



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN
TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA**

TITULACIÓN DE INGENIERO TÉCNICO EN TOPOGRAFÍA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DE SUELO DEL VALLE DE TAMANART
(MARRUECOS) A PARTIR DE IMÁGENES LANDSAT.**

Madrid, Octubre 2013

ALUMNOS:

SARA GÁLVEZ HERRILLO

JESÚS ROMERO PÉREZ

TUTOR:

MERCEDES FARJAS ABADÍA

AGRADECIMIENTOS

A nuestra tutora Mercedes, por sus consejos, entrega y dedicación, ya que siempre ha estado ahí cuando la hemos necesitado.

A todos aquellos profesores que de algún modo nos han orientado para la realización de este proyecto.

A nuestras familias, por su paciencia, apoyo y confianza a lo largo de nuestras vidas.

A todos nuestros compañeros y amigos de la Universidad, con los que hemos sufrido fatigas y compartido tan buenos momentos.

A nuestras parejas, por su apoyo y comprensión en los momentos más difíciles.

A todos: MUCHAS GRACIAS.

ÍNDICE

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
1. OBJETIVO	5
2. ZONA DE ESTUDIO	6
2.1. Situación y descripción de la zona de estudio	9
2.2. Geología de la zona de estudio	10
3. ANTECEDENTES	12
3.1. Características del material empleado	12
3.1.1. Escenas Landsat	13
3.1.2. ASTER DEM GLOBAL	17
3.1.3. Cartografía de la zona de estudio	20
3.1.4. Imagen aérea de la zona de los yacimientos	21
4. PRE-PROCESO DE DATOS	23
4.1. Pre-proceso de escenas	23
4.2. Corrección geométrica por modelo orbital	23
4.3. Pre-proceso del canal multispectral y pancromático	24
4.3.1. Metodología	24
5. FUSIÓN DEL CANAL PANCROMÁTICO Y MULTIESPECTRAL	28
5.1. Proceso operativo	29
5.1.1. Fusión Resolution Merge	29
5.1.2. Fusión Wavelet Resolution Merge	30
5.2. Resultados	31
5.2.1. Resultados Landsat 7	31
5.2.2. Resultados Landsat 5	32
5.3. Comparativa de resultados	33
6. RECORTE DE LAS IMÁGENES	36
6.1. Proceso operativo	36
6.2. Resultados	37
7. ANÁLISIS EXPLORATORIO	38
7.1. Fotointerpretación de combinaciones de bandas	38
7.2. Definición de posibles clases existentes	43
7.3. Análisis de las curvas del valor digital de la imagen fusionada	44



8. CLASIFICACIÓN	45
8.1. Clasificación supervisada	45
8.1.1. Fase de entrenamiento	45
8.1.1.1. Análisis de las estadísticas de las clases espectrales	47
8.1.2. Fase de asignación. Proceso operativo	48
8.1.3. Comprobación y análisis de resultados	51
8.1.4. Conclusiones	51
8.2. Clasificación manual	52
9. EDICIÓN CARTOGRÁFICA TEMÁTICA	55
9.1. Proceso operativo	55
9.2. Resultados	57
10. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL	58
11. YACIMIENTOS	62
11.1. Yacimientos de la zona de estudio	62
11.2. Datos de campo	66
11.3. Localización de los yacimientos	69
12. ANEXOS	72
12.1. ANEXO I: Fundamentos de Teledetección	72
12.2. ANEXO II: Fundamentos de la fusión	95
13. PRESUPUESTO	98
14. CONCLUSIONES	101
15. BIBLIOGRAFÍA	102
16. RESULTADOS	103

1. OBJETIVO

1. OBJETIVO:

El objetivo del presente Proyecto Fin de Carrera es la elaboración de cartografía base de la zona del Valle de Tamanart y la elaboración de un documento cartográfico que muestre la distribución de minerales en ella. Se pretende poder facilitar el reconocimiento del área arqueológica de estudio desde la perspectiva del análisis físico para correlacionar el material de superficie con la aparición de petroglifos o restos arqueológicos.

En la investigación arqueológica de países emergentes es difícil contar con cartografía previa de la zona de interés en la realización de las campañas de campo. Se pretende plantear una metodología general de creación de cartografía básica y cartografía temática de distribución de minerales en superficie mediante técnicas de teledetección utilizando imágenes de satélite que sean gratuitas a través de la red.

El proyecto consta de dos partes:

1. Confección de la cartografía base:

- Primero: se realiza una breve descripción documentada de los aspectos físicos globales (geomorfológicos, geológicos, hidrológicos...) del área de estudio, a través de los documentos que puedan existir en Internet con acceso libre y con la información aportada por el grupo de investigación.
- Segundo: Para poder obtener la base cartográfica se realiza el tratamiento de datos de las escenas de los satélites. Las escenas gratuitas disponibles han sido dos imágenes de la misma zona, una del satélite Landsat7 y otra del satélite Landsat5, descargadas del servidor GLOVIS (*USGS Global Visualization Viewer*).

Confección de la cartografía temática:

- Selección de la zona de estudio en las imágenes de teledetección ya tratadas en la primera parte del proyecto.
- Clasificación de la imagen para usos de suelo.
- Edición de la cartografía temática.

El resultado del proyecto son la cartografía base y de coberturas superficiales de distribución de minerales sobre la que se ubican los yacimientos arqueológicos de la zona, yacimientos y paneles que fueron georreferenciados en la campaña de campo 2013.

El PFC se realiza en colaboración con el Departamento de Prehistoria de la UNED, responsables de la investigación arqueológica en la zona de estudio.

2. ZONA DE ESTUDIO

2.- ZONA DE ESTUDIO

LOCALIZACIÓN:

Marruecos, oficialmente denominado Reino de Marruecos, también conocido como Imperio Jerifiano o Reino Alauí, es un país situado en el noroeste del continente africano.

Se encuentra separado de Europa por el estrecho de Gibraltar. Limita al norte con el mar Mediterráneo, al sur con el Sáhara Occidental y Mauritania, al este con Argelia y al oeste con el Océano Atlántico. Tiene frontera física con Mauritania, Argelia y España. Tiene una superficie de 446.550 km² y una población aproximada de 32 millones de personas. Su capital es Rabat.



Fig.2.1. Localización Marruecos.

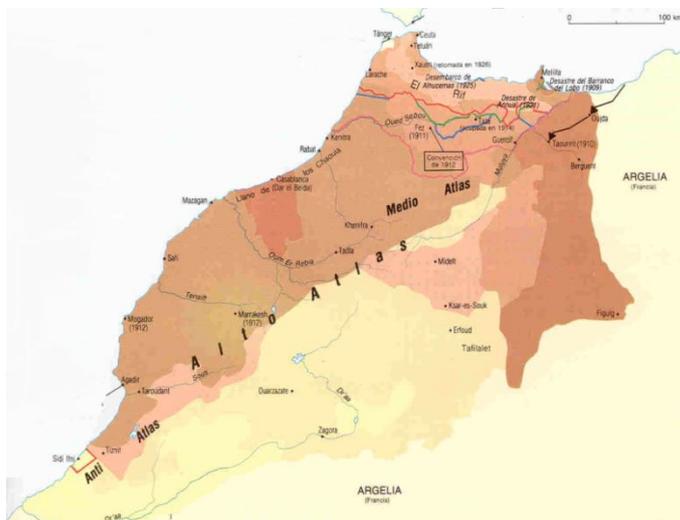


Fig.2.2. Localización Anti-Atlas.

TERRITORIO:

Marruecos tiene las llanuras más extensas y las montañas más altas de África del Norte. El país tiene cuatro regiones fisiográficas; **Rif:** paralela a la costa mediterránea. Corresponde a una cadena montañosa reciente, formada durante el Terciario (Cenozoico). Forma parte de las cadenas alpinas resultantes de la colisión entre África y Eurasia. Está constituida fundamentalmente por rocas mesozoicas y cenozoicas

plegadas. **La cordillera del Atlas:** que atraviesa el país de suroeste a noreste entre el océano Atlántico y el Rif, del que la separa la depresión de Taza. Comprende tanto el Alto con el medio Atlas. Forma parte de la Cadena Atlántica formada durante el Terciario y es una cadena intracontinental. Geológicamente destaca la presencia de rocas mesozoicas y cenozoicas falladas y plegadas. **La Meseta:** es una región caracterizada por llanuras, plataformas y colinas. En esta región afloran rocas paleozoicas deformadas, sobre los que se disponen discordantemente, depósitos mesozoicos y cenozoicos débilmente plegados. **El dominio surmarroquí, constituido por el Anti-Atlas y el Sahara:** se caracteriza por un zócalo precámbrico (Arcaico y Proterozoico) deformado durante ciclos orogénicos antiguos (Orogenia Panafricana), que aparece recubierto por sedimentos paleozoicos escasamente deformados.

La mayoría de los marroquíes habitan en la llanura costera. Marruecos tiene muchos ríos que, aunque no son importantes para la navegación, se utilizan para regadíos y para generar energía eléctrica; los principales son el Muluya, que vierte sus aguas al mar Mediterráneo, y el Sebu, que fluye hacia el océano Atlántico.

CLIMA Y MEDIO AMBIENTE:

A lo largo de la costa mediterránea, Marruecos goza de un clima subtropical suavizado por las influencias oceánicas, que proporcionan a las ciudades costeras temperaturas moderadas. Hacia el interior, los inviernos son más fríos y los veranos más calurosos. En las zonas elevadas no son raras las temperaturas inferiores a -17 °C y la nieve cubre los picos de las montañas durante la mayor parte del año. Las precipitaciones en forma de lluvia se producen principalmente durante los meses de invierno, siendo abundantes en el noroeste y ligeras en el este y sur.

RECURSOS NATURALES:

La agricultura es el principal recurso económico de Marruecos, pero también son significativos sus recursos minerales; entre estos últimos destacan los fosfatos aunque también destacan otros minerales como el carbón, el cobalto, el hierro, el plomo, el manganeso, el petróleo, la plata, el estaño y el cinc. Marruecos es un importante productor de fosfatos.

FLORA Y FAUNA:

En las regiones montañosas de Marruecos encontramos grandes áreas forestales, que forman bosques de alcornoques, encinas, enebros, cedros, abetos y pinos. Excepto en las áreas cultivadas, el monte bajo de matorral y las praderas cubren normalmente las llanuras.

SUELO:

Los suelos de la costa de Marruecos son halomórficos y húmico-carbonatados; las áreas interiores tienen podzoles y suelos de estepa. La zona meridional del país es principalmente desierto.

AGRICULTURA:

Los principales cultivos de Marruecos son: los cereales, cebada, trigo, patatas, uvas, caña de azúcar y remolacha azucarera. También se cultivan otras frutas y verduras.

El corcho es el principal producto forestal del país; mucha madera se utiliza como combustible. Los principales centros pesqueros son Agadir, Safi, Essaouira y Casablanca.

DIVISIONES ADMINISTRATIVAS:

Marruecos se divide administrativamente en 35 provincias y 2 prefecturas urbanas; otras 4 provincias comprenden el disputado territorio del Sahara Occidental. Desde Abril de 1997 el territorio ha sido compartimentado, además, en 16 regiones, 13 en Marruecos, 2 en el Sahara Occidental y 1 entre ambos (Guelmin-Es-Smara).

Esas regiones son:

1. Chaouia-Ouardigha.
2. Doukkala-Abda.
3. Fes-Boulemane.
4. Gharb-Chrarda-Beni Hssen.
5. Grand Casablanca.
6. Guelmim-Es Smara.
7. Laayoune-Boujdour-Sakia El Hamra.
8. Marrakech-Tensift-Hauz.
9. Meknés-Tafilalet.
10. Oriental.
11. Oued Ed-Dahab-Lagouira.
12. Rabat-Salé-Zemmour-Zaer.
13. Souss-Massa-Draa.
14. Tadla-Azilal.
15. Tanger-Tétouan.
16. Taza-Alhoceima-Taounate.

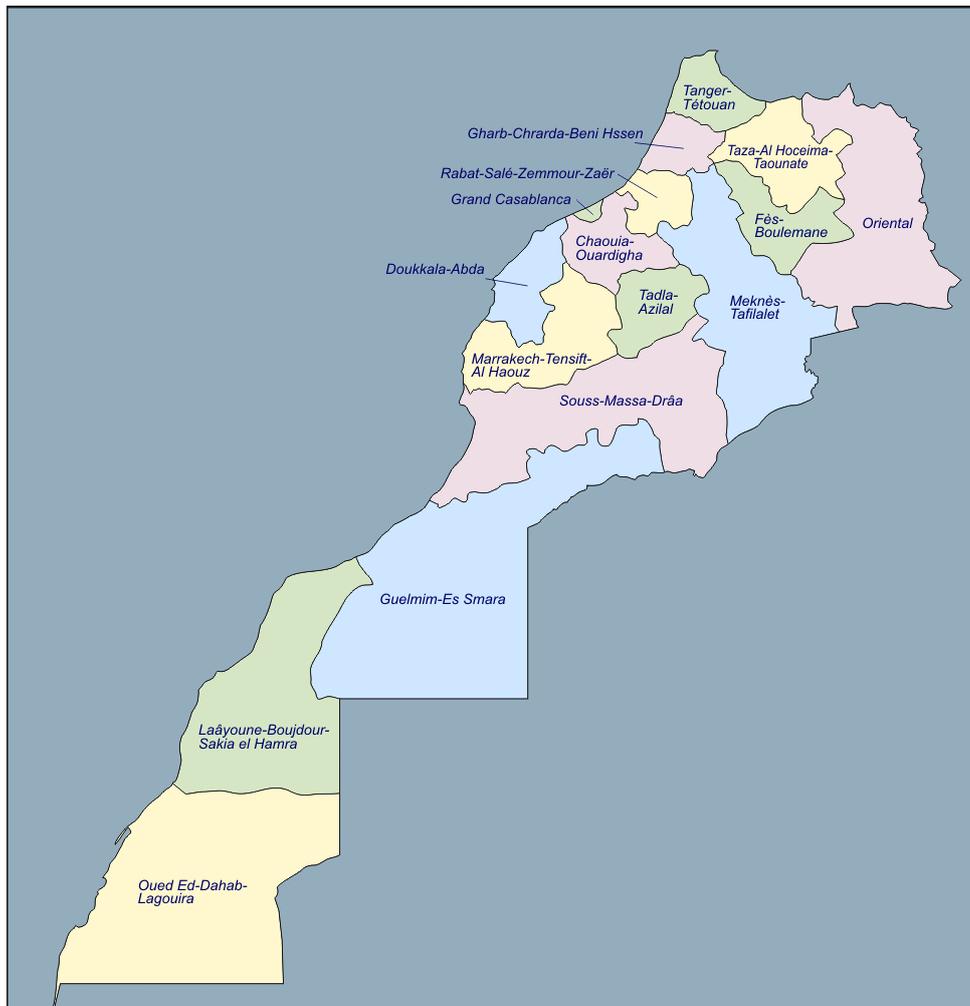


Fig.2.3.Regiones de Marruecos.

2.1. SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

En la región administrativa de Guelmin-Es Smara, se encuentran los términos municipales de Talrhaïcht, Foum El Hassane, Assa y Taghjijt, municipios donde se sitúa el valle de Tamanart y los yacimientos arqueológicos objeto de nuestro estudio.



Fig.2.4. Localización de la región de Guelmin-Es-Smara



Fig.2.5. Valle de Tamanrt.

En el Valle de Tamanart podemos encontrar palmerales entre cañones de paredes verticales que se elevan varios centenares de metros; anchas ramblas pedregosas, graneros de piedra colgados sobre los peñascos; manantiales que surgen entre los roquedos escondidos; las pinturas y los grabados rupestres nos hablan de una tierra de cazadores seculares y de otros tiempos y otros ecosistemas bien distintos a los actuales; pueblos encaramados a las laderas...

El valle del Tamanart atesora una de las mayores concentraciones de pinturas y grabados rupestres de todo Marruecos. Tanto al sur como al norte de Foum El Hassane, existen diversos focos de arte prehistórico, que tanto por calidad como por cantidad justifican la importancia de estos yacimientos.



Fig.2.6. Ejemplo de yacimiento de la zona.

Los grabados muestran magníficas representaciones de diversos animales, predominando los animales típicos de la sabana como bóvidos, antílopes, elefantes....



Fig.2.7. Surgencia del río Tamanart.

Nada más adentrarnos en el valle, en todo momento delimitado por paredes rocosas que lo estrechan y ensanchan, las aldeas y las franjas de palmerales y huertos se suceden, siempre a orillas del río, de caudal intermitente y ocasional, pero que de vez en cuando sorprende con alguna surgencia que acumula el agua en alguna poza.

Los pueblos combinan el núcleo tradicional de casas de adobe o piedra con las nuevas construcciones. Las montañas que lo rodean son montañas viejas y pedregosas, de cumbres suaves y redondeadas, pero surcadas de múltiples cicatrices en forma de cañones y desfiladeros que muestran sus estratos desnudos y atormentados por la erosión. Estos estratos muchas veces son aprovechados para ubicar graneros y antiguos pueblos fortificados, hoy en día en desuso y prácticamente destruidos, y de los que únicamente persisten algunos morabitos.

Todo el fondo del valle está salpicado de arbustos y árboles aislados, pudiendo encontrar algún que otro argán.

2.2. GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Marruecos es un país de gran interés desde el punto de vista geológico, puesto que como consecuencia de su clima mediterráneo a subsahariano ofrece amplios paisajes en los que aparecen espléndidos afloramientos para el estudio de su geología. Además, Marruecos está situado en una unión triple entre el continente (África), el océano (Atlántico) y una zona activa de colisión de placas (el sistema de plegamiento Alpino). Como consecuencia de estas peculiaridades por una parte afloran rocas cuyas edades varían entre el Arcaico y el Cenozoico y por otra, aparecen sistemas tectónicos muy variados, desde cuencas sedimentarias a cinturones metamórficos plegados.

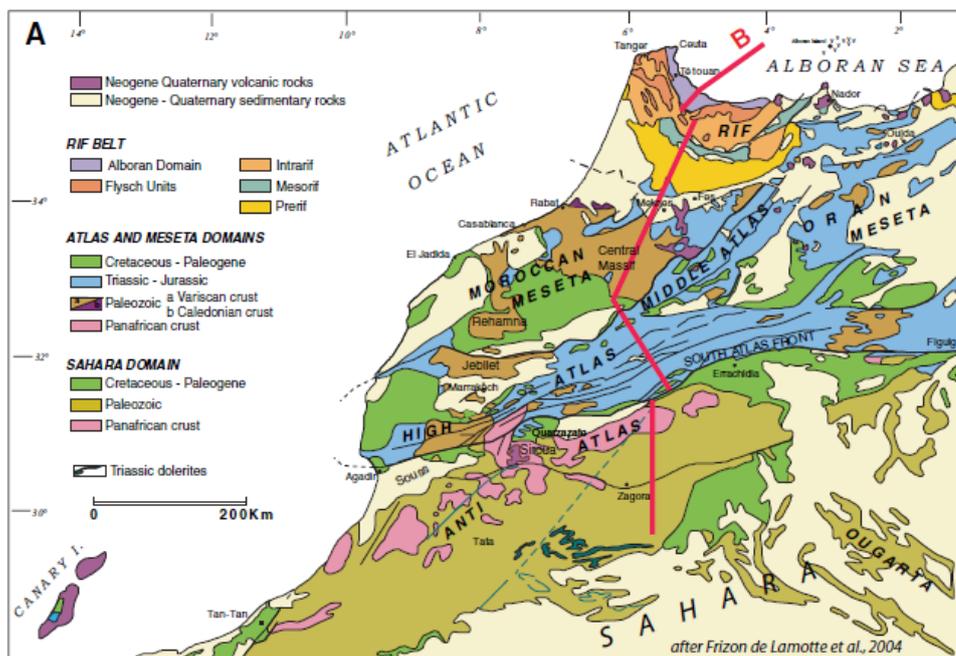


Fig.2.8.Principales dominios geológicos diferenciados en Marruecos.

Geológicamente, la zona de estudio del presente Proyecto Fin de Carrera se encuentra dentro del dominio del Anti-Atlas y el Sahara, caracterizado en su conjunto por un basamento constituido por una compleja asociación de rocas cristalinas, metamórficas y sedimentarias, a las que se superpone una cobertura sedimentaria, mayoritariamente depositada en un ambiente marino poco profundo, de naturaleza mixta silíceo y carbonatada y con una edad que abarca desde el Cámbrico hasta el Carbonífero.



La litología dominante en la sucesión sedimentaria son las areniscas. Estas areniscas son de grano fino a muy fino, color pardo, violáceo o verdoso, compactas y bastante masivas en general aunque localmente presentan estratificación cruzada y pasadas enriquecidas en fósiles. El espesor de los estratos varía de decimétrico a métrico. Estos estratos de areniscas suelen presentar diaclasado ortogonal a distintas escalas

Otras características destacables son la fractura concoidea, la erosión alveolar que muestran las areniscas menos compactas y la ferruginización que presentan con frecuencia los techos de los estratos, que afecta a espesores de roca desde decimétricos a centimétricos.

Las pizarras afloran en mucho menor porcentaje que las areniscas y se caracterizan por presentar un marcado bandeado, tener espesores en general decimétricos, mostrar una mayor fracturación y, sobre todo, porque dan mucho menos resalte topográfico que las areniscas.

Por último, las calizas aparecen en parches irregulares que tienen un carácter erosivo sobre las areniscas. En afloramiento se las reconoce con facilidad por su textura más rugosa y abundancia de bioclastos, en especial braquiópodos, bivalvos, equinodermos y trilobites. Con frecuencia estos restos fósiles aparecen ferruginizados.

3. ANTECEDENTES

3. ANTECEDENTES:

La materia específica elegida para la elaboración del presente Proyecto Fin de Carrera y para llevar a cabo los objetivos indicados ha sido la Teledetección.

La teledetección es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos terrestres y planetarios. Como su nombre indica, esta ciencia supone la adquisición de información a distancia, sin contacto directo con el objeto estudiado.

Podemos distinguir dos fases en el proceso general del procesamiento de datos en Teledetección: la captura de datos del sensor y su análisis o interpretación.

La fase de captura se origina con el flujo energético emitido a partir de una fuente, flujo que recorre la atmósfera interactuando con ella, llegando a la superficie terrestre donde sufre entre otros procesos una reflexión que hará que este flujo sea recogido por el sensor, codificado, grabado y enviado al sistema de recepción.

En la segunda fase con los datos digitales proporcionados por el sensor, se realiza una interpretación visual de los datos, y se realiza un tratamiento digital de los mismos. Estos procedimientos se describirán en los capítulos de este PFC, los fundamentos teóricos de la realización del proyecto se citan en el Anexo I: Fundamentos.

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL EMPLEADO.

Para la realización del presente Proyecto Fin de Carrera, se han empleado como datos de partida, la siguiente documentación:

- Escena Landsat 7 capturada mediante el sensor Enhanced Thematic Mapper + .
(LE72020402003026EDC00)
- Escena Landsat5 capturada mediante el sensor Thematic Mapper.
(LT52020402010021MPS00)
- Una modelo ASTER DEM GLOBAL.
- Cartografía a escala 1/1.000.000 con la localización del Valle de Tamanart.
- 4 mapas digitales que cubren la zona de estudio a escala 1/100.000:
 - ASSA
 - FOUM-EL-HASSANE
 - TAGHJIJ
 - TALRHAICHT

3.1.1 ESCENAS LANDSAT.

Las escenas, tanto del satélite Landsat 7 como del satélite Landsat 5, han sido descargadas gratuitamente del servidor USGS del portal Glovis. El pre-proceso de las escenas ha sido realizado por el Instituto Geológico Minero de los EEUU (USGS), que forma parte del Departamento del Interior de los EEUU.

A continuación se presentan las características generales que definen cada una de las escenas, así como una imagen general del material de trabajo:

Listado de Imágenes de Landsat:

- **Landsat7:**



Fig.3.1. Escenas del satélite Landsat7.

- Escena: LE72020402003026EDC00 CC: 0% Date: 26/1/2003
- L7 SLC-on (1999.2003) Quality: 9 Producto: ETM+ L1T
- Número de bandas: seis bandas correspondientes al espectro visible y al infrarrojo cercano (1, 2, 3, 4, 5 y 7), una banda correspondiente al infrarrojo termal (6) y una correspondiente al pancromático (8).
- Formato de archivo: geoTIFF
- Nivel de corrección: Nivel 4
- Proyección: UTM 29
- Tamaño: 637 MB

- **Landsat5:**

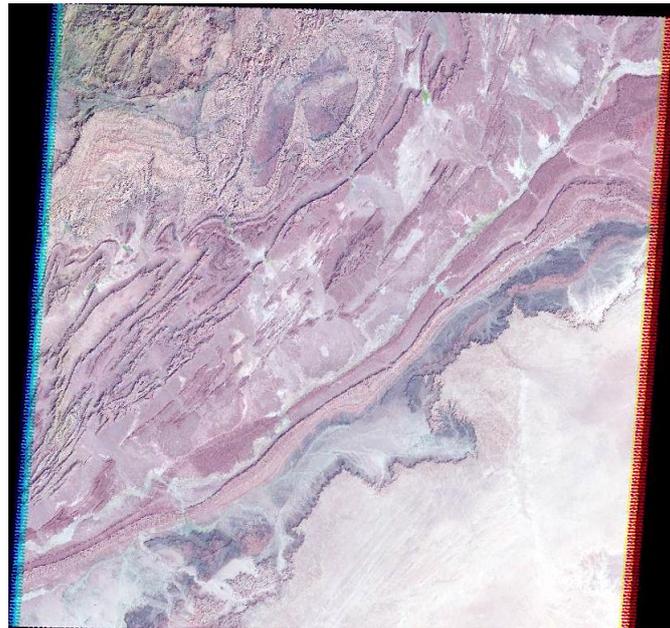


Fig.3.2. Escenas del satélite Landsat5.

- Escena: LT52020402010021MPS00 CC: 0% Date: 21/1/2010
- TL GLS2010 (2008.2011) Quality: 9 Producto: TM L1T
- Número de bandas: Tres bandas del espectro visible (1, 2 y 3), una del infrarrojo cercano (4), dos del infrarrojo medio (5 y 7) y una del infrarrojo térmico (6).
- Formato de archivo: geoTIFF
- Nivel de corrección: Nivel 4
- Proyección: UTM 29
- Tamaño: 440 MB

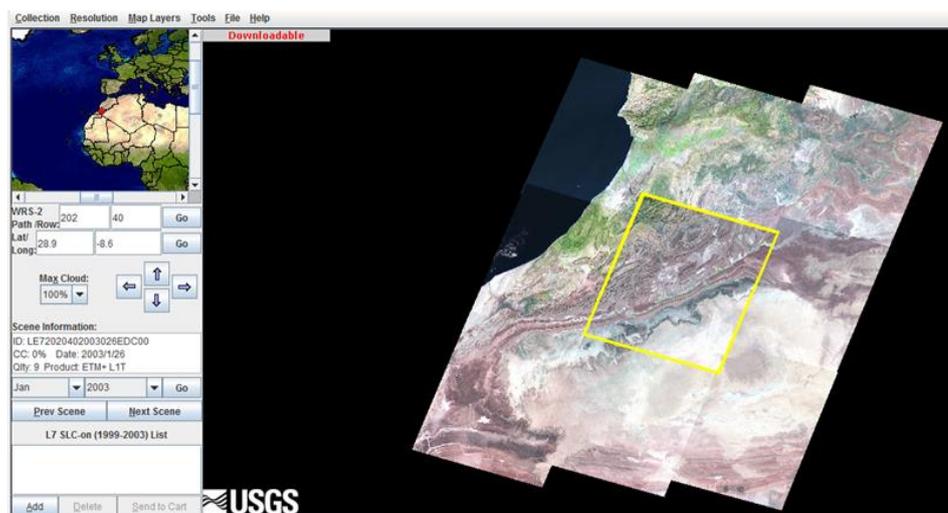


Fig.3.3. Escena seleccionada del satélite Landsat 7, descargada gratuitamente de USGS.

Las escenas se incluyen en el Proyecto Fin de Carrera en soporte digital. Además de contener los ficheros correspondientes a las ocho bandas que registra el sensor ETM+ y las siete bandas del sensor TM, se incluyen metadatos de los parámetros orbitales de los satélites y de los parámetros de calibración. También contiene información del trabajo de pre-proceso realizado, así como del resultado de éste.

Contenido del Anexo digital con las escenas originales utilizadas en este Proyecto Fin de Carrera:

- **Landsat 7:**

- Un fichero de información general del producto que contiene cada escena.

 - README.TXT

- Un fichero con el informe del resultado del pre-proceso sistemático realizado por el Instituto Geológico de los EEUU (USGS).

 - LE72020402003026EDC00_GCP

- Un fichero con metadatos de los parámetros orbitales del satélite en el momento de la toma:

 - LE72020402003026EDC00_MTL

- Nueve ficheros correspondientes a cada banda del sensor.

 - LE72020402003026EDC00_B1:

 - Fichero correspondiente a la banda multiespectral ETM+ ¹.
 - Resolución espectral de 0.45 a 0.52 μm .

 - LE72020402003026EDC00_B2:

 - Fichero correspondiente a la banda multiespectral ETM+ ².
 - Resolución espectral de 0.53 a 0.61 μm .

 - LE72020402003026EDC00_B3:

 - Fichero correspondiente a la banda multiespectral ETM+ ³.
 - Resolución espectral de 0.63 a 0.69 μm .

 - LE72020402003026EDC00_B4:

 - Fichero correspondiente a la banda multiespectral ETM+ ⁴.
 - Resolución espectral de 0.78 a 0.90 μm .

 - LE72020402003026EDC00_B5:

 - Fichero correspondiente a la banda multiespectral ETM+ ⁵.
 - Resolución espectral de 1.55 a 1.75 μm .

 - LE72020402003026EDC00_B7:

 - Fichero correspondiente a la banda multiespectral ETM+ ⁷.
 - Resolución espectral de 2.08 a 2.35 μm .

 - LE72020402003026EDC00_B6_VCID_1:

 - Fichero correspondiente a la banda térmica ETM+ ^{6L}.
 - Resolución espectral de 10.4 a 12.5 μm .

 - LE72020402003026EDC00_B6_VCID_2:

 - Fichero correspondiente a la banda térmica a otra ganancia ETM+ ^{6H}.
 - Resolución espectral de 10.4 a 12.5 μm .

 - LE72020402003026EDC00_B8:

 - Fichero correspondiente a la banda pancromática ETM+⁸.
 - Resolución espectral de 0.52 a 0.90 μm .

- **Landsat 5:**

- Un fichero de información general del producto que contiene cada escena.

- README.TXT

- Un fichero con el informe del resultado del pre-proceso sistemático realizado por el Instituto Geológico de los EEUU (USGS).

- L5202040_04020100121_GCP

- Un fichero con metadatos de los parámetros orbitales del satélite en el momento de la toma:

- L5202040_04020100121_MTL

- Nueve ficheros correspondientes a cada banda del sensor.

- L5202040_04020100121_B10:

- Fichero correspondiente a la banda multiespectral TM₁.
Resolución espectral de 0.45 a 0.52 μm .

- L5202040_04020100121_B20:

- Fichero correspondiente a la banda multiespectral TM₂.
Resolución espectral de 0.53 a 0.61 μm .

- L5202040_04020100121_B30:

- Fichero correspondiente a la banda multiespectral TM₃.
Resolución espectral de 0.63 a 0.69 μm .

- L5202040_04020100121_B40:

- Fichero correspondiente a la banda multiespectral TM₄.
Resolución espectral de 0.78 a 0.90 μm .

- L5202040_04020100121_B50:

- Fichero correspondiente a la banda multiespectral TM₅.
Resolución espectral de 1.55 a 1.75 μm .

- L5202040_04020100121_B70:

- Fichero correspondiente a la banda multiespectral TM₇.
Resolución espectral de 2.08 a 2.35 μm .

- L5202040_04020100121_B60:

- Fichero de la banda térmica TM₆.
Resolución espectral de 10.4 a 12.5 μm .

3.1.2. ASTER DEM GLOBAL.

Es el resultado de un proyecto internacional conjunto entre el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la Administración Nacional de Aeronáutica del Espacio (NASA). Utiliza un sensor de Observación de la Tierra desarrollado en Japón a bordo del satélite "Terra". El lanzamiento se realizó en diciembre de 1999.

ASTER: *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.*

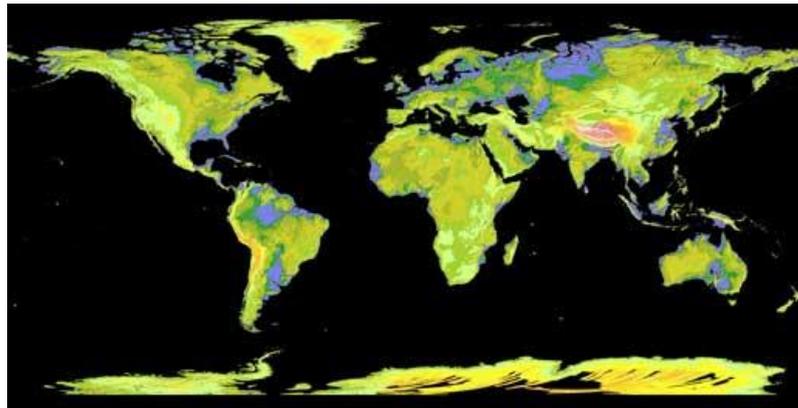


Fig.3.4. ASTER pigmentada de la Tierra.

ASTER nos proporciona:

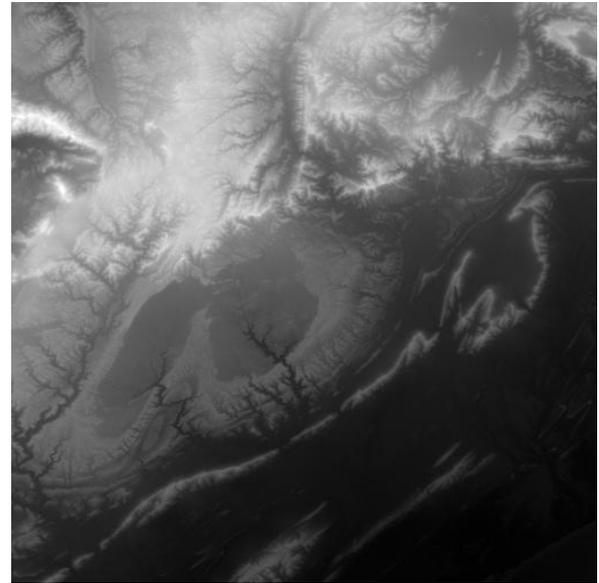
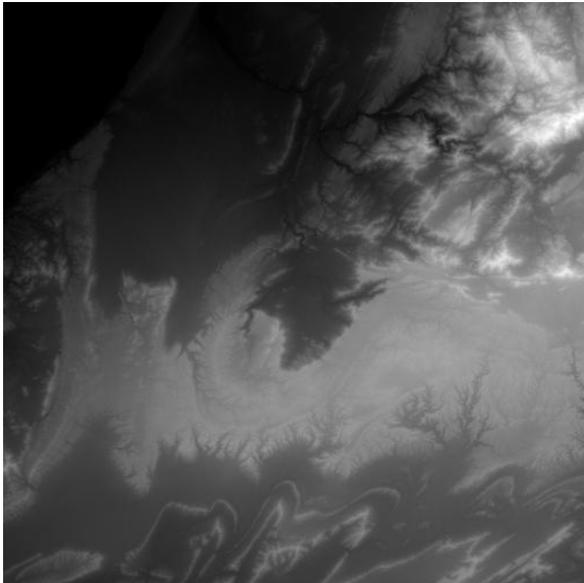
Condición de la superficie: El sensor captura un rango de longitudes de onda que comprende desde el espectro visible hasta la banda térmica infrarroja (esta última invisible al ojo humano), y ofrece información detallada sobre las condiciones de la superficie de la Tierra (por ejemplo, la vegetación, características geológicas), junto con su distribución.

DEM: El Modelo Digital de Elevaciones (DEM) es generado desde un par de estéreo-imágenes de la misma área. ASTER GDEM se desarrollará sobre la base de estos datos.

Las altitudes proporcionadas por el GDEM de ASTER son ortométricas y están calculadas con base al "Earth Gravity Model 1996" (EGM96): Modelo Geopotencial Terrestre de 1996.

Los DEM RASTER contienen suficiente información para extraer diversas características del terreno como las cuencas y las áreas de drenaje.

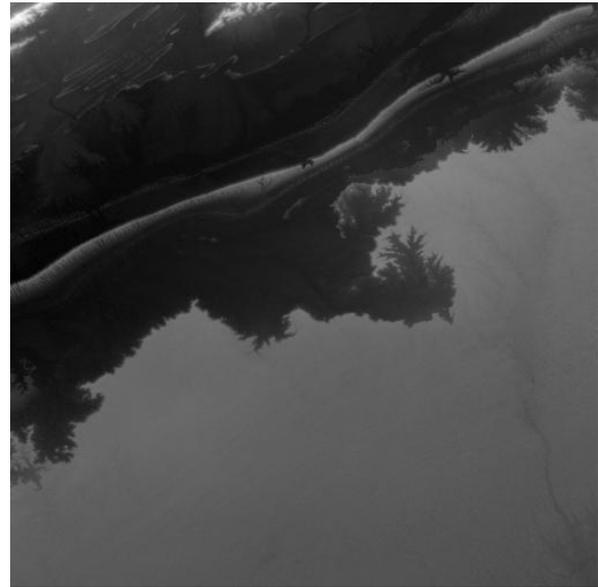
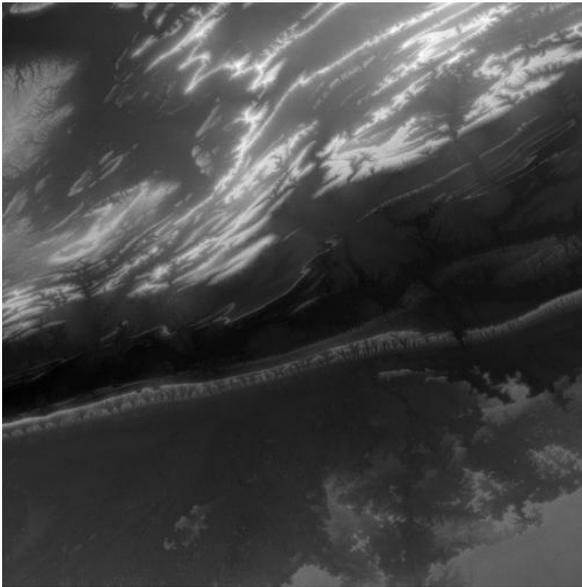
Dentro de la zona de estudio, se pueden encontrar 4 ficheros con información *ASTER DEM GLOBAL*. Los ficheros descargados y sus características son:



Data conjunto de atributos	Valor del atributo
<u>ID Entidad</u>	ASTGDEM2_0N29W010
<u>Agencia</u>	NASA / METI
<u>Fecha de adquisición</u>	2011/10/17
<u>Vendedor</u>	NASA / METI
<u>Mapa Proyección</u>	GEOGRÁFICA
<u>Sensor</u>	ASTER
<u>Resolución</u>	1 segundo de arco
<u>Tamaño del archivo</u>	16622099
<u>Tipo de sensor</u>	GDEM
<u>Elipsoide</u>	WGS84
<u>Unidades</u>	GRADOS
<u>Versión</u>	2.0
<u>Formato del producto</u>	GEOTIFF
<u>Compruebe Valor Sum</u>	186287624
<u>Licencia ID</u>	17
<u>Licencia Levantamiento actualización</u>	
<u>Fecha de ingreso</u>	16-NOV-11
<u>Fecha de actualización</u>	01-FEB-12
<u>Centro Latitud</u>	29 ° 30'00 .00 "N
<u>Centro de Longitud</u>	9 ° 30'00 .00 "W
<u>NW Corner Lat</u>	30 ° 00'00 .50 "N
<u>NW Corner largo</u>	10 ° 00'00 .50 "W
<u>NE Corner Lat</u>	30 ° 00'00 .50 "N
<u>NE Corner largo</u>	8 ° 59'59 .50 "W
<u>SE Corner Lat</u>	28 ° 59'59 .50 "N
<u>SE Corner largo</u>	8 ° 59'59 .50 "W
<u>SW Corner Lat</u>	28 ° 59'59 .50 "N
<u>SW Corner largo</u>	10 ° 00'00 .50 "W

Data conjunto de atributos	Valor del atributo
<u>ID Entidad</u>	ASTGDEM2_0N29W009
<u>Agencia</u>	NASA / METI
<u>Fecha de adquisición</u>	2011/10/17
<u>Vendedor</u>	NASA / METI
<u>Mapa Proyección</u>	GEOGRÁFICA
<u>Sensor</u>	ASTER
<u>Resolución</u>	1 segundo de arco
<u>Tamaño del archivo</u>	18297025
<u>Tipo de sensor</u>	GDEM
<u>Elipsoide</u>	WGS84
<u>Unidades</u>	GRADOS
<u>Versión</u>	2.0
<u>Formato del producto</u>	GEOTIFF
<u>Compruebe Valor Sum</u>	309794815
<u>Licencia ID</u>	17
<u>Licencia Levantamiento actualización</u>	
<u>Fecha de ingreso</u>	16-NOV-11
<u>Fecha de actualización</u>	01-FEB-12
<u>Centro Latitud</u>	29 ° 30'00 .00 "N
<u>Centro de Longitud</u>	8 ° 30'00 .00 "W
<u>NW Corner Lat</u>	30 ° 00'00 .50 "N
<u>NW Corner largo</u>	9 ° 00'00 .50 "W
<u>NE Corner Lat</u>	30 ° 00'00 .50 "N
<u>NE Corner largo</u>	7 ° 59'59 .50 "W
<u>SE Corner Lat</u>	28 ° 59'59 .50 "N
<u>SE Corner largo</u>	7 ° 59'59 .50 "W
<u>SW Corner Lat</u>	28 ° 59'59 .50 "N
<u>SW Corner largo</u>	9 ° 00'00 .50 "W

Fig.3.5. Información GDEM de ASTER. Metadatos.



Data conjunto de atributos	Valor del atributo
<u>ID Entidad</u>	ASTGDEM2_0N28W010
<u>Agencia</u>	NASA / METI
<u>Fecha de adquisición</u>	2011/10/17
<u>Vendedor</u>	NASA / METI
<u>Mapa Proyección</u>	GEOGRÁFICA
<u>Sensor</u>	ASTER
<u>Resolución</u>	1 segundo de arco
<u>Tamaño del archivo</u>	16071216
<u>Tipo de sensor</u>	GDEM
<u>Elipsoide</u>	WGS84
<u>Unidades</u>	GRADOS
<u>Versión</u>	2.0
<u>Formato del producto</u>	GEOTIFF
<u>Compruebe Valor Sum</u>	557886298
<u>Licencia ID</u>	17
<u>Licencia Levantamiento actualización</u>	
<u>Fecha de ingreso</u>	16-NOV-11
<u>Fecha de actualización</u>	01-FEB-12
<u>Centro Latitud</u>	28 ° 30'00 .00 °N
<u>Centro de Longitud</u>	9 ° 30'00 .00 °W
<u>NW Corner Lat</u>	29 ° 00'00 .50 °N
<u>NW Corner largo</u>	10 ° 00'00 .50 °W
<u>NE Corner Lat</u>	29 ° 00'00 .50 °N
<u>NE Corner largo</u>	8 ° 59'59 .50 °W
<u>SE Corner Lat</u>	27 ° 59'59 .50 °N
<u>SE Corner largo</u>	8 ° 59'59 .50 °W
<u>SW Corner Lat</u>	27 ° 59'59 .50 °N
<u>SW Corner largo</u>	10 ° 00'00 .50 °W

Data conjunto de atributos	Valor del atributo
<u>ID Entidad</u>	ASTGDEM2_0N28W009
<u>Agencia</u>	NASA / METI
<u>Fecha de adquisición</u>	2011/10/17
<u>Vendedor</u>	NASA / METI
<u>Mapa Proyección</u>	GEOGRÁFICA
<u>Sensor</u>	ASTER
<u>Resolución</u>	1 segundo de arco
<u>Tamaño del archivo</u>	14159788
<u>Tipo de sensor</u>	GDEM
<u>Elipsoide</u>	WGS84
<u>Unidades</u>	GRADOS
<u>Versión</u>	2.0
<u>Formato del producto</u>	GEOTIFF
<u>Compruebe Valor Sum</u>	3827930466
<u>Licencia ID</u>	17
<u>Licencia Levantamiento actualización</u>	
<u>Fecha de ingreso</u>	16-NOV-11
<u>Fecha de actualización</u>	01-FEB-12
<u>Centro Latitud</u>	28 ° 30'00 .00 °N
<u>Centro de Longitud</u>	8 ° 30'00 .00 °W
<u>NW Corner Lat</u>	29 ° 00'00 .50 °N
<u>NW Corner largo</u>	9 ° 00'00 .50 °W
<u>NE Corner Lat</u>	29 ° 00'00 .50 °N
<u>NE Corner largo</u>	7 ° 59'59 .50 °W
<u>SE Corner Lat</u>	27 ° 59'59 .50 °N
<u>SE Corner largo</u>	7 ° 59'59 .50 °W
<u>SW Corner Lat</u>	27 ° 59'59 .50 °N
<u>SW Corner largo</u>	9 ° 00'00 .50 °W

Fig.3.6. Información GDEM de ASTER. Metadatos.

3.1.3. CARTOGRAFÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Para una mayor definición del valle de Tamanart, se dispone de un mapa con la localización aproximada, mapa que ha sido escaneado y proporcionado en formato jpg; así como de los cuatro mapas a escala 1/100.000 donde se encuentra dicho valle, que también han sido escaneados y proporcionados en formato jpg; además se ha incluido una impresión de pantalla donde se ha localizado la zona de estudio en Google Earth:

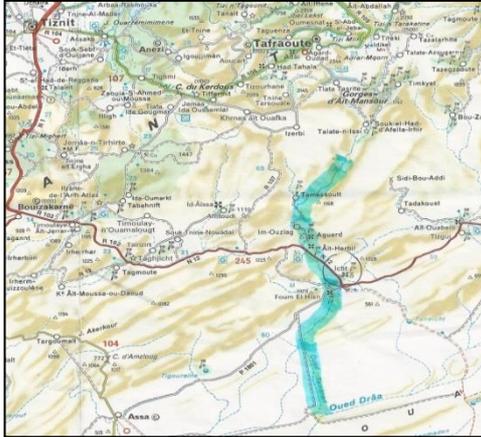


Fig.3.6. Localización del Valle Tamanart.



Fig.3.7. Localización zona de estudio en Google Earth.

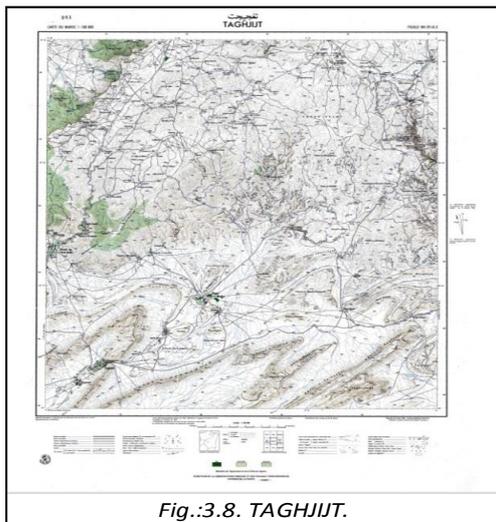


Fig.:3.8. TAGHJUT.

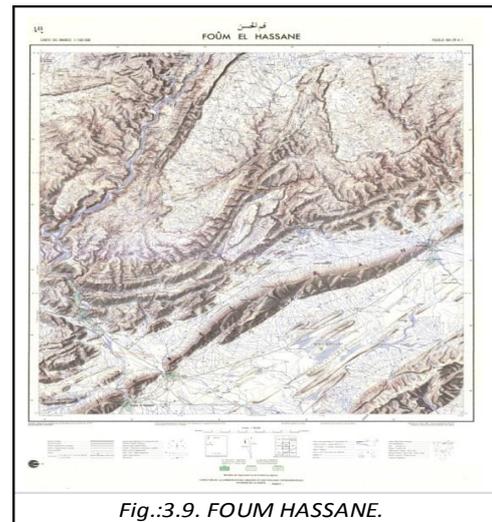


Fig.:3.9. FOUM HASSANE.

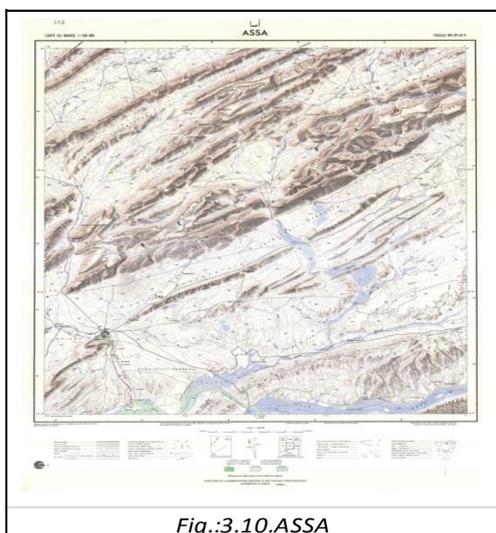


Fig.:3.10.ASSA

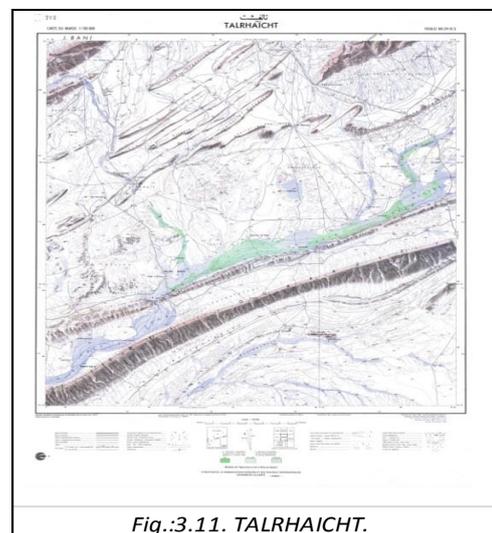
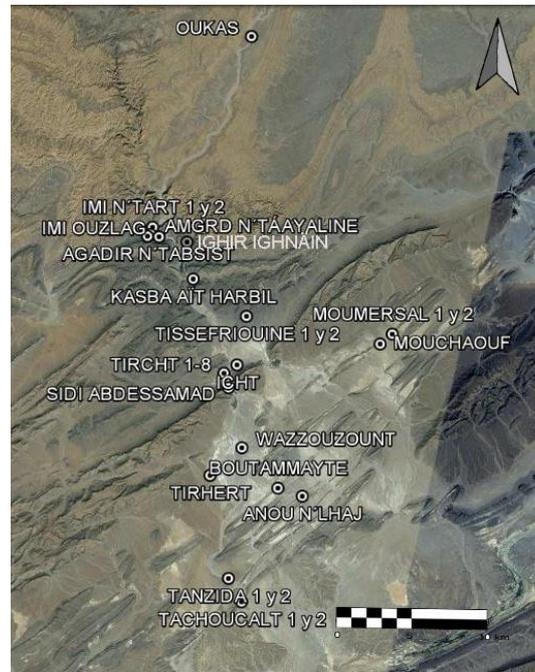


Fig.:3.11. TALRHAICHT.

3.1.4. IMÁGEN AÉREA DE LA ZONA DE LOS YACIMIENTOS.

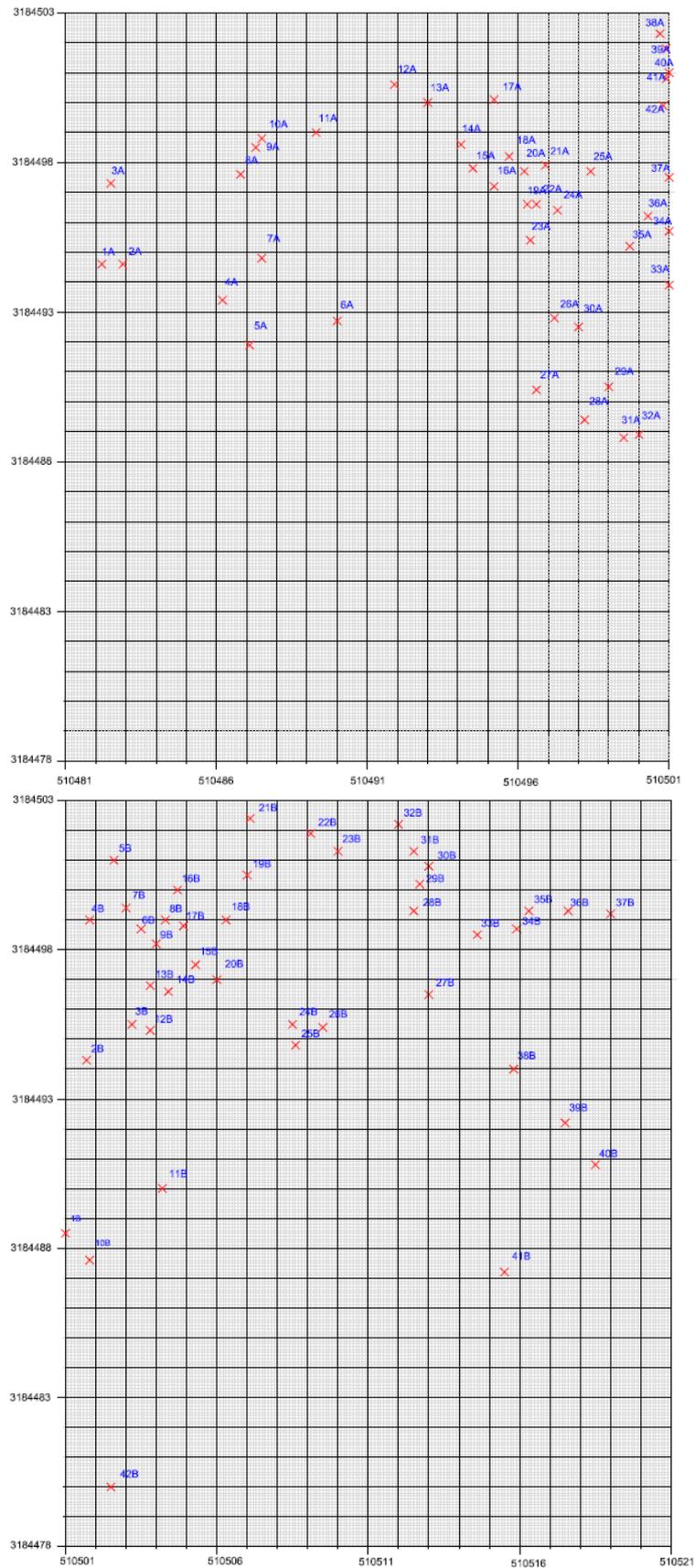
A continuación se dispone de una imagen de Google con la localización de los 31 yacimientos, un plano con la localización de los 84 paneles pertenecientes a un yacimiento (Tachokalt), así como sus coordenadas UTM. Estos archivos serán necesarios para la posterior localización de los yacimientos en nuestras imágenes



Coordenadas UTM de los yacimientos de la zona de estudio:

OUKAS: UTM 29R, 513789 E, 3253616 N	IMI N'TART 1: UTM 29 R, 501085 E, 3230813 N
IMI N'TART 2: UTM 29R, 500883 E, 3230715 N	IMI OUZLA: UTM 29 R, 501850 E, 3229607 N
AGADIR N'TABSIST: UTM 29R, 500456 E, 3229718 N	AMGRD N'TÁAYALINE: UTM 29R, 500816 E, 3229920 N
KASBA AÏT HARBIL: UTM 29R, 505819 E, 3224367 N	TISSEFRIOUINE 1: UTM 29R, 511602 E, 3219043 N
TISSEFRIOUINE 2: UTM 29R, 512157 E, 3219652 N	MOUMERSAL 1: UTM 29R, 529838 E, 3216993 N
MOUMERSAL 2: UTM 29R, 529838 E, 3216993 N	MOUCHAOUF: UTM 29R, 528321 E, 3215830 N
TIRCHT 1: UTM 29R, 509220 E, 3212775 N	TIRCHT 2: UTM 29R, 509162 E, 3213193 N
TIRCHT 3: UTM 29R, 509153 E, 3213310 N	TIRCHT 4: UTM 29R, 509400 E, 3213088 N
TIRCHT 5: UTM 29R, 509427 E, 3213272 N	TIRCHT 6: UTM 29R, 509559 E, 3213394 N
TIRCHT 7: UTM 29R, 510825 E, 3213753 N	TIRCHT 8: UTM 29R, 509699 E, 3213699 N
ICHT: UTM 29R, 510829 E, 3213746 N	SIDI ABDESSAMAD: UTM 29R, 509718 E, 3210984 N
WAZZOUZOUNT: UTM 29R, 511131 E, 3203604 N	BOUTAMMAYTE: UTM 29R, 515368 E, 3198532 N
TIRHERT – TIGHIRTE: UTM 29R, 507144 E, 3200327 N	TANZIDA 1: UTM 29R, 509017 E, 3187631 N
TANZIDA 2: UTM 29R, 510342 E, 3186727 N	TACHOKALT 1: UTM 29R, 510443 E, 3183180 N
TACHOKALT 2: UTM 29R, 510527 E, 3184715 N	IGHIR IGHNAÏN: UTM 29R, 505220 E, 3228880 N
ANOU N'LHAJ – ANOU EL-HAJJ: UTM 29R, 518320 E, 3197463 N	

Plano con la localización de los 84 paneles del yacimiento Tachokalt:



4. PRE-PROCESO DE DATOS

4. PRE-PROCESO DE DATOS.

4.1. PRE- PROCESO DE ESCENAS.

La base de pre-proceso correspondiente al tratamiento digital de las imágenes es realizada directamente por el Instituto Geológico de los EEUU (USGS), Departamento de Interior de los EEUU, a partir de los datos originales (“datos crudos”) de los satélites Landsat 7 y Landsat 5.

Los datos originales del satélite Landsat 7 y Landsat 5 tienen un nivel de producto cuatro. El nivel cuatro conlleva haber realizado una corrección geométrica y radiométrica básica de los datos originales del sensor.

El trabajo de pre-proceso por parte del USGS ha consistido en pasar de un nivel de producto cuatro a un producto preparado para un nivel cinco. El nivel de producto cinco consiste en una imagen con correcciones sistemáticas, pero que se georreferencia utilizando las efemérides de los satélites. Las escenas resultantes del pre-proceso elaborado por el USGS son las empleadas para realizar este Proyecto Fin de Carrera. Son dos escenas, una correspondiente a cada satélite, con un nivel de producto cinco, respecto a la corrección geométrica, y con el Nivel Digital original, respecto a la resolución espectral.

Los pasos seguidos en esta fase del proyecto consisten en las siguientes actuaciones:

- Estudio del tamaño de los ficheros, tanto de los datos de partida, como de los de salida en las sucesivas fases del proyecto. Como las escenas son de gran tamaño e irán aumentando según avance el proyecto, hay que tener en cuenta las limitaciones de nuestro equipo informático de trabajo y buscar alternativas en caso de deficiencia por parte del mismo. En esta fase se realizó de forma general un estudio del tamaño de los archivos y de forma simultánea en algunas fases del proyecto se efectuó un estudio del tamaño de los datos de salida.
- Creación y organización de nuestro entorno de trabajo, mediante carpetas y subcarpetas donde guardar los resultados de las diferentes fases del proyecto.

4.2. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA POR MODELO ORBITAL.

El objetivo del proceso de corrección geométrica es poder obtener una georreferenciación de las dos escenas.

Los algoritmos de corrección modelizan la posición del satélite y la geometría del sensor a través de datos que un ordenador de a bordo graba sobre la captura. La altitud, las efemérides y los parámetros de altitud del satélite, descritos en el archivo *Payload Correction Data* (PCD) y en el archivo *Calibration Parameter File* (CPF) son los componentes fundamentales que se utilizan para la generación de productos nivel 5 y son las que garantizan la fidelidad geométrica general de la imagen.

La siguiente fase del proyecto consiste en la fusión de bandas e importación del canal pancromático.

El nivel 4 posee una georreferenciación según las coordenadas del satélite, y se comprueba al abrir una imagen con ERDAS, ya que se observa como la imagen está georreferenciada en coordenadas UTM, en el Huso 29.

Esta georreferenciación inicial se considera para el proyecto.

4.3. PRE-PROCESO DEL CANAL MULTIESPECTRAL Y PANCROMÁTICO.

Antes de la fusión hay que preparar las escenas según sus bandas. Cada imagen viene cifrada en un conjunto numeroso de archivos. Estos archivos corresponden a sus bandas.

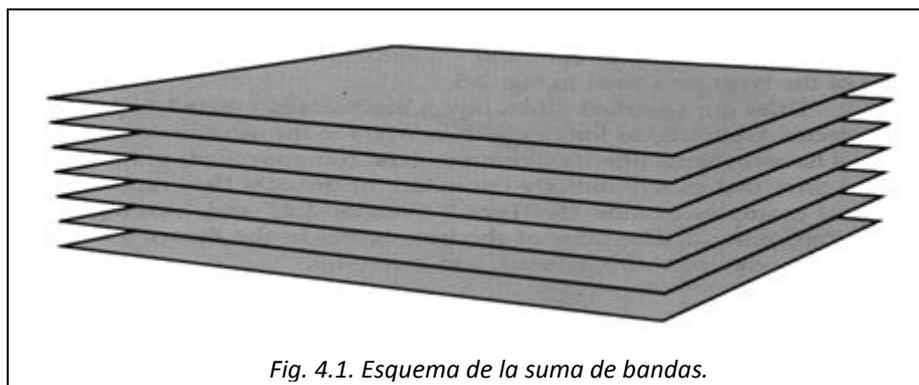
Si el objetivo es fusionar el canal pancromático con los canales multiespectrales, hay que preparar una escena con la suma de las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7 para el caso de la escena Landsat 7 y 1, 2, 3, 4, 5, 6 para el caso de la escena Landsat 5 y otra escena con el canal pancromático.

Esta fusión de bandas, logrará una mejor resolución espacial de la imagen.

Para este proceso se ha utilizado el programa informático ERDAS IMAGINE 2011, programa que habíamos utilizado durante los estudios de Ingeniería Técnica en Topografía en la asignatura de Teledetección.

4.3.1. METODOLOGÍA.

El concepto de fusionar las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7 del espectro visible, es el de obtener una escena que posea toda la información de los niveles digitales (ND) en cada pixel.



Obtendremos una escena para cada satélite con toda la información de cada banda y con una resolución espectral de 30 metros, sin que sus ND varíen.

Ejemplo de fusión de bandas de una imagen:

- Fusión de las bandas del espectro visible en la escena Landsat7 y Landsat5:

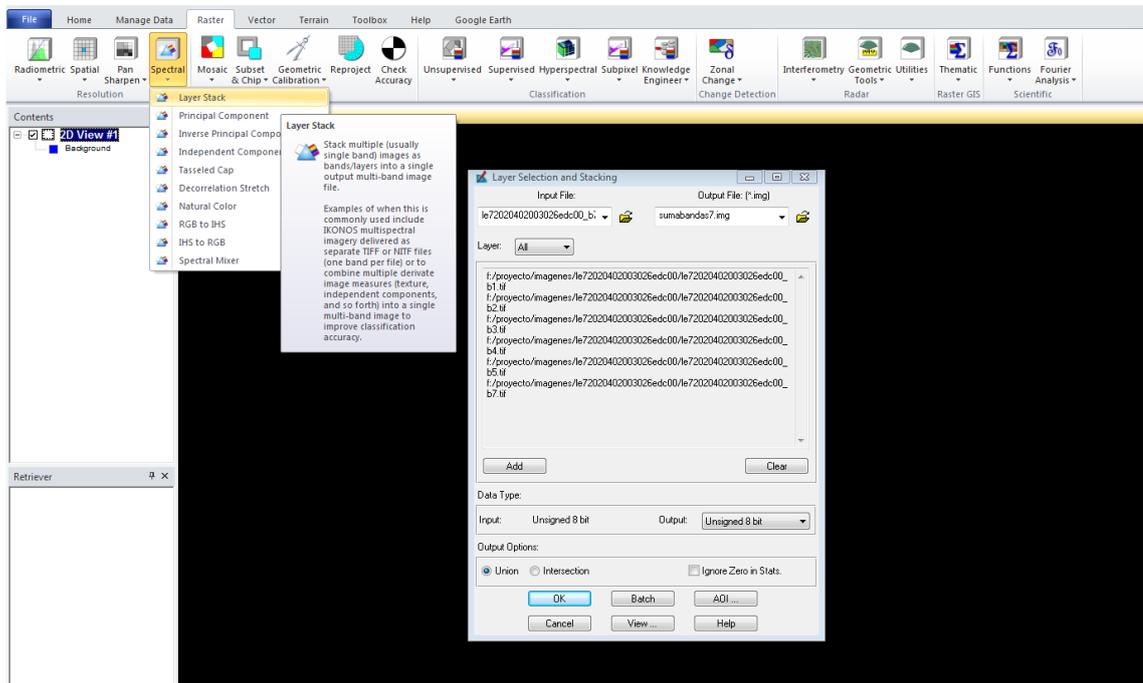


Fig. 4.2. Proceso de la suma de bandas en ERDAS IMAGINE 2011.

En la barra de herramientas pinchamos en la pestaña *Raster* → *Spectral* → *LayerStack*.

En la ventana que se despliega, introducimos:

- *Input File*: Fichero *geoTIFF* de entrada; uno por cada banda, en total 6.
- *Output File*: Fichero de salida con formato *.img*, *sumabandas7.img* y *sumabandas5.img* para la imagen del satélite Landsat7 y Landsat 5 respectivamente.
- *Data type*: *OutputUnsigned 8bit*
- *Output Option*: Unión.

Aceptamos la operación. El proceso dura aproximadamente 2 minutos; lo realizamos dos veces, uno para la imagen Landsat7 cuyo fichero de salida ocupa 237MB y otra para la imagen Landsat5 cuyo fichero de salida ocupa 246MB.

- Resultados:

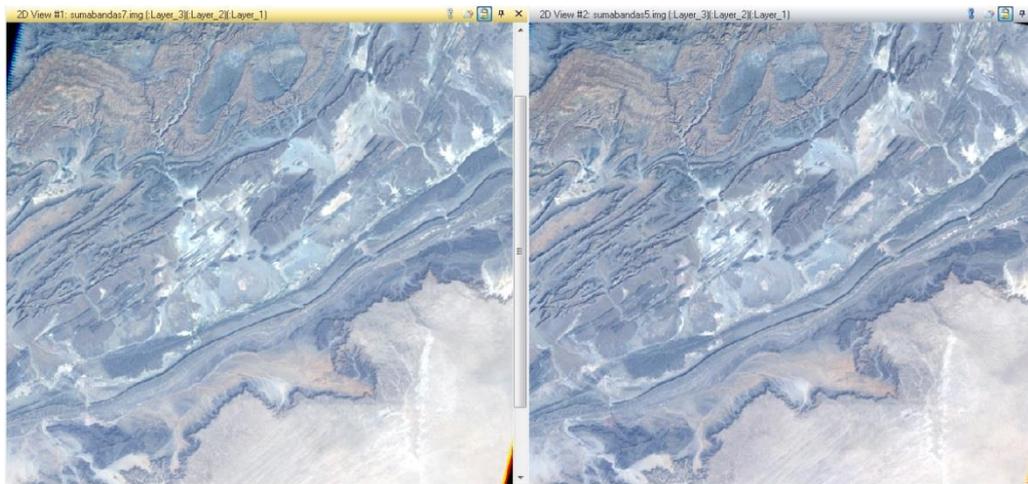


Fig. 4.3. Imagen Izquierda resultado Landsat 7, Imagen Derecha resultado Landsat 5.

- Creación de una escena con la banda del Pancromático en la escena Landsat7.

En este proceso se obtiene una transformación de formato de una imagen *.geoTIFF* a un formato *.img*, sin modificar los ND del pixel.

Este proceso también se realiza con ERDAS, de la siguiente forma:

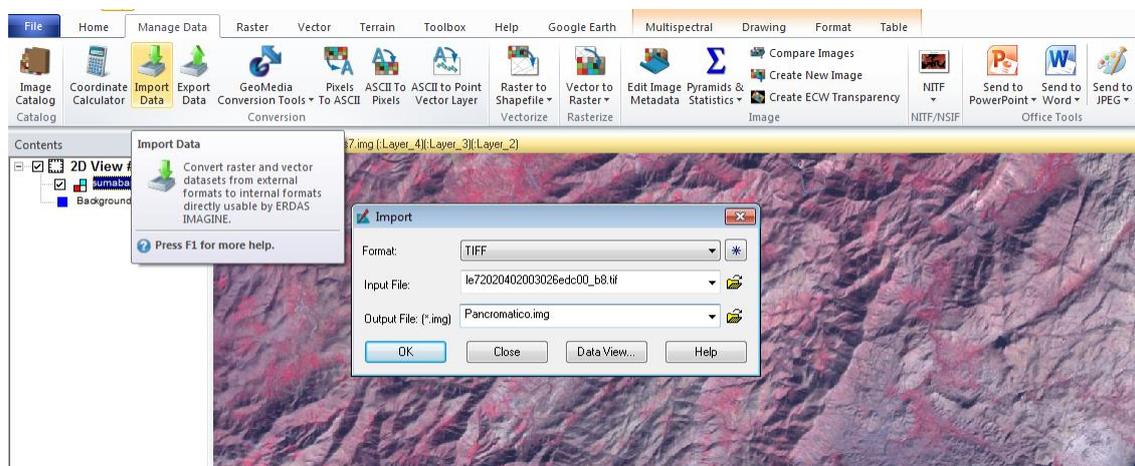


Fig. 4.4. Proceso de importación en ERDAS IMAGINE 2011.

En la barra de herramientas pinchamos en la pestaña *Manage Data* → *Import Data*;

· *Format*: Elegimos el tipo de archivo entrante, TIFF.

· *Input File*: Fichero de entrada correspondiente a la banda 8 del canal pancromático.

· *Output File*: Fichero de salida, en formato *.img*, de nombre *Pancromatico7.img* en este caso.

Aceptamos la operación dando OK, y nos aparece una nueva ventana para confirma la operación.

El proceso dura unos 3 minutos aproximadamente, lo realizamos para la escena Landsat 7, el fichero de salida ocupa 153MB y se llama Pancromatico7.img.

- Resultado:

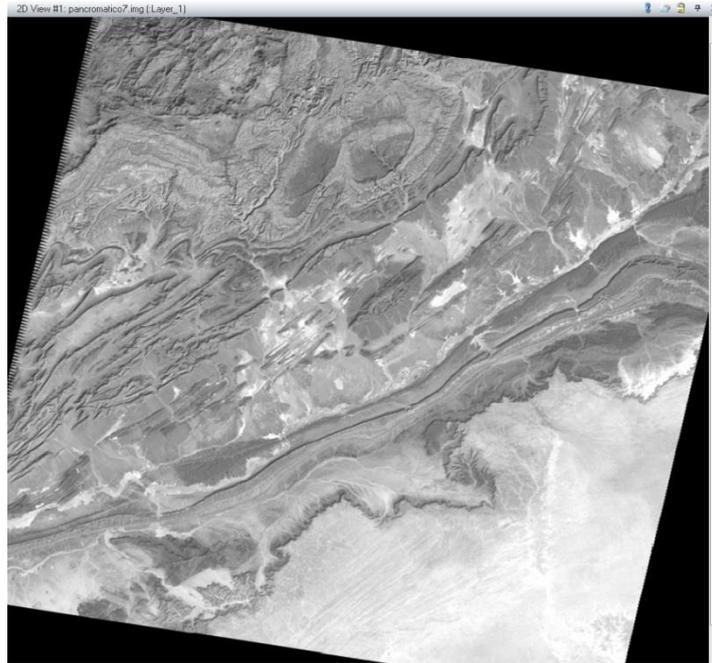


Fig. 4.5. Banda Pancromática de la escena Landsat7 en formato .img

5. FUSIÓN DEL CANAL PANCRÓMÁTICO Y MULTIESPECTRAL

5. FUSIÓN DEL CANAL PANCROMÁTICO Y MULTIESPECTRAL.

El objetivo de la fusión del canal pancromático con los canales visibles, es obtener dichos canales, con la resolución espacial del canal pancromático (15 metros). De esta manera los datos pueden ser empleados en un proceso de clasificación de las escenas, proceso que se tiene previsto realizar para obtener la cartografía básica y cartografía temática de distribución de minerales de la zona de estudio del proyecto.

Gracias a los distintos grados de resolución geométrica actualmente disponibles, podemos obtener, mediante imágenes de satélite, un rango muy amplio de escalas.

Los sensores espaciales están diseñados para una determinada finalidad, y por lo tanto su resolución espacial y su resolución espectral están condicionadas a ella. Ambas tienen una relación inversa, generalmente, lo que hace que un sensor de alta resolución espacial sea pobre en la espectral, es decir, en el número de bandas y su anchura en el espectro.

El objetivo de la fusión es mejorar la calidad de los datos, ya sea en lo que se refiere a su aspecto visual, a la discriminación digital de ciertas categorías, a mejorar una estimación de una determinada variable o demostrar la solidez de un determinado método de análisis.

Este tipo de fusiones desde el punto de vista de la interpretación de imágenes es interesante, puesto que a partir de un sensor de baja o media resolución espacial, pero alta resolución espectral, como es el caso de nuestros sensores, para sus bandas multiespectrales y térmicas, y otro de alta resolución espacial, como la banda pancromática del mismo sensor, ofrece una imagen fusionada de alta resolución espacial y alta resolución espectral. Esto permite una mejor interpretación del territorio, debido a la gran superficie de terreno cubierta por una imagen de satélite. Si se requiere un mayor nivel de detalle, para estudios locales por ejemplo, habría que recurrir a la fotografía aérea o a otros sensores más recientes y de mayor resolución espacial y/o espectral.

La fusión del canal pancromático con el resto permite generar y trabajar con escalas cartográficas mayores de las que se obtendrán a partir de las imágenes originales.

En el anexo II se detallan los fundamentos de los diferentes tipos de fusión.

5.1. PROCESO OPERATIVO.

Para la realización de la Fusión se ha empleado el programa ERDAS IMAGINE 2011. Dentro del programa, los comandos empleados para la fusión han sido el denominado *Resolution Merge* (fusión estándar) y *Wavelet Resolution Merge* con el fin de obtener una comparación de ambos métodos y poder determinar cuál es el que mejor se ajusta a las necesidades del proyecto.

En el capítulo anterior se prepararon las imágenes, obteniendo una imagen con el canal pancromático y otra con la suma de las bandas espectrales. De este modo, las escenas están preparadas para la fusión.

5.1.1. FUSIÓN RESOLUTION MERGE.

A continuación se presentan los parámetros definidos en el proceso operativo de una fusión estándar (*Resolution Merge*)

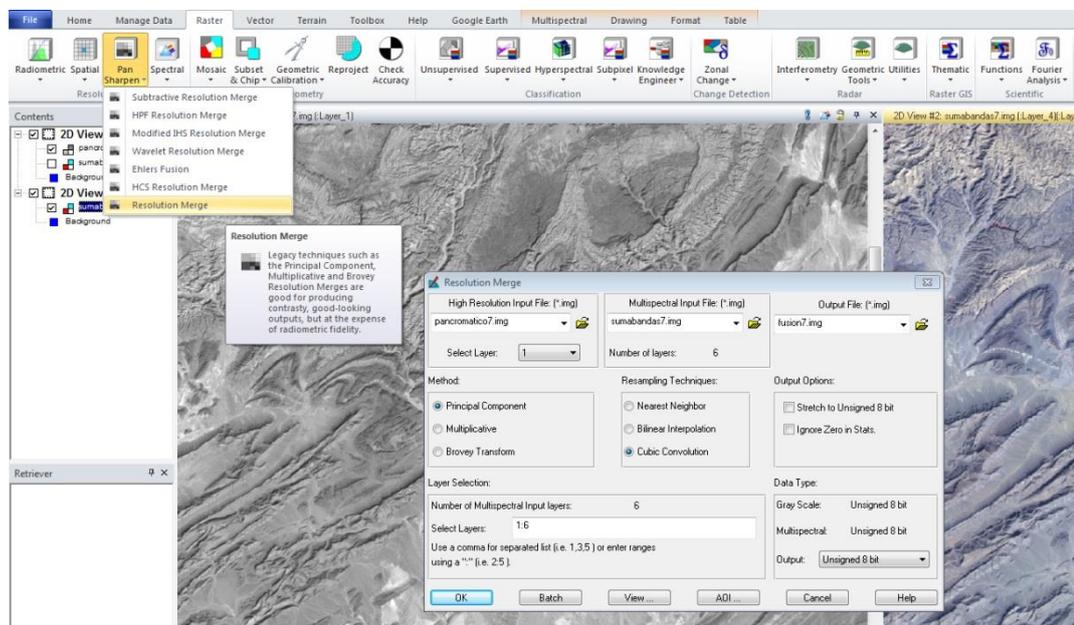


Fig.5.1. Despliegue de ventanas en la opción *Resolution Merge* en ERDAS.

En la barra de herramientas pinchamos en la pestaña *Raster* → *Pan Sharpen* → *Resolution Merge*.

En la ventana de *Resolution Merge*, tenemos las siguientes opciones para realizar la fusión:

- *High Resolution Input File*: Fichero de entrada en el que introducimos la imagen con el canal pancromático (.img).
- *Multispectral Input File*: Fichero de entrada en el que introducimos la imagen con la suma de las bandas (.img).
- *Output File*: Fichero de salida para la escena (.img).
- *Method*: La metodología a aplicar es *Principal Component*.

- *Resampling Techniques*: Técnicas a utilizar → *Cubic Convolution*.
- *Layer Selection*: Seleccionamos el número de bandas que entraran en el proceso, es decir las bandas del espectro visible.
- *Data Type*: *Output unsigned 8 bit*.

Una vez introducidos los datos, aceptamos la operación.

5.1.2. FUSIÓN WAVELET RESOLUTION MERGE.

A continuación se presentan los parámetros definidos en el proceso operativo de una fusión *Wavelet (Wavelet Resolution Merge)*.

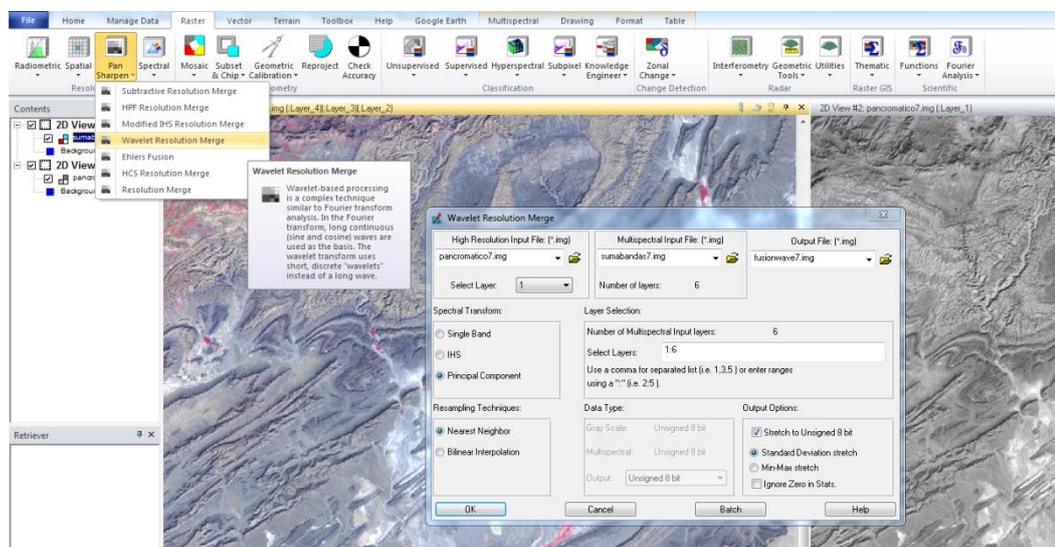


Fig.5.2. Despliegue de ventanas en la opción *Wavelet Resolution Merge* en ERDAS.

En la barra de herramientas pinchamos en la pestaña *Raster* → *Pan Sharpen* → *Wavelet Resolution Merge*.

En la ventana de *Wavelet Resolution Merge*, tenemos las siguientes opciones para realizar la fusión:

- *High Resolution Input File*: Fichero de entrada en el que introducimos la imagen con el canal pancromático (.img).
- *Multispectral Input File*: Fichero de entrada en el que introducimos la imagen con la suma de las bandas (.img).
- *Output File*: Fichero de salida para la escena (.img).
- *Spectral Transform*: Transformación espectral a aplicar → *Principal Component*.
- *Resampling Techniques*: Técnicas a utilizar → *Nearest Neighbor* (Vecino próximo).

- *Layer Selection*: Seleccionamos el número de bandas que entraran en el proceso, es decir las bandas del espectro visible.
- *Data Type*: *Outputunsigned8 bit*.

Una vez introducidos los datos, aceptamos la operación.

5.2. RESULTADOS.

5.2.1. RESULTADOS LANDSAT 7.

- **FUSIÓN RESOLUTION MERGE:**

El proceso de realización de la fusión *Resolution Merge* para la escena correspondiente al satélite Landsat 7 es de 15 minutos aproximadamente, creando un fichero de salida (fusion7.img) y con un tamaño de 926 MB

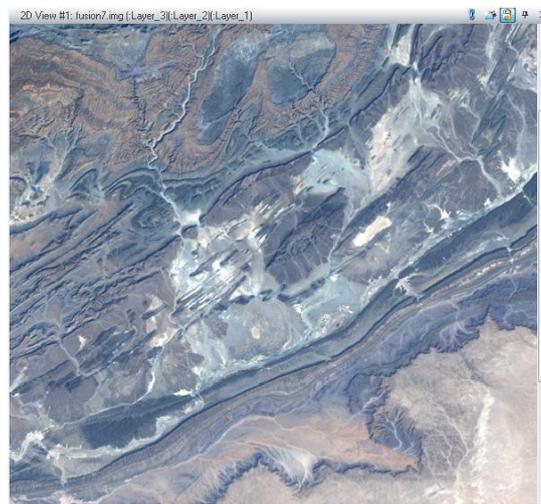


Fig.5.3. Resultado fusión RESOLUTION MERGE.

- **FUSIÓN WAVELETE RESOLUTION MERGE:**

El proceso de realización de la fusión *Wavelet Resolution Merge* para la escena correspondiente al satélite Landsat 7 es de 15 minutos aproximadamente, creando un fichero de salida (fusionwave7.img) y con un tamaño de 940 MB.

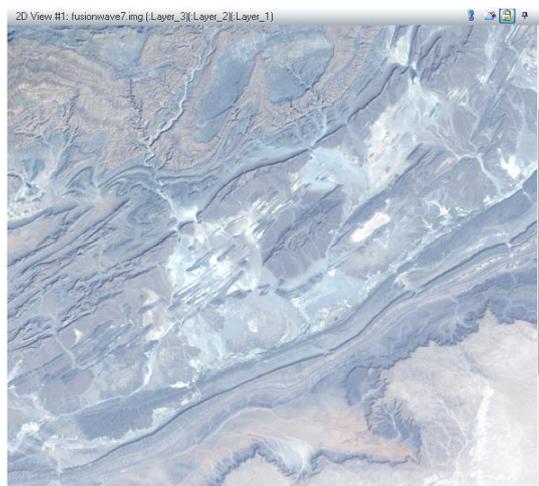


Fig.5.4. Resultado fusión WAVELET RESOLUTION MERGE.

5.2.2. RESULTADOS LANDSAT 5.

- FUSIÓN RESOLUTION MERGE:

El proceso de realización de la fusión *Wavelet Resolution Merge* para la escena correspondiente al satélite Landsat 5 es de 15 minutos aproximadamente, creando un fichero de salida (fusion5.img) y con un tamaño de 957 MB



Fig.5.5. Resultado fusión RESOLUTION MERGE.

- FUSIÓN WAVELETE RESOLUTION MERGE:

El proceso de realización de la fusión *Wavelet Resolution Merge* para la escena correspondiente al satélite Landsat 5 tarda 15 minutos aproximadamente, creando un fichero de salida (fusionwave5.img) y con un tamaño de 974 MB.



Fig.5.6. Resultado fusión WAVELET RESOLUTION MERGE.

5.3. COMPARATIVA DE RESULTADOS.

Una vez terminado el proceso de fusión de las dos imágenes mediante dos métodos diferentes, se realiza una comparación para determinar cuál es el que mejor se adapta a las necesidades del proyecto.

Como se mencionó con anterioridad en el proceso de fusión, en teoría, no se produce ninguna alteración de la resolución radiométrica de la imagen original.

- LANDSAT 7:

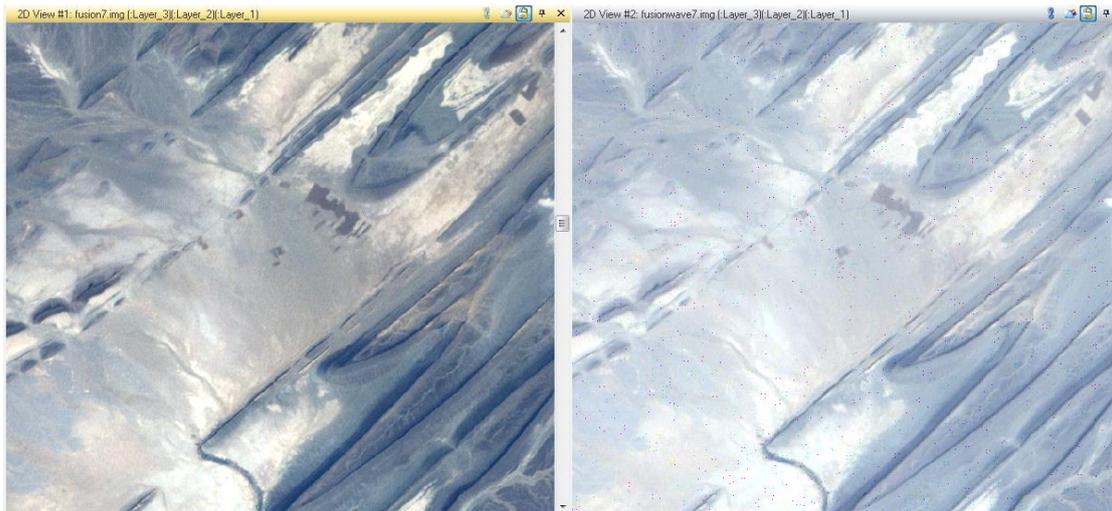


Fig.5.7. Comparación de las fusiones realizadas (3, 2, 1) RGB del satélite Landsat 7.

- LANDSAT 5:

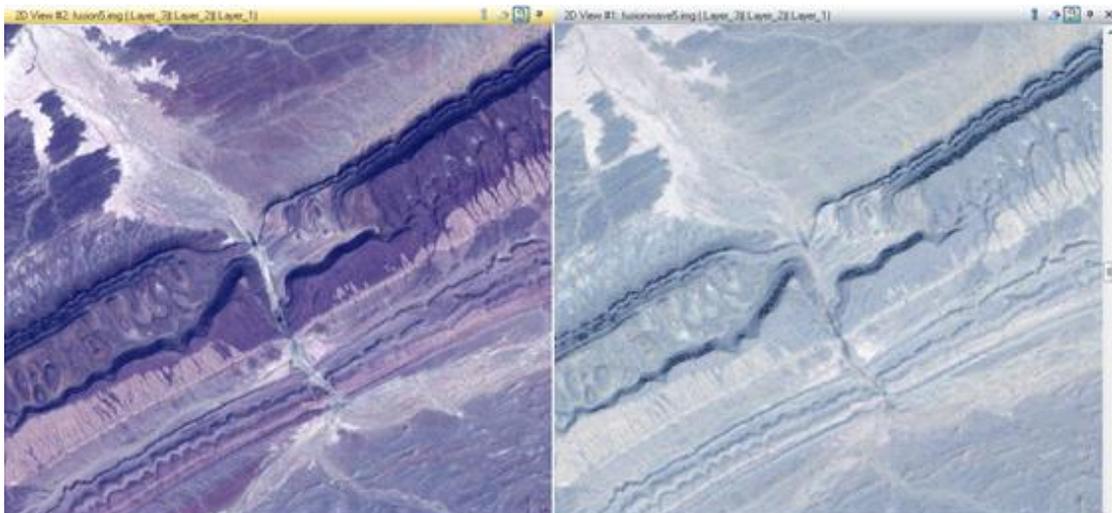


Fig.5.8. Comparación de las fusiones realizadas (3, 2, 1) RGB del satélite Landsat 5.

A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que pese a que lo esperado sería que el método *Wavelet Resolution Merge* (imagen derecha) ofreciera un mejor resultado dado que es un proceso más complejo, para nuestro caso no es así, ya que estropea la información y la imagen aparece con puntos de colores, mientras que el método *Resolution Merge* (imagen izquierda) proporciona un mejor aspecto visual.

Por lo tanto el método elegido para la siguiente fase del proyecto ha sido la Fusión *Resolution Merge*.

A continuación, se comparan los histogramas de la imagen sin fusionar, y la imagen fusionada, para demostrar que los ND de los pixeles no han sido modificados.

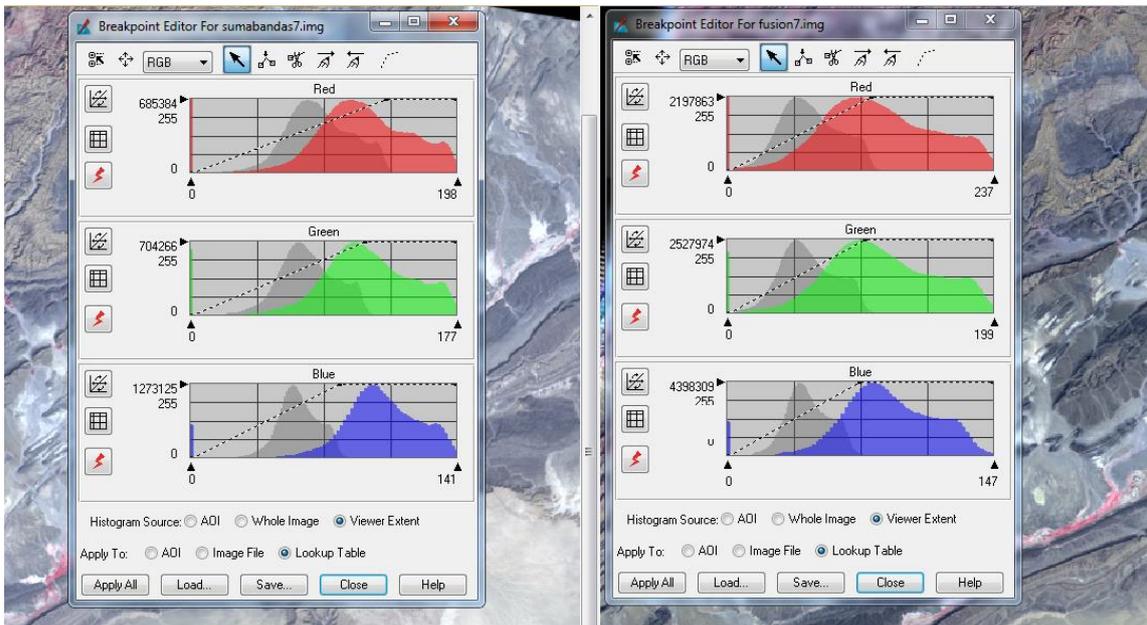


Fig.5.9. Comparación de histogramas. Composición 3, 2, 1 (RGB) del satélite Landsat 7.

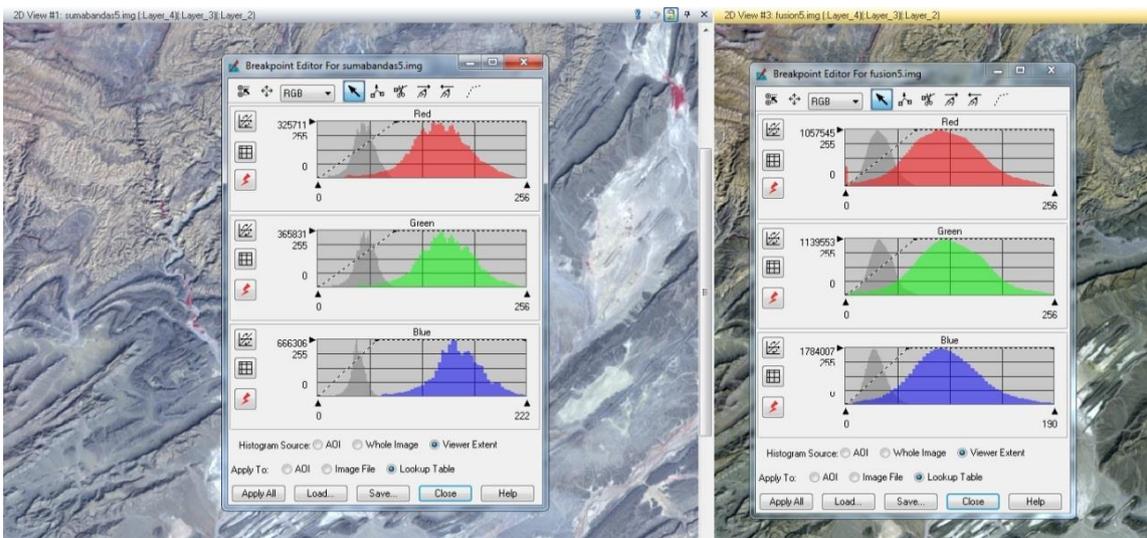


Fig.5.10. Comparación de histogramas. Composición 3, 2, 1 (RGB) del satélite Landsat 5.

Comparando los histogramas se observa que no son exactamente iguales, pero eso no significa que los niveles digitales del pixel estén modificados, sino que el programa ERDAS realiza una corrección del histograma al realizar la fusión.

Por último hay que ver si realmente ha mejorado la resolución espacial de la imagen.



La imagen de salida correspondiente a la fusión de la banda pancromática con la multispectral del satélite Landsat 7 presenta mejor aspecto, es decir, una mejor apreciación o percepción visual de la geometría de la imagen. Esta percepción más favorable se debe a la diferencia de resolución espacial entre la imagen de referencia y la original. Se ha pasado de una resolución espacial de 30 metros a 15 metros.



Sin embargo, al observar la imagen de salida creada mediante la fusión de la banda pancromática del satélite Landsat 7 con la banda multispectral del satélite Landsat 5, nos damos cuenta que ésta no aporta ninguna información adicional ya que al haber tanta diferencia en el tiempo entre ambas estropeamos la información de la imagen original, en lugar de mejorarla. Por este motivo, de ahora en adelante se ha decidido trabajar sólo con la escena correspondiente al satélite Landsat 7. Por otra parte no aparecen cambios superficiales susceptibles de ser analizados entre ellas.

6. RECORTE DE IMÁGENES

6. RECORTE DE LAS IMÁGENES.

Cuando se realiza la fusión de bandas con el programa de ERDAS, se crea un borde de superposición de las bandas. Este borde hay que eliminarlo para el estudio de las imágenes, por ello, el siguiente proceso del proyecto es el recorte de las imágenes.

6.1. PROCESO OPERATIVO.

Para realizar el recorte de una imagen es necesario crear un área de interés (AOI), para ello se pincha en el menú *File* → *New* → *2DNew* → *AOI Layer*. Una vez se tiene el AOI se procede a realizar el recorte mediante el menú *Raster* → *Subset & Chip* → *Create Subset Image*, donde aparecerá una ventana en la que tendremos que poner el nombre de salida del fichero, en nuestro caso, *Recorte7.img*. En esta misma ventana aparecerá una pestaña llamada AOI que al pincharla se abre una nueva ventana en la que se selecciona la opción *viewer*, por último se acepta todo el proceso.

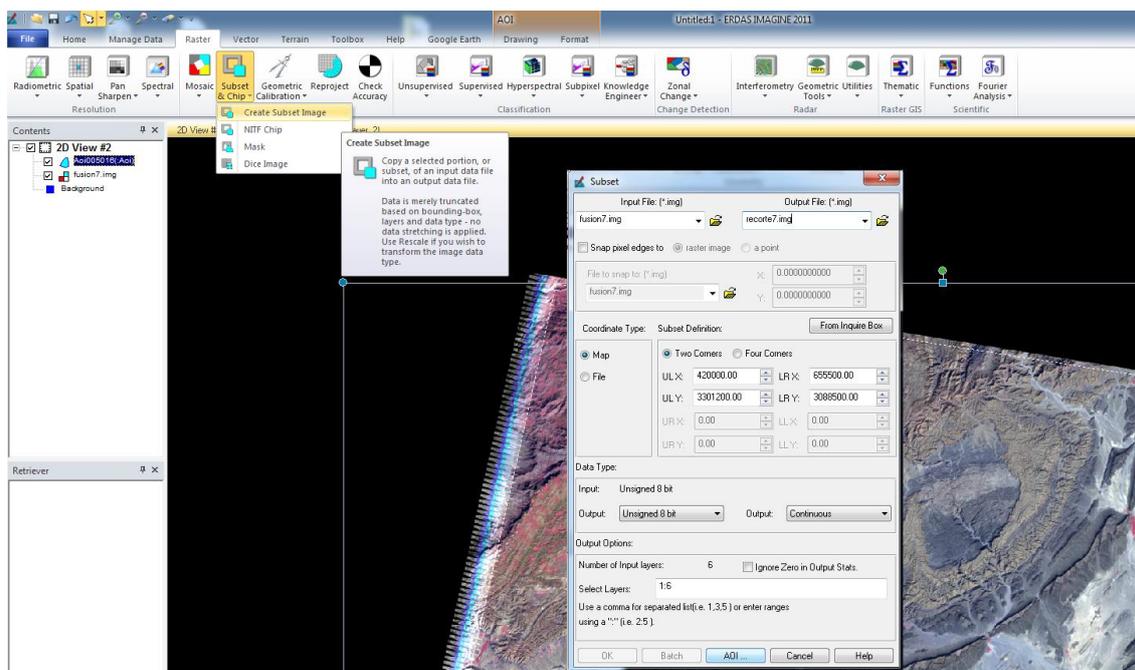


Fig. 6.1. Recorte de escenas Landsat.

Este proceso tarda unos 2 minutos, el fichero de salida es en formato .img

6.2. RESULTADOS.

A continuación se muestra la imagen resultante.



Fig. 6.2. Resultado Landsat 7 recortada.

7. ANÁLISIS EXPLORATORIO

7. ANÁLISIS EXPLORATORIO

El objetivo de la segunda fase del proyecto es obtener una cartografía de usos del suelo de la zona, mediante el método de clasificación supervisada. Antes de proceder a cualquier clasificación, es conveniente realizar un análisis exploratorio de los valores de reflectancia, con el fin de obtener alguna información adicional que facilite la clasificación.

En nuestro caso, el análisis exploratorio realizado consta de las fases siguientes:

- Fotointerpretación de combinaciones de bandas.
- Definición de posibles clases existentes.
- Análisis de firmas espectrales.

7.1. FOTOINTERPRETACIÓN DE COMBINACIONES DE BANDAS.

Mediante técnicas de fotointerpretación de diferentes combinaciones de bandas es posible obtener información, en principio fiable, de los posibles usos y coberturas presentes en la zona.

La combinación de bandas 3, 2, 1 en RGB (*red, green, blue*) proporciona el color real observado por el ojo humano. Esto es así por corresponder la banda 3 al rojo, la banda 2 al verde y la banda 1 al azul. Esta combinación de bandas proporciona mucha información sobre los usos y coberturas del suelo, mediante técnicas de Fotointerpretación.

Mediante la fotointerpretación se llega a observar, en principio, seis usos del suelo: Zona urbana, carreteras, caminos de tierra, vegetación de regadío, vegetación de matorral y suelos desnudos.

- Zona Urbana y vegetación: En esta combinación de bandas la vegetación aparece en color verde. Se puede observar que las zonas de vegetación se encuentran próximas a las zonas urbanas, presentando una pigmentación verde oscuro, y cuya superficie de ocupación tiene una geometría más o menos definida. Por esta interpretación se podría decir que la vegetación presente en la zona es de matorral y regadío.



Fig.7.1. Zona Urbana y Vegetación de regadío (3, 2, 1): Imagen izquierda Erdas, imagen derecha Google

- Vegetación de matorral: En esta combinación de bandas la vegetación de matorral aparece en color verde claro.



Fig.7.2. Vegetación de matorral (3, 2, 1): Imagen izquierda Erdas, imagen derecha Google Earth

- Carreteras:



Fig.7.3. Carreteras (3, 2, 1): Imagen izquierda Erdas, imagen derecha Google Earth

- Caminos de tierra:



Fig.7.4. Caminos de tierra (3, 2, 1): Imagen izquierda Erdas, imagen derecha Google

Los suelos desnudos ocupan prácticamente la totalidad de la superficie. Se pueden apreciar cinco coberturas del suelo teniendo en cuenta la geología y geomorfología de la zona, descrita en el capítulo 2 (Zona de estudio).

- Dunas Arenosas:

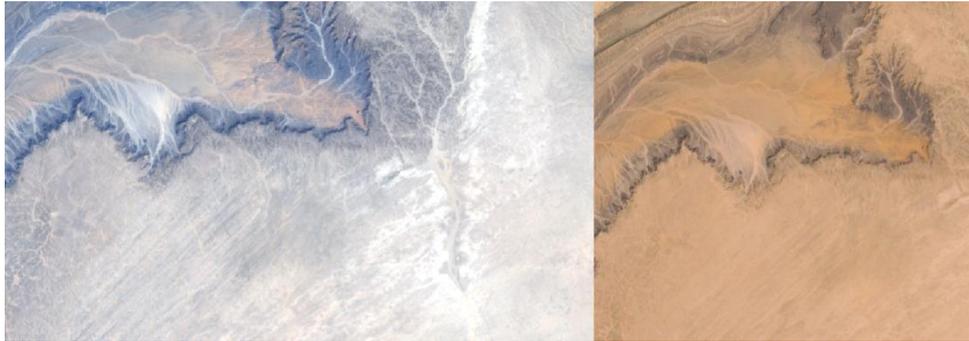


Fig.7.5.Dunas arenosas (3, 2, 1): Imagen izquierda Erdas, imagen derecha Google

- Depósitos aluviales:



Fig.7.6.Depósitos aluviales (3, 2, 1): Imagen izquierda Erdas, imagen derecha

- Areniscas: Para distinguir mejor las areniscas se utilizaron otras combinaciones de bandas.



Fig.7.7.Areniscas (3, 2, 1): Imagen izquierda Erdas, imagen derecha Google Earth

- Zona Montañosa:

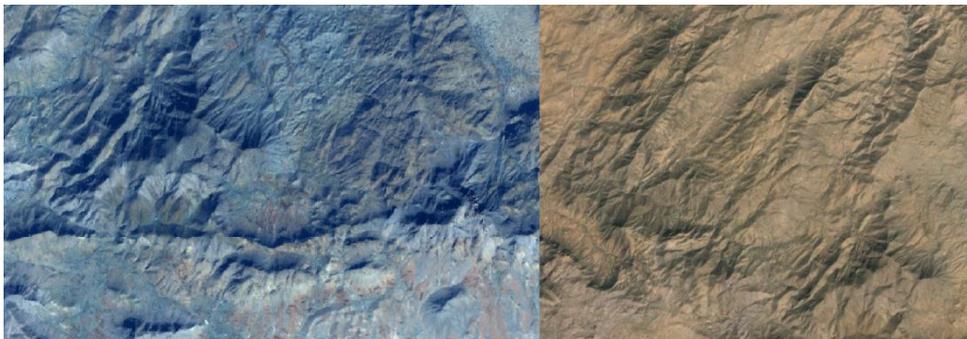


Fig.7.8.Zona Montañosa (3, 2, 1): Imagen izquierda Erdas, imagen derecha Google

- Cabecera de cuenca hidrográfica (Foreland basin): es una región de baja altitud adyacente a un cinturón de montaña, formada por la colisión de las placas tectónicas. Esta zona también es conocida como "Greenstone Belf".

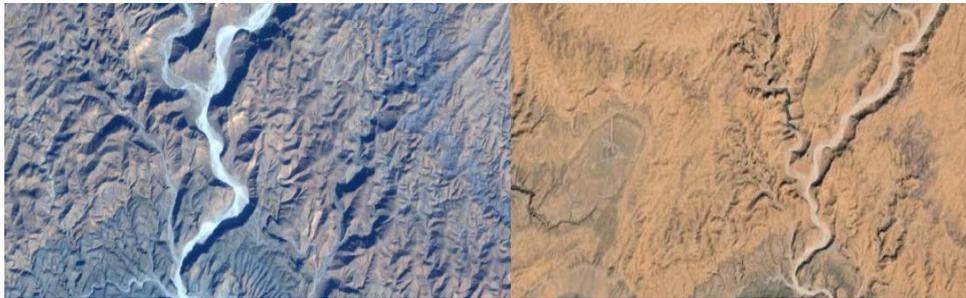


Fig.7.9.Cabecera de cuenca hidrográfica (3, 2, 1): Imagen izquierda Erdas, imagen

La combinación de bandas 5, 4, 1 en RGB, a diferencia de la anterior, visualiza la banda 4, correspondiente al infrarrojo cercano, en color verde.

En esta banda la vegetación presenta una alta reflectividad, de ahí que las zonas definidas anteriormente como vegetación de regadío aparezcan en verde. El posible uso del suelo de matorral bajo no queda tan bien definido en esta combinación de bandas. Es posible que esto se deba a la distribución dispersa de dicha vegetación.

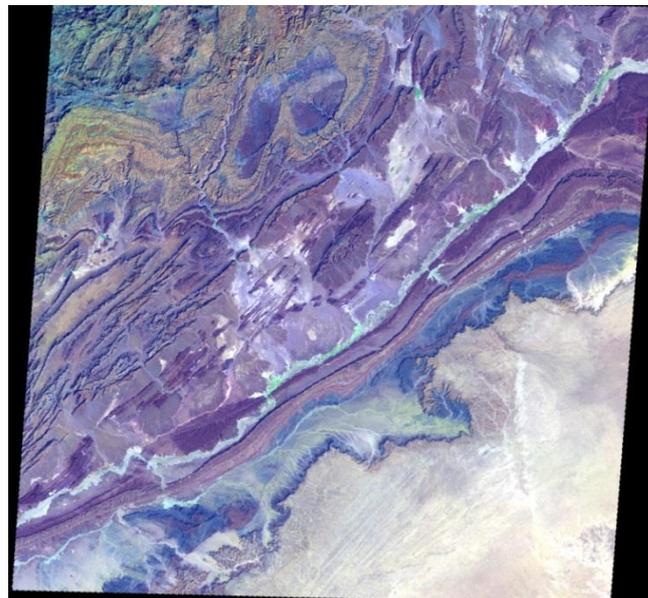


Fig.7.10. Composición vegetación verde (5, 4, 1)

Es posible que la vegetación no destaque todo lo esperado.

La combinación de bandas 4, 3, 2 en RGB, a diferencia de la anterior, visualiza la banda 4, correspondiente al infrarrojo cercano, tiene buena sensibilidad a la vegetación que aparece en color rojo. Según el tipo de vegetación tendrá distinta tonalidad de rojo, apareciendo la vegetación de regadío en rojo oscuro y la vegetación de matorral en rojo claro. Además representa los caminos.

Podemos identificar perfectamente en la imagen las zonas de vegetación:

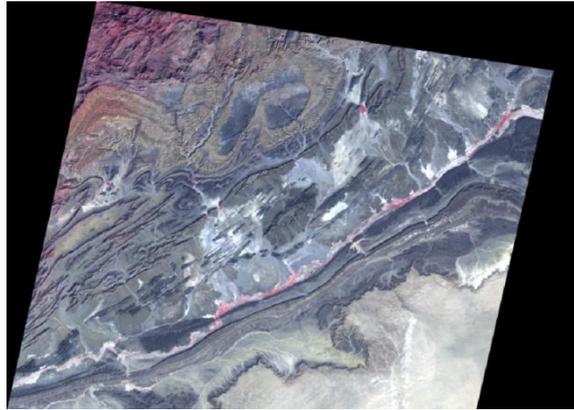


Fig.7.11. Composición vegetación rojo (4, 3, 2)

La combinación de bandas 6, 5, 4 en RGB, nos permite apreciar las clases de textura de tierras (arcilla, tierra, arenas...)

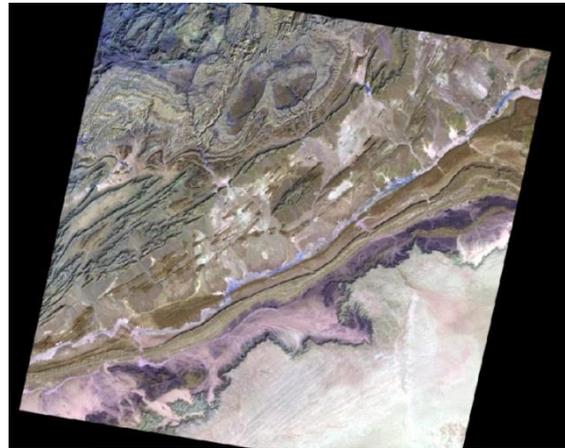


Fig.7.12. Clases de suelo (6, 5, 4)

La combinación de bandas 6, 4, 1 en RGB, nos permite diferenciar los distintos minerales de la imagen, muy útil para la clasificación:

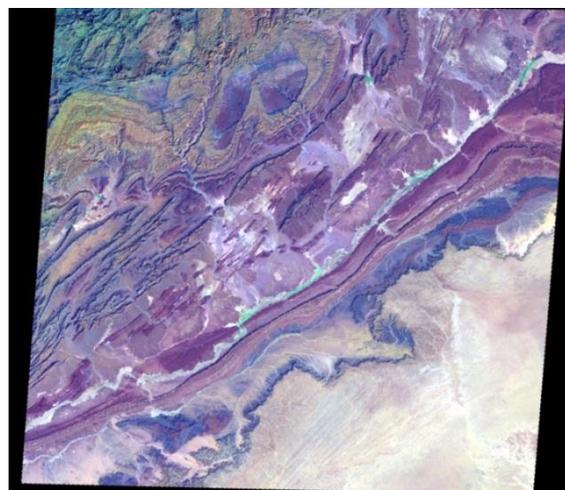


Fig.7.13. Clases de minerales (6, 4, 1)

7.2. DEDINICIÓN DE POSIBLES CLASES EXISTENTES.

Antes de proceder a cualquier tipo de clasificación, es conveniente un estudio previo de las posibles clases que pueden constituir nuestra leyenda. Esto facilitará la realización de las posteriores clasificaciones.

Mediante la documentación sobre la geomorfología y geología de la zona (capítulo 2), los análisis exploratorios realizados hasta el momento y la interpretación visual de la imagen, es posible definir una leyenda de las clases espectrales presentes en la zona. El objetivo es tener una idea sobre los posibles usos y coberturas del suelo en la zona.

El primer paso ha sido definir dos grandes grupos de clases: usos artificiales y usos naturales, abordándose cada grupo de manera independiente. El resultado final de la definición de la leyenda aproximada se expresa en el siguiente gráfico. Entre usos y coberturas del suelo se han diferenciados nueve clases, siete de usos naturales y dos de usos artificiales.

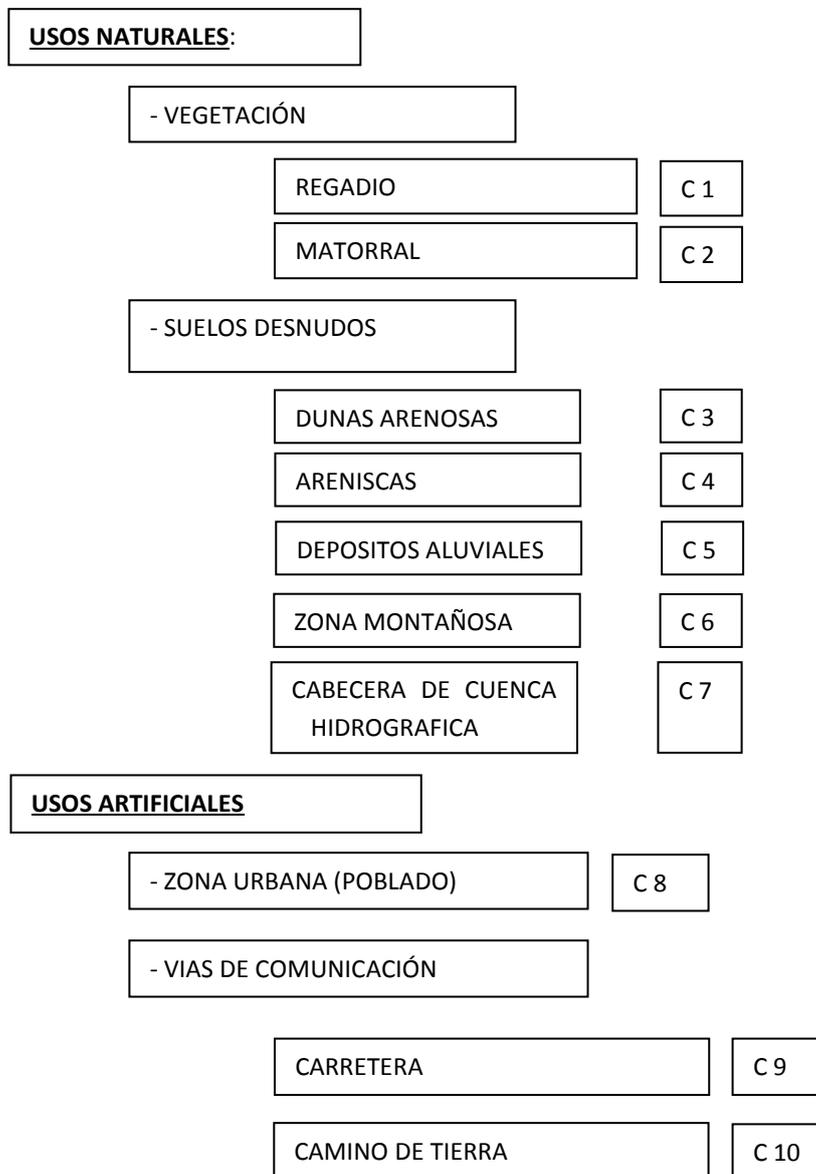


Fig.7.13. Posibles usos y coberturas existentes en la zona estudio.

7.3. ANÁLISIS DE LAS CURVAS DEL VALOR DIGITAL DE LA IMAGEN FUSIONADA.

Una vez definidas las posibles clases existentes en la zona, es de interés realizar un análisis exploratorio de las curvas del valor digital de la imagen fusionada

No obstante éste análisis no se ha efectuado en todas las posibles clases definidas anteriormente, solo en aquellas cuya ocupación en la zona es más evidente.

A continuación se presenta un gráfico con el contenido de reflectancia para cada canal de los posibles usos y coberturas de la zona. Estos valores serán analizados de forma simultánea con la curva del valor digital asociada.

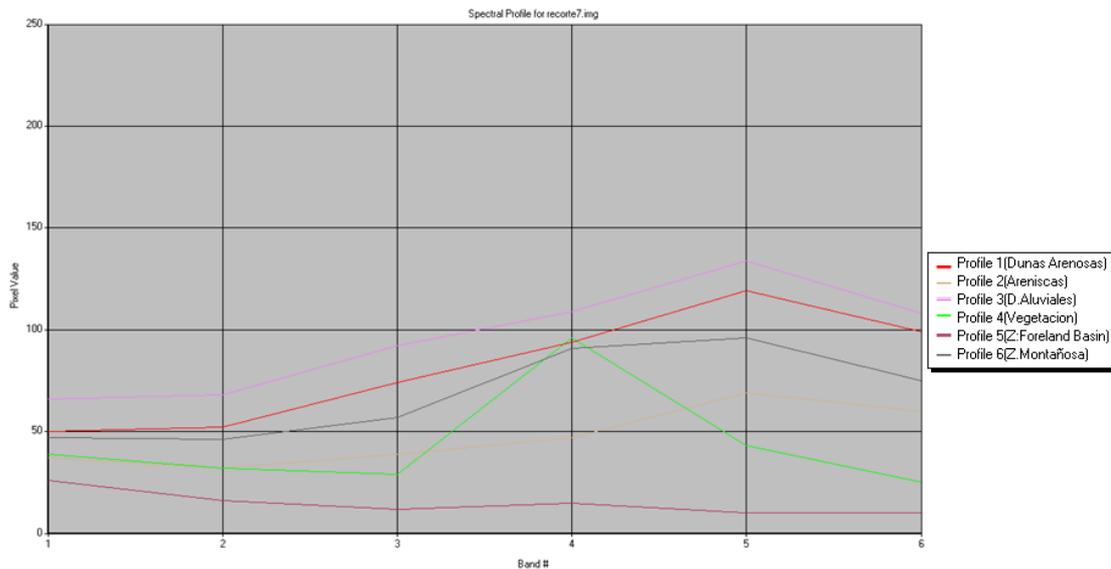


Fig.7.15. Análisis gráfico de las curvas del valor digital de la imagen fusionada en la zona estudio.

El perfil número 4, que aparece en color verde corresponde a la clase espectral que hemos definido como vegetación de regadío. Puede verse que presenta un pico en la banda 4. Esta es la banda del Infrarrojo, la vegetación tiene una gran reflectividad en el infrarrojo, de ahí la presencia del pico en el perfil.

8. CLASIFICACIÓN

8. CLASIFICACIÓN.

8.1. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

La clasificación digital implica categorizar una imagen multibanda. La imagen multibanda se convierte en otra imagen, de igual tamaño y características similares a las originales. La diferencia es que el valor que define a cada píxel ya no es la reflectancia, sino un nuevo nivel digital. Este nuevo nivel digital no tiene relación con la radianza detectada por el sensor, sino que se trata de una etiqueta que identifica la categoría asignada a ese píxel.

Es una clasificación supervisada por el hecho de que definimos nosotros mismos los píxeles pertenecientes a cada clase basándonos en el conocimiento previo de la zona de estudio adquirido mediante el análisis exploratorio realizado en el apartado anterior, a diferencia de la clasificación no supervisada.

El método supervisado parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por información previa o estudios de campo. Así el intérprete puede identificar una serie de áreas en la imagen suficientemente representativas de cada una de las categorías que componen la leyenda. A estas áreas se le denominan áreas de entrenamiento.

Para la realización de la clasificación han de seguirse las siguientes fases:

- Fase de entrenamiento. Definición digital de las categorías.
- Análisis de estadísticas. Proceso operativo.
- Comprobación y verificación de los resultados.
- Conclusiones.

8.1.1. FASE DE ENTRENAMIENTO.

En esta fase se selecciona una muestra de píxeles de la imagen que representen, adecuadamente, las categorías de interés. Esta fase es de vital importancia para obtener unos resultados válidos.

Suelen distinguirse dos tipos de clases: temáticas o informacionales y espectrales. Las primeras son las que constituyen nuestra leyenda de trabajo, y las establece el usuario. Las segundas, corresponden a los grupos de valores espectrales homogéneos dentro de la imagen, en función de ofrecer una reflectancia similar, para las bandas consideradas. Estas últimas se deducen de los valores de reflectancia presentes en la imagen. Idealmente habría de producirse una correspondencia biunívoca entre las dos, es decir que para a cada clase de cobertura le corresponda un único grupo espectral. Normalmente esta situación no suele darse. En la clasificación supervisada lo que se pretende, como objetivo final, es definir clases temáticas, a partir de las clases espectrales obtenidas.

Lo primero que se llevó a cabo fue el establecimiento de una leyenda de las clases temáticas presentes en la imagen. Para ello es necesario el conocimiento de la zona de estudio, adquirido mediante estudios de campo o conocimientos previos.

La toma de datos en campo no ha sido posible realizarla, debido a la situación geográfica de la zona de estudio y de no poder disponer de instrumentación necesaria para ello.

Los conocimientos previos sobre las posibles clases temáticas presentes en la imagen, pueden ser obtenidos mediante consultas a documentos variados. Nuestro conocimiento previo de la zona de estudio se ha basado en documentación sobre su geomorfología y fotointerpretación de la imagen. La fotointerpretación es una técnica basada en la experiencia del operador (sistema experto) como para poder definir una leyenda.

Al disponer sólo de esta información, en principio no ha sido posible el establecimiento de una leyenda de clases temáticas. Pero mediante la escasa información y los procesos realizados con anterioridad, análisis exploratorio (capítulo 7) es posible definir una leyenda de clases espectrales.

Mediante la fotointerpretación es posible distinguir la existencia de zonas artificiales como son las zonas urbanas y vías de comunicación. También se distinguen un núcleo montañoso de posible composición diferente.

El análisis exploratorio evidenciaba la posible existencia de vegetación, tanto de regadío como de matorral.

Mediante el análisis exploratorio se llegó a la conclusión de la posible existencia de 7 clases espectrales dominantes en la imagen, sobre los suelos desnudos que la componen.

En total se ha constituido, para una primera clasificación supervisada, una leyenda con 10 clases espectrales. Tres de uso artificial (caminos, carreteras y zona urbana), dos correspondiente a la posible vegetación de regadío, una correspondiente a la posible zona montañoso, y cuatro a diferentes composiciones de suelo desnudo.

A continuación se presentan las clases espectrales, así como el uso o cobertura que pudiera estar relacionado con ella.

- Clase 1 (Camino de tierra).
- Clase 2 (Carreteras).
- Clase 3 (Poblado).
- Clase 4 (Areniscas).
- Clase 5 (Dunas Arenosas).
- Clase 6 (Zona Montañoso).
- Clase 7 (Zona Cabecera de cuenca hidrográfica).
- Clase 8 (Depósitos Aluviales).
- Clase 9 (Regadío).
- Clase 10 (Matorral).

8.1.1.1. Análisis de las estadísticas de las clases espectrales.

Es preciso evaluar la viabilidad de que las categorías seleccionadas puedan clasificarse sin grave riesgo de error. Si se prueba que dos o más son muy similares habrá una gran probabilidad de confusión entre ellas, por lo que sería aconsejable lo siguiente:

- Confirmar que las estadísticas de entrenamiento han sido obtenidas correctamente.
- Adoptar una leyenda más general, con nuevas categorías que supongan una mezcla de las que ofrecen mayor riesgo de confusión.

En nuestro caso se obtuvieron las estadísticas de cada clase y el diagrama de signatura espectral correspondiente a la medias.

Los estadísticos están constituidos por el valor medio de reflectancia para cada banda y por la desviación típica, que se refiere al grado de homogeneidad que aparece en torno a ese valor central. (Si este valor es muy alto, es que hay una gran diversidad de valores y es más difícil de clasificar, ya que probablemente ofrezca solape con otras categorías).

En el diagrama de signatura el eje de abscisas recoge las bandas que intervienen en el análisis y en el eje de ordenadas los valores de reflectancia medios para esa categoría o clase. Líneas paralelas y próximas indican un probable solape entre categorías, mientras que cruces entre líneas manifiestan las bandas donde es más probable separar las categorías.

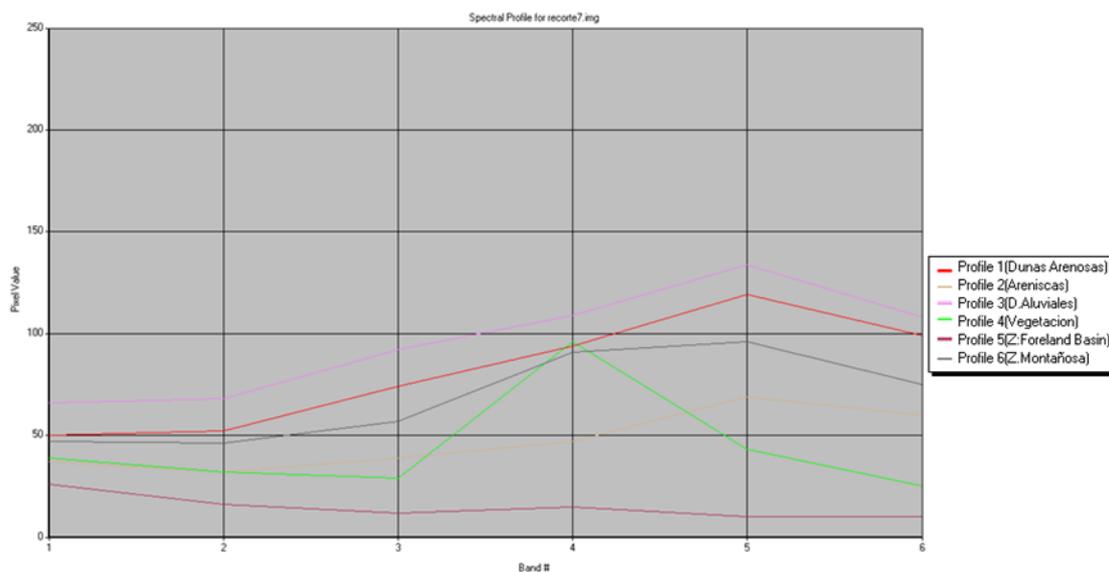


Fig. 8.1. Gráfico de medias de las curvas del valor digital.

La mayor variación se localiza en las bandas 4 y 5. Si comparamos el gráfico observamos que hay gran paralelismo entre líneas y por tanto hay probabilidad de solape entre estas clases. Probablemente generen conflictos en la clasificación, aunque sus valores medios para cada banda son bastante diferentes.

8.1.2. FASE DE ASIGNACIÓN. PROCESO OPERATIVO.

ERDAS IMAGINE 2011 también nos permite realizar clasificaciones supervisadas.

Para acceder a la opción de clasificación supervisada hay que entrar en la pestaña Raster y seguidamente en la pestaña llamada Supervised, se despliega una lista de opciones, elegimos Signature Editor y se abrirá la ventana de trabajo:

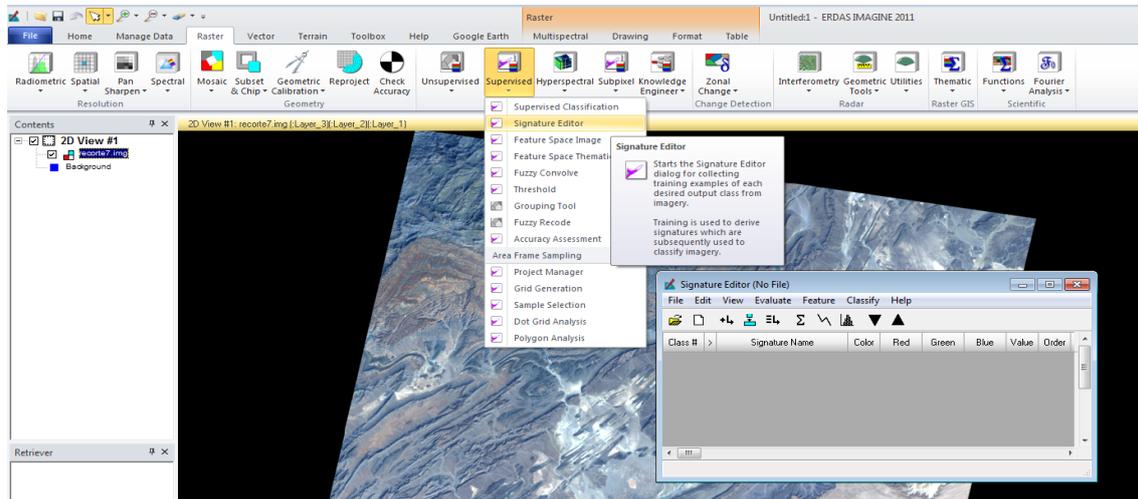


Fig.8.2. Despliegue de ventanas en la opción Signature Editor en ERDAS.

En primer lugar hay que definir el número de píxeles que queremos que seleccione en función del píxel semilla, para poder realizar una mejor clasificación. Para ello creamos un AOI, donde identificaremos los píxeles semilla.

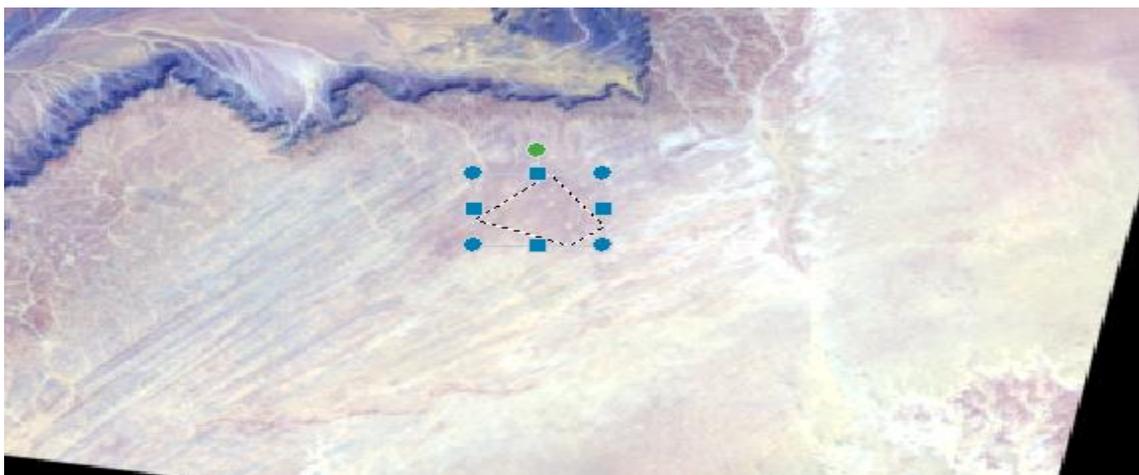


Fig. 8.3. Selección Pixel semilla de Dunas Arenosas.

Una vez definidas las diez clases diferentes de usos, creamos una nueva imagen con una única capa de salida, donde se observara la clasificación supervisada.

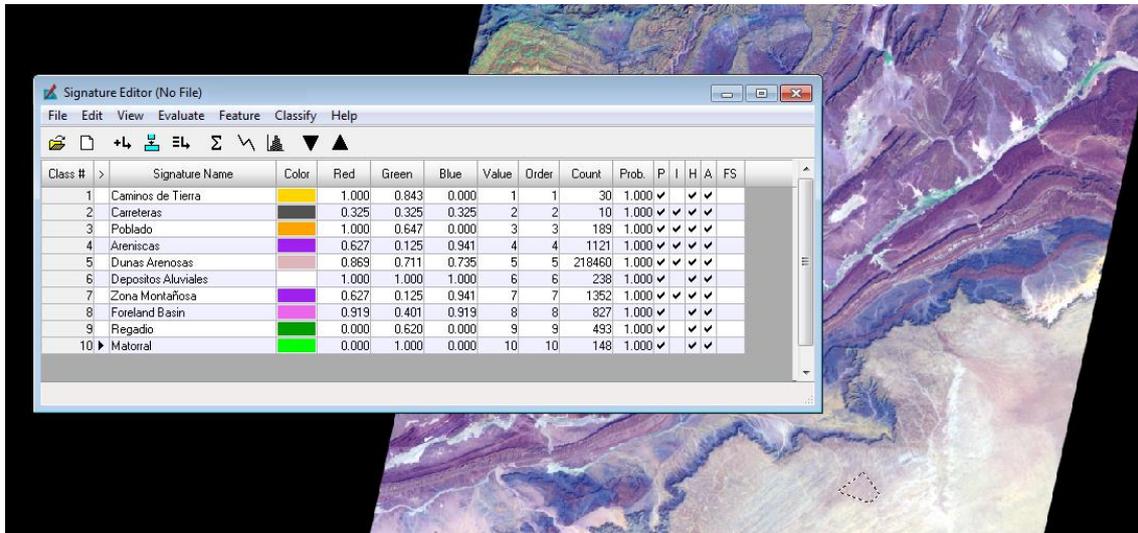


Fig.8.4. Definición de las diferentes clases en ERDAS.

El proceso de clasificación supervisada dura 5 minutos, cuyo fichero de salida es Clasificación.img y un tamaño de 37 MB. Formada por 13926 filas x 14645 columnas x 1 banda.

El resultado es:

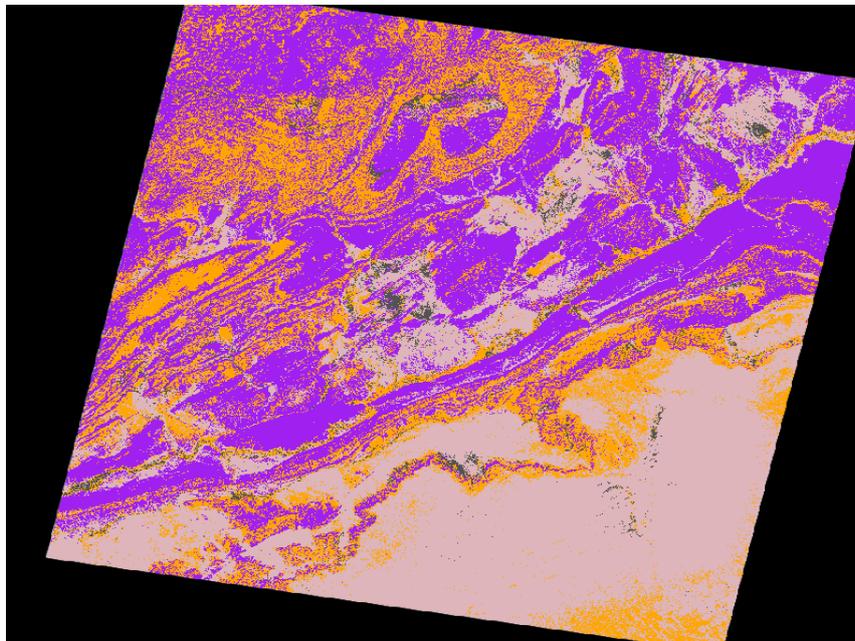


Fig. 8.5. Clasificación supervisada.

Al observar la clasificación, nos damos cuenta que la población y carreteras crean mucho conflicto, asignando la misma clasificación a otra zona de similar valor espectral.

No se puede olvidar que el tamaño del píxel es de 15 m. Este tamaño no tiene porqué ser suficiente para poder definir los elementos artificiales mencionados, siendo estas dos clases poco apreciables hemos realizado una nueva clasificación eliminándolas. Las clases de la nueva clasificación quedarían así:

- Clase 1 (Camino de tierra).
- Clase 2 (Areniscas).
- Clase 3 (Dunas Arenosas).
- Clase 4 (Depósitos Aluviales).
- Clase 5 (Zona Montañosa).
- Clase 6 (Zona Cabecera de cuenca hidrográfica).
- Clase 7 (Regadío).
- Clase 8 (Matorral).

El resultado de la nueva clasificación es el siguiente:

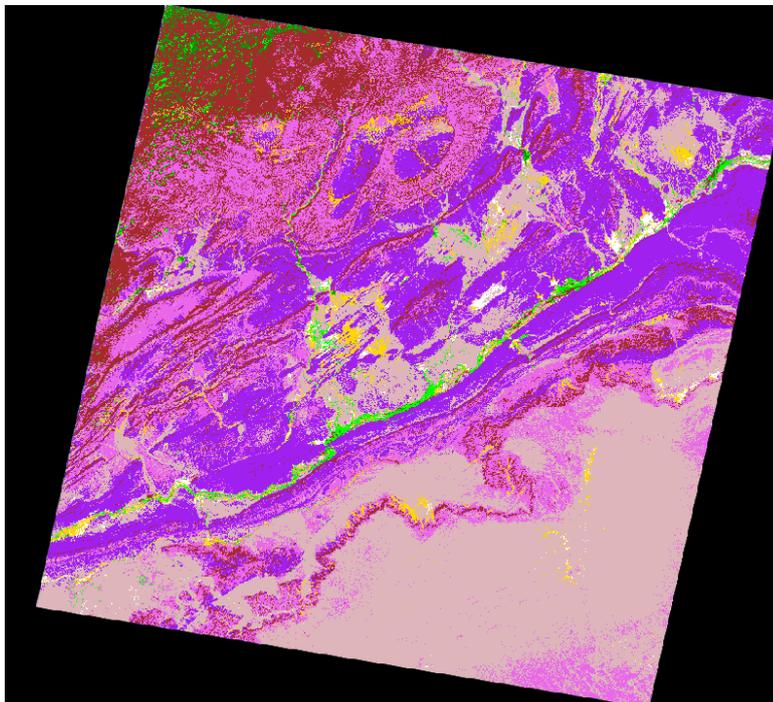


Fig. 8.6. Segunda Clasificación supervisada.

La nueva imagen tiene por nombre Clasificación2.img, con un tamaño de 37 MB y está formada por 13926 filas x 14645 columnas x 1 banda.

8.1.3. COMPROBACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para comprobar la eficacia de la clasificación observamos los valores digitales medios y las desviaciones típicas entre cada clase con cada banda:

Banda	Valores Digitales Medios							
	Camino de Tierra	Areniscas	Dunas Arenosas	Depositos Aluviales	Zona Montañosa	Cabecera de cuenca hidrográfica	Regadio	Matorral
1	62,000	37,882	51,659	73,223	31,881	40,982	38,442	47,568
2	65,400	33,776	55,155	82,685	28,464	45,104	30,034	43,270
3	88,167	38,498	80,184	115,676	33,617	67,727	26,398	44,919
4	105,167	44,955	97,755	134,697	49,332	88,593	85,929	129,189
5	124,100	68,083	121,866	160,739	62,795	128,478	43,418	84,493
6	101,667	62,206	107,574	143,290	51,827	107,565	25,684	53,527

Banda	Camino de Tierra	Areniscas	Dunas Arenosas	Depositos Aluviales	Zona Montañosa	Cabecera de cuenca hidrográfica	Regadio	Matorral
1	2,304	2,035	1,771	2,695	4,348	3,119	1,749	2,067
2	2,943	2,572	2,174	2,844	7,434	4,497	1,971	2,794
3	4,676	3,783	3,835	4,019	12,541	7,403	2,75	5,077
4	5,89	4,964	5,389	4,404	19,342	9,566	7,18	5,964
5	9,672	7,664	6,708	5,224	27,35	14,169	5,695	5,74
6	8,535	6,695	5,199	4,515	23,408	11,528	4,674	6,82

Para una clasificación válida las desviaciones deberían estar en un intervalo de 3 ó 4 .Como podemos observar la mayoría están muy por encima y por debajo, pocas son las que se encuentran en este intervalo. Por lo tanto la zona de error entre clases es muy grande lo que no da una buena clasificación.

8.1.4. CONCLUSIONES.

La conclusión que obtenemos de este proceso, no es satisfactorio, ya que como mencionamos en el capítulo anterior, todas las curvas del valor digital de la imagen tienen una gráfica similar, lo que dificultaría mucho la clasificación.

Estamos realizando una clasificación de usos de suelo, lo cual se hace muy difícil mediante una clasificación matemática, ya que la imagen tiene cantidad de tonalidades parecidas además de las sombras que se confunden con otras clases de las que pertenecen.

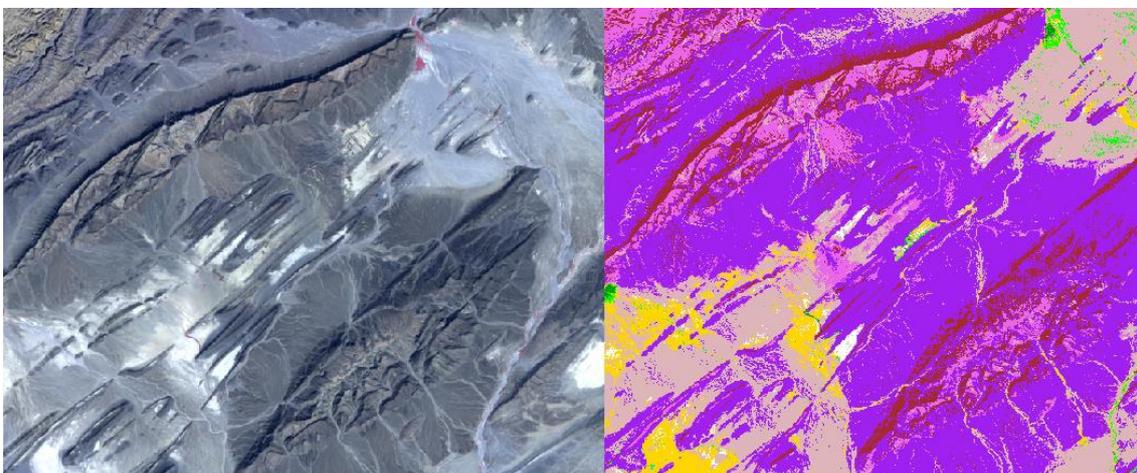


Fig. 8.7. Localización de sombras.

No podemos olvidar que estamos trabajando con una imagen con resolución del pixel igual a 15 metros lo que también dificulta la clasificación matemática.

La vegetación ha sido clasificada de forma satisfactoria:

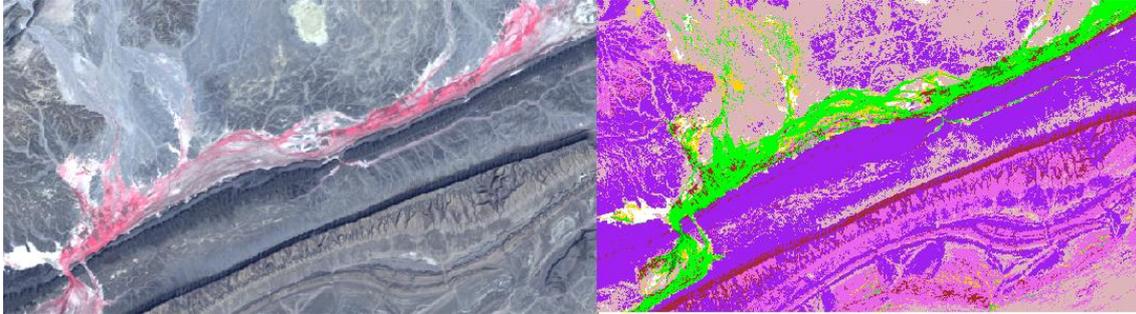


Fig. 8.8. Localización de vegetación.

La solución al problema es realizar una clasificación de los materiales manualmente, utilizando la clasificación matemática de la vegetación ya que aporta un buen resultado. Además es el método de trabajo de los geólogos ya que se ha comprobado que la clasificación matemática no es un método práctico para la clasificación de usos de suelo.

8.2. CLASIFICACION MANUAL.

Como el resultado de la clasificación supervisada no es el esperado, se realizara la clasificación de usos de suelo de manera manual.

El primer paso que hemos realizado es recortar la imagen, para trabajar solo con nuestra zona de interés cuyas coordenadas son:

- Esquina superior izquierda: Latitud: 29°30' N, Longitud: 9°30' O
- Esquina superior derecha: Latitud: 29°30' N, Longitud: 8°30' O
- Esquina inferior izquierda: Latitud: 28° 30' N, Longitud: 9°30' O
- Esquina inferior derecha: Latitud: 28° 30' N, Longitud: 8°30' O

El resultado es una imagen de tamaño 287 MB, llamada recortefinal.img:



Fia. 8.9. Recortefinal.ima.

Como se ha mencionado anteriormente, se utilizará la clasificación de la vegetación, por lo tanto se tiene que eliminar el resto de usos de suelo, para ello abrimos la imagen clasificación2.img, pinchamos en el botón derecho del ratón, elegimos la opción *Display Attribute Table* y nos aparece una tabla en la parte inferior de la tabla, en la pestaña *Opacity* asignamos para todas las clases un cero menos para matorral y regadío que pondremos un uno. Además también tenemos que recortarla ya que la clasificación está hecha de todo la imagen y a partir de ahora trabajaremos con la imagen recortada, a la nueva imagen la llamaremos Clasificacionrecorte.img.



Fig. 8.10. Clasificacionrecorte.img sobre recortefinal.img.

Previo a la clasificación manual mediante el programa *Erdas Imagine 2011* hemos realizado una clasificación manual mediante el programa *Paint*, para hacernos una idea del resultado final. Es una clasificación por edades del suelo de la imagen, a partir de los documentos geológicos que tenemos:

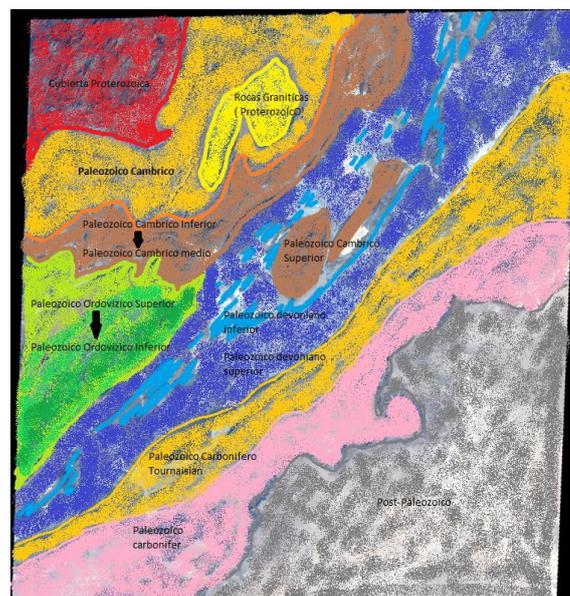


Fig.8.11. Clasificación de la imagen por edades de los materiales.

Antes de dibujar los usos de suelo, se hace una nueva clasificación, puesto que lo haremos manualmente podemos hacer una clasificación más específicas ya que no habrá problema de confusión.

- Clase 1 (Carreteras).
- Clase 2 (Poblados).
- Clase 3 (Areniscas).
- Clase 4 (Depósitos Aluviales).
- Clase 5 (Zona Montañosa).
- Clase 6 (Zona Cabecera de cuenca hidrográfica).
- Clase 7 (Dunas Arenosas).
- Clase 8 (Regadío).
- Clase 9 (Matorral).
- Clase 10 (Localización de pequeños estratos de Calizas y Pizarras).
- Clase 11 (Antiguos cursos fluviales, actualmente subterráneos).

Mediante *Erdas* se dibujan las distintas clases, ayudándonos de *Google Earth* para la localización tanto de los poblados como de las carreteras y superponemos la vegetación (resultado de la clasificación matemática). El resultado es el siguiente:

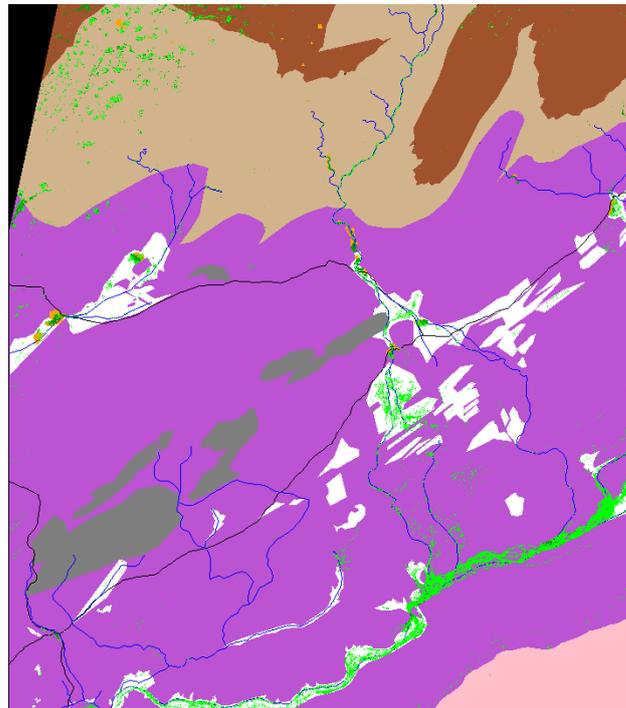


Fig.8.12. Clasificación de usos de suelo.

9. EDICIÓN CARTOGRÁFICA TEMÁTICA

9. EDICIÓN CARTOGRÁFICA TEMÁTICA.

9.1. PROCESO OPERATIVO

Una vez realizada la clasificación y definida la leyenda de coberturas del suelo, se procede al diseño cartográfico para generar la cartografía temática de coberturas superficiales.

ERDAS Imagine 2011 permite opciones válidas a la hora de realizar la edición de la cartografía.

Primero se crea una ventana de mapa donde trabajar, para ello se pincha en *New* → *Map View*, al abrirse la nueva ventana arrastramos la imagen que se va a utilizar de la pantalla *2D View* a la pantalla *Map View*.

La fase siguiente consiste definir las dimensiones papel de nuestra composición y las unidades de medidas, para ello se va al menú *Layout* y se pincha en *Page Size*, se abrirá una ventana donde se define las dimensiones del papel y las unidades.

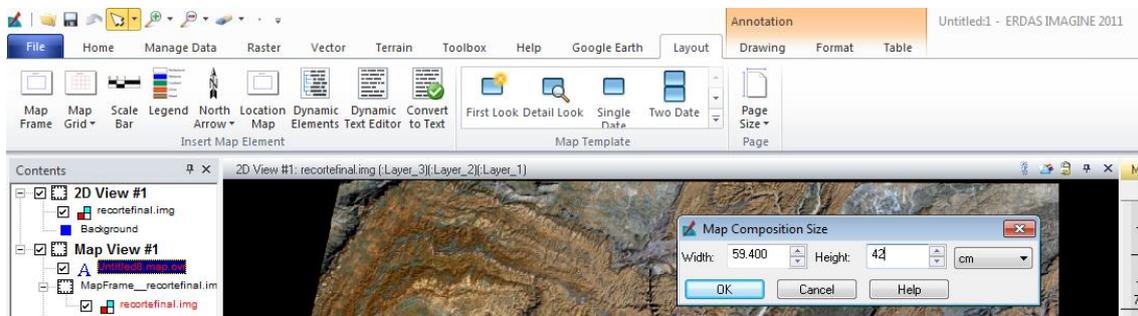


Fig. 9.1. Definición tamaño de página y unidades.

Para un tamaño de A2, las dimensiones son 594 x 420 milímetros.

El siguiente paso es definir la escala de trabajo y el área de la imagen que aparecerá en la cartografía, teniendo en cuenta el límite normal de percepción visual (0.2mm) y el tamaño del pixel (15m), además del tamaño de la imagen. Para introducir la escala se tiene que hacer doble clic sobre el mapa.

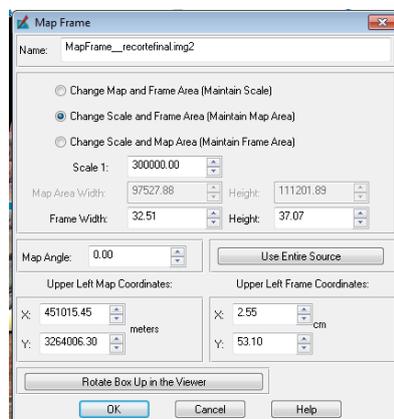


Fig. 9.2. Definición de Escala.

Posteriormente se ha definido un marco y una retícula asociada a la imagen. Esta se ha realizado según las coordenadas de la proyección asociada al sistema de referencia (UTM), huso 29. También se puede definir el meridiano y paralelo origen de la retícula, como el incremento de los meridianos y paralelos que la componen. Se va al menú *Drawing* y se pincha en *Map Grid*, se abrirá una ventana donde se definen los parámetros del marco y la retícula.

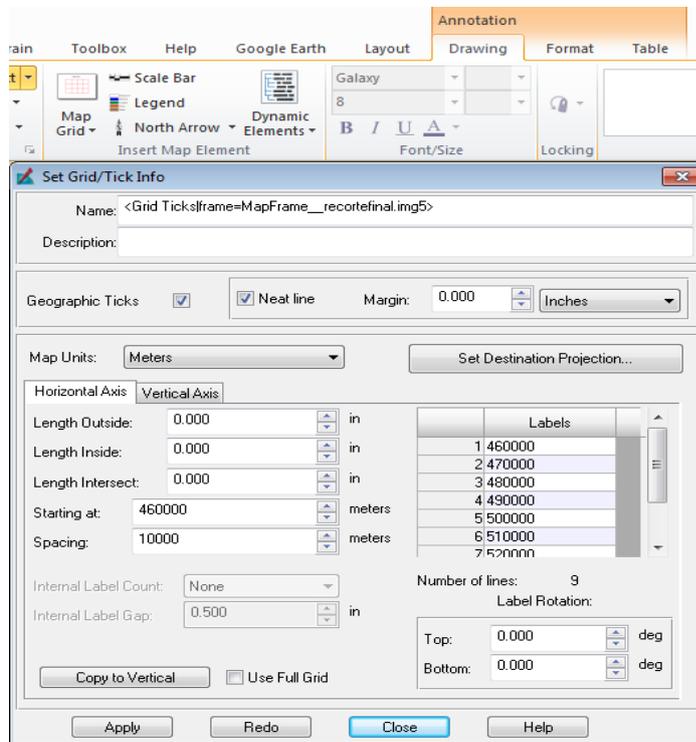


Fig. 9.3. Definición del marco y retícula

Una vez definidos estos parámetros, el último paso es la información adicional contenida en la cartografía. Esta información es la siguiente:

- Leyenda.
- Escala gráfica.
- Gráfico que represente la dirección y sentido del norte geográfico.
- Información sobre la base cartográfica empleado y los procesos realizados.
- Información sobre la autoría de su realización.

9.2. RESULTADOS.

Todas las cartografías tienen una resolución espacial de 15m, en el Sistema de Referencia WGS84 y Sistema de Proyección UTM para el huso 29 y hemisferio Norte.

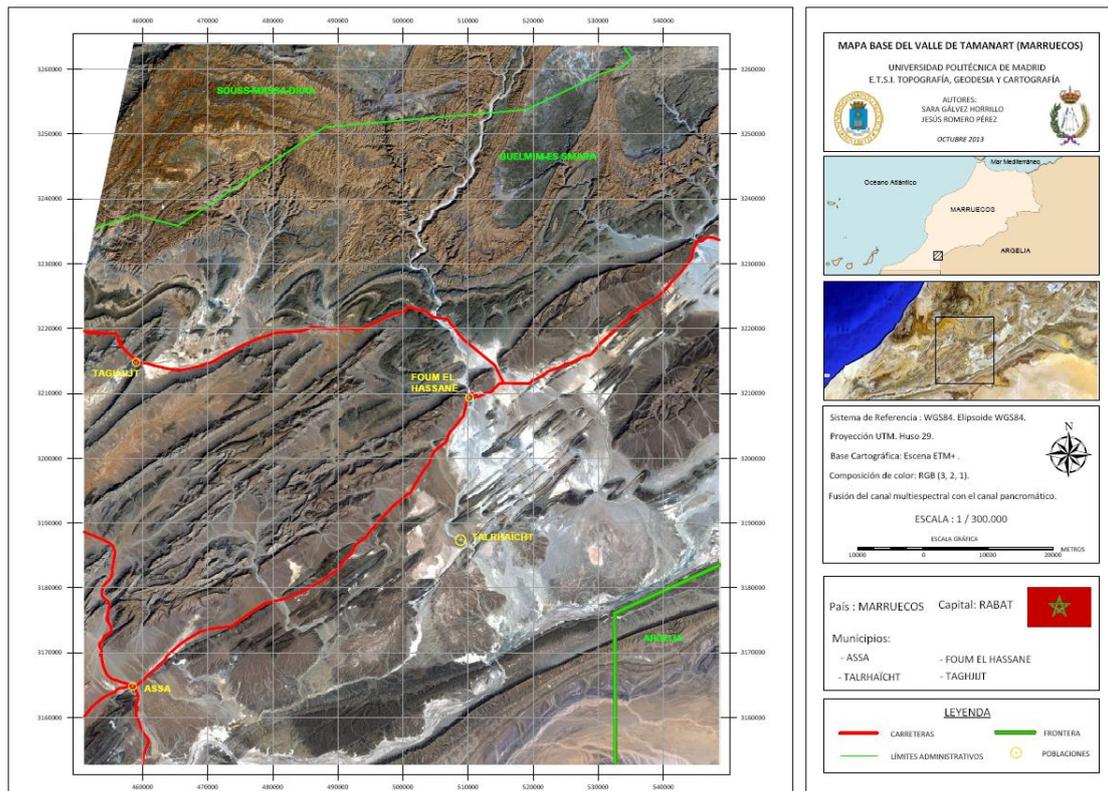
Cartografías:

- Cartografía base del Valle de Tamanart a escala 1/300.000.
- Cartografía temática de coberturas del suelo a escala 1/300.000.
- Cartografía de localización de los yacimientos sobre la cartografía base a escala 1/200.000.
- Cartografía de localización de los yacimientos sobre la cartografía base dividida en dos hojas a escala 1/75000.

Se presenta la cartografía en formato digital y en formato analógico.

El formato digital presenta extensión *.geoTIFF, para no perder la información de la georreferenciación de la imagen.

- Ejemplo:



10. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

10. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL.

El *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) es un sistema de observación espacial que posee la capacidad de capturar imágenes estereoscópicas de una misma porción de terreno. Esta capacidad puede ser aprovechada para la generación de modelos de elevación digital (DEM). En el presente trabajo se describe el proceso seguido para la extracción de DEM a partir de imágenes ASTER.

Los modelos obtenidos se emplean luego en la delimitación de cuencas hidrográficas y el cálculo de sus principales características morfométricas.

El *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) es un sistema de observación orbital puesto en funcionamiento desde 1999 como resultado de la cooperación entre la NASA, el Ministerio de Economía de Japón, el METI y el ERSDAC japonés y su propósito fundamental es el de monitorizar fenómenos relacionados con el medio ambiente y la explotación de recursos naturales. Es parte del sistema EOS (Earth Observing System).

La cobertura de una escena ASTER es de 61.5 Km por 63 Km. Las imágenes Aster capturan información en 15 bandas del espectro electromagnético: cuatro en el espectro visible y el infrarrojo cercano (VNIR, 0.5 μm -1.0 μm) con 15 m de resolución espacial, seis en el Infrarrojo de onda corta (SWIR, 1.0 μm –2.5 μm) con 30 m de resolución espacial y cinco en el infrarrojo térmico (TIR, 8 μm –12 μm) con una resolución espacial de 90 m.

Los archivos se han descargado desde *Earth Explorer*, que está relacionado con *Google Earth*:



Fig.10.1. DEM ASTER descargadas.

En nuestra zona de estudio podemos encontrar cuatro DEM ASTER que contienen información sobre el Modelo Digital del Terreno. Cada imagen contiene dos archivos que se detallan a continuación:

ASTGTM2_N28W009:

- ASTGTM2_N28W009_dem en formato TIFF de 25 MB.
- ASTGTM2_N28W009_num en formato TIFF de 25 MB.

ASTGTM2_N28W010:

- ASTGTM2_N28W010_dem en formato TIFF de 25 MB.
- ASTGTM2_N28W010_num en formato TIFF de 25 MB.

ASTGTM2_N29W009:

- ASTGTM2_N29W009_dem en formato TIFF de 25 MB.
- ASTGTM2_N29W009_num en formato TIFF de 25 MB.

ASTGTM2_N29W010:

- ASTGTM2_N29W010_dem en formato TIFF de 25 MB.
- ASTGTM2_N29W010_num en formato TIFF de 25 MB.

Para generar el modelo de elevación se ha utilizado el programa ArcScene:

ArcScene es un visualizador 3D adecuado para generar escenas con perspectiva que permiten navegar e interactuar con la entidad 3D y los datos de ráster. Basado en OpenGL, ArcScene admite simbología de línea 3D compleja y representación cartográfica de texturas, así como también la creación de superficies y la visualización de TIN. Se cargan todos los datos en la memoria para permitir funcionalidades de navegación, desplazamiento panorámico y zoom relativamente rápidas. Las entidades de vector se representan como vectores, y se realiza un submuestreo de los datos del ráster o se configuran a un número fijo de filas y columnas que establece.

La metodología ha sido la siguiente:

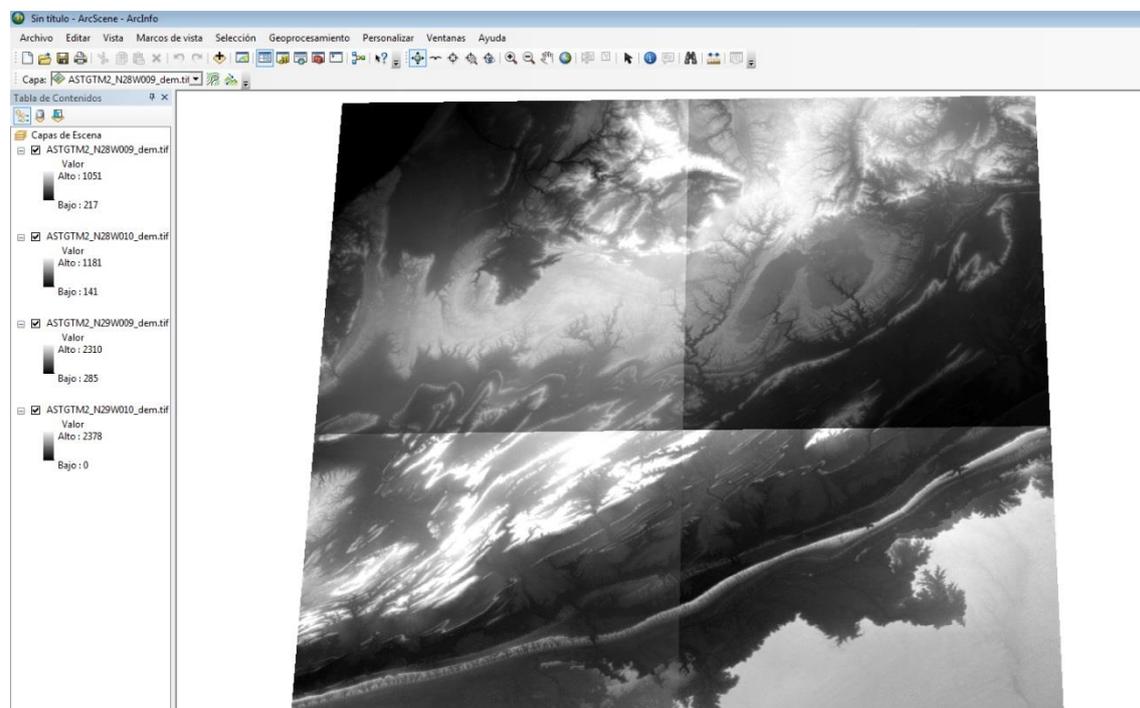


Fig. 10.2. DEM ASTER cargadas.

- Cargamos la imagen de la zona de estudio encima del archivo de elevación. Se hace doble clic en la imagen ráster, para acceder a las propiedades de la imagen, y en la opción de modelos de elevación, en la pestaña de Alturas de base vemos que hay un apartado de Elevación desde superficie, en el que pincharemos la opción flotando en una superficie personalizada y seleccionamos un modelo de elevación de los cuatro que está en la capa de debajo. Repetimos el proceso con los cuatro modelos de elevación, cargando la imagen ráster una vez para cada modelo.

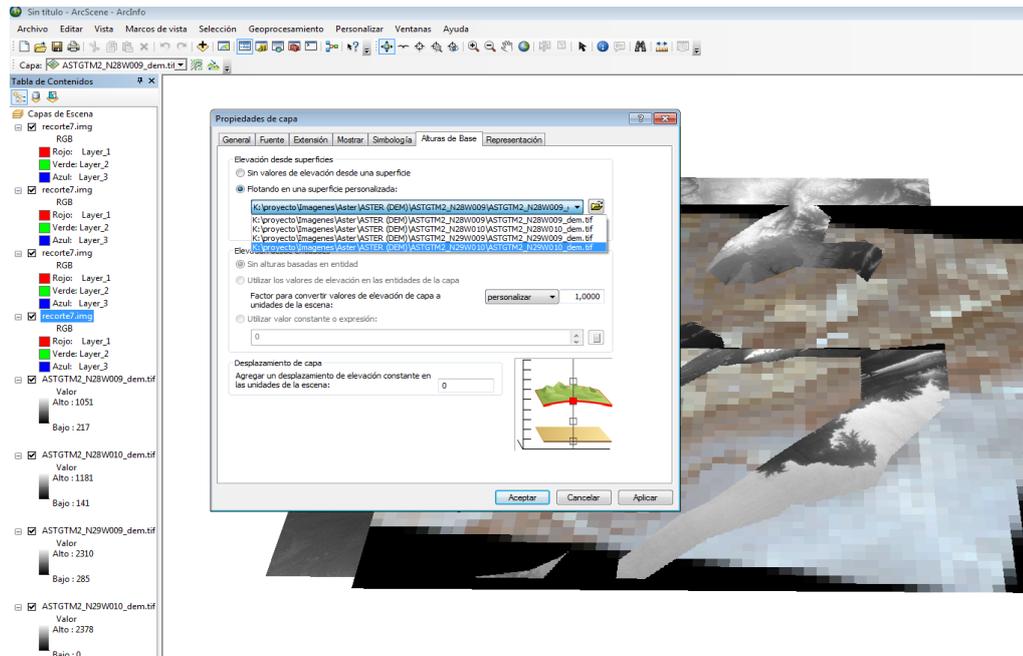


Fig. 10.3. Aplicación el DEM. ArcScene.

- El siguiente paso es exagerar la escala para que se aprecie mejor el relieve además de agregar un desplazamiento de elevación constante en las unidades de la escena. Después de probar con distintos números de exageración, creemos que el adecuado es 6 unidades y el desplazamiento de elevación 2.
- El resultado es el siguiente:

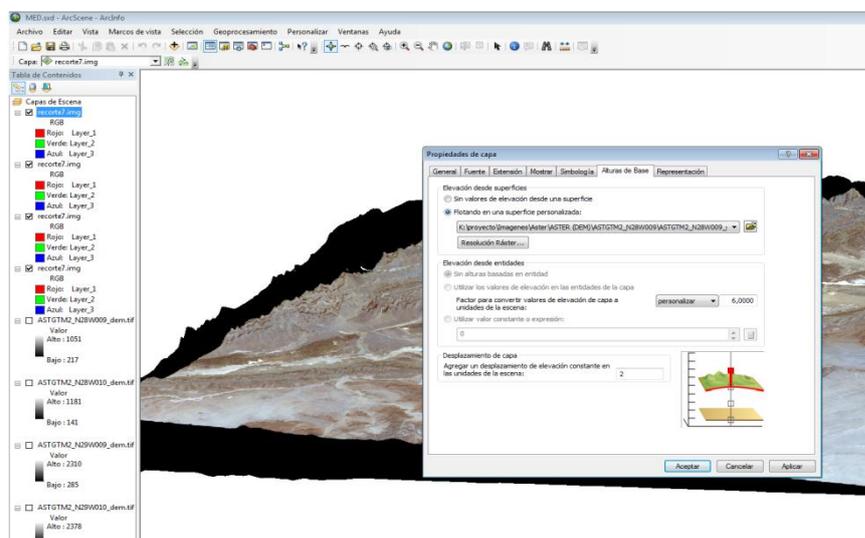


Fig. 10.4. Introducción de escala y elevación.

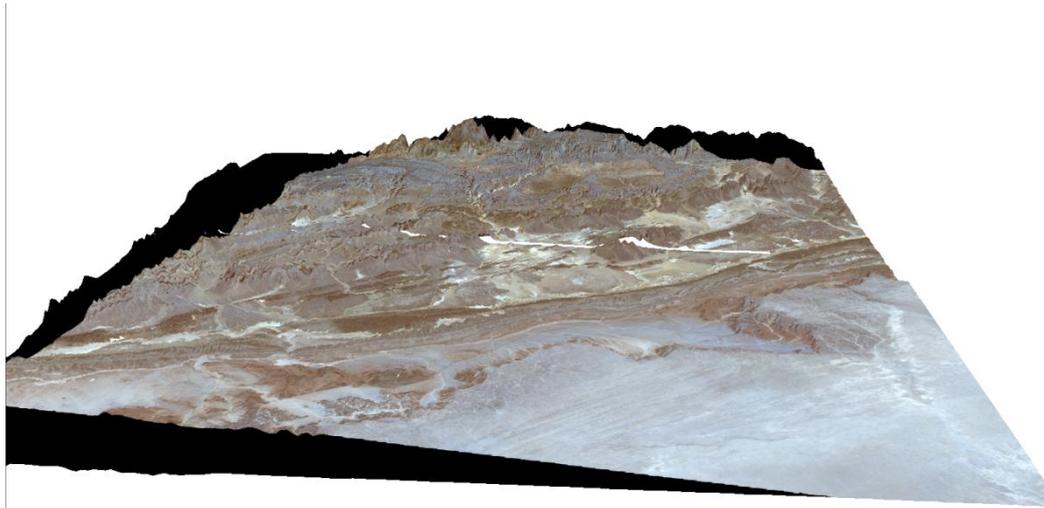


Fig. 10.5. Modelo de Elevación Digital completo

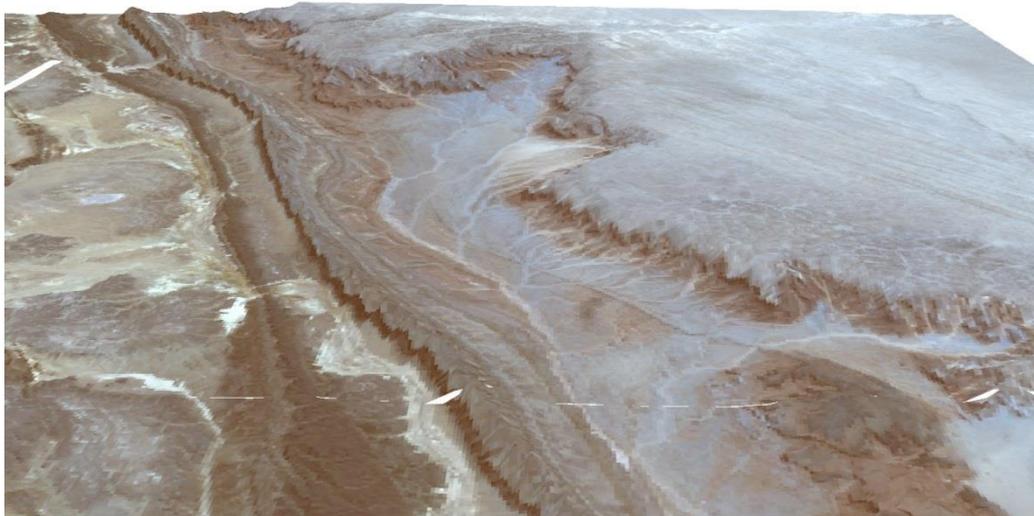


Fig. 10.6. Modelo de Elevación Digital con zoom

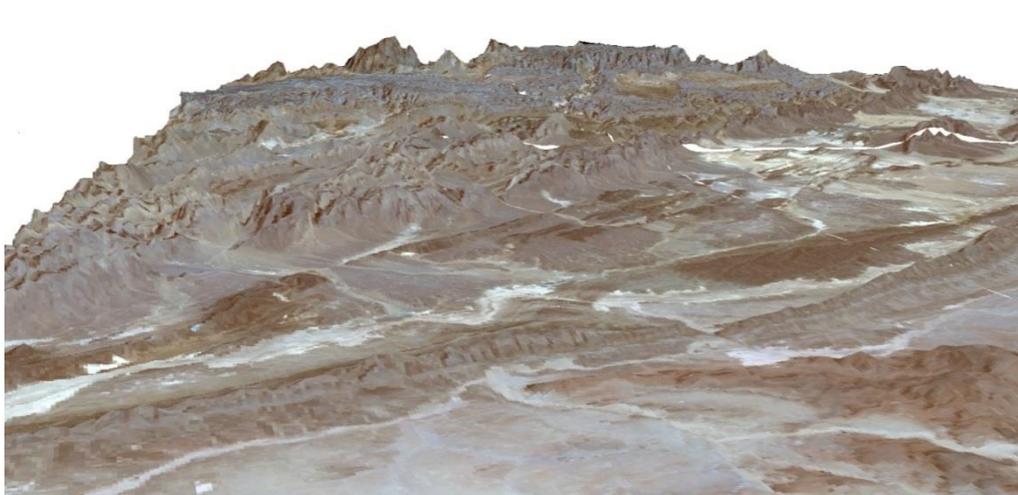


Fig. 10.7. Modelo de Elevación Digital con zoom

11. YACIMIENTOS

11. YACIMIENTOS.

11.1. YACIMIENTOS DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El Proyecto Tamanart, es un proyecto de investigación arqueológica tutelada y desarrollada por la U.N.E.D de España y el Centre National du Patrimoine Rupestre de Marruecos. Esta investigación científica se lleva a cabo en el sur de Marruecos desde hace dos años y tiene como objetivo documentar el arte rupestre de esta zona.

Dentro de la zona de estudio encontramos una gran cantidad de yacimientos arqueológicos con grabados rupestres prehistóricos de gran importancia.

El afloramiento objeto de la campaña 2013 se localiza al sureste de Tanzida y corresponde a un crestón pétreo, de dirección noreste-suroeste, constituido por una alternancia de areniscas, pizarras y lentejones de calizas de edad Devónico.

Las rocas afloran con una dirección N30°E y buzamiento de 15°SE.

Estos estratos de areniscas suelen presentar diaclasado ortogonal a distintas escalas, pudiendo identificarse, sobre todo en el caso de Tachoucalt 2, que este tipo de exfoliación provoca el desarrollo de “exfoliación en bolos”.

Un aspecto fundamental en el estudio “in situ” de los yacimientos es establecer relaciones entre grabados y litología en las que aparecen. El análisis exhaustivo de los yacimientos es concluyente en este sentido: todos los grabados están realizados sobre areniscas. Otra cuestión fundamental es analizar el tipo de superficie sobre la que aparece el grabado; en este caso vemos dos situaciones diferentes: grabados que aparecen sobre una superficie con coloración rojiza por oxidación o grabados que aparecen sobre una pátina negruzca, conocida internacionalmente como “*desert varnish*” y que suele presentar elevadas concentraciones en manganeso.



Fig. 11.1. Alternancia entre estratos de arenisca (1) y estratos de pizarra (2).



Fig. 11.2. Estratos de areniscas (1) con diversos grabados, que en la parte superior presentan abundantes pasadas con restos de bioclastos marinos (2).



Fig. 11.3. Capa de arenisca (1) que en la parte superior aparece fuertemente ferruginizada y con abundantes restos de fósiles resedimentadís (2).



Fig. 11.4. Transición de facies de areniscas estratificadas (1) a calizas masivas (2).



Fig. 11.5. Imágenes correspondientes a las capas de areniscas: a) y b) ferruginizaciones en los techos de los estratos; c) erosión eólica que provoca superficies facetadas; d) detalle de diversas conchas de bioclastos enriquecidos en hierro de origen diagenético; e) dentritas de piro lusita en capas de areniscas y f) estratificación cruzada en areniscas rojizas



Fig. 11.6. Tipos de diaclasado y fragmentación en las areniscas: a) y b) diaclasado ortogonal que afecta a numerosos grabados realizados en la superficie de un estrato; c) detalle de la fragmentación causada por el diaclasado ortogonal; d) ejemplo de exfoliación en bolos; e) y f) detalles de areniscas que muestra roturas con morfología concoidal.

11.2. DATOS DE CAMPO.

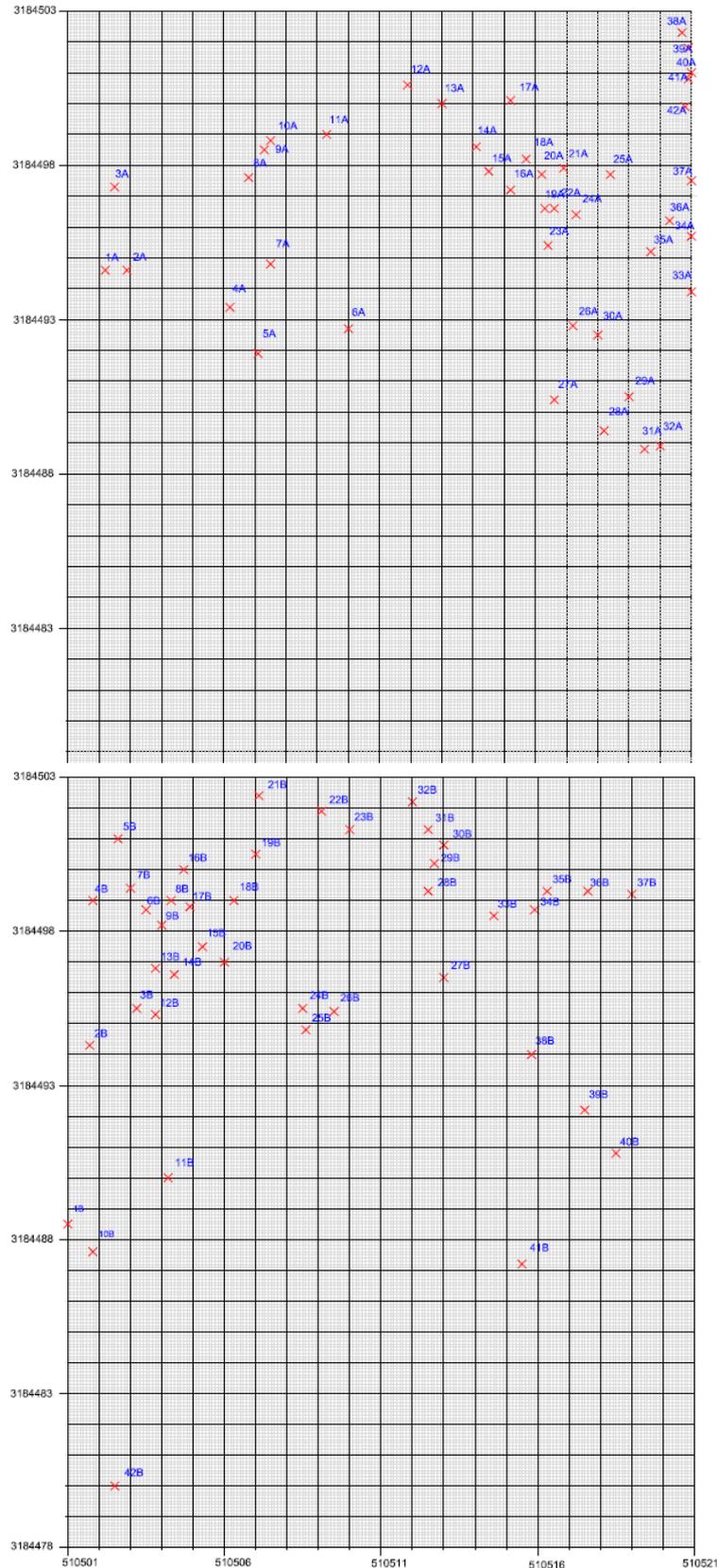
Resultado de la campaña realizada en Abril del 2013, nos fueron proporcionadas las coordenadas de los siguientes yacimientos:

1. **OUKAS:** UTM 29R, 513789 E, 3253616 N
2. **IMI N'TART 1:** UTM 29 R, 501085 E, 3230813 N
3. **IMI N'TART 2:** UTM 29R, 500883 E, 3230715 N
4. **IMI OUZLA:** UTM 29 R, 501850 E, 3229607 N
5. **AGADIR N'TABSIST:** UTM 29R, 500456 E, 3229718 N
6. **AMGRD N'TÁAYALINE:** UTM 29R, 500816 E, 3229920 N
7. **ASBA AÏT HARBIL:** UTM 29R, 505819 E, 3224367 N
8. **TISSEFRIOUINE 1:** UTM 29R, 511602 E, 3219043 N
9. **TISSEFRIOUINE 2:** UTM 29R, 512157 E, 3219652 N
10. **MOUMERSAL 1 y 2:** UTM 29R, 529838 E, 3216993 N
11. **MOUCHAOUF:** UTM 29R, 528321 E, 3215830 N
12. **TIRCHT 1:** UTM 29R, 509220 E, 3212775 N
13. **TIRCHT 2:** UTM 29R, 509162 E, 3213193 N
14. **TIRCHT 3:** UTM 29R, 509153 E, 3213310 N
15. **TIRCHT 4:** UTM 29R, 509400 E, 3213088 N
16. **TIRCHT 5:** UTM 29R, 509427 E, 3213272 N
17. **TIRCHT 6:** UTM 29R, 509559 E, 3213394 N
18. **TIRCHT 7:** UTM 29R, 510825 E, 3213753 N
19. **TIRCHT 8:** UTM 29R, 509699 E, 3213699 N
20. **ICHT:** UTM 29R, 510829 E, 3213746 N
21. **SIDI ABDESSAMAD:** UTM 29R, 509718 E, 3210984 N
22. **WAZZOUZOUNT:** UTM 29R, 511131 E, 3203604 N
23. **BOUTAMMAYTE:** UTM 29R, 515368 E, 3198532 N
24. **TIRHERT – TIGHIRTE:** UTM 29R, 507144 E, 3200327 N
25. **TANZIDA 1:** UTM 29R, 509017 E, 3187631 N
26. **TANZIDA 2:** UTM 29R, 510342 E, 3186727 N
27. **TACHOKALT 1:** UTM 29R, 510443 E, 3183180 N
28. **TACHOKALT 2:** UTM 29R, 510527 E, 3184715 N
29. **IGHIR IGHNAÏN:** UTM 29R, 505220 E, 3228880 N
30. **ANOU N'LHAJ – ANOU EL-HAJJ:** UTM 29R, 518320 E, 3197463 N

Ubicación de la situación de los 84 paneles del yacimiento Tachokalt.

En el yacimiento Tachokalt se obtuvo la situación de los paneles que se encontraron, proporcionando las coordenadas de todos ellos:

Paneles del sector A: Del 1A al 42A Paneles del sector B: Del 1B al 42B



Las coordenadas de los 84 paneles del yacimiento Tachokalt son:

Coordenadas de los 84 paneles					
A	X	Y	B	X	Y
1	510482,2	3184494,6	1	510501,0	3184488,5
2	510482,9	3184494,6	2	510501,7	3184494,3
3	510482,5	3184497,3	3	510503,2	3184495,5
4	510486,2	3184493,4	4	510501,8	3184499,0
5	510487,1	3184491,9	5	510502,6	3184501,0
6	510490,0	3184492,7	6	510503,5	3184498,7
7	510487,5	3184494,8	7	510503,0	3184499,4
8	510486,8	3184497,6	8	510504,3	3184499,0
9	510487,3	3184498,5	9	510504,0	3184498,2
10	510487,5	3184498,8	10	510501,8	3184487,6
11	510489,3	3184499,0	11	510504,2	3184490,0
12	510491,9	3184500,6	12	510503,8	3184495,3
13	510493,0	3184500,0	13	510503,8	3184496,8
14	510494,1	3184498,6	14	510504,4	3184496,6
15	510494,5	3184497,8	15	510505,3	3184497,5
16	510495,2	3184497,2	16	510504,7	3184500,0
17	510495,2	3184500,1	17	510504,9	3184498,8
18	510495,7	3184498,2	18	510506,3	3184499,0
19	510496,3	3184496,6	19	510507,0	3184500,5
20	510496,2	3184497,7	20	510506,0	3184497,0
21	510496,9	3184497,9	21	510507,1	3184502,4
22	510496,6	3184496,6	22	510509,1	3184501,9
23	510496,4	3184495,4	23	510510,0	3184501,3
24	510497,3	3184496,4	24	510508,5	3184495,5
25	510498,4	3184497,7	25	510508,6	3184494,8
26	510497,2	3184492,8	26	510509,5	3184495,4
27	510496,6	3184490,4	27	510513,0	3184496,5
28	510498,2	3184489,4	28	510512,5	3184499,3
29	510499,0	3184490,5	29	510512,7	3184500,2
30	510498,0	3184492,5	30	510513,0	3184500,8
31	510499,5	3184488,8	31	510512,5	3184501,3
32	510500,0	3184488,9	32	510512,0	3184502,2
33	510501,0	3184493,9	33	510514,6	3184498,5
34	510501,0	3184495,7	34	510515,9	3184498,7
35	510499,7	3184495,2	35	510516,3	3184499,3
36	510500,3	3184496,2	36	510517,6	3184499,3
37	510501,0	3184497,5	37	510519,0	3184499,2
38	510500,7	3184502,3	38	510515,8	3184494,0
39	510500,9	3184501,8	39	510517,5	3184492,2
40	510501,0	3184501,0	40	510518,5	3184490,8
41	510500,9	3184500,8	41	510515,5	3184487,2
42	510500,8	3184499,9	42	510502,5	3184480,0

11.3. LOCALIZACIÓN DE LOS YACIMIENTOS

En este apartado se procede a localizar tanto los yacimientos como los paneles de la zona de estudio.

Como se ha visto en los capítulos anteriores, la escena está preparada. Por lo tanto se puede proceder directamente a la localización de los yacimientos. Para ello, como para casi todo el proyecto, se ha utilizado *ERDAS IMAGINE 2011*.

- Resultados:

Primero se ha realizado la localización de los yacimientos, el fichero resultante se ha denominado Yacimientos.ovr y tiene un tamaño de 76KB:



Fig. 11.7. Localización de los 31 yacimientos.



Fig. 11.8. Zoom del yacimiento.



Fig. 11.12. Zoom de los yacimientos del 13 al 22.



Fig. 11.9. Zoom de los yacimientos del 2 al 8.

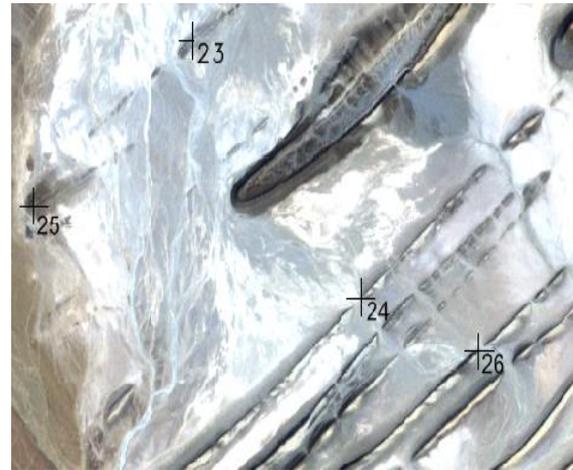


Fig. 11.13. Zoom de los yacimientos del 23 al 26.



Fig. 11.10. Zoom de los yacimientos 9 y 10.



Fig. 11.14. Zoom de los yacimientos del 27 al 29.



Fig. 11.11. Zoom de los yacimientos 11 y 12.

Por último se ha realizado la localización de los paneles correspondientes al yacimiento Tachokalt, teniendo en cuenta que la máxima distancia entre los paneles son 20 metros y que la resolución espacial del pixel es de 15 metros, el resultado no es nada satisfactorio ya que se distribuyen las 84 rocas en 6 pixeles y para que se aprecie la diferencia entre ellas hay que hacer demasiado zoom. El fichero resultante se llama TACHOKALT.ovr y ocupa 1.94 MB:

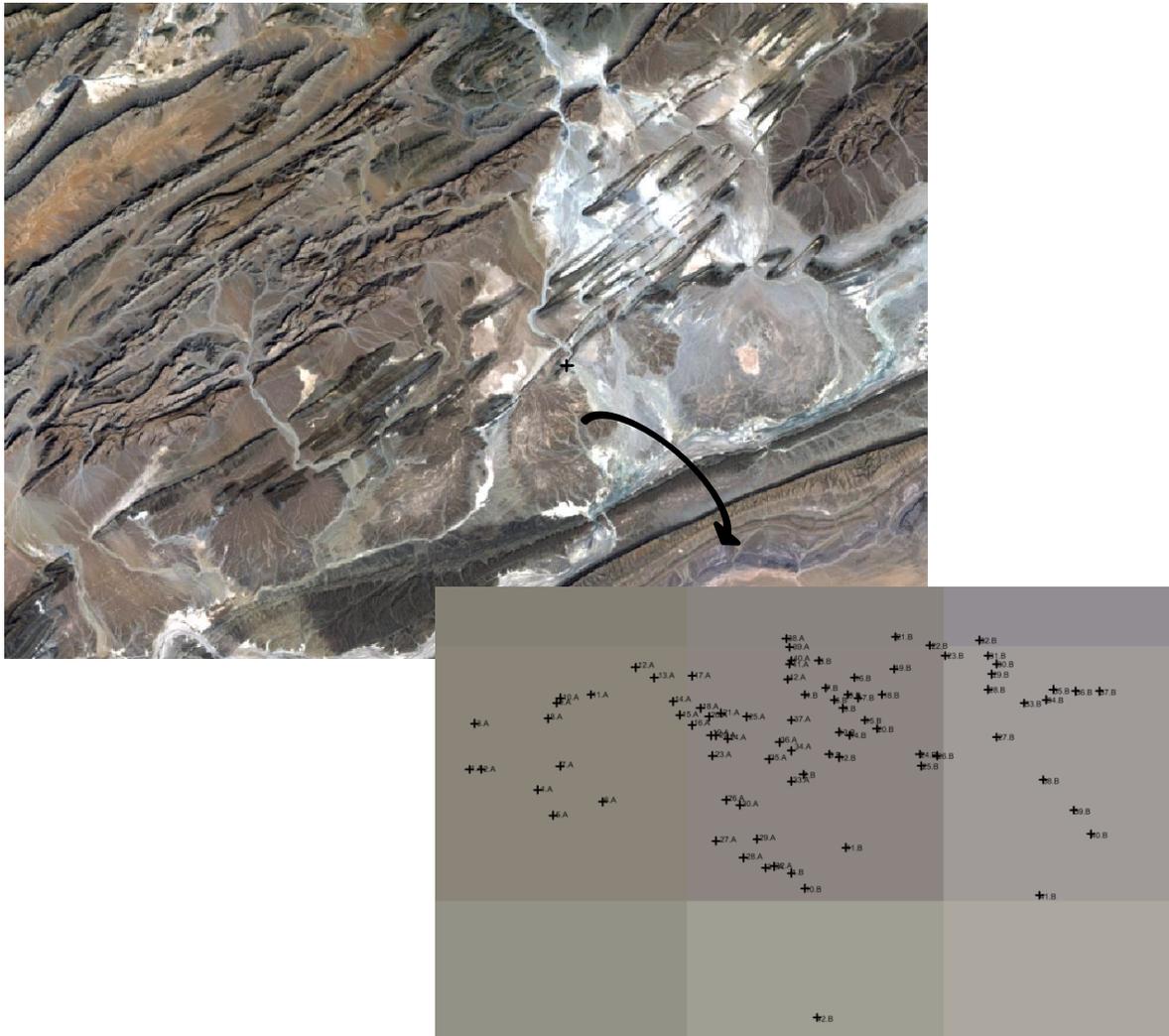


Fig. 11.15. Localización de las 84 rocas del yacimiento Tachokalt.

12. ANEXOS

12. ANEXOS.

12.1. ANEXO I: FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN.

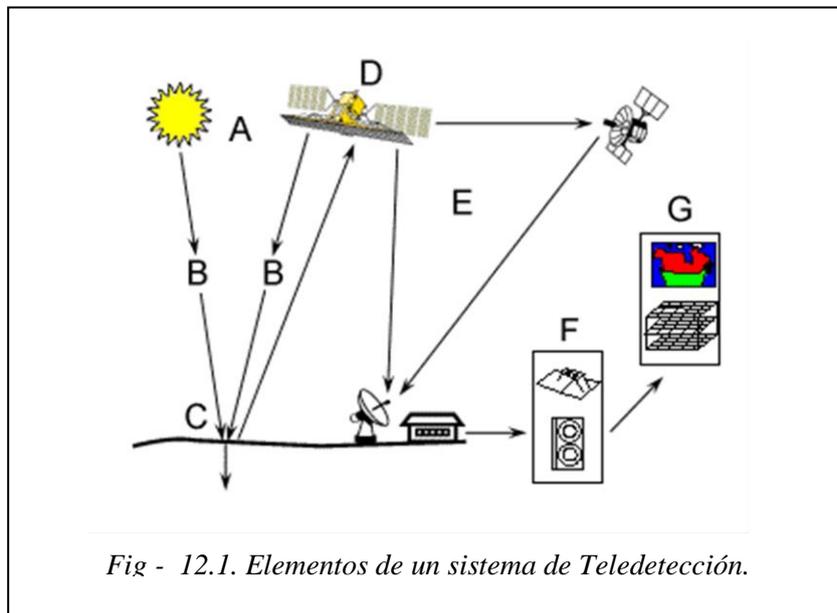
La teledetección o percepción remota es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos terrestres y planetarios. La teledetección supone la adquisición de información a distancia, sin contacto directo con el objeto estudiado. Sus principales fuentes de información son las medidas y las imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas y espaciales.

FUNDAMENTOS FÍSICOS DE TELEDETECCIÓN.

Los fundamentos físicos de la teledetección espacial son compartidos con otros sistemas de teledetección (fotografía aérea, televisión...), ya que todos se basan en la medida de la radiación electromagnética emitida o reflejada por los objetos, como respuesta a la incidencia de una radiación natural (luz solar) o artificial (radar). En el primer caso se habla de teledetección pasiva y en el segundo de teledetección activa.

- **Fundamentos básicos.**

El sistema de teledetección consta de diferentes elementos que se interrelacionan. En el caso de un sistema de teledetección de la superficie terrestre basado en ondas electromagnéticas se caracteriza por los siguientes elementos:



- **La fuente de energía (A):** Es la que da origen al flujo energético que es detectado por el sensor. Si el origen del flujo energético está en el propio sensor se denomina teledetección activa y si es una fuente externa a éste, como el Sol, se denomina teledetección pasiva.

- **La radiación y la atmósfera (B):** Cuando la energía recorre el camino desde la fuente hasta el objeto de la superficie terrestre, atraviesa e interactúa con la atmósfera. Este fenómeno se produce también en el camino desde el objeto hasta el sensor.
- **Interacción con el objeto de interés (C):** Cuando la energía llega a la tierra interactúa con el objeto de interés, conformando las diversas coberturas de la tierra tales como las vegetales, suelos, agua etc. Debido a esa interacción energía-objeto, y dependiendo de las características del objeto, la radiación será reflejada, absorbida (y posteriormente emitida) o transmitida a través del mismo.
- **Sistema del Sensor o Receptor de Radiación (D):** Es el que capta, codifica y graba la radiación que devuelve el objeto en tierra, enviándolo posteriormente al sistema de recepción en tierra.
- **Sistemas de Recepción (E):** Aquí los datos recibidos en formato digital son pre-procesados para obtener una imagen, en soporte papel o digital.
- **Interpretación y Análisis (F):** La imagen pre-procesada es interpretada de forma analógica o digital para evaluar el problema.
- **Aplicación (G):** El usuario final realiza las aplicaciones con la información extraída de la imagen, entendiendo el comportamiento de los objetos de interés registrados para la solución del problema planteado.
- **Radiación electromagnética. Espectro electromagnético.**

En un sistema de teledetección terrestre, las ondas electromagnéticas son consideradas como las portadoras de la información, y por ello serán estudiadas en este apartado.

La radiación electromagnética se genera a partir de la transformación de otras formas de energía como son la energía cinética, química, térmica, eléctrica, magnética o nuclear. Las ondas electromagnéticas son las portadoras de la energía radiante. Al proceso físico que la genera se le llama radiación.

Esta radiación electromagnética es creada en todo punto del espacio por un doble campo periódico: el campo eléctrico y el campo magnético; que son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación. Las propiedades magnéticas y eléctricas de la materia modifican las ondas que interactúan con ella. La Teledetección es posible gracias a la interacción de un flujo energético con las cubiertas terrestres, considerando tanto la dirección como la cantidad de flujo recibido por el sensor permitiendo relacionar éste con el objeto de interés. Este flujo se ve afectado por diversos factores, entre otros:

- Influencia de la atmósfera: dispersión (difusión), absorción y refracción.
- Ángulo de iluminación solar: depende de la fecha del año y la hora de medición.
- Relieve: orientación, pendiente.
- Variaciones medioambientales de la superficie: asociación con otras cubiertas.

Una onda electromagnética resulta de la propagación simultánea en el espacio de un campo eléctrico y otro magnético variables y, dada su forma de propagación, los diferentes tipos se definen por la longitud de onda o por la frecuencia. La longitud de onda expresa el carácter periódico de esta perturbación, y vendría definida como la distancia entre dos picos contiguos de uno de los campos, midiéndose en unidades de longitud (mts, mm....). La frecuencia mediría el número de ciclos por unidad de tiempo que pasan por un punto fijo, midiéndose en hercios.

Las propiedades de la radiación electromagnética se han explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas: la teoría ondulatoria y la teoría corpuscular:

- Teoría ondulatoria

Propone que la naturaleza de la luz es ondulatoria y se transmite siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s . Está formada por dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético. Las características de esta onda pueden describirse con dos parámetros, (longitud de onda y frecuencia).

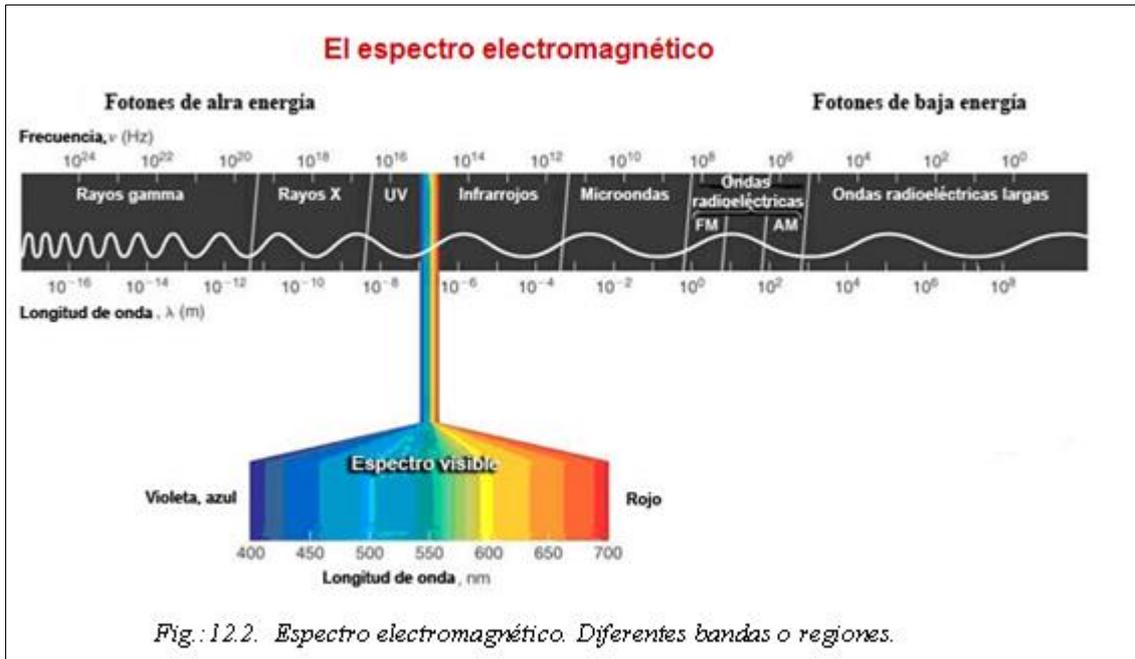
- Teoría corpuscular

Según esta teoría la luz es una sucesión de unidades discretas de energía (fotones) con masa iguala cero. Son paquetes discretos o quantums de energía. Esta teoría cubre las deficiencias de la formulación de Maxwell cuando trata de explicar ciertos fenómenos significativos de interacción de la radiación electromagnética y la materia.

Actualmente se considera que la radiación electromagnética presenta una doble naturaleza, ondulatoria y corpuscular, la primera se manifiesta en los fenómenos de propagación y la segunda en su interacción con la materia.

Tanto la longitud de onda como la frecuencia permiten clasificar los diferentes tipos de energía electromagnética, recibiendo todos, en conjunto, el nombre de espectro electromagnético, y recibiendo denominaciones particulares cada una de las porciones del mismo (visible, ultravioleta, infrarrojo...). Como la velocidad de propagación es la misma para todos los tipos de energía electromagnética, existe una relación inversamente proporcional entre longitud de onda y frecuencia, es decir, a mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa, utilizándose ambos valores, de forma indiferente, para la clasificación de las ondas electromagnéticas.

El espectro electromagnético representa la continuidad de la energía electromagnética desde longitudes de onda muy cortas (rayos cósmicos y rayos gamma) a longitudes muy largas (radio y televisión) dividiéndose en bandas donde la radiación electromagnética presenta un comportamiento similar o son generadas por mecanismos similares. Sin embargo estas divisiones no son definidas exactamente y una región se confunde con otra.



Los intervalos más usuales en Teledetección son:

- Visible: Longitud de onda ($0.4 \mu\text{m} - 0.7 \mu\text{m}$)
- Infrarrojo próximo: Longitud de onda ($0,7\mu\text{m} - 1.3 \mu\text{m}$)
- Infrarrojo medio: Longitud de onda ($1.3 \mu\text{m} - 3 \mu\text{m}$)

Se denomina región óptica del espectro al intervalo de entre $0,3 \mu\text{m}$ y $15 \mu\text{m}$.

Las bandas de radio ocupan la región de $\lambda > 10 \text{ cm}$ y es utilizada también por los sensores activos como radares, altímetros, sondas y en menor medida por radiómetros pasivos.

Las bandas de microondas van desde la anterior hasta λ de 1mm . La mayor parte de las interacciones están regidas por rotaciones moleculares, particularmente las de λ más cortas. Es la región más utilizada por radiómetros / espectrómetros de microondas y sistemas radar.

Las bandas del infrarrojo cubren la región espectral desde longitudes de onda del orden de 1 mm hasta $0.7 \mu\text{m}$. Esta región se divide en subregiones llamadas submilimétricas, IR lejano, IR medio e IR próximo. En esta región se produce gran parte de la radiación electromagnética debida a las rotaciones y vibraciones moleculares, se utilizan, para teledetección, espectrómetros, radiómetros, polarímetros y láseres. En la región vecina al infrarrojo, la del visible ($0.4 \mu\text{m} - 0.7 \mu\text{m}$), juega un papel determinante la energía de los niveles electrónicos.

En la región del ultravioleta ($0.4 \mu\text{m}$ a 300 Angstroms), al igual que en el visible, la energía de los niveles electrónicos se encuentra en la explicación de las interacciones onda-materia. Los sensores de ultravioletas se han utilizado, principalmente, para el estudio de atmósferas planetarias o para estudiar superficies sin atmósfera debido a la opacidad de los gases en estas pequeñas longitudes de onda.

Los rayos X (de 300 a 0.3 Angstroms) y los rayos gamma (menos de 0.3 Angstroms) se han utilizado en menor medida para estudiar la opacidad atmosférica. Su utilización se ha limitado a plataformas de vuelo a baja altura o al estudio de superficies sin atmósfera.

A continuación se definirán los términos más relevantes empleados en teledetección, así como sus unidades de medida.

- Energía radiante (Q):

Es el total de energía radiada en todas las direcciones. Se mide en Julios (J).

- Densidad de energía radiante (W):

Es la cantidad de energía por unidad de volumen. Se mide en Julios por metro cúbico.

$$W = \frac{\partial Q}{\partial V}$$

- Flujo radiante (Φ):

Es la cantidad de energía radiada por unidad de tiempo en todas las direcciones. Se mide en watios W, J/s.

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

- Densidad de flujo radiante (E, M):

Flujo radiante interceptado por la unidad de área de una superficie plana. Se mide en watios por metro cuadrado $\rightarrow W / m^2$.

$$E, M = \frac{\partial \Phi}{\partial A}$$

Particularizando se denomina:

- *Irradianza (E):* Si el flujo es entrante hacia la superficie.
- *Excitancia o emitancia radiante (M):* Si el flujo es saliente de la superficie.

- Intensidad radiante (I):

Es el flujo radiante desde una fuente puntual saliendo de una fuente puntual en una dirección por unidad de ángulo sólido. Se mide en watios por estereorradián W / Sr.

$$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \Omega}$$

- Radianza (L):

Es el total de energía radiada por una superficie en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida.

$$L = \frac{\partial I}{\partial A \cdot \cos \theta}$$

Se mide en watios por metro cuadrado y por estereorradián W / m² · sr.

Por extensión de lo anterior, la radianza espectral (L_T) indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Se trata de la medida más cercana a la observación remota. Se mide en $W / m^2 \cdot sr \cdot \mu m$.

$$L_T = \frac{\partial L}{\partial \lambda}$$

- Albedo:

Es otra variable que mide la radiación reflejada por los cuerpos. Es la relación entre la totalidad de la luz reflejada por la superficie y la totalidad de la luz incidente sobre la misma. Se considera la luz incidente y reflejada en todo el rango espectral y en todas las direcciones, al contrario que la reflectancia que suele referirse a una determinada longitud de onda y en el caso del satélite a una dirección.

Cuando un flujo de energía radiante (Φ) alcanza la superficie de un determinado material, una parte de esa radiación es reflejada otra es absorbida y otra es transmitida generando los diferentes flujos respectivamente Φ_r , Φ_a , Φ_t . Tendremos así que:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \qquad 1 = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} + \frac{\Phi_a}{\Phi_i} + \frac{\Phi_t}{\Phi_i} = \rho + \alpha + \tau$$

La relación entre las tres magnitudes no es constante, sino que varía con cada longitud de onda, por lo que tendríamos:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda$$

- Emisividad (e):

Relación entre la emitancia de una superficie (M) y la que daría un emisor perfecto (cuerpo negro) a la misma temperatura (M_n).

- Reflectancia o Reflectividad (ρ):

Relación entre el flujo reflejado por una superficie y el incidente en ella.

La reflectancia varía según la dirección considerada y por tanto pueden hacerse diferentes medidas de la misma:

- *Reflectancia hemisférica:* Se considera la incidencia proveniente de la semiesfera sobre el centro o del centro hacia la semiesfera. Se usa en laboratorio.
- *Reflectancia direccional:* Se considera la incidencia según una dirección única formando el mismo ángulo de entrada y salida respecto a la normal a la superficie. Es la usada en Teledetección por satélite.

- Absortancia o Absortividad (α):

Relación entre el flujo absorbido por una superficie y el incidente en ella.

- Transmitancia o Transmitividad (τ):

Relación entre el flujo transmitido a través de una superficie y el incidente en ella.

- **Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera.**

Como ya se explicó anteriormente, cuando la radiación electromagnética que sale del Sol viaja hacia la superficie terrestre, ésta atraviesa la atmósfera, produciéndose una interacción entre la radiación y los diversos constituyentes atmosféricos provocando diferentes procesos, principalmente absorción y dispersión. Este fenómeno también se da en el camino desde la superficie de reflexión hacia el sensor.

- **Constituyentes Atmosféricos:**

La atmósfera está compuesta fundamentalmente por gases, aerosoles y nubes. Tanto gases como aerosoles contribuyen a la dispersión y absorción de la radiación provocando en el primer caso un cambio de dirección sin cambio de propiedades (disminuye el contraste y por tanto degrada los contornos de la imagen), y en el segundo caso una disminución de la cantidad de energía en una determinada longitud de onda. Afectan principalmente al intervalo del visible e infrarrojo siendo casi despreciable en la región de las microondas.

Los principales gases atmosféricos son el nitrógeno (78%) y el oxígeno (21%) existiendo también en pequeñas cantidades vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) y ozono (O₃). Todos los gases contribuyen a la dispersión y su efecto combinado se calcula como una función de la densidad atmosférica y de la presión.

Las nubes grandes en relación al tamaño de píxel influyen en la observación remota de la Tierra produciendo alta reflectancia en el intervalo del visible y del IR próximo, además de una disminución de la temperatura estimada en el IR térmico.

- **Dispersión atmosférica:**

La dispersión o *scattering* afecta a la dirección de la radiación visible pero puede modificar también la distribución espectral de las longitudes de onda del visible y cercanas a él. Se distinguen tres tipos.

- Dispersión de Rayleigh: Se produce cuando la longitud de onda de la radiación es mayor que el tamaño de las partículas. Es inversamente proporcional a 4 veces la longitud de onda. (El azul es dispersado 4 veces más que el rojo y la UV cerca de 16 veces más que el rojo).
- Dispersión de Mie: Se produce cuando la longitud de onda de la radiación es aproximadamente igual al tamaño de las partículas. Su efecto en Teledetección es un deterioro general de las imágenes multiespectrales en el espectro óptico debido a polvo, polen, contaminación o gotas de agua.
- Dispersión no selectiva: Se produce cuando el tamaño de las partículas es mucho mayor que la longitud de onda en la atmósfera inferior. Se llama no selectiva porque no depende de la longitud de onda.

- Absorción atmosférica:

La absorción se produce cuando un átomo o molécula recibe radiación electromagnética y se excita a un nivel de energía superior, afectando a longitudes de onda mayores o menores que las de la luz visible al contrario que la dispersión.

Los absorbentes atmosféricos más importantes son el vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), oxígeno (O₂) y ozono (O₃), aunque este fenómeno de la absorción es muy selectivo, limitándose a determinadas longitudes de onda dentro del espectro electromagnético (las inferiores a 0,3 μm por el ozono, por ejemplo). Las regiones del espectro donde estos procesos son débiles, y por lo tanto la transmisión de energía se produce con facilidad, reciben el nombre de “ventanas espectrales” y se centran especialmente en el ultravioleta, el visible y el infrarrojo reflejado y térmico, además de las longitudes de onda superiores a 1 mm., donde la transmisión atmosférica es total, siendo ésta una de las principales razones de su frecuente uso en teledetección (radar). Lógicamente, los principales sensores utilizados en los sistemas de teledetección espacial se centran, por razones obvias, en las regiones de las ventanas espectrales y en las longitudes de onda donde la emisión es mayor.

Aproximadamente las ventanas atmosféricas corresponden a las siguientes bandas con las denominaciones que se indican

Ventana	Banda espectral (μm)
1	0.3 – 1.3
2	1.5 – 1.8
3	2.0 – 2.6
4	3.0 – 3.6
5	4.2 – 5.0
6	7.0 – 15.0

Fig.12.3. Ventanas atmosféricas

- **Interacciones entre la energía electromagnética y la superficie terrestre.**

La energía electromagnética que recibe la superficie terrestre, sufre diferentes procesos. Una parte puede ser reflejada y el resto penetra en los elementos de la superficie terrestre a través de ondas refractadas que pueden ser absorbidas o transmitidas, dependiendo de la naturaleza de los objetos y de la longitud de onda de la energía. Por otra parte, la energía absorbida es posteriormente devuelta en forma de energía emitida por los objetos, aunque dicha emisión se produce en otras longitudes de onda (generalmente más largas) dependiendo, como ya hemos visto, de su temperatura. Aplicando el principio de la conservación de la energía podemos decir que:

$$E \text{ incidente} = E \text{ reflejada} + E \text{ absorbida} + E \text{ transmitida}$$

Como todos, o la mayor parte de los sistemas de teledetección, se sustentan en la energía reflejada o emitida por los objetos es interesante definir el concepto de *reflectividad* o *reflectancia* que equivaldría al porcentaje de energía reflejada respecto a la energía incidente. Sin embargo, la reflexión de los objetos depende, en gran medida, de su naturaleza interna y del grado de rugosidad de la superficie, pudiéndose diferenciar dos tipos de reflexión extremos:

- Reflexión especular: Se produce en superficies lisas y planas (donde las variaciones altimétricas de la rugosidad superficial sean menores que la longitud de onda). En estos casos el ángulo de reflexión es igual al de incidencia, pudiendo llegar a saturar el detector (reflejos en el agua para el espectro visible, por ejemplo).
- Reflexión difusa o lambertiana: Cuando las variaciones de la rugosidad superficial son mayores que la longitud de onda, la energía es reflejada más o menos uniformemente en todas las direcciones con independencia del ángulo de incidencia (arena, nieve...), dependiendo la reflectancia sólo de la longitud de onda.

Los cuerpos reales se encuentran entre estos dos tipos de reflexión, produciéndose además una dispersión hacia el interior de los huecos del material que finalmente emerge tras reflexiones múltiples.

Si el material tiene un rango de longitudes de onda de máxima absorción, la radiación reflejada presenta mínimos en ese rango espectral, y estas bandas son denominadas bandas de absorción fundamentales para caracterizar el objeto puesto que dependen del tipo de material.

- **Firmas espectrales.**

Cualquier material sobre el que incida radiación electromagnética reflejará una parte de ese flujo dependiendo de la longitud de onda, lo que permitirá en Teledetección discriminar diferentes objetos. Es necesario por tanto basarnos en perfiles espectrales que disminuyan el error de identificación. Las respuestas tanto en reflectancia como en emitancia constituyen la llamada "signatura o firma espectral" de cada material.

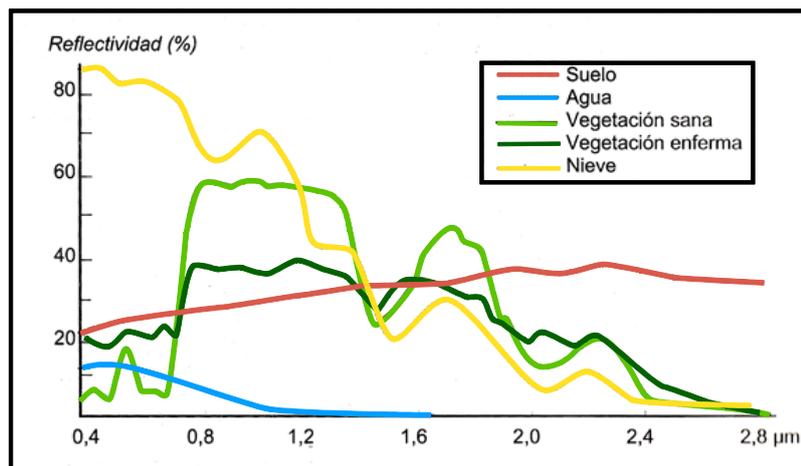


Fig.12.4. Firmas espectrales

Estas firmas espectrales de los materiales varían en el espacio y en el tiempo, de manera que un mismo objeto puede tener aspectos diferentes según el lugar, condiciones climáticas, latitud y otras condiciones ambientales. Hay que considerar también el tamaño, forma, configuración, textura, etc.

En Teledetección esto es posible gracias a la multispectralidad de las imágenes que permiten obtener valores de reflectancia en distintas longitudes de onda.

Dado el gran número de factores que intervienen, es importante comparar los resultados obtenidos por observación remota en el terreno.

- Características espectrales de los suelos.

La extensa presencia del suelo sobre la superficie terrestre hace que sea el principal reflector de la radiación solar incidente, incluso si existe cubierta vegetal, influyendo en su reflectancia en función de la densidad y estado vegetativo de ésta.

Además, conociendo la reflectancia de los suelos podremos caracterizarlos en función de su estado y propiedades.

Sus principales componentes son los sólidos inorgánicos, materia orgánica, aire y agua.

El componente inorgánico o fracción mineral contiene fundamentalmente minerales cristalinos, la materia orgánica consta de raíces, restos vegetales y organismos vivos del suelo, rellenándose de aire y agua los espacios vacíos entre materiales sólidos en proporción variable dependiendo de sus características y estado.

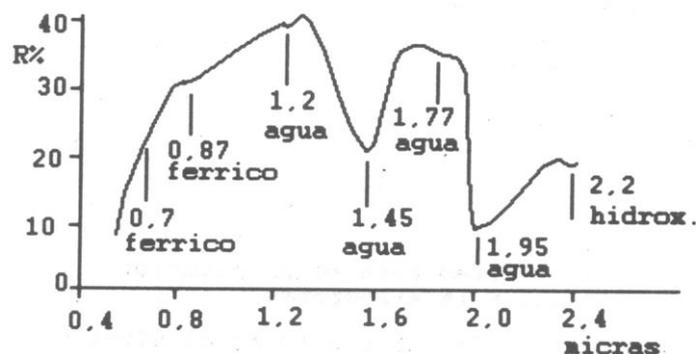


Fig.12.5. Curva espectral de un suelo y bandas de absorción del agua y del hierro.

- Influencia de los componentes del suelo sobre la reflectancia:

La humedad es la causante de que los suelos más oscuros sean los que más cantidad de agua tienen debido a las reflexiones múltiples de la radiación en el interior de la fina película de agua que cubre las partículas (banda de absorción) patente en una disminución de la reflectancia en el visible. Estas bandas de absorción serán tanto más estrechas y profundas cuanto más localizada se encuentre el agua en el suelo (suelos arcillosos) y más anchas y poco profundas cuanto más deslocalizada esté (suelos arenosos).

La materia orgánica influye en la reflectancia del suelo dependiendo de la forma y cantidad en la que esta se encuentra, llegando a enmascararlo si su presencia es mayor al 2%. A mayor estado de descomposición menor reflectancia (Sapric (>20% M.O.) <Hemic<Fibric).

En general la reflectancia es inversamente proporcional al diámetro de la partícula. Hay que considerar no sólo el tamaño de la misma, sino también la forma y el tamaño de los agregados. El contenido de hierro influye de forma inversamente proporcional en la reflectancia en el visible.

Respecto a la parte mineral del suelo influyen en las características espectrales debido a sus estructuras cristalinas. Los suelos de mineralogía gípsica presentan en todo el espectro la mayor reflectancia, los caoliníticos tienen una banda de absorción ancha entorno a las 0.9 μm .

- Influencia del estado superficial del suelo:

El estado de la rugosidad de la superficie del suelo puede afectar a su reflectancia. Cuando ésta es mayor, más se dispersa la radiación y menor reflectividad presenta al tiempo que se producen sombras de las partículas. Por ejemplo en los suelos recién labrados donde hay más rugosidad y humedad hay una disminución de la reflectancia.

La cubierta superficial condiciona la respuesta espectral del suelo subyacente debido a las distintas características espectrales de suelos y plantas.

Por lo general para coberturas vegetales de un suelo inferiores al 15% se asemeja al suelo desnudo en tanto que si es mayor del 40% la respuesta se parece más a la de la vegetación.

No obstante las propiedades de la vegetación están condicionadas por el tipo y estado del suelo subyacente y esto permite una estimación indirecta de sus propiedades.

En general el subsuelo condiciona las características superficiales de los suelos. Los que mejor drenaje tienen presentan una mayor reflectancia. Si el suelo está erosionado se observarán cambios de color correspondientes a los horizontes inferiores.

- Características espectrales de la vegetación.

La complejidad del estudio de las propiedades ópticas de las cubiertas vegetales radica no sólo en las características propias de los vegetales sino también de condicionantes ajenos a ellas tales como la elevación solar, geometría de la cubierta, condiciones atmosféricas, posición del sensor, color del suelo, orientación de las líneas de cultivo etc.

- Influencia de los componentes de la cubiertas vegetales:

La curva de reflectancia de las hojas vegetales tienen una forma parecida presentando una forma característica en cada una de las regiones de visible, infrarrojo próximo y medio.

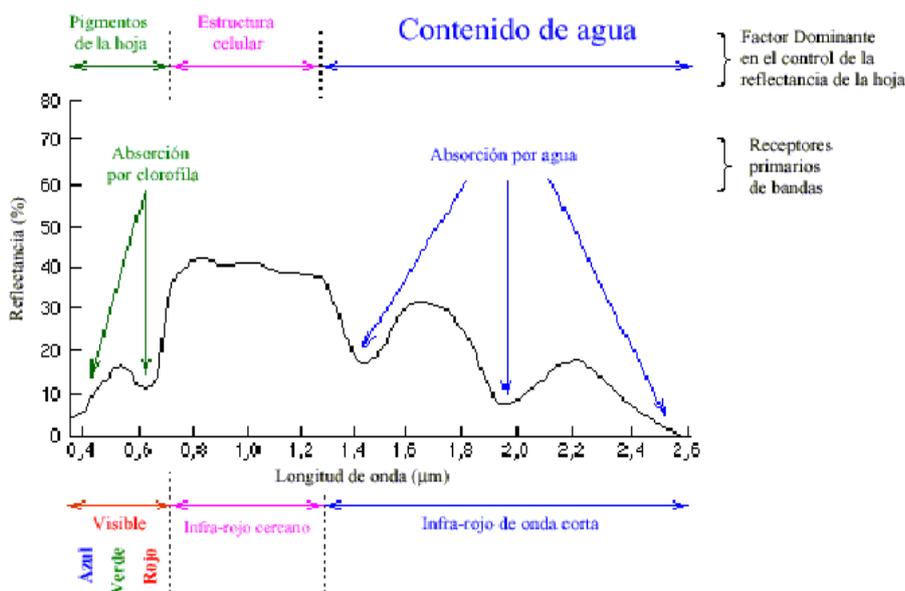


Fig. 12.6. Comportamiento respecto a la reflectancia

En el intervalo del visible (0.4 a 0.7 μm) la reflectancia de la hoja es baja presentando bandas de absorción en el rojo y azul debidas a los pigmentos (principalmente clorofila a y b) resultando un máximo en el verde que explica el color de las hojas.

En el intervalo del infrarrojo próximo (0.7 a 1.3 μm) la reflectancia es muy alta formando una meseta debido a la estructura anatómica de la hoja.

En el intervalo del infrarrojo medio (1.3 a 2.5 μm) aparecen fuertes bandas de absorción en función del contenido de agua.

La reflectancia difusa de las hojas depende de la longitud de onda y de su estructura interna, pigmentación y contenido en agua, mientras que la especular se debe a la cutícula de la hoja (fina película protectora de tallo y hoja carente de cloroplastos).

Las propiedades ópticas de las hojas dependen también de su estado en la fase juvenil y de senescencia. Fuera de estos estados las propiedades de plantas anuales o de árboles caducifolios permanecen constantes al contrario que las hojas aciculares de las coníferas, pues varían por el aumento de clorofila que se produce de año en año.

El periodo de senescencia de la hoja se caracteriza por la desaparición de clorofila y aparición de pigmentos marrones aumentando reflectancia en el amarillo-verde y del rojo. En el IR próximo sólo varía la reflectancia al secarse la hoja y cambiar su estructura interna. En el IR medio se asocia el aumento de reflectancia al secado de la hoja (disminución de contenido en agua).

El estado nutritivo o enfermedades y plagas pueden hacer variar la cantidad de clorofila o hacer que aparezcan nuevos pigmentos alterando la reflectancia.

En ciertos cultivos anuales con presencia de flores (colza, girasol), o incluso praderas y pastizales primaverales presentan una respuesta espectral alterada por dichas flores.

En el caso de los árboles hay que considerar no sólo las hojas sino también las piñas (en coníferas) y corteza.

- Reflectancia de cubiertas vegetales:

La reflectancia de las cubiertas vegetales está ligada no sólo a la de las propias hojas sino también a la del suelo subyacente. La influencia de este último es menor con el crecimiento de las plantas, disminuyendo la reflectancia del visible e IR medio y aumentando la del IR próximo.

Por lo anterior es interesante saber el LAI (*Leaf Area Index*) que indica el total de superficie de hojas por unidad de superficie de terreno.

En el caso de una cubierta forestal la reflectancia es la combinación de la de los árboles y la del suelo que a su vez está influido por un estrato herbáceo y uno arbustivo, pudiendo prevalecer la reflectancia de estos últimos si hay poco arbolado.

- Influencia de la elevación solar:

El motivo de esta influencia se debe a que los rayos iluminan desigualmente la cubierta según su inclinación generando zonas de sombra y de luz tanto en la variación de elevación solar a lo largo del día como a lo largo del año.

En el caso de cubiertas vegetales cuyas características no cambien de aspecto a lo largo del año (bosque de coníferas, suelo desnudo, rocas...) la variación de reflectancia se produce por la variación anual de la elevación del Sol. Si las cubiertas son de tipo anual el cambio de reflectancia bidireccional obedece no sólo a la elevación solar sino a cambios de la propia cubierta siendo difícil distinguirlos.

- Características espectrales del agua.

El agua absorbe o transmite la mayor parte de la radiación visible que recibe, por ello, su firma espectral es parecida a la de los suelos pero en sentido contrario. A mayor longitud de onda se produce mayor absorción. Su máxima reflectancia (agua clara) está en el azul desapareciendo prácticamente en el infrarrojo.

El comportamiento del agua depende de la profundidad, materiales en suspensión (arcillas, clorofila y nutrientes) y rugosidad de la superficie.

Los materiales del fondo influyen en la reflectancia y está relacionado con la profundidad. Como la absorción aumenta con la profundidad, las aguas poco profundas presentan mayor reflectancia.

El contenido de clorofila hace que descienda la reflectancia entorno al azul presentando un aumento en el verde siendo muy útil para localizar concentraciones de algas.

Los materiales en suspensión contribuyen a la turbidez del agua aumentando al tiempo la reflectancia. La rugosidad de la superficie hace que ésta se comporte de forma difusa dando mayor reflectancia. Las aguas tranquilas se comportan, respecto a la reflexión, de forma especular dependiendo la reflectancia de la posición del sensor.

SENSORES.

- **Tipos de sensores:**

La teledetección se realiza a través de los sensores, detectando la señal electromagnética (reflejada o emitida) que llega de la Tierra y de la atmósfera. Convierten la señal en un formato analógico (fotografía) o digital (imagen). Estos sensores se ubican en plataformas: satélites, aviones, grúas, globos...

Su clasificación puede hacerse desde distintos puntos de vista:

-Según el origen de la señal captada y las técnicas de teledetección:

- Sensores Pasivos: El sensor registra la radiación emitida por el sistema observado o la radiación solar reflejada. Trabajan en todo el rango espectral. Por ejemplo las cámaras de fotos, los radiómetros y los sistemas de vídeo.
- Sensores Activos: El sensor cumple la doble función de producir una señal de características conocidas que interactúa con el sistema observado y será registrado por el sensor. La información procede de la comparación de radiación emitida y reflejada. Trabajan únicamente en el intervalo de las microondas. Por ejemplo el Radar y el Lidar.

- Según la región del espectro en que trabajan:

- Técnicas en el visible-infrarrojo próximo: Sensores que miden la intensidad de la radiación solar reflejada por la Tierra en el intervalo espectral de 0.4 a 2.5 μm .
- Técnicas en el infrarrojo térmico: Registran la radiación emitida por el sistema radiante en el intervalo espectral de 3 a 5 μm y de 8 a 14 μm .
- Técnicas en las microondas: Miden la intensidad y polarización de las ondas centimétricas entre 0.1 y 100 cm.

- Según la forma de registrar la señal:

- Registro casi instantáneo: Permiten la adquisición casi instantánea del conjunto de la escena observada, como las cámaras fotográficas y cámaras electromagnéticas de barrido (*Return Beam Vidicon*).
- Registro secuencial: Ofrecen una adquisición secuencial de elementos de la imagen con los que dato a dato se constituye el conjunto de la escena.

Los radiómetros multispectrales son sensores óptico-electrónicos que registran la radiación reflejada y emitida por la superficie terrestre y la separan en distintas bandas espectrales por medio de prismas, espejos dicróicos o filtros.

Adquieren la información de la superficie terrestre de forma secuencial, a intervalos regulares, de forma que cada medida corresponde a un ángulo de visión llamado IFOV (*Instantaneous Field of View*) o “campo de visión instantáneo”. La radiación es detectada por una serie de detectores sensibles a diferentes longitudes de onda transformándola en impulsos eléctricos proporcionales a la intensidad de la radiación recibida. La señal correspondiente a un IFOV se traduce en un dato numérico (dígito) que en la imagen corresponde a un píxel obteniendo una imagen multispectral.

Existen dos tipos fundamentales de radiómetros:

- Exploradores o radiómetros de barrido transversal por espejo oscilante (*across-trackscanners*): Adquieren información en una serie de líneas procedente de estrechas franjas de terreno transversales a la dirección de avance de la plataforma. En cada barrido la radiación recibida es muestreada de un lado a otro del sensor mediante un espejo rotatorio. Según avanza la plataforma los barridos van conformando una imagen bidimensional de la superficie terrestre. Una línea de barrido equivale a una línea de píxeles en la imagen.

El rango espectral es de 0.3 a 14 μm . La radiación es separada por prismas o espejos y se convierte en señales eléctricas mediante foto-detectores. Para evitar el cambio de respuesta del sensor, los detectores se calibran. Conociendo estos coeficientes de calibrado del sensor y las condiciones de adquisiciones, los valores digitales de la imagen pueden traducirse en términos de radianza y a partir de ésta calcular magnitudes físicas como la reflectividad o la temperatura del sistema observado.

La resolución espacial del píxel viene condicionada por el IFOV y el “campo de visión angular total” (FOV) del espejo oscilante determinando también la amplitud de la franja de barrido (*swath*) y la anchura de la imagen. El IFOV en teledetección espacial está en valores entorno a 10º-20º.

Este sistema es el utilizado en misiones como Landsat, TIROS-NOAA, Nimbus entre otras.

- Exploradores o radiómetros de empuje (*along-trackscanners o pushbroomscanners*): Llevan una cadena lineal de detectores que cubre todo el campo de visión angular del sensor y se desplaza a lo largo de la trayectoria. Los detectores son CCD scanners (*Charge Couple Device*) ligados para actuar como electrodos.

En cada instante se registra información de una línea completa generando al avanzar el sensor, una imagen bidimensional de la superficie terrestre.

Al prescindir de la parte móvil del espejo, son más fiables y duraderos. Permite ver y medir por más tiempo la radiación registrando mejor la señal y mejorando la resolución radiométrica.

El aumento de tiempo de observación disminuye el IFOV y permite usar bandas espectrales más estrechas. Se mejora por tanto la resolución espacial espectral.

- **Características de los sensores.**

Si bien en fotografía tiene sentido hablar de escala, en el caso de imágenes espaciales hablaremos de resolución. Se define la resolución de un sensor como su habilidad para registrar y discriminar información de detalle. Se contemplan cuatro tipos de resolución: espacial, espectral, radiométrica, temporal y actualmente angular.

- Resolución espacial:

La resolución espacial de un sensor está determinada por el IFOV, que es la sección angular medida en radianes observada en un instante. La distancia sobre el terreno del IFOV es la unidad mínima de la imagen y corresponde al tamaño medio del píxel. Esta resolución depende de factores como la altura orbital, velocidad de exploración y número de detectores.

Indica el tamaño mínimo de los objetos que se pueden discriminar, pero también puede registrar objetos de tamaño inferior al píxel debido a la influencia de otros factores como la geometría, contraste de radianza entre objetos próximos o la claridad de la atmósfera.

- Resolución espectral.

La resolución espectral de un sensor expresa su aptitud para separar señales de diferente longitud de onda y depende del filtro óptico que las separa en bandas.

Indica el número y anchura de las bandas espectrales en que un sensor registra la radiación. Cuanto mayor número y más estrechas sean, mayor es la capacidad del sensor para reproducir la respuesta espectral del objeto observado pudiendo discriminar unas coberturas de otras.

- Resolución radiométrica.

La resolución radiométrica se refiere a la sensibilidad de un sensor y expresa su aptitud en una banda espectral dada para diferenciar señales electromagnéticas de energía diferente.

Está condicionada por los intervalos de digitalización de la señal. El número máximo de niveles digitales de la imagen (rango dinámico) suele identificarse con la resolución radiométrica y oscila entre 64 (6-bit), 128 (7-bit), 256 (8-bit), 1024 (10-bit).

A mayor número de niveles mayor resolución radiométrica y mejor será la información.

- Resolución temporal.

La resolución temporal es la frecuencia de cobertura del sensor, es decir, la periodicidad con que adquiere imágenes de la misma zona. Esto es función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación) así como del diseño del sensor (ángulo de observación y abertura).

Los satélites meteorológicos son los de más alta resolución temporal ofreciendo imágenes cada 30 minutos como el Meteosat, o cada 12 horas como el NOAA.

PROGRAMA LANDSAT.

Gracias a los resultados que proporcionaron las primeras fotografía espaciales, la agencia espacial norteamericana (NASA) diseñó a finales de los años 60 el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos terrestres. Fruto de estos trabajos fue la puesta en órbita del primer satélite de la serie ERTS (*Earth Resource Technology Satellite*) el 23 de Julio de 1972. Esta familia de satélites fue rebautizada como Landsat a partir del segundo lanzamiento (Landsat 2), en 1975, constituyendo en 1978 la primera generación de satélites Landsat tras el lanzamiento del tercer satélite (Landsat 3).

Entre los satélites de recursos, el programa Landsat puede considerarse el más fructífero, puesto que ha proporcionado datos multiespectrales de alta resolución a una amplia gama de usuarios durante más de 25 años, lo que representa el registro más largo de información sobre la superficie terrestre obtenido de forma global y repetitiva desde el espacio.

La segunda generación de satélites Landsat se inicia con el lanzamiento del poco operativo Landsat 4 en 1982 y posterior puesta en órbita del Landsat 5 en 1984.

A mediados de los años 80, el programa Landsat entra en una nueva etapa en cuanto a financiación y funcionamiento, con la transferencia del programa al sector privado. En 1985 la compañía EOSAT recibe los derechos para vender productos Landsat por un período de 10 años con el compromiso de participar en el desarrollo de futuros sensores. El gobierno mantenía la responsabilidad en el control físico de la plataforma y se comprometía a colaborar en el desarrollo de los satélites Landsat 6 y 7. Recortes presupuestarios pusieron en entredicho este compromiso y se temió por la continuidad de los Landsat. Ante las presiones de la comunidad científica y profesional, una nueva ley en 1992, devuelve la gestión del programa al gobierno y se adquieren compromisos para una financiación estable que asegurase la continuidad del Landsat 6 y 7 en los años 90.

El satélite Landsat 6 se lanzó en 1993 pero por fallos de comunicación con la plataforma no se ubicó en la órbita precisa y se perdió. Este fracaso y el dudoso éxito de la gestión privada hicieron temer por el futuro de estos satélites. No obstante, se inició el proyecto Landsat 7 bajo un programa en el que participan 3 agencias: la NASA, responsable del desarrollo y lanzamiento del satélite y del sector de tierra, la NOAA, encargada de su operación y mantenimiento durante todo el tiempo de vida del satélite, y la USGS que recoge, procesa y distribuye los datos y se encarga de mantener el archivo de datos. El satélite Landsat 7 fue lanzado finalmente en abril de 1999 con un sensor denominado ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*).

Las imágenes generadas por el satélite Landsat7 adquiridas mediante el sensor ETM+ presentan una mejor relación costo-beneficio que los datos generados por satélites de resolución media (15 a 30 metros).

- **Características orbitales.**

Los primeros tres satélites de la serie tenían características similares. El peso total del sistema se aproximaba a los 960Kg. Su órbita era heliosincrona, esto quiere decir pasa por el mismo lugar a la misma hora; polar, ligeramente inclinada (99'1 grados). Con una altura orbital media de 917 Km, circundaba la tierra cada 103 minutos, con lo que realizaba 14 orbitas diarias para volver sobre la misma porción de la superficie terrestre a los 18 días, y a la misma hora local (entre 9:30 y las 10:30 según latitudes).

Con el fin de reducir al máximo las alteraciones en las condiciones de observación se dotó a los satélites de un sistema de estabilización según tres ejes, orientados hacia la superficie terrestre y la vertical del punto *nadir*. Las correcciones en la órbita, por tanto, se hacían desde las estaciones terrestres, lo que confería una gran estabilidad en la toma de datos.

Los satélites posteriores (4, 5, 6, 7) modificaron su forma y sus características orbitales. La altura de vuelo se reduce de 917 a 705 Km, aunque se mejora el ciclo de recubrimiento, de 18 a 16 días consiguiendo un área de escena de área 185 x 170 Km, gracias a su menor periodo orbital (98.9 grados). Sin embargo, el momento de adquisición se mantiene en torno a las 9:45 hora local en nuestras latitudes.

- **Instrumentos de observación.**

En lo que a equipamiento se refiere el programa Landsat puede ser estructurado en 3 generaciones. Una primera fase constituida por los Landsat 1, 2 y 3 cuyo equipamiento estaba formado por una explorador de barrido multiespectral MSS (*Multispectral Scanner*) y un conjunto de tres cámaras vidicon RBV (*Return Beam Vidicon*).

Los satélites de la segunda generación Landsat 4 y 5 mantienen el sensor MSS para garantizar la continuidad de los datos anteriores, eliminan las cámaras RBV e incorporan un nuevo sensor denominado TM (*Thematic Mapper*) diseñado para la cartografía temática que proporciona datos de mayor resolución espacial, espectral y radiométrica.

Con el lanzamiento del satélite Landsat 7 (ya que el 6 no llegó a funcionar) se entra en una versión mejorada de la segunda generación con la incorporación de una versión actualizada del TM denominado ETM (*Enhanced Thematic Mapper*).

En los siguientes apartados vamos a resumir las características más importantes de cada uno de estos sensores.

La tabla siguiente resume la información más relevante de cada uno de los satélites que conforma la serie Landsat.

Satélite	Lanzamiento (fin servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Sensor	Banda: intervalo espectral (μm)	Resolución espacial (m)
Landsat 1	23/07/72 06/01/78	917	18	RBV	(1) 0.48 0.57 (2) 0.58 0.68 (3) 0.70 0.83	80 80 80
				MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1	79 79 79 79
Landsat 2	22/01/75 25/02/82	917	18	Idéntico al Landsat 1		
Landsat 3	05/03/78 31/03/83	917	18	RBV	(1) 0.5 0.75	40
				MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1 (8) 10.4 12.6	79 79 79 240
Landsat 4	16/07/82 (83)	705	16	MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1	82 82 82 82
				TM	(1) 0.45 0.52 (2) 0.52 0.60 (3) 0.63 0.69 (4) 0.76 0.9 (5) 1.55 1.75 (6) 10.4 12.5 (7) 2.08 2.35	30 30 30 30 30 120 30
Landsat 5				Idéntico al Landsat 4		
Landsat 6	05/10/93 05/10/93	705	16	Fallos en el sistema		
Landsat 7	15/04/99	705	16	ETM+	(1) 0.45 0.52	30
					(2) 0.53 0.61	30
					(3) 0.63 0.69	30
					(4) 0.78 0.9	30
					(5) 1.55 1.75	30
					(6) 10.4 12.5	120
					(7) 2.09 2.35	30
PAN 0.5 0.90	15					

- **Bandas espectrales y resolución espacial.**

Las bandas del espectro visible y del infrarrojo mantienen la resolución espacial de 30m del satélite Landsat 5 (canales 1, 2, 3, 4, 5 y 7). Las bandas del infrarrojo térmico (canales 6L y 6H) pasan a ser adquiridas con resolución de 60 metros, contra 120 metros del Landsat 5. La nueva banda Pancromática (canal 8) tiene 15 m de resolución espacial.

El siguiente cuadro comparativo ilustra las diferencias de resolución espectral entre el sensor TM del Landsat5 y el sensor ETM+ del Landsat7. Los valores, expresados en micrones, representan los límites de longitudes de onda a los que es sensible cada banda espectral.

BANDA	LONGITUD DE ONDA	APLICACIONES
1	0.45 – 0.52 Azul	Discriminación de suelo/vegetación, mapas de batimetría, identificación de elementos culturales/urbanos, calidad del agua
2	0.53 – 0.61 Verde	Mapas de vegetación verde (medidas del pico de reflectancia), identificación de aspectos urbanos/culturales, calidad del agua
3	0.63 – 0.69 Rojo	Áreas vegetadas/no vegetadas, discriminación de especies vegetales por absorción de clorofila, elementos culturales/urbanos
4	0.78 – 0.90 IR cercano	Estimación del vigor de vegetación y biomasa, identificación de tipos de cultivos y vegetación, delimitación de cuerpos de agua y humedad del suelo
5	1.55 – 1.75 IR medio	Indicativa de la cantidad de humedad en las plantas y suelo. Se distingue entre nieve y nubes.
6	10.4 – 12.5 IR térmico	Discriminación de stress en las plantas, humedad del suelo por radiación termal, mapas termales (urbano, agua)
7	2.09 – 2.35 IR medio	Discriminación de minerales y tipos de rocas, mapas hidrotérmicos, contenido de humedad en la vegetación
8	0.52 - 0.90	Discriminaciones favorables en canal pancromático y resolución espacial.

La banda Pancromática (banda 8) es la mayor novedad del sensor ETM+ en el Landsat7. Su resolución espacial de 15 m, registrada con las demás bandas, permite que las imágenes generadas a través de este sensor sean trabajadas para obtener ampliaciones hasta una escala de 1:25.000.

La banda Termal (banda 6) del satélite Landsat 7 genera la banda 6 con paso bajo (Canal 6L) y paso alto (Canal 6H). Esto permite varias opciones de análisis y aplicaciones, tales como la medición relativa de temperatura radiante o un cálculo de temperatura absoluta.

Niveles de corrección geométrica de las imágenes Landsat7.

En todas las imágenes, y esto es válido para todos los satélites comercialmente disponibles, las correcciones del sistema son algoritmos de rectificación de la imagen “cruda” aplicada automáticamente en la estación de recepción, usando parámetros espaciales contenidos en los archivos descriptores de imagen (datos de posicionamiento y efemérides del satélite), que consiguen minimizar las variaciones espaciales internas presentes en la imagen en su estado bruto, correcciones del ángulo de curvatura terrestre, variaciones de velocidad, altura y actitud del satélite, desplazamientos orbitales, etc. Las imágenes Landsat7 están disponibles en 3 niveles de corrección geométrica:

- Nivel 4: es un nivel de corrección básica donde la imagen es radiométrica y geoméricamente corregida de forma sistemática.
- Nivel 5: también consiste en una imagen con correcciones sistemáticas, pero que se georreferencia utilizando las efemérides del satélite. Los algoritmos de corrección modelizan la posición del satélite y la geometría del sensor a través de datos que una computadora de abordo graba sobre la captura. Altitud, efemérides y parámetros de actitud del satélite, descritos en el archivo PCD (*Payload Correction Data*) y en el archivo CPF (*Calibration Parameter File*) son los componentes fundamentales usados para la generación de productos nivel 5 y garantizan la fidelidad geométrica general de la imagen.
- Nivel 6: No es un proceso automático ni una corrección sistemática. Este nivel de procesamiento exige intervención adicional de un operador. La imagen nivel 5 antes descrita es ajustada con puntos de control cartográficos o con puntos de control medidos especialmente con tecnología GPS. Se obtiene una imagen rectificadas a una determinada proyección cartográfica.
- Ortoimagen: Este nivel de procesamiento exige la intervención de un operador sobre una imagen corregida con puntos de control utilizando también un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) para corregir todas las distorsiones. El producto final consiste en una ortoimagen georreferenciada a la proyección cartográfica deseada.



- Imagen de Fusión (Merge): Es una combinación de la resolución espacial de la banda Pancromática (15 metros) con la resolución espectral de Landsat 7. Una correcta interpretación de la información proveniente de imágenes satelitales depende principalmente de los atributos de textura y color presentes en dicha imagen, fundamentalmente para discriminar áreas que presentan variaciones relevantes, como tipos de vegetación y especies, patrones específicos de uso y ocupación del suelo e interpretaciones ligadas a la morfología.

12.2. ANEXO II: FUNDAMENTOS DE LA FUSIÓN.

FUNDAMENTOS.

Como se mencionó con anterioridad el objetivo principal de la fusión de imágenes es realzar el aspecto visual de una determinada imagen con información proveniente de otra con mayor resolución espacial.

La fusión de imágenes exige una coincidencia píxel a píxel entre ambas, es decir, que es necesario que estén georreferenciadas.

El método de la fusión de imágenes que hemos aplicado en este proyecto se denominada "Fusión Merge". Es una combinación de la resolución espacial de la banda Pancromática (15 metros) con la resolución espectral de las bandas multiespectrales (30 metros).

Existen varias técnicas de fusión de imágenes que emplean diferentes algoritmos, los más comunes son los siguientes:

- Método IHS (Intensidad, Tono y saturación): Se basa en la transformación de la imagen desde el espacio de color RGB hasta otro cuyos ejes son la intensidad, el brillo, y la saturación. Este método produce distorsiones en las características espectrales de la imagen.
- Método PCS (Fusión Componentes Principales). Consiste en la sustitución de la intensidad en el espacio de color por la primera componente principal, por la combinación de ésta y alguna banda multiespectral o por la sustitución de la primera y segunda componentes principales. Una limitación de este método reside en que la primera componente principal no recoge toda la varianza, a efectos de conservación de la respuesta espectral.
- Contribución espectral relativa: Se realiza la fusión mediante operaciones algebraicas entre bandas. Los resultados prácticos son bastante limitados.
- Método SRV: La imagen se calcula por medio de una ecuación, por ello se denomina de cociente sintético variable. El principal problema de este método es que el cálculo de los coeficientes de la ecuación se realiza tan sólo para un número determinado de clases que incluyen diferentes respuestas espectrales. A todo ello se le suma la necesidad de un modelo atmosférico y la incapacidad de cálculo para áreas extensas.
- Método de las "onditas" (Wavelets): Es un método que utiliza la información de mayor resolución espacial para "inyectarla" en otra de menor resolución. Son pequeñas funciones sinusoidales que se aplican de manera discreta a la zona de la imagen.

Este último método es el que se ha utilizado en el proyecto puesto que, además de permitir fusionar canales multiespectrales con el canal pancromático, los otros métodos modifican la resolución espectral de la imagen fusionada y lo que se pretende es que se mantengan las características espectrales de la imagen.

A continuación se presenta el fundamento matemático del algoritmo *Wavelets*, al considerarse de gran interés en la realización del proyecto.

- **Fundamento matemático del algoritmo *Wavelets*.**

El método consiste en el incremento de la resolución espacial por inyección de “estructuras”. Son pequeñas funciones sinusoidales que se aplican de manera discreta a la zona de la imagen. Pero antes se ha de considerar las siguientes hipótesis:

- Debe existir una similitud entre las estructuras fisiográficas observadas en las bandas espectrales, sin que esto suponga que haya un recubrimiento entre bandas ni que los coeficientes de correlación entre las imágenes sean elevados.
- Las imágenes a fusionar pueden haber sido tomadas en épocas diferentes, a condición de que exista similitud entre la fisiografía. En el caso de referirse a vegetación en diferente estado fenológico, se obtendrán peores resultados.

El algoritmo que usa está basado en una descomposición de ondas multirresolución. La imagen es descompuesta en múltiples canales basándose en el contenido sus frecuencias locales, obteniéndose nuevas imágenes cada una de ellas con diferente grado de resolución. La transformación de una distribución $f(t)$ puede ser expresada como:

$$W(a,b) = |a|^{-0.5} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$$

Siendo $W(a, b)$ los coeficientes *wavelets*.

Esta ecuación muestra como la función $f(t)$ se descompone en combinaciones lineales de una serie de funciones locales denominadas *wavelets* $\Psi_{a,b}(t)$, siendo a y b los parámetros de escalado y traslación, respectivamente. Cada función local es una versión escalada y trasladada de la función denominada *wavelet* madre $\Psi(t)$, y quedan definidas por la siguiente ecuación:

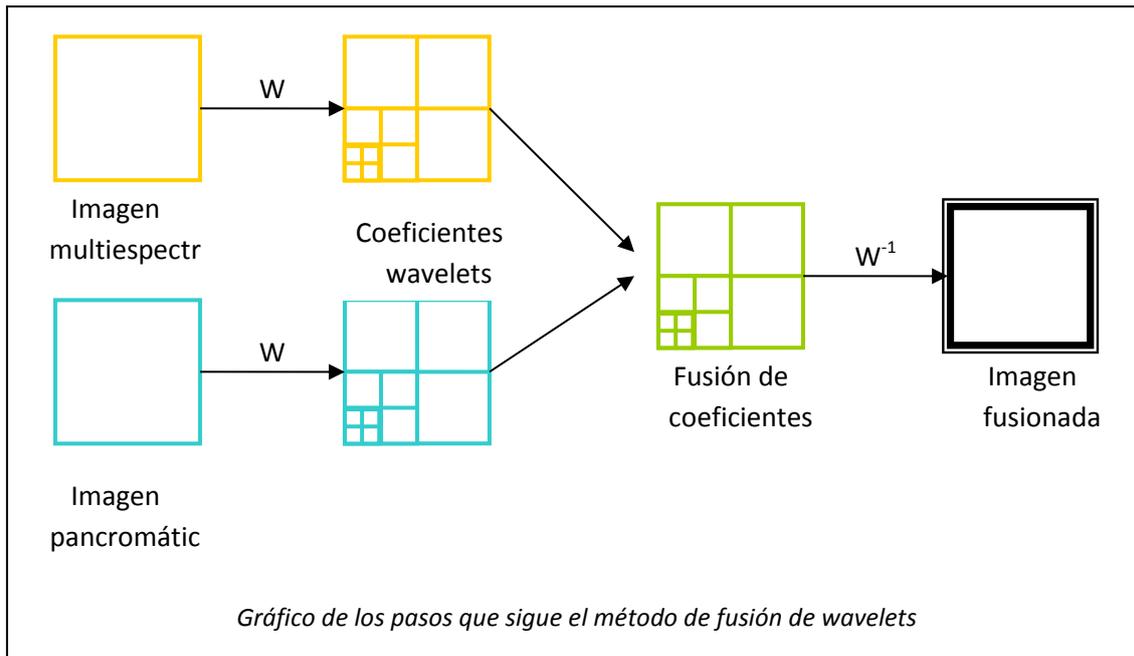
$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-0.5} \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$$

Como se ha visto, el fundamento básico de este método es la descomposición de las imágenes (señales) en diferentes coeficientes *wavelets*. Si se aplica esta transformación a una señal 2D como es el caso de una imagen tendremos que llegar a cuatro resultados: una aproximación, detalles en vertical, detalles en horizontal y detalles en diagonal de la imagen original.

En la práctica, las expresiones analíticas señaladas arriba se sustituyen por filtros de paso alto aplicándose mediante un banco de filtros que sintetiza las imágenes cada vez a menor resolución, constituyendo los coeficientes *wavelets*.

Una vez obtenidos los coeficientes habrá que realizar la fusión de estos. Este paso se puede realizar de dos maneras:

- Reemplazando los coeficientes *wavelets* de la imagen multispectral por los correspondientes coeficientes de la imagen de mayor resolución.
- Añadiendo los coeficientes de gran resolución a los de la imagen multispectral.



Esta última forma preserva toda la información espacial en la imagen multispectral. Aquí también aparecen dos maneras de realizarlo: añadiendo los componentes RGB o añadiendo la componente intensidad. Se usa el segundo método puesto que afecta básicamente a la información espacial no a la espectral.

Finalmente se reconstruye la imagen utilizando la transformada inversa.

$$f(t) = \iint W(a,b)\psi_{a,b}(t)dadb$$

El resultado de la fusión depende tanto de las imágenes como del modelo de fusión de los coeficientes utilizados.

13. PRESUPUESTO

13. PRESUPUESTO

A continuación se muestra el coste económico que supone el proyecto realizado asignando unos valores presupuestarios aproximados a cada una de las acciones y elementos que han intervenido.

HOJA DE PRECIOS:

1. Costes instrumentales.

- Ordenador e impresora:
 - Compra: 1.500 euros.
 - Amortización en 1 año: $1.500 / 200 = 7,50$ euros / día.
 - **Total: 7,50 euros / día.**

- Programa ERDAS IMAGINE 2011:
 - Compra: 4.800 euros.
 - Amortización en dos años: $4.800 / 400 = 12,00$ euros / día.
 - **Total: 12,00 euros / día.**

- Paquete Microsoft Office para Windows 2010:
 - Compra: 542,84 euros.
 - Amortización en 1 año: 2,71 euros / día.
 - **Total: 2,71 euros / día.**

2. Costes personales.

- Ingeniero Técnico en Topografía:
 - **Total: 120,20 euros / día.**

PRESUPUESTO POR CAPÍTULO:

CAPÍTULO I: DOCUMENTACIÓN.

- Búsqueda de información: 3 días

Concepto	Nº Unidades	€/unidad	€/día	Presupuesto
I.T. Topografía	2	120,20 €	240,40 €	721,20 €
Ordenador	2	7,50 €	15,00 €	45,00 €
Paquete office	2	2,71 €	5,42 €	16,26 €
			Total	782,46 €

CAPÍTULO II: FUSIÓN DE IMÁGENES.

- Fusión de las escenas Landsat: 2 días.

Concepto	Nº Unidades	€/unidad	€/día	Presupuesto
I.T. Topografía	2	120,20 €	240,40 €	480,80 €
Ordenador	2	7,50 €	15,00 €	30,00 €
Programa ERDAS	2	12,00 €	24,00 €	48,00 €
			Total	558,80 €

CAPÍTULO III: CLASIFICACIÓN.

- Áreas de entrenamiento y procesamiento de la imagen: 3 días.

Concepto	Nº Unidades	€/unidad	€/día	Presupuesto
I.T. Topografía	2	120,20 €	240,40 €	721,20 €
Ordenador	2	7,50 €	15,00 €	45,00 €
Programa ERDAS	2	12,00 €	24,00 €	72,00 €
			Total	838,20 €

CAPÍTULO IV: CARTOGRAFÍA.

- Análisis en soporte papel y digital de los resultados: 6 días.

Concepto	Nº Unidades	€/unidad	€/día	Presupuesto
I.T. Topografía	2	120,20 €	240,40 €	1.442,40 €
Ordenador	2	7,50 €	15,00 €	90,00 €
Programa ERDAS	2	12,00 €	24,00 €	144,00 €
			Total	1.676,40 €

CAPÍTULO V: MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL.

- Análisis en soporte papel y digital de los resultados: 1 día.

Concepto	Nº Unidades	€/unidad	€/día	Presupuesto
I.T. Topografía	2	120,20 €	240,40 €	240,40 €
Ordenador	2	7,50 €	15,00 €	15,00 €
Programa ARCSCENE	2	12,00 €	24,00 €	24,00 €
			Total	279,40 €

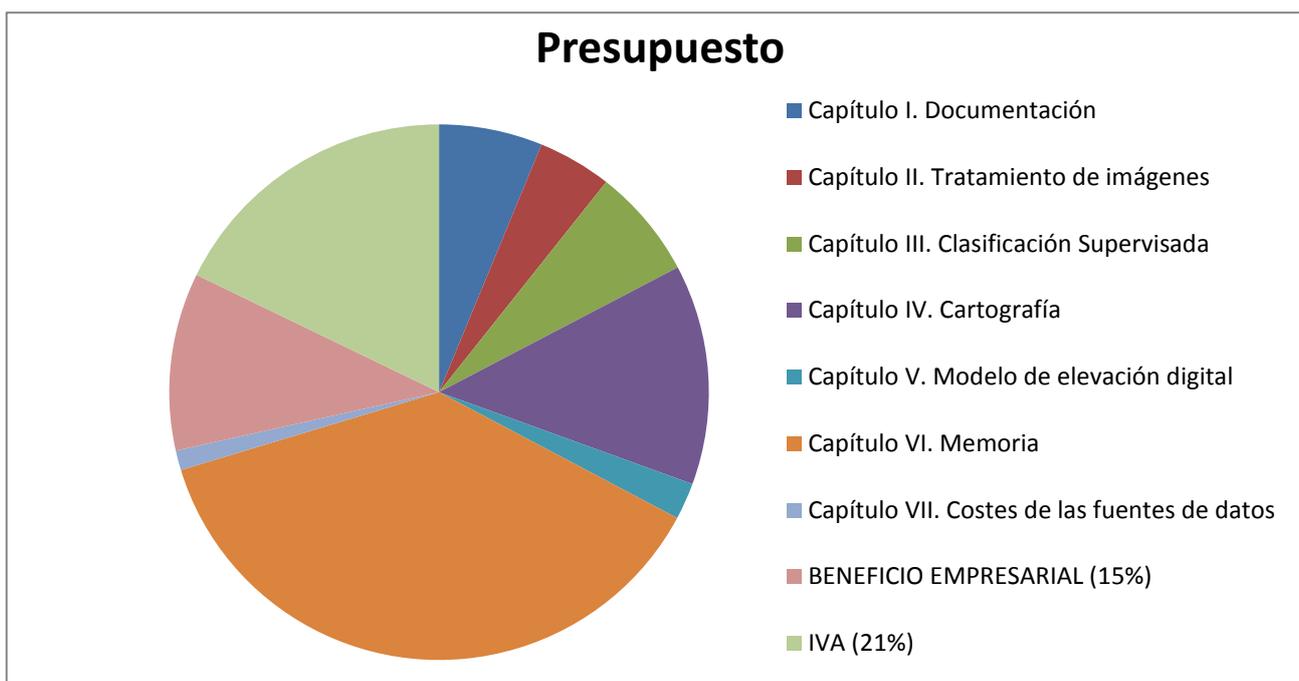
CAPÍTULO VI: MEMORIA.

- Análisis en soporte papel y digital de los resultados: 15 días.

Concepto	Nº Unidades	€/unidad	€/día	Presupuesto
I.T. Topografía	2	120,20 €	240,40 €	3.606,00 €
Ordenador	2	7,50 €	15,00 €	225,00 €
Impresora	2	9,00 €	18,00 €	270,00 €
Paquete Office	2	12,00 €	24,00 €	360,00 €
Materiales varios	2	9,00 €	18,00 €	270,00 €
Total				4.731,00 €

RESUMEN GENERAL DEL PRESUPUESTO.

Capítulo I. Documentación	782,46 €
Capítulo II. Tratamiento de imágenes	558,80 €
Capítulo III. Clasificación Supervisada	838,20 €
Capítulo IV. Cartografía de Usos de suelo	1.676,40 €
Capítulo V. Modelo de elevación digital	279,40 €
Capítulo VI. Memoria	4.731,00 €
Capítulo VII. Costes de las fuentes de datos	150,00 €
TOTAL ACTIVIDADES	9.016,26 €
BENEFICIO EMPRESARIAL (15%)	1.352,44 €
IVA (21%)	2.242,85 €
PRESUPUESTO FINAL	12.611,55 €



14. CONCLUSIONES

14. CONCLUSIONES

En las conclusiones generales quisiéramos destacar la importancia de la teledetección como un método de estudio, ya que nos permite conocer la zona de trabajo sin necesidad de estar en ella, reduciendo gastos de exploración.

Gracias a la teledetección se puede establecer la cobertura de usos del suelo de la zona de estudio, pudiéndose valorar los elementos que la componen.

Cabe destacar que el análisis de los usos del suelo previo a la visita de la zona, tal como lo hemos planteado en este proyecto, es un análisis basado en la capacidad de fotointerpretación del operador apoyándose en los datos geológicos obtenidos. Los verdaderos resultados se obtendrán en campo, realizando una comprobación in situ de las categorías y clases que se han establecido a priori.

Es de valorar, la gran cantidad de información disponible en la red. Los programas de libre distribución como *Google Earth* y *Earth Explorer*, son capaces de aportar muchísima información de forma rápida, eficaz y económica. Es importante tener en cuenta la bondad de esta información, pero es interesante su aportación como complemento de información. También queremos destacar que a pesar de que existe mucha información geológica de Marruecos en general, nos ha sido muy difícil encontrar información de nuestra zona en concreto

El objetivo de este PFC se ha logrado, ya que se ha obtenido una cartografía base, aportando información necesaria para los trabajos de campo posteriores.

La obtención de un modelo de elevación digital es una herramienta que aporta más información de la zona, y permite observar de forma rápida y fiable la morfología del terreno.

De cara al futuro, el presente Proyecto Fin de Carrera, es un proyecto que se puede retomar, ampliándolo en función de las necesidades y tecnologías disponibles para nuevos retos, tanto de la zona de estudio como de otras zonas a ser tratadas de la misma manera.

En definitiva el trabajo realizado forma parte del estudio previo de una zona de interés, que consideramos puede resultar oportuno para empezar cualquier trabajo, y que puede ayudar en la fase de diseño y de toma de decisiones.

15. BIBLIOGRAFÍA

15. BIBLIOGRAFÍA.

- **Textos:**

- Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. *Autor:* Emilio Chuvieco Salinero. 1ª Edición Mayo del 2002.
- Santiago Ormeño Villajos. "Teledetección Fundamental". F.G.U.P.M. E.U.I.T.T. 3ª Edición, 2006.
- Manual de ERDAS IMAGINE 2011.

- **Páginas Web:**

- <http://www.africainfomarket.org/paises/informacion-general-economica/marruecos/135>
- <http://www.pullmantur.es/destinos/marruecos.html>
- http://www.escuderos4x4.com/ciudades_de_interes.htm
- <http://www.hoeckmann.de/karten/afrika/index.htm>
- <http://www.personales.ulpgc.es/emartin.dch/articulos/grabados EMC97.pdf>
- <http://glovis.usgs.gov/>
- <http://www.gvsig.org/web/>
- http://www.herpnet.org/herpnet/gbif/World_UTM_Map.pdf
- <http://es.wikipedia.org/>
- <http://geo-sat.com.ar/es/content/view/32/65/>
- <http://www.fao.org/geonetwork/srv/es/main.home>
- <http://joseguerreroa.wordpress.com/2011/10/09/calculo-de-la-reflectancia-aparente-en-imagenes-de-satelite-con-qgis/>
- <http://www.maplibrary.org/>
- <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- <http://viajarpormarruecos.blogspot.com.es/2010/04/igmir-y-el-alto-valle-del-rio-tamanart.html>
- http://www.geografiainfo.es/nombres_geograficos/name.php?uni=-81198&fid=3967&c=morocco

16. RESULTADOS

17. RESULTADOS

- Mapa base del Valle de Tamanart a partir de imágenes de satélites ETM + a escala 1/300000. Se incluye en el proyecto en formato A2 y formato digital con extensión geoTIF.

Tamanart.tiff

- Mapa temático de coberturas del suelo del Valle de Tamanart a escala 1/300.000. Se incluye en el proyecto en formato A2 y formato digital con extensión geoTIF.

Clasificacion.tiff

- Mapa de la localización de los yacimientos sobre la cartografía base a escala 1/200.000. Se incluye en el proyecto en formato A2 y formato digital con extensión geoTIF.

Yacimientos.tiff

- Mapas de la localización de los yacimientos sobre la cartografía base dividida en dos hojas a escala 1/75.000. Se incluye en el proyecto en formato A1 y formato digital con extensión geoTIF.

Yacimientos1.tiff

Yacimientos2.tiff

- Plano de la localización de los paneles del yacimiento Tachokalt a escala 1/100. Se incluye en el proyecto en formato A2 y formato digital con extensión pdf.

Paneles.pdf

- Memoria descriptiva del proyecto. En formato digital con extensión pdf e impresa.

MEMORIA.pdf

Todos los archivos son incluidos en un DVD.