



**POLITÉCNICA**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA

GRADO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**IDENTIFICACIÓN DE CUBIERTAS CON CONTENIDO DE AMIANTO MEDIANTE  
SISTEMAS ESPECTRALES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA EN EL MUNICIPIO DE  
CARTAGENA**

**Autor: Javier Antón Ortiz**

Tutor:  
Íñigo Molina Sánchez

Tutor:  
Serafín López-Cuervo  
Medina

Co-tutora:  
Begoña Verdejo Herreras  
Hexagon

Co-tutor:  
Julio Lerena Fernández  
Hexagon

Madrid, septiembre, 2025

“La exposición a los contaminantes atmosféricos produce un amplio espectro de efectos sobre la salud, especialmente de los más pobres, **provocando millones de muertes prematuras**”.

Papa Francisco, Laudato Si’, n. 20

### **Agradecimientos**

A mis padres y a mi hermano,  
por su apoyo incondicional.

A mis tutores Íñigo y Serafín,  
por su siempre disponibilidad, templanza y compromiso como docentes.

A mis cotutores Julio y Begoña,  
por permitirme hacer el TFG en el marco de la Cátedra.

## **Resumen**

Este Trabajo Fin de Grado consiste en la identificación de tejados y cubiertas de edificios que contienen amianto en Cartagena (Murcia, España) mediante imágenes satelitales multiespectrales del sensor PlanetScope. El amianto ha sido utilizado desde el 4000 a.C., y recientemente se ha reconocido su impacto perjudicial en la salud humana. Necesitamos elaborar un censo de amianto municipal lo más rápido posible para que en 2028 pueda ser retirado de los edificios todo el amianto, tal y como obliga la ley. Los riesgos para la salud asociados al amianto ponen de manifiesto el potencial de los sistemas de observación de la tierra.

Este proyecto compara métodos de clasificación de tejados en Cartagena mediante sistemas espectrales de observación de la tierra, con el objetivo de identificar la metodología más precisa para detectar cubiertas con amianto utilizando el software ERDAS Imagine (versión 2023). La metodología consiste en extraer las firmas espectrales de diferentes tipos de tejado para determinar el algoritmo más adecuado para detectar la presencia de amianto.

Para ello se realizará la comparación con algoritmos de clasificación supervisada. En otros estudios, los resultados indicaron que el clasificador de Distancia de Mahalanobis proporciona la mayor precisión, en el nuestro es el de Maximum Likelihood. Los hallazgos se presentarán como mapas temáticos, constituyendo un primer censo de cubiertas con amianto. Este análisis se centra exclusivamente en las herramientas ofrecidas por ERDAS Imagine.

Este estudio introduce un enfoque novedoso utilizando ERDAS Imagine, estableciendo una base para futuros análisis comparativos con metodologías empleadas en otros estudios.

Palabras clave: ERDAS Imagine, Teledetección, Sensores Multiespectrales, Clasificación de tejados, PlanetScope, Amianto.

## **Abstract**

The objective of this Bachelor's Final Project is to identify roofs and building coverings containing asbestos in Cartagena (Murcia, Spain) using multispectral satellite imagery from the PlanetScope sensor. Asbestos has been used since 4000 BC, and its harmful impact on human health has only recently been recognized. It is essential to develop a municipal asbestos census as quickly as possible to ensure that all asbestos can be removed from buildings by 2028, in accordance with current legislation. The health risks associated with asbestos highlight the potential of environmental remote sensing.

This project compares methods of roof classification in Cartagena using remote sensing, aiming to identify the most accurate methodology for detecting asbestos-containing roofs with ERDAS Imagine software (version 2023). The methodology consists of extracting the spectral signatures of different roof types to determine the most suitable algorithm for detecting the presence of asbestos.

In this Final Project, we compare Supervised Classification Algorithms. The results in other researches indicated that the Mahalanobis Distance classifier provides the highest accuracy. The findings will be presented as thematic maps, constituting a first census of asbestos-containing roofs. This analysis focuses exclusively on the tools provided by ERDAS Imagine.

This study introduces a novel approach using ERDAS Imagine, establishing a foundation for future comparative analyses with methodologies employed in other studies.

**Keywords:** ERDAS Imagine, Remote Sensing, Multispectral Sensors, Roof Classification, PlanetScope, Asbestos.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO .....	8
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	12
ÍNDICE DE TABLAS.....	14
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	15
<b>1. MOTIVACIONES, LEGISLACIÓN Y OBJETO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1. Sobre el amianto en el mundo .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2. Sobre el amianto en España.....</b>	<b>17</b>
<b>1.3. Legislación en España .....</b>	<b>17</b>
1.3.1. Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre .....	18
1.3.2. Real Decreto 374/2001, de 6 de abril .....	18
1.3.3. Orden Ministerial de 7 de diciembre del 2001 .....	18
1.3.4. Variedades de amianto más utilizadas.....	19
1.3.5. Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular	19
1.3.6. Directrices para la retirada del amianto instalado.....	19
<b>1.4. Objetivos .....</b>	<b>20</b>
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1. Caso del censo de Madrid .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2. Caso del censo de Alcalá de Henares.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Caso del censo de Alcobendas .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4. Caso para la detección de amianto en Cartagena de Indias (Colombia).....</b>	<b>24</b>
<b>2.5. Aplicación del software ERDAS Imagine en clasificación supervisada .....</b>	<b>26</b>
2.5.1. Clasificación supervisada en ERDAS Imagine .....	26
2.5.2. Sobre las reglas no paramétricas en ERDAS Imagine .....	28
2.5.2.1. Parallelepiped.....	28
2.5.2.2. Feature Space .....	28

2.5.3.	Justificación de las clasificaciones realizadas.....	29
<b>3.</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.</b>	<b>Situación, extensión y división administrativa .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.1.</b>	<b>Bounding box de la escena .....</b>	<b>32</b>
3.1.1.1.	Coordenadas Geográficas WGS84: .....	32
3.1.1.2.	Coordenadas Proyectadas UTM 30N: .....	32
3.1.1.3.	Representación Gráfica:.....	33
<b>4.</b>	<b>DATOS, SOFTWARE Y MATERIALES.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1.</b>	<b>Datos de los que disponemos .....</b>	<b>34</b>
4.1.1.	Imagen PlanetScope: .....	34
4.1.1.1.	Bounding box de la escena (bbox):.....	35
4.1.1.2.	¿Cómo se ha adquirido la imagen?.....	35
4.1.2.	Cartografía de Centro Nacional de Información Geográfica del Instituto Geográfico Nacional (CNIG-IGN):.....	36
<b>4.2.</b>	<b>Software Del que se dispone.....</b>	<b>38</b>
4.2.1.	ERDAS Imagine 2023, v. 16.8 .....	38
4.2.2.	Orfeo ToolBox v. 9.1.....	38
4.2.3.	ArcGIS Pro .....	39
<b>4.1.</b>	<b>Herramientas en línea de las que se dispone .....</b>	<b>39</b>
4.1.1.	Google Maps .....	39
4.1.1.	Catastro.....	39
<b>4.2.</b>	<b>Equipo (Material) Del que se dispone .....</b>	<b>40</b>
<b>5.</b>	<b>METODOLOGÍA Y DESARROLLO PROPUESTO.....</b>	<b>41</b>
<b>5.1.</b>	<b>Establecer capa de edificios. Establecemos el área de estudio.....</b>	<b>41</b>
<b>5.2.</b>	<b>Analizar distintos tejados en Google Maps .....</b>	<b>42</b>
<b>5.3.</b>	<b>Extraer firmas espectrales (Capa AOI con todas las firmas separadas).....</b>	<b>43</b>
<b>5.4.</b>	<b>Analizar las firmas de edificios con amianto y sin amianto. ....</b>	<b>45</b>
<b>5.5.</b>	<b>Clasificación supervisada de tejados .....</b>	<b>46</b>
5.5.1.	Máxima verosimilitud .....	46
5.5.2.	Distancia de Mahalanobis .....	46
5.5.3.	Mapeo de Ángulo Espectral .....	46
5.5.4.	Mapeo de la Correlación Espectral .....	46
5.5.5.	Distancia mínima.....	47

<b>5.6.</b>	<b>Validación y análisis de resultados</b> .....	<b>47</b>
<b>5.7.</b>	<b>Conclusión de la METODOLOGÍA FINAL</b> .....	<b>48</b>
<b>5.8.</b>	<b>Mapa de la metodología final</b> .....	<b>48</b>
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>50</b>
<b>6.1.</b>	<b>Resultados de la fase de enmascaramiento.</b> .....	<b>50</b>
<b>6.2.</b>	<b>RESULTADOS DE LAS FIRMAS DE EDIFICIOS DE AMIANTO.</b> .....	<b>51</b>
<b>6.3.</b>	<b>Resultado final: Clasificación de los tejados en Cartagena (Murcia) siguiendo los métodos de clasificación supervisada</b> .....	<b>53</b>
<b>6.3.1.</b>	<b>Presentación y validación de resultados de la clasificación supervisada</b> .....	<b>54</b>
<b>6.3.1.1.</b>	<b>Distancia de Mahalanobis</b> .....	<b>56</b>
<b>6.3.1.2.</b>	<b>Spectral Angle Mapper</b> .....	<b>57</b>
<b>6.3.1.3.</b>	<b>Spectral Correlation Mapper</b> .....	<b>58</b>
<b>6.3.1.4.</b>	<b>Maximum Likelihood</b> .....	<b>59</b>
<b>6.3.1.5.</b>	<b>Minimum Distance</b> .....	<b>60</b>
<b>6.4.</b>	<b>Conclusión de la validación</b> .....	<b>61</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>62</b>
<b>7.1.</b>	<b>conclusiones específicas</b> .....	<b>62</b>
<b>7.2.</b>	<b>Conclusiones generales</b> .....	<b>62</b>
<b>8.</b>	<b>CRONOGRAMA</b> .....	<b>63</b>
<b>8.1.</b>	<b>Tabla de fases de trabajo</b> .....	<b>63</b>
<b>8.2.</b>	<b>Definición del área de estudio</b> .....	<b>64</b>
<b>8.3.</b>	<b>Preprocesamiento de datos</b> .....	<b>64</b>
<b>8.4.</b>	<b>Análisis espectral</b> .....	<b>65</b>
<b>8.5.</b>	<b>Clasificación y validación</b> .....	<b>65</b>
<b>8.6.</b>	<b>Generación de documentos</b> .....	<b>65</b>
<b>9.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN DE PRECIOS Y PRESUPUESTO</b> .....	<b>66</b>
<b>9.1.</b>	<b>Justificación de precios</b> .....	<b>66</b>
<b>9.2.</b>	<b>Presupuesto</b> .....	<b>67</b>

<b>10.</b>	<b>IMPACTO ÉTICO Y AMBIENTAL .....</b>	<b>68</b>
<b>10.1.</b>	<b>Punto de vista médico.....</b>	<b>68</b>
<b>10.2.</b>	<b>Punto de vista socioeconómico .....</b>	<b>71</b>
<b>10.3.</b>	<b>Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) .....</b>	<b>72</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXO 1. Diagrama de Gantt .....</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXO 2. Tabla de horas por tarea e ítem del presupuesto .....</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXO 3. Ficha Técnica de la imagen .....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXO 4. Información Catastral de edificios con contenido de amianto .....</b>	<b>78</b>
	<b>ANEXO 5. Edificios con contenido de amianto .....</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXO 6. Edificios sin amianto.....</b>	<b>80</b>
	<b>ANEXO 7. Firmas de todos los edificios mostrados .....</b>	<b>81</b>
	<b>Anexo 8. Imágenes de edificios con amianto en Google Maps.....</b>	<b>82</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>1</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. FLUJOGRAMA DE LA METODOLOGÍA DEL CENSO DE MADRID. FUENTE: ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA DE EDIFICIOS CON CUBIERTAS DE AMIANTO EN EL MUNICIPIO DE MADRID.....	23
ILUSTRACIÓN 2. FLUJO DE TRABAJO DE DETECCIÓN DE AMIANTO EN ALCOBENDAS. FUENTE: WEBINAR ¿CÓMO REALIZAR EL CENSO DE AMIANTO DE TU AYUNTAMIENTO? (YOUTUBE) .....	24
ILUSTRACIÓN 3. FLUJO DE TRABAJO PROPUESTO POR SABA ET AL. FUENTE: ANÁLISIS DE LA CLASIFICACIÓN DE TECHOS DE FIBROCEMENTO EN ÁREAS URBANAS: MÉTODOS SUPERVISADOS Y NO SUPERVISADOS CON TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL E HIPERESPECTRAL.....	26
ILUSTRACIÓN 4. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA CLASIFICACIÓN. FUENTE: HEXAGON. DOCUMENTACIÓN ERDAS IMAGINE .....	27
ILUSTRACIÓN 5. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA ERDAS IMAGINE. FUENTE: SOFTWARE ERDAS IMAGINE V. 16.8. ....	27
ILUSTRACIÓN 6. CLASIFICACIÓN DE PARALELEPÍEDOS. FUENTE: HEXAGON. DOCUMENTACIÓN ERDAS IMAGINE.....	28
ILUSTRACIÓN 7. ESPACIO DE CARACTERÍSTICAS. FUENTE: HEXAGON. DOCUMENTACIÓN ERDAS IMAGINE.....	29
ILUSTRACIÓN 8. FIGURA. MAPA DE ESPAÑA Y UBICACIÓN DEL MUNICIPIO DE CARTAGENA EN LA REGIÓN DE MURCIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	31
ILUSTRACIÓN 9. FIGURA. EDIFICIOS DE LA ZONA URBANA DE CARTAGENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	32
ILUSTRACIÓN 10. FIGURA. REPRESENTACIÓN DE LOS LÍMITES DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	33
ILUSTRACIÓN 11. EDIFICIOS ENMASCARADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	37
ILUSTRACIÓN 12. FLUJOGRAMA PARA DELIMITAR LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	42
ILUSTRACIÓN 13. CREACIÓN DE CAPA AOI DE MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	43
ILUSTRACIÓN 14. MUESTRAS DE AMIANTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	44
ILUSTRACIÓN 15. MUESTRAS DE OTROS MATERIALES DISTINTOS AL AMIANTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	44
ILUSTRACIÓN 16. EXTRACCIÓN DE FIRMAS ESPECTRALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	45
ILUSTRACIÓN 17. FLUJOGRAMA DE LA CLASIFICACIÓN DE TEJADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA ...	47
ILUSTRACIÓN 18. FLUJOGRAMA DE LA VALIDACIÓN DE RESULTADOS EN ORFEO TOOLBOX. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	47
ILUSTRACIÓN 19. FLUJOGRAMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	48
ILUSTRACIÓN 20. NDBI EN SPATIAL MODEL EDITOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN ERDAS IMAGINE. ....	50
ILUSTRACIÓN 21. NBAI EN SPATIAL MODEL EDITOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN ERDAS IMAGINE. ....	50
ILUSTRACIÓN 22. MUESTRAS DE AMIANTO, REPRESENTACIÓN DEL VALOR DE REFLECTANCIA MEDIO EN CADA BANDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	51
ILUSTRACIÓN 23. FIRMAS ESPECTRALES DE AMIANTO Y DE OTROS MATERIALES DISTINTOS AL AMIANTO. FUENTE: CHANCHÍ-GOLONDRINO ET AL., EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA EFICACIA Y EFICIENCIA DE LOS MÉTODOS COMPUTACIONALES EN LA DETECCIÓN DE FIBROCEMENTO EN IMÁGENES H.....	52

ILUSTRACIÓN 24. FIGURA. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA EN CARTAGENA POR MÉTODOS SUPERVISADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	53
ILUSTRACIÓN 25. UNIFICACIÓN DE POLÍGONOS Y FIRMAS PARA LA VALIDACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	54
ILUSTRACIÓN 26. REPRESENTACIÓN DE LAS FIRMAS EN ERDAS IMAGINE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN ERDAS IMAGINE.....	55
ILUSTRACIÓN 27. FASE DE DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	64
ILUSTRACIÓN 28. FASE DE PROCESAMIENTO DE DATOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	64
ILUSTRACIÓN 29. FASE DE ANÁLISIS ESPACIAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	65
ILUSTRACIÓN 30. FASE DE CLASIFICACIÓN Y VALIDACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	65
ILUSTRACIÓN 31. FASE DE GENERACIÓN DE DOCUMENTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	65
ILUSTRACIÓN 32. PULMÓN SANO. FUENTE: PINTEREST.....	70
ILUSTRACIÓN 33. PULMÓN CON CANCER. FUENTE: WEB CANCER.PUB. ....	71
ILUSTRACIÓN 34. PULMÓN CON ASBESTOSIS. FUENTE: PINTEREST. ....	71
ILUSTRACIÓN 35. ICONOGRAFÍA REPRESENTATIVA DE CADA UNO DE LOS ODS. FUENTE: WEB ODS DE LA ONU.....	72
ILUSTRACIÓN 36. ODS 11. FUENTE: WEB ODS 11 DE LA ONU. ....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. VARIEDADES DE AMIANTO MÁS UTILIZADAS Y SUS MINERALES ANÁLOGOS NO FIBROSOS. ....	19
TABLA 2. REPRESENTACIÓN DE LAS ESQUINAS .....	33
TABLA 3. INFORMACIÓN DEL PRODUCTO PLANETSCOPE. FUENTE: WEB DE LA ESA – SECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE PLANET SCOPE .....	34
TABLA 4. CÁMARA (INSTRUMENTO) DEL SATÉLITE PLANET SCOPE. FUENTE: WEB DE LA ESA – SECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE PLANET SCOPE .....	36
TABLA 5. TABLA DE ATRIBUTOS DE LA CARTOGRAFÍA VECTORIAL DE EDIFICIOS DEL IGN. FUENTE: DOCUMENTO DE ESPECIFICACIONES DE LA BTN. ....	36
TABLA 7. VERIFICACIÓN DEL MÉTODO DE LA DISTANCIA DE MAHALANOBIS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	56
TABLA 8. VERIFICACIÓN DEL MÉTODO SPECTRAL ANGLE MAPPER. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	57
TABLA 9. VERIFICACIÓN DEL MÉTODO SPECTRAL CORRELATION MAPPER. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	58
TABLA 10. VERIFICACIÓN DEL MÉTODO DE MAXIMUM LIKELIHOOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..	59
TABLA 11. VERIFICACIÓN DEL MÉTODO DE MINIMUM DISTANCE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	60
TABLA 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	61
TABLA 12. SOBRE LAS HORAS DE TRABAJO SEGÚN EL CRONOGRAMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	63
TABLA 13. JUSTIFICACIÓN DE PRECIOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	66
TABLA 14. MEDICIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	67
TABLA 15. PRESUPUESTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	67

## **ÍNDICE DE ECUACIONES**

ECUACIÓN 1. NDBI .....	41
ECUACIÓN 2. NBAI .....	41

El autor del presente Trabajo declara ser responsable de la elaboración y autoría del mismo, asegurando con ello que no existe plagio, ni parcial ni total, ni el uso de medios externos de generación de contenido automático en la redacción de la memoria del TFT y garantiza que el contenido del TFT es fruto de su trabajo y, por tanto, de aportación propia y original.

## **1. MOTIVACIONES, LEGISLACIÓN Y OBJETO**

El amianto, del cual se conoce una serie de minerales fibrosos provenientes de los silicatos, viene utilizándose por la humanidad desde el 4000 a. C., la Edad de Piedra; arqueólogos han encontrado fibras de amianto en cerámica y posibles mechas de lámparas y velas, ya que es un material resistente al fuego. San Isidoro de Sevilla, en sus Etimologías, ya hablaba del amianto que conocemos, diciendo de este material que se usaba en telas por ser un hilo que era ignífugo, casi con mágicas propiedades. Sin embargo, no fue hasta mediados del siglo XIX que la explotación de estos minerales se realiza de la forma industrial en la que lo conocemos.<sup>1</sup>

### **1.1. SOBRE EL AMIANTO EN EL MUNDO**

A principios del Siglo XX, Montague Murray fue de las primeras personas en documentar la nocividad del amianto por un caso de un hombre que falleció a los 33 años de edad por fibrosis pulmonar tras haber trabajado durante 14 años en una fábrica textil de amianto, ya que las fibras de este mineral pueden desprenderse fácilmente y ser respiradas.<sup>2</sup>

No fue hasta el año 1924 que Nellie Kershaw fallece por asbestosis, declarado oficialmente, dada su exposición en el trabajo. Inglaterra regula sobre la nocividad del amianto a partir de 1931 mediante The Asbestos Industry Regulations.<sup>3</sup> En Islandia, Noruega o Suecia se prohíbe la comercialización del amianto en 1984.<sup>4</sup>

### **1.2. SOBRE EL AMIANTO EN ESPAÑA**

En España el amianto se populariza en 1920 por la empresa Uralita S. A., empresa que le dio tanta fama a este mineral que muchas personas lo llaman uralita en vez de amianto o asbesto. La fama del amianto en España tuvo su clímax de 1965 a 1995, vendiéndose en España durante todo el siglo XX un total de 2,6 millones de toneladas de amianto.<sup>5</sup> Se obliga a retirar el amianto, especialmente las de carácter público, antes de 2028.<sup>6</sup>

### **1.3. LEGISLACIÓN EN ESPAÑA**

La legislación en España es relativamente reciente, centrada sobre todo en proteger la salud de los trabajadores.

“Se ha determinado que ciertos materiales que contienen amianto, como el fibrocemento, tienen una vida útil estimada de entre 30 y 50 años. Considerando las importaciones de amianto realizadas en el país, se puede estimar que para el año 2020, aproximadamente el 65% de los materiales de fibrocemento producidos e instalados hasta 1980 ya han superado su vida útil. Para el año 2030, este porcentaje aumentará al 87%, y para el año 2040, todos

los materiales de fibrocemento habrán excedido esta estimación (Instituto de Salud Pública y Laboral de Navarra, 2020). Esto implica que el riesgo de exposición ambiental al amianto está en aumento y será cada vez más elevado, a menos que los materiales que contienen amianto sean retirados adecuadamente de edificios, empresas y vertederos no controlados, y almacenados en condiciones seguras”<sup>7</sup>.

### **1.3.1. Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre**

Se imponen limitaciones a la comercialización y uso de preparados peligrosos. Así dice el Artículo 1º: “La comercialización y el uso en todo el territorio nacional de las sustancias y preparados peligrosos recogidos en el anexo I del presente Real Decreto, quedarán sometidos a las limitaciones establecidas en el mismo”.<sup>8</sup>

### **1.3.2. Real Decreto 374/2001, de 6 de abril**

“Sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo”<sup>9</sup>.

### **1.3.3. Orden Ministerial de 7 de diciembre del 2001**

Prohibición total de la comercialización del amianto. Modificación del anexo 1 del Real Decreto 1406/1989:

“Artículo único. Modificación del anexo I del Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre.

1. Se sustituye el punto 4, fibras de amianto, de la parte 1 del anexo I del Real Decreto 1406/1989, por el que figura en el anexo de la presente Orden.
2. A partir de la entrada en vigor de la presente disposición, queda prohibida la utilización, producción y comercialización de las fibras señaladas en el apartado anterior y de los productos que las contengan”.<sup>10</sup>

### 1.3.4. Variedades de amianto más utilizadas.

Tabla 1. Variedades de amianto más utilizadas y sus minerales análogos no fibrosos.

Grupo	Denominación	Fórmula química	Nº CAS
Serpentinas	Crisotilo	$Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$	12001-29-5
Anfíboles	Crocidolita	$Na_2Fe_3^{2+}Fe_2^{3+}(Si_4O_{22})(OH)_2$	12001-28-4
	Amosita	$(Fe^{2+}, Mg)_7(Si_8O_{22})(OH)_2$	12172-73-5
	Antofilita amianto	$(Mg, Fe^{2+})_7(Si_8O_{22})(OH,F)_2$	77536-67-5
	Actinollita amianto	$Ca_2(Fe^{2+}, Mg)_3(Si_8O_{22})(OH)_2$	77536-66-4
	Tremolita amianto	$Ca_2Mg_5(Si_8O_{22})(OH)_2$	77536-68-6

En la tabla anterior, Tabla 1, están representadas las variedades de amianto más utilizadas y sus grupos. La identificación es internacionalmente validada, acorde al Chemical Abstract Service, que garantiza la estandarización. La normativa que establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud en entornos riesgosos de trabajo es la siguiente, que coincide en la fuente de la que se ha extraído la información para hacer la tabla: Cuadro del artículo 2 del Real Decreto 396/2006, de 31 de Marzo.

### 1.3.5. Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular

Establece, en su Disposición adicional 14ª, que: “En el plazo de un año desde la entrada en vigor de la ley, los ayuntamientos elaborarán un censo de instalaciones y emplazamientos con amianto incluyendo un calendario que planifique su retirada. Tanto el censo como el calendario, que tendrán carácter público, serán remitidos a las autoridades sanitarias, medioambientales y laborales competentes de las comunidades autónomas, las cuales deberán inspeccionar para verificar, respectivamente, que se han retirado y enviado a un gestor autorizado.

Esa retirada priorizará las instalaciones y emplazamientos atendiendo a su grado de peligrosidad y exposición a la población más vulnerable. En todo caso las instalaciones o emplazamientos de carácter público con mayor riesgo deberán estar gestionadas antes de 2028.”<sup>11</sup>

### 1.3.6. Directrices para la retirada del amianto instalado

El pasado mes de junio del año 2024, se publicaron unas Directrices para la retirada del amianto instalado de forma interministerial por el Ministerio de Sanidad; Ministerio de trabajo y Economía, y el Ministerio para la Transición Ecológica y reto demográfico. Fueron

sometidas a consulta de la Federación Española de Municipios y provincias (FEMP) en el mes de mayo del año 2024.<sup>12</sup> La legislación obliga a retirar el amianto, especialmente el contenido de amianto en edificios públicos y en aquellos lugares que puedan suponer un verdadero riesgo para la salud de las personas, antes de 2028.<sup>13</sup>

## 1.4. OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es la identificación de cubiertas con contenido de amianto mediante sistemas espectrales de observación de la tierra en el municipio de Cartagena. Todo ello se realizará usando imágenes satelitales multiespectrales obtenidas por el sensor PlanetScope y procesadas por el software especializado ERDAS Imagine (Versión 16.8, 2023).

Para alcanzar el objetivo general, hay una serie de objetivos específicos que se plantean en el marco de una metodología del proyecto basado en técnicas de teledetección:

- Segregar entre tipos de cubiertas, especialmente las que contienen amianto, por medio de las imágenes multiespectrales. Este primer paso de diferenciar los diferentes tipos de cubierta es un proceso técnico que no se basa todavía en el análisis de firmas espectrales, sino la inspección ocular en campo por un técnico correctamente documentado. Para posteriormente realizar una buena clasificación, el ingeniero debe trasladarse a Cartagena o, en nuestro caso, ante la imposibilidad de ir, se ha decidido que la forma más semejante es trabajar con las imágenes de Google Maps y la posibilidad de vista desde caminos, calles y carreteras. De forma paralela, se recoge información catastral para asegurar, por medio del año de construcción, que se trata verdaderamente de amianto y no de algún material similar sustituto más moderno.
- Extraer firmas espectrales de los diferentes tipos de tejado en Cartagena. Para la posterior clasificación, se extraerán las firmas espectrales de los diferentes tejados, cada firma tendrá su propia clase y estarán agrupados en amianto o no amianto.
- Comparar los algoritmos de clasificación que se pueden hacer en ERDAS Imagine. El software propone cinco técnicas distintas de clasificación multiespectral supervisada donde se analizan las precisiones en la discriminación de amianto.
- Establecer una metodología basada en ERDAS Imagine y el mejor algoritmo para la clasificación de tejados de amianto en este software. Basándonos en los resultados de la comparación de algoritmos, se establece y documenta una metodología optimizada para la clasificación de tejados con amianto, esta metodología servirá como flujo de trabajo replicable en ERDAS Imagine.
- Generar la cartografía georreferenciada de techos con contenido de amianto detectados. Representando la distribución espacial de los techos con contenido de amianto en el municipio, la cartografía podrá servir como censo visual de las cubiertas con presencia de amianto que, validadas una por una mediante la inspección ocular de un técnico

debidamente instruido proporcionará una herramienta fundamental para gestionar y planificar ambientalmente la retirada de este nocivo material.

## 2. ANTECEDENTES

Si bien es verdad que el ayuntamiento de Cartagena (Murcia) no tiene censo de amianto, sí tenemos metodologías anteriores propuestas que nos servirán para hacer la nuestra teniendo en cuenta los objetivos mencionados en el capítulo anterior de este Trabajo Fin de Grado. Tendremos en consideración las metodologías siguientes:

- Centro de Observación y Teledetección Espacial, S.A.U. (COTESA). (2023). Elaboración de cartografía de edificios con cubiertas de amianto en el municipio de Madrid. Ayuntamiento de Madrid.  
[https://geoportal.madrid.es/fsdescargas/IDEAM\\_WBGEOPORTAL/SATELITE/AMIANTO/AMIANTO\\_2023/EsAytMadrid2023\\_Informe\\_DeteccionAmianto.pdf](https://geoportal.madrid.es/fsdescargas/IDEAM_WBGEOPORTAL/SATELITE/AMIANTO/AMIANTO_2023/EsAytMadrid2023_Informe_DeteccionAmianto.pdf)
- Álvarez López, P. (2023). Desarrollo metodológico para la identificación de cubiertas de fibrocemento por teledetección [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Alcalá]. e\_Buah.  
<https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/61859>
- Montesinos, S. (2023). ¿Cómo realizar el censo de amianto de tu Ayuntamiento? [Webinar]. GEODIM.  
<https://www.geodim.es/noticia.aspx?page=Alcobendas%20ya%20tiene%20su%20censo%20de%20amianto>
- Saba, M., Castrillón-Ortíz, C., Valdelamar-Martínez, D., Coronado-Hernández, O. E., & Bustillo-LeCompte, C. (2025). Analysis of asbestos-cement roof classification in urban areas: Supervised and unsupervised methods with multispectral and hyperspectral remote sensing. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 37, 101464.  
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101464>

### 2.1. CASO DEL CENSO DE MADRID

Señalamos, de este caso, que la metodología que propone es de alto interés ya que, además de que será la que dé el marco a nuestra metodología (Al estar esta previamente ensayada), el informe que elabora COTESA para el Ayuntamiento de Madrid nos da información de gran valor. Veo necesario mostrar este párrafo donde se nos dan las líneas generales de esta metodología:

“El principal objetivo de esta metodología consistió en generar una cartografía de cubiertas de amianto a partir de imágenes de satélite de muy alta resolución (imágenes VHR por sus siglas en inglés) utilizando, para ello, técnicas avanzadas de Inteligencia Artificial y de teledetección. Finalmente se propone la elaboración periódica de una cartografía de cubiertas de amianto (anual) para poder monitorizar el proceso de desamiantado que se produzca en la zona de estudio.”<sup>14</sup> El siguiente flujograma, que viene del informe de detección de amianto ([ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA DE EDIFICIOS CON CUBIERTAS DE](#)

[AMIANTO EN EL MUNICIPIO DE MADRID](#)), se replicará, con sus debidas observaciones y cambios, en este documento.

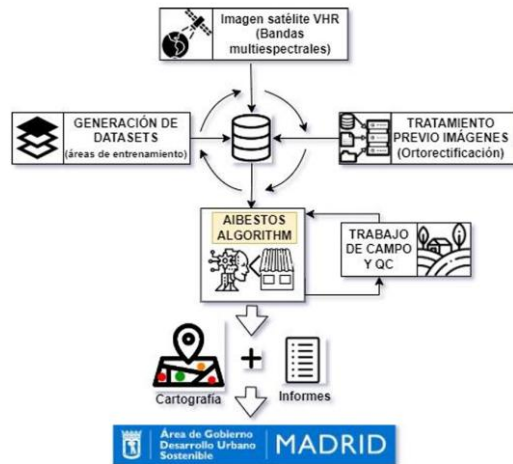


Ilustración 1. Flujograma de la metodología del censo de Madrid. Fuente: ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA DE EDIFICIOS CON CUBIERTAS DE AMIANTO EN EL MUNICIPIO DE MADRID

## 2.2. CASO DEL CENSO DE ALCALÁ DE HENARES

Señalamos de este caso que fue el primer documento que tuve, proporcionado por Hexagon, donde se daban las especificaciones necesarias que se requerían en este proyecto. Al ser un estudio académico que tiene en cuenta las regulaciones sobre el amianto con gran cuidado, ha sido un interesante documento bibliográfico. El subrayado de la importancia y necesidad del uso de los Sistemas Espectrales de Observación de la Tierra en este proyecto hacen que este párrafo sea de interés:

“Este estudio se centra en la detección de cubiertas de fibrocemento en el municipio de Alcalá de Henares a través de análisis de imágenes satelitales Deimos-2 y ortofotografías del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Se han utilizado tres enfoques distintos: clustering, Random Forest y redes neuronales convolucionales. Este estudio tiene aplicaciones significativas en la planificación urbana, la gestión ambiental y el cumplimiento de regulaciones relacionadas con el fibrocemento en la construcción. Además, este estudio subraya la importancia de la teledetección como una herramienta para abordar problemas en el entorno urbano y destaca la diversidad de enfoques disponibles para la detección de materiales. Este trabajo proporciona una base para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el campo de la teledetección y la gestión urbana.”<sup>15</sup>

## 2.3. CASO DEL CENSO DE ALCOBENDAS

De este caso, que se explica en un webinar en YouTube de la empresa Bureau Veritas España, lo más interesante es la explicación por el marco legislativo, además de que hacen un largo análisis de cómo se debe trabajar en este tipo de proyectos. De este caso, los ponentes hacían

un gran hincapié en la inspección visual in situ; en este Trabajo Final de Titulación, ante la imposibilidad de trasladarme a Cartagena por los costes que podría haber ocasionado, se ha resuelto de otra forma que se detallará más adelante. Veo necesaria la lectura de estos párrafos en la web que nos indica en líneas muy generales la motivación y la línea general de trabajo:

“El peligro del amianto se debe a las fibras inhalables que se liberan al medio ambiente. Esta liberación, especialmente en el caso de las cubiertas de fibrocemento, se debe principalmente a la exposición a la intemperie. (...)

Alcobendas es uno de los primeros municipios de España en contar con un censo georreferenciado de cubiertas de fibrocemento de todo el municipio realizado mediante técnicas de sistemas espectrales de observación de la tierra de muy alta resolución por las empresas Bureau Veritas y SM GEODIM”.<sup>16</sup> Aquí se representa un fotograma del vídeo (Fuente: <https://youtu.be/NokYGL-e-bQ?si=foMWYXmAsXznm39q>) webinar donde se habla del Flujo de Trabajo, donde el apartado resaltado en la diapositiva es diferente:



Ilustración 2. Flujo de trabajo de detección de amianto en Alcobendas. Fuente: Webinar ¿Cómo realizar el censo de Amianto de tu Ayuntamiento? (Youtube)

Aprovechando la multiespectralidad de las imágenes satelitales, podremos segmentar el municipio para encontrar superficies potenciales de amianto. Las respuestas del amianto son diversas: La exposición al sol o el envejecimiento del material hacen que las respuestas espectrales varíen.

## 2.4. CASO PARA LA DETECCIÓN DE AMIANTO EN CARTAGENA DE INDIAS (COLOMBIA)

Este documento académico es el más interesante de todos. Nuestra metodología está, junto al del Ayuntamiento de Madrid, íntimamente relacionada con el trabajo realizado por estos doctores. Las conclusiones acertadas y la comparación de los datos hiperespectrales con los

multiespectrales, y de la clasificación supervisada con la no supervisada, hacen que se avale el uso de imágenes multiespectrales y los métodos supervisados.

“Los techos de fibrocemento, que se encuentran comúnmente en las áreas urbanas, presentan riesgos ambientales y para la salud a medida que se deterioran, liberando fibras de asbesto a la atmósfera. La identificación y clasificación precisas de estos techos son esenciales para evaluar los peligros potenciales e implementar las medidas de remediación adecuadas. Este estudio presenta un análisis exhaustivo de los métodos de clasificación supervisados y no supervisados para la identificación de techos de fibrocemento en un área urbana utilizando datos de teledetección multiespectrales e hiperespectrales. Se emplearon seis métodos de clasificación supervisados bien establecidos y dos métodos de clasificación no supervisados para analizar datos multiespectrales (satélite WorldView 3) e hiperespectrales (sobrevuelo), ofreciendo resoluciones de píxeles terrestres de 3,7 m y 1,2 m para ambas imágenes. ENVI® se utilizó con fines de clasificación. Los métodos supervisados incluidos en el estudio fueron paralelepípedo (PP), distancia mínima (MiD), distancia de Mahalanobis (MhD), mapeador de ángulos espectrales (SAM), máquina de vectores de soporte (SVM) y divergencia de información espectral (SID). Por el contrario, los métodos no supervisados fueron K-Means e ISO-Data. El rendimiento de clasificación de cada método se evaluó en función de varias métricas. La novedad de este estudio radica en la primera comparación de seis métodos supervisados y dos no supervisados aplicados a imágenes hiperespectrales capturadas a través de levantamientos aéreos e imágenes satelitales sobre la misma área urbana. Los resultados indican que los datos hiperespectrales superaron a los datos multiespectrales en términos de clasificación de techos de fibrocemento, lo que demuestra el potencial de las imágenes hiperespectrales para una identificación más precisa. Además, los clasificadores supervisados superaron consistentemente a los métodos no supervisados, lo que destaca la importancia del conocimiento a priori para una clasificación precisa. Por el contrario, el análisis de costo-beneficio revela que las imágenes multiespectrales son significativamente más rentables, son hasta 6,5 veces menos costosas y requieren aproximadamente 32 veces menos recursos computacionales que las imágenes hiperespectrales. Este estudio proporciona información importante para la planificación urbana, la evaluación ambiental y la gestión de la salud pública al permitir una identificación precisa y eficiente de los techos de fibrocemento en áreas urbanas. Los hallazgos resaltan el papel fundamental de seleccionar datos de teledetección y técnicas de clasificación apropiados para tales aplicaciones. La metodología y los resultados ofrecen una valiosa orientación a las autoridades locales, los investigadores y los responsables políticos para abordar los riesgos relacionados con el amianto, especialmente en los países en desarrollo que se enfrentan a estos desafíos”.<sup>17</sup> Aquí se muestra el flujo de trabajo propuesto, que presenta grandes similitudes con nuestra propuesta (Fuente: Saba et al. [https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2352938525000175-gr2\\_lrg.jpg](https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2352938525000175-gr2_lrg.jpg)):

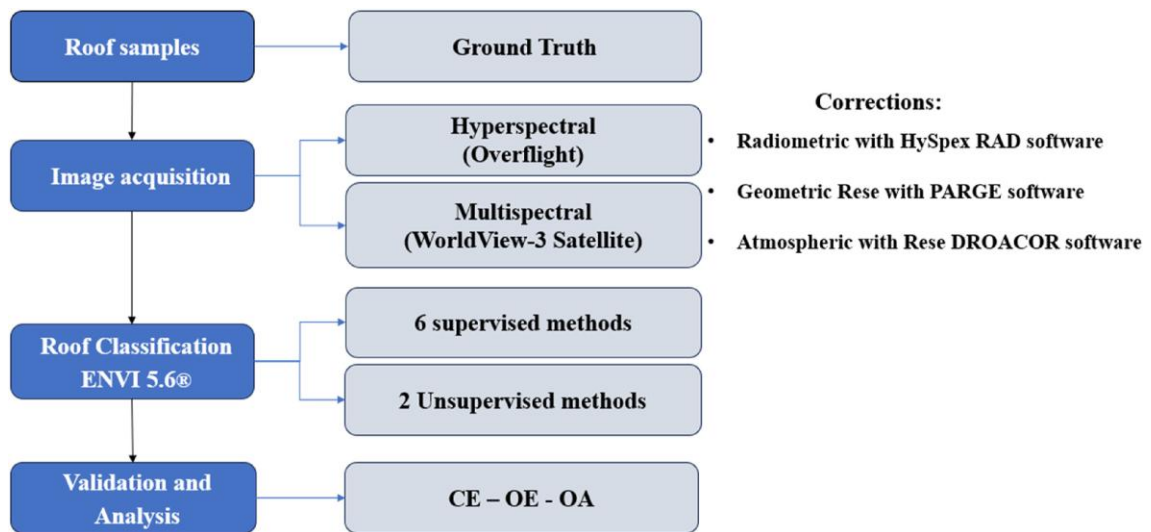


Ilustración 3. Flujo de trabajo propuesto por Saba et al. Fuente: Análisis de la clasificación de techos de fibrocemento en áreas urbanas: Métodos supervisados y no supervisados con teledetección multispectral e hiperespectral

## 2.5. APLICACIÓN DEL SOFTWARE ERDAS IMAGINE EN CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

Estas metodologías propuestas no utilizan ERDAS Imagine, software ampliamente utilizado en el mundo de la Teledetección. Por ello, también veo necesario en este apartado de antecedentes explicar las posibles soluciones que nos ofrece este software para nuestra clasificación de cubiertas en el municipio de Cartagena.

### 2.5.1. Clasificación supervisada en ERDAS Imagine

Esta ilustración sobre la clasificación supervisada en ERDAS Imagine es muy interesante, ya que nos hace ver que hay un primer criterio que es la elección o no de una regla no paramétrica en la que se corre el riesgo de que asigne directamente el valor sin pasar por reglas paramétricas que tienen lógicas más complejas, pero proporcionan una mayor precisión, la necesaria para nuestro trabajo.

(Fuente:

[https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/viewer/attachment/uOKHREQkd\\_XR9iPo9Y\\_ljw/Vxy~12L~VT\\_8gq9BcKB0ZA-uOKHREQkd\\_XR9iPo9Y\\_ljw/](https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/viewer/attachment/uOKHREQkd_XR9iPo9Y_ljw/Vxy~12L~VT_8gq9BcKB0ZA-uOKHREQkd_XR9iPo9Y_ljw/));

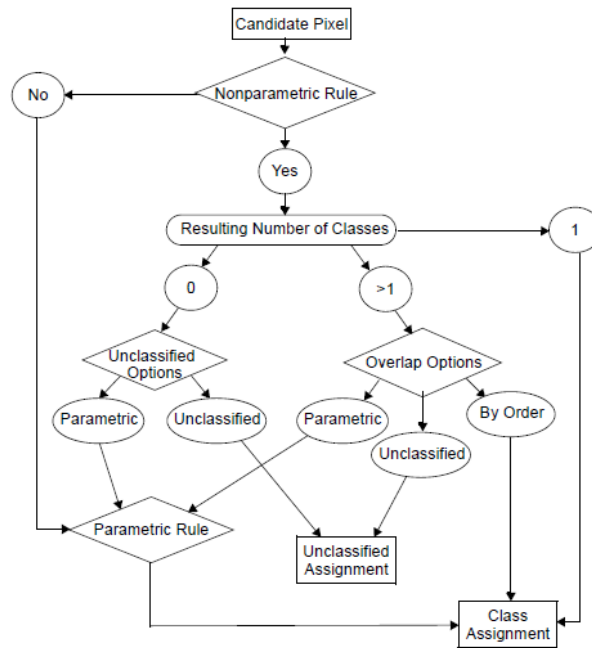


Ilustración 4. Diagrama de flujo de la clasificación. Fuente: Hexagon. Documentación ERDAS Imagine

El software ERDAS Imagine, a la hora de clasificar los tejados, nos permite tomar una serie de decisiones como: Elegir si queremos establecer reglas no paramétricas o elegir entre cada una de las posibles reglas. Aquí una imagen de la clasificación supervisada que relaciona el comportamiento de la algoritmia previamente indicada con la interfaz del software:

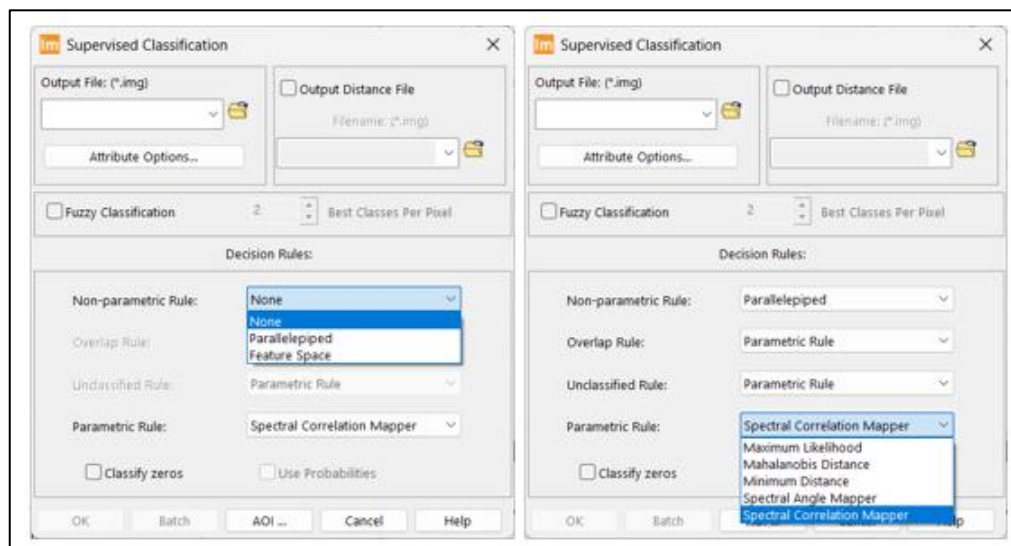


Ilustración 5. Clasificación supervisada ERDAS Imagine. Fuente: Software ERDAS Imagine v. 16.8.

### 2.5.2. Sobre las reglas no paramétricas en ERDAS Imagine

Veamos sobre las reglas no paramétricas del software ERDAS Imagine:

Estas reglas no paramétricas son Parallelepiped y Feature Space.

#### 2.5.2.1. Parallelepiped

La regla no paramétrica de Paralelepípedos consiste en definir un rectángulo para cada clase, cada píxel se asigna o no si está contenido en dicho rectángulo. Los límites del rectángulo se pueden tomar de muchas formas. Por ejemplo, por valores mínimos y máximos, la medida de la banda con una desviación estándar o cualquier otro límite que se especifique. Aquí la ilustración de la regla usada en ERDAS Imagine.

(Fuente:

[https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/r/uOKHREQkd\\_XR9iPo9Y\\_ljw/jMUzJLm25Sn2\\_ZDxOt9t5A](https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/r/uOKHREQkd_XR9iPo9Y_ljw/jMUzJLm25Sn2_ZDxOt9t5A)):

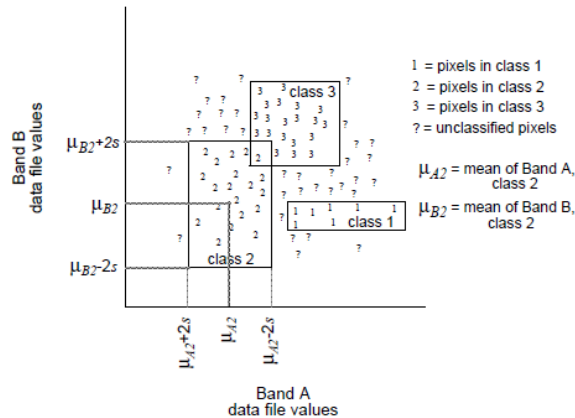


Ilustración 6. Clasificación de paralelepípedos. Fuente: Hexagon. Documentación ERDAS Imagine.

#### 2.5.2.2. Feature Space

La regla no paramétrica de espacio característico, que consiste en que cuando un valor no cae dentro de un polígono, queda sin clasificar. Aquí la explicación de la regla usada en ERDAS Imagine.

(Fuente:

[https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/r/uOKHREQkd\\_XR9iPo9Y\\_ljw/jMUzJLm25Sn2\\_ZDxOt9t5Av](https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/r/uOKHREQkd_XR9iPo9Y_ljw/jMUzJLm25Sn2_ZDxOt9t5Av)):

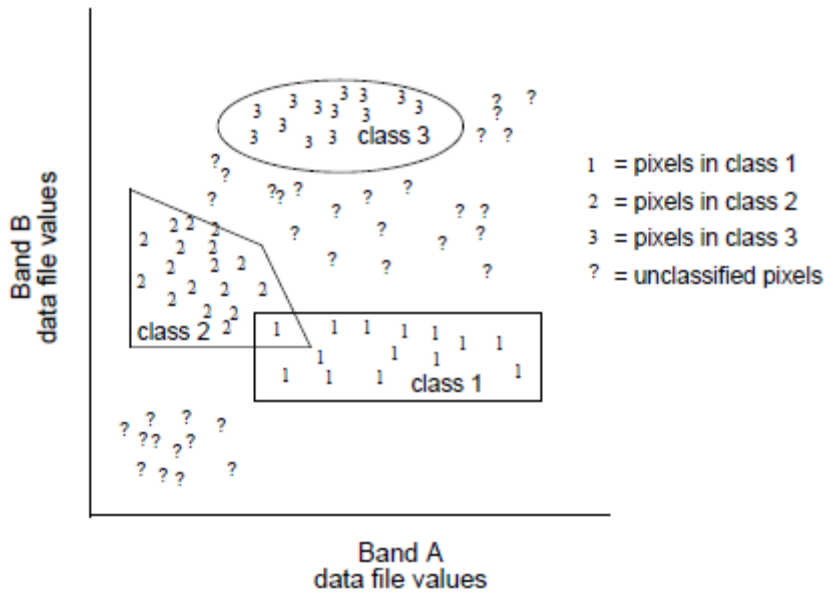


Ilustración 7. Espacio de características. Fuente: Hexagon. Documentación ERDAS Imagine.

### 2.5.3. Justificación de las clasificaciones realizadas.

Los sistemas de clasificación son variados, también, en sus reglas paramétricas. Podemos optar por 5 diferentes en el apartado “parametric rules”: Este texto de Hexagon para ERDAS Imagine es sumamente instructivo:

“Cuando se realiza una clasificación de Distancia mínima, Distancia de Mahalanobis, Máxima verosimilitud, Mapeador de ángulo espectral o Mapeador de correlación espectral, se puede producir un archivo de imagen de distancia además de la capa ráster temática de salida. Un archivo de imagen de distancia es una capa ráster continua de 32 bits de una banda en la que cada valor de archivo de datos representa el resultado de una ecuación de distancia espectral, en función de la regla de decisión utilizada.

En una clasificación de distancia mínima, cada valor de distancia es la distancia espectral euclidiana entre el vector de medición del píxel y el vector medio de la clase del píxel.

En una clasificación de Distancia de Mahalanobis o Máxima verosimilitud, el valor de distancia es la Distancia de Mahalanobis entre el vector de medición del píxel y el vector medio de la clase del píxel.

En una clasificación de Spectral Angle Mapper o Spectral Correlation Mapper, los valores de distancia se asignan como la suma de los ángulos de las dos curvas espectrales.

Los píxeles más brillantes (que contienen los valores de archivo de distancia más altos) están espectralmente más lejos de las medias de firma para las clases a las que están asignados. Es más probable que se clasifiquen erróneamente.

Los píxeles más oscuros están espectralmente más cerca y es más probable que se clasifiquen correctamente. Si se utilizó el entrenamiento supervisado, los píxeles más oscuros suelen ser las muestras de entrenamiento”<sup>18</sup>.

Como hemos visto en líneas generales, las cinco técnicas elegidas representan lógicas diferentes, pero guardan una similitud que las hace idóneas según el caso de Cartagena de Indias: Supervisión clasificada.

- Máxima verosimilitud es un clasificador robusto que funciona por distribución normal. Considera dispersión y varianza, lo que lo hace muy utilizado por su fiabilidad.
- Mapeador de Ángulo Espectral se centra en la firma espectral, de gran utilidad en nuestra imagen donde dos cubiertas de amianto no están iluminadas de la misma forma. Clasifica píxeles basándose en el ángulo entre vectores espectrales y las firmas.
- Distancia de Mahalanobis es similar a máxima verosimilitud, ya que trabaja con la covarianza de las bandas (mayor precisión que mínima distancia) y de esas varianzas crea un complemento comparador con máxima verosimilitud.
- Distancia mínima es el clasificador más simple, fundamentado en la distancia Euclídeana.
- Mapeador de Correlación Espectral se enfoca en la firma espectral de un píxel desconocido y uno de referencia. Se utiliza mucho en clasificación de cubiertas metálicas.<sup>19</sup>

Aunque ERDAS Imagine dispone de herramientas avanzadas como Spatial Model Editor que permite integrar múltiples datos y crear flujos de trabajo complejos, se decide no usarlo por las siguientes razones: Nos enfocamos en la Clasificación Espectral desde el punto de vista radiométrico, la identificación del amianto por medio de su firma espectral; los proyectos que utilizan Spatial Model Editor son más complejos. Dicha complejidad podría ser el objetivo de un TFG, pero no el nuestro. Frente a la precisión que nos puede dar Spatial Model Editor, preferimos la sencillez de su apartado de Clasificación Supervisada.

ERDAS Imagine dispone también de clasificaciones no supervisadas, como el algoritmo Kmeans: La agrupación de píxeles basadas en propiedades espectrales sin utilizar entrenamiento puede servir para una segmentación inicial, pero ineficaz para la precisión necesaria. Agrupar tejados de esta forma mezclaría y agruparía materiales similares y reduciría considerablemente la fiabilidad del censo, por ello se prioriza el método supervisado.

La herramienta de Supervisión Clasificada contiene la posibilidad de utilizar otros algoritmos simplistas como el de paralelepípedos o el de espacio de características. Estos clasificadores asignan píxeles a una clase por medio de rangos predefinidos, lo que lo hace propenso a errores cuando hay gran variabilidad de datos, como en este caso. Las firmas espectrales pueden variar por envejecimiento, suciedad, musgo... Necesitamos algoritmos más controlables y robustos. Por ello nos decantaremos por los métodos paramétricos de clasificación supervisada.



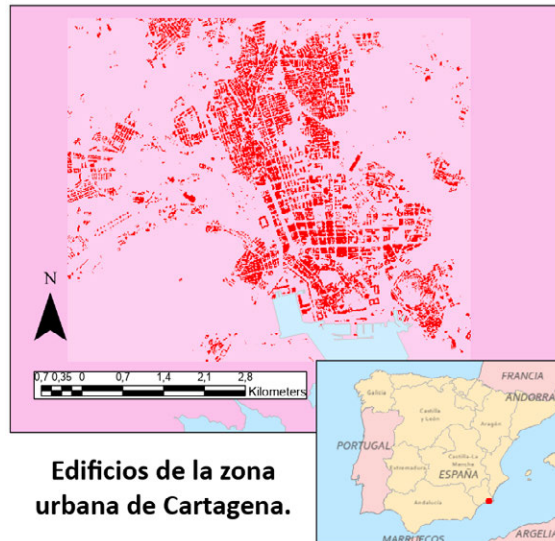


Ilustración 9. Figura. Edificios de la zona urbana de Cartagena. Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1. BOUNDING BOX DE LA ESCENA

Los márgenes de la zona de estudio vienen dados por los márgenes de la imagen PlanetScope de la zona urbana de Cartagena. La escena descargada será enmascarada por una máscara de edificios para eliminar el análisis en las zonas agrarias, de montaña, de agua... distintas a edificios que estén en la capa de edificios de la BTN del CNIG-IGN.

El Bounding Box es el polígono rectangular que delimitará los márgenes de la zona de estudio en nuestro proyecto.

#### 3.1.1.1. Coordenadas Geográficas WGS84:

Latitud mínima, Longitud máxima (Esquina inferior izquierda):

37 35 29.7465 N, 0 57 51.0674 W

Latitud máxima, Longitud mínima (Esquina superior derecha):

37 38 8.4663 N, 1 1 34.2789 W

#### 3.1.1.2. Coordenadas Proyectadas UTM 30N:

X máxima, Y mínima (Esquina inferior izquierda):

679735.53 m, 4162451.73 m

X mínima, Y máxima (Esquina superior derecha):

674158.00 m, 4167227.00 m

**3.1.1.3. Representación Gráfica:**

Esta tabla, Tabla 2, muestra la representación de las esquinas de la zona de estudio en Cartagena. En ella se muestra la capa de la imagen donde se ha aplicado la máscara para que solo se muestren los edificios. La zona está delimitada mostrando en qué lugar están los núcleos urbanos más representativos.

Tabla 2. Representación de las esquinas

	37 38 8.4663 N	4167227.00 m	
1 1 34.2789 W	ZONA DE ESTUDIO		0 57 51.0674 W
674158.00 m			674158.00 m
	37 35 29.7465 N	4162451.73 m	

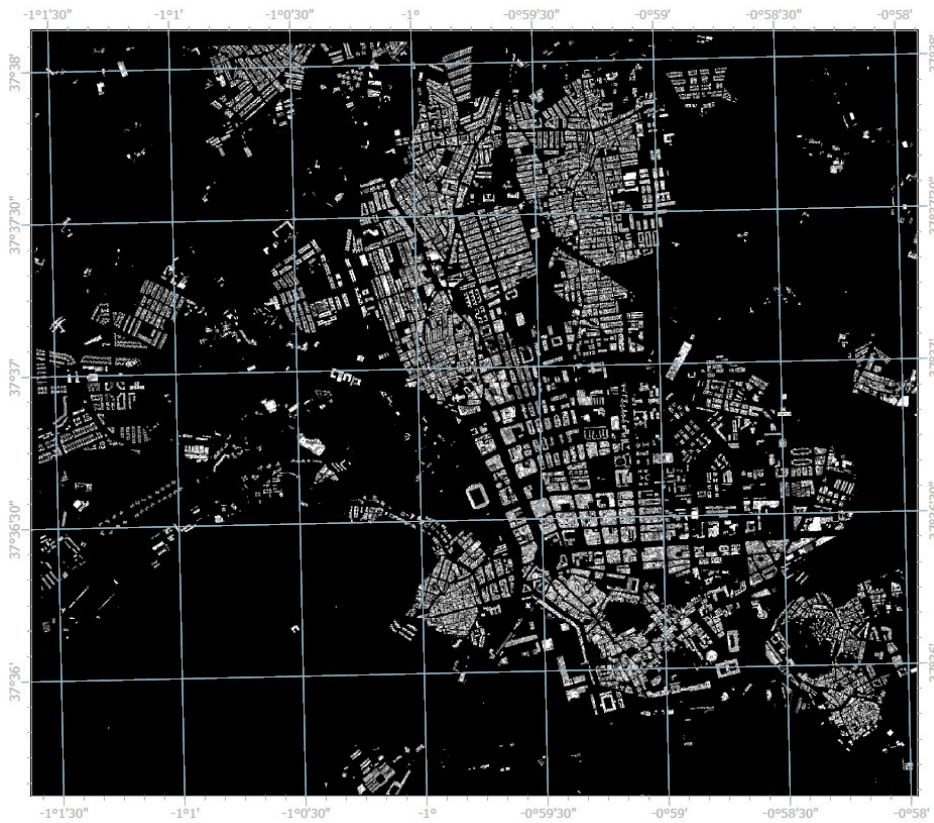


Ilustración 10. Figura. Representación de los límites de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Coordenadas geográficas WGS84

## 4. DATOS, SOFTWARE Y MATERIALES

Para este Trabajo Final de Grado se utilizará el siguiente material:

ERDAS Imagine, QGIS, OTB y ArcGIS como softwares mencionados previamente.

Datos de observación de la tierra: Imagen multispectral PlanetScope. Capa vectorial de edificios del IGN.

Google Maps e información de Catastro como fuentes de referencia.

Ordenador portátil con características mínimas de 32GB de RAM y 512GB de SSD que permita realizar operaciones en ERDAS Imagine con gran rapidez.

### 4.1. DATOS DE LOS QUE DISPONEMOS

Disponemos de capas cartográficas en formato ráster y vectorial para realizar el proyecto.

#### 4.1.1. Imagen PlanetScope:

Imagen multispectral analítica de PlanetScope (Instrumento SuperDove PSB.SD) con ID: 20231113\_104135\_90\_2475\_3B\_AnalyticMS\_SR\_8b\_clip.tif. Esta imagen es una imagen de reflectancias superficiales (SR) corregidas atmosféricamente al ser una imagen planet surface reflectance<sup>20</sup>, además de ser corregida geométricamente, ortorrectificada y con distorsiones geométricas eliminadas al ser una imagen de nivel 3B, tal y como se muestra en la ilustración (Fuente: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope#instruments-section>):

Tabla 3. Información del producto PlanetScope. Fuente: Web de la ESA – Sección de instrumentos de planet scope

#### Información del producto

Nombre	Descripción	Nivel de producto
Producto de escena básica de PlanetScope	Radiancia de la parte superior de la atmósfera escalonada (en el sensor) y producto corregido por sensor. El producto Basic Scene está diseñado para usuarios con capacidades avanzadas de procesamiento de imágenes y corrección geométrica. Este producto tiene un encuadre basado en escenas y no se proyecta a una proyección cartográfica. Correcciones radiométricas y de sensores aplicadas a los datos.	Nivel 1B
Producto de escena ortogonal PlanetScope	Producto de imagen ortorrectificado y escalado de radiación superior de la atmósfera (en el sensor) o reflectancia superficial adecuado para aplicaciones analíticas y visuales. Este producto tiene un encuadre basado en escenas y se proyecta a una proyección cartográfica.	Nivel 3A
Producto de ortomosaico PlanetScope	Correcciones radiométricas y de sensores aplicadas a los datos. Las imágenes se ortorrectifican y se proyectan en una proyección UTM.	Nivel 3B

Fecha de adquisición: 13 de noviembre del 2023, 10:41:35 h (UTC). Imagen cenital: 90º de ángulo de visión del satélite con ID: 2475. Sun Azimuth / Elevation: 161.2° / 32.3°. Luz solar desde el sureste, sol bajo, sombras moderadas. Sensor pasivo, es decir, capta la luz que se refleja de la incidencia de la luz solar en las superficies. 1.2º de View Angle (off-nadir), ángulo de la vertical del satélite (nadir) y la dirección de adquisición de imagen. No hay casi

deformación por paralaje (valor próximo a cero). GSD de 3~3.7 m/pixel. La imagen georreferenciada por GCP, según vemos en sus metadatos.

#### 4.1.1.1. Bounding box de la escena (bbox):

Min long: -1.04057002º

Min lat: 37.58811951º

Max long: -0.94674999º

Max lat: 37.66767883º

(VER ANEXO 3 PARA MÁS INFORMACIÓN)

#### 4.1.1.2. ¿Cómo se ha adquirido la imagen?

Para esta imagen concreta, el sol como fuente de iluminación incide sobre la superficie que absorbe una parte del espectro y refleja otra, haciendo que el sensor pasivo registre esa energía. Las bandas del espectro donde opera esta imagen son las bandas del espectro visible e infrarrojo, tal y como se muestra en la siguiente imagen (Fuente: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope#instruments-section>):

Tabla 4. Cámara (Instrumento) del satélite Planet Scope. Fuente: Web de la ESA – Sección de instrumentos de planet scope

**PlanetScope Camera**

The PlanetScope camera on each Dove cubesat operates currently in eight bands - red edge, red, green, green I, yellow, blue, coastal blue and near infra-red.

Sensor Type	Three-band frame Imager or four-band frame Imager with a split-frame NIR filter (Dove-C) Four-band frame imager with butcher-block filter providing blue, green, red, and NIR stripes (Dove-R) Eight-band frame imager with butcher-block filter providing blue, green, red, red-edge, and NIR stripes (SuperDove)
Spectral Bands	Coastal Blue: 431 - 452 nm Blue: 465 - 515 nm Green I: 513 - 549 nm Green: 547 - 583 nm Yellow: 600 - 620 nm Red: 650 - 680 nm RedEdge: 697 - 713 nm NIR: 845 - 885 nm
Ground Sample Distance (nadir)	Dove-C: 3.0 m-4.1 m Dove-R: 3.0 m-4.1 m SuperDove: 3.7 m-
Frame Size	24 km x 8 km (approximate) for Dove-C 24 km x 16 km (approximate) for Dove-R 32.5 km x 19.6 km (approximate) for SuperDove
Maximum Image Strip per orbit	20,000 km <sup>2</sup>
Revisit Time	Daily at nadir
Image Capture Capacity	200 million km <sup>2</sup> /day

**4.1.2. Cartografía de Centro Nacional de Información Geográfica del Instituto Geográfico Nacional (CNIG-IGN):**

Usamos, además, la cartografía de la Base Topográfica Nacional, el archivo shapefile de edificios para hacer el enmascaramiento. Son construcciones fijas procedentes de los catastros nacionales y completada con capturas sobre foto del PNOA. No se garantiza a la proporcionada por los catastros, ya que la geometría se obtiene por agrupación de subparcelas o volúmenes constructivos, capturándose la información por elementos superficiales representados por su contorno (topológicamente, los patios son agujeros). El lado mínimo es de 2 metros.<sup>21</sup> En la siguiente tabla del IGN se proporcionan los atributos, donde nos interesa sobre todo el tipo de edificios que puede contener.

Tabla 5. Tabla de atributos de la cartografía vectorial de edificios del IGN. Fuente: Documento de especificaciones de la BTN.

**IDENTIFICACIÓN DE CUBIERTAS CON CONTENIDO DE AMIANTO MEDIANTE SISTEMAS ESPECTRALES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA EN EL MUNICIPIO DE CARTAGENA**

Atributos:

VALOR	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN	
<b>TIPO - TIPO_0507</b>			Txt (2)
Estado físico en el que se encuentra la construcción			
01	GENÉRICO	Edificio convencional no clasificable como ninguno del resto de valores	
03	CUEVA HABITABLE	Cavidad subterránea habilitada para vivienda u otras actividades	
04	PABELLÓN POLIDEPORTIVO	Edificio cubierto destinado a la práctica de varios deportes	
05	ESTADIO	Edificio de grandes dimensiones, habitualmente cerrado, que puede estar al aire libre o cubierto, con numerosas gradas para los espectadores, destinado a competiciones deportivas u otros eventos culturales	
06	PLAZA DE TOROS	Edificio cerrado, generalmente circular y descubierto, donde se celebran las corridas de toros	
07	REFUGIO DE MONTAÑA	Edificio situado en determinados lugares de las montañas para acoger a viajeros y excursionistas	
08	EDIFICIO LIGERO	Construcción para dotar de cierta protección a los elementos que se encuentran bajo ella. Ejemplos de este tipo son las marquesinas, naves abiertas, casetas o cobertizos	
<b>ESTADO - ESTAD_0507</b>			Txt (2)
Estado físico en el que se encuentra la construcción			
01	EN USO	Se encuentra en condiciones constructivas aparentes para ser usado	
03	RUINAS	Se ha destruido en parte, aunque hay restos visibles	
<b>REFERENCIA CATASTRAL - REFCAT</b>			Txt (20)
Parte de la referencia catastral referente a la parcela (procedente de los organismos catastrales)			
<b>MÁXIMO PLANTAS - N_PLANTAS</b>			Número
Número máximo de plantas de un edificio (procedente de los organismos catastrales)			
<b>MÁXIMO SÓTANOS - N_SOTANOS</b>			Número
Número máximo de sótanos de un edificio (procedente de los organismos catastrales)			
<b>TIPO PARCELA - TIPO_PARCE</b>			Txt (1)
U (urbana), D (diseminado), R (rústica), X (dominio público) (procedente de los organismos catastrales)			
Consultar el resto de los atributos en el apartado <a href="#">Atributos comunes BTN</a>			

Aquí se representa en una ilustración el enmascaramiento de los edificios con la imagen PlanetScope:

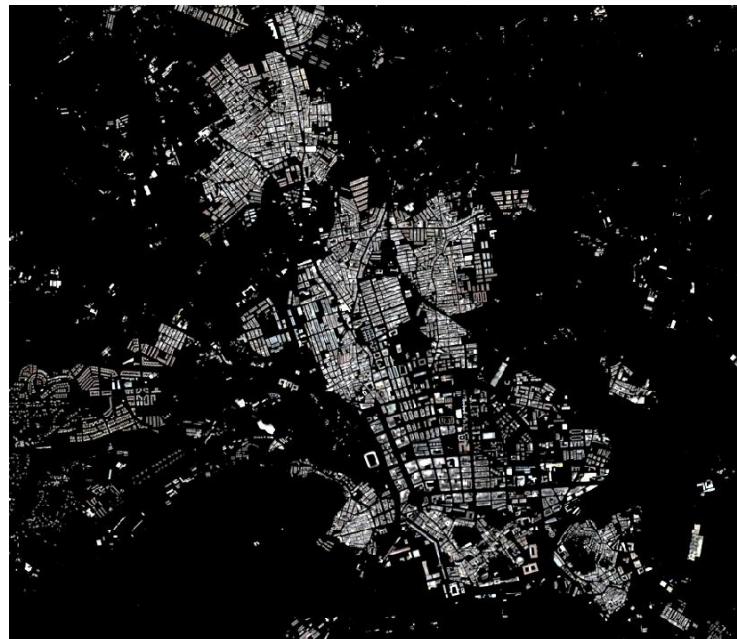


Ilustración 11. Edificios enmascarados. Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. SOFTWARE DEL QUE SE DISPONE

Para el siguiente proyecto, requerimos los siguientes softwares:

- ERDAS Imagine versión 16.8 para todo el análisis
- QGIS versión 3.38 y Orfeo Toolbox versión 9.1 para la validación
- ArcGIS Pro versión 3.30 para la generación de la cartografía (Podríamos utilizar un software libre en este caso, pero disponemos de ArcGIS Pro, que simplifica el trabajo)

### 4.2.1. ERDAS Imagine 2023, v. 16.8

ERDAS Imagine es el software de teledetección más usado del mundo, según reza su web. Aquí algunas características del software que usaremos para la extracción de firmas y clasificación de tejados:

“ERDAS IMAGINE proporciona valor real al consolidar la teledetección, la fotogrametría, el análisis LiDAR, el análisis vectorial básico, el procesamiento de radar y la inteligencia artificial (IA) en un solo producto. Ofrece muchas soluciones en una, incorporando los siguientes estándares, características empresariales y productos:

- Análisis de imágenes, teledetección y SIG;
- Soporte para imágenes ópticas pancromáticas, multi espectrales e hiperespectrales, radar y datos LiDAR;
- Interfaz de cinta personalizable y fácil de usar;
- Modelado espacial con operadores de nubes ráster, vectoriales y de puntos, así como visualización de resultados en tiempo real;
- Variedad de herramientas de detección de cambios;
- Clasificación de imágenes y extracción de características mediante herramientas de aprendizaje automático (ML) y aprendizaje profundo (DL);
- Trabaje con sus datos utilizando los diferentes productos GIS y de teledetección de Hexagon”<sup>22</sup>.

### 4.2.2. Orfeo ToolBox v. 9.1

“Orfeo ToolBox (OTB) es un proyecto de código abierto para la teledetección de última generación. Construido sobre los hombros de la comunidad geoespacial de código abierto, puede procesar imágenes ópticas, multiespectrales y de radar de alta resolución a escala de terabytes. Hay una amplia variedad de aplicaciones disponibles: desde orto-rectificación o pansharpening, hasta clasificación, procesamiento SAR y mucho más.

Se puede acceder a todos los algoritmos de OTB desde QGIS, Python, la línea de comandos o C++. QGIS es una herramienta de visualización fácil de usar con énfasis en la representación acelerada por hardware para imágenes de alta resolución (ópticas y SAR). Con él, los usuarios finales pueden visualizar enormes productos de imágenes sin procesar y acceder a todas las aplicaciones de la caja de herramientas. Desde portátiles con recursos limitados hasta clústeres de alto rendimiento, OTB está disponible en Linux, Windows y macOS (a través de Docker para ordenadores Mac con ARM). Está impulsado por la comunidad, es extensible y está muy documentado. ¡Orfeo ToolBox no es una caja negra!”<sup>23</sup>.

### **4.2.3. ArcGIS Pro**

“ArcGIS Pro es la principal aplicación de sistema de información geográfica (SIG) de escritorio. Diseñado con innovaciones impulsadas por el usuario, ofrece herramientas y capacidades incomparables que respaldan su trabajo. Los usuarios pueden mantener los datos espaciales de manera efectiva; generar impresionantes visualizaciones 2D, 3D y 4D; y realizar análisis de mapeo avanzados. El intercambio de datos sin problemas dentro del sistema ArcGIS fomenta valiosas soluciones e información SIG”<sup>24</sup>. Este software se utilizará para la creación de la cartografía.

## **4.1. HERRAMIENTAS EN LÍNEA DE LAS QUE SE DISPONE**

Para realizar las búsquedas de información de cubiertas con contenido de amianto, como hemos mencionado previamente en el apartado del caso de Alcobendas, nos es imposible desplazarnos a Cartagena, por tanto, para lograr un análisis preciso y adecuado, tendremos que ir virtualmente gracias a las nuevas tecnologías.

### **4.1.1. Google Maps**

Utilizaremos esta aplicación en línea de visor de mapas y navegación desarrollada por Google para que, analizando imágenes satelitales y su herramienta de exploración de lugares adquiramos la información necesaria para discernir entre cubiertas de amianto y no amianto y podamos realizar nuestra cartografía. La cartografía de Google Maps nos limita de la siguiente manera: El año de adquisición de las imágenes satelitales e imágenes de exploración de lugares tiene que coincidir, al menos con poco tiempo de diferencia, con nuestra imagen satelital PlanetScope, de ahí que en vez de utilizar una imagen reciente, estemos usando una imagen de noviembre del 2023.

### **4.1.1. Catastro**

El uso de la web del catastro nacional sirve para que, a esa primera inspección visual, al no haber podido ir en persona a Cartagena, le añadamos un factor sumamente necesario para saber si ese edificio contiene amianto o no: La fecha. De esta forma, si la fecha coincide con

la de uno de los años donde el amianto ha sido más utilizado (El boom de Uralita S.A.), podamos certificar de forma remota la existencia de amianto en el edificio.

#### **4.2. EQUIPO (MATERIAL) DEL QUE SE DISPONE**

Para poder realizar la práctica se dispone de un equipo de 1TB de almacenamiento en disco duro sólido con una pantalla de gran calidad capaz de reproducir vídeos en UHD. Además, la memoria RAM del dispositivo es de 32GB. El procesador es un Intel Core Ultra 7. La tarjeta gráfica es una Intel ARC.

A este ordenador se le añade un ratón periférico, conexión a internet, licencia de Windows 11 y licencia de Microsoft Office.

## 5. METODOLOGÍA Y DESARROLLO PROPUESTO

Para la metodología de este proyecto, se ha pensado en que pueda ser reproducible, por tanto, dentro de la herramienta ERDAS Imagine realizaremos la clasificación supervisada teniendo en cuenta las cinco reglas paramétricas propuestas por el propio software. La detección de cubiertas en el área urbana de Cartagena mediante un enfoque técnico presenta una serie de fases conectadas que empiezan en el área de estudio y finalizan en la generación de documentación.

### 5.1. ESTABLECER CAPA DE EDIFICIOS. ESTABLECEMOS EL ÁREA DE ESTUDIO.

El primer paso consiste en definir la capa de edificios y área de estudio, aislando los edificios en nuestra cartografía. Para ello se optó por enmascarar la imagen satelital utilizando la capa vectorial de edificios de la Base Topográfica Nacional (BTN) para evitar ruidos significativos y tener una máscara de edificios precisa, eliminando la necesidad de otros filtros adicionales que se hubieran necesitado si usáramos cualquiera de estas otras dos posibles maneras de enmascaramiento:

Se procuró enmascarar por medio de esta capa y no mediante otra técnica como el NDBI para establecer el área de estudio. Si bien es verdad que mediante esta técnica de Índice de Diferencia Normalizada de Edificios puede ser interesante para establecer una capa de edificios inicial, al realizarla en ERDAS Imagine, algunas zonas de montaña pedregosa o carretera se clasifican como edificios, por tanto, preferimos dejar de tener algunos edificios aislados a que se introdujera ruido en nuestro análisis. Se representa la ecuación del NDBI:

Ecuación 1. NDBI

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$$

Se intentó realizar el análisis por medio del índice NBAI, que añade la capa del verde y cuya expresión es la siguiente, pero seguía siendo insatisfactorio:

Ecuación 2. NBAI

$$NBAI = \frac{SWIR - \frac{NIR}{Green}}{SWIR + \frac{NIR}{Green}}$$

Tanto en un índice como en otro, la cartografía hubiera tenido errores en la resolución espacial, ya que el GSD de estas bandas es de 30 m, frente a los 3-5 m que tenemos con las de PlanetScope. Por tanto, el flujo de trabajo de esta etapa sería el siguiente:

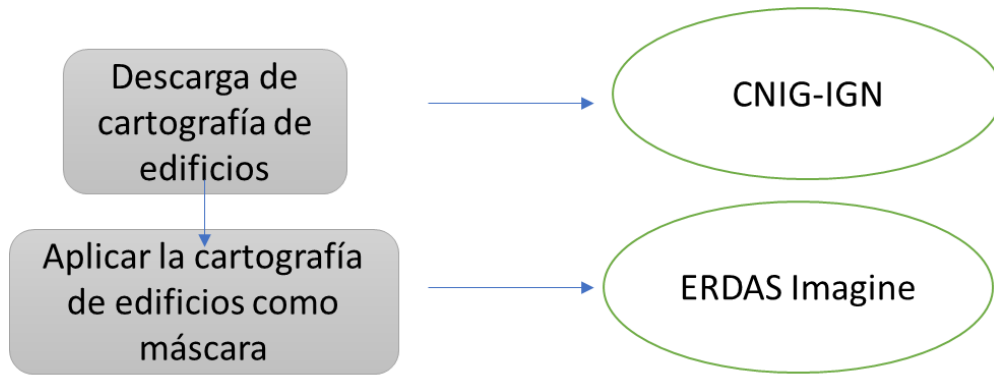


Ilustración 12. Flujograma para delimitar la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Para aplicar la cartografía de edificios como máscara, es necesario en ERDAS Imagine realizar un recorte con la herramienta subset por medio de la creación de una capa AOI de edificios.

## 5.2. ANALIZAR DISTINTOS TEJADOS EN GOOGLE MAPS

El segundo paso está ligado a la importancia de la inspección visual, que es la verdadera determinante de la calidad de los trabajos a la hora de realizar los entrenamientos previos. Se ve afectada por la imposibilidad de salir a campo a analizar las cubiertas de primera mano, pero, en línea, utilizando un visor como Google Maps y teniendo referencias catastrales, al determinar el año del edificio y la apariencia visual, podemos diferenciar entre cubierta de amianto o no. Nos centramos en cubiertas de fibro-amianto para hacer nuestra cartografía de edificios (con y sin amianto). (VER ANEXO 4, ANEXO 5 y ANEXO 6). La información catastral de estos edificios con contenido de amianto nos hace tener una idea del boom del amianto en España. Tenemos edificios desde 1900 hasta 1986, pero predominan las cubiertas de amianto entre las décadas de 1960 y 1970. Una vez hemos analizado edificios con amianto y sin amianto, creamos las capas vectoriales de EDIFICIOS CON AMIANTO y EDIFICIOS SIN AMIANTO, que posteriormente utilizaremos.

La verdad-terreno es nuestra manera de entrenar al clasificador. De esta forma fiable se crean dos capas: Una sin amianto que contiene 33 polígonos y otra con amianto que contiene el resto, 37. Dividiendo la muestra en partes, seleccionamos dividimos las muestras para tener un set de datos de entrenamiento (Un número reducido de firmas) y uno de validación donde, además de los de entrenamiento, estén contenidas todos los polígonos.

El flujo de trabajo para esta capa tiene su radicalidad en la visualización de las cubiertas del ANEXO 8. Cada una de estas cubiertas es localizada visualmente, después se comprueba que sea amianto con la fecha y coincidencia de la parcela de catastro con las coordenadas de Google Maps, acto seguido, se crea la capa en ERDAS Imagine de la cubierta de amianto. Para los edificios sin amianto no se requerirá un trabajo tan minucioso, ya que no será necesario visualizar las referencias catastrales para ver el año de construcción, sino que mientras se va visualizando en Google Maps se va creando la capa de edificios sin amianto. Esta sería la metodología de esta fase:

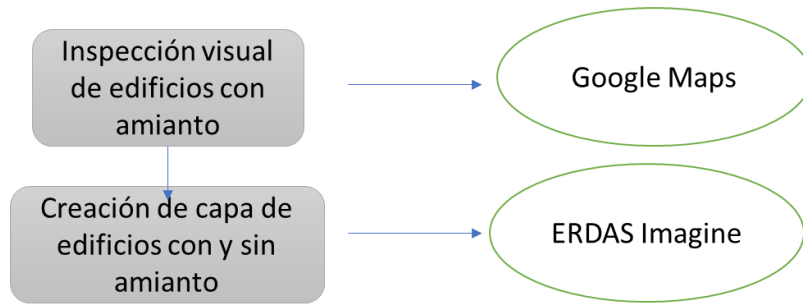


Ilustración 13. Creación de capa AOI de muestras. Fuente: Elaboración propia.

### 5.3. EXTRAER FIRMAS ESPECTRALES (CAPA AOI CON TODAS LAS FIRMAS SEPARADAS)

Una firma espectral es la variación de la reflectividad en superficie de una cubierta en función de longitud de onda. La heterogeneidad de cubiertas hace que cada superficie tenga un patrón espectral distinto, de ahí el interés en analizarlo. Las firmas espectrales se analizan en valores de reflectividad o reflectancia, que es la característica de la cubierta en cada longitud de onda.<sup>25</sup> Por tanto, podemos definir que la firma espectral es el porcentaje de energía reflejada (la reflectancia) de una superficie en función de la longitud de onda.

Para la extracción de las firmas espectrales, tenemos que separar por cada una de las entidades. Estas firmas nos mostrarán el comportamiento del amianto. Para poder extraer dichas firmas espectrales, primero necesitamos traer las capas de:

- Algunos edificios con amianto (Ver ilustración 14 y ANEXO 6)
- Algunos edificios sin amianto (Ver ilustración 15 ANEXO 5)

El total de muestras de amianto es de 46, 9 de ellas se eliminaron. En el caso de Alcobendas se analizaba con el 10% de las cubiertas, en nuestro caso será inferior dicha proporción, ya que no contamos con un extendido tiempo.

Aquí se muestran representadas zonas de cubiertas de edificios con contenido de amianto, extraídos en una capa vectorial en ERDAS Imagine:

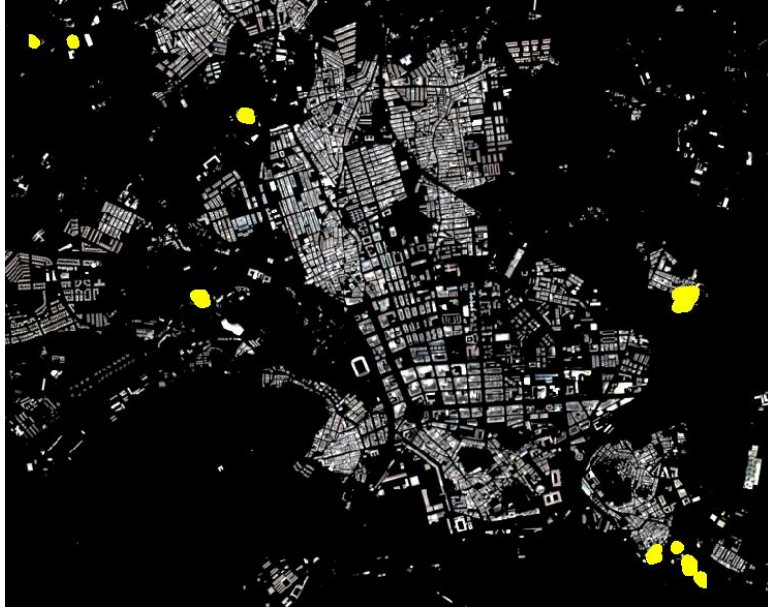


Ilustración 14. Muestras de amianto. Fuente: Elaboración propia.

En esta ilustración se representan cubiertas de edificios sin contenido de amianto extraídos en una capa vectorial en ERDAS Imagine:



Ilustración 15. Muestras de otros materiales distintos al amianto. Fuente: Elaboración propia.

Hemos pasado directamente al análisis, sin tener que hacer unas correcciones geométricas o atmosféricas, porque nuestra imagen es un producto 3B de reflectancias superficiales de Planet. Tal y como se ha indicado antes, como viene en la página web de la ESA, es una imagen corregida radiométricamente, ortorrectificada y reproyectada en UTM. Los valores de la imagen vienen reflectancias, tal y como hemos mencionado en el apartado donde hablábamos sobre la imagen.

Para la extracción de firmas espectrales, usaremos Signature editor de ERDAS Imagine y lo compararemos con firmas de otros estudios. Para ello es necesario escalar estas firmas, ya que los valores con los que estamos trabajando son radiancias.

Las firmas espectrales, para nuestro análisis, las sacaremos de la siguiente forma:

1. Firmas espectrales de la capa de amianto para analizar espectralmente su comportamiento.
2. Firmas espectrales de todas las cubiertas (amianto o no, se detalla en un atributo de la imagen para la segmentación) de todos los AOI (ANEXO 7). Estas firmas nos servirán para la validación.
3. Parte significativa de las firmas espectrales de las cubiertas para el entrenamiento.

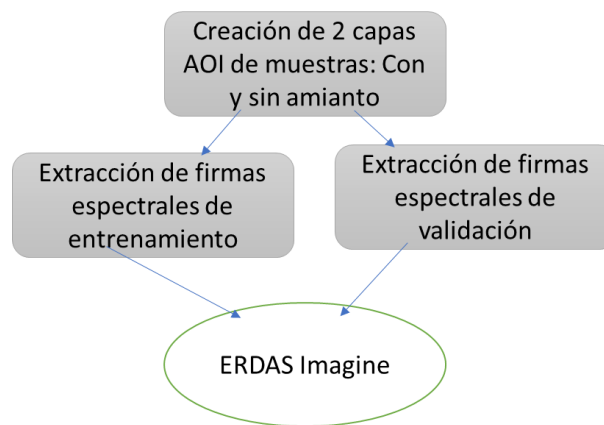


Ilustración 16. Extracción de firmas espectrales. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4. ANALIZAR LAS FIRMAS DE EDIFICIOS CON AMIANTO Y SIN AMIANTO.

¿Existe algún patrón característico? De esos patrones, ¿cuál lo hace distinto a otros edificios?

El comportamiento de luz en cada material es distinto, ya que algunas superficies absorben y emiten diferentes longitudes de onda. En nuestro caso, dado que utilizamos imágenes PlanetScope multiespectrales, donde están captadas por un sensor pasivo, tenemos 8 bandas de análisis que van desde el Coastal Blue hasta el NIR. La firma espectral es la representación gráfica de los valores de reflectancia de un objeto en función de la longitud de onda. Por lo general, la reflectancia se suele dar normalizada (valores de 0 a 1), pero la imagen la proporciona escalada por un factor de 10.000. Desde tiempos inmemoriales, el amianto ha sido usado por ser un material ignífugo y por alterar su comportamiento espectral si se acerca a una fuente de calor (brilla), lo que nos puede dar una cierta pista de qué está ocurriendo en la banda del Infrarrojo Térmico.

Este análisis hace que sea viable la detección de amianto a partir de imágenes multiespectrales, además de ser fundamento teórico.

## 5.5. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE TEJADOS

Para realizar nuestra clasificación supervisada de tejados, volviendo al apartado de antecedentes y la justificación de métodos, tras haber hecho una correcta identificación y categorización de tejados, tenemos cinco modelos en la interfaz de Clasificación Supervisada de nuestro software tal y como hemos mencionado antes.

- Máxima verosimilitud
- Distancia de Mahalanobis.
- Mapeo de ángulo espectral (SAM).
- Mapeo de la correlación espectral (SCM).
- Distancia mínima.

### 5.5.1. Máxima verosimilitud

Con la media y la desviación típica de cada clase, este método funciona por una asignación por distribución normal, es decir, por medio de una probabilidad.

### 5.5.2. Distancia de Mahalanobis

Este método compara la firma espectral de un pixel y la media de las firmas de entrenamiento teniendo en cuenta las matrices de covarianza. De esta forma ve cuánto se aleja nuestra firma espectral de pixel de cada firma espectral de clase entrenada, entonces, independientemente de que se encuentre cercano a la media (Distancia mínima), realizando una ponderación con el valor de la covarianza, el pixel se clasifica.

### 5.5.3. Mapeo de Ángulo Espectral

Calcula el ángulo entre firmas espectrales y los trata como vectores en el espacio n-dimensional, donde n es el número de bandas.

### 5.5.4. Mapeo de la Correlación Espectral

Basado en el patrón espectral, busca firmas espectrales paralelas. De esta forma, lo importante es el comportamiento espectral y no la luz incidente. Se utiliza mucho para la clasificación de metales.

### 5.5.5. Distancia mínima

Distancia euclidiana tratando las firmas como vectores. La menor distancia euclidiana es la que se asigna a cada clase. Se realiza la media de la reflectividad de cada banda (la media de cada clase) y por cada reflectividad se va comparando con cada clase hasta que encuentra con la que menor distancia hay.

Utilizando la imagen enmascarada sin clasificar, por cada uno de los métodos de clasificación supervisada y utilizando las firmas espectrales seleccionadas para el entrenamiento, en ERDAS Imagine se realiza la clasificación. El flujo de trabajo es el siguiente:

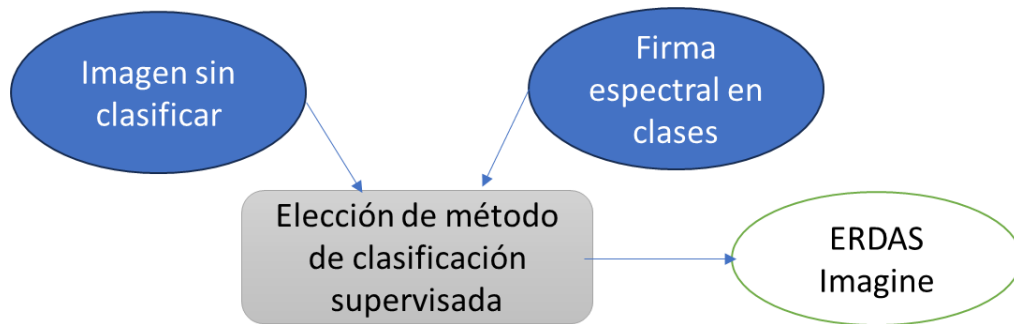


Ilustración 17. Flujograma de la Clasificación de tejados. Fuente: Elaboración propia

## 5.6. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta última fase de validación, si bien es verdad que conlleva un proceso metodológico en sí misma y un proceso metodológico previo, entra en el límite de nuestra metodología, ya que vamos a utilizar para la validación la matriz de confusión que explicaremos posteriormente.

Se realiza teniendo en cuenta el flujograma siguiente:

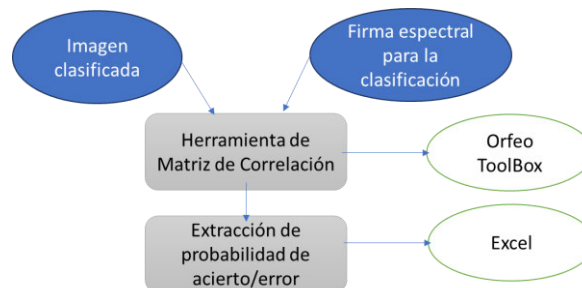


Ilustración 18. Flujograma de la validación de resultados en Orfeo ToolBox. Fuente: Elaboración propia.

## 5.7. CONCLUSIÓN DE LA METODOLOGÍA FINAL

Hay cuatro grandes fases para esta metodología, que hemos basado en el caso de Madrid. El flujograma en la siguiente ilustración:

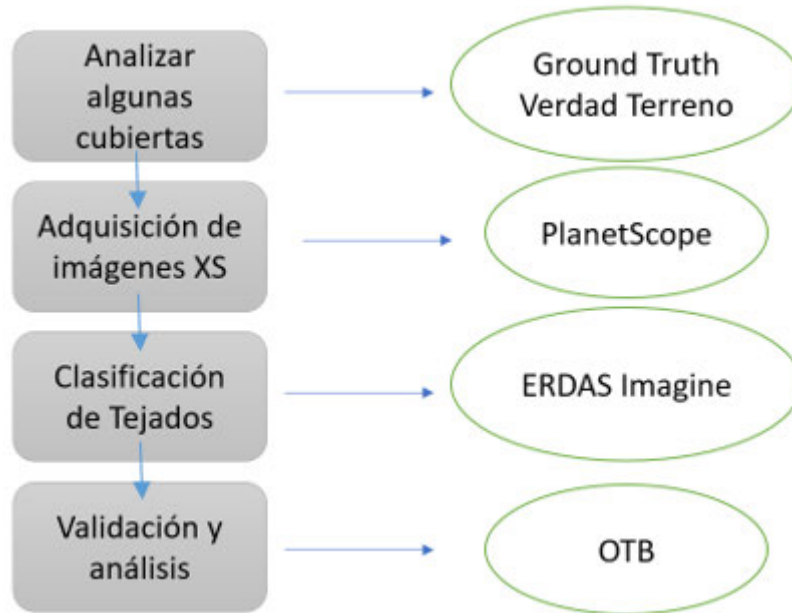


Ilustración 19. Flujograma. Fuente: Elaboración propia.

Para garantizar la fiabilidad de los resultados, el proceso está diseñado como un diagrama de flujo de trabajo secuencial que garantice su consistencia. El enfoque de la metodología será en el contexto siempre de la clasificación supervisada, por tanto, es verdaderamente imprescindible asegurar la precisión por medio del buen entrenamiento del algoritmo.

## 5.8. MAPA DE LA METODOLOGÍA FINAL

Para generar el mapa metodológico, nos hemos fijado en otras metodologías en el capítulo anterior del estado del arte (Antecedentes). El mapa metodológico es también el flujo de trabajo, que es el siguiente:

- Definición del área de estudio realizado previamente
  - Delimitar Bounding Box
  - Obtener capa vectorial de edificios y aplicado como máscara
- Preprocesado de datos
  - Descargar la imagen PlanetScope (8 bandas, 3.3 m GSD)
  - Revisión de metadatos (Ver el anexo de metadatos)

- Verificar geometría y proyección de cada dato, partiendo de que queremos que nuestra cartografía esté proyectada en ETRS89, UTM 30N (EPSG 25830).
- Realizar el enmascaramiento, podemos hacer un enmascaramiento previo usando algún índice como el NDBI o el NDBI, pero es preferible aplicar la máscara de la capa vectorial de edificios.
- Excluimos todo lo que no sea edificios de nuestra imagen
  - Generación de AOI de edificios
  - Enmascaramiento de la capa de edificios
- Generamos las muestras de entrenamiento y las estudiamos
  - Identificar cubiertas en Google Maps y confirmar en Catastro con el año; para las cubiertas sin amianto no será necesario confirmar el año.
  - Generación de AOI para las firmas
  - Extracción de firmas espectrales
  - Evaluación de patrones espectrales
- Clasificación por cubierta (Según los polígonos de entrenamiento)
  - Maximum Likelihood (mejor resultado, ~88% exactitud).
  - Distancia de Mahalanobis.
  - Spectral Angle Mapper (SAM).
  - Spectral Correlation Mapper (SCM).
  - Minimum Distance.
- Validación por matriz de confusión
  - Matriz de confusión
  - Selección de algoritmo propio
- Documentación
  - Generar cartografía
  - Generar informe y documentación de resultados

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados y discusiones, comparando con otras metodologías.

### 6.1. RESULTADOS DE LA FASE DE ENMASCARAMIENTO.

Se realiza el índice NDBI en una imagen de Sentinel 2 del mismo día de adquisición que la de PlanetScope, tal y como se ve en la imagen, donde aparece el procedimiento en Spatial Modeler Editor:

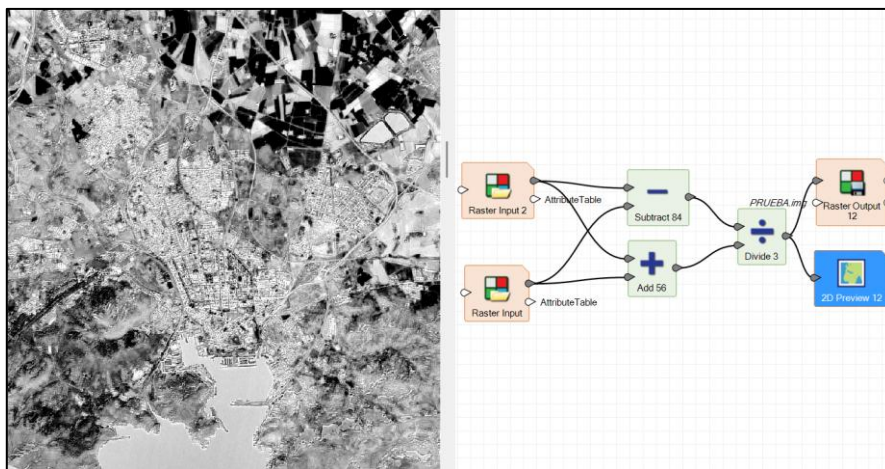


Ilustración 20. NDBI en Spatial Model Editor. Fuente: Elaboración propia en ERDAS Imagine.

Se realiza el índice NDAI sobre la misma imagen de Sentinel con un resultado insuficiente, abundantes zonas mal clasificadas donde sigue siendo preferible el uso de la capa de edificios del CNIG-IGN para el enmascaramo.

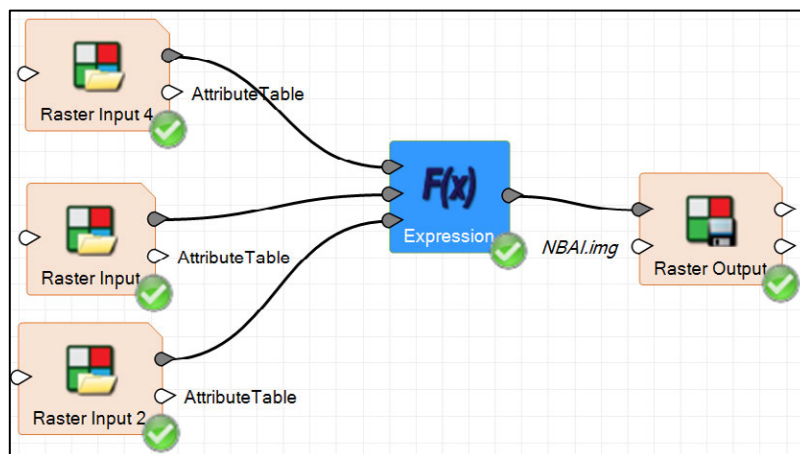


Ilustración 21. NDAI en Spatial Model Editor. Fuente: Elaboración propia en ERDAS Imagine.

Se realiza, entonces, el enmascaramiento por medio de la capa vectorial de edificios de la Base Topográfica Nacional (Ver Figura 9 y Figura 11). De esta forma, asegurando que la resolución mínima de la cartografía vectorial es de 2 m y que el GSD mínimo es de 3 m, no existirán problemas de escala y se clasificará la mayoría de edificios.

## 6.2. RESULTADOS DE LAS FIRMAS DE EDIFICIOS DE AMIANTO.

Leamos la siguiente firma espectral, extraída de nuestro sensor multispectral:

- Entre las bandas Banda 1 y Banda 4 (azul, verde y primer rojo), vemos una tendencia creciente según avanza la longitud de onda, al reflejar poco azul y verde, podemos pensar en colores grisáceos-rojizos. En nuestro caso, los grises del amianto.
- De la Banda 5 a Banda 6 (rojos) vemos una meseta que cae ligeramente en la banda 6 por la absorción relativa en el rojo propia de minerales.
- La banda 7 (borde rojo) presenta una subida con una tendencia de mayor crecimiento respecto a la inicial, pero no tan fuerte como suele ocurrir en la vegetación.
- La banda 8 (Infrarrojo cercano) presenta una subida brusca y una pendiente mayor a las anteriores.

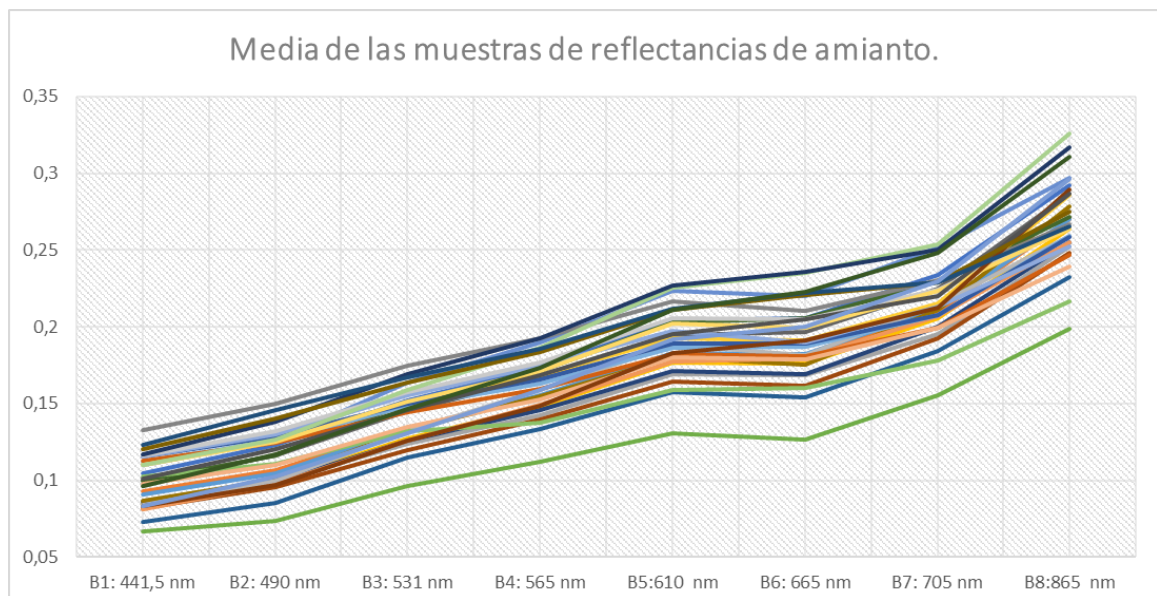


Ilustración 22. Muestras de amianto, representación del valor de reflectancia medio en cada banda. Fuente: Elaboración propia.

Leamos las siguientes firmas de amianto que guardan similitud con las previas firmas, aquí representadas en la ilustración (Fuente: <https://doi.org/10.3390/ma18153456>):

- Gráfico de la izquierda:
  - Se puede ver un crecimiento progresivo en las primeras bandas, relativas al visible.

- Se ve una meseta entre las bandas 50 y 60 (Aproximadamente), relativas al rojo
- Continuamos con una tendencia que decae desde la Banda 60 hasta la 90 (Aproximadamente). Es propia de otros minerales
- Hay una subida brusca en el infrarrojo
- Tras el infrarrojo, el comportamiento de la curva se asemeja a una parábola
- Gráfico de la derecha:
  - Diferentes firmas espectrales, pero ninguna similar a las del gráfico de la izquierda

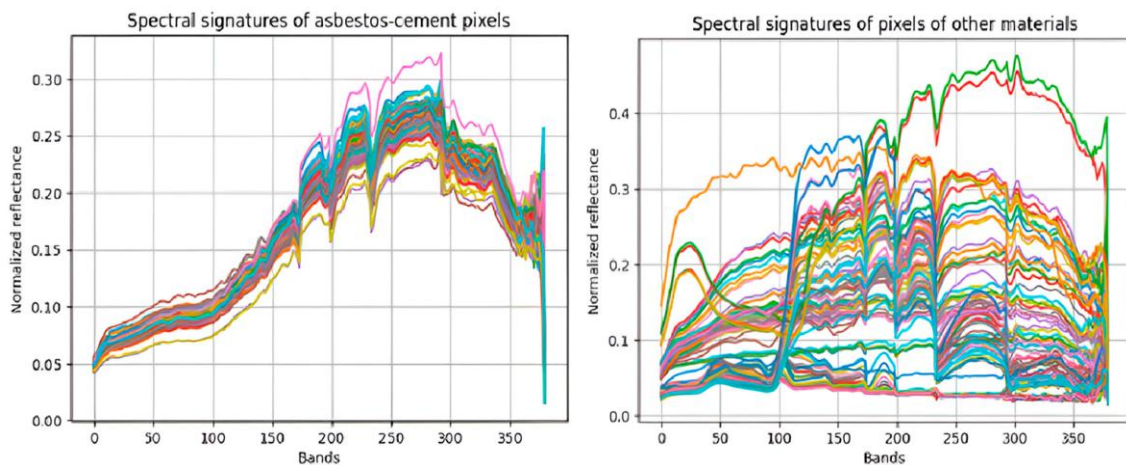


Ilustración 23. Firmas espectrales de amianto y de otros materiales distintos al amianto.  
Fuente: Chanchí-Golondrino et al., Evaluación comparativa de la eficacia y eficiencia de los métodos computacionales en la detección de fibrocemento en imágenes h

Haciendo una primera comparación relativa a los gráficos de la ilustración 23, podemos indicar que las curvas de amianto son homogéneas con un patrón claro. Las curvas dispersas de otros materiales suelen mostrar valores superiores de reflectancia muy superiores, el doble en algunos casos, en la mayoría de las primeras bandas (Infrarrojo cercano y espectro visible) independientemente de la firma espectral.

Haciendo una comparación entre el gráfico de amianto de nuestras firmas y el de las firmas de Chanchí-Golondrino et al., vemos un comportamiento espectral muy similar: Tendencia al alza inicial, bandas azul, verde y rojo; meseta y disminución en los rojos siguientes, y tendencia al alza a partir del borde rojo que incrementa su pendiente en el infrarrojo próximo. Aunque los valores de nuestro gráfico presentan valores de escala superiores de reflectancia, lo que podría ser por trabajar con medias de sensores multispectrales de mayor variabilidad.

De esta forma, podemos asegurar la existencia de un patrón característico y único en las cubiertas con contenido de amianto.

### 6.3. RESULTADO FINAL: CLASIFICACIÓN DE LOS TEJADOS EN CARTAGENA (MURCIA) SIGUIENDO LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

## Clasificaciones de tejado en Cartagena (Murcia)

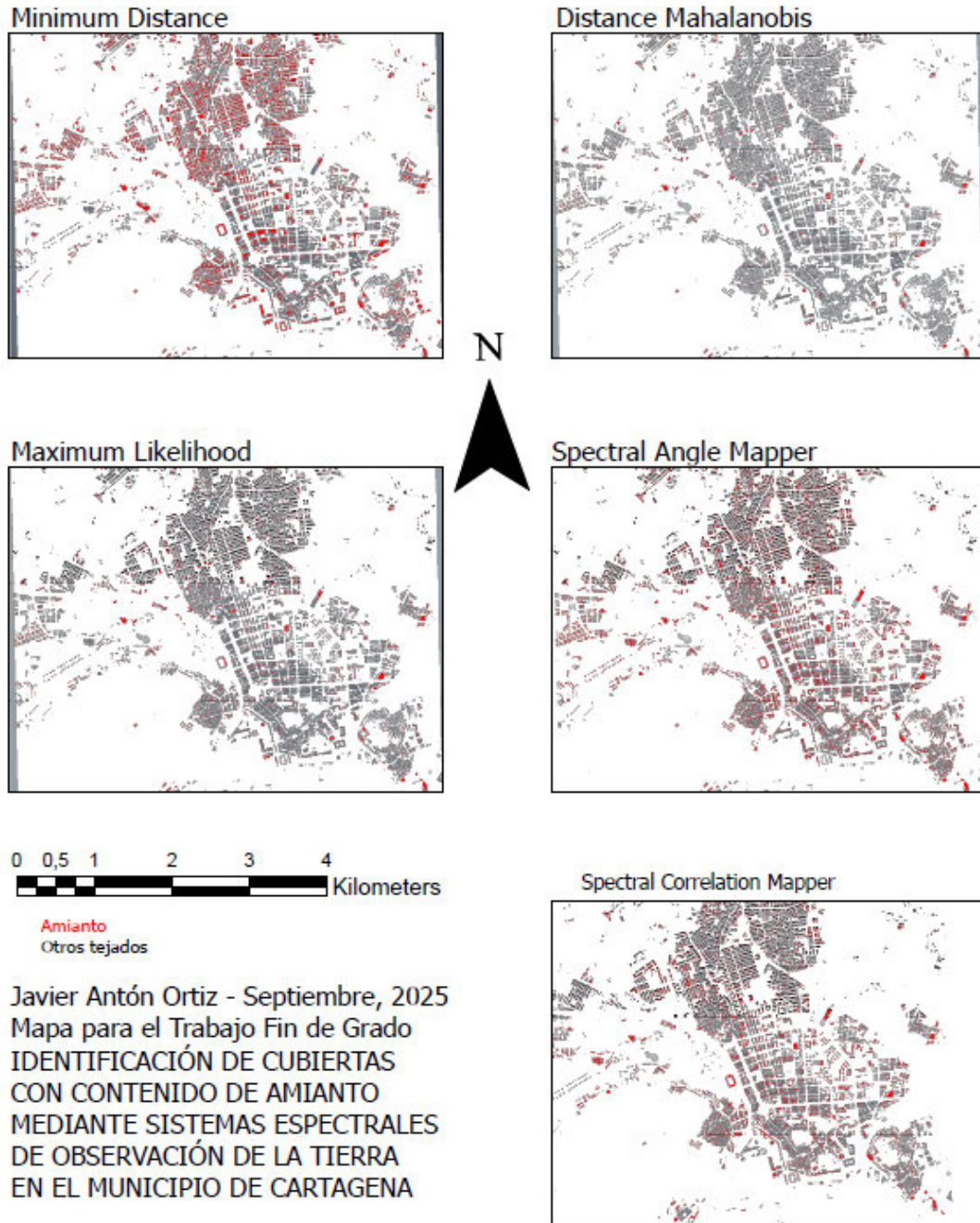


Ilustración 24. Figura. Clasificación supervisada en Cartagena por métodos supervisados.  
Fuente: Elaboración propia

### 6.3.1. Presentación y validación de resultados de la clasificación supervisada

En QGIS, tras la instalación de Orfeo ToolBox, hallamos la matriz de confusión. De esta forma, validaremos nuestros resultados. La validación se realizará con la herramienta ComputeConfusionMatrix de Orfeo Toolbox, que nos permitirá hacer la matriz de confusión para nuestro análisis.

La comparación de algoritmos tiene su empirismo en su validación, en nuestro caso, separando en dos clases: Existencia de amianto y no existencia. Haciendo una matriz, en esta se contarán cuántos píxeles de amianto están clasificados como amianto y cuántos no (los píxeles de amianto correctos, los píxeles de amianto de omisión y, con el resto, los de comisión), al igual se realiza con los píxeles de no amianto. Gracias a esta forma de validación, con esa matriz podemos hallar el número de píxeles correctamente clasificados por cada grupo de clases.

La matriz de confusión es el método estandarizado en los sistemas espectrales de observación de la tierra para comparar las clases asignadas por cada uno de los cinco tipos de clasificador con las muestras de edificio. Las métricas nos dan los porcentajes de acierto de las detecciones, los errores de omisión y los de comisión.



Ilustración 25. Unificación de polígonos y firmas para la validación. Fuente: Elaboración propia.

En dicha validación, para alcanzar la máxima exactitud, se utilizan todas las firmas y no únicamente las firmas seleccionadas para la clasificación.

IDENTIFICACIÓN DE CUBIERTAS CON CONTENIDO DE AMIANTO MEDIANTE SISTEMAS ESPECTRALES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA EN EL MUNICIPIO DE CARTAGENA

Class #	>	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order	Count	Prob.	P	I	H	A	FS
24		B24		0.592	0.626	0.660	25	25	304	1.000	✓	✓	✓	✓	
25		B25		0.446	0.414	0.434	26	26	90	1.000	✓	✓	✓	✓	
26		B26		0.592	0.626	0.660	27	27	304	1.000	✓	✓	✓	✓	
27		B27		0.475	0.452	0.462	28	28	97	1.000	✓	✓	✓	✓	
28		B28		0.383	0.422	0.479	29	29	50	1.000	✓	✓	✓	✓	
29		B29		0.592	0.626	0.660	30	30	304	1.000	✓	✓	✓	✓	
30		B30		0.404	0.429	0.482	31	31	49	1.000	✓	✓	✓	✓	
31		B31		0.404	0.392	0.426	32	32	47	1.000	✓	✓	✓	✓	
32		B32		0.382	0.413	0.458	33	33	58	1.000	✓	✓	✓	✓	
33		B33		0.309	0.334	0.378	34	34	44	1.000	✓	✓	✓	✓	
34		B34		0.592	0.626	0.660	35	35	304	1.000	✓	✓	✓	✓	
35		B35		0.363	0.375	0.422	36	36	44	1.000	✓	✓	✓	✓	
36		B36		0.592	0.626	0.660	37	37	304	1.000	✓	✓	✓	✓	
37		B37		0.592	0.626	0.660	38	38	304	1.000	✓	✓	✓	✓	
38		B38		0.400	0.412	0.455	39	39	149	1.000	✓	✓	✓	✓	
39		B39		0.383	0.420	0.473	40	40	148	1.000	✓	✓	✓	✓	
40		B40		0.592	0.626	0.660	41	41	304	1.000	✓	✓	✓	✓	
41		B41		0.323	0.362	0.411	42	42	92	1.000	✓	✓	✓	✓	
42		B42		0.432	0.465	0.516	43	43	61	1.000	✓	✓	✓	✓	
43		B43		0.592	0.626	0.660	44	44	304	1.000	✓	✓	✓	✓	
44		B44		0.828	0.868	0.874	45	45	60	1.000	✓	✓	✓	✓	
45		B45		0.592	0.626	0.660	46	46	304	1.000	✓	✓	✓	✓	
46		A1		0.693	0.699	0.671	1	47	115	1.000	✓	✓	✓	✓	
47		A2		0.634	0.641	0.624	47	48	154	1.000	✓	✓	✓	✓	
48		A3		0.792	0.805	0.779	48	49	90	1.000	✓	✓	✓	✓	
49		A4		0.664	0.660	0.628	49	50	72	1.000	✓	✓	✓	✓	
50		A5		0.701	0.695	0.657	50	51	80	1.000	✓	✓	✓	✓	
51		A6		0.481	0.480	0.454	51	52	65	1.000	✓	✓	✓	✓	
52		A7		0.652	0.653	0.621	52	53	88	1.000	✓	✓	✓	✓	
53		A8		0.620	0.617	0.599	53	54	59	1.000	✓	✓	✓	✓	
54		A9		0.760	0.764	0.735	54	55	56	1.000	✓	✓	✓	✓	
55		A10		0.698	0.691	0.629	55	56	222	1.000	✓	✓	✓	✓	
56		A11		0.590	0.589	0.532	56	57	45	1.000	✓	✓	✓	✓	
57		A12		0.783	0.798	0.734	57	58	24	1.000	✓	✓	✓	✓	
58		A13		0.877	0.871	0.796	58	59	30	1.000	✓	✓	✓	✓	
59		A14		0.670	0.653	0.611	59	60	25	1.000	✓	✓	✓	✓	
60		A15		0.719	0.690	0.625	60	61	18	1.000	✓	✓	✓	✓	
61		A16		0.767	0.799	0.796	61	62	84	1.000	✓	✓	✓	✓	
62		A17		0.741	0.783	0.797	62	63	83	1.000	✓	✓	✓	✓	

Ilustración 26. Representación de las firmas en ERDAS Imagine. Fuente: Elaboración propia en ERDAS Imagine.

### 6.3.1.1. Distancia de Mahalanobis

Tabla 6. Verificación del método de la Distancia de Mahalanobis. Fuente: Elaboración propia.

Método		
Distancia Mahalanobis		
Píxeles	Predice amianto	Predice no amianto
Siendo amianto	19985	4960
Sin ser amianto	2397	31509
	Píxeles	Porcentaje
Total:	58851	
Correctos:	51494	87%
Errores O/C	7357	13%
	Predice amianto	Predice no amianto
Siendo amianto	34%	8%
Sin ser amianto	4%	54%
	Omisión	Comisión
Amianto	2397	4960
	42%	8%

La tabla 3 hace referencia al análisis en OTB del método de la Distancia de Mahalanobis: podemos observar que los valores de errores de omisión son mucho mayores que los de comisión para el amianto. El 10% del amianto no ha sido detectado, y un 4% del amianto detectado no era amianto. Es un 87% efectivo. Robusto.

Este es el método que, según el caso de Cartagena de Indias, supera a otros clasificadores.

### 6.3.1.2. Spectral Angle Mapper

Tabla 7. Verificación del método Spectral Angle Mapper. Fuente: Elaboración propia.

	Método	
	Spectral Angle Mapper	
Píxeles	Predice amianto	Predice no amianto
Siendo amianto	17996	3949
Sin ser amianto	9726	24180
	Píxeles	Porcentaje
Total:	55851	
Correctos:	42176	76%
Errores O/C	13675	24%
	Predice amianto	Predice no amianto
Siendo amianto	32%	7%
Sin ser amianto	17%	43%
	Omisión	Comisión
Amianto	9726	3949
	39%	61%

La tabla 4 hace referencia al análisis en OTB del método de la Spectral Angle Mapper, podemos observar que los valores de errores de omisión son mucho mayores que los de comisión para el amianto. El 44% del amianto no ha sido detectado, y un 17% del amianto detectado no era amianto. Tiene una efectividad del 76%. Esto se debe a posible suciedad o degradación de los tejados, ya que afecta negativamente al ángulo espectral.

Este método es el utilizado para el caso del ayuntamiento de Madrid, arrojando unos resultados muy superiores.

### 6.3.1.3. Spectral Correlation Mapper

Tabla 8. Verificación del método Spectral Correlation Mapper. Fuente: Elaboración propia.

	Método	
	Spectral Correlation Mapper	
Píxeles	Predice amianto	Predice no amianto
Siendo amianto	17544	4401
Sin ser amianto	9830	24076
	Píxeles	Porcentaje
Total:	55851	
Correctos:	41620	75%
Errores O/C	14231	25%
	Predice amianto	Predice no amianto
Siendo amianto	31%	8%
Sin ser amianto	18%	43%
	Omisión	Comisión
Amianto	9830	4401
	39%	61%

La tabla 5 hace referencia al análisis en OTB del método de Spectral Correlation Mapper, podemos observar que los valores de errores de omisión son mucho mayores que los de comisión para el amianto. El 45% del amianto no ha sido detectado, y un 18% del amianto detectado no era amianto. Tiene una efectividad del 75%. Se utiliza para detector metales, pero la variabilidad de las firmas de amiantos hacen que no sea tan robusto en este caso.

### 6.3.1.4. Maximum Likelihood

Tabla 9. Verificación del método de Maximum Likelihood. Fuente: Elaboración propia.

	Método	
	Maximum Likelihood	
Píxeles	Predice amianto	Predice no amianto
Siendo amianto	19310	2635
Sin ser amianto	3959	29947
	Píxeles	Porcentaje
Total:	55851	
Correctos:	49257	88%
Errores O/C	6594	12%
	Predice amianto	Predice no amianto
Siendo amianto	35%	5%
Sin ser amianto	7%	54%
	Omisión	Comisión
Amianto	3959	2635
	39%	61%

La tabla 6 hace referencia al análisis en OTB del método de la Distancia de Maximum Likelihood, podemos observar que los valores de errores de omisión son mucho mayores que los de comisión para el amianto. El 18% del amianto no ha sido detectado, y un 7% del amianto detectado no era amianto. Tiene una eficacia del 88%, siendo este el mejor resultado. El más equilibrado.

### 6.3.1.5. Minimum Distance

Tabla 10. Verificación del método de Minimum Distance. Fuente: Elaboración propia.

	Método	
	Minimum Distance	
Píxeles	Predice amianto	Predice no amianto
Siendo amianto	19853	2092
Sin ser amianto	11165	22741
	Píxeles	Porcentaje
Total:	55851	
Correctos:	42594	76%
Errores O/C	13257	24%
	Predice amianto	Predice no amianto
Siendo amianto	36%	4%
Sin ser amianto	20%	41%
	Omisión	Comisión
Amianto	11165	2092
	39%	61%

La tabla 7 hace referencia al análisis en OTB del método de la Distancia de Minimum Distance, podemos observar que los valores de errores de omisión son mucho mayores que los de comisión para el amianto. El 10% del amianto no ha sido detectado, y un 4% del amianto detectado no era amianto. Tiene una eficacia del 76%. Método simple, pero no válido para alta variabilidad.

## 6.4. CONCLUSIÓN DE LA VALIDACIÓN

El análisis comparativo de los algoritmos de clasificación utilizados revela que hay una gran variación entre ellos

Tabla 11. Discusión de resultados. Fuente: Elaboración propia.

Método	Efectividad	Características
Máxima verosimilitud	88%	Más robusto, considera la dispersión y varianza de los datos de entrenamiento, minimiza errores de omisión
Distancia de Mahalanobis	87%	Trabaja con covarianza de bandas
Mapeador de Ángulo Espectral	76%	Enfoque en la firma espectral, pero insuficiente
Mapeador de Correlación Espectral	75%	Gran superposición de firmas con otras cubiertas, bajo rendimiento
Distancia Mínima	76%	Clasificador simplista, resultados simplistas.

Se requieren algoritmos estadísticos medianamente complejos para la detección de amianto, como Máxima Verosimilitud o Distancia de Mahalanobis.

- En nuestro caso, el método de mayor efectividad fue el de máxima verosimilitud, con un 88% de precisión. En el caso de Cartagena de Indias fue la distancia de Mahalanobis con un 97,3% en sensores hiperespectrales; ante la falta de presupuesto, la precisión nuestra con sensores multiespectrales es superior a la del Caso de Cartagena de Indias, que con sensores multiespectrales alcanzó un 74,4% de precisión.
- En el caso de Madrid, el porcentaje de acierto utilizando el método SAM es del 98,3%, superando por 12 puntos nuestra precisión.
- Nuestros resultados son superiores respecto al caso de Alcalá de Henares, donde la precisión general (Usando imagen de Deimos-2) es del 75,8%, y con la matriz de error del NIR es del 64,1%.

## 7. CONCLUSIONES

### 7.1. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

- Las cubiertas de edificios con contenido de amianto presentan un patrón característico.
- ERDAS Imagine se convierte en una herramienta robusta para la clasificación supervisada multiespectral
- PlanetScope se convierte en una colección de imágenes válidas para el análisis multiespectral de cubiertas de amianto.

### 7.2. CONCLUSIONES GENERALES

Las técnicas de observación de la tierra aplicadas a imágenes multiespectrales de PlanetScope constituyen una herramienta poderosa para identificar en Cartagena las cubiertas con contenido de amianto. El uso de las imágenes de Alta Resolución Planet Scope ha dado resultados fiables teniendo en cuenta el GSD de 3 a 7 metros.

La comparación de algoritmos en ERDAS Imagine evidencia que los métodos paramétricos ofrecen un mejor rendimiento respecto a los no paramétricos. Destaca el clasificador Maximum Likelihood con una precisión del 88%, la opción más fiable, seguida por la Distancia de Mahalanobis (87%). Los métodos más simples como Mínimum Distance o basados en Spectral Angle Mapper o Spectral Correlation Mapper obtuvieron peor rendimiento.

La metodología es aplicable a otros municipios que requieran cumplir la Ley 7/2022.

Este trabajo evidencia que la observación de la tierra reduce dependencias de inspecciones in situ, disminuyendo costes, riesgo en la salud de trabajadores (evita que exista contacto) y disminuye tiempos.

Los resultados aportan una base metodológica sólida para futuros desarrollos que incorporen mayor resolución espectral o enfoques más avanzados (Random Forest, SVM, Deep Learning).

## 8. CRONOGRAMA

En el Anexo 1 está todo el diagrama de Gantt que nos servirá para este apartado y el posterior, capítulos de cronograma y presupuesto.

La metodología se establece en las siguientes fases:

### 8.1. TABLA DE FASES DE TRABAJO

La tabla 8 hace referencia a la asignación horaria a cada trabajador en horas a cada tarea dentro de las cinco grandes fases del trabajo.

Tabla 12. Sobre las horas de trabajo según el cronograma. Fuente: Elaboración propia.

Definición del área de estudio	Asignación	Nº de horas
Establecimiento de límites del municipio	Ingeniero	6
Estudio del comportamiento del amianto	Ingeniero	18
Estudio de antecedentes	Ingeniero	24
Petición y descarga de imágenes	Asistente	4,5
Petición y descarga de capas vectoriales	Asistente	4,5
Revisión de metadatos y organización	Ingeniero	12
Preprocesamiento de datos	Asignación	Nº de horas
Correcciones y verificación	Ingeniero	12
Búsqueda de cubiertas sin amianto	Ingeniero	24
Búsqueda de cubiertas con amianto	Ingeniero	21
Enmascarado de capas	Asistente	18
Análisis espectral	Asignación	Nº de horas
Extracción de firmas	Ingeniero	18
Cálculo de índices	Ingeniero	6
Patrones y relación de bandas	Ingeniero	14
Clasificación y validación	Asignación	Nº de horas
Clasificación supervisada	Ingeniero	4,5
Clasificación no supervisada	Ingeniero	19,5
Validación y verificación	Ingeniero	33
Generación de documentación	Asignación	Nº de horas
Preparación de resultados y documentación	Ingeniero	36

Asistente	27h
Ingeniero	248h





## 9. JUSTIFICACIÓN DE PRECIOS Y PRESUPUESTO

En este apartado se muestra la justificación de precios y presupuesto. Para ello enumeraremos los recursos necesarios (Para no redundar, se informa que las características del hardware y software están detalladas en capítulos previos):

- Recursos humanos:
  - o Ingeniero
  - o Asistente
- Equipamiento (Hardware y software):
  - o Ordenador portátil
  - o ERDAS Imagine
  - o Microsoft Office
  - o ArcGIS Pro ente
- El resto de gastos como oficina, internet o gastos de administración están en costes indirectos

### 9.1. JUSTIFICACIÓN DE PRECIOS

Tabla 13. Justificación de precios. Fuente: Elaboración propia.

	Precio	Amortización	Precio/hora
Ítem	Euros	Años	Euros/hora
Ordenador portátil	3.500,00 €	2	1,01 €
Microsoft Office anual	99,99 €	1	0,06 €
ERDAS Imagine	7.499,52 €	1	4,32 €
ArcGIS Pro	7.985,60 €	1	4,60 €
	Salario	Sueldo/hora	
Trabajador	Euros	Euros/hora	
Ingeniero	52.010,56 €	29,96	
Auxiliar	29.477,28 €	16,98	

## 9.2. PRESUPUESTO

(Las horas están justificadas en el ANEXO 2)

Tabla 14. Mediciones. Fuente: Elaboración propia.

Definición del área de estudio	Asignación	Nº de horas	Coste
Establecimiento de límites del municipio	Ingeniero	6	179,76 €
Estudio del comportamiento del amianto	Ingeniero	18	539,28 €
Estudio de antecedentes	Ingeniero	24	719,04 €
Petición y descarga de imágenes	Asistente	4,5	134,82 €
Petición y descarga de capas vectoriales	Asistente	4,5	134,82 €
Revisión de metadatos y organización	Ingeniero	12	359,52 €
Preprocesamiento de datos	Asignación	Nº de horas	
Correcciones y verificación	Ingeniero	12	359,52 €
Búsqueda de cubiertas sin amianto	Ingeniero	24	719,04 €
Búsqueda de cubiertas con amianto	Ingeniero	21	629,16 €
Enmascarado de capas	Asistente	18	539,28 €
Análisis espectral	Asignación	Nº de horas	
Extracción de firmas	Ingeniero	18	539,28 €
Cálculo de índices	Ingeniero	6	179,76 €
Patrones y relación de bandas	Ingeniero	14	419,44 €
Clasificación y validación	Asignación	Nº de horas	
Clasificación supervisada	Ingeniero	4,5	134,82 €
Clasificación no supervisada	Ingeniero	19,5	584,22 €
Validación y verificación	Ingeniero	33	988,68 €
Generación de documentación	Asignación	Nº de horas	
Preparación de resultados y documentación	Ingeniero	36	1.078,56 €

Tabla 15. Presupuesto. Fuente: Elaboración propia.

Variables						8.072,83 €
Imágenes	Modelo	Sensor	Precio (€/Km2)	Área (Km2)	Coste imágenes	184,29 €
	PlanetScope	PS2	2,25	81,9052	184,29 €	
Trabajador	Puesto		Coste €/h	Horas	Coste trabajadores	7.888,54 €
	Ingeniero		29,96	248	7.430,08 €	
	Auxiliar		16,98	27	458,46 €	
Fijos			1.146,40 €		Costes Indirectos	2.765,77 €
	Coste €/h	Horas	Coste		30%	
Ordenador	1,01	275	277,75 €			
S.O. W.11	0,06	275	16,50 €		Fondo de Contingencias	719,10 €
Microsoft Office	0,03	105	3,15 €		6%	
ERDAS Imagine	4,32	155	669,60 €			
ArcGIS Pro	4,6	39	179,40 €		<b>TOTAL</b>	<b>12.704,09 €</b>

## 10. IMPACTO ÉTICO Y AMBIENTAL

### 10.1. PUNTO DE VISTA MÉDICO

“El amianto es un agente carcinógeno sumamente peligroso que sigue afectando a diversos sectores económicos, como la rehabilitación de edificios, la minería y la explotación de canteras, la gestión de residuos y la lucha contra incendios, en los que los trabajadores corren un alto riesgo de exposición. El amianto está clasificado como agente carcinógeno de categoría 1A con arreglo al anexo VI, parte 3, del Reglamento (CE) n.o 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo (6). De conformidad con las estadísticas europeas sobre enfermedades profesionales, es, con diferencia, la principal causa de cáncer profesional, con hasta un 78 % de casos de cáncer profesional reconocidos en los Estados miembros en cuanto que casos asociados a la exposición al amianto. Cuando se inhalan, las fibras de amianto suspendidas en el aire pueden provocar enfermedades graves, como mesotelioma y cáncer de pulmón, y los primeros signos de enfermedad pueden tardar una media de treinta años en manifestarse desde el momento de la exposición, dando lugar, en última instancia, a muertes relacionadas con el trabajo. Por tanto, la presente Directiva se aplica a todas las actividades, incluidas las obras de construcción, reformas o rehabilitación y demolición, la gestión de residuos, la minería y la lucha contra incendios, en las que los trabajadores estén expuestos, o puedan estarlo, durante su trabajo, al polvo procedente de amianto o de materiales que lo contengan. (...).

Tras los nuevos avances científicos y tecnológicos en este ámbito, hay margen para mejorar la protección de los trabajadores expuestos al amianto y reducir así la probabilidad de que los trabajadores expuestos contraigan enfermedades relacionadas con el amianto. Dado que el amianto es un carcinógeno sin umbral, no es científicamente posible determinar el nivel por debajo del cual la exposición no provoque efectos adversos para la salud. En su lugar, puede establecerse una relación entre exposición y riesgo, lo que facilita la fijación de un límite de exposición profesional (en lo sucesivo, «valor límite») teniendo en cuenta un nivel aceptable de exceso de riesgo. En consecuencia, debe revisarse el valor límite y la metodología de medición para el amianto con el fin de reducir el riesgo mediante la disminución de los niveles de exposición para mejorar la protección de los trabajadores frente a las enfermedades profesionales derivadas del amianto”.<sup>26</sup>

La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que anualmente hay en torno a 25000 casos de enfermedades relacionadas con amianto, principalmente cáncer de pulmón, mesotelioma y asbestosis<sup>27</sup>. Es por este motivo que el Comité Social y Económico de la Unión Europea publicó en 2015 su Informe Erradicar el amianto en la UE, el objetivo es erradicar el amianto para el año 2028. Es por ello que el Gobierno de España en la ley 7/2022 establece que debe hacerse un censo de amianto previo al 2023 donde debe retirarse el amianto antes del 2028.

La OMS indica que todas las formas de amianto, incluida el crisotilo, son cancerígenas, una proporción mundial sustancial está expuesto a los riesgos de este mineral, produciendo más del 70% de muertes de cáncer en el entorno laboral. Más de 200.000 muertes en el mundo son causadas por la exposición al amianto (Estimación conjunta con la Organización Internacional del Trabajo, OIT), aparte de las enfermedades graves que puede provocar. Más de 50 Estados Miembros de la OMS han prohibido este mineral. La exposición también al humo de tabaco aumenta el riesgo de mesotelioma, empeorándose cuanto más se fume.

La OMS, en colaboración con sus estados miembros, la OIT y otras organizaciones, colabora en la erradicación de las enfermedades relacionadas a este mineral mediante: Reconocer que la mejor forma de erradicar las enfermedades derivadas es prohibir el uso del amianto; proporcionar información y mecanismos para la eliminación de los asbestos y reemplazarlo por sustitutos más seguros; reducir la exposición del aspecto; mejorar el tratamiento y rehabilitación de los afectados por el amianto, además de mejorar la rapidez con la que se diagnostica a estos pacientes afectados; crear registros de exposición de personas al asbesto, y proporcionar información sobre el riesgo de estos minerales y derivados.<sup>28</sup>

“La completa eliminación de todo el amianto usado y de todos los productos que contengan amianto debe ser un objetivo prioritario de la Unión Europea. Los planes de acción son competencia de los Estados miembros, pero la UE debería coordinarlos. Por ello el CESE anima a la UE a colaborar con los agentes sociales y otras partes interesadas a escala europea, nacional y regional para desarrollar y compartir planes de acción de gestión y eliminación del amianto. Estos planes deberían incluir: educación e información, formación para empleados públicos, formación nacional e internacional, programas para financiar la eliminación del amianto, actividades de sensibilización sobre la eliminación del amianto y de los productos que contengan amianto (incluso durante su erradicación en los edificios), instalaciones públicas y emplazamientos de antiguas fábricas de amianto, limpieza de recintos y construcción de instalaciones para la destrucción del amianto y de escombros que contengan amianto, supervisión de la eficiencia de los requisitos jurídicos vigentes, evaluación de la exposición del personal en riesgo y la protección de la salud”.<sup>29</sup>

“La localización e identificación de Material con Contenido de Amianto (MCA) en emplazamientos o instalaciones no implica necesariamente riesgo de inhalación de fibras de amianto, sino que habrá que considerar otros factores para conocer cuándo los MCA identificados constituyen un verdadero riesgo. La valoración de dicho riesgo es una fase importante del proceso global de diagnóstico de los MCA en instalaciones o edificaciones, salvo en casos de demolición total o parcial a corto plazo en las que esta información puede no ser determinante para planificar la retirada previa de los MCA instalados. El “riesgo potencial de un MCA” es la posibilidad de que se liberen las fibras que contiene al ambiente. Esto ocurre no sólo por la friabilidad del material sino también por otros factores como, por ejemplo, su ubicación, grado de deterioro o estado de conservación, accesibilidad o confinamiento, etc. Por tanto, los factores determinantes para la valoración del riesgo potencial serán aquellos que influyan en la capacidad de un material de liberar las fibras que contiene, pudiendo distinguir factores relacionados con el propio material (friabilidad, tipo de material, estado de conservación o tratamiento superficial) o a factores que tengan una

influencia directa en la posibilidad de que dichos materiales puedan ser perturbados o alterados y, por tanto, influir en la capacidad de emisión de fibras al ambiente (accesibilidad, ubicación, exposición a vibraciones y choques, erosión eólica, actividad del lugar donde se ubiquen, etc.)”<sup>30</sup>.

Estas son algunas patologías que estos minerales fibrosos pueden causar:

Cánceres como el Mesotelioma pleural y peritoneal, que puede ser producido incluso en bajas exposiciones, agravándose en fumadores expuestos. Cáncer de pulmón. Cáncer de laringe.

Otras enfermedades como la asbestosis, que es la fibrosis pulmonar irreversible que se desarrolla por exposición prolongada. Pero el problema principal no es el cáncer, que es una consecuencia de años de exposición.

El proceso fisiopatológico que deriva de la exposición prolongada a fibras de amianto, principalmente anfíboles (crocidolita, amosita) y serpentinas (crisolito), desencadena un proceso progresivo. Las fibras de amianto intentan ser fagocitadas por los macrófagos alveolares y se genera una reacción inflamatoria que, si persiste, conduce a una fibrosis intersticial difusa que altera el intercambio gaseoso y la oxigenación en sangre. Se intenta respirar, pero la alteración del organismo genera descontrol celular.

Aquí algunas imágenes de pulmones vistos por radiografías:

- PULMÓN SANO, ilustración

(Fuente: Fuente: <https://www.pinterest.com/pin/355925176784475081>):



Ilustración 32. Pulmón sano. Fuente: Pinterest.

- PULMÓN CON CÁNCER, ilustración

(Fuente: Fuente: <https://cancerpumb.blogspot.com/2015/05/diagnostico.html>):

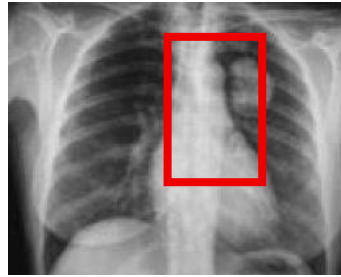


Ilustración 33. Pulmón con cancer. Fuente: web Cancerpub.

- PULMÓN CON ASBESTOSIS, ilustración

(Fuente: Fuente: <https://es.pinterest.com/pin/407505466272538076/>):

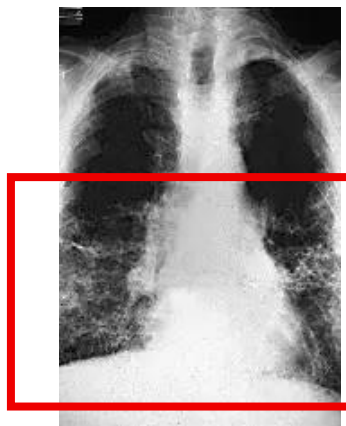


Ilustración 34. Pulmón con asbestosis. Fuente: Pinterest.

## 10.2. PUNTO DE VISTA SOCIOECONÓMICO

El impacto del amianto no recae igual en todas las personas. En las poblaciones pobres y marginales, la exposición a este material es mayor que en el resto. El amianto se ha usado incontroladamente en viviendas sociales, fábricas, naves industriales, chabolas, etcétera, espacios que el trabajador marginal y pobres frecuentan o incluso habitan, pudiendo algunos estar expuestos al amianto de forma directa durante años y todos los días.

“No es propio de habitantes de este planeta vivir cada vez más inundados de cemento, asfalto, vidrio y metales, privados del contacto físico con la naturaleza. (...)”

El ambiente humano y el ambiente natural se degradan juntos, y no podremos afrontar adecuadamente la degradación ambiental si no prestamos atención a causas que tienen que ver con la degradación humana y social. De hecho, el deterioro del ambiente y el de la sociedad afectan de un modo especial a los más débiles del planeta: «Tanto la experiencia común de la vida ordinaria como la investigación científica demuestran que los más graves

efectos de todas las agresiones ambientales los sufre la gente más pobre»<sup>31</sup>. (...). El impacto de los desajustes actuales se manifiesta también en la muerte prematura de muchos pobres, en los conflictos generados por falta de recursos y en tantos otros problemas que no tienen espacio suficiente en las agendas del mundo”<sup>32</sup>, por tanto, la retirada del amianto no solo supone un beneficio médico para toda la sociedad, sino que es un acto de justicia social donde se evita que los pobres sean más pobres, ya que evitamos que sobre estas clases marginadas recaigan, además, enfermedades que agraven sus situaciones.

El uso de imágenes satelitales reduce la necesidad de las inspecciones presenciales, disminuyendo las emisiones derivadas que conlleva. EL coste ambiental se centra en el procesamiento de las imágenes y generación de cartografía.

### 10.3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

“El 25 de septiembre de 2015, 193 países se comprometieron con los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas Se abre en ventana nueva y su cumplimiento para el año 2030.

Los objetivos persiguen erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todas las personas como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Un nuevo contrato social global que no deje a nadie atrás”.<sup>33</sup> Aquí se representa, en una ilustración, los 17 ODS con sus nombres y colores característicos (Fuente: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>):



Ilustración 35. Iconografía representativa de cada uno de los ODS. Fuente: Web ODS de la ONU

Los ODS asociados a este Trabajo Fin de Grado son especialmente el ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructuras; el ODS 3: Salud y bienestar, y el ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles. Nos centraremos en este ODS, el 11 (Fuente: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>). Ilustración característica del objetivo:

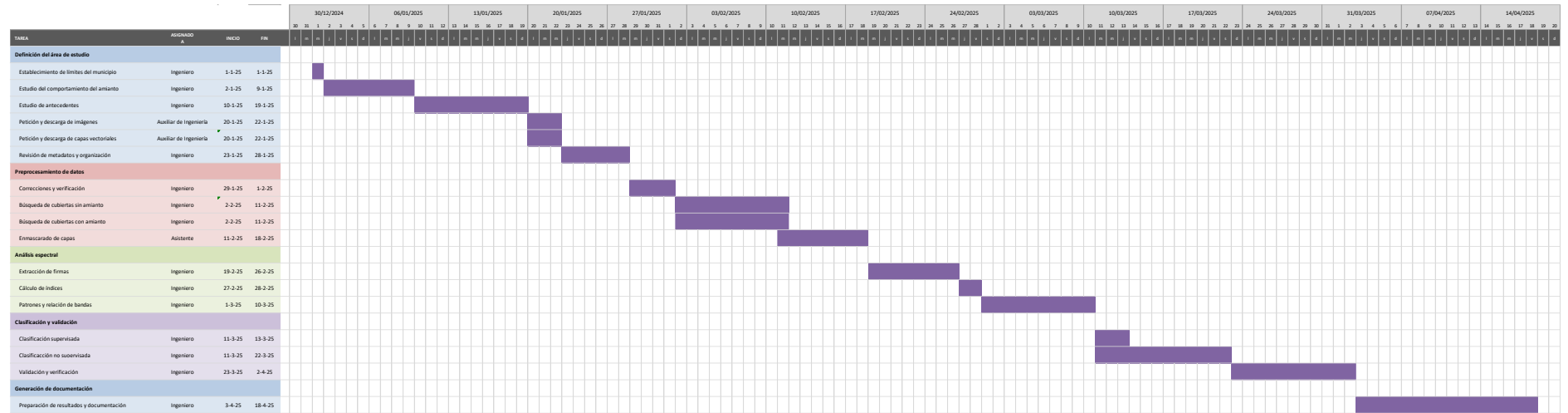


Ilustración 36. ODS 11. Fuente: Web ODS 11 de la ONU.

En este ODS se aborda la contaminación del aire, tema principal de este Trabajo Fin de Grado: “Con el tiempo, estos problemas afectarán a toda la población. La desigualdad puede generar malestar e inseguridad, la contaminación deteriora la salud de la población y afecta a la productividad de los trabajadores y, por tanto, a la economía, y los desastres naturales pueden alterar el estilo de vida de las personas. La contaminación del aire no es solo un problema urbano que perjudica la salud de millones de personas, sino que también afecta a los pueblos y las zonas rurales”<sup>34</sup>.

## ANEXOS

### ANEXO 1. DIAGRAMA DE GANTT



## ANEXO 2. TABLA DE HORAS POR TAREA E ÍTEM DEL PRESUPUESTO

	HORAS						
	ERDAS Imagine	Arcgis	Office	Ingeniero	Auxiliar	PC	S.O. W11
<b>Definición del área de estudio</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>24</b>	<b>60</b>	<b>9</b>	<b>69</b>	<b>69</b>
Establecimiento de límites del municipio	0	0	6	6	0	6	6
Estudio del comportamiento del amianto	0	0	6	18	0	18	18
Estudio de antecedentes	0	0	6	24	0	24	24
Petición y descarga de imágenes	0	0	0	0	4,5	4,5	4,5
Petición y descarga de capas vectoriales	0	0	0	0	4,5	4,5	4,5
Revisión de metadatos y organización	12	0	6	12	0	12	12
<b>Preprocesamiento de datos</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>57</b>	<b>18</b>	<b>75</b>	<b>75</b>
Correcciones y verificación	12	0	3	12	0	12	12
Búsqueda de cubiertas sin amianto	0	0	0	24	0	24	24
Búsqueda de cubiertas con amianto	0	0	6	21	0	21	21
Enmascarado de capas	18	0	0	0	18	18	18
<b>Análisis espectral</b>	<b>38</b>	<b>0</b>	<b>24</b>	<b>38</b>	<b>0</b>	<b>38</b>	<b>38</b>
Extracción de firmas	18	0	9	18	0	18	18
Cálculo de índices	14	0	0	6	0	6	6
Patrones y relación de bandas	6	0	14	14	0	14	14
<b>Clasificación y validación</b>	<b>57</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>57</b>	<b>0</b>	<b>57</b>	<b>57</b>
Clasificación supervisada	4,5	0	0	4,5	0	4,5	4,5
Clasificación no supervisada	19,5	0	0	19,5	0	19,5	19,5
Validación y verificación	33	0	3	33	0	33	33
<b>Generación de documentación</b>	<b>9</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>0</b>	<b>36</b>	<b>36</b>
Preparación de resultados y documentación	9	36	36	36	0	36	36
<b>TOTAL</b>	<b>146</b>	<b>36</b>	<b>96</b>	<b>248</b>	<b>27</b>	<b>275</b>	<b>275</b>

### ANEXO 3. FICHA TÉCNICA DE LA IMAGEN

Ficha Técnica – Imagen PlanetScope Analítica Multiespectral

- Nombre de archivo: 20231113\_104135\_90\_2475\_3B\_AnalyticMS\_SR\_8b\_clip.tif
- ID de la colección: 32856a4d-601a-4395-abc6-488f255efa4e (PSScene)
- Plataforma: PlanetScope
- Instrumento: SuperDove PSB.SD
- Fecha y hora de adquisición: 13 de noviembre de 2023, 10:41:35 h UTC
- Ángulo cenital (View Angle / Off-nadir): 1.2°
  - Implica adquisición casi nadir, mínima distorsión geométrica
- Azimut / Elevación solar: 161.2° / 32.3° → luz solar desde sureste, sol bajo, sombras moderadas
- Nivel de procesamiento: 3B (ortorrectificada, radiométricamente calibrada y corregida atmosféricamente)
- Tipo de producto: AnalyticMS (Multiespectral, reflectancia superficial SR)
- Profundidad de bits: 8 bits/pixel
- Georreferenciación: Por GCP, EPSG:32630 (WGS84, UTM 30N)
- Observaciones:
  - La imagen está recortada (“clip”) para el AOI.
  - Sombras moderadas por sol bajo, útil para análisis de relieve y topografía.
  - Ideal para análisis multiespectral, índices de vegetación, clasificación supervisada y comparaciones multitemporales.
- Resolución espacial (GSD): 3–3.6 m/pixel
- Bounding box (BBOX):
  - Min Long: -1.04057002
  - Min Lat: 37.58811951
  - Max Long: -0.94674999
  - Max Lat: 37.66767883
- Bounding box en metros:

Punto	X (Este, m)	Y (Norte, m)
Mínimo	583.740	4.161.350
Máximo	592.030	4.171.230

- Área=(Xmax-Xmin)×(Ymax-Ymin)

$$\Delta X = 592.030 - 583.740 = 8290 \text{ m}$$

$$\Delta Y = 4.171.230 - 4.161.350 = 9880 \text{ m}$$

$$\text{Área}=\Delta X\times\Delta Y=8290\times9880=81.905.200\text{ m}^2$$

$$\text{Área en km}^2 =81.9052\text{ km}^2$$

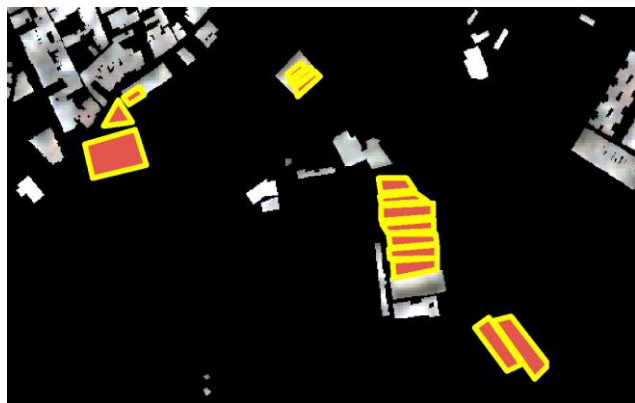
La imagen solicitada a PlanetScope es de resolución media (3 a 7 m), de 8 bandas tomada desde la plataforma 2475. Libre de nubes, vista calidad y referenciada con Ground Control Points. GSD aproximado de 3,5 m que nos servirá para detectar superficies de techo medianas y grandes, pero no cubiertas demasiado pequeñas o fragmentos.

El tipo de imagen PSScene en fase finalized y categoría standard, a este nivel (3B), son valores normalizados de reflectancia de superficie (SR) de 0 a 10.000 (En escala entera) con corrección atmosférica.

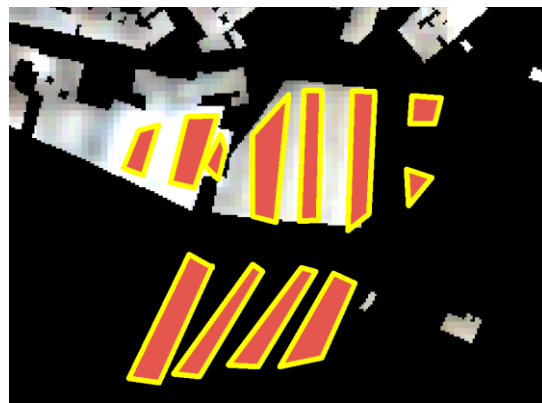
## ANEXO 4. INFORMACIÓN CATASTRAL DE EDIFICIOS CON CONTENIDO DE AMIANTO

REFERENCIA CATASTRAL	DIRECCIÓN	USO	SUP. CONSTRUIDA (m2)	AÑO	PARTICIPACIÓN DEL INMUEBLE
002102500XG76F0001JF	CL BLASES, LOS - DS CANTERAS 24 (D) Es:1 Pl:00 Pt:01 TODOS	Industrial	1050	1960	100
002102700XG76F0001SF	CL BLASES, LOS - DS CANTERAS 24 (B) Es:1 Pl:00 Pt:01 TODOS	Industrial	1181	1976	100
002101100XG76F0001PF	CL BLASES, LOS - DS CANTERAS 24 Es:1 Pl:00 Pt:01	Industrial	1740	1976	78
002101100XG76F0002AG	CL BLASES, LOS - DS CANTERAS 24 Es:1 Pl:00 Pt:02	Industrial	708	1976	22
9530437XG7693S0001FU	CL BUZOS - SANTA LUCIA 22 Es:T Pl:OD Pt:AS	Industrial	4574	1960	100
9530464XG7693S0001GU	CL BUZOS - SANTA LUCIA 2 Es:T Pl:OD Pt:AS	Industrial	2306	1965	100
9431211XG7693S0002QI	CM HUERTO AGUILAR-STA. LUCIA 24 TODOS	Almacén-Estacionamiento	924	1970	100
9431207XG7693S0001FU	CL FCO. JORQUERA-SANTA LUCIA 65	Industrial	3211	1930	100
9431205XG7693S0001LU	CL BARDIZA - SANTA LUCIA 2 (D)	Industrial	263	1900	100
000701400XG76F0001BF	PJ CEMENTERIO - DS EL PLAN 2 Es:1 Pl:00 Pt:01 PORCION 1	Industrial	933	1977	46,21
000701400XG76F0002ZG	PJ CEMENTERIO - DS EL PLAN 2 Es:1 Pl:00 Pt:02 PORCION2	Industrial	1086	1977	53,79
51016A013001660001SS	FN SAN JUSTO - DS MAGDALENA 6 Polígono:13 Parcela:166 Paraje:SAN JUSTO	Industrial	590	1930	100
51016A013002580001SJ	FN SAN JUSTO - DS MAGDALENA 2 (A) Polígono:13 Parcela:258 Paraje:SAN JUSTO	Industrial	1265	1930	100
9452712XG7695S0001SK	CL CESAR AUGUSTO-TORRECIEGA 64 Es:T Pl:OD Pt:AS	Industrial	812	1986	100
9452716XG7695S0001WK	CL MARCO AURELIO-TORRECIEGA 47 Es:T Pl:OD Pt:AS	Comercial	1930	1980	100
002500500XG76F0001EF	PJ TORRECIEGA - DS HONDON 70	Industrial	1134	1987	100
002500400XG76F0001JF	PJ TORRECIEGA - DS HONDON 68	Industrial	1250	1987	100
002500300XG76F0001IF	PJ TORRECIEGA - DS HONDON 66	Industrial	1391	1987	100
002500200XG76F0001XF	PJ TORRECIEGA - DS HONDON 64	Industrial	1383	1987	100

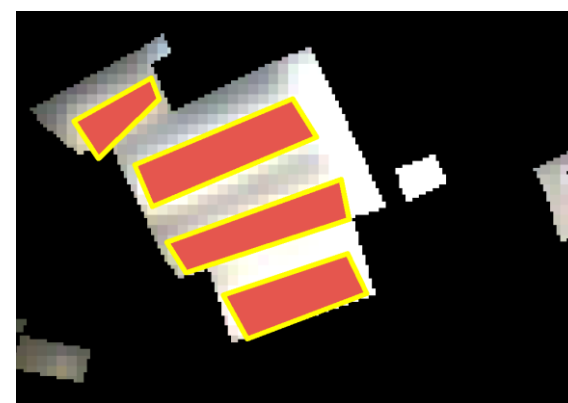
### ANEXO 5. EDIFICIOS CON CONTENIDO DE AMIANTO



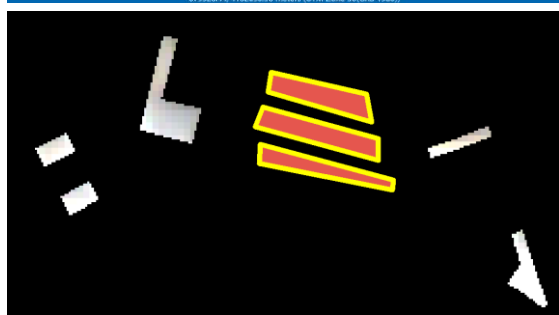
67952644, 416269096 meters (UTM Zone 30(GRS 1980))



67945090, 416488910 meters (UTM Zone 30(GRS 1980))



67559534, 416499189 meters (UTM Zone 30(GRS 1980))

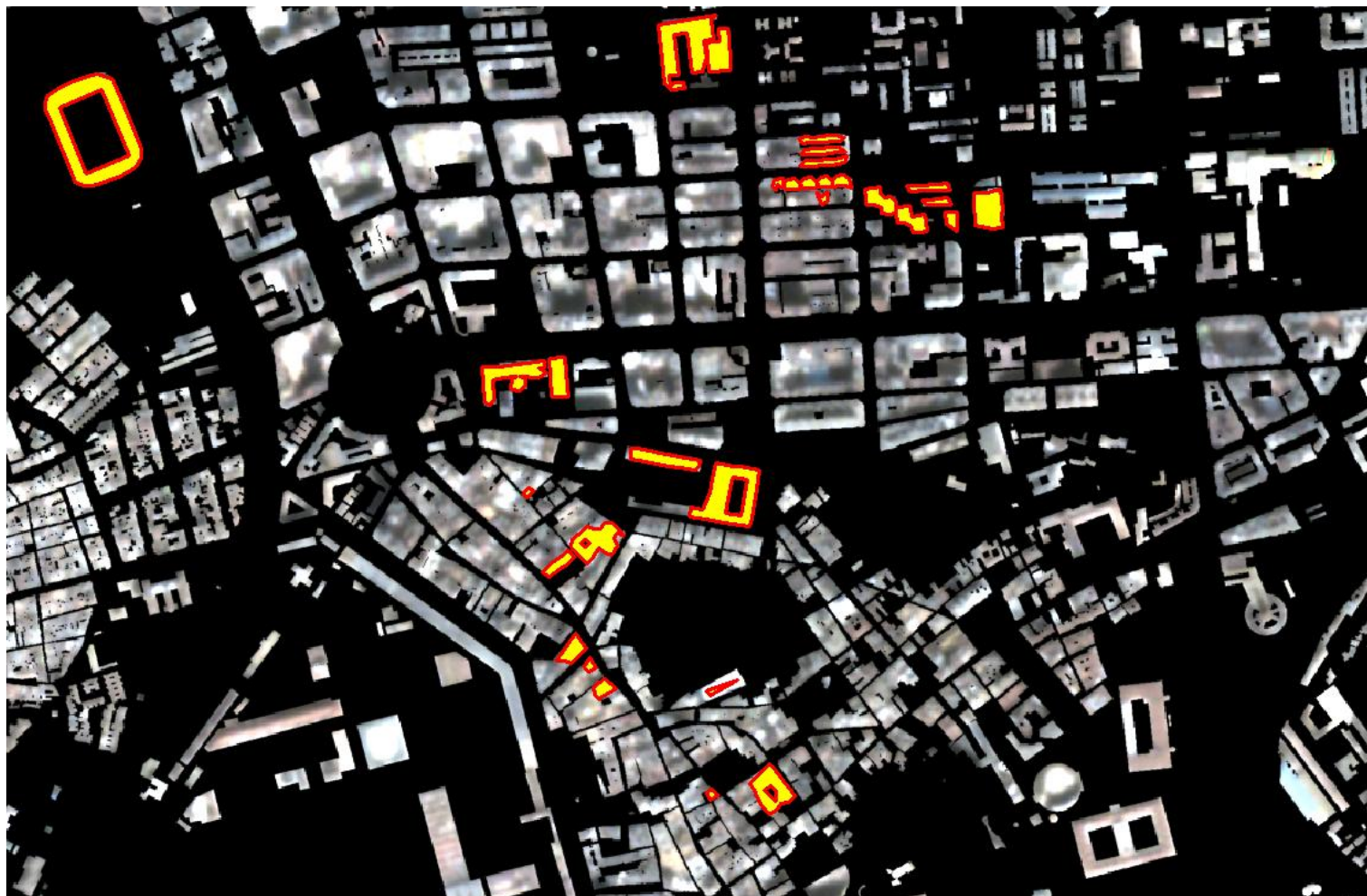


67604265, 416645100 meters (UTM Zone 30(GRS 1980))



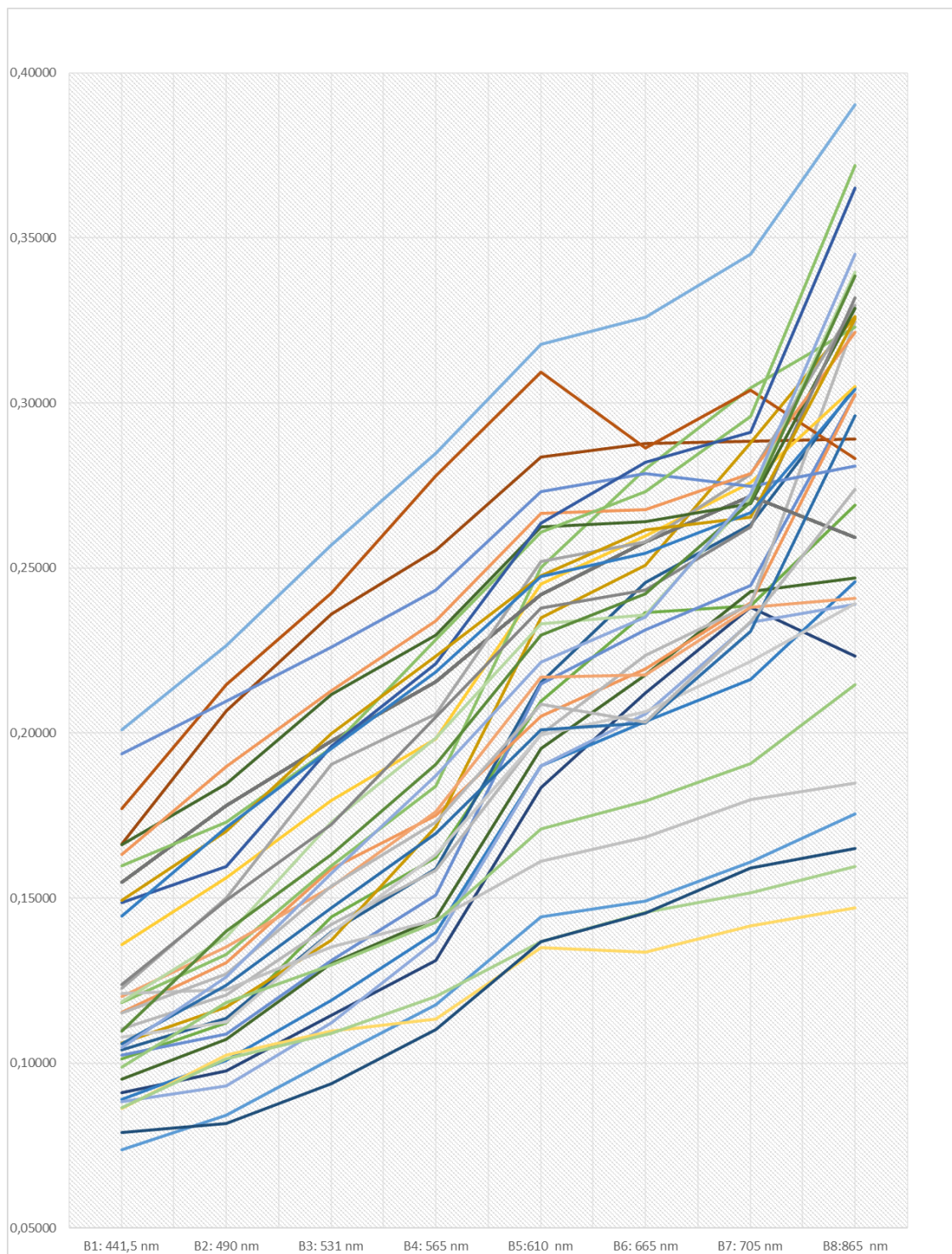
67463191, 416700546 meters (UTM Zone 30(GRS 1980))

**ANEXO 6. EDIFICIOS SIN AMIANTO**



677166.19, 4164319.26 meters (UTM Zone 30(GRS 1980))

### ANEXO 7. FIRMAS DE TODOS LOS EDIFICIOS MUESTRADOS



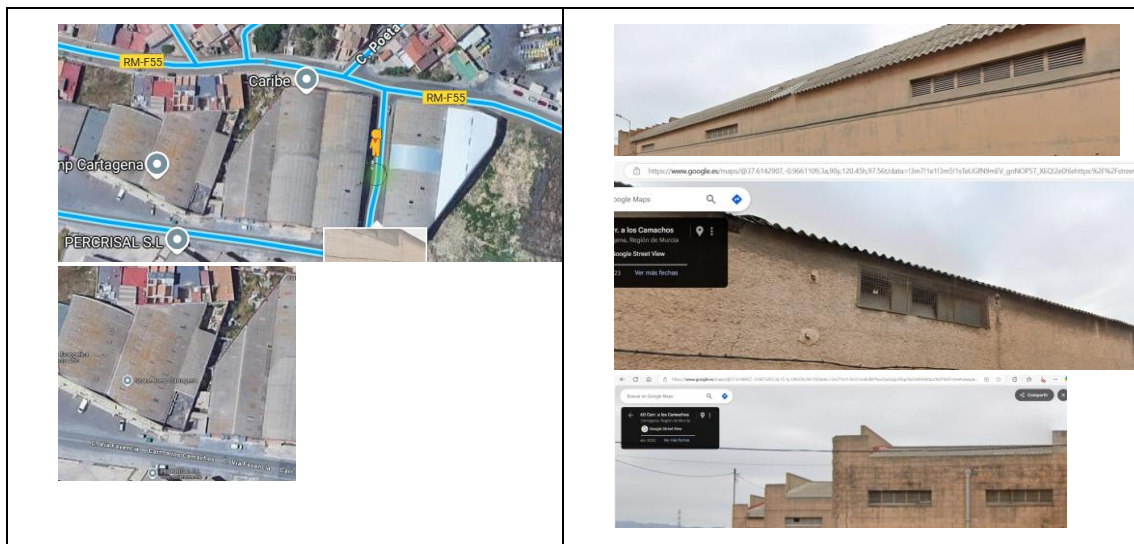
ANEXO 8. IMÁGENES DE EDIFICIOS CON AMIANTO EN GOOGLE MAPS

Vista cenital de edificio con amianto	Vista oblicua de edificio con amianto
	
	
	
	

IDENTIFICACIÓN DE CUBIERTAS CON CONTENIDO DE AMIANTO MEDIANTE SISTEMAS ESPECTRALES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA EN EL MUNICIPIO DE CARTAGENA



IDENTIFICACIÓN DE CUBIERTAS CON CONTENIDO DE AMIANTO MEDIANTE SISTEMAS ESPECTRALES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA EN EL MUNICIPIO DE CARTAGENA



## BIBLIOGRAFÍA

---

<sup>1</sup> Clic&Post. (s. f.). Historia del amianto. Clic&Post.

<https://clicandpost.com/construccion-y-reformas/historia-del-amianto/>

<sup>2</sup> Selikoff, I. J. (2005). Asbestos: Medical and legal aspects. Postgraduate Medical Journal, 81(963), 380–383. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1069377/>

<sup>3</sup> Imperial College London. (2018, 2 de febrero). The asbestos story: A tale of public health and politics. Imperial Medicine Blog.

<https://blogs.imperial.ac.uk/imperial-medicine/2018/02/02/the-asbestos-story-a-tale-of-public-health-and-politics/>

<sup>4</sup> Gestión del Amianto. (s. f.). Historia del amianto o asbestos. Gestión del Amianto.

<https://gestiondelamianto.com/historia-amianto-asbestos/>

<sup>5</sup> Ferrer, A. (2012). La historia del amianto en España: Salud laboral y conflicto social. Rebelión. <https://rebellion.org/docs/136931.pdf>

<sup>6</sup> Ministerio de Empleo y Seguridad Social. (2014). Guía de equipos de protección individual para trabajos con amianto.

<http://tusaludnoestaennomina.com/wp-content/uploads/2014/12/Gu%C3%ADa-de-equipos-de-protecci%C3%B3n-individual-para-trabajos-con-amianto.pdf>

<sup>7</sup> Álvarez López, P. (2023). Desarrollo metodológico para la identificación de cubiertas de fibrocemento por teledetección [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Alcalá]. e\_Buah. <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/61859>

<sup>8</sup> BOE. (1989, 10 de noviembre). Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre, sobre limitaciones a la comercialización y uso de preparados peligrosos. Boletín Oficial del Estado.

<https://www.boe.es/eli/es/rd/1989/11/10/1406>

<sup>9</sup> Ministerio de la Presidencia. (2001). Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo. Boletín Oficial del Estado, núm. 104, 1 de mayo de 2001. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2001/04/06/374/con>

<sup>10</sup> BOE. (2001, 7 de diciembre). Orden Ministerial sobre modificación del anexo I del Real Decreto 1406/1989, prohibición de amianto. Boletín Oficial del Estado.

[https://www.boe.es/eli/es/o/2001/12/07/\(1\)](https://www.boe.es/eli/es/o/2001/12/07/(1))

<sup>11</sup> Congreso de los Diputados. (2022). Ley 7/2022, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. Boletín Oficial del Estado.

<sup>12</sup> Ministerio de Sanidad. (2024). Directrices para la retirada del amianto instalado: Elaboración de un censo de instalaciones y emplazamientos con amianto y criterios de priorización para su retirada. Gestión de los residuos con amianto.

[https://www.sanidad.gob.es/areas/sanidadAmbiental/riesgosAmbientales/sueloHabitat/residuos/docs/DIRECTRICES\\_DA\\_Ley\\_Residuos\\_JUNIO\\_2024.pdf](https://www.sanidad.gob.es/areas/sanidadAmbiental/riesgosAmbientales/sueloHabitat/residuos/docs/DIRECTRICES_DA_Ley_Residuos_JUNIO_2024.pdf)

<sup>13</sup> Ministerio de Empleo y Seguridad Social. (2014). Guía de equipos de protección individual para trabajos con amianto.

<http://tusaludnoestaennomina.com/wp-content/uploads/2014/12/Gu%C3%ADa-de-equipos-de-protecci%C3%B3n-individual-para-trabajos-con-amianto.pdf>

<sup>14</sup> Centro de Observación y Teledetección Espacial, S.A.U. (COTESA). (2023). *Elaboración de cartografía de edificios con cubiertas de amianto en el municipio de Madrid* [Documentación técnica]. Ayuntamiento de Madrid.

[https://geoportal.madrid.es/fsdescargas/IDEAM\\_WBGEOPORTAL/SATELITE/AMIANTO/AMIANTO\\_2023/EsAytMadrid2023\\_Informe\\_DeteccionAmianto.pdf](https://geoportal.madrid.es/fsdescargas/IDEAM_WBGEOPORTAL/SATELITE/AMIANTO/AMIANTO_2023/EsAytMadrid2023_Informe_DeteccionAmianto.pdf)

<sup>15</sup> Álvarez López, P. (2023). Desarrollo metodológico para la identificación de cubiertas de fibrocemento por teledetección [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Alcalá]. Repositorio Institucional UAH.

2 [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/61859/TFM\\_Alvarez\\_Lopez\\_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/61859/TFM_Alvarez_Lopez_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

<sup>16</sup> SM GEODIM, SL. (2022, 1 de diciembre). Webinar de censo de amianto [Entrada de blog]. SM GEODIM.

<https://www.geodim.es/noticia.aspx?page=Webinar%20de%20Censo%20de%20Amianto>

<sup>17</sup> Saba, M., Castrillón-Ortíz, C., Valdelamar-Martínez, D., Coronado-Hernández, O. E., & Bustillo-LeCompte, C. (2025). Análisis de la clasificación de techos de fibrocemento en áreas urbanas: Métodos supervisados y no supervisados con teledetección multispectral e hiperespectral. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30, 101464.

<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101464>

<sup>18</sup> Hexagon Geospatial. *Documentation Portal*. FluidTopics.

[https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/r/uOKHREQkd\\_XR9iPo9Y\\_ljw/rLS~VS5WchBG3Qz4vZSJkg](https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/r/uOKHREQkd_XR9iPo9Y_ljw/rLS~VS5WchBG3Qz4vZSJkg)

<sup>19</sup> Sohn, Y., & Rebello, N. S. (2002). Supervised and unsupervised spectral angle classifiers. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(12), 1271–1280

[https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/2002journal/december/2002\\_dec\\_1271-1280.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/2002journal/december/2002_dec_1271-1280.pdf)

<sup>20</sup> Planet. (2023). PlanetScope Product Specifications. (p. 13). Technical Specification | Planet Documentation

<https://docs.planet.com/data/imagery/planetscope/techspec/>

<sup>21</sup> CNIG-IGN. Especificaciones de los Puntos de Interiores de la Base Topográfica Nacional (BTN-POI). [Plantilla Institucional](#)

<https://www.ign.es/resources/docs/IGNCnig/BTN/ESPBTN.pdf>

<sup>22</sup> Hexagon. (2023). ERDAS IMAGINE [Folleto]. Hexagon SIG.

[https://bynder.hexagon.com/m/36459101c9c7006f/original/Hexagon\\_SIG\\_ERDAS\\_IMAGINE\\_brochure\\_2023\\_ES.pdf](https://bynder.hexagon.com/m/36459101c9c7006f/original/Hexagon_SIG_ERDAS_IMAGINE_brochure_2023_ES.pdf)

<sup>23</sup> Orfeo ToolBox. (2024). Orfeo ToolBox (Versión 9.1). <https://www.orfeo-toolbox.org/>

<sup>24</sup> Esri. ArcGIS Pro: Software de SIG de escritorio líder en el mundo. Esri.

<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>

<sup>25</sup> Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. CNIG-IGN. Firmas espectrales - Plan Nacional de Teledetección - PNT

<https://pnt.ign.es/web/guest/firmas-espectrales>

<sup>26</sup> Unión Europea. (2023). Directiva (UE) 2023/2668 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de noviembre de 2023, por la que se modifica la Directiva 2009/148/CE sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al amianto durante el trabajo. Diario Oficial de la Unión Europea, L 2023/2668.

[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=OJ:L\\_202302668](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=OJ:L_202302668)

<sup>27</sup> World Health Organization. (2014, March). Elimination of asbestos-related diseases. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/329994>

<sup>28</sup> World Health Organization. (2024, 27 de septiembre). Asbestos.

<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/asbestos>

<sup>29</sup> Comité Económico y Social Europeo. (2015, 31 de julio). Dictamen del Comité Económico y Social Europeo sobre “Erradicar el amianto en la UE” (2015/C 251/03). Diario Oficial de la Unión Europea. Recuperado de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014IE5005>

<sup>30</sup> Ministerio de Sanidad. (junio 2024). Directrices para la retirada del amianto instalado. Elaboración de un censo de instalaciones y emplazamientos con amianto y criterios de priorización para su retirada. Gestión de los residuos con amianto. Dirección General de Salud Pública y Equidad en Salud.

[https://www.sanidad.gob.es/areas/sanidadAmbiental/riesgosAmbientales/sueloHabitat/residuos/docs/DIRECTRICES\\_DA\\_Ley\\_Residuos\\_JUNIO\\_2024.pdf](https://www.sanidad.gob.es/areas/sanidadAmbiental/riesgosAmbientales/sueloHabitat/residuos/docs/DIRECTRICES_DA_Ley_Residuos_JUNIO_2024.pdf)

<sup>31</sup> Conferencia Episcopal Boliviana. (2012). El universo, don de Dios para la vida: Carta pastoral sobre medio ambiente y desarrollo humano en Bolivia. En El universo, don de Dios para la vida (p. 17). CEB.

[https://www.centrodelapostoladocatico.org/uploads/9/2/4/6/9246931/2012.03.22\\_cpas\\_carta\\_pastoraleluniversodondediosparalavida.pdf](https://www.centrodelapostoladocatico.org/uploads/9/2/4/6/9246931/2012.03.22_cpas_carta_pastoraleluniversodondediosparalavida.pdf)

[https://www.vatican.va/content/francesco/es/encyclicals/documents/papa-francesco\\_20150524\\_enciclica-laudato-si.html](https://www.vatican.va/content/francesco/es/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html)

<sup>33</sup> Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación. (s. f.). La Agenda 2030, una brújula para los grandes retos del presente y futuro.

<https://www.exteriores.gob.es/RepresentacionesPermanentes/unesco/es/Comunicacion/Noticias/Paginas/Articulos/Agenda-2030-.aspx>

<sup>34</sup> Naciones Unidas. (s. f.). Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

<sup>35</sup>Vertex42. (2025). Simple Gantt chart.

[https://www.vertex42.com/ExcelTemplates/simple-gantt-chart.html?utm\\_source=ms&utm\\_medium=file&utm\\_campaign=office&utm\\_content=url](https://www.vertex42.com/ExcelTemplates/simple-gantt-chart.html?utm_source=ms&utm_medium=file&utm_campaign=office&utm_content=url)