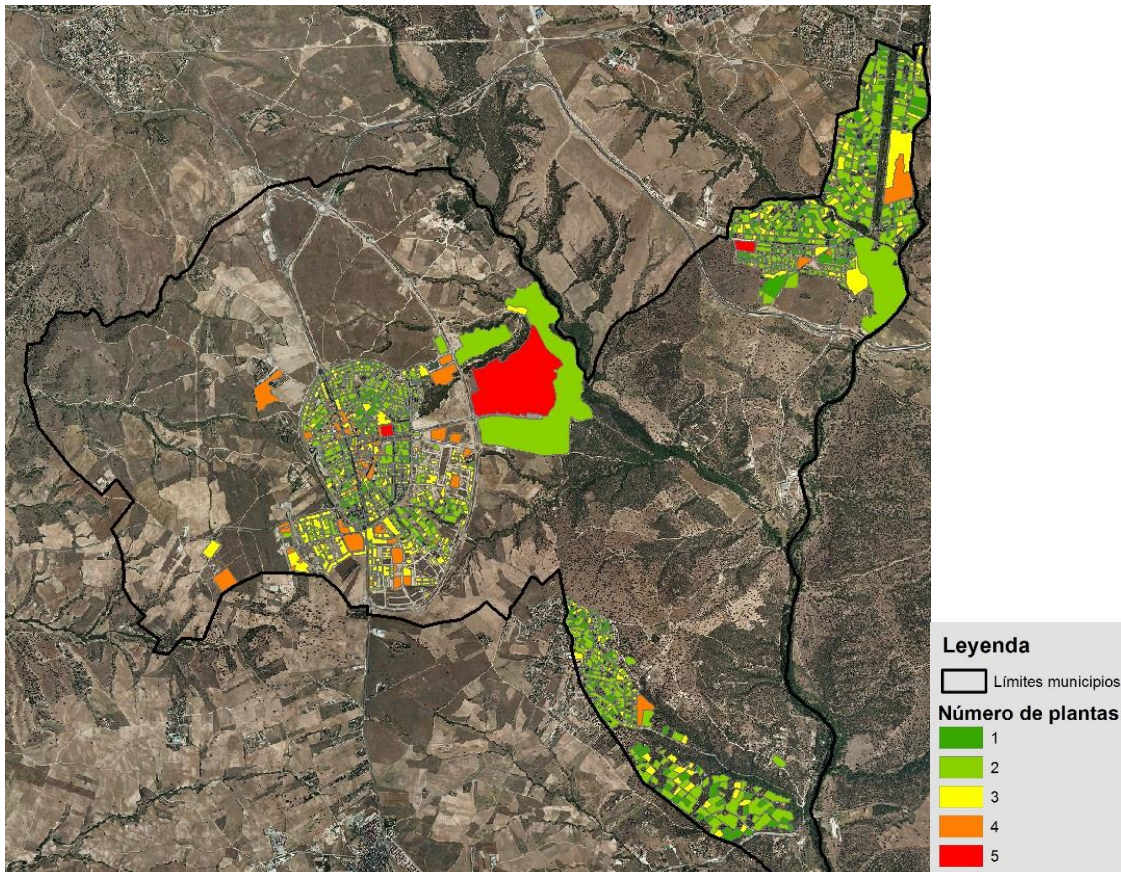


Fig.50.Número de plantas en Villanueva de la Cañada

En Villanueva de la Cañada en todo el casco urbano no se superan las cuatro plantas, generalmente son viviendas residenciales y chalets adosados que se están extendiendo hacia el extrarradio del núcleo, no hay ningún edificio de apartamentos que sobresalga sobre los demás. Posee un pequeño polígono industrial a las afueras, pero sus edificaciones tampoco superan las tres o cuatro alturas. Los edificios más altos, se corresponden con la Universidad de Alfonso X el Sabio, también a las afueras. En La zona Noreste (Villafranca del Castillo) y Sureste (la Finca de Villanueva) nos encontramos con zonas de urbanizaciones, son en su mayoría chalets unifamiliares de una o dos alturas. Pero sí que destaca algún edificio como la Universidad Francisco José Cela o el Colegio Zola Villafranca en el caso de Villafranca del Castillo, o el centro privado-concertado de enseñanza Arcadia en La Finca de Villanueva.

- Número de plantas en Villaviciosa de Odón:

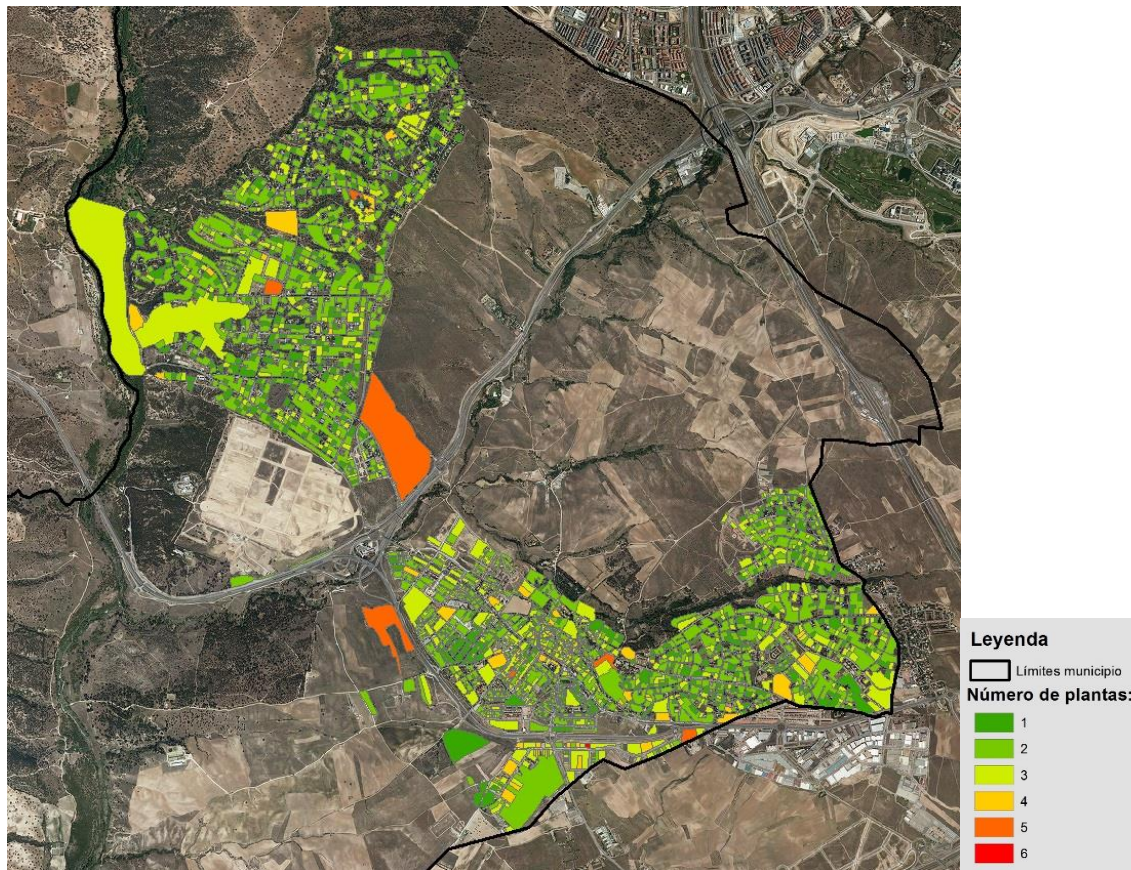


Fig.51. Número de plantas en Villaviciosa de Odón

Por último en Villaviciosa de Odón también nos encontramos con alturas contenidas, ya que es un municipio con bastantes urbanizaciones y residencial, al noroeste del municipio está la entidad urbanística el Bosque, con edificaciones entre una o dos plantas en su mayoría, destaca alguna parcela con cinco plantas, en este caso se trata de la Universidad Europea de Madrid y el Agora International School. Al Sureste del municipio cuenta con otro espacio de urbanizaciones, donde en ningún caso se superan las cuatro plantas de altura, al igual que ocurre en el casco urbano. En el polígono industrial situado al sur, sí

que hay alguna edificación de nueva construcción que alcanza seis plantas, pero por lo general suelen estar también entre las dos y cuatro plantas.

En la siguiente tabla se refleja el número medio plantas y altura media por municipios:

Municipio	Num plantas	Altura (m)
Arroyomolinos	2,34	7,02
Boadilla del Monte	2,12	6,36
Brunete	1,99	5,97
Majadahonda	2,59	7,77
Móstoles	3,49	10,47
Navalcarnero	2,45	7,35
Villanueva de la Cañada	2,20	6,60
Villaviciosa de Odón	2,05	6,15
	Media plantas	Media altura
	2,40	7,21

Tabla 14. Número de plantas y altura media por municipio

Como hemos ido viendo, son municipios con edificaciones no muy altas, la mayoría de ellos se sitúan entre las dos y dos plantas y media de altura, es decir, entre 6 y siete metros, a excepción de Majadahonda y Móstoles que superan esa altura. Por lo tanto, se puede ver una relación clara entre el número de habitantes y la altura edificada. Así, los núcleos que más población acogen, presentan alturas más altas y han apostado por una mayor extensión en altura, aunque tampoco en exceso. Mientras que los municipios con menor carga demográfica presentan alturas más contenidas con un fuerte carácter residencial.

Esto va en clara relación con el avance del sellado de suelo que ha experimentado la zona, lo que ha propiciado que se haya aumentado en más del doble. Por lo que habrá que valorar el coste ecológico que supone este tipo de extensión por el territorio. La Comisión Europea ya se está percatando y se está haciendo eco del problema, así en su documento los costes ocultos del sellado del suelo ya advierte: “Lo que quizás es más preocupante es que las zonas construidas en las afueras de las ciudades, o zonas periurbanas, tienen la misma cantidad de suelo construido que las zonas urbanas, pero su densidad de población es la mitad”.

12. CONCLUSIONES:

El suelo es un recurso muy infravalorado, y muy pocas veces se tiene en cuenta que es un recurso limitado y de gran valor ecológico y ambiental, ya que desempeña numerosas funciones vitales en los ecosistemas. El aumento de la ocupación del territorio ha traído asociado un sellado del suelo, pero a pesar de ello, a diferencia del agua o el aire, no existe una legislación que aborde el problema.

En el presente proyecto se ha abordado este problema y se ha valorado el incremento del sellado del suelo en varios municipios de la Comunidad de Madrid cercanos a la capital. Para este fin se ha buscado utilizar gran parte de las tecnologías aprendidas a lo largo del máster, así como tecnologías un poco más novedosas aplicadas al sellado del suelo, como son los nuevos satélites Sentinel o los datos LIDAR.

De esta forma, se ha ido buscando la metodología más óptima, utilizando diversos índices y clasificaciones. En el estudio hemos comprobado como para nuestra zona de estudio las clasificaciones supervisadas dan un porcentaje de exactitud más elevado que calculando, clasificando y corrigiendo los distintos índices. Y gracias a los datos arrojados por ellas, se ha calculado como en los municipios de estudio el sellado del suelo ha aumentado un 101% en el periodo 1987-2016, llegando a representar un 13,14% del territorio.

Además se han identificado las edificaciones que se encontraban en suelo no urbanizable, muchas de ellas localizadas en zonas de permeabilidad alta y en parque naturales, haciendo todavía más perjudicial el sellado del suelo en estas zonas. Por último, mediante el cálculo de la altura media edificada por municipio, se ha podido comprobar como éstos han apostado por un crecimiento más repartido por el territorio, con muchas zonas residenciales de viviendas unifamiliares de una o dos alturas, lo que aumenta en gran medida el impacto sobre el suelo.

13. BIBLIOGRAFÍA:

- Libros y artículos consultados:

Comisión Europea (2012). *Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo.*

Comisión Europea (2012). *Los costes ocultos del sellado del suelo. En busca de alternativas a la ocupación y sellado del suelo.*

Fernández Freire, C. González Cascón, M^aV^a. Gómez Domínguez, A. y Gómez Nieto, I. (2011). *Introducción a la teledetección con Erdas Imagine.* Unidad SIG. Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). 2011.

García Alvarado, J. M^a, Pérez González, M^a E. y García Rodríguez, M^a P. 2014. *Revisión del concepto de sellado de suelos y propuesta de tipología urbana.* Anales de Geografía de la Universidad Complutense, n^o 34, 87-103.

Gómez Vicario, I. (2014): *Análisis de sellado de suelo en varios municipios de la Comunidad de Madrid.* Universidad Complutense de Madrid.

Pérez González, M^a E. y García Rodríguez, M^a P. (2013). *Aplicaciones de la Teledetección en degradación de suelos.* Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. 61: 285-308.

Pérez González, M^a E. y García Rodríguez, M^a P. (2013). *Sellado de suelos en áreas con riesgo de inundación.* XV Congreso de Teledetección. INTA, Madrid. 373-376. En: Editores: Fernández-Renau González-Anleo, A. y Miguel Llanes, E. (2013). *Teledetección. Sistemas Operacionales de Observación de la Tierra.* Madrid.

- Páginas web consultadas:

CENTO DE DESCARGAS DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (CNIG) <<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>>

CENTRO DE DESCARGAS DEL SERVICIO GEOLÓGICO DE LOS ESTADOS UNIDOS (United States Geological Survey – USGS) <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>

INFORMACIÓN DEL TERRITORIO, URBANISMO Y CARTOGRAFÍA DE LA COMUNIDAD DE MADRID -PLANEA MADRID <<http://www.madrid.org/cartografia/planea/index.htm>>

INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA <<http://www.igme.es/>>

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE) <<http://www.ine.es/>>