



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

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

**MODELIZACIÓN DEL CÁLCULO DE
INDICADORES AMBIENTALES, A PARTIR DE
SENSORES ÓPTICOS DE ALTA RESOLUCIÓN
TEMPORAL A BORDO DE SATÉLITE**

Tesis Doctoral

Autor:

Marcos PALOMO ARROYO

Ingeniero en Geodesia y Cartografía

2012

Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía.

E. T. S. I. Topografía, Geodesia y Cartografía.

TESIS DOCTORAL: Modelización del cálculo de Indicadores Ambientales, a partir de sensores ópticos de alta resolución temporal a bordo de satélite.

AUTOR: D. Marcos PALOMO ARROYO. Ingeniero en Geodesia y Cartografía.

DIRECTORES: Dr. Santiago ORMEÑO VILLAJOS. Dr. Ingeniero Agrónomo.
Dr. Rafael ESPEJO SERRANO. Dr. Ingeniero Agrónomo.

El comité a evaluar la presente tesis doctoral, está formado por los siguientes doctores:

PRESIDENTE: D.
(Universidad Politécnica de Madrid)

VOCAL: D.
(... ..)

D.
(... ..)

D.
(... ..)

SECRETARIO: D.
(... ..)

SUPLENTE:
(... ..)

... ..
(... ..)

ha decidido otorgar la calificación de

Madrid, a de de

El secretario del comité.

[...] Esto sabemos: La tierra no pertenece al hombre; el hombre pertenece a la tierra. Esto sabemos, todo va enlazado, como la sangre que une a una familia. Todo lo que le ocurra a la tierra, le ocurrirá a los hijos de la tierra. El hombre no tejó la trama de la vida; él es sólo un hilo. Lo que hace con la trama se lo hace a sí mismo. [...]

(Carta del Jefe Seattle al Gobernador de Washington, 1854)

Índice de contenidos

Índice de contenidos	v
Índice de tablas	xI
Índice de figuras	xV
1. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES, ESTADO DEL ARTE Y OBJETIVOS.	5
1.1. Introducción.	5
1.2. Antecedentes.	6
1.2.1. Los inicios de la teledetección espacial.	6
1.2.2. Principales programas y sensores de observación de la Tierra.	8
1.3. Estado del arte.	12
1.3.1. Integración de datos espaciales de diferente resolución. .	12
1.3.2. Modelos de obtención de variables biofísicas cuantitativas.	14
1.3.3. Modelos de obtención de documentos cualitativos de ocupación del suelo. Situación actual.	22
1.3.4. Indicadores ambientales.	46
1.3.5. Teoría de modelos. Modelización cartográfica.	55
1.4. Objetivos de la investigación.	66
1.5. Resumen.	67
2. MATERIALES Y MÉTODOS DE ESTUDIO.	69
2.1. Resoluciones de los sensores espaciales. Tipos.	69
2.2. Sensores espaciales.	70
2.2.1. Sensor <i>Thematic Mapper</i> (TM).	70
2.2.2. Sensor <i>Enhanced Thematic Mapper</i> (ETM+).	71
2.2.3. Sensor MODIS (<i>MODerate resolution Imaging Spectroradiometer</i>).	72

2.3.	Estructura de la información.	77
2.3.1.	Formato GeoTIFF.	78
2.3.2.	Formato <i>Fast Format</i>	79
2.3.3.	Archivos binarios genéricos.	79
2.3.4.	Archivos de imagen genéricos.	80
2.3.5.	Otros formatos.	81
2.3.6.	Formato HDF.	81
2.3.7.	El modelo de datos de SOV:	85
2.3.8.	Conversión de datos entre SOV y el formato HDF:	86
2.4.	Equipos informáticos.	88
2.5.	Resumen.	89

3. PROPUESTA DE UN MODELO TEÓRICO ADAPTADO A UNA ESCALA REGIONAL. 91

3.1.	Objetivos parciales.	91
3.2.	Descripción sintética.	91
3.3.	Subsistemas fundamentales.	92
3.3.1.	Descarga de datos de sensores espaciales.	92
3.3.2.	Conversión de formatos.	92
3.3.3.	Obtención de variables de base.	95
3.3.4.	Obtención de documentos temáticos derivados.	96
3.3.5.	Presentación y difusión de resultados.	98
3.4.	Subsistemas complementarios.	101
3.4.1.	Generación de mosaicos y recorte de imágenes.	101
3.4.2.	Cambio de sistema de referencia y proyección.	102
3.4.3.	Consideración de condiciones ambientales.	102
3.4.4.	Interpolación temporal.	108
3.5.	Consideraciones sobre metodologías, estructuras y datos.	109
3.5.1.	Lenguajes de modelado.	109
3.5.2.	Estructuras de datos.	110
3.6.	Especificaciones técnicas del modelo.	110
3.6.1.	Módulo de descarga de datos.	110
3.6.2.	Preproceso de datos.	111
3.6.3.	Cálculo de variables.	112
3.6.4.	Presentación de resultados.	113
3.6.5.	Automatización de los procesos.	114
3.6.6.	Tiempos de proceso y volumen de datos.	120
3.6.7.	Análisis comparativo.	128

3.7. Resumen del capítulo.	132
4. ENSAYO Y VALIDACIÓN DEL MODELO PROPUESTO.	
APLICACIÓN.	135
4.1. Objetivos parciales.	135
4.2. Validación radiométrica de los datos MODIS. Caso práctico 1. .	135
4.2.1. Zona de estudio y preproceso de los datos.	136
4.2.2. Obtención de datos de referencia.	138
4.2.3. Análisis de las diferencias.	140
4.2.4. Influencia del relieve.	143
4.2.5. Influencia de la ocupación del suelo.	146
4.3. Interpolación espacio-temporal de datos MODIS. Caso práctico 2.	148
4.3.1. Objetivos.	148
4.3.2. Zona de control.	149
4.3.3. Aumento de la resolución espacial de MODIS a partir de ETM+.	151
4.3.4. Propuesta y validación de un método de interpolación espacio-temporal.	153
4.4. Influencia de la pluviometría en los datos de reflectividad. Caso práctico 3.	162
4.4.1. Introducción.	162
4.4.2. Selección del área de estudio.	163
4.4.3. Muestreo puntual.	164
4.4.4. Distribución espacial de los datos.	174
4.5. Interpolación espacial. Aplicación a la obtención de documentos de ocupación del suelo. Caso práctico 4.	190
4.5.1. Antecedentes.	190
4.5.2. Zona de estudio.	191
4.5.3. Metodología.	192
4.5.4. Proceso de interpolación.	193
4.5.5. Proceso de clasificación.	193
4.6. Detección y seguimiento de procesos contaminantes en aguas embalsadas. Caso práctico 5.	205
4.6.1. Introducción.	205
4.6.2. Materiales y métodos.	205
4.6.3. Resultados.	210
4.7. Resultados parciales.	216

5. CONCLUSIONES Y POSIBLES LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.	221
5.1. Conclusiones generales.	221
5.2. Posibles líneas de investigación futuras	223
Bibliografía	225
Anejos	243
I. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES ESPACIALES CONSIDERADOS.	245
I.1. TM y ETM+.	245
I.1.1. Sensor TM.	245
I.1.2. Bandas espectrales del sensor ETM+.	246
I.2. Características de MODIS y estructura de la información de los productos estándar MOD09GA y MOD09GQ.	246
I.3. Posibilidades futuras.	264
II. MANUAL DE REFERENCIA DE LAS APLICACIONES PROPUESTAS.	267
II.1. Aplicación DescargaModis.	268
II.2. Aplicación PreprocesaModis.	269
II.3. Aplicación ImpHdf.	271
II.4. Aplicación AritSOV.	273
II.5. Aplicación CalcMedEntTerr.	277
II.6. Aplicación leeMODQA.	280
II.7. Aplicación OrcUpdateWeb.	282
II.8. Aplicación UploadColorCombi.	284
II.9. Aplicación PorcentOcupEntTerr.	286
II.10. Aplicación interpolaSOV.	289
II.11. Aplicación import _aemet.	290
III. MANUAL DE USUARIO DE LAS APLICACIONES PROPUESTAS.	295
III.1. Aplicación DescargaModis.	295
III.2. Aplicación PreprocesaModis.	296
III.3. Aplicación ImpHdf.	298
III.4. Aplicación AritSOV.	299
III.5. Aplicación CalcMedEntTerr.	300
III.6. Aplicación leeMODQA.	302
III.7. Aplicación OrcUpdateWeb.	303

III.8. Aplicación UploadColorCombi.	304
III.9. Aplicación PorcentOcupEntTerr.	306
III.10. Aplicación interpolaSOV.	307
III.11. Aplicación import_aemet.	309
IV. MODELOS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE LA APLICACIÓN ARITSOV.	313
IV.1. Cálculo de radiancia de imágenes TM/ETM+.	313
IV.2. Cálculo de reflectividad de imágenes TM/ETM+.	315
IV.3. Corrección topográfica de imágenes ETM+.	317
IV.4. Interpolación lineal de imágenes MODIS.	318
V. CÓDIGO FUENTE DE APLICACIONES COMPLEMENTARIAS.	321
V.1. Programa remuestreo.cpp.	321

Índice de tablas

1.1. Coeficientes de la transformación <i>Tasseled Cap</i> (TM y ETM+).	22
1.2. Coeficientes de la transformación <i>Tasseled Cap</i> (MODIS).	22
1.3. Leyendas utilizadas en el producto MCD12Q1 (MODIS).	30
1.4. Ejemplo de matriz de confusión o de contingencia.	42
1.5. Errores superficiales según resolución espacial.	51
1.6. Términos municipales cuyo error superficial es inferior al 5 %.	52
2.1. Tipos de datos de imagen en SOV.	87
3.1. Tiempos de cálculo y requerimientos de espacio, para la obtención de variables a partir de datos MODIS.	125
3.2. Tiempos de cálculo para la obtención de variables a partir de datos meteorológicos AEMET.	126
3.3. Tiempos de cálculo de la interpolación espacial de datos MODIS.	127
3.4. Comparativa entre servidores de productos derivados de satélites.	133
4.1. Comparación de reflectividad MODIS-ETM+ (media).	139
4.2. Análisis de las diferencias, en valor absoluto y % de reflectividad.	140
4.3. Diferencias entre MOD09GQ y la reflectividad predicha, en valor absoluto y %.	141
4.4. Correlación entre capas.	143
4.5. Estadísticos de la imagen ETM+ remuestreada, con corrección por relieve.	146
4.6. Diferencias entre MOD09GQ y estimación ETM+, según la clase de ocupación.	147
4.7. Correlación entre estadísticos y clases de ocupación. (B1 y B2 de MODIS)	148
4.8. Estadísticos de la imagen sintética (BXs) sin valores negativos.	152
4.9. Diferencias entre la imagen sintética (BXs) y la reflectividad ETM+.	152

4.10. Correlación entre la imagen sintética (BXs) y la ETM+ de control.	152
4.11. Estadísticos de la imagen sintética (BXs) con el método propuesto.	155
4.12. Coeficiente de correlación entre la imagen sintética (BXs) y las iniciales.	155
4.13. Diferencias entre la imagen sintética y la reflectividad ETM+. .	155
4.14. Estadísticos Zona 1.	159
4.15. Estadísticos Zona 2.	159
4.16. Estadísticos Zona 3.	159
4.17. Estadísticos Zona 4.	160
4.18. Aumento del coeficiente de correlación entre imagen sintética y de control, para las diferentes zonas.	160
4.19. Análisis de diferencias, por clase de pertenencia. Bandas 1 y 2. .	161
4.20. Coeficientes de correlación entre ángulos cenitales del sensor y solar y la reflectividad o el NDVI.	170
4.21. Influencia de la pluviometría en las diferentes cubiertas, en cada una de las fechas consideradas.	172
4.22. Características de las imágenes de partida (MOD09GA). Reflectividad media y desviación típica, en cada fecha estudiada.	175
4.23. Características de los datos MOD09GQ, bandas 1 y 2. Media y desviación típica en las cuatro fechas.	176
4.24. Clases de ocupación consideradas.	176
4.25. Matrices de error de la clasificación, empleando los datos procedentes del producto MOD09GA, en las fechas consideradas (Días juliano 233 (F1), 238 (F2), 240 (F3) y 249 (F4)).	181
4.26. Precisión de la clasificación, empleando datos procedentes del producto MOD09GA.	182
4.27. Matrices de error de la clasificación, empleando los datos procedentes de los productos MOD09GA y MOD09GQ, en las fechas consideradas (Días juliano 233 (F1), 238 (F2), 240 (F3) y 249 (F4).	184
4.28. Precisión de la clasificación obtenida a partir de los datos MOD09GA y MOD09GQ.	185
4.29. Valores del NDVI, calculado a partir de MOD09GA.	185
4.30. NDVI. Valores medios y desviación típica, según clase de pertenencia, en cada fecha.	187
4.31. Valores del NDVI, calculados a partir de MOD09GQ, en cada fecha.	187

4.32. NDVI. Valores medios y desviación típica, según clase de pertenencia y fecha.	189
4.33. Índice de estrés hídrico (MSI) obtenido a partir de MOD09GA, en las cuatro fechas consideradas.	189
4.34. Índice de estrés hídrico (MSI), calculado a partir de MOD09GA en las diferentes fechas, desglosado según clases de pertenencia. .	191
4.35. Valores del índice de estrés hídrico (MSI), calculado con datos mixtos MOD09GA y MOD09GQ.	191
4.36. Índice de estrés hídrico (MSI), obtenido a partir de los datos mixtos MOD09GA y MOD09GQ, según clase de pertenencia y fecha.	191
4.37. Comparación TM - MODIS interpolada (12 clases).	196
4.38. Comparación TM - MODIS (12 clases).	197
4.39. Comparación MODIS interpolada - MODIS (12 clases).	198
4.40. Comparación TM - MODIS interpolada (4 clases).	202
4.41. Comparación TM - MODIS (4 clases).	202
4.42. Comparación MODIS interpolada - MODIS (4 clases).	202
4.43. Comparación TM - MODIS interpolada (5 clases).	204
4.44. Comparación TM - MODIS (5 clases).	204
4.45. Comparación MODIS interpolada - MODIS (5 clases).	204
4.46. Características principales del embalse de As Conchas (Inventario de presas y embalses, MARM, 2011).	206
4.47. Concentraciones medias de Clorofila-a (en mg/m^3).	212
4.48. Concentraciones máximas de Clorofila-a (en mg/m^3).	213
4.49. Valores de los parámetros registrados por la estación automática <i>Río Limia en Pontelinares</i> . (Fuente: SAIH Miño-Sil).	214
4.50. Clasificación del grado trófico (Vollenweider and Kerekes, 1982). .	216
I.1. Bandas multiespectrales del sensor ETM+.	245
I.2. Bandas multiespectrales del sensor ETM+.	246
I.3. Bandas multiespectrales del sensor MODIS-TERRA.	246
I.5. Denominación de los productos MODIS - LANCE.	248
I.7. Productos MODIS, LP-DAAC.	250
I.9. MOD09GQ. Capas de información.	254
I.10. MOD09GQ. Calidad de la información.	254
I.12. MOD09GA. Capas de información. Bandas de 1000 m.	256
I.14. MOD09GA. Capas de información. Bandas de 500 m.	257
I.16. MOD09GA. Calidad de la información (1000 m).	259

I.18. MOD09GA. Calidad de la información (500 m).	260
I.20. MOD09GA. Datos de georreferenciación.	262
I.21. MOD09GA. Información sobre los datos de 250 m.	263
I.23. Características del sensor OLI.	264
I.24. Características del sensor TIRS.	264
I.25. Características del sensor VIIRS.	265

Índice de figuras

1.1. Método STARFM (Gao et al., 2006). En él, datos de alta y baja resolución espacial adquiridos de forma simultánea, son utilizados para predecir el valor en otra fecha, a partir de los datos de baja resolución.	14
1.2. NDVI, zona Palencia. Se puede apreciar el mayor grado de detalle de la imagen TM.	19
1.3. Resultado de la aplicación de la transformación Tasseled Cap a una imagen TM (Zona Palencia). Las tres bandas resultantes, están relacionadas con el <i>brillo</i> , el <i>verdor</i> y la <i>humedad</i> del terreno.	23
1.4. Esquema del proceso de clasificación supervisada (Imagen adaptada de: Faculty of Science. Chulalongkorn University).	25
1.5. Leyenda CLC00 (Imagen: Instituto Geográfico Nacional).	28
1.6. Leyenda <i>Global Land Cover 2000</i> (Imagen: Proyecto GLC2000).	31
1.7. Equivalencia de leyendas CLC00-GLC2000. (Imagen: Neumann, K. et al., 2007)	32
1.8. Espacio de características (Imagen: Wikiversity).	33
1.9. Clasificador de mínima distancia (Imagen: Wikiversity).	33
1.10. Clasificador por paralelepípedos (Imagen: Wikiversity).	34
1.11. Clasificador de máxima verosimilitud (Imagen: Wikiversity).	35
1.12. Ejemplo de árbol de decisión binario.	37
1.13. Configuración habitual de una red neuronal del tipo <i>Back Propagation</i> , de tres capas (Imagen: http://encefalus.com).	38
1.14. Funcionamiento de un nodo intermedio o neurona (Kendall, 2001).	39
1.15. Función de activación en una neurona (Kendall, 2001).	40
1.16. Modelo Presión - Estado - Respuesta. (Imagen: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México).	47
1.17. Proceso de obtención de indicadores ambientales, a partir de datos procedentes de satélite.	54
1.18. El proceso de modelización.	55

1.19. Representación de la realidad. (Imagen: http://www.nonprofitgis.org/layers.html)	64
1.20. Operaciones del álgebra de mapas. Izquierda: Operaciones puntuales. Derecha: Operaciones de vecindad.	66
2.1. Sistema de coordenadas Landsat World Wide Reference System (WRS).	72
2.2. Cobertura diaria de MODIS- Terra. (Imagen: LP-DAAC). . . .	73
2.3. Proyección sinusoidal empleada para la distribución de datos MODIS (Imagen: LP-DAAC).	74
2.4. Tipos de datos soportados por el formato HDF. (Imagen: The HDF Group).	83
2.5. Bloque de descripción de datos. (Imagen: The HDF Group). . .	84
2.6. Descriptor de datos. (Adaptada de The HDF Group).	85
2.7. Organización interna de los datos en un archivo HDF.	85
3.1. Esquema general del modelo. Dependiendo del origen de los datos, el flujo de procesos discurrirá por uno u otro camino. . .	93
3.2. Estructura del módulo de descarga de datos (MODIS).	94
3.3. Estructura del módulo de descarga de datos (TM/ETM+). . . .	94
3.4. Estructura del módulo de conversión de formatos. De HDF al específico de la aplicación.	94
3.5. Estructura del módulo de obtención documentos cuantitativos (índices).	95
3.6. Estructura del módulo de obtención documentos cualitativos (ocupación del suelo).	96
3.7. Modelización de la obtención de índices cuantitativos, a partir de sus expresiones, mediante operaciones aritmético-lógicas con las bandas de información.	97
3.8. Estructura del módulo de obtención de documentos derivados de resultados de tipo cualitativo (porcentajes de ocupación). . .	97
3.9. Estructura del módulo de obtención de documentos derivados de resultados cuantitativos (valores medios por entidad territorial). .	98
3.10. Estructura del módulo de presentación de resultados.	98
3.11. Vista de la interface de acceso a los resultados. Las capas temáticas obtenidas, se superponen a la base cartográfica proporcionada por GoogleMaps.	100

3.12. Estructura del módulo de generación de mosaicos y recorte de datos.	101
3.13. Estructura del módulo de cambio de proyección y sistema de referencia.	102
3.14. Consideración de la cubierta de nubes. Imagen de la Zona de Palencia.	103
3.15. Interface de acceso a los datos del SIAR (Castilla-La Mancha). .	105
3.16. Resultado de una consulta en el SIAR-Castilla La Mancha. . . .	106
3.17. Estructura de directorios del portal de acceso a los datos de la AEMET.	107
3.18. Estructura del módulo encargado del proceso de integración de datos meteorológicos con los procedentes de otras fuentes.	108
3.19. Estructura del módulo encargado del procedimiento de interpolación espacial.	109
3.20. Utilización de las aplicaciones en el “ <i>Modo manual/supervisado</i> ”. .	115
3.21. Ejemplo de utilización de aplicaciones en el “ <i>Modo automático/no supervisado</i> ”, a través de la línea de comandos.	115
4.1. Localización del área de estudio.	136
4.2. Aspecto de la zona de trabajo (Reflectividad en bandas 3 y 4 de ETM+).	137
4.3. Histograma de diferencias debidas al remuestreo. B1-B3 y B2-B4.	140
4.4. Distribución espacial de las diferencias (izq. B1-B3. Dcha. B2-B4).	141
4.5. Entropía, desviación típica y filtrado paso alto, banda 3, ETM+. Cuanto más claro, mayor es el valor del parámetro representado.	143
4.6. Entropía, desviación típica y filtrado paso alto, banda 4, ETM+. Cuanto más claro, mayor es el valor del parámetro representado.	143
4.7. Elevaciones de la zona de estudio, según el modelo SRTM3.	145
4.8. Pendientes de la zona de estudio, calculadas a partir del modelo SRTM3.	145
4.9. Zona de cultivos (C). (Fotografías: Google StreetView).	146
4.10. Suelo desnudo (SD). (Fotografías: Google StreetView).	146
4.11. Vegetación natural (VN). (Fotografías: Google StreetView).	147
4.12. Clasificación de la imagen ETM+. <i>SD</i> , hace referencia a la clase Suelo Desnudo, <i>C</i> , a la de Cultivos y <i>VN</i> a la de Vegetación Natural.	147
4.13. Localización del área de estudio.	149

4.14. Suelos desnudos o con poca vegetación. (Fotografías: Google StreetView).	150
4.15. Áreas urbanas y superficies artificiales. (Fotografía: Google StreetView).	150
4.16. Cauces fluviales. (Fotografía: Google StreetView).	150
4.17. Vegetación natural. (Fotografías: Google StreetView).	150
4.18. Zona de análisis. Reflectividad en Bandas 3 y 4 de la imagen ETM+ (14/11/2001).	151
4.19. Reflectividad en Bandas 1 y 2 de MOD09GQ, remuestreadas a 30 m. (24/12/2001)	151
4.20. Imagen sintética generada. (Reflectividad en Bandas 1 y 2).	153
4.21. Esquema del método de interpolación temporal lineal, propuesto.	154
4.22. Histograma de diferencias de reflectividad entre la imagen sintética y la de control. (Bandas 1 y 2).	156
4.23. Imagen obtenida mediante interpolación. (Reflectividad en Bandas 1 y 2).	156
4.24. Mejora de resolución de la imagen interpolada (derecha), con respecto a la imagen original (izquierda). (B1 arriba; B2 abajo).	157
4.25. Diferencias entre la imagen sintética y la ETM+ de comprobación. (Bandas 1 y 2).	157
4.26. Aparición de artefactos en la imagen interpolada (en el cauce del río), como consecuencia de la variación no lineal de la reflectividad entre las imágenes inicial y final.	158
4.27. Zonas de análisis seleccionadas.	158
4.28. Ocupación del suelo del área de estudio. Se han considerado 5 clases. Agua, Arena, Vegetación Natural y dos tipos de suelos.	161
4.29. Firmas espectrales de las tres fechas consideradas, para cada una de las cubiertas.	162
4.30. Vista general de la zona, MODIS (izq.) y ETM+ (dcha.). Combinación color RGB 432.	163
4.31. Localización del área de estudio.	164
4.32. Alrededores de Palencia. Cultivos de regadío. (Fotografías: Google StreetView).	164
4.33. Alrededores de Palencia. Cultivos de secano. (Fotografías: Google StreetView).	165
4.34. Alrededores de Palencia. Vegetación natural. (Fotografías: Google StreetView).	165

4.35. Evolución temporal de las perfiles espectrales de las clases seleccionadas, registradas por el sensor ETM+ en los meses de diciembre, febrero y agosto.	166
4.36. Influencia ángulo cenital del sensor en la reflectividad (bandas R e IRp) y en el NDVI, en las diferentes cubiertas analizadas. La reflectividad no se mantiene constante en el periodo considerado, presentando variaciones diarias.	168
4.37. Influencia del ángulo cenital solar en la reflectividad (bandas R e IRp) y en el NDVI, en las diferentes cubiertas analizadas. Se observa un patrón de variación de los valores almacenados, en concordancia con la posición del sol en el momento de la toma. .	169
4.38. Influencia de la pluviometría en la reflectividad, según tipo de cubierta.	171
4.39. Influencia de la pluviometría en las diferentes cubiertas. Se han considerado las bandas Roja (R) e Infrarroja próxima (NIR), así como el NDVI.	173
4.40. Firmas espectrales de la clasificación preliminar (promedios de cada clase en la parte superior y clases individuales en la inferior). Clases C1, C2, C3 y C4. Eje X: Banda MODIS. Eje Y: Reflectividad (%).	177
4.41. Firmas espectrales filtradas (promedios de cada clase en la parte superior y clases individuales en la inferior). Clases C1, C2, C3 y C4. Eje X: Banda MODIS. Eje Y: Reflectividad (%).	178
4.42. Imágenes clasificadas, a partir de los datos MOD09GA, en las cuatro fechas consideradas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.	180
4.43. Imágenes clasificadas a partir de los datos mixtos MOD09GA y MOD09GQ, en las cuatro fechas seleccionadas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.	183
4.44. NDVI obtenido a partir del producto MOD09GA, en las diferentes fechas analizadas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.	186
4.45. Evolución NDVI, calculado a partir de los datos MOD09GA, según clases de pertenencia. Eje X: Fecha (DJ). Eje Y: Valor NDVI.	187
4.46. NDVI obtenido a partir de MOD09GQ, en las diferentes fechas analizadas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.	188

4.47. Evolución NDVI, calculado a partir de los datos MOD09GQ, según clases de pertenencia. Eje X: Fecha (DJ). Eje Y: Valor NDVI.	189
4.48. Índice de estrés hídrico (MSI), calculado a partir del producto MOD09GA, en las cuatro fechas seleccionadas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.	190
4.49. Índice de estrés hídrico (MSI), obtenido a partir de la utilización conjunta de MOD09GA y MOD09GQ, en las cuatro fechas consideradas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.	192
4.50. Imágenes TM (fila superior, izquierda y derecha) y MODIS (fila inferior) iniciales, finales e interpolada (fila superior, centro). Combinación color RGB:342.	194
4.51. Variación del coeficiente Kappa, según el número de clases consideradas. Un agrupamiento en 12 <i>clústers</i> o clases, proporciona el mayor valor	195
4.52. Perfiles espectrales de las 12 clases (promedios de cada clase en la parte superior y clases individuales en la inferior). Eje X: Banda MODIS (Ordenadas según equivalencia con TM). Eje Y: Reflectividad (%).	199
4.53. Clasificación no supervisada (12 clases). En ella se han representado del mismo color las clases similares.	200
4.54. Clasificación no supervisada (4 clases).	201
4.55. Clasificación no supervisada (5 clases).	203
4.56. Vista del embalse de As Conchas (Imagen: Google Maps)	206
4.57. Evolución del nivel del embalse de As Conchas, durante el periodo estudiado.	206
4.58. Masas de agua. En color verde se muestra el embalse de Lindoso, en naranja, As Conchas y en azul, el de Salas).	210
4.59. Evolución temporal de la concentración de Clorofila-a.	211
4.60. Evolución temporal de los valores medios de Clorofila-a. En el eje X, se indican las 9 fechas consideradas, mientras que en el eje Y se indica la concentración media de Clorofila-a, mg/m^3 , en cada uno de los embalses.	212

4.61. Evolución temporal de los parámetros registrados en la estación <i>Río Limia en Pontelinares</i> , integrada en el SAIH/SAICA Miño- Sil, en cada una de las 9 fechas analizadas. Los valores correspondientes a la conductividad y a los fosfatos, están escalados para permitir una mejor visualización de los mismos (x 0.3 y x 500, respectivamente).	215
4.62. Distribución espacial de la concentración media de Clorofila-a. Embalse de Salas (24/mayo/2011).	216
III.1. Interfaz de usuario de la aplicación DescargaModis.	296
III.2. Interfaz de usuario de la aplicación PreprocesaModis.	297
III.3. Interfaz de usuario de la aplicación ImpHdf.	298
III.4. Interfaz de usuario de la aplicación AritSOV.	299
III.5. Interfaz de usuario de la aplicación CalcMedEntTerr.	301
III.6. Interfaz de usuario de la aplicación leeMODQA.	302
III.7. Interfaz de usuario de la aplicación OrcUpdateWeb.	304
III.8. Interfaz de usuario de la aplicación UploadColorCombi.	305
III.9. Interfaz de usuario de la aplicación interpolaSOV	306
III.10. Interfaz de usuario de la aplicación interpolaSOV	308
III.11. Interfaz de usuario de la aplicación import_aemet.	310

Resumen.

La presente tesis doctoral tiene por objeto el estudio y análisis de técnicas y modelos de obtención de parámetros biofísicos e indicadores ambientales, de manera automatizada a partir de imágenes procedentes de satélite de alta resolución temporal.

En primer lugar se revisan los diferentes programas espaciales de observación del territorio, con especial atención a los que proporcionan dicha resolución. También se han revisado las metodologías y procesos que permiten la obtención de diferentes parámetros cuantitativos y documentos cualitativos, relacionados con diversos aspectos de las cubiertas terrestres, atendiendo a su adaptabilidad a las particularidades de los datos.

En segundo lugar se propone un modelo de obtención de parámetros ambientales, que integra información proveniente de sensores espaciales y de otras fuentes auxiliares utilizando, en cierta medida, las metodologías presentadas en apartados anteriores y optimizando algunas de las referidas o proponiendo otras nuevas, de manera que se permita dicha obtención de manera eficiente, a partir de los datos disponibles y de forma sistemática.

Tras esta revisión de metodologías y propuesta del modelo, se ha procedido a la realización de experimentos, con la finalidad de comprobar su comportamiento en diferentes casos prácticos, depurar los flujos de datos y procesos, así como establecer las situaciones que pueden afectar a los resultados. De todo ello se deducirá la evaluación del referido modelo.

Los sensores considerados en este trabajo han sido MODIS, de alta resolución temporal y *Thematic Mapper* (TM), de media resolución espacial, por tratarse de instrumentos de referencia en la realización de estudios ambientales. También por la duración de sus correspondientes misiones de registro de datos, lo que permite realizar estudios de evolución temporal de ciertos parámetros biofísicos, durante amplios periodos de tiempo. Así mismo, es de destacar que la continuidad de los correspondientes programas parece estar asegurada.

Entre los experimentos realizados, se ha ensayado una metodología para la integración de datos procedentes de ambos sensores. También se ha analizado un método de interpolación temporal que permite obtener imágenes sintéticas con la resolución espacial de TM (30 m) y la temporal de MODIS (1 día), ampliando el rango de aplicación de este último sensor. Asimismo, se han analizado algunos de los factores que afectan a los datos registrados, tal como la geometría de la toma de los mismos y los episodios de precipitación, los cuales alteran los resultados obtenidos. Por otro lado, se ha comprobado la validez del modelo propuesto en el estudio de fenómenos ambientales dinámicos, en concreto la contaminación orgánica de aguas embalsadas.

Finalmente, se ha demostrado un buen comportamiento del modelo en todos los casos ensayados, así como su flexibilidad, lo que le permite adaptarse a nuevos orígenes de datos, o nuevas metodologías de cálculo.

Abstract.

This thesis aims to the study and analysis of techniques and models, in order to obtain biophysical parameters and environmental indicators in an automated way, using high temporal resolution satellite data.

Firstly we have reviewed the main Earth Observation Programs, paying attention to those that provide high temporal resolution. Also have reviewed the methodologies and process flow diagrams in order to obtain quantitative parameters and qualitative documents, relating to various aspects of land cover, according to their adaptability to the peculiarities of the data.

In the next stage, a model which allows obtaining environmental parameters, has been proposed. This structure integrates information from space sensors and ancillary data sources, using the methodologies presented in previous sections that permits the parameters calculation in an efficient and automated way.

After this review of methodologies and the proposal of the model, we proceeded to carry out experiments, in order to check the behavior of the structure in real situations. From this, we derive the accuracy of the model.

The sensors used in this work have been MODIS, which is a high temporal resolution sensor, and Thematic Mapper (TM), which is a medium spatial resolution instrument. This choice was motivated because they are reference sensors in environmental studies, as well as for the duration of their corresponding missions of data logging, and whose continuity seems assured.

Among the experiments, we tested a methodology that allows the integration of data from cited sensors, we discussed a proposal for a temporal interpolation method for obtaining synthetic images with spatial resolution of TM (30 m) and temporal of MODIS (1 day), extending the application range of this one. Furthermore, we have analyzed some of the factors that affect the recorded data, such as the relative position of the satellite with the ground point, and the rainfall events, which alter the obtained results. On the other

hand, we have proven the validity of the proposed model in the study of the organic contamination in inland water bodies.

Finally, we have demonstrated a good performance of the proposed model in all cases tested, as well as its flexibility and adaptability.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES, ESTADO DEL ARTE Y OBJETIVOS.

1.1. Introducción.

Se justifica la presente investigación en la necesidad de realizar un seguimiento de nuestro entorno ambiental, de una manera rigurosa, automatizada y con la suficiente frecuencia para cumplir los requerimientos de los indicadores ambientales, basada, fundamentalmente, en datos procedentes de satélite y en correspondencia con lo que, a nivel internacional, contempla el sistema GEOSS (*Global Earth Observation System of Systems*) y a nivel europeo el Programa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*). Dicha necesidad implica disponer de otra información de carácter diverso, con cierta frecuencia y que abarque zonas suficientemente extensas del territorio.

Clásicamente (e incluso, en la actualidad), la toma de datos se hace por procedimientos tradicionales, de recogida de muestras e información *in situ*, de forma que el proceso de obtención de datos es, con frecuencia, lento y costoso, además de lo limitado del número de muestras que es posible obtener de este modo, particularmente, cuando el área de aplicación se refiere a zonas muy extensas.

Con el lanzamiento de satélites orientados a la observación del territorio, equipados de sensores multiespectrales con una resolución espacial cada vez mayor, se ha podido disponer de gran cantidad de información ambiental de una forma económica, rápida, precisa y global, por lo que las técnicas de teledetección han ido adquiriendo progresivamente un mayor protagonismo en estudios de carácter ambiental. Sin embargo, debido a la configuración de los

parámetros orbitales y de registro, no es posible disponer de alta resolución espacial, espectral, temporal y radiométrica de forma simultánea lo que, de hecho, implica ciertas limitaciones en la utilidad de dichas técnicas.

Dos sensores muy utilizados en el ámbito de la teledetección ambiental, son TM (*Thematic Mapper*) y MODIS (*MODerate Image Spectroradiometer*). El primero de ellos es un sensor de referencia desde comienzos de los años 80, tiene una resolución espacial media (30 m en los canales multispectrales) y presenta una limitada resolución temporal (16 días), mientras que el segundo, puesto en órbita en 1999, es un sensor de baja resolución espacial (250 m - 1000 m) y una alta resolución temporal (1 día), por lo que sería conveniente desarrollar métodos que permitan integrar la información de ambos sensores, obteniendo, en la medida de lo posible, un documento que mejora la resolución temporal del uno y la espacial del otro.

Por otro lado, la posibilidad de acceder a los datos MODIS a través de servidores remotos, poco tiempo después de la adquisición de los mismos, así como la automatización de los procesos, posibilita la obtención de diversos parámetros ambientales, de forma eficiente para amplias zonas de territorio, con resoluciones espaciales de hasta 30 m y con una periodicidad de 24 horas. La referida posibilidad se encuentra en el origen de los objetivos perseguidos por la presente tesis.

1.2. Antecedentes.

1.2.1. Los inicios de la teledetección espacial.

El primer satélite específicamente desarrollado para adquirir imágenes de la superficie terrestre, fue puesto en órbita en febrero de 1959 con el inicio del programa *Corona*, el cual tenía una finalidad militar y se mantuvo operativo hasta 1972, siendo desclasificado en 1995 (McDonald, 1997). Por otro lado, el primer satélite diseñado específicamente para el estudio de recursos de la superficie terrestre fue el ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*), lanzado el 23 de Junio de 1972 (Goddard Space Flight Center, 1972). Los tres primeros de la serie (después conocida como LANDSAT) eran una versión modificada de los satélites meteorológicos NIMBUS y seguían una órbita casi polar a una altitud variable entre 897 y 918 km. Como sensor más característico llevaban el MSS que registra cuatro bandas espectrales (una banda espectral es un conjunto de radiaciones electromagnéticas cuyas longitudes de onda están comprendidas entre ciertos valores). El Landsat-1 dejó de estar en servicio el

6 de enero de 1978 y los Landsat 2 y 3 en el año 1983. El 16 de julio de 1982 se puso en órbita el Landsat-4 y el 1 de marzo de 1984 el Landsat-5, el cuál continua aún activo. El satélite Landsat-5 lleva el sensor *Thematic Mapper* (TM), con siete bandas espectrales y una resolución geométrica de 30 m. en seis de las bandas. Muchas misiones, desde entonces, han obtenido imágenes para el estudio de recursos terrestres, pero ninguna como Landsat ha estimulado el vertiginoso desarrollo de la Teledetección hasta los niveles actuales. En los años 1989-1990 estuvo en peligro la misión Landsat ante el planteamiento, por parte del gobierno americano de retirar la subvención, sin embargo hubo una reconsideración de la postura, en parte debido a las presiones de la comunidad científica internacional, lanzándose el Landsat-6, el cual fracasó en su puesta en órbita y el Landsat- 7, lanzado el 15 de abril de 1999 y que aún continua activo, pese a un fallo en su sensor *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+), que introducía algunas mejoras con respecto a su predecesor TM, tales como una banda pancromática con una resolución de 15 m y una mejora en la resolución de la banda térmica, la cuál pasó a ser de 60 m. En 1986 se puso en órbita el satélite francés Spot-1, también para el estudio de recursos terrestres y con el sensor *High Resolution Visible* (HRV) que puede trabajar en modo multibanda (4 bandas) y en modo multiespectral, de ésta última forma con una resolución espacial de 10 m. El programa Spot ha tenido continuidad, encontrándose actualmente operativo en satélite Spot-5, con el sensor *High Resolution Geometric* (HRG), el cual permite obtener imágenes en modo pancromático con una resolución espacial de hasta 2.5 m y en modo multiespectral con 10 m, en cuatro bandas. Está prevista la continuidad temporal de esta serie, con el lanzamiento de dos nuevos satélites en los años 2012 y 2013, con los que se espera alcanzar una resolución espacial de 1.5 m, en la banda pancromática y 6 m en las bandas multiespectrales. Paralelamente, se han ido desarrollando otros programas espaciales, basados en la utilización de otro tipo de sensores, los cuales no tienen la alta resolución espacial de los mencionados anteriormente, pero sin embargo tienen una alta resolución temporal, lo que permite llevar a cabo estudios diacrónicos de ciertos aspectos ambientales.

En la actualidad, los sensores espaciales son ampliamente utilizados en aplicaciones tales como predicción meteorológica, seguimiento de masas forestales y cultivos, detección de yacimientos minerales, control de cambios, estudios de polución, etc. proporcionando información de forma continua en el tiempo, homogénea y de múltiples aspectos.

En este trabajo, sólo nos ocuparemos de los sensores espaciales ópticos, que operan en el llamado *intervalo óptico del espectro electromagnético*, comprendido entre 0.4 - 15 μm (Goetz et al., 1985), abarcando desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo térmico. Es llamado intervalo óptico por el hecho de que pueden utilizarse espejos y lentes para reflejar y refractar la energía en el interior de los sensores.

1.2.2. Principales programas y sensores de observación de la Tierra.

1.2.2.1. El programa *Landsat*.

Dado el éxito de las misiones anteriores en lo que a obtención de imágenes se refiere, la NASA ideó junto con el Departamento de Interior de EE.UU. un programa conjunto, denominado inicialmente *Earth Resources Technology Satellites* (ERTS), que fue iniciado en 1967 y cuyo primer satélite, el ERTS-1, fue lanzado el 23 de julio de 1972, estando operativo hasta el 6 de enero de 1978. La plataforma de este sensor estaba basada en la del satélite meteorológico *Nimbus*, adaptada a las necesidades de la misión ERTS. Este satélite fue el primer satélite no tripulado específicamente diseñado para la adquisición de información de la superficie terrestre de forma sistemática, multiespectral y con una resolución media.

En 1975, la NASA cambió el nombre del programa a *Landsat*, al tiempo que el satélite ERTS-1 pasó a llamarse Landsat-1. Hasta la actualidad, un total de 6 satélites de este programa han sido lanzados con éxito, mientras que uno de ellos, sufrió un fallo en el lanzamiento.

Los Landsat siguen una órbita casi polar con una altitud de 705 km (918 km en la primera generación), para cubrir la superficie terrestre los satélites necesitan 16 días y 233 órbitas (18 y 252 para los Landsat 1,2 y 3), el solape de las imágenes en el ecuador es del 7.6 % (14 % para la primera generación) y cruza el citado círculo máximo a las 10 horas 30 minutos solares (9:30 en los Landsat 1, 2 y 3), las únicas áreas terrestres no cubiertas por los Landsat son las regiones polares con una latitud superior a los 81 grados N y S.

1.2.2.2. El programa *Earth Observing System* (EOS).

Se trata de un programa científico internacional cuyos objetivos principales son proveer los datos y los procesos necesarios para establecer los impactos de sucesos naturales y artificiales en el planeta. Así, los satélites que integran

el programa están orientados a la obtención de datos relativos a diversas áreas relacionadas con el clima, tales como radiación, nubes, vapor de agua y precipitaciones, glaciares, hielo oceánico y continental, ozono y contaminantes químicos así como otros aerosoles de origen antropogénico.

Dada la diversidad de temáticas implicadas en el mismo, los sensores que integran este programa no sólo están embarcados en plataformas espaciales, sino que también está complementado por una red de sensores terrestres. Además, el programa no se limita a los propios sensores de adquisición de datos, sino que también define los sistemas de almacenamiento de los datos y los formatos de los mismos, así como los sistemas de distribución de todo el conjunto de información adquirida.

El lanzamiento del último satélite de la serie Landsat supuso el punto de inicio de este programa, estando, en la actualidad, integrado por las siguientes plataformas espaciales:

- Landsat 7, 1999.
- *Quik Scatterometer* (QuikSCAT), 1999.
- Terra, 1999.
- *Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor Satellite* (ACRIMSAT), 1999.
- Jason-1, 2001.
- Aqua, 2002.
- *Solar Radiation and Climate Experiment* (SORCE), 2003.
- Aura, 2004.
- *Ocean Surface Topography Mission* (OSTM), 2008.

Por otro lado, se preveía la continuación del programa, mediante la puesta en órbita de la plataforma GLORY, a comienzos de 2011, que fracasó en su puesta en órbita, al estallar el cohete lanzador, así como con la *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM), cuyo lanzamiento está previsto para diciembre de 2012 (NASA, Earth Observing System, 2011).

1.2.2.3. La misión Envisat.

El satélite ENVISAT (*ENVironmental SATellite*), de la Agencia Espacial Europea, es un satélite orientado a la observación de los recursos terrestres, lanzado en marzo de 2002. De los sensores instalados a bordo, el de mayor interés desde el punto de vista de esta tesis, es el sensor MERIS (*Medium-Spectral Resolution, Imaging Spectrometer*), con una resolución espacial de 300 m, aproximadamente, que permite obtener una cobertura global cada 3 días, capturando información en 15 bandas espectrales, cuya posición y ancho de banda puede ser programado. Aunque las aplicaciones de este sensor pueden ser diversas, con aplicaciones terrestres y atmosféricas, está principalmente orientado al estudio de las masas oceánicas, en lo referente a medidas de calidad de aguas.

1.2.2.4. El programa *Global Monitoring Environment System* (GMES).

En el año 2003, se firmó el acuerdo marco entre la Comisión Europea y la Agencia Espacial Europea (ESA), con la finalidad de crear un programa espacial europeo. En principio, este programa debe cubrir los siguientes aspectos:

- Observación de la Tierra (GMES).
- Navegación por satélite (GALILEO).
- Meteorología (EUMETSAT).
- Telecomunicaciones (SATCOM).

El comienzo del programa GMES, tuvo lugar en el año 2006, con la creación del *GMES Bureau* que dio comienzo al desarrollo de metodologías y sensores para cubrir determinados aspectos relacionados con el medio ambiente, si bien el lanzamiento de los primeros satélites Sentinel, no está previsto hasta finales de 2012, mientras que los servicios operativos no se encontrarán disponibles hasta el año 2015, por lo que no es contemplado en el ámbito de esta investigación.

1.2.2.5. El programa SPOT.

Este programa fue iniciado en 1978 por el CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales francés) en colaboración con Bélgica y Suecia (Brachet, 1985).

Los satélites de la serie Spot, cinco en total y dos más en proyecto, han ido mejorando sus prestaciones, en lo referente a la resolución espacial, estando siempre más orientados a la obtención de cartografía de base dadas sus características así como el reducido número de bandas espectrales. La resolución geométrica del sensor *High Resolution Geometric* (HRG), instalado a bordo del satélite Spot 5, es de 5 m, en modo pancromático (existiendo la posibilidad de obtener una resolución de 2.5 m mediante un modo de trabajo especial) y de 10 m, en las 4 bandas multiespectrales, situadas en las regiones verde, roja, infrarrojo próximo y medio.

1.2.2.6. Misiones futuras.

Dada la antigüedad de las primeras misiones Landsat, así como la utilidad de los datos suministrados por los sensores MODIS de los satélites Terra y Aqua, la colección de datos recogidos en estos años es muy grande, lo que permite realizar estudios comparativos de evoluciones temporales. Por ello, es de gran interés que haya una continuidad temporal en los mismos. En este sentido, se están diseñando y preparando los sensores que sustituirán a TM y ETM+, así como a MODIS.

Las misiones que continuarán con la adquisición de datos son *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM) y *NPOESS Preparatory Project* (NPP).

Landsat Data Continuity Mission. Se trata de una misión conjunta de la NASA y del *United States Geological Survey* (USGS), diseñada para proporcionar continuidad temporal a las series de datos adquiridas por los sensores MSS, TM y ETM+, instalados a bordo de los diversos satélites de que han conformado la misión Landsat, durante un intervalo de 30 años, cuando éstos dejen de estar operativos (Irons and Masek, 2006; Irons and Murphy-Morris, 2007).

La plataforma espacial está obtenida a partir de otras anteriores, ya probadas, con el fin de disminuir costes, así como evitar fallos de diseño. En concreto, es una evolución de la plataforma 300HP *Standard Modular Spacecraft Architecture*, fabricada por Orbital (Rapid Spacecraft Development Office, 2010).

Los sensores principales embarcados en la plataforma son el *Operational Land Imager* (OLI) y el *Thermal InfraRed Sensor* (TIRS), cuyas características se muestran en las tablas I.23y I.24, en el anejo I.3. Como se puede ver, se han añadido dos bandas, en relación a TM/ETM+, que aportan información en la

región azul del espectro, con utilidad en observaciones costeras, así como en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR), que se utilizará para la detección de cirros. Todas las bandas cuentan con una resolución radiométrica de 12 bits.

El primer satélite de esta misión, está previsto que sea lanzado en diciembre de 2012 (Behrens, 2009), siendo su vida operativa de 5 años.

NPOESS Preparatory Project (NPP). El *National Polar-orbiting Operational Environment Satellite System (NPOESS) Preparatory Project (NPP)*, es una misión que está diseñada para evitar que se produzcan interrupciones en la adquisición de datos de los sensores MODIS, en el periodo previo a la puesta en marcha del programa NPOESS en 2013. Uno de los sensores destacados de esta misión es el *Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS)*. Las características de este sensor se muestran en la Tabla I.25, del anejo I.3 (Lee et al., 2006).

La fecha de lanzamiento de la misión se ha ido retrasando sucesivamente (Schweiss et al., 2006, 2008), desde el año 2004, en que estaba previsto la puesta en órbita del satélite.

1.3. Estado del arte.

1.3.1. Integración de datos espaciales de diferente resolución.

Con la finalidad de ampliar los rango de aplicabilidad de los sensores espaciales, existen metodologías que permiten integrar datos procedentes de sensores de alta y baja resolución espacial, así como de diferente resolución temporal.

1.3.1.1. Integración de datos de diferente resolución espacial.

Con la finalidad de integrar datos de distinta procedencia, se han propuesto métodos de remuestreo que permiten, tanto validar los datos adquiridos por sensores de baja resolución espacial, como integrar datos de reflectividad de diferentes resoluciones.

Uno de estos métodos, es el propuesto por Liang et al. (2002), que puede ser utilizado para predecir valores de reflectividad MODIS, a partir de la reflectividad medida por el sensor ETM+. Para ello, se utilizan unas relaciones matemáticas, establecidas a partir de un proceso de regresión lineal, en el que

se relacionan reflectividades medidas tanto con ETM+, como con MODIS, con medidas en campo efectuadas con un espectrorradiómetro.

Las expresiones propuestas, que permiten obtener la reflectividad MODIS (R_i), a partir de las correspondientes ETM+ (r_i), siendo i el número de banda, son las siguientes:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,0789r_2 + 0,9209r_3 \\ R_2 &= 0,1711r_1 - 0,2007r_2 + 1,0107r_4 + 0,0427r_5 \\ R_3 &= 1,0848r_1 - 0,1115r_2 + 0,0186r_3 + 0,0103r_4 - 0,0138r_5 \\ R_4 &= 1,1595r_2 - 0,1783r_3 + 0,0191r_4 \\ R_5 &= 0,5191r_1 - 0,7254r_2 + 0,7126r_4 + 0,5719r_5 \\ R_6 &= -0,0246r_4 + 1,1889r_5 - 0,1846r_7 \\ R_7 &= -0,1061r_1 + 0,1145r_2 - 0,0554r_4 + 0,0944r_5 + 0,9582r_7 \end{aligned} \tag{1.1}$$

En ellas, se puede apreciar que para obtener la reflectividad de una determinada banda, se utilizan los datos de más de una banda del sensor ETM+, ello con la finalidad de reducir los residuos del modelo de regresión, así como para minimizar las posibles correlaciones entre bandas del intervalo visible e infrarrojo próximo del espectro.

1.3.1.2. Integración de datos de diferente resolución temporal.

En el caso de precisar la utilización conjunta de datos adquiridos por sensores de diferente resolución temporal, se han propuesto algunas metodologías, con la finalidad de mejorar las prestaciones de los sensores de media resolución temporal, permitiendo la incorporación de datos procedentes de otros sensores, con mayor resolución temporal, pero menor resolución geométrica.

Una metodología a considerar, es el *Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model* (STARFM), propuesto por Gao (1996), el cual permite obtener imágenes con la resolución espacial de ETM+ y la resolución temporal de MODIS. El esquema del modelo, se muestra en la Figura 1.1. La obtención de la imagen interpolada, se obtiene a partir de una combinación de imágenes de alta y baja resolución espacial en la época T1, en la que se buscan celdas (marcadas con un círculo) con valores similares al de la celda central (señalada por una cruz), en el paso (1). Posteriormente, estas celdas son sometidas a un proceso de filtrado (2) con los que se determinarán los

pesos que tendrán en el proceso de promediado, junto con los valores de baja resolución (3), de forma que se obtenga el resultado final (4).

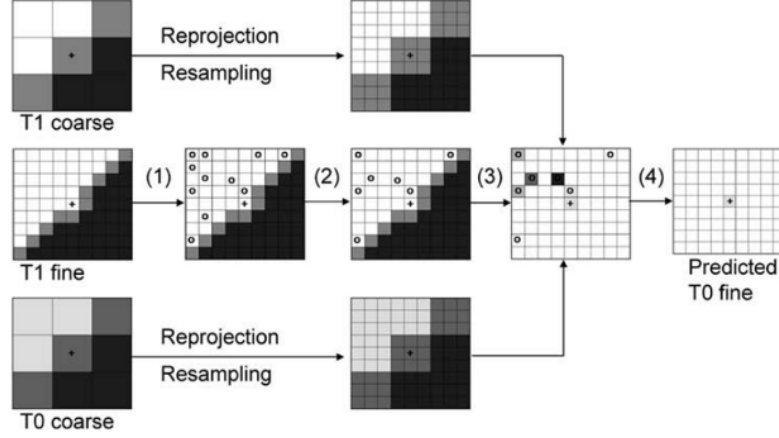


Figura 1.1: Método STARFM (Gao et al., 2006). En él, datos de alta y baja resolución espacial adquiridos de forma simultánea, son utilizados para predecir el valor en otra fecha, a partir de los datos de baja resolución.

El valor resultado de la interpolación, puede ser obtenido mediante la expresión

$$L(x_{w/2}, y_{w/2}, t_0) = \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^w \sum_{k=1}^w W_{ijk} \times (M(x_i, y_j, t_0) + L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k)) \quad (1.2)$$

donde $L(x_{w/2}, y_{w/2}, t_0)$ es la reflectividad calculada para la imagen interpolada, $L(x_i, y_j, t_k)$ es la reflectividad de ETM+ en la fecha inicial, W_{ijk} , es el coeficiente de peso de la celda considerada, w es el tamaño de la ventana de interpolación y $M(x_i, y_j, t_0)$ y $M(x_i, y_j, t_k)$, son las reflectividades de MODIS en las dos fechas consideradas.

1.3.2. Modelos de obtención de variables biofísicas cuantitativas.

1.3.2.1. Parámetros biofísicos.

La cuantificación de determinados aspectos biofísicos del territorio, exige la definición de fórmulas y procedimientos adaptados al proceso de datos procedentes de teledetección espacial.

La obtención de diversos de estos parámetros o variables a partir de los datos suministrados por la teledetección, se lleva a cabo mediante

procedimientos más o menos complejos, que pueden requerir, a su vez, datos auxiliares que complementen a los obtenidos por los sensores espaciales.

1.3.2.2. Fuentes de datos.

La fuente primaria de datos, necesarios para la obtención de los diversos parámetros biofísicos seleccionados en este trabajo, es el sensor MODIS y, eventualmente, el sensor TM. En ciertos parámetros, pueden ser necesarios una serie de datos auxiliares, tales como datos meteorológicos, relieve, coeficientes edafológicos, entre otros. En estos casos, las fuentes de procedencia de los mismos son diversas, así como sus formatos de almacenamiento originales y se indicarán en cada caso, pudiendo ser necesario efectuar un número variable de operaciones de preprocesamiento para su integración.

1.3.2.3. Escalas de medida y representación.

Dada la naturaleza de las variables calculadas mediante teledetección, se utilizan escalas cuantitativas y documentos dasimétricos para la representación gráfica, cuya resolución espacial corresponderá con el tamaño del píxel del sensor, de forma que cada valor está referido a un punto del terreno.

No obstante, también existe la posibilidad de presentar los resultados mediante documentos de coropletas, realizando agregados por entidades territoriales, cuencas hidrográficas, etc., de forma que el valor esté referido a dichas unidades administrativas.

1.3.2.4. Índices de vegetación.

Un parámetro fundamental para el seguimiento y caracterización de cubiertas son los índices de vegetación. Diversos estudios han demostrado la correlación existente entre estos parámetros y el grado de cubierta vegetal del territorio (Myneni et al., 1995), por lo que constituyen una referencia fundamental en las aplicaciones ambientales de la teledetección. Éstos se han venido utilizando desde los comienzos de la teledetección por satélite, habiéndose propuesto multitud de ellos, pues se obtienen fácilmente a partir de los datos adquiridos por los sensores espaciales.

A continuación se muestran las expresiones que permiten calcular algunos de estos índices. En ellas, R_{xxx} hace referencia al valor de reflectividad registrado por el sensor, expresado en nm .

- *Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI (Rouse et al., 1974):

$$NDVI = \frac{R_{859} - R_{645}}{R_{859} + R_{645}} \quad (1.3)$$

- *Difference Vegetation Index*, DVI (Tucker, 1979):

$$DVI = R_{859} - R_{645} \quad (1.4)$$

- *Simple Ratio Index*, SRI (Birth and McVey, 1968):

$$SRI = \frac{R_{859}}{R_{645}} \quad (1.5)$$

- *Modified Simple Ratio*, MSR (Chen, 1996):

$$MSR = \frac{R_{859}/R_{645} - 1}{\sqrt{R_{859}/R_{645}} + 1} \quad (1.6)$$

- *Enhanced Vegetation Index*, EVI (Huete et al., 1994):

$$EVI = 2.5 \frac{R_{859} - R_{645}}{R_{859} + 6 \cdot R_{645} - 7.5 \cdot R_{469} + 1} \quad (1.7)$$

- *Normalized Difference Water Index*, NDWI (Gao, 1996):

$$NDWI = \frac{R_{855} - R_{1240}}{R_{855} + R_{1240}} \quad (1.8)$$

- *Shortwave Infrared Water Stress Index*, SIWSI (Fensholt and Sandholt, 2003):

$$SIWSI = \frac{R_{859} - R_{1640}}{R_{859} + R_{1640}} \quad (1.9)$$

- *Normalize Difference Water Index 7*, NDI7 (Rubio et al., 2006):

$$NDI7 = \frac{R_{859} - R_{2130}}{R_{859} + R_{2130}} \quad (1.10)$$

- *Simple Ratio Water Index*, SRWI (Zarco-Tejada and Ustin, 2002):

$$SRWI = \frac{R_{859}}{R_{1240}} \quad (1.11)$$

- *Moisture Stress Index*, MSI (Hunt Jr and Rock, 1989):

$$MSI = \frac{R_{1640}}{R_{859}} \quad (1.12)$$

- *Global Vegetation Moisture Index*, GVMI (Ceccato et al., 2002):

$$GVMI = \frac{(R_{859} + 0.1) - (R_{1640} + 0.02)}{(R_{859} + 0.1) + (R_{1640} + 0.02)} \quad (1.13)$$

- *Weighted Difference Vegetation index*, WDVl (Clevers, 1991):

$$WDVI = R_{859} - s \cdot R_{645} \quad (1.14)$$

donde s es la pendiente de la línea de suelo.

- *Soil Adjusted Vegetation Index*, SAVI (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{R_{859} - R_{645}}{R_{859} - R_{645} + L} (1 + L) \quad (1.15)$$

en la que L es un término cuyo valor puede ser $L = 0$ en áreas totalmente cubiertas de vegetación y $L = 1$ en zonas desprovistas de la misma, si bien se suele tomar un valor de $L = 0,5$, que se ajusta bien a la mayor parte de las situaciones.

- *Second Soil Adjusted Vegetation Index*, SAVI2 (Major et al., 1990):

$$SAVI2 = \frac{R_{859}}{R_{645} + \frac{b}{a}} \quad (1.16)$$

siendo a y b los coeficientes de la línea de suelo.

- *Modified Second Soil Adjusted Vegetation Index*, MSAVI2 (Qi et al., 1994):

$$MSAVI2 = \frac{1}{2} \left[2(R_{859} + 1) - \sqrt{2(R_{859} + 1)^2 - 8(R_{859} - R_{645})} \right] \quad (1.17)$$

- *Adjusted Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*, ATSAVI (Baret and Guyot, 1991):

$$ATSAVI = \frac{a(R_{859} - a \cdot R_{645} - b)}{a \cdot R_{845} + R_{645} + 0.08(1 + a^2)} \quad (1.18)$$

donde a y b son los coeficientes de la línea de suelo.

- *Green Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI_g (Gitelson et al., 1996):

$$NDVI_g = \frac{R_{859} - R_{555}}{R_{859} + R_{555}} \quad (1.19)$$

- *Triangular Vegetation Index*, TVI (Broge and Leblanc, 2001):

$$TVI = 60(R_{859} - R_{555}) - 100(R_{645} - R_{555}) \quad (1.20)$$

- *Red/Green Index*, RGI (Gamon and Surfus, 1999):

$$RGI = \frac{R_{645}}{R_{555}} \quad (1.21)$$

- *Atmospherically Resistant Index*, ARVI (Kaufman and Tanre, 1992):

$$ARVI = \frac{R_{845} - R_{RB}}{R_{845} + R_{RB}}; \quad (1.22)$$

$$R_{RB} = R_{645} - \gamma(R_{469} - R_{645}) \quad (1.23)$$

donde γ es un parámetro que varía en función de la cantidad de aerosoles.

- *Global Environment Monitoring Index*, GEMI (Pinty and Verstraete, 1992):

$$GEMI = \eta(1 - 0.25\eta) - \frac{R_{645} - 0.125}{1 - R_{645}}; \quad (1.24)$$

$$\eta = \frac{2(R_{845}^2 - R_{645}^2) + 1.5R_{859} + 0.5R_{645}}{R_{859} + R_{645} + 0.5} \quad (1.25)$$

- *Amplified Normalised Difference Vegetation Index*, ANDVI (Zurita Milla, 2003):

$$ANDVI = \frac{(R_{859} + R_{469}) - (R_{555} - R_{645})}{(R_{845} + R_{469}) + (R_{555} - R_{645})} \quad (1.26)$$

- *Perpendicular Vegetation Index*, PVI (Richardson and Wiegand, 1977):

$$PVI = \frac{R_{859} - aR_{645} - b}{\sqrt{1 + a^2}} \quad (1.27)$$

donde a y b son los coeficientes de la línea de suelo.

- *Normalized Difference Senescent Vegetation Index*, NDSVI (Qi et al., 2002):

$$NDSVI = \frac{R_{1640} - R_{645}}{R_{1640} + R_{645}} \quad (1.28)$$

En las expresiones anteriores, se hace referencia a los coeficientes de la línea de suelo, expresada en la forma $y = a \cdot x + b$, la cual representa la relación entre la reflectancia en el Rojo y en el Infrarrojo próximo, de los píxeles totalmente desprovistos de vegetación. Los valores ambos coeficientes, a y b , se obtienen mediante un análisis de regresión lineal de dichas reflectancias.

En el listado anterior, se ha intentado adaptar las expresiones dadas para cada uno de los índices propuestos, a las características específicas de las bandas espectrales de MODIS. No obstante, dadas las diferencias en respuesta espectral, ancho de cada banda y posición de las mismas en el espectro, se han realizado estudios con el fin de obtener los parámetros de transformación entre múltiples sensores para alguno de esos parámetros (Steven et al., 2003). En la Figura 1.2, se muestra, a modo de ejemplo, el NDVI obtenido a partir de datos procedentes de los sensores TM y MODIS (izquierda y derecha).

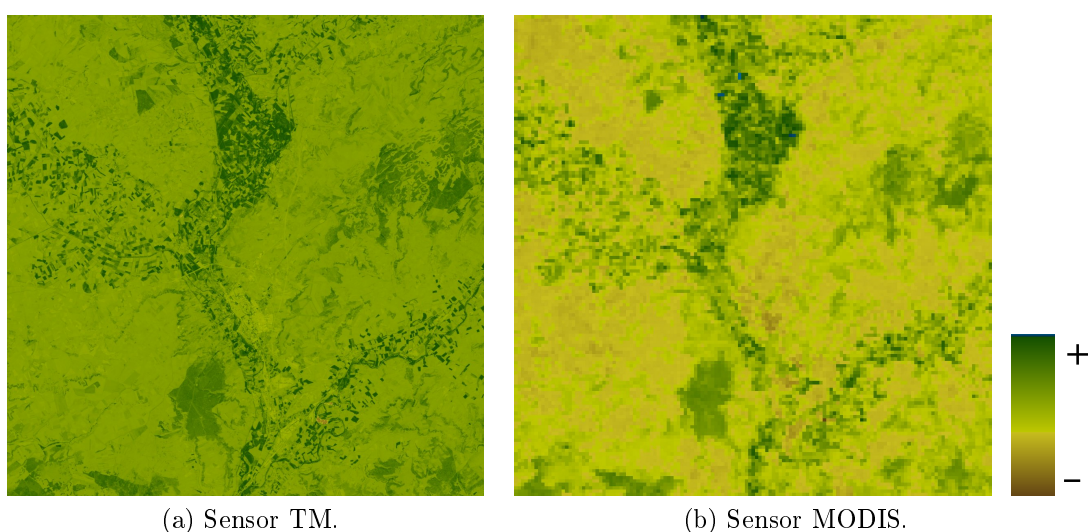


Figura 1.2: NDVI, zona Palencia. Se puede apreciar el mayor grado de detalle de la imagen TM.

1.3.2.5. Otros índices.

Junto con los índices de vegetación, se han propuesto otros para evaluar otras propiedades de las cubiertas terrestres, tales como

- *Normalized Difference Snow Index*, NDSI (Hall et al., 1995):

$$NDSI = \frac{R_{555} - R_{1640}}{R_{555} + R_{1640}} \quad (1.29)$$

- *Normalized Difference Tillage Index*, NDTI (Van Deventer et al., 1997):

$$NDTI = \frac{R_{1640} - R_{2130}}{R_{1640} + R_{2130}} \quad (1.30)$$

- *Concentración de Clorofila-A*, ChlA (Kendall, 2004):

$$ChlA = 10,0^{c_0 + c_1 \log \frac{R_{488}}{R_{551}} + c_2 \left[\log \frac{R_{488}}{R_{551}} \right]^2 + c_3 \left[\log \frac{R_{488}}{R_{551}} \right]^3} \quad (1.31)$$

donde c_0 , c_1 , c_2 y c_3 son coeficientes que se determinan en función de las características de las aguas analizadas.

- *Topsoil Grain Size Index*, GSI (Xiao et al., 2006):

$$GSI = \frac{R_{645} - R_{469}}{R_{645} + R_{469} + R_{555}} \quad (1.32)$$

- *Bare Soil Index*, BSI (Rikimaru et al., 2002):

$$BSI = \frac{(R_{1640} + R_{645}) - (R_{859} + R_{469})}{(R_{1640} + R_{645}) + (R_{859} + R_{469})} \quad (1.33)$$

- *Normalized Difference Moisture Index*, NDMI (equivalente a SIWSI) (Jin and Sader, 2005):

$$NDMI = \frac{R_{859} - R_{1640}}{R_{859} + R_{1640}} \quad (1.34)$$

- *MODIS Burned Area Index*, BAIM (Martín and Chuvieco, 1998; Martín et al., 2005):

$$BAIM = \frac{1}{(R_{C859} - R_{859})^2 + (R_{C2130} - R_{2130})^2} \quad (1.35)$$

donde R_{C859} y R_{C2130} , son las reflectividades en las bandas 2 y 7 MODIS, de la imagen de referencia, previa al incendio.

1.3.2.6. Transformación *Tasseled Cap*.

La transformación *Tasseled Cap* (Kauth and Thomas, 1976) se desarrolló originalmente para el sensor MSS, adaptándose posteriormente a los sensores TM y ETM+. El objetivo de esta transformación es discriminar cultivos y estudiar su desarrollo, así como realizar seguimiento de cambios de la cubierta (Bauer et al., 1994; Cohen et al., 1995; Collins and Woodcock, 1996; Dymond et al., 2002; Skakun et al., 2003).

Conceptualmente supone un cambio de dimensionalidad, de forma que convierte las bandas originales de TM/ETM+ con información espectral en otras nuevas con información sobre tipos de suelo (*Brillo*), cobertura vegetal (*Verdor*) y nivel de humedad (*Humedad*), al mismo tiempo que reduce la cantidad de datos con una pérdida de información mínima (Crist and Cicone, 1984; Crist, 1985; Crist and Kauth, 1986), al transformar las seis bandas espectrales iniciales en tres. Los coeficientes que se emplean en la transformación dependen del sensor utilizado y se muestran en la tabla 1.1.

Algunos autores (Lobser and Cohen, 2007; Zhang et al., 2002), han desarrollado unos coeficientes adaptados a las bandas 1 a 7 de MODIS y comprobado su validez con los datos procedentes de TM/ETM+ (Tabla 1.2).

Un ejemplo del resultado de aplicar los coeficientes anteriores, se muestra en la Figura 1.3 , donde se puede observar las nuevas bandas resultantes de aplicar la transformación a una imagen TM, así como la discriminación de diferentes tipos de cubiertas presentes en ellas, según su brillo, su verdor o su humedad.

Tabla 1.1: Coeficientes de la transformación *Tasseled Cap* (TM y ETM+).

(a) Sensor TM.

Banda	Brillo (TM)	Verdor (TM)	Humedad (TM)
1 (<i>Blue</i>)	0.3037	-0.2848	0.1509
2 (<i>Green</i>)	0.2793	-0.2435	0.1793
3 (<i>Red</i>)	0.4343	-0.5436	0.3299
4 (<i>NIR1</i>)	0.5585	0.7243	0.3406
5 (<i>NIR 2</i>)	0.5082	0.0840	-0.7112
7 (<i>SWIR 1</i>)	0.1863	-0.1800	-0.4572

(b) Sensor ETM+.

Banda	Brillo (ETM+)	Verdor (ETM+)	Humedad (ETM+)
1 (<i>Blue</i>)	0.3561	-0.3344	0.2626
2 (<i>Green</i>)	0.3972	-0.3544	0.2141
3 (<i>Red</i>)	0.3904	-0.4556	0.0926
4 (<i>NIR1</i>)	0.6966	0.6966	0.0656
5 (<i>NIR 2</i>)	0.2286	-0.0242	-0.7629
7 (<i>SWIR 1</i>)	0.1596	-0.2630	-0.5388

Tabla 1.2: Coeficientes de la transformación *Tasseled Cap* (MODIS).

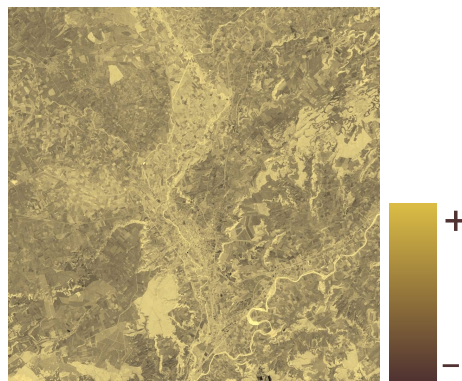
Banda	Brillo	Verdor	Humedad
1 (<i>Red</i>)	0.4395	-0.4064	0.1147
2 (<i>NIR1</i>)	0.5945	0.5129	0.2489
3 (<i>Blue</i>)	0.2460	-0.2744	0.2408
4 (<i>Green</i>)	0.3918	-0.2893	0.3132
5 (<i>NIR 2</i>)	0.3506	0.4882	-0.3122
6 (<i>SWIR 1</i>)	0.2136	-0.0036	-0.6416
7 (<i>SWIR 2</i>)	0.2678	-0.4169	-0.5087

1.3.3. Modelos de obtención de documentos cualitativos de ocupación del suelo. Situación actual.

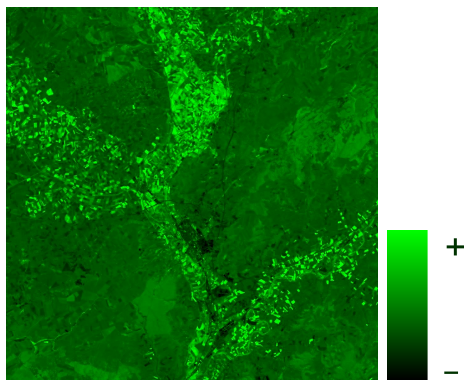
1.3.3.1. Clasificación de imágenes multiespectrales.

El objetivo general de esta sección es desglosar brevemente el proceso de clasificación y los posibles métodos de cálculo a desarrollar en cada una de ellas, de manera que se tenga un panorama de encuadre de la opción adoptada en nuestro estudio.

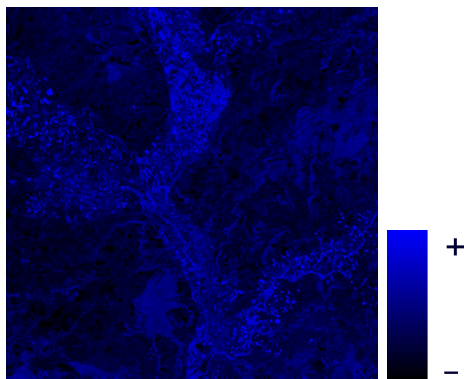
La necesidad de representar la superficie de la tierra y lo que sucede sobre ella ha sido una constante histórica, difícil de satisfacer hasta nuestro siglo debido a las carencias técnicas. Los datos adquiridos por satélites espaciales



(a) Brillo.



(b) Verdor.



(c) Humedad.

Figura 1.3: Resultado de la aplicación de la transformación Tasseled Cap a una imagen TM (Zona Palencia). Las tres bandas resultantes, están relacionadas con el *brillo*, el *verdor* y la *humedad* del terreno.

para el seguimiento de recursos naturales, han proporcionado medios más adecuados para la cartografía temática, aportando una visión global de grandes superficies con una alta frecuencia temporal. La clasificación temática suele ser el objetivo final de la mayoría de los trabajos de teledetección; en muchos casos la información tematizada pasa a ser fuente de alimentación de un sistema

de información geográfica, entrando en otra cadena de procesos de análisis y representación.

Como contrapartida, los datos adquiridos por sensores espaciales de alta resolución espacial suelen ser costosos, su registro territorial es de una globalidad limitada por el alto nivel de detalle (por ejemplo, 185 x 185 km², para cada escena de Landsat TM y ETM+) y requieren una gran capacidad de los equipos informáticos utilizados para el proceso del volumen de datos registrado. En este sentido, los sensores de alta resolución temporal (1 día) y baja resolución espacial (250 - 500 m), así como con una mayor resolución espectral del sensor (hasta 36 bandas en el caso de MODIS), se presentan como idóneos para estudios que abarquen zonas amplias del territorio.

El objetivo principal de la clasificación es la asignación automatizada de los píxeles de una imagen a diversas categorías informacionales. Los datos, generalmente son de tipo multiespectral, y el perfil espectral de cada una de las clases es el patrón utilizado para el proceso.

Los métodos de reconocimiento espectral de patrones, se refieren a un tipo de métodos basados en la información espectral de cada píxel para la obtención de documentos de ocupación de suelo.

El reconocimiento de patrones espaciales implica el estudio de las relaciones entre cada píxel de la imagen con los que le rodean. Los clasificadores espaciales deben considerar aspectos tales como textura, proximidad, forma, repetibilidad, direccionalidad y contexto, entre otros. Estos tipos de clasificador, intenta reproducir el análisis espacial realizado por un operador humano durante el proceso de interpretación visual y, por ello, son más complejos de programar.

El reconocimiento temporal de patrones utiliza el factor tiempo como ayuda a la identificación de características. Por ejemplo, en el seguimiento de cosechas, la variación de la radiometría, así como de la distribución espacial a lo largo del tiempo permite la realización de estudios de seguimiento del ciclo vegetativo de diferentes tipos de cultivos.

Todo proceso de clasificación conlleva dos grandes etapas: la definición de las áreas de entrenamiento y la asignación de píxeles a las clases definidas. En la etapa de entrenamiento se lleva a cabo la definición de áreas de referencia que controlarán la clasificación, mediante la relación establecida entre las clases espectrales y las clases temáticas o informacionales que se quieran derivar de la imagen. Se puede suponer que establecer tales paridades es una tarea ardua y pocas veces evidente o con relaciones biunívocas.

Los métodos de establecimiento de áreas de entrenamiento pueden ser supervisados, no supervisados y mixtos.

- Los métodos supervisados (Figura 1.4) requieren de la identificación por parte de un operador humano de las áreas de entrenamiento, las cuales son superficies amplias y fácilmente reconocibles en las imágenes o cartografías de apoyo de una determinada clase de ocupación de suelo. Es aconsejable tomar muestras de la reflectividad de esas áreas con un radiómetro de campo, en la misma fecha de barrido de la imagen o en fechas inmediatas. Los datos de campo permiten establecer relaciones guiadas entre los *Niveles Digitales* (ND) de la imagen y las categorías reconocidas en las áreas de entrenamiento. Este procedimiento de clasificación limita los márgenes de error por la precisión inherente al control de campo y verificaciones sobre el terreno; las ventajas son todavía más patentes en el caso de áreas con gran fragmentación de cubiertas. Entre los inconvenientes que se imputan a la clasificación supervisada están el grado de rigidez y subjetivismo que infringen las muestras además de los problemas para clasificar zonas de transición de cubiertas donde no suelen darse relaciones de correspondencia nítida. A esto hay que añadir los costes del muestreo que serán tanto más altos cuanto más diversa y amplia sea el área de escena a clasificar. Imágenes de distintos sensores requieren tamaños de áreas de entrenamiento y muestreos de campo diferentes.

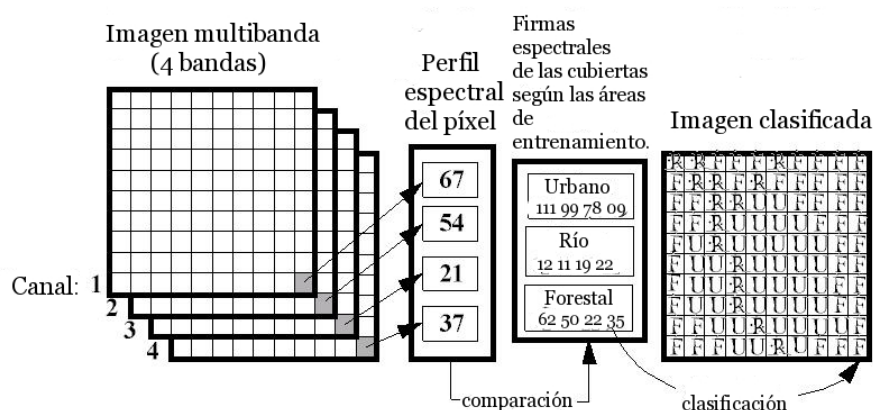


Figura 1.4: Esquema del proceso de clasificación supervisada (Imagen adaptada de: Faculty of Science. Chulalongkorn University).

- Los métodos no supervisados, también denominados de análisis de clusters o aglomerados, tienen como objetivo formar grupos de objetos

homogéneos dentro de una variedad de atributos cualitativos (NDVI) o cuantitativos (ND). El proceso se realiza de forma automática y no requiere el conocimiento previo del área ni la toma de muestras en campo. Este tipo de metodologías puede ser adecuada en los siguientes casos:

- Como aproximación estadística a datos desconocidos y como guía hacia la clasificación supervisada por la identificación automática de clases espectrales.
 - Como aplicación de alta operatividad, en casos en los que la rapidez de resultados puede compensar una cierta pérdida de precisión de los mismos.
 - Como final de tratamiento de una larga serie temática multitemporal, sobre la que se ha mantenido un riguroso control de procesos intermedios.
- Los métodos mixtos de selección de áreas de entrenamiento combinan los elementos mas positivos de las dos formas explicadas hasta ahora. Unas veces el método no supervisado antecede al supervisado como guía; otras, se aplican por separado para sintetizar los resultados finales de cada clasificación.

1.3.3.2. Tipo de datos: Distribución espectral y temporal de bandas.

Dadas las características de los datos recogidos por los sensores multiespectrales instalados a bordo de satélites, éstos se almacenan en archivos con información multiespectral, que nos muestran las características espectrales del suelo en el instante de la toma. Puesto que la toma de datos se realiza de forma continua en el tiempo, es posible disponer además de datos multiespectrales capturados en fechas diferentes, lo que nos permite realizar un seguimiento temporal de las propiedades espectrales del suelo.

Este análisis temporal de los datos nos permitirá una mejor discriminación de los “usos” del suelo, diferentes de la “ocupación” de los mismos, puesto que un uso puede implicar diferentes ocupaciones a lo largo del tiempo.

Generalmente, el análisis temporal de los datos procedentes de satélite, se realiza considerando las variaciones a lo largo del tiempo de algunos parámetros relacionados con los estudios que estemos llevando a cabo. Uno de estos parámetros es el NDVI, cuya evolución temporal puede contribuir a la determinación de distintos tipos de coberturas vegetales.

La ventaja que en este aspecto aporta el sensor MODIS, es que la resolución temporal es muy alta (1 día), por lo que el seguimiento de fenómenos de rápida evolución temporal es factible, mediante la utilización de datos adquiridos por dicho sensor.

1.3.3.3. Especificación de clases de ocupación (leyenda).

Estandarización de leyendas. Previamente al proceso de clasificación, es necesario definir las clases de ocupación que se utilizarán. Éstas pueden variar según la finalidad del trabajo, así como por las características propias de la zona de estudio, si bien puede ser interesante intentar establecer unas categorías fijas, que tengan un ámbito de utilización amplio, aunque en una zona concreta no estén presentes, con el fin de estandarizar los resultados en estudios de zonas extensas.

En la actualidad no existe una leyenda estandarizada con una definición homogénea de clases, si bien existen intentos y propuestas por parte de diversas organizaciones, de forma que la identificación de la ocupación del suelo a partir de la leyenda puede ser ambigua, al depender de la misma y no encontrar representantes de clases puras en una zona determinada. No obstante, se debería intentar adaptar una leyenda predeterminada que se adapte lo mejor posible a las características de nuestro trabajo, sin intentar definir nuestra propia leyenda, salvo en casos realmente necesarios.

Tipificación de *Land Cover*. Leyendas. Diversos organismos internacionales y distribuidoras de datos de satélite han propuesto leyendas para clasificar los diferentes tipos de usos y ocupación del suelo, basadas en diferentes criterios y pensando en diferentes fines, más o menos genéricos. Pese a algunos intentos de homogeneizar las leyendas (Herold et al., 2006), aún no existe ningún acuerdo al respecto.

En este caso, se han analizado las leyendas de CORINE Land Cover, la utilizada en el producto estándar MCD12Q1 de MODIS y la del proyecto Global Land Cover 2000.

Leyenda *CORINE Land Cover 2000*. El proyecto CORINE Land Cover persigue la realización de cartografía de ocupación del suelo, a escala 1:100.000 a nivel europeo (Büttner et al., 2004). Uno de los objetivos de este trabajo es la actualización periódica de los resultados, si bien estas son muy

escasas y con gran separación temporal entre ellas, siendo la más reciente de 2006.

La leyenda del documento de ocupación *CORINE Land Cover 2000* (CLC00), está formada por 44 clases de cobertura, agrupadas en una estructura jerárquica con tres niveles, tal como se muestra en la Figura 1.5.

El nivel 1, está formado por los siguientes cinco grandes grupos:

- Superficies artificiales.
- Zonas agrícolas.
- Zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos.
- Zonas húmedas.
- Superficies de agua.



Figura 1.5: Leyenda CLC00 (Imagen: Instituto Geográfico Nacional).

MODIS Land Cover Type (producto estándar MCD12Q1). El producto MODIS Land Cover Type proporciona un documento de ocupación del suelo global, con una resolución espacial de 500 m y una periodicidad de actualización anual entre los años 2001 y 2007 (Strahler et al., 1999). Desde ese año, no se encuentra disponible ninguna nueva versión.

El conjunto de datos disponible, proporciona información sobre la cobertura del suelo agrupada según cinco leyendas preestablecidas.

1. Leyenda del *International Geosphere Biosphere Programme* (IGBP).
2. Leyenda de la Universidad de Maryland (UMD).
3. Leyenda propia derivada de datos LAI/fPAR.
4. Leyenda propia derivada de valores de *Productividad Neta Primaria* (NPP).
5. Leyenda basada en la tipología funcional de las plantas (PFT, *Plant Functional Type*).

Las clases definidas en cada una de ellas se muestra en la tabla 1.3.

Leyenda *Global Land Cover 2000*. El proyecto *Global Land Cover 2000*, GLC2000 (Bartholomé and Belward, 2005), liderado por el *Institute for Environment and Sustainability*, del *Joint Research Centre*, tuvo por objetivo el proporcionar un documento de cobertura del suelo a nivel global tomando como fecha de referencia el año 2000, dada la importancia de ese año en lo referente al medio ambiente (Convención internacional contra el Cambio Climático, Convención Ramsar, Protocolo de Kyoto, etc.). Las cubiertas consideradas en esta leyenda, se indican en la figura 1.6.

Unificación de leyendas. En el caso de cambiar la leyenda del documento una vez efectuada la clasificación, es necesario realizar una reasignación de las clases de pertenencia de cada una de ellas, con el fin de establecer equivalencias entre ambas. Estas correspondencias pueden no ser del todo precisas, por lo que en numerosas ocasiones será necesario establecer una solución de compromiso que minimice los errores de transformación de una en otra. Como se puede ver en la Figura 1.7, donde se muestran las correspondencias entre las leyendas de los documentos GLC2000 y CLC2000, dado el mayor nivel de detalle de este último, a ciertas entradas del primero le corresponden varias del segundo, por lo que se producirá una pérdida de información en el proceso (Neumann et al., 2007).

1.3.3.4. Entrenamiento del clasificador.

Este procedimiento requiere identificar una superficie representativa de cada clase. Es importante que el área de entrenamiento sea una muestra homogénea de la respectiva clase, pero al mismo tiempo, debe considerarse el rango de variabilidad para cada clase, así pues, frecuentemente se utiliza

Tabla 1.3: Leyendas utilizadas en el producto MCD12Q1 (MODIS).

Clase	Leyenda IGBP	Leyenda UMD	Leyenda LAI/IPAR	Leyenda NPP	Leyenda PFT
0	Agua	Agua	Agua	Agua	Agua
1	Perennifolias de hoja estrecha	Perennifolias de hoja estrecha	Pastizal/Cultivo de cereales	Perennifolias de hoja estrecha	Perennifolias de hoja estrecha
2	Perennifolias de hoja ancha	Perennifolias de hoja ancha	Matorral	Perennifolias de hoja ancha	Perennifolias de hoja ancha
3	Caducifolias de hoja estrecha	Caducifolias de hoja estrecha	Cultivos de hoja ancha	Caducifolias de hoja estrecha	Caducifolias de hoja estrecha
4	Caducifolias de hoja ancha	Caducifolias de hoja ancha	Sabana	Caducifolias de hoja ancha	Caducifolias de hoja ancha
5	Bosques mixtos	Bosques mixtos	Perennifolias de hoja ancha	Cultivos anuales de hoja ancha	Matorral
6	Matorral denso	Matorral denso	Caducifolias de hoja ancha	Cultivos herbáceos anuales	Pastizales
7	Matorral disperso	Matorral disperso	Perennifolias de hoja estrecha	Sin vegetación	Cultivos de cereal
8	Sabana boscosa	Sabana boscosa	Caducifolias de hoja estrecha	Superficies artificiales	Cultivos de hoja ancha
9	Sabana	Sabana	Suelo desnudo	-	Superficies artificiales
10	Praderas y pastizales	Praderas y pastizales	Superficies artificiales	-	Hielo y nieve
11	Zonas pantanosas	-	-	-	Suelo desnudo
12	Cultivos	Cultivos	-	-	-
13	Superficies artificiales	Superficies artificiales	-	-	-
14	Mosaico de Cultivos/Vegetación natural	-	-	-	-
15	Hielo y nieve	-	-	-	-
16	Suelo desnudo o con poca vegetación	Suelo desnudo o con poca vegetación	-	-	-
254	Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
255	Fill Value	Fill Value	Fill Value	Fill Value	Fill Value



Figura 1.6: Leyenda *Global Land Cover 2000* (Imagen: Proyecto GLC2000).

más de un área de entrenamiento para cada clase. Para verificar las áreas de entrenamiento, se utilizan fotos aéreas, revisiones de campo y cartografía disponible. Si existe una variabilidad intra-clase importante, la selección de los lugares de entrenamiento puede ser muy laboriosa, siendo, a veces, difícil asegurar que se ha seleccionado un número suficiente de muestras para cada clase. Para obtener estadísticos suficientemente fiables (Davis et al., 1978) deben obtenerse entre 10 y 100 píxeles de entrenamiento por clase y por característica.

1.3.3.5. El proceso de clasificación.

Se han desarrollado diversos métodos matemáticos con el fin de proceder al agrupamiento de los píxeles de una imagen multispectral, según diversos criterios de similitud. En la Figura 1.8 se representa, de forma bidimensional, el espacio de características de una serie de clases ocupacionales presentes en la imagen.

En ella se puede observar como los píxeles correspondientes a cada una de las clases se agrupan de forma más o menos compacta, según su reflectividad en banda 1 y banda 2, en este caso.

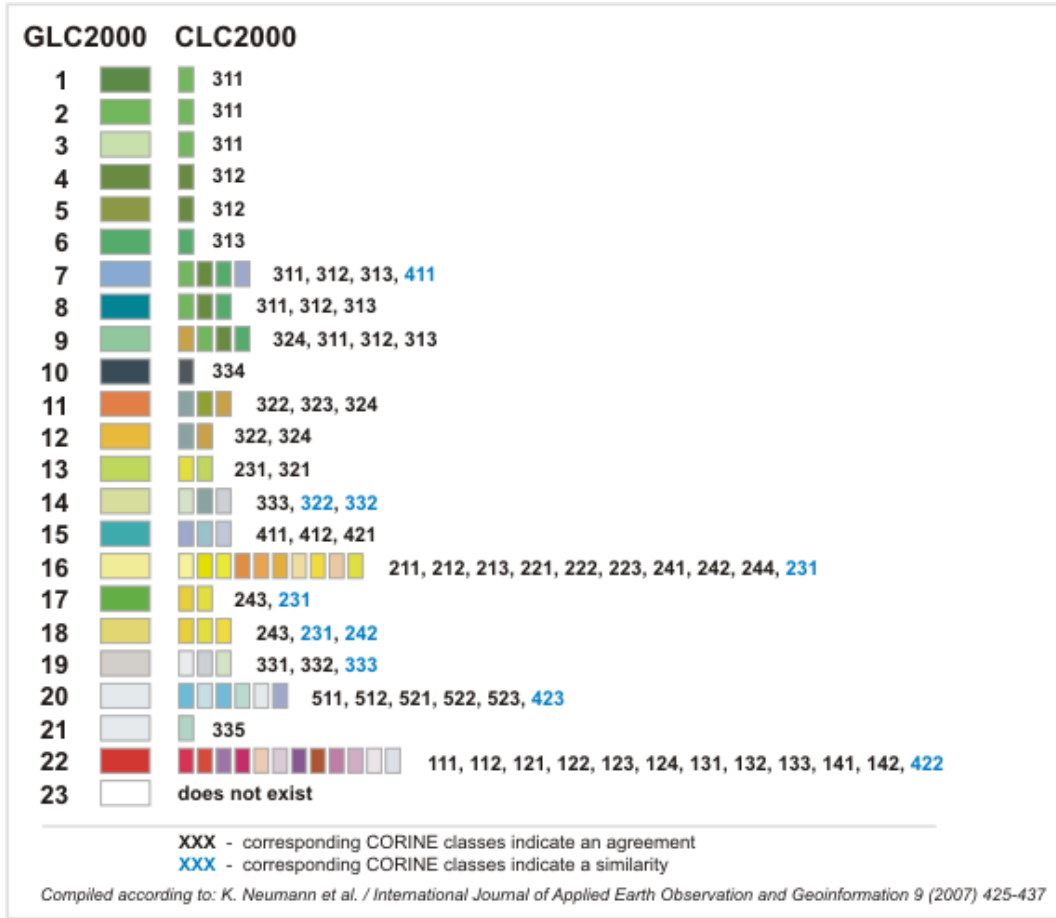


Figura 1.7: Equivalencia de legendas CLC00-GLC2000. (Imagen: Neumann, K. et al., 2007)

Clasificador de mínima distancia. Este método asigna cada píxel de la imagen, según la mínima distancia a la media de cada una de las clases de pertenencia (Figura 1.9).

El paso previo a la clasificación consiste, pues, en la obtención de las medias de cada una de las clases previamente definidas. Una vez realizado este proceso, el siguiente es el cálculo de la distancia espectral del píxel a cada una de las medias anteriores, de forma que se asigne al más cercano. La distancia más utilizada en este método es una distancia euclídea n-dimensional, siendo n el número de bandas espectrales del conjunto de datos, la cuál se obtiene con la expresión 1.36.

$$d_{ij}^{(k)} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n_{bandas}} \left(X_{ij}^n - \bar{X}_{ij}^{(k)} \right)^2} \quad (1.36)$$

donde k es el número de clases, X_{ij}^n el valor de cada píxel en la banda n y $\bar{X}_{ij}^{(k)}$ el valor del “centroide” (media aritmética) de la clase k en la banda n .

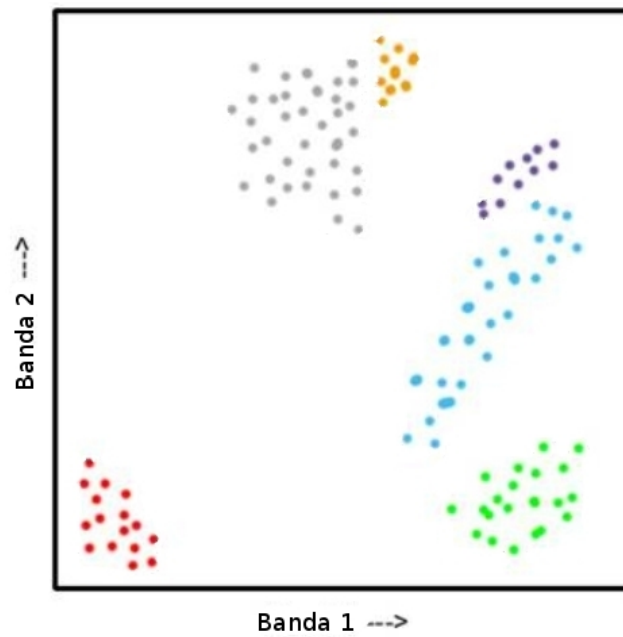


Figura 1.8: Espacio de características (Imagen: Wikiversity).

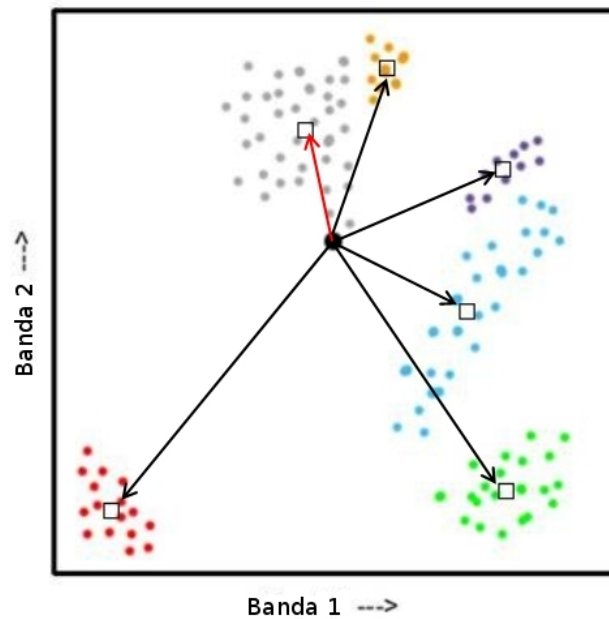


Figura 1.9: Clasificador de mínima distancia (Imagen: Wikiversity).

Los subíndices (i, j) corresponden al número de fila y número de columna en cada píxel de la imagen.

Una vez determinadas las distancias a cada clase, se toma la mínima de todas ellas, y se asigna el píxel correspondiente a la clase más próxima (es decir, a la clase para la cual la distancia es menor).

$$C_{ij} = \left\{ k | d_{ij}^{(k)} = \text{mínimo} \right\} \quad (1.37)$$

Es un algoritmo rápido y fácil de implementar, pero tiene tendencia a favorecer la formación de clusters alargados (efecto cadena), lo cual se considera, generalmente, como un defecto de la correspondiente medida de distancia y es, así mismo, muy sensible al ruido o a pequeños cambios en la posición de los puntos (Ormeño, 1993), al tiempo que puede asignar píxeles a clases erróneas si éstas están próximas y tienen desviaciones típicas diferentes, por lo que es un método que no se utiliza mucho en la actualidad.

Clasificador por paralelepípedos. En este método trata de resolver en parte el problema del anterior con la varianza de las diferentes clases, definiendo *hiperparalelepípedos* multidimensionales que engloben totalmente las nubes de valores correspondientes a cada clase espectral (Figura 1.10).

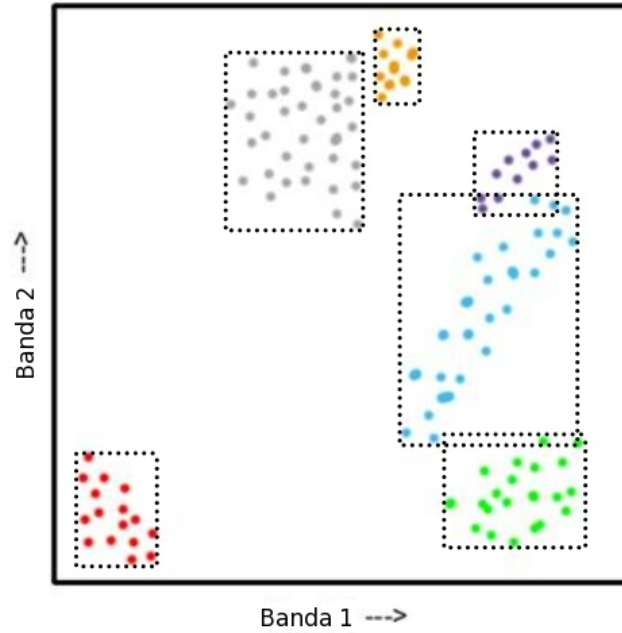


Figura 1.10: Clasificador por paralelepípedos (Imagen: Wikiversity).

Un píxel es asignado a una determinada clase si sus ND están dentro del área de dominio de esa clase, para todas las bandas que intervienen en la clasificación, de esta forma, el píxel i será asignado a la clase C si sus ND en las distintas bandas (n), $ND_{i,n}$, están incluidos en el área de dominio de esa clase de acuerdo con la expresión

$$\overline{ND}_{C,n} - \Delta R_{C,n} \leq ND_{i,n} \leq \overline{ND}_{C,n} + \Delta R_{C,n} \quad (1.38)$$

siendo $\overline{ND}_{C,n}$ el ND medio de la clase C en la banda n , y $\Delta R_{C,n}$ el semiancho del paralelepípedo.

De esta forma se mejora la precisión en la asignación de clases, si bien pueden existir problemas en las áreas de solape entre los paralelepípedos, o bien, que haya puntos que queden sin clasificar al no estar en el interior de ningún paralelepípedo. Pese a la simplicidad de implementación del método, debido a los problemas anteriores, tampoco es comúnmente utilizado en la actualidad, siendo superado en precisión por otros algoritmos de clasificación.

Clasificador de máxima verosimilitud. El clasificador de máxima verosimilitud evalúa cuantitativamente tanto la varianza como la covarianza de las clases espectrales a la hora de asignar la pertenencia de los píxeles de la imagen. En este caso, se hace la suposición de que las nubes de puntos que forman cada una de las categorías diferenciadas en la fase de entrenamiento son Gaussianas. En este supuesto, la distribución de una clase puede ser definida por su vector de medias y su matriz de covarianzas. Con estos parámetros, es posible calcular la probabilidad estadística de que un píxel pertenezca a una determinada clase.

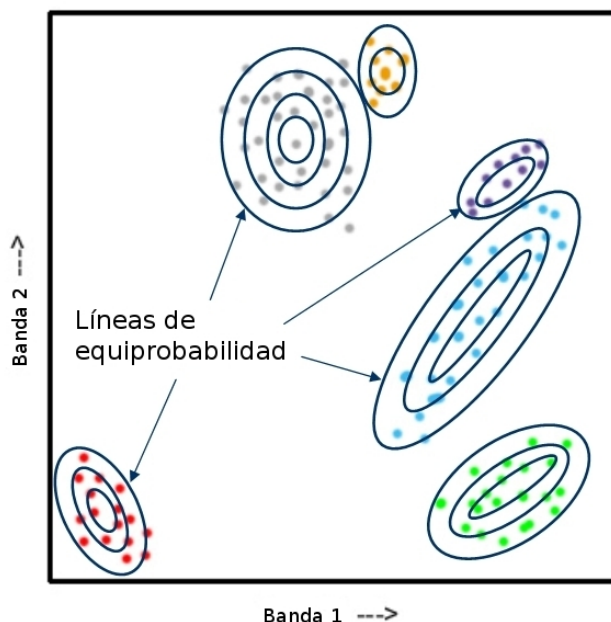


Figura 1.11: Clasificador de máxima verosimilitud (Imagen: Wikiversity).

En la Figura 1.11 se muestra gráficamente la probabilidad de que un píxel pertenezca a una determinada clase. Las superficies resultantes se denominan *funciones de densidad de probabilidad*, definiéndose una por cada clase espectral. La asignación de píxeles a clases de pertenencia se realiza

calculando la probabilidad de pertenencia a cada una de ellas, asignando la clase con mayor probabilidad.

Se trata de un método de clasificación basado en la teoría de decisión bayesiana.

Supongamos n clases definidas previamente mediante su vector de medias $\vec{M}_i$ y por su matriz de covarianzas $\sum_i$. Dado un vector de características k -dimensional $\vec{z}$ correspondiente a un píxel determinado, se trata de decidir a cuál de las clases es más probable que pertenezca dicho vector, de forma que se minimice la probabilidad de error en la clasificación.

En el caso de realizar un análisis univariante, la probabilidad de un píxel de pertenecer a una determinada clase w_1 , estará determinada por

$$p(z/w_i) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z - \mu_1}{\sigma_1} \right)^2} \quad (1.39)$$

siendo μ_1 y σ_1 la media y la desviación típica de dicha clase.

Si extendemos lo anterior al caso de n clases, un píxel se asignará a una de ellas, si se cumple la condición

$$p(z/w_i) \geq p(z/w_j) \forall j \neq i, j = 1, \dots, n \quad (1.40)$$

Al aplicar la teoría bayesiana, el píxel se asigna a la clase que proporcione una mayor probabilidad a posteriori. En el caso de expresarlo en función de las verosimilitudes y probabilidades a priori, la expresión que asignará la clase de pertenencia se transforma en

$$p(z/w_i)p(w_i) \geq p(z/w_j)p(w_j) \forall j \neq i, j = 1, \dots, n \quad (1.41)$$

Este método de clasificación es uno de los más utilizados en la actualidad, por la precisión de los resultados ofrecidos.

Lógica borrosa. Los métodos de clasificación analizados anteriormente se engloban en los determinados métodos de clasificación deterministas, de forma que cada píxel de la imagen inicial se asigna exclusivamente a una clase de pertenencia, según su mayor probabilidad de pertenencia, excluyendo todas las demás. En el caso de que la diferencia entre las diferentes probabilidades sea grande (95 % frente a 5 %), el error cometido no es muy significativo, pero puede suceder que esa diferencia sea menor (55 % frente a 45 %), con lo que el error puede ser más importante.

Dada la existencia de píxeles mixtos (Jensen, 1996; Schowengerdt, 2007), que engloban varias clases, existen otros métodos que devuelven un resultado cuantitativo en el que se representa el grado de pertenencia de cada píxel a cada clase. Estos métodos emplean técnicas de lógica borrosa (*fuzzy*). Estos métodos utilizan una técnica similar a la clasificación no supervisada mediante el método de las *K-medias*, excepto que no considera límites rígidos entre clases en el espacio de características. De esta forma, se puede representar cuanto de próximo está un píxel a una clase

Árboles de decisión. Un clasificador basado en un árbol de decisión está formado por varios niveles, de forma que, partiendo de la imagen inicial, no clasificada, vamos descendiendo por las *ramas*, de tal forma que en cada nodo, generalmente binario, seguimos el camino hasta asignar a cada píxel la clase correspondiente según cumpla las diferentes condiciones impuestas en cada uno de los nodos. Dada la rigidez del criterio de decisión, generalmente booleano, estos métodos sólo pueden ser aplicados en casos muy concretos, o cuando los nodos del árbol de decisión puedan definirse de forma muy concisa.

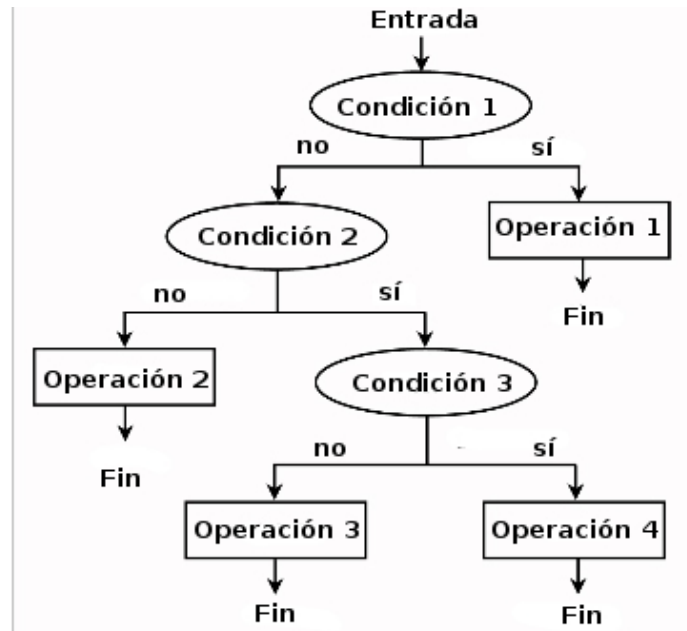


Figura 1.12: Ejemplo de árbol de decisión binario.

La ventaja que presentan es que suelen ser relativamente fáciles de implementar y no requieren grandes capacidades de cálculo, por lo que siguen siendo empleados en la actualidad, en el caso de que puedan adaptarse a las necesidades.

Redes neuronales. El principio de funcionamiento de las redes neuronales artificiales consiste en imitar a las redes neuronales reales, en cuanto a su secuencia de aprendizaje. Una neurona artificial es un objeto lógico que recibe diversas entradas, hace una suma ponderada de las mismas y produce una salida a partir de la aplicación de una función umbral a la media ponderada.

Generalmente, se trabaja con asociaciones de estas neuronas, de forma que se interconectan las salidas de unas con las entradas de otras, con el fin de formar una *red neuronal*. En la figura 1.13, se muestra una configuración típica de este tipo de redes, denominada *Back Propagation Neural Network*.

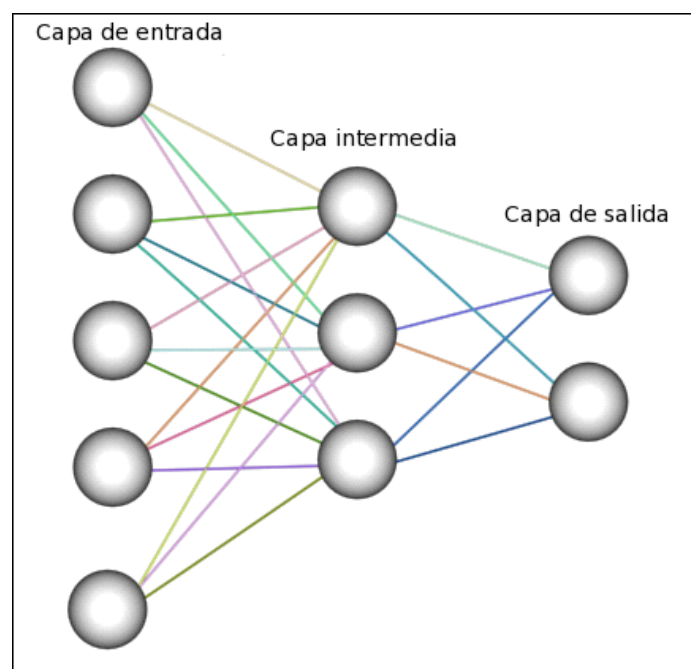


Figura 1.13: Configuración habitual de una red neuronal del tipo *Back Propagation*, de tres capas (Imagen: <http://encefalus.com>).

Esta red tiene tres capas de neuronas: la capa de entrada (*input layer*) en la que no se realiza ningún procesamiento de los datos. En la capa media (*hidden layer*) se encuentran los elementos procesadores de cada nodo de la red, los cuales constan de una serie de elementos independientes, denominados neuronas, las cuáles producen una salida conforme a una función de activación, y que distribuye los elementos de entrada entre los diferentes nodos de la capa de salida (*output layer*).

En esta red consta de una sola capa media, pero podrían ser más. En un caso simple de clasificación la información de entrada serían los vectores multiespectrales de los píxeles de entrenamiento, una banda por nodo. En cada nodo de la capa media se produce una sumatoria y una transformación

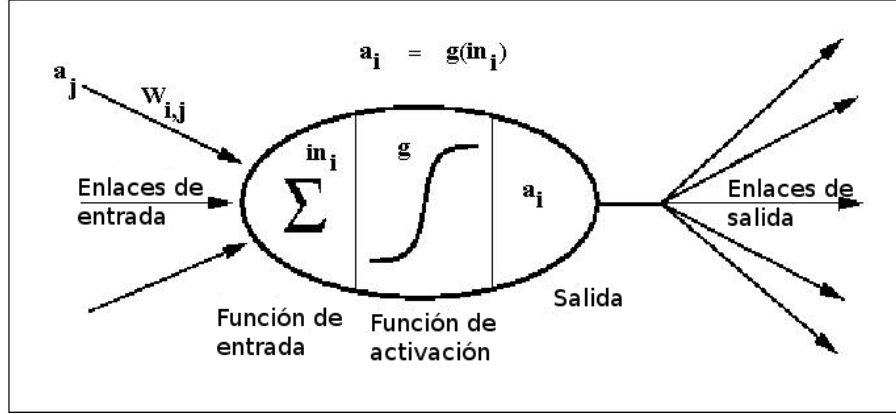


Figura 1.14: Funcionamiento de un nodo intermedio o neurona (Kendall, 2001).

como se representa en la Figura 1.14. Para cada nodo i de la capa media llega una entrada in_i , ponderada según los diferentes pesos w_{ij} que se aplican a las entradas provenientes de cada nodo de las capas anteriores, a_j , sobre la cual se efectúan las siguientes operaciones:

$$\begin{aligned} in_i &= \sum_j w_{ji} a_j \\ a_i &= \mathcal{F}(in_i) \end{aligned} \quad (1.42)$$

a_i es la salida del nodo i , y es dirigida a cada nodo de salida k . La salida de éste, o_k , vendrá dada por las operaciones

$$\begin{aligned} S_k &= \sum_j w_{kj} h_j \\ o_k &= \mathcal{F}(S_k) \end{aligned} \quad (1.43)$$

La función de transformación más usual es la sigmoidea, que se denomina *función de activación* y se corresponde con la siguiente expresión

$$\mathcal{F}(S) = \frac{1}{1 + e^S} \quad (1.44)$$

que se representa gráficamente en la Figura 1.15, junto a otras funciones de activación empleadas en este tipo de redes.

El procedimiento requerido para hacer funcionar a una red neuronal, se descompone en varias fases:

1. Entrenamiento. Se le introducen a la red la respuesta espectral de píxeles cuya clase se conoce y se compara la salida con la realidad. A partir de esta comparación se modifican los coeficientes de ponderación de

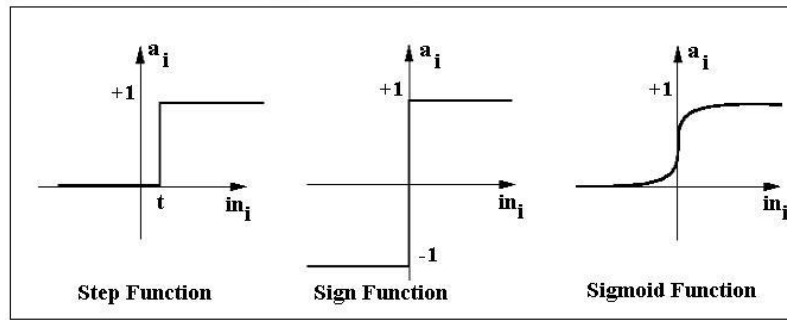


Figura 1.15: Función de activación en una neurona (Kendall, 2001).

todas las neuronas para que se obtenga la respuesta adecuada, en un procedimiento automático cuyo resultado es booleano, es decir, un 1 en la clase correcta y ceros en las demás.

2. Estabilización. Al principio del entrenamiento, los factores de ponderación cambian rápidamente, pero conforme este se desarrolla (y si las áreas de entrenamiento se han seleccionado adecuadamente) se estabilizan (no se modifican aunque se vuelvan a introducir los píxeles de entrenamiento). En este momento finaliza la fase de entrenamiento.
3. Clasificación. Se introducen las respuestas espectrales de los píxeles cuya clase no se conoce y se adjudican a la clase que devuelva la señal de salida con mayor valor (que no va a ser necesariamente 1).

Se trata, en definitiva, de un método de clasificación no paramétrico robusto que da buenos resultados cuando las respuestas espectrales de las clases no siguen una distribución normal. La clave está en el conjunto de coeficientes de ponderación que constituyen un conjunto de parámetros que deben ajustarse a unos datos de entrada y salida. Por tanto en cierto modo es equivalente a una regresión. El conjunto de ecuaciones que queda almacenado en la red neuronal es similar a las ecuaciones que dividen el espacio de variables en varias regiones.

Clasificadores de contexto. Uno de los problemas que se presentan a la hora de clasificar imágenes de satélite utilizando los métodos descritos anteriormente, es que sólo se atienden a las propiedades de cada píxel sin considerar su entorno. Los clasificadores de contexto incorporan estos criterios de vecindad, de forma que la clasificación se realiza en función de la asignación de las adyacentes.

Esto es relativamente importante en el caso de que el tamaño del píxel sea más pequeño que las unidades de paisaje seleccionadas, puesto que en este

caso podría utilizarse la información de los píxeles de alrededor para estimar la pertenencia a una clase o confirmar la estimación. Puede resultar un método útil en combinación con el de máxima probabilidad ya que permite incluir la información de los píxeles circundantes para tomar una decisión en caso de que las probabilidades para dos clases sean similares o no exista una clase con probabilidades de pertenencia suficientemente altas.

Junto con la información multispectral, podría considerarse otra información complementaria que ayude al algoritmo de clasificación a asignar la clase de pertenencia. Entre esta información estaría la altitud, pendiente, litología, etc.

1.3.3.6. Clasificación no supervisada.

En el procedimiento de clasificación no supervisada se elimina la intervención de operadores humanos que realicen una selección previa de áreas de entrenamiento de cada una de las clases ocupacionales que se vayan a considerar. De esta forma, los algoritmos utilizados en este proceso tienen que ser capaces de extraer la información necesaria de los píxeles de la imagen y agruparlos (*clustering*) en un determinado número de clases, previamente establecido, basado en criterios de similaridad y agrupamientos naturales de valores en el espacio de características. Por ello, y al contrario que sucede en los métodos de clasificación supervisada, en los que las clases de pertenencia se seleccionan de forma que representen distintos tipos de ocupación de suelo, establecidos en una leyenda, en los métodos no supervisados, el resultado se agrupa en clases espectrales, por lo que es necesario un posterior análisis del resultado con el fin de obtener documentos de interés que representen clases físicas de ocupación de suelo.

Existen numerosos algoritmos de agrupamiento que pueden ser utilizados en este procedimiento, si bien el más utilizado es el denominado *K-medias*, el cuál se trata de un método iterativo cuyo único dato de partida es el número de clases en que queremos agrupar los resultados. El método comienza con la asignación de una serie aleatoria de *centros de clase* en el espacio de características, obteniendo sus correspondiente vectores de medias. Tras este proceso inicial, se procede a la clasificación de todos los píxeles de la imagen, según el clasificador de mínima distancia. Tras este proceso, se recalculan los vectores de medias de cada una de las clases resultantes, de forma que se procede a efectuar una nueva reclasificación de todos los píxeles de la imagen, con los nuevos vectores de medias. Las iteraciones continúan hasta que no

Tabla 1.4: Ejemplo de matriz de confusión o de contingencia.

$Clase_{asignada}$ $\backslash$ $Clase_{real}$	C0	C1	C2	C3	C4	C5	Suma fila
C0	789602	12704	25105	4605	7844	4239	844099
C1	9015	73536	6358	1537	82	2	90530
C2	25643	12076	217420	8963	19595	1259	284956
C3	7168	2380	7469	38528	66	0	55611
C4	8541	365	24472	102	54173	1049	88702
C5	3960	77	4858	0	6439	8436	23770
Suma Columna	843929	101138	285682	53735	88199	14985	

se produzcan cambios significativos en los vectores de medias de las clases resultantes. Es ahora cuando el operador debe efectuar una correlación entre las clases obtenidas y las ocupaciones del suelo establecidas en la leyenda seleccionada para el documento, ya que, salvo que las características de las mismas sean muy distintivas, no se producirá una correlación directa entre ambas.

1.3.3.7. Estudio de precisiones de la clasificación.

Un aspecto fundamental del proceso de clasificación de imágenes multiespectrales es la determinación del error en la identificación y asignación de píxeles a las clases de pertenencia adecuadas. Hasta ahora, el gran problema de la clasificación no supervisada sido precisamente su falta de precisión en los resultados, por lo que frecuentemente se utilizan los métodos supervisados, pese al mayor tiempo necesario para el proceso de los datos.

En este trabajo utilizaremos los criterios definidos por Congalton (1991), por ser ampliamente utilizados en este ámbito de la teledetección con fines ambientales (Grenier et al., 2008; Liu et al., 2007; Foody, 2002).

Matrices de error. Una forma habitual de representar el error cometido en el proceso de clasificación de imágenes multiespectrales, es a través de una matriz de error, llamada a veces matriz de contingencia o de confusión.

En estas matrices, se compara la relación entre clases, en base a una serie de puntos de comprobación en los que conocemos la clase de pertenencia real y la asignada tras el proceso de clasificación. En la Tabla 1.4 se muestra un ejemplo de matriz de confusión, de un caso real estudiado en este trabajo.

En ella, los valores de la diagonal principal representan los píxeles que han sido correctamente clasificados. El resto de valores representan errores de omisión y comisión. Por ejemplo, los valores situados en las columnas, excepto los de la diagonal principal, se refieren a los errores de omisión, que representan los píxeles que, perteneciendo realmente (verdad terreno) a la clase j (representadas en columnas), se han asignado a las clases i (representadas en filas). Por otro lado, los valores situados en cada fila, fuera de la diagonal, muestran los errores de comisión. En concreto, representan los píxeles que, como resultado del proceso de clasificación, se han asignado a la clase i , cuando deberían pertenecer a la clase j , representadas en las columnas (verdad terreno).

Congalton (1991) propone una serie de parámetros para evaluar cuantitativamente la bondad de la clasificación a partir de la matriz de contingencia. Estos parámetros son la *precisión de usuario*, la *precisión del productor* y la *precisión global*. Las expresiones para obtenerlos se indican en la ecuación 1.45.

Los parámetros utilizados son la *precisión del usuario*, la *precisión del productor* y la *precisión global*, que se definen en las siguientes ecuaciones

$$\begin{aligned} \text{Precisión del usuario}_{Ci} &= \frac{M_{ii}}{\sum_{k=1-n, j=i} (M_{kj})} \\ \text{Precisión del productor}_{Ci} &= \frac{M_{ii}}{\sum_{k=1-n, j=i} (M_{jk})} \\ \text{Precisión global} &= \frac{\sum_{i=1-n} M_{ii}}{\sum_{k=1-n, j=1-n} (M_{kj})} \end{aligned} \quad (1.45)$$

En ellas, M_{ij} representa cada elemento de la matriz de contingencia, siendo M_{ii} los elementos de la diagonal principal y n es el número de clases de pertenencia. En concreto, la precisión global se obtiene dividiendo el total de elementos correctamente clasificado, frente al total de píxeles. La precisión de usuario se obtiene dividiendo el total de píxeles correctamente clasificados de cada una de las clases entre el total de píxeles que deberían pertenecer a cada una de ellas (suma de la fila i). Con esta serie de valores, uno por clase, tenemos una aproximación a la probabilidad de que un píxel clasificado en una determinada categoría, pertenezca realmente a ella. La precisión del productor, se obtiene dividiendo el número de píxeles correctamente clasificado de cada una de las clases, entre el total de píxeles que se han obtenido de esa clase en el proceso de clasificación (suma de la columna j). La interpretación de este

parámetro es que representa una medida cuantitativa de la bondad del proceso de entrenamiento del clasificador.

Para este ejemplo concreto, utilizando los datos de la Tabla 1.4, los valores de estos parámetros son:

■ Precisión de usuario:

- $C0 = 93 \%$
- $C1 = 81 \%$
- $C2 = 76 \%$
- $C3 = 69 \%$
- $C4 = 61 \%$
- $C5 = 35 \%$

■ Precisión del productor:

- $C0 = 93 \%$
- $C1 = 72 \%$
- $C2 = 76 \%$
- $C3 = 71 \%$
- $C4 = 61 \%$
- $C5 = 56 \%$

■ Precisión global = 85%

Como se observa, el rango de precisiones varía, según la clase de pertenencia, tanto en la precisión de usuario como del productor. Es de hacer notar que según el método de selección de áreas de entrenamiento y de puntos de validación, los resultados anteriores pueden no ser totalmente representativos, sobre todo si hacemos coincidir las áreas de entrenamiento elegidas en las fase previas del proceso de clasificación con los puntos de muestreo en los que se realiza la validación en campo, pues se trata de un muestreo condicionado.

Junto con los valores anteriores, existe otro parámetro numérico para cuantificar el grado de precisión de la clasificación, que compara el resultado obtenido con el que se derivaría de un procedimiento de asignación de clases

totalmente aleatorio. Este parámetro es el valor $Kappa(\kappa)$, que se calcula a partir de la siguiente expresión (Cohen, 1960)

$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^n p_{ii} - \sum_{i=1}^n q_{ii}}{1 - \sum_{i=1}^n q_{ii}} \quad (1.46)$$

siendo $p_{ij} = \frac{T_{ij}}{T_{..}}$, $p_{i.} = \frac{T_{i.}}{T_{..}}$, $p_{.j} = \frac{T_{.j}}{T_{..}}$ y $q_{ij} = p_{i.} \cdot p_{.j}$, donde T_{ij} representa el elemento i, j en valor absoluto de la matriz de confusión, $T_{i.}$ el sumatorio de la fila i , $T_{.j}$ el sumatorio de la columna j y $T_{..}$ el sumatorio de todos los elementos de la matriz. El valor de κ , obtenido con la ecuación (1.46) varía entre -1 y 1. Un resultado de 0, indica que el resultado obtenido no es mejor que si la asignación de clases se hubiera realizado al azar, mientras que un resultado igual a 1, implica un grado total de acuerdo.

Del mismo modo que se obtiene un coeficiente κ para el conjunto global de la clasificación, pueden obtenerse para cada una de las clase, utilizando la expresión

$$\kappa_i = \frac{p_{ii} - q_{ii}}{p_{i.} - q_{ii}} \quad (1.47)$$

Aplicando las expresiones anteriores, los resultados que se obtienen para la matriz de contingencia de la Tabla 1.4, son los siguientes (valores global y descompuestos para cada una de las clases de pertenencia):

- $\kappa = 0,69$
- $\kappa_{C1} = 0,88$
- $\kappa_{C2} = 0,65$
- $\kappa_{C3} = 0,77$
- $\kappa_{C4} = 0,61$
- $\kappa_{C5} = 0,41$

Así, el valor de $\kappa = 0,69$ indica que el resultado es un 69 % mejor que el esperado, con respecto a un procedimiento aleatorio.

Las diferencias entre el valor anterior y el parámetro *precisión global* obtenido anteriormente, son debidas a la diferente metodología y al hecho de que este sólo considera los valores de la diagonal principal, excluyendo los errores de comisión y omisión.

1.3.4. Indicadores ambientales.

En los apartados anteriores, se han descrito diversos parámetros cuantitativos y cualitativos para representar y cuantificar diversos aspectos de las cubiertas terrestres a partir de información capturada por sensores multiespectrales instalados a bordo de satélites artificiales, así como otros datos auxiliares, procedentes de fuentes diversas.

Se han propuesto diversas definiciones a este concepto, si bien en este trabajo adoptaremos la dada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), que define un indicador ambiental como *un parámetro o el valor resultante de un conjunto de parámetros, que ofrece información sobre un fenómeno, con un significado dado por una definición clara de su función*, o bien la propuesta por el Ministerio de Medio Ambiente (Centro de Publicaciones. Ministerio de Medio Ambiente, 2000), que le define un indicador ambiental como *una variable que ha sido socialmente dotada de un significado añadido al derivado de su propia configuración científica, con el fin de reflejar de forma sintética una preocupación social con respecto al medio ambiente e insertarla coherentemente en el proceso de toma de decisiones*, y que será la adoptada por este trabajo.

En cualquier caso, la comunicación es la principal función de los indicadores. Ésta exige simplicidad, y los indicadores tienen la capacidad de simplificar una realidad compleja. Así, un indicador es una medida, generalmente cuantitativa, que puede ser usada para ilustrar y comunicar un fenómeno complejo de manera simple, incluyendo tendencias y progresos a lo largo del tiempo (Cifrián Bemposta et al., 2006).

En la actualidad se trabaja con el concepto “Indicador ambiental”, que engloba a ambos tipos de parámetros (cualitativos y cuantitativos), al mismo tiempo que amplía su significado y utilidad.

Los indicadores ambientales se han venido utilizando desde finales de los años 80, cuando en 1989 la OCDE puso en marcha su programa y publicó el primer conjunto de indicadores ambientales en el año 1991 (Organisation for Economic Co-operation and Development, 1991). Dadas las características de los datos procedentes de sensores espaciales, su utilización en la obtención de indicadores ambientales no tardó en llegar, con los trabajos de Lambin and Strahler (1994), Wallace and Campbell (1998) y Weiers et al. (2004), entre otros, en los que se proponen metodologías y aplicaciones de estos datos en la obtención de ciertos indicadores ambientales.

Los indicadores propuestos por la OCDE utilizan el esquema *Presión - Estado - Respuesta*, formulado por Rapport and Friend (1979), que agrupa los indicadores en tres tipos:

- **Presión:** Son aquellos que describen las presiones ejercidas sobre el medio ambiente, principalmente debidas a las actividades humanas y que afectan a la calidad y cantidad de los recursos naturales.
- **Estado:** Muestran la calidad del medio ambiente y de los aspectos cualitativos y cuantitativos de los recursos naturales, sin valorar las presiones que se ejercen sobre ellos.
- **Respuesta:** Representan en qué medida responde la sociedad ante los cambios ambientales y las preocupaciones por éstos. Se entiende por respuesta las acciones individuales o colectivas que tienen por objetivo evitar, atenuar o corregir las repercusiones negativas sobre el medio ambiente que tienen las actividades humanas.

En la Figura 1.16 se muestra el esquema general de este modelo.

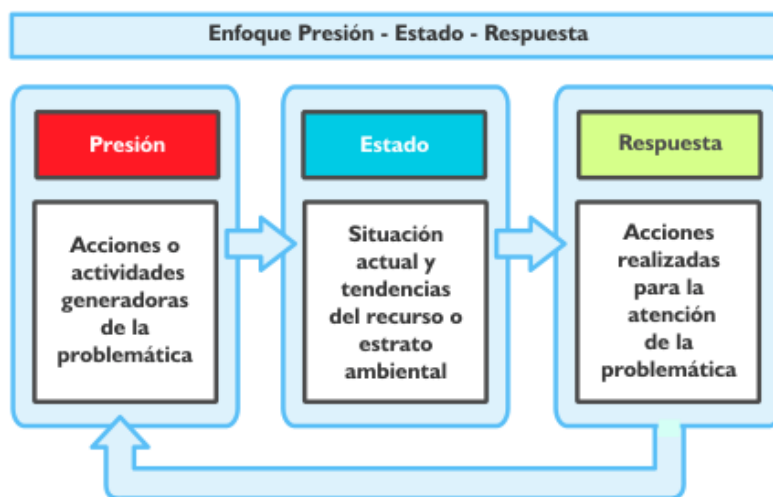


Figura 1.16: Modelo Presión - Estado - Respuesta. (Imagen: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México).

Otro modelo de clasificación y agrupamiento de indicadores es el de *Fuerzas Motrices - Presión - Estado - Impacto - Respuesta* (Jesinghaus, 1998), basado en el anterior, introduce nuevos factores como las fuerzas motrices y los impactos en el medio ambiente.

1.3.4.1. Características de los indicadores ambientales.

De las características que debe cumplir un indicador para servir como herramienta efectiva de comunicación, parece razonable destacar éstas:

- Mensurables y posibles de analizar en series temporales: Los indicadores deben reflejar la evolución en el tiempo, de forma que puedan analizarse para prevenir o corregir tendencias negativas.
- Relevantes: Estar relacionados con los objetivos, metas y prioridades.
- Funcionales: Deben ser útiles en la toma de decisiones. De esta manera los indicadores pasan a ser herramientas de gestión que permiten fijar responsabilidades a los agentes que intervienen en la formulación y aplicación de políticas.
- Fidedignos: Deben estar basados en datos completos y precisos
- Comparables: deben permitir la comparación a distintas escalas territoriales y temporales.

1.3.4.2. Ventajas del uso de indicadores ambientales.

Las ventajas que presentan la utilización de los indicadores como herramientas de suministro de información son:

- Proporcionan una base estable para elaborar informes.
- Facilitan la presentación de un panorama claro de la situación ambiental.
- Uniforman la recogida de datos, lo que origina una información de calidad y comparable.
- Centran la recopilación de datos en torno a cuestiones clave.
- Facilitan la gestión y la evaluación de las políticas ya que permiten medir evoluciones y tendencias.
- Permiten hacer comparaciones.

1.3.4.3. Entidades proponentes indicadores ambientales.

En la actualidad, existen numerosas entidades y organizaciones que han propuesto diversos indicadores ambientales con finalidades más o menos específicas, y no sólo referidos a aspectos ambientales, sino también a aspectos económicos o sociales.

En el ámbito internacional, las entidades proponentes de indicadores ambientales más relevantes son la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (United Division Statistics Division, 1984, 1988, 1991, 1995), a través de sus diversas agencias, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (Organisation for Economic Co-operation and Development, 1991, 1993, 2008), la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) (Smeets et al., 1999; Gabrielsen and Bosch, 2003), mientras que a nivel nacional, se encuentran el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MMARM) (Herrera and López, 1996; Ministerio de Medio Ambiente, 2000) y el Observatorio de la Sostenibilidad (OSE) (Observatorio de la Sostenibilidad, 2005), entre otros, ya que diversas instituciones de ámbito regional y local han propuesto sus propios conjuntos de indicadores ambientales.

En concreto, el MMARM gestiona el Banco Público de Indicadores Ambientales (BPIA) (Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, 2011), el cual es un proyecto de elaboración y difusión de la información ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, accesible a través de la web, que permite disponer de un modo muy intuitivo y ágil de los principales datos sobre el medio ambiente. Recientemente se ha llevado a cabo una actualización de todos los indicadores, con la mejor información disponible hasta la fecha.

Los indicadores se presentan en un formato ilustrado con gráficos, a los que acompañan definiciones y notas que los hacen asequibles para un público muy amplio. Consta de 68 indicadores ambientales estructurados dentro de un sistema dividido en 14 áreas, cubriendo una serie de asuntos relacionados con la conservación del medio ambiente, así como seguir su evolución en el temporal: Aire, Agua, Suelo, Naturaleza y Biodiversidad, Residuos, Agricultura, Energía, Industria, Pesca, Turismo, Transporte, Hogares, Medio Urbano y Desastres Naturales y Tecnológicos. La selección de los indicadores ha sido realizada en el contexto de la Red EIONET (Red Europea de Información y Observación del Medio Ambiente), cuyo Punto Focal Nacional reside en la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental.

Tiene como objetivo principal presentar un conjunto de indicadores que contribuyan al conocimiento de los aspectos ambientales más destacables en la totalidad o en parte del territorio español, elaborados de un modo sintético y con el mayor rigor posible.

Su carácter público radica en su intención de ser útil a todas las personas, colectivos u organismos que precisen acceder a la mejor información ambiental disponible, para lo cual se ha elegido como modo de difusión la web del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Además, hay que destacar el carácter colectivo y consensuado del trabajo de selección en el contexto de la Red EIONET (Red Europea de Información y Observación del Medio Ambiente) cuyo Punto Focal Nacional es la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental.

BPIA es un proyecto abierto. Los indicadores se estructuran en 14 áreas cuyo número puede ampliarse, igual que el número de indicadores que integran cada una de ellas. A medida que se calculan y actualizan los indicadores con la información más reciente, éstos se van incorporando a los diferentes capítulos.

Los indicadores de BPIA son seleccionados en base a los siguientes criterios:

- Que sean relevantes para el conocimiento del medio ambiente en España y que contribuyan al incremento de la conciencia ambiental de la sociedad española.
- Que los datos para elaborarlos estén DISPONIBLES, ya sea en fuentes oficiales o, en su defecto, en otros organismos, instituciones, asociaciones, etc., cuyo prestigio en el ámbito de que se trate esté reconocido públicamente.
- Que puedan ser actualizados regularmente conforme a sus características de periodicidad y siempre que la carga de trabajo que ello represente sea razonable.
- Que sean fácilmente interpretables, susceptibles de ser comprendidos por la gran mayoría de la población.

Los antecedentes de este proyecto son:

- El Sistema Español de Indicadores Ambientales (SEIA), publicado por el Ministerio de Medio Ambiente entre 1996 y 2003.
- El Tronco Común de Indicadores Ambientales, documento de trabajo en el se incluyeron los indicadores que evalúan el grado de integración del medio ambiente en las políticas sectoriales.

Tabla 1.5: Errores superficiales según resolución espacial.

Resolución espacial	50 m	100 m	250 m	500 m	1000 m
Media (%)	0.0009	0.003	-0.014	0.02	-0.39
Máximo (%)	3.07	8.72	23.72	56.82	61.88
Mínimo (%)	-2.09	-5.07	-28.87	-80.41	384.6
Desv. Est.	0.12	0.33	1.33	3.31	11.09

- El Perfil Ambiental de España, que se trata de una publicación anual que presenta la mejor información disponible hasta la fecha e incluye las sugerencias de diversos paneles de expertos.

1.3.4.4. Zonificación.

En el ámbito cartográfico, una forma de representación habitual de los resultados obtenidos mediante procedimientos analíticos, la constituyen los documentos de *coropletas*. Se trata de un tipo particular de representación superficial, en el cual los límites de las divisiones se hacen corresponder con límites administrativos. Puesto que es frecuente obtener valores medios de parámetros ambientales agregados por entidades territoriales de diferente naturaleza y, puesto que los indicadores ambientales deben estar referidos a entidades territoriales para ser representativos, es necesario establecer cuáles serán las más adecuadas al objeto del trabajo.

De acuerdo con la resolución espacial de los sensores empleados en este trabajo, se ha establecido que la mínima unidad administrativa que puede ser utilizada es el término municipal, siendo perfectamente posible referir los resultados a provincias, comunidades autónomas, confederaciones hidrográficas, comarcas, etc.

Para ello, se ha utilizado el estudio realizado por Ormeño Villajos et al. (2009) en el que se analiza el efecto de la resolución espacial en la estimación de la superficie de la entidad territorial, obteniéndose los resultados que se muestran en las tablas 1.5.

El parámetro medido es el *error superficial*, definido como

$$E_s = \frac{S_{real} - S_{calc}}{S_{real}} \cdot 100$$

donde S_{real} se refiere a la superficie de la entidad obtenida a partir del documento cartográfico vectorial, o al tabulado, y S_{calc} a la obtenida tras un proceso de rasterización utilizando el tamaño de celda considerado.

Según los resultados anteriores, se puede elaborar la Tabla 1.6, en la que se muestran el porcentaje de entidades territoriales cuyo error superficial es inferior a una determinada cantidad, en este caso el 5 %.

Tabla 1.6: Términos municipales cuyo error superficial es inferior al 5 %.

Resolución espacial	50 m	100 m	250 m	500 m	1000 m
% Términos municipales	100	100	99.2	94.9	74

Aunque hemos considerado el término municipal como la subdivisión mínima analizable empleando sensores de baja resolución espacial, en determinados parámetros podremos realizar ciertas excepciones, siempre que el tamaño de la entidad sea superior al del propio píxel, como se mostrará en el apartado 4.6.

1.3.4.5. Obtención de indicadores ambientales mediante teledetección espacial.

Dada la diversidad de temas a los que pueden estar referidos los indicadores ambientales, no todos pueden ser obtenidos empleando únicamente datos procedentes de sensores espaciales, ni aún obtenerse a partir de éstos. Se ha seleccionado una lista de indicadores que pueden derivarse de forma más o menos directa a partir de estos datos. El listado forma parte del trabajo realizado en el proyecto IaTel II (Ormeño Villajos et al., 2009), realizado conjuntamente entre la Universidad Politécnica de Madrid y el Instituto Geográfico Nacional, donde se seleccionaron algunos de ellos, de los cuales se esbozaron sus correspondientes modelos procesales y se agruparon en diferentes categorías, según la procedencia de los datos empleados en su obtención, así como la dificultad de cálculo de los mismos en **OD**, Obtención directa, que indica que puede ser obtenido de forma inmediata a partir de los datos procedentes del satélite mediante un proceso sencillo, **OP**, Obtención Posible, que indica la posibilidad de calcularle en colaboración con otras entidades y con la ayuda de otros datos auxiliares y **ONP**, Obtención No Posible, o es muy dificultosa, con los medios disponibles o cuya metodología no está completamente definida:

Indicadores que pueden obtenerse a partir de documentos de uso y ocupación del suelo tales como SIOSE o CORINE Land Cover, así como documentos derivados de información procedente de satélite.

- Superficie de cultivos anuales y permanentes (ONU). [OD](#).
- Costa desnaturalizada (TCI). [OP](#).
- Superficie urbanizada (OSE). [OD](#).
- Superficie urbanizada en el litoral (OSE). [OP](#).
- Superficie forestal como porcentaje de la superficie total (ONU) [OD](#).
- Ocupación del suelo. *Land Take* (CSI 14). [OP](#).
- Superficie forestal por tipo de especie (TCI). [OD](#).
- Superficie forestal (I. Mediterráneo). [OD](#).
- Cambio en la superficie forestal (ONU). [OD](#).
- Cambio en los usos del suelo (TCI). [OP](#).
- Evolución de la superficie dedicada a invernaderos (TCI). [ONP](#).
- Cambios en los usos del suelo (ONU). [OP](#).

Indicadores que pueden obtenerse a partir de datos de satélite.

- Concentración de algas en aguas costeras (ONU) [OP](#).
- Defoliación de las masas forestales (IAMMA). [OP](#).
- Daños en los bosques (TCI). [OP](#).
- Agua embalsada eutrofizada (TCI). [OP](#).
- Eutrofización en embalses (IA MMA). [OP](#).
- Satellite derived vegetation index (ONU). [OD](#).

Indicadores que pueden obtenerse mediante fuentes diversas. Las variables indicador pueden ser obtenidas a partir de productos de satélite ó mediante documentos de ocupación del suelo.

- Superficie forestal incendiada (TCI). [OP](#).
- Superficie quemada por año (I. Mediterráneo). [OP](#).
- Incendios forestales (IAMMA). [OP](#).

- Porcentaje de cultivos de regadío (ONU). OD.
- Tasa de suelo agrícola de regadío (I. Mediterráneo). OD.
- Superficie de regadío (TCI). OD.
- Superficie afectada por desertificación (ONU). ONP.
- Superficie de construcciones legales e ilegales (ONU). ONP.
- Superficie afectada por la erosión (TCI). ONP.

Del listado anterior, se deduce que la mayor dificultad para obtener indicadores ambientales a partir de datos procedentes de teledetección se encuentra en aquellos casos en los que la información básica se obtiene a partir de documentos de ocupación del suelo, por la complejidad de obtención de estos documentos a partir de información procedente de satélites.

En el proceso de obtención de indicadores ambientales a partir de datos procedentes de sensores espaciales (Figura 1.17), es necesario la obtención previa de ciertas variables indicadoras, para las cuáles serán, en cierta medida, índices cuantitativos relacionados con características físicas del territorio. La metodología para la obtención de estas variables, suele estar definida ya que, generalmente, se trata de índices de vegetación, de concentración de materia orgánica, etc. Tras la obtención de estas variables, es preciso integrarlas, de acuerdo a la metodología definida por la entidad proponente del indicador, así como considerar la información relativa a las entidades territoriales, con la finalidad de referir los resultados obtenidos a las mismas, puesto que los indicadores ambientales normalizados están referidos a ellas.

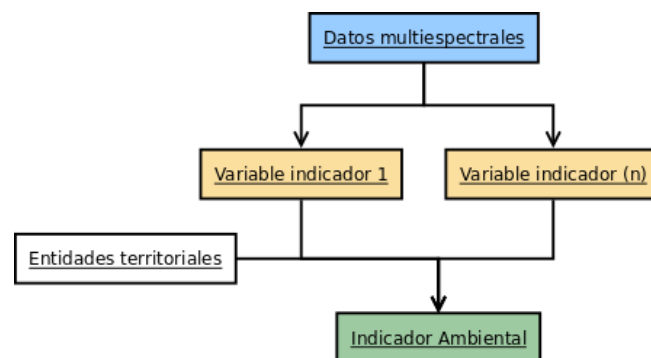


Figura 1.17: Proceso de obtención de indicadores ambientales, a partir de datos procedentes de satélite.

1.3.5. Teoría de modelos. Modelización cartográfica.

1.3.5.1. Definición de modelo.

La complejidad de los problemas que se presentan en el mundo real, así como la caracterización de ciertos fenómenos naturales, hace necesaria su descomposición en componentes sencillos, relacionados entre sí, que permitan afrontar su resolución de forma eficiente y precisa. Por tanto, se puede definir un modelo como “un objeto, concepto o conjunto de relaciones, que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica” (Ríos, 1995). La representación fiel de esta realidad, se puede conseguir tras un proceso de abstracción que nos permita identificar las características principales, simplificándolas y estableciendo sus interrelaciones, de forma que la complejidad inicial sea reducida a una imagen conceptual, cuyo nivel de complejidad permita comprenderla, con los recursos disponibles (Figura 1.18). El valor de un modelo, es su posibilidad de aplicación para la mejor comprensión del comportamiento de un sistema en circunstancias en las que no es posible, por razones técnicas, económicas o políticas, experimentar con una situación real.

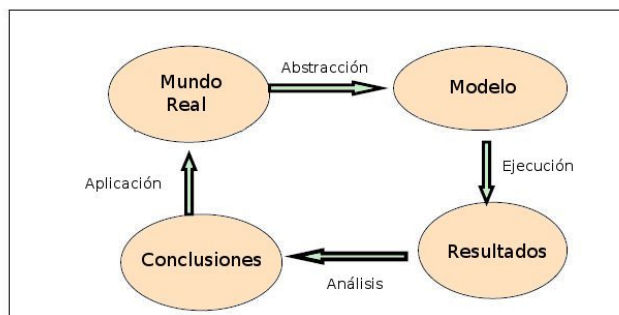


Figura 1.18: El proceso de modelización.

La finalidad de la construcción de un modelo, es la de comprender mejor nuestro entorno, con el fin de predecirle y, si fuera posible, controlarle y así, desde este punto de vista, la modelización puede ser vista como un proceso que nos permite aumentar nuestro control sobre el mundo, así como tomar decisiones o responder a cuestiones relacionadas con el mismo (Rothenberg, 1989). Un modelo no es “real” ni “verdadero”, en el mejor de los casos, es consistente y concordante con las observaciones (Batanero, 2001).

Es importante resaltar que el mejor modelo no es aquél que se aproxima mejor a los datos, sino que muchas veces el es uno que, siendo simple, nos

proporciona una buena aproximación de los fenómenos representados. Por ello, algunas veces, fenómenos de naturaleza determinista se describen mejor con un modelo probabilístico.

1.3.5.2. Clasificación de los modelos.

Se han propuesto varias clasificaciones de modelos, basadas en diferentes criterios, sin ser las diferentes categorías excluyentes entre sí, pudiendo un determinado modelo pertenecer a diferentes categorías en función del criterio considerado.

Turner (1986) propuso una categorización de los modelos, ateniéndose a las reglas de construcción del modelo, es decir, a la forma de establecer las relaciones de correspondencia entre modelo y realidad. Así, se diferencian los siguientes tipo:

- **Modelos icónicos.** Tratan de reproducir fielmente las características del objeto real, modificando algunas propiedades, tales como la escala o el material, pero conservando las propiedades morfológicas (forma).
- **Modelos análogos.** En ellos se mantienen algunas propiedades de los objetos reales, pero sin ser réplicas morfológicas de los mismos. Para su construcción se utilizan un conjunto de convenciones que sintetizan y codifican propiedades del objeto real, facilitando su interpretación.
- **Modelos simbólicos.** Los objetos reales se representan empleando reglas más abstractas, empleando una codificación matemática (geométrica, estadística, etc.) que permite estudiar las propiedades de dichos objetos.

Atendiendo a las propiedades matemáticas de las relaciones entre los datos de entrada y de salida, puede establecerse la siguiente diferenciación:

- **Modelos deterministas.** En ellos, las relaciones entre las cantidades de entrada y salida son exactas y únicas, proporcionando resultados libres de incertidumbre.
- **Modelos estocásticos.** En este caso, las relaciones entre los datos de entrada y salida son de tipo probabilístico existiendo, por tanto, una cierta indeterminación en el resultado.

Es posible, además, establecer una clasificación de tipologías de modelos en base al modo de representación de la realidad (Ríos, 1995):

- **Modelos analógicos**, en los que un fenómeno se representa mediante algún dispositivo físico. En este grupo, se incluyen los modelos icónicos, integrados en esta clasificación por aquellos en los que el objeto real se representa a escala por el modelo.
- **Modelos cualitativos**, en los que las relaciones entre las variables no se expresan cuantitativamente, lo que supone, en general, una imperfección del modelo.
- **Modelos matemáticos**, en los que el objetivo es simplificar la realidad identificando las variables importantes del sistema, relacionándolas mediante algoritmos matemáticos. Son equivalentes a los modelos simbólicos, comentados anteriormente.

Desde el punto de vista de la evaluación y el control de fenómenos, podemos utilizar la división básica de modelos físicos y abstractos. Los primeros son más comprensibles, siendo copias a escala del objeto en estudio. En un modelo abstracto, se representa la situación del mundo real mediante símbolos.

Mientras que en los modelos físicos se describe estrictamente el tipo de comportamiento del sistema considerado, en los modelos abstractos se profundiza en el análisis de dicho comportamiento, permitiendo funciones como la planificación, a través del examen de las posibles consecuencias de distintas alternativas de acción y la selección de aquellas que parecen ofrecer los mayores beneficios (Zancajo Jimeno, 2003).

1.3.5.3. Los ordenadores y su aplicación a la modelización.

Muchos modelos son complejos y precisan de infinidad de cálculos y operaciones, o de manejar muchos datos. La principal característica de los ordenadores es su capacidad para llevar a cabo cálculos a gran velocidad y con un alto grado de exactitud, convirtiéndose en elementos indispensables para la elaboración de modelos.

Así pues, el ordenador constituye el medio que pone en marcha un modelo, especialmente cuando éste es amplio y complejo. Los ordenadores no modifican el proceso de elaboración de un modelo, salvo que requieran la formulación matemática del modelo para volver a “expresarse” luego como un algoritmo primero y, después, como un programa de ordenador. Sin embargo, debido a su capacidad de cálculo, permite evaluar mayor número de relaciones que cualquier otro procedimiento.

Además, Lowry (1965), hace mención a dos propiedades importantes de los datos de este tipo de modelos: su localización, que les sitúa en el espacio y otros elementos con relación a otros en relación a lo que a posición se refiere, y fecha de ocurrencia, que introduce la variación temporal como un aspecto relevante, especialmente cuando hablamos de sistemas dinámicos.

1.3.5.4. Los modelos matemáticos.

Definición y clasificación. Los modelos matemáticos son un tipo particular de modelo abstracto, que representan los sistemas considerados mediante la utilización de símbolos matemáticos. Para su construcción, se parte de una imagen mental de dicho sistema para, a continuación, proceder a su descripción verbal, la cuál es traducida a un lenguaje matemático. La exactitud de la descripción depende de la capacidad para percibir el sistema del mundo real. La formulación matemática es simplemente una traducción a otro lenguaje, de nuestra percepción del mundo real. No hay nada inherente a los símbolos matemáticos que nos garantice la exactitud. Sin embargo, la precisión necesaria para convertir las palabras en símbolos descubre con frecuencia las incongruencias de la descripción verbal y puede, por tanto, conducir a una clarificación de nuestra imagen mental en el sentido de cómo funciona el sistema real. La necesidad de un análisis preciso es una de las ventajas más significativa de la aplicación de los modelos matemáticos.

Los modelos matemáticos, pueden ser agrupados en tres categorías (Lowry, 1965):

- **Modelos descriptivos**, referidos a la representación de una situación existente. En palabras de Lowry, *“tiene el objetivo limitado de inducir al ordenador a que le proporcione [al constructor del modelo] las características más destacadas del contexto”*. Tienen un gran valor científico, pues describen muchos aspectos de la estructura del sistema, reduciendo su complejidad a un lenguaje coherente y riguroso de relaciones matemáticas. Sin embargo, estos modelos no sirven para realizar acciones de predicción o de planificación.
- **Modelos de predicción**, se usan en la simulación de situaciones futuras. Tienen exigencias más estrictas que los descriptivos, aunque pueden operar en el mismo sentido.
 - Sólo se utilizarán las relaciones que se espera que se mantengan razonablemente constantes a lo largo del tiempo.

- Es necesario que las variables incluidas en el modelo puedan evaluarse en el futuro.
- **Modelos de planificación.** Constituyen una ampliación de los de predicción, con la diferencia de que se construyen de forma que indiquen no sólo qué ocurrirá como resultado de determinadas hipótesis, sino también qué tiempo de rendimiento o actuación es posible con respecto a los objetivos fijados.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que los modelos no sustituyen el juicio de los expertos, si no que intentan proporcionar “*un método sistemático de ayuda al responsable en la toma de decisiones para elegir las acciones, investigando el problema, analizando los objetivos y alternativas y comparándolos mediante la aplicación de un marco apropiado, analítico, si es posible, para facilitar un juicio acerca del problema*” (Quade and Boucher, 1968).

Uno de los principales problemas prácticos del uso de los modelos son las limitaciones impuestas por la disponibilidad de los datos. Incluso el modelo más simple precisa una gran cantidad de información, que va aumentando según el modelo se hace más real.

1.3.5.5. Diseño de modelos.

La aplicación de un modelo a un problema del mundo real no es un proceso sencillo. Algunas de las fases de la investigación del desarrollo del modelo puede indicar que las ideas iniciales son susceptibles de mejorarse, motivo por el que es conveniente que el método para la elaboración de un modelo sea iterativo.

Las fases que se deben establecerse en el proceso de diseño de modelos son las siguientes (Urquía Moraleda, 2008):

1. Definición del problema.
2. Definición del sistema.
3. Formulación conceptual del modelo.
4. Diseño preliminar del experimento.
5. Preparación de los datos de entrada.
6. Traducción e implementación del modelo.
7. Verificación y validación..

8. Diseño experimental final.
9. Experimentación.
10. Análisis e interpretación.
11. Documentación.

Definición del problema. El paso inicial, previo a cualquier otra operación, es la definición del problema objeto de estudio y la fijación de objetivos a alcanzar, con el fin de establecer qué variables se han de indicar, de cuáles es posible prescindir y qué nivel de agregación es aceptable. Al fin y al cabo, la construcción del modelo se realiza con el fin de ayudar a responder ciertas preguntas acerca del sistema real.

Definición del sistema y formulación del modelo. La representación de aspectos y fenómenos del mundo real mediante modelos, requiere un proceso de abstracción y simplificación con el fin de adaptar esos aspectos a los objetivos del estudio, identificando un pequeño conjunto de características o propiedades del sistema suficientes para servir a los objetivos específicos del estudio.

La formulación del modelo consiste en el desarrollo de un modelo preliminar, bien gráficamente o en pseudocódigo, en el que se definen los componentes básico, las variables descriptivas y las interacciones (la parte lógica) que le constituyen. Este procedimiento puede descomponerse en cinco fases (Lee, 1974):

1. Elección de las variables a incluir. Generalmente, las variables básicas serán determinadas al definir el problema. No obstante, podrán existir otras variables adicionales íntimamente relacionadas con las anteriores que también deberán ser tenidas en consideración en el modelo si existe una relación causal entre una variable adicional y una o varias de las iniciales.
2. Clasificación y nivel de agregación. Una vez incluida una variable en el modelo, es necesario establecer su clasificación y el nivel de agregación.
3. Tratamiento del tiempo. El factor temporal deberá ser tenido en cuenta en ciertos modelos, por lo que deben considerarse dos posibles aspectos:
 - a) El primero, afecta a la planificación y se refiere al periodo de tiempo para el que se utiliza el modelo, es decir, el horizonte temporal del plan.

- b) El segundo, radica en la consideración del tiempo. En este sentido, es de señalar que los modelos que describen una situación de cambio continuo (modelos dinámicos) proporcionan mejores representaciones que aquellos que describen el sistema sólo en un punto determinado del tiempo (modelos estáticos). Por otro lado, el desarrollo y el funcionamiento de modelos dinámicos es más complejo que el de los modelos estáticos.
4. Especificaciones del modelo. Para desarrollar las fases anteriores, el investigador habrá establecido una hipótesis sobre la estructura y comportamiento del fenómeno que se pretende reproducir. El siguiente paso en la construcción del modelo corresponde a la descripción de las hipótesis de comportamiento del sistema y de su conversión a una forma matemática o simbólica. El punto de partida, es una descripción verbal del sistema en consideración, que describirá las características importantes del sistema y sus iteraciones. Una vez completada esta descripción, puede convertirse en un modelo matemático equivalente, aunque no es un proceso simple.
5. Evaluación del modelo. La especificación del modelo en términos matemáticos, incluye varias constantes o parámetros que añaden dimensiones a las relaciones del mismo, es decir, la variación de una variable con relación a las otras. Si la forma y estructura del modelo son satisfactorias, la evaluación es el proceso de encontrar el valor de los parámetros que mejor se ajusta a situación observada.

Diseño preliminar del experimento y preparación de los datos de entrada. Estas fases consisten en definir qué acciones se ejercerán sobre el modelo y cómo se va a medir su comportamiento. Se trata, por tanto, de definir qué variables se proporcionarán como datos de entrada y cuáles serán devueltas como resultado del proceso, cómo va a modificarse el valor de las entradas y cómo van a recogerse los datos de salida.

Por otro lado, deben formatearse los datos de entrada, para adaptarlos a las estructuras propias del modelo, especialmente en caso de provenir de varias fuentes.

Traducción del modelo e implementación. En el caso de que el modelo vaya a ser implementado, es necesario transformar el diagrama de flujo de

procesos en instrucciones, las cuáles dependerán del lenguaje de modelado o programación elegido para tal cometido. En este momento se define el tipo de implementación se va a realizar, si se realizará una aplicación independiente (ejecutable) se utilizará el soporte de aplicaciones disponibles comercialmente, sobre qué sistemas operativos se ejecutará, etc. ya que dependiendo de una opción, el proceso de traducción debe realizarse de distinta forma, adaptándole a las herramientas disponibles en cada una de las opciones.

Verificación y validación del modelo. En este punto, se comprueba que el modelo funciona como se espera y que los resultados que ofrece son compatibles con lo que se espera del sistema real que representa.

La finalidad del proceso de *verificación* es la de comprobar que no existen errores de implementación del modelo, mientras que la *validación*, consiste en comprobar que el modelo proporciona resultados suficientemente aproximados a la realidad, en función de los objetivos previstos.

Se han establecido diferentes procedimientos de verificación de modelos, entre los que se encuentran los siguientes (Urquía Moraleda, 2008):

- Verificación manual de la lógica. Consistente en la ejecución del modelo, sobre un conjunto reducido de datos, de forma que los resultados pueden ser comprobados de forma manual.
- Comprobación submodelo a submodelo. Se trata de verificar que cada componente individual produce los resultados esperados para todos los posibles tipos de entrada.
- Comprobación con soluciones conocidas. Se basa en la ejecución del modelo sobre un conjunto de datos prefijados, de los cuáles conocemos los resultados que se obtendrían.
- Test de sensibilidad. Permite establecer la sensibilidad del modelo a variaciones en parámetros individuales, de forma que se establezca la influencia que pequeñas variaciones en los datos iniciales, producen en los resultados.

Por otro lado, el proceso de validación de un modelo consiste en determinar (Urquía Moraleda, 2008):

- Si el modelo representa adecuadamente al sistema real (comprobación de la estructura del modelo).

- Si los datos generados de la simulación del modelo, reproducen de forma adecuada el comportamiento del sistema real (comprobación del comportamiento del modelo).
- Si el usuario del modelo tiene confianza en los resultados obtenidos de las simulaciones (comprobación de la confianza del usuario en el modelo).

La validez de un modelo sólo puede ser evaluada con respecto al propósito específico con el cuál fue diseñado y construido. Durante las fases de diseño, desarrollo y uso del modelo, el proceso de validación es continuo, de forma que la confianza en el modelo va aumentando conforme es utilizado y comprobado en diferentes condiciones por lo que, tanto la validación, como la verificación son procesos que realmente nunca finalizan.

Dado que, desde el punto de vista de la ingeniería, los modelos deben ser útiles, ejecutarse en un tiempo razonable y con un coste asumible, en el proceso de validación, es más adecuado preguntarse en qué medida las diferencias entre el modelo y la realidad son lo suficientemente significativas como para afectar a las conclusiones derivadas del uso del modelo, que no en qué medida se ajusta el comportamiento simulado al comportamiento real del sistema (Urquía Moraleda, 2008).

Experimentación y análisis de los resultados. El diseño de los experimentos debe hacerse de forma que se respondan a las preguntas planteadas en el estudio, por lo que las condiciones de realización deberán estar bajo control. Por otro lado, debe asegurarse que el conjunto de datos suministrado al modelo, es suficientemente amplio, para que los resultados ofrecido sean significativos desde un punto de vista estadístico.

Documentación. El desarrollo y el modo de operación del modelo, debe documentarse con el fin de alargar su vida útil. La documentación debe ser clara y concisa, con el fin de facilitar posteriores modificaciones o ser utilizado por personas distintas del creador del mismo.

1.3.5.6. Modelización cartográfica.

Introducción. La modelización cartográfica es un tipo particular de modelo, de tipo descriptivo, que puede definirse como la representación de la realidad geográfica expresada mediante cartografía o datos cartográficos. Esta representación de la realidad, puede realizarse mediante distintas capas

temáticas (Figura 1.19), las cuáles pueden estar almacenadas en dos grandes grupos de estructuras: ráster y vectorial.

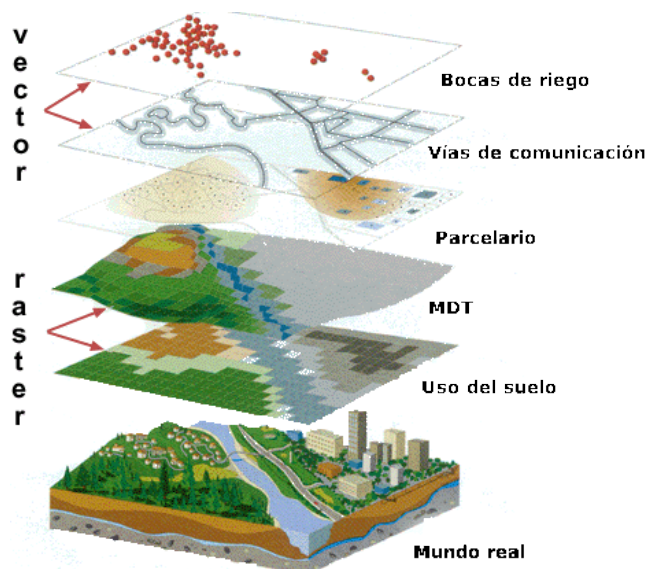


Figura 1.19: Representación de la realidad.
(Imagen: <http://www.nonprofitgis.org/layers.html>)

Los capas de información de tipo ráster se utilizan en la representación de fenómenos que se presentan con una distribución superficial en una determinada región. Están organizados en mallas regulares, en el que el valor de cada celda representa una propiedad de tipo cualitativa, como en un documento de ocupación del suelo, o cuantitativa, en el caso de un modelo de elevaciones o de índices de vegetación. Esta estructura es la propio de los datos adquiridos por los sensores espaciales, en los que cada celda representa una determinada porción del territorio, que vendrá determinada por la resolución espacial del mismo.

Por el contrario, los documentos vectoriales son más utilizados en el caso de representar elementos cuya distribución es puntual, lineal o superficial pero con un valor constante en su interior. Este tipo de representación se emplea, por ejemplo, en los mapas de carreteras o parcelarios.

La representación de la realidad mediante cartografía convencional, constituye un modelo de tipo análogo, analógico y físico (según la clasificación considerada), que presenta algunos inconvenientes, tales como:

- Es un modelo estático. La representación del fenómeno se refiere al momento de la toma de datos, por lo que pueden aparecer discrepancias con la realidad actual, especialmente en el caso de fenómenos dinámicos.

- La actualización del modelo es un proceso laborioso y costoso. Especialmente, si la toma de datos se hace con métodos tradicionales, lo que limita la utilidad de este tipo de representación en tareas de predicción y planificación.
- La generación de nueva información no reflejada en el mapa también es un proceso laborioso. Además, la incorporación de un cambio en la situación reflejada por la cartografía correspondiente, derivada de un proceso de planificación, conlleva la nueva formación del mapa.

A pesar de estos inconvenientes, es un modelo ampliamente utilizado, pues se trata de la mejor expresión del territorio y, por tanto, los procesos de planificación del mismo conllevan su necesaria utilización.

La incorporación de la informática a los procesos cartográficos, ha permitido agilizar las labores de actualización de la cartografía. La aparición de estructuras de datos cartográficas, codificadas mediante las denominadas Bases de Datos Espaciales (BDE) convierten al modelo cartográfico digital, en un modelo que participa de las ventajas de los modelos físicos e incorpora las ventajas de los modelos abstractos. Además, permite considerar el factor temporal en el modelo, que permite representar fenómenos dinámicos.

El modelado cartográfico. Se denomina *modelado cartográfico* a todas aquellas operaciones que se realizan sobre uno o varios modelos cartográficos y cuya finalidad es la de derivar otros nuevos en los que se derivan nuevas informaciones a partir de relaciones explícitas o implícitas presentes en los datos originales y que, mediante la incorporación de conocimiento teórico o empírico sobre ciertos procesos, permiten determinar modelos de comportamiento espacial de fenómenos de interés.

Operaciones en el modelado cartográfico. Existen diversas formas de considerar los datos y las relaciones entre ellos, así como las posibilidades de obtención de documentos derivados de los conjuntos de datos. Así, los distintos tipos de funciones (ver Figura 1.20), se pueden organizar en (Tomlin, 1990):

- Funciones de caracterización local. En este tipo de operaciones el resultado se obtiene operando con valores/píxeles individuales, que pueden provenir de una única capa de datos o de varias de ellas, sin tener en cuenta los valores adyacentes. El proceso de obtención de ciertos índices de vegetación pertenece a este tipo de operaciones, pues

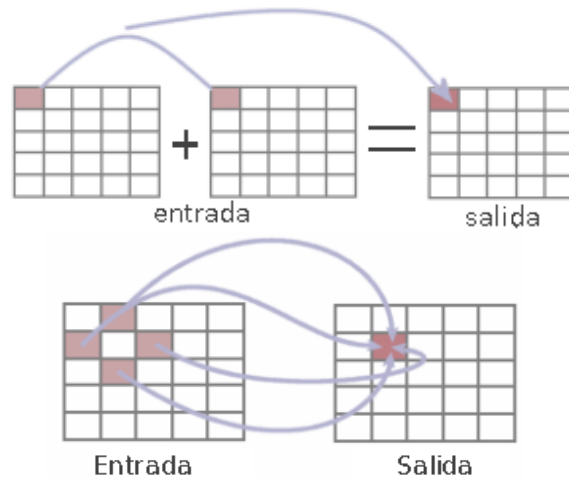


Figura 1.20: Operaciones del álgebra de mapas. Izquierda: Operaciones puntuales. Derecha: Operaciones de vecindad.

el valor del mismo en cada celda de la imagen, sólo depende del valor de reflectividad en determinadas bandas espectrales, referidos a esa misma celda.

- Funciones de vecindad. En estas operaciones, el resultado del proceso, es función de los valores del propio píxel, así como de los adyacentes, no limitándose a los inmediatamente próximos, si no que puede delimitarse una determinada zona de influencia alrededor del mismo. Los procesos de realce y filtrado espacial pertenecen a este tipo de funciones, pues consideran el entorno de cada celda en el cálculo del resultado.
- Funciones zonales. Al contrario que en las funciones de vecindad, en las que las áreas se definen según criterios de proximidad a cada celda, el resultado se obtiene a partir de la agregación de valores según zonas definidas por criterios cualitativos, las cuáles no tienen que ser regulares ni del mismo tamaño. Así, un caso típico de este tipo de funciones es el cálculo de los valores medios de un cierto parámetro por entidades territoriales.

1.4. Objetivos de la investigación.

La presente tesis doctoral tiene como objetivo general el *establecer modelos de obtención de parámetros biofísicos e indicadores ambientales, a partir de datos procedentes de satélites de alta resolución temporal*. Dado que se trata de definir una serie de metodologías, el ámbito de aplicación es escalable, si

bien, se ha diseñado para zonas amplias del territorio, dadas las características de los sensores a emplear (MODIS y, de forma secundaria, TM y ETM+), centrándonos básicamente en regiones del territorio peninsular de España que puedan ser representativas de la totalidad del país.

Para ello, han de verificarse los siguientes objetivos específicos, que tratan aspectos parciales de la investigación:

1. Analizar y establecer la viabilidad para la obtención de diferentes parámetros ambientales, a partir de datos de satélite de alta resolución temporal, mediante modelos estándar de obtención de índices cuantitativos, cualitativos e indicadores ambientales.
2. Adaptar y proponer modelos procesales y de datos, que permitan la referida obtención, de manera eficiente y optimizada, teniendo en cuenta las particularidades de los datos de partida.
3. Establecer y aplicar estrategias de validación de los modelos propuestos, mediante la realización de ensayos que permitan detectar debilidades en las metodologías, así como factores que puedan afectar a la calidad de los resultados.
4. Mejorar las utilidades de los datos procedentes de satélite, mediante metodologías que mejoren sus características, en lo que a resolución geométrica y temporal respecta.
5. Automatizar los procedimientos de obtención de parámetros, para permitir el cálculo sistemático de un determinado número de variables ambientales, con el fin de facilitar el seguimiento temporal de procesos ambientales dinámicos.

1.5. Resumen.

Tras la revisión realizada, se ha llegado a las siguientes conclusiones parciales:

- Existe un gran número de índices y parámetros biofísicos que cuantifican determinados aspectos de las cubiertas terrestres que pueden ser obtenidos mediante datos adquiridos por los sensores TM y MODIS, u otros equivalentes.

- En lo referente a la obtención de documentos cualitativos de ocupación del suelo, el hecho de que el entrenamiento del clasificador sea un proceso determinante en cualquier metodología, limita en gran medida las posibilidades de automatización total del procedimiento.
- Han sido propuestos diversos criterios para estimar la bondad de los procesos de clasificación, que determinan la precisión desde diferentes puntos de vista, tales como el productor y el usuario.
- Se ha identificado un cierto número de indicadores ambientales normalizados, cuya obtención es posible mediante técnicas de teledetección, por lo que los resultados pueden comparados con los obtenidos mediante otras metodologías.
- La representación y caracterización de diversos fenómenos del mundo real, es posible mediante la creación de modelos cartográficos y de otro tipo, adecuados a los fines perseguidos, y que se enmarcan dentro de los objetivos de este trabajo.

Capítulo 2

MATERIALES Y MÉTODOS DE ESTUDIO.

2.1. Resoluciones de los sensores espaciales. Tipos.

El concepto *resolución* en el ámbito de la teledetección hace referencia a cuatro significados bien diferenciados, ya que se consideran diferentes tipos, según nos refiramos a un aspecto u otro. En concreto, se habla de resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica, las cuáles pasamos a definir a continuación.

- Resolución espacial: Este concepto designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen. Está determinada por el tamaño del píxel, medido en metros sobre el terreno, aunque esto depende de la altura del sensor con respecto a la Tierra, el ángulo de visión, la velocidad de escaneado y las características ópticas del sensor.

En el caso que nos ocupa, la resolución espacial oscila entre los 30 m del sensor *Thematic Mapper* (TM) y los 250 - 500 m de *MODIS*, por lo que según la finalidad del trabajo, deberemos decantarnos por uno que se adapte a nuestras especificaciones.

- Resolución temporal: Es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre, lo que equivale al periodo de tiempo entre distintas pasadas del satélite por la misma zona de la Tierra. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita y del ancho de barrido en cada pasada. Es un valor de gran importancia a la hora de seleccionar el sensor que se va a utilizar como

origen de los datos, pues en el caso de intentar estudiar fenómenos con una variabilidad temporal alta, puede no ser adecuado. Así, el rango de valores de resolución temporal disponibles en la actualidad, oscila entre unos pocos minutos en el caso de satélites meteorológicos, hasta los 16 días del sensor TM.

- Resolución espectral: Define los canales espectrales y su ancho de banda respectivo, que es capaz de captar el sensor. Los sensores espaciales típicos, no alcanzan grandes valores de resolución espectral, siendo valores usuales los comprendidos entre 4 y 10, si bien los sensores hiperspectrales pueden disponer de hasta 256 canales con un ancho de banda muy estrecho (unos pocos nm) para poder separar de forma precisa distintos objetos por su comportamiento espectral diferencial.
- Resolución radiométrica: También denominada resolución dinámica, representa el número máximo de niveles de gris en que se puede codificar la radiación detectada. Normalmente, se mide en *bits* y depende del conversor analógico digital usado: una mayor resolución dinámica (mayor número de bits) nos permite una mejor discriminación de pequeñas diferencias de radiación, al tener un mayor rango de valores posibles.

2.2. Sensores espaciales.

2.2.1. Sensor *Thematic Mapper* (TM).

El sistema *Thematic Mapper* (TM), es un sensor instalado a bordo de los satélites Landsat 4 y 5, constituyendo una mejora fundamental con respecto a la generación anterior, denominada *Multi Spectral Scanner* (MSS), utilizado en los primeros satélites del programa Landsat (Landsat 1, 2, 3, 4 y 5).

Responde al tipo de escáner transversal, posee 7 bandas espectrales, en los intervalos mostrados en la tabla I.1 del anejo I.

Es decir, posee 3 bandas en el visible (1, 2 y 3) situadas, respectivamente en el azul, verde y rojo; dos bandas en el IR próximo (4 y 5), una en el IR medio (5) y otra en el IR térmico (6). La banda 6 tiene una unidad de resolución de campo de $120 \times 120 m^2$, correspondiente a un IFOV de 0.17 mrad, mientras que en todas las demás, la citada unidad de resolución es de $30 \times 30 m^2$ (IFOV de 0.043 mrad), es decir, en estas bandas la resolución es muy superior a la de MSS.

El tamaño de la imagen es de 185 km. de ancho por 170 km. en la dirección Norte-Sur. El número de píxeles de cada banda es de $39 \cdot 10^6$.

Se deducen fácilmente las mejoras de TM con respecto a MSS. En síntesis, se ofrece una mayor resolución espectral y espacial del sensor y la exploración de un mayor rango del espectro electromagnético. La situación de las tres bandas del visible, permite la realización de composiciones en color normal o natural.

2.2.2. Sensor *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+).

Se encuentra situado a bordo del satélite Landsat 7, lanzado el 15 de abril de 1999 y está operativo desde entonces, aunque actualmente presenta limitaciones en la adquisición de las imágenes, debido a un fallo en el sistema compensador del movimiento para eliminar el efecto del desplazamiento orbital. Se trata de una evolución del sensor TM (*Thematic Mapper*), instalado en los satélites Landsat 4 (1982) y 5 (1984), compartiendo las mismas bandas espectrales, y añadiendo una nueva pancromática, con resolución de 15 m. Dicha circunstancia permite hacer análisis diacrónicos, dado el gran intervalo temporal que abarcan los datos tomados por estos sensores.

El sensor ETM+ registra radiación en el visible, infrarrojo próximo, medio y térmico. La resolución nominal es de 15 m en la banda pancromática y 30 m en las seis bandas del visible, e infrarrojos cercano y medio y 60 m en el infrarrojo térmico. Las imágenes están referidas al *Landsat World-Wide-Reference System*, (WRS), en el cual se sitúan según dos coordenadas, *path* y *row* (Figura 2.1). Según esta nomenclatura, la coordenada *path* se asimila al número de órbita del satélite, mientras que *row* está relacionada con la latitud del centro nominal de la imagen. De esta forma, una cobertura completa contiene 57.784 escenas, cada una de 183 km de ancho por 170 km de largo. Cada escena necesita un espacio de almacenamiento de 3.8 Gb de datos, que equivalen, aproximadamente, a 475 Mb.

El número y posición de las bandas espectrales se detalla en la Tabla I.2, del anejo I.

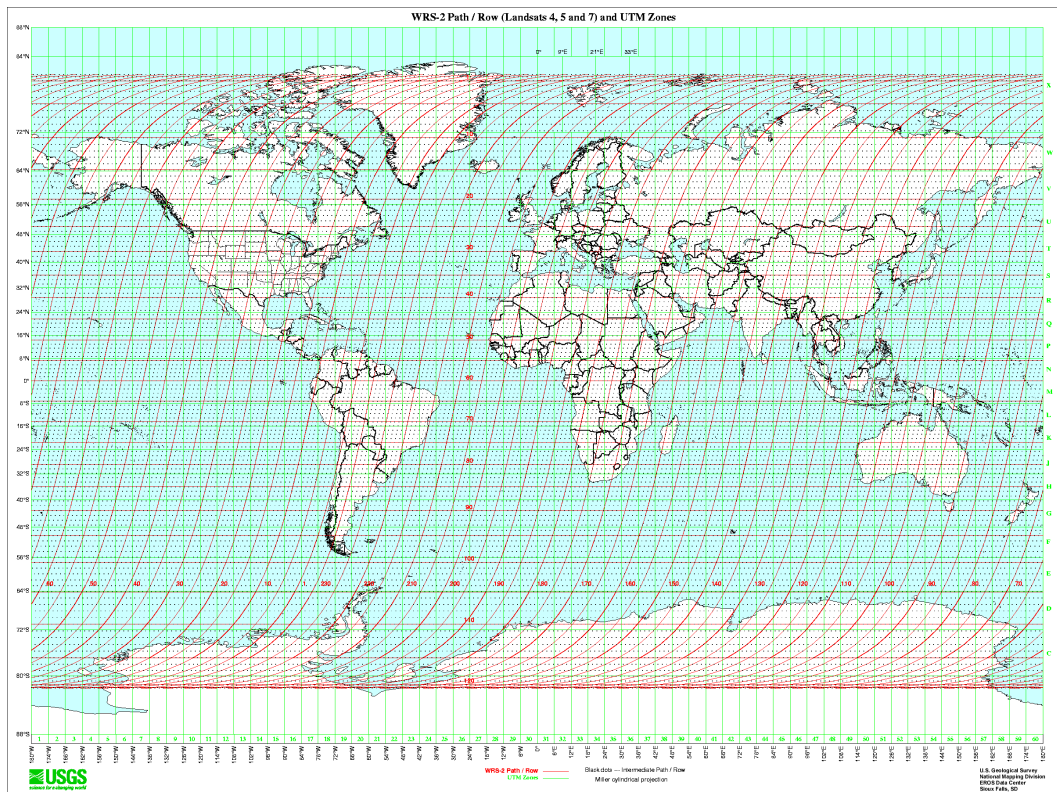


Figura 2.1: Sistema de coordenadas Landsat World Wide Reference System (WRS).

2.2.3. Sensor MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*).

2.2.3.1. Características generales.

El instrumento MODIS es un sensor multiespectral que está instalado a bordo de los satélites TERRA (1999) y AQUA (2002). Sus órbitas están programadas de manera que TERRA pasa de norte a sur por el Ecuador a las 10:30, hora solar local, mientras que AQUA pasa de sur a norte al mediodía. Ambos recubren la totalidad de la superficie de la Tierra cada 1 ó 2 días, dependiendo de la latitud del lugar (ver Figura 2.2), capturando datos en 36 bandas espectrales. Esta información se utiliza para el estudio de procesos con carácter regional y global que ocurren en áreas terrestres, océanos y capas bajas de la atmósfera.

MODIS juega un papel muy importante en el desarrollo de modelos capaces de detectar y predecir cambios, de forma suficientemente precisa, para facilitar la toma de decisiones en temas relacionados con el medio ambiente.

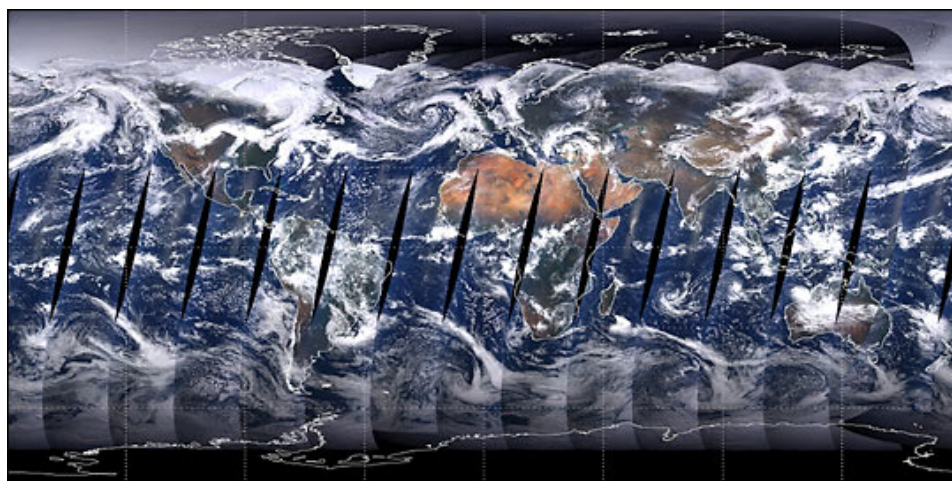


Figura 2.2: Cobertura diaria de MODIS- Terra. (Imagen: LP-DAAC).

Proporciona alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 bandas espectrales (ver tabla I.3 del anejo I) de longitudes de onda comprendidas entre 0,4 y 14,4 μm . Dos de las bandas se toman a una resolución de 250 m, cinco bandas con 500 m y las restantes 29 bandas con 1 km. Sobre la órbita EOS a 705 km de altitud, el sensor sigue un patrón de escaneo de $\pm 55^\circ$ captando una franja de 2330 km.

2.2.3.2. Datos y productos.

Los datos obtenidos por el sensor MODIS se distribuyen en formato HDF-EOS (Demcsak, 1997; Wynne et al., 1997) por el LP-DAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*), accediéndose a ellos, bien a través de una *interface* de descarga o, alternativamente, a través de un servicio ftp que almacena los datos y productos derivados. Para facilitar la difusión de los mismos, se utiliza una proyección sinusoidal, mostrada en la Figura 2.3, de toda la superficie terrestre cubierta por MODIS, la cuál está dividida en teselas de $10^\circ \times 10^\circ$, de forma que sólo sea necesario descargar la zona de interés.

La denominación de los archivos se efectúa de acuerdo al siguiente esquema de codificación

MXDxxxx.Ayyyyddd.hMMvNN.ccc.YYYYOoddhhmmss

siendo,

X = Satélite, 'O'=Terra, 'Y'=Aqua, 'C'=mixto.

xxxx = Tipo de producto (ver tabla I.5).

yyyy = Año.

ddd = Día del año, contado a partir del 1 de enero (=001).

MM = Tesela horizontal (ver figura 2.3).

NN = Tesela vertical (ver figura 2.3).

ccc = Versión del producto.

YYYYOodd = Fecha de producción del archivo.

hhmmss = Hora de producción del archivo.

El resultado es un nombre de archivo como el siguiente,

MOD09GQ.A2007216.h17v04.005.2007221234428.hdf

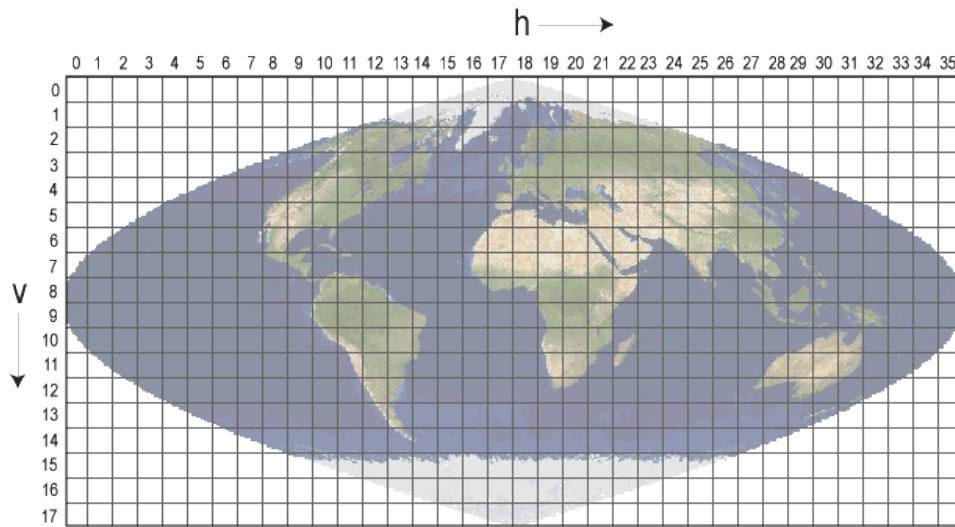


Figura 2.3: Proyección sinusoidal empleada para la distribución de datos MODIS (Imagen: LP-DAAC).

Junto a los datos recogidos por el sensor, se ofrecen una serie de productos precalculados de gran interés, entre los que se encuentran los que se relacionan a continuación.

- Reflectividad superficial: diaria o síntesis de 8 días. Resoluciones de 250 - 500 - 1000 m (Vermote and Vermeulen, 1999).
- Temperatura superficial y emisividad: diaria o síntesis de 8 días. Resoluciones de 1000 - 6000 m (Wan, 1999, 2007).
- Índices de vegetación: síntesis de 16 días o 30 días. Resoluciones de 250 - 500 - 1000 m (Huete et al., 1999).
- Anomalías térmicas/Incendios: valores diarios o síntesis de 8 días. Resolución espacial de 1000 m (Justice et al., 2006).
- Productividad bruta: síntesis de 8 días. Resolución espacial de 1000 m (Running et al., 1999).

- Albedo: síntesis de 16 días. Resolución espacial de 1000 m (Strahler and Muller, 1999).
- Índices de área foliar: síntesis de 8 días. Resolución espacial de 1000 m (Knyazikhin et al., 1999; Myneni et al., 2003).
- Máscara de cuerpos de agua. Resolución espacial de 250 m (Carroll et al., 2009).

Algunos de los productos anteriores están disponibles para los satélites TERRA y AQUA, mientras que otros sólo lo están para TERRA. Una relación completa de estos productos se encuentra en las tablas I.5 y I.7, del anejo I.2. La obtención de dichos productos se hace mediante la aplicación de diferentes metodologías y algoritmos, por lo que se agrupan en diferentes versiones, siendo la más actual la versión 005, lo que implica que puede ser utilizada en trabajos científicos publicables (Morissette et al., 2002; Justice et al., 2002).

Herramienta *MODIS Reprojection Tool*. Dado que los productos de MODIS se distribuyen divididos en teselas y en una proyección sinusoidal, en algunas ocasiones es necesario unir varias de ellas, así como cambiar la proyección, con el fin de obtener una cobertura completa de toda la región de interés. Concretamente, en el caso de la Península Ibérica, son necesarias cuatro de estas teselas (h17v04, h17v05, h18v04 y h18v05) para recubrir todo el territorio.

El *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) proporciona un conjunto de aplicaciones denominadas *MODIS Reprojection Tool* (MRT) que permite efectuar el mosaico de las diferentes teselas, la extracción de subescenas, así como el cambio de proyección, entre otras. El conjunto de aplicaciones, así como sus opciones, se encuentra documentado en (Land Processes DAAC USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, 2008).

Reflectividad superficial. MOD09GQ. Este producto proporciona una estimación de la reflectividad espectral al nivel del terreno, sin estar afectada por la dispersión y absorción atmosférica. Los algoritmos aplicados a los datos tomados por el sensor, así como los datos auxiliares necesarios para efectuar la corrección atmosférica están detallados por (Vermote and Vermeulen, 1999).

La reflectividad superficial se calcula para las bandas 1 y 2 de MODIS, con resolución de 250 m, y se distribuye en la proyección sinusoidal utilizada por

MODIS (*MODIS sinusoidal grid*), para la difusión de sus productos. Junto a la reflectividad de las dos bandas, se incluye información adicional sobre la calidad de los datos.

El producto se distribuye en la actualidad en su versión 5, lo que implica que sus características son bien conocidas, por lo que puede utilizarse en trabajos científicos.

El formato de distribución es por teselas con las características que se citan a continuación.

- Área cubierta: 10^0 x 10^0 en latitud y longitud.
- Dimensiones: 4800 x 4800 filas/columnas.
- Tamaño de archivo: 280 MB, aprox.
- Proyección: sinusoidal.
- Formato de fichero: HDF-EOS.
- Resolución espacial: 250 m.
- Capas de información (Vermote and Kotchenkova, 2008): ver Tabla I.9 del anejo I.

La calidad de la información hace referencia al grado de fiabilidad con el que se guarda la misma. Está almacenada en un número de 16 bit que codifica la información según una nomenclatura detallada en la Tabla I.10 del anejo I.

Reflectividad superficial. MOD09GA. Al igual que el producto MOD09GQ, el producto estándar MOD09GA nos proporciona la reflectividad espectral a nivel del terreno en las bandas 1 a 7 de MODIS, con una resolución espacial de 500 m y 1 km.

La distribución de los datos se hace en la proyección sinusoidal utilizada por MODIS (*MODIS sinusoidal grid*) para la difusión de sus productos. Junto a la reflectividad de las dos bandas, se incluye información adicional sobre la calidad de los datos.

El producto se distribuye en la actualidad en su versión 5, lo que implica que sus características son bien conocidas, por lo que puede utilizarse en trabajos científicos.

El formato de distribución es por teselas con las características que se citan a continuación.

- Área cubierta: $10^9 \times 10^9$ en latitud y longitud.
- Dimensiones: 1200 x 1200 filas/columnas.
- Tamaño de archivo: 85 MB, aproximadamente.
- Proyección: sinusoidal.
- Formato de fichero: HDF-EOS.
- Resolución espacial: 500 - 1000 m.
- Capas de información (Vermote and Kotchenkova, 2008): ver tablas I.12 y I.14, del anejo I.

La calidad de la información es una estimación del grado de fiabilidad con el que se almacena la misma. Está almacenada en un número de 16 bit, que codifica la información según lo indicado en la Tabla I.16, en el anejo I.

Los metadatos adicionales que se incluyen en el conjunto de la información, son los datos de georreferenciación (Tabla I.20, anejo I), así como información sobre los datos de 250 m de resolución espacial, que están comprendidos en cada celda de 500 m. Tabla I.21, anejo I), de acuerdo al siguiente esquema:

- 0 - Primera línea, primera columna.
- 1 - Primera línea, segunda columna.
- 2 - Segunda línea, primera columna.
- 3 - Segunda línea, segunda columna.

2.3. Estructura de la información.

El formato de almacenamiento y difusión de la información de partida depende de su propia naturaleza, así como del organismo productor y/o distribuidor.

En estos casos, es necesario diferenciar datos ráster, datos vectoriales o datos tabulares, cada uno con características definidas. En este sentido, es necesario destacar las ventajas que hemos destacado del formato HDF (*Hierarchical Data Format*), desarrollado por el *National Center for Supercomputing Applications* (NCSA), dependiente de la Universidad de Illinois. Este es el formato elegido por la NASA para distribuir los productos

procedentes del sensor MODIS, así como los TM y ETM+, por lo que se prestará especial atención a las características del mismo.

Dado que, generalmente, cada software de proceso utiliza unas estructuras de almacenamiento propias, es necesario asegurarse de que existe la posibilidad de adaptación entre el formato de los datos empleados y las estructuras de almacenamiento soportadas por la aplicación que se utilice.

2.3.1. Formato GeoTIFF.

Es un formato de almacenamiento de imágenes, adaptado a las particularidades de las imágenes georreferenciadas. Este formato consta de dos partes:

- Una parte TIFF (*Tagged-Image File Format*), coincidente con el formato TIFF estándar (Adobe Developers Association, 1992).
- Una parte *Geo*, que incluye la definición de campos propios para el almacenamiento de las referencias geográficas (Ritter and Ruth, 1995), así como los datos de proyección y dátum.

Las características principales de este formato son:

- Es un formato muy flexible, que se puede adaptar a diferentes propósitos.
- Se utiliza casi exclusivamente como formato de almacenamiento de imágenes sin pérdida y sin ninguna compresión, aunque permite algoritmos de compresión de imágenes sin pérdida (LZW).
- Los archivos suelen ocupar mucho espacio, en el caso de almacenamiento de imágenes procedentes de satélite.
- Las especificaciones están publicadas, por lo que puede ser implementado en cualquier programa gráfico.
- Las etiquetas en la región de cabecera del archivo permiten almacenar información acerca de las dimensiones de la imagen, la cantidad de colores utilizados y el tipo de compresión, así como información adicional.
- Puesto que el número de etiquetas o *tags* disponibles es muy amplio, no todas las aplicaciones las implementan, por lo que en los sucesivos procesos de apertura y guardado pueden perderse.

- En un archivo TIFF pueden almacenarse hasta tres capas de información, por lo que no puede ser utilizado para la difusión de datos multiespectrales, salvo que se utilice un archivo por cada banda (solución habitualmente empleada para la difusión de datos Landsat).

2.3.2. Formato *Fast Format*.

Es un formato de almacenamiento especialmente adaptado a las características de los datos procedentes de los sensores *Thematic Mapper* y *Enhanced Thematic Mapper*.

Es una estructura del tipo BSQ, de almacenamiento secuencial de bandas, junto con un archivo de cabecera, con información acerca de los datos almacenados. La estructura de este formato se encuentra detallada en Landsat Team (2007).

2.3.3. Archivos binarios genéricos.

Estas estructuras, generalmente, constan de un archivo de cabecera, de tipo texto, en el que se proporciona información acerca de los datos, tales como dimensiones, número de bandas, tipo de datos, información de referenciación, entre otros, junto con una serie de archivos binarios, que son los que almacenan los datos. Entre las múltiples estructuras de almacenamiento, las más comúnmente utilizadas son las de los siguientes tipos:

- BIP (*Band Interleaved by Pixel*): En ella, el almacenamiento se realiza intercalando los píxeles de cada una de las bandas espectrales, en orden.
- BIL (*Band Interleaved by Line*). En este tipo de archivos, se almacenan intercaladas las líneas/filas de cada banda, en orden secuencial.
- BSQ (*Band SeQuential*). Las bandas se almacenan una a continuación de otra, en el mismo archivo.

La ventaja de este tipo de estructuras, es que son muy flexibles, permitiendo su adaptación a múltiples tipos de información procedente de satélite o de otras fuentes de adquisición de datos.

Junto con el formato HDF, es el tipo de estructura utilizada en este trabajo, ya que es la soportada de forma nativa por la aplicación SovMap.

2.3.4. Archivos de imagen genéricos.

Junto con las estructuras propias desarrolladas específicamente con el fin de almacenar información multiespectral procedente de sensores espaciales, algunos tipos de datos pueden almacenarse en ficheros gráficos, con los formatos estándar de almacenamiento de imágenes más comúnmente empleados. Algunos de estos formatos son los siguientes:

- BMP (*Bitmap*). Es un archivo de almacenamiento de imágenes sin compresión ampliamente utilizada y soportada por diversas aplicaciones. Las especificaciones de este formato están publicadas (Prosise, 1994), por lo que puede ser implementado en aplicaciones específicas si bien, no está especialmente adaptado a las características de los datos manejados en este trabajo.
- JPEG (*Joint Photographic Experts Group*). Posiblemente, sea el formato de almacenamiento gráfico más extendido y prácticamente la totalidad de aplicaciones incorporan soporte para este formato. Es un formato de almacenamiento de imágenes con pérdidas, generalmente, lo que limita su utilización en el ámbito de la teledetección donde, de forma habitual, es preciso acceder a los datos originales, sin sufrir ningún tipo de modificación. Tiene la ventaja de que los archivos resultantes son de tamaño reducido, lo que facilita su difusión. Este es el formato elegido en este trabajo para la presentación de los resultados en la página web creada al efecto. Las especificaciones de este formato, también están publicadas (Hamilton, 1992), lo que permite el desarrollo de aplicaciones que implementen soporte para esta estructura. La última versión, JPEG2000 (Skodras et al., 2001), incorporan la opción de compresión sin pérdidas, pero aún no está muy extendida su utilización.
- PNG (*Portable Network Graphics*). Constituye la alternativa libre al formato GIF, ampliamente utilizado para la difusión de imágenes de 256 colores. Las ventajas sobre este, es que permite almacenar imágenes en color verdadero (RGB) así como la compresión sin pérdida de los datos contenidos, lo que reduce el tamaño del archivo resultante. Además, permite la definición de regiones “transparentes”, lo que le dota de mayor versatilidad de cara a la presentación de resultados.

2.3.5. Otros formatos.

Los formatos de almacenamiento enunciados anteriormente, son los más utilizados por las agencias distribuidoras de datos adquiridos mediante sensores espaciales, así como los más utilizados para la difusión y presentación de resultados. Ello, no obstante, no evita que existan numerosas estructuras de almacenamiento más o menos específicas, que son usadas para la distribución de algún producto o conjunto de datos. Entre ellos, podemos encontrar los siguientes:

- Estructuras ASCII, para almacenamiento de datos tabulares, principalmente.
- DIMAP (Bally et al., 2000), utilizado por la compañía *Spot Image* para la distribución de los datos adquiridos por el satélite Spot5.
- Mr.SID, el cual se trata de un formato diseñado, inicialmente, para la difusión de imágenes tomadas por cámaras aéreas y que ha sido utilizado para la difusión de mosaicos de imágenes Landsat por la NASA.
- LRIT/HRIT (Wolf and Just, 1999), utilizado por EUMETSAT para la difusión de los datos procedentes del satélite *Meteosat Second Generation 2* (MSG-2).
- HDF The HDF Group (2008), empleado para la difusión de datos y productos procedentes del sensor MODIS, así como por diversos organismos, para el intercambio de información de tipo ráster, vectorial y tabular. Por la importancia que dicha estructura presenta en el ámbito de este trabajo, sus características se detallan en el apartado 2.3.6.

No todos los formatos empleados, son libres o tienen publicadas sus especificaciones, por lo que la utilización de algunos de ellos, quedará condicionada a la disponibilidad de herramientas que permitan extraer la información contenida en ellos y convertirla a otros formatos más estandarizados. En este trabajo, se ha evitado, en la medida de lo posible, la utilización de estos formatos propietarios, pues consideramos que limita el ámbito de aplicabilidad de la información almacenada en estas estructuras.

2.3.6. Formato HDF.

Los científicos generan y procesan archivos de datos en múltiples equipos, empleando diferentes softwares y compartiendo esos datos con otras personas

que utilizan otros equipos con otros softwares. También, es posible que se necesite incluir varios tipos diferentes de datos en un mismo archivos, tales como imágenes, tablas, metadatos, etc.

Con la aparición del formato HDF, se resuelven estos problemas, ya que este formato proporciona una estructura de archivo de propósito general (Fortner, 1998) que:

- Permite obtener información acerca de los datos de un archivo desde dentro de ese archivos, sin necesidad de recurrir a fuentes externas.
- Permite almacenar datos de distinta naturaleza en un mismo archivo y relacionarlos entre ellos.
- Estandariza los formatos y las descripciones de los tipos de datos más comúnmente empleados.
- Al ser un formato abierto, permite que sea implementado en múltiples paquetes de software, por lo que la portabilidad aumenta.
- Es flexible y puede ser adaptado para almacenar cualquier tipo de dato.

2.3.6.1. Historia:

El proyecto para desarrollar el formato HDF comenzó en el año 1988 en la NCSA como respuesta a la necesidad de almacenar y distribuir datos científicos de diversa naturaleza en un formato estándar independiente de la plataforma.

Con estos propósitos, el proyecto se desarrolló rápidamente, siendo en la actualidad múltiples organismos públicos y privados los que distribuyen sus datos en este formato. Entre ellos, la NASA, en varios de sus programas de Observación Terrestre, *EOS*, (Ullman, 1999), NOAA, el USGS, departamentos de universidades de todo el mundo, etc.

Además, dada la amplia difusión, es de esperar que su uso vaya en aumento, por lo que se puede considerar un estándar de almacenamiento de información procedente de satélite o multipropósito (Folk et al., 1999).

2.3.6.2. Descripción del formato HDF:

El formato HDF soporta las siguientes estructuras de datos (Figura 2.4):

- Scientific Data Sets (SD), utilizados para almacenar matrices n-dimensionales de datos enteros (8, 16 o 32 bits) o decimales (32 o 64 bits) en su formato estándar, o por medio de las APIs, crear datos en otros

2.3. Estructura de la información.

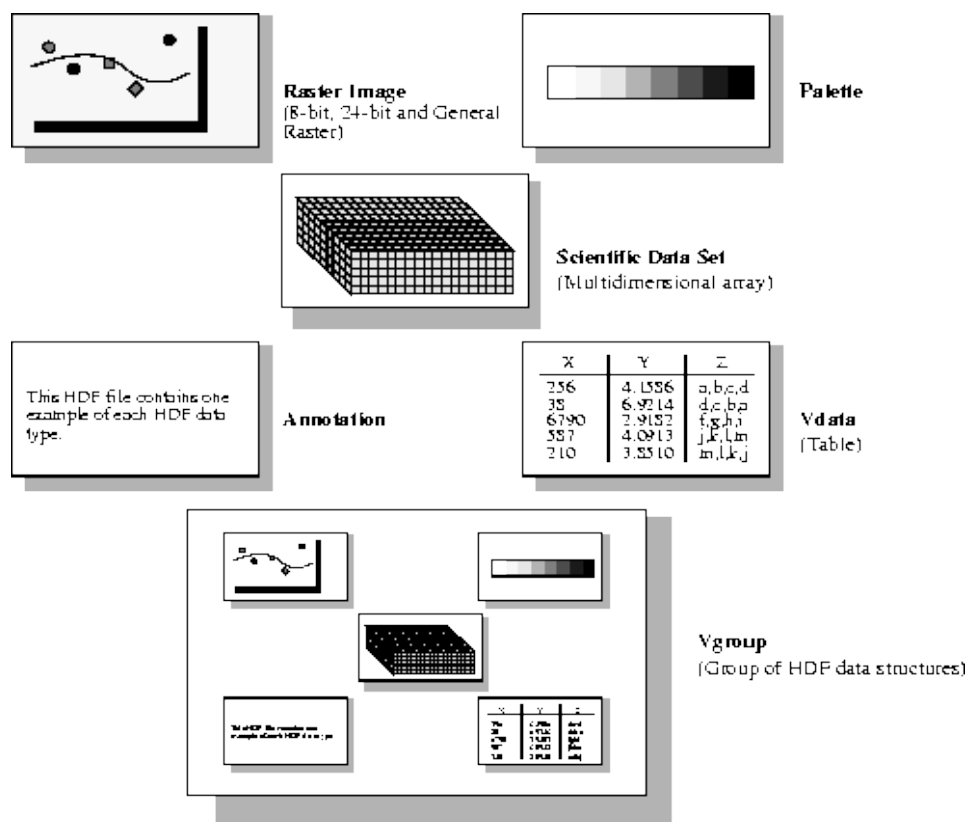


Figura 2.4: Tipos de datos soportados por el formato HDF. (Imagen: The HDF Group).

rangos de valores (1 a 32 bits), junto con sus metadatos (dimensiones de la matriz, atributos, etc.).

- Raster Images (RI), que permiten almacenar imágenes de 8 bits (0-255 niveles) o 24 bits (en formato RGB), o bien utilizar nuevamente las librerías de programación para guardar imágenes en otros formatos (16 a 32 bits enteros, 32 a 64 bits coma flotante). Además se permite almacenar en cualquiera de los formatos anteriores, información sobre las dimensiones de la imagen, así como una paleta de color asociada a ella. También es posible utilizar compresión (RLE, JPEG, GZIP y adaptativa Huffman) para reducir el tamaño de los archivos resultantes.
- Text Annotations (TA), para almacenar cualquier tipo de información textual: Etiquetas, descripciones o información de archivo.
- VDatas y VGroups (VD y VG), que nos permite asociar datos relacionados dentro de un archivo.

La organización de los archivos, así como la definición de estructuras, se encuentran documentadas por The HDF Group (2008), The HDF Group (2010b) y The HDF Group (2010a), mientras que las especificaciones y características particulares del formato, para su adaptación a los datos procedentes del programa EOS han sido detalladas por Demcsak (1997) y Wynne et al. (1997).

2.3.6.3. Organización interna de los datos:

Un fichero HDF consta de las siguientes partes: Encabezado, bloque de descripción de datos, formado por los descriptores de los datos y los datos propiamente dichos, como se muestra en la Figura 2.7.

La organización a nivel binario de estos elementos dentro del archivo es la siguiente:

- Encabezado: Ocupa los cuatro primeros bits e identifica a un archivo como HDF. Su valor es siempre el mismo: $\text{N}^{\wedge}\text{C}^{\wedge}\text{S}^{\wedge}\text{A}$ (valor hexadecimal 0x0E031301).
- Bloque de descripción de los datos (Figura 2.5): Está formado por los descriptores de los datos contenidos en el archivo. Se almacena en disco como dos valores: el primero, de 16 bits, que indica el número de descriptores de datos, y el segundo, de 32 bits, que define el offset del primer descriptor de datos, seguido de los descriptores de datos propiamente dichos.

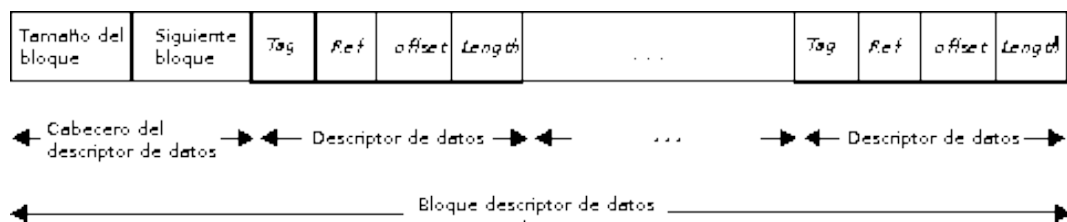


Figura 2.5: Bloque de descripción de datos. (Imagen: The HDF Group).

- Descriptores de datos (Figura 2.6): Describen el tipo y la localización de los datos contenidos en el archivo. Está formado por una *tag* de 16 bits, un *id* de 16 bits, el *data offset* de 32 bits y *data length*, también de 32 bits. La *tag* (etiqueta) define el tipo de datos almacenado de acuerdo a un código establecido por la NCSA, el *id* (identificador) es un número

secuencial que determina de forma unívoca a cada elemento, el *data offset* fija el offset (desplazamiento) del primer elemento del conjunto de datos con respecto al comienzo del archivo y el *data length* indica el tamaño de ese conjunto de datos.

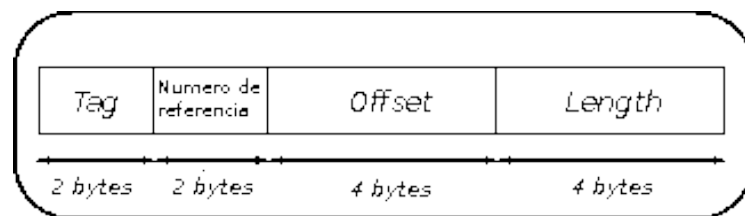


Figura 2.6: Descriptor de datos. (Adaptada de The HDF Group).

- Datos: Almacenados a continuación del último descriptor de datos, se almacenan en el formato adecuado según el tipo de datos de que se trate, siguiendo un esquema similar al mostrado en la Figura 2.7.

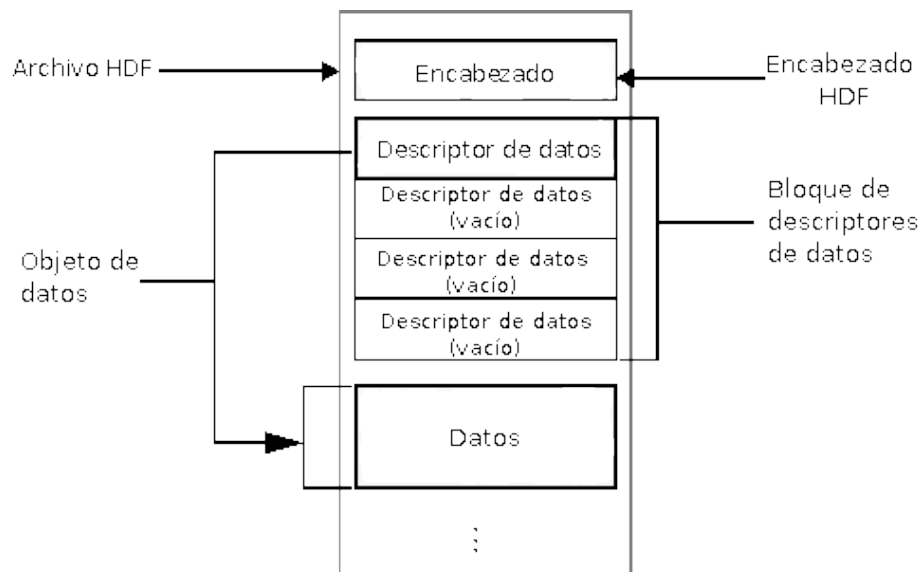


Figura 2.7: Organización interna de los datos en un archivo HDF.

2.3.7. El modelo de datos de SOV:

El programa SOV, desarrollado por el profesor Santiago Ormeño, de la Universidad Politécnica de Madrid, es una aplicación de análisis raster orientada a la Teledetección y la Fotogrametría que permite trabajar con imágenes mono y multibanda.

Los tipos de datos que nos interesan en este trabajo se organizan en el programa SOV del siguiente modo:

- Archivos raster: Están formados por un fichero ASCII con extensión *orc* en el que se incluyen los datos de la imagen tales como descripción, dimensiones, sensor, tipo de datos, número de bandas, nombre del archivo que contiene cada banda y coordenadas. Los archivos que contienen los datos de la imagen (uno por banda) con extensión *raw*, en formato binario. En el caso de tener asociada una paleta de color, ésta se almacena en un archivo del mismo nombre que el *orc* y con extensión *pal*, binario con 256 entradas de 3 bytes de forma que cada tripleta de valores define una tripleta RGB.
- Tablas de atributos: Están formadas por un fichero ASCII con extensión *smp* que contiene las dimensiones de la tabla, así como los datos de la misma.
- Datos vectoriales: Se almacenan en un archivo de tipo ASCII, con extensión *dbv*, en el que es posible almacenar datos de tipo punto, polilínea y polígono cerrado, sin topología.

2.3.8. Conversión de datos entre SOV y el formato HDF:

El conjunto de aplicaciones desarrolladas en este trabajo, están basadas en las estructuras de datos utilizadas por el programa SOV, mencionado anteriormente. Por ello, dado que los datos de MODIS y, en menor medida los de TM y ETM+, se distribuyen en formato HDF, es necesario convertirlos previamente al formato propio de la aplicación. Del mismo modo, puede resultar de interés para la difusión posterior de resultados, la adopción de las estructuras disponibles en los archivos HDF. Por ello, se han desarrollado algunas aplicaciones que facilitan estas conversiones (Palomo Arroyo, 2006).

2.3.8.1. Conversión SOV->HDF:

Como vimos en el apartado anterior, los datos que nos interesa exportar desde SOV al formato HDF son las imágenes raster y las tablas de atributos.

Las imágenes raster se almacenan en un archivo HDF a través del *General Raster Data Model*. El hecho de no utilizar los tipos predefinidos RI-8 o RI-24 de almacenamiento de imágenes raster de 8 bits o de 24 bits, es debido a que

SOV puede trabajar con imágenes de 8 y 16 bits de enteros, y de 32 bits en coma flotante, tal como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Tipos de datos de imagen en SOV.

Nombre	Nº de bytes	Descripción
BYTE	1	Enteros de 0 - 255
INTEGER	2	Enteros de -32767 - 32768
REAL	4	Números en coma flotante

Los datos que necesitamos para almacenar una imagen en formato HDF son:

- Nombre: Es una cadena de texto que nos permite identificar rápidamente a una imagen dentro de un archivo.
- Dimensiones: Columnas y filas de la misma.
- Tipo de píxel: Número de bytes que ocupa en memoria cada píxel.
- Datos de imagen: Es la imagen propiamente dicha.
- Paleta (opcional): Paleta asociada a la imagen. Dado que HDF tiene una limitación en cuanto a paletas de color, ésta sólo puede asociarse a una imagen de 256 niveles (8 bits).

Todos los datos anteriores los podemos obtener del fichero *orc*, del *raw* y del *pal*.

Para guardar las imágenes se puede escribir directamente en disco, siguiendo las pautas del apartado 2.3.6.3 o bien utilizar las funciones de la librería desarrollada por la NCSA, e incluirlas en nuestra aplicación. En este trabajo se ha seguido esta segunda opción, por ser mucho más sencillo que escribir los datos directamente en disco.

Las tablas de atributos tienen su equivalente en el formato HDF en los *Scientific Datasets* (SD), por lo que procederemos a leer el fichero con extensión *smp* y a almacenar los siguientes datos empleando nuevamente las funciones de la librería:

- Matriz de datos, con los valores que se van a almacenar.
- Nombre.
- Tipo de datos que almacenamos.

- Dimensiones.
- Atributos (opcionales): Unidades, escalas, rango, sistema de coordenadas, etc.

2.3.8.2. Conversión HDF->SOV:

Este paso es más complicado que el anterior, ya que todas las estructuras de datos de SOV están soportadas por el formato HDF, pero no sucede lo mismo al contrario.

Lo más sencillo es utilizar nuevamente las funciones de la librería para extraer sólo los tipos de datos que nos interesan. Estos datos serán imágenes raster (RI) y tablas de atributos (SD).

Con ello, lo que conseguimos es generar el archivo *orc* de descripción así como el *raw* con los datos de cada una de las bandas (tantas como imágenes contenga el HDF), o el *smp*, uno por cada SD del fichero.

En el proceso de extracción de imágenes se puede producir algún tipo de pérdida de información, ya que los ficheros HDF pueden almacenar una paleta con cada imagen, no siendo posible en SOV, que todas las bandas de la misma imagen tienen la misma paleta asociada. Este inconveniente se podría resolver extrayendo cada imagen por separado, creando tantos *orc* como imágenes contenga el HDF, cada uno con su paleta asociada.

2.4. Equipos informáticos.

Para la realización de los ensayos oportunos, así como para la posible implementación del modelo, no se requieren equipos informáticos de características especiales, pudiendo ser utilizado cualquier ordenador de tipo PC, cuyos requisitos mínimos sean los siguientes:

- Procesador *AMD* o *Intel*, de 1.5 MHz o superior.
- 1 Gb de memoria RAM.
- 10 Gb de almacenamiento en disco.
- Sistema operativo *Windows* o *Linux*.
- Conexión a internet de alta velocidad.

Por otro lado, el software específico que se requiere es el siguiente:

- Aplicación *SovMap*, de proceso de datos de satélite. Esta aplicación, constituye el germen de partida de las aquí desarrolladas, que se integran con ella, adoptando sus estructuras de almacenamiento y dotándola de mayores funcionalidades.
- Compilador de C/C++ (*Code::Blocks*), el cual permite el desarrollo de aplicaciones multiplataforma con interface gráfica, utilizando el lenguaje de programación C++.
- Herramientas genéricas de visualización y manipulación de archivos HDF, provenientes de MODIS (*HDFView*), que nos permitirán examinar, de forma preliminar, los contenidos de los archivos, así como efectuar labores de preproceso elementales.

Se ha optado, en la medida de lo posible por la utilización de aplicaciones de software libre, lo que facilita el desarrollo de las mismas, así como su posible distribución posterior, al no requerir licencias de uso. Por otro lado, el hecho de que solamente se utilice el ordenador en el momento de la descarga y del cálculo, almacenándose los resultados en un servidor externo, facilita la portabilidad de las aplicaciones, ya que pueden ejecutarse en prácticamente cualquier ordenador con conexión a internet.

2.5. Resumen.

Como resumen, podemos destacar que:

- Las características de los sensores TM/ETM+ y MODIS se adaptan a los fines perseguidos en este trabajo, pudiendo, por tanto, servir como fuente de datos multiespectrales cada uno de ellos, con sus limitaciones en cuanto a criterios de resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica se refiere.
- Los productos estándar MOD09GA, reflectividad superficial 500 m y MOD09GQ, reflectividad superficial 250 m, pueden ser utilizados como datos de entrada en el proceso de obtención de múltiples índices y parámetros biofísicos.
- Dado que el formato HDF es un formato abierto, es relativamente sencillo desarrollar pequeñas aplicaciones que permitan importar o exportar datos de éste a cualquier otro que soporte el programa de

modelización y teledetección que utilicemos habitualmente. El proceso se limita a identificar las estructuras de datos que soporta nuestra aplicación, así como su correspondencia con la estructuras definidas en el formato HDF. Una vez hecho esto, se llama desde el código de nuestra aplicación de conversión de formatos a las funciones desarrolladas por la NCSA, incluidas en una librería que es posible descargar libremente (<http://hdf.ncsa.uiuc.edu/>).

- El cálculo de parámetros ambientales de forma automatizada, no requiere de equipos informáticos especiales, siempre que el ámbito de aplicación esté restringido a una extensión territorial contenida (tal como territorios nacionales).

Capítulo 3

PROPUESTA DE UN MODELO TEÓRICO ADAPTADO A UNA ESCALA REGIONAL.

3.1. Objetivos parciales.

Los objetivos que se pretenden alcanzar en este capítulo son:

1. Establecer la estructura general de un modelo que permita la obtención de determinados parámetros biofísicos e indicadores ambientales, a partir de información multiespectral procedente de satélite y otros datos auxiliares.
2. Describir los subsistemas que integran el modelo general y sus interrelaciones.
3. Establecer las especificaciones técnicas que debe cumplir dicho modelo de obtención.
4. Realizar un análisis comparativo con otros sistemas similares, que estén operativos actualmente.

3.2. Descripción sintética.

El proceso de obtención de variables ambientales a partir del sensor MODIS, se puede definir de forma esquemática, como una sucesión de módulos independientes, cada uno de ellos con una función definida.

A grandes rasgos, estos módulos serían los siguientes:

- Descarga de la información procedente del sensor MODIS.
- Descarga de los posibles datos auxiliares, necesarios en el proceso.
- Preproceso de los datos, para adaptarlos al software de trabajo.
- Proceso de los datos y obtención de resultados.
- Difusión de los resultados.

El esquema general del modelo propuesto se muestra en la Figura 3.1. El flujo de procesos comienza en la parte superior y, dependiendo del conjunto de datos empleado, así como de los productos que se desean obtener, no todos los procedimientos y caminos son aplicables.

3.3. Subsistemas fundamentales.

3.3.1. Descarga de datos de sensores espaciales.

El primer paso es proceder a la descarga de los datos procedentes de los sensores espaciales seleccionados, en este caso MODIS y TM. El esquema del procedimiento es el que se muestra en las figuras 3.2 y 3.3.

Este paso previo, requiere conocer la dirección de los datos, en los servidores remotos en los que están almacenados, así como disponer de una conexión a internet, para proceder a la descarga de los mismos. En algunos casos, el acceso a estos servidores se lleva a cabo mediante un acceso seguro, siendo necesario proporcionar un nombre de usuario y una contraseña, por lo que, previamente, deberemos disponer de una cuenta en el mismo que nos permita establecer la conexión. Una vez determinada la estructura de directorios del servidor, así como de nombres de los archivos, es posible proceder a la descarga y almacenamiento, en el equipo local, de los datos necesarios para ser utilizados en los procesos posteriores.

3.3.2. Conversión de formatos.

En este proceso, se llevan a cabo las operaciones necesarias para transformar el formato empleado en la difusión de los datos adquiridos por los sensores empleados, al formato utilizado por el software de proceso (Figura

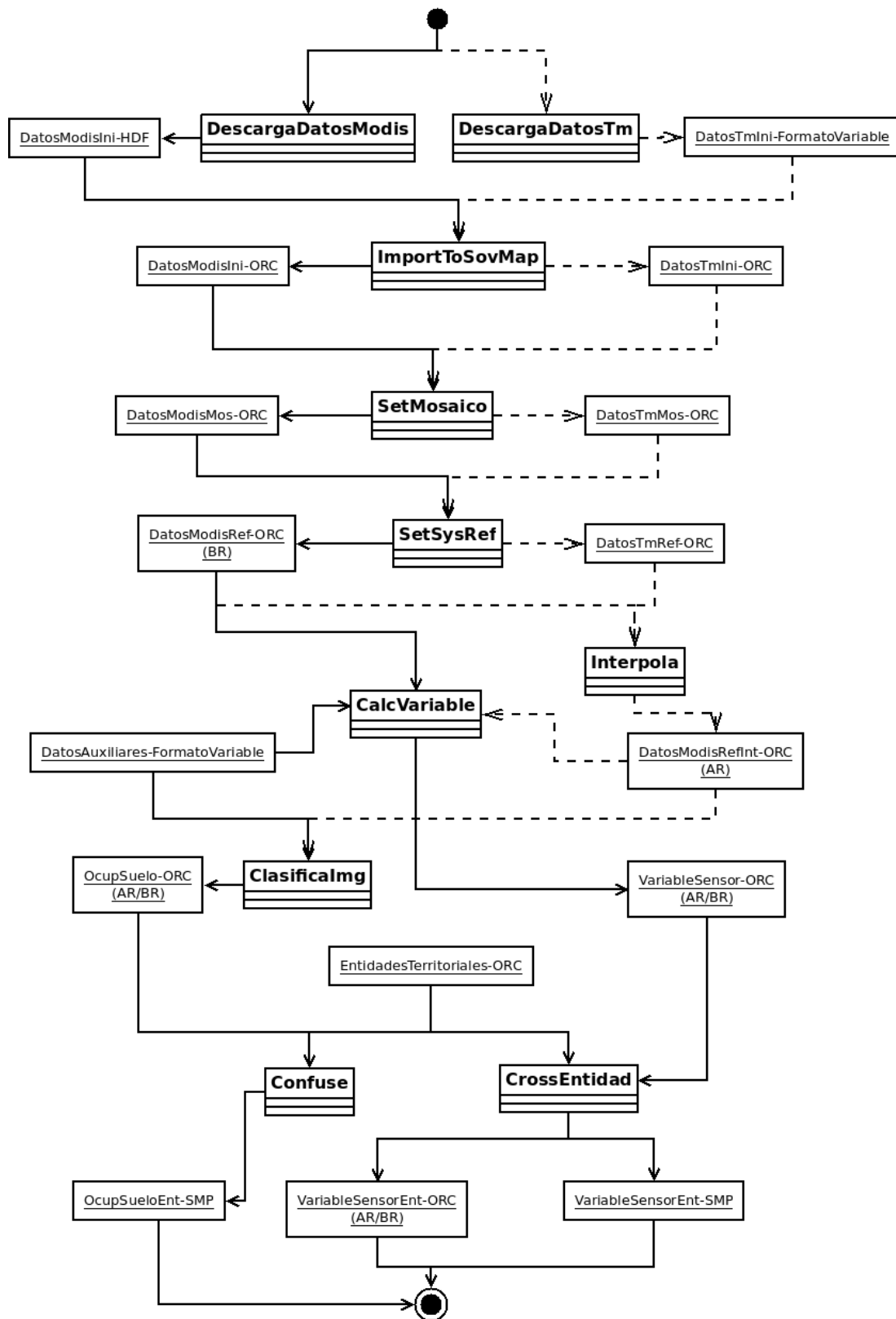


Figura 3.1: Esquema general del modelo. Dependiendo del origen de los datos, el flujo de procesos discurrirá por uno u otro camino.

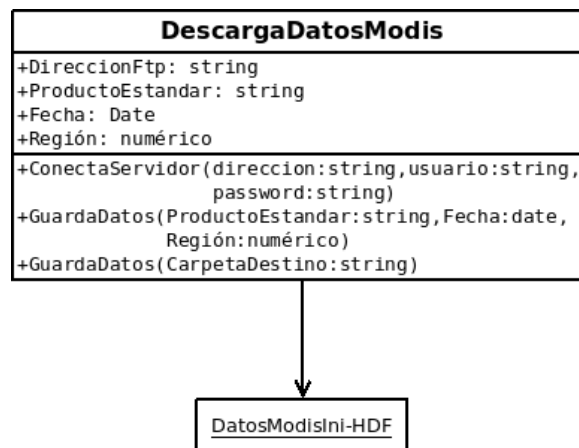


Figura 3.2: Estructura del módulo de descarga de datos (MODIS).

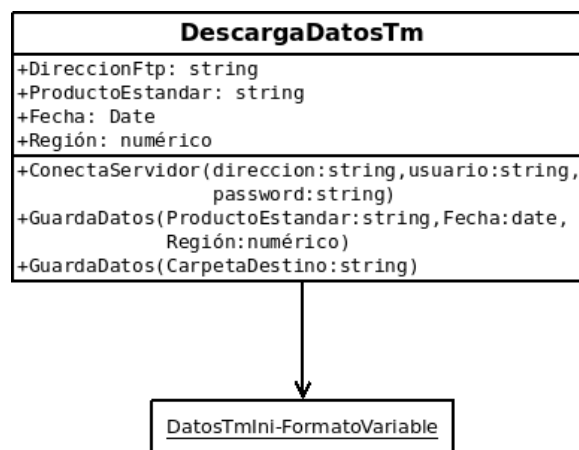


Figura 3.3: Estructura del módulo de descarga de datos (TM/ETM+).

3.4). Es proceso podría omitirse en el caso de que los datos a utilizar coincidieran con el formato nativo de la aplicación, lo cuál, generalmente, no suele suceder.

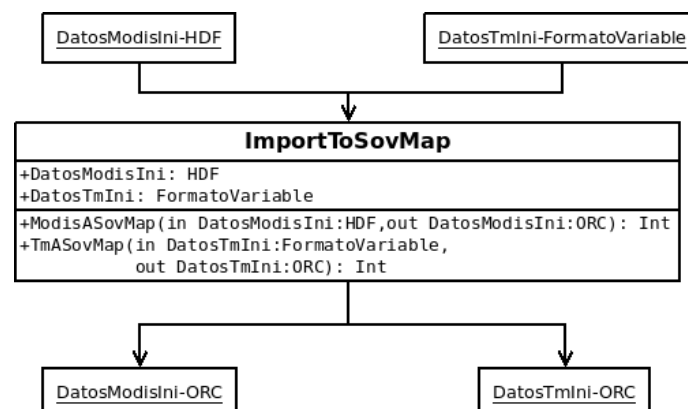


Figura 3.4: Estructura del módulo de conversión de formatos. De HDF al específico de la aplicación.

Dependiendo del origen de los datos, el formato es variable. En este trabajo, se han considerado como formatos de los datos de entrada el HDF para los datos procedentes de MODIS y, en ocasiones, de TM/ETM+ y el formato TIFF o binario genérico para los datos TM/ETM+. Como formato de salida, dado que los procesos posteriores se llevarán a cabo con aplicaciones compatibles con la aplicación SovMap, se ha elegido la estructura formada por un archivo de cabecera, con extensión ORC y un conjunto de archivos binarios con extensión RAW, que almacenan los datos descargados.

3.3.3. Obtención de variables de base.

Para la obtención de variables de base, es necesario definir dos caminos claramente diferenciados, según el tipo de información derivada que se quiera obtener. Por un lado se encuentran las variables cuantitativas y por otro, las cualitativas. En el primer grupo (Figura 3.5), se enmarcan los parámetros e índices enunciados en el apartado 1.3.2, mientras que en el segundo se encuentran los documentos de ocupación de suelo (Figura 3.6).

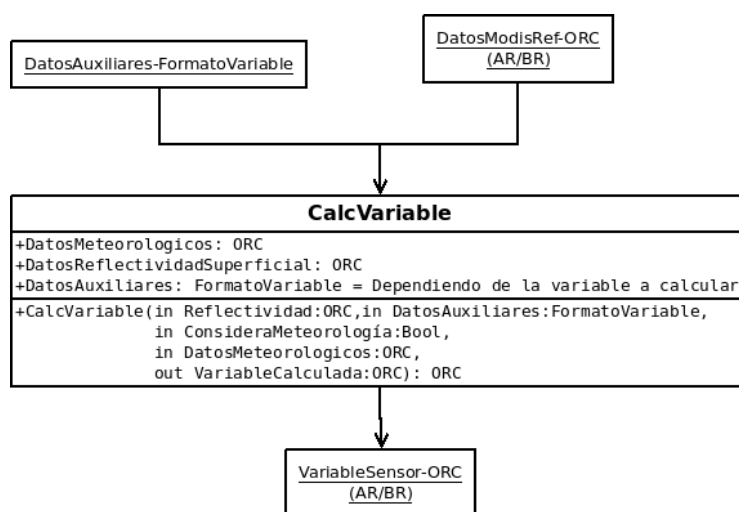


Figura 3.5: Estructura del módulo de obtención documentos cuantitativos (índices).

El procedimiento que debe seguirse en la obtención de documentos cuantitativos derivados de datos MODIS, es el reflejado en la Figura 3.7, en el que se muestra el esquema particularizado para la obtención de diversos índices cuantitativos, como los descritos en el apartado 1.3.2.

El módulo *CalculadoraDeBandas* deberá ser flexible, para adaptarse a las distintas operaciones que son necesarias para la obtención del mayor número posible de parámetros, con el fin de que la aplicación sea lo más versátil posible.

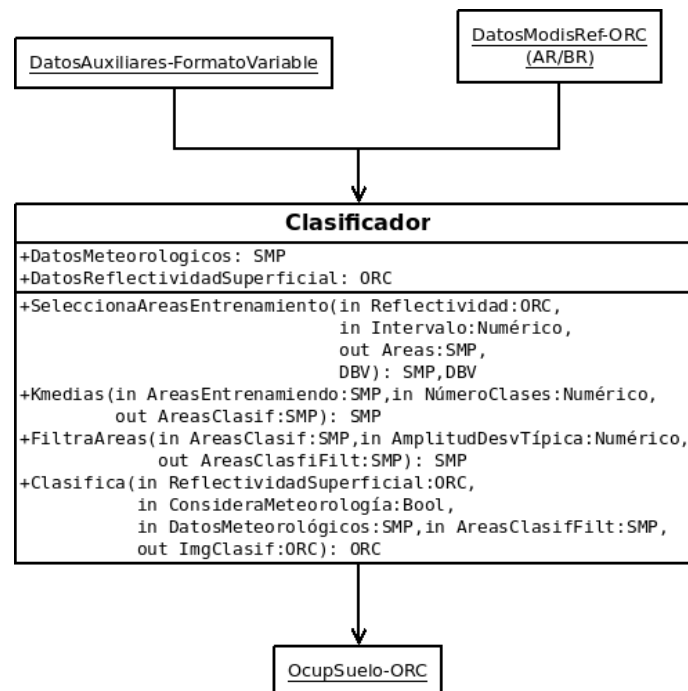


Figura 3.6: Estructura del módulo de obtención documentos cualitativos (ocupación del suelo).

Para ello, la solución más favorable es la basada en un sistema programable, que permita la manipulación de datos ráster y la realización de operaciones aritméticas y lógicas, así como de análisis ráster, con las capas de datos de entrada, previamente seleccionadas por el usuario.

3.3.4. Obtención de documentos temáticos derivados.

Partiendo de los documentos de base, cuantitativos o cualitativos, puede efectuarse un análisis espacial con el fin de obtener ciertos documentos temáticos derivados de los anteriores.

Se ha constatado que el análisis territorial es fundamental en el proceso de obtención de ciertos indicadores ambientales, pues éstos han de estar referidos a entidades territoriales, tales como los términos municipales, comarcas, etc.

Para efectuar este análisis, se ha de contar con la capa de entidades territoriales, en formato ráster, y con la misma resolución espacial que los documentos derivados de MODIS.

Así, según se trate de documentos cualitativos o cuantitativos, se obtendrán diferentes resultados, tales como porcentajes de ocupación de cada una de las clases presentes, en el caso de documentos cualitativos (Figura 3.8), o bien,

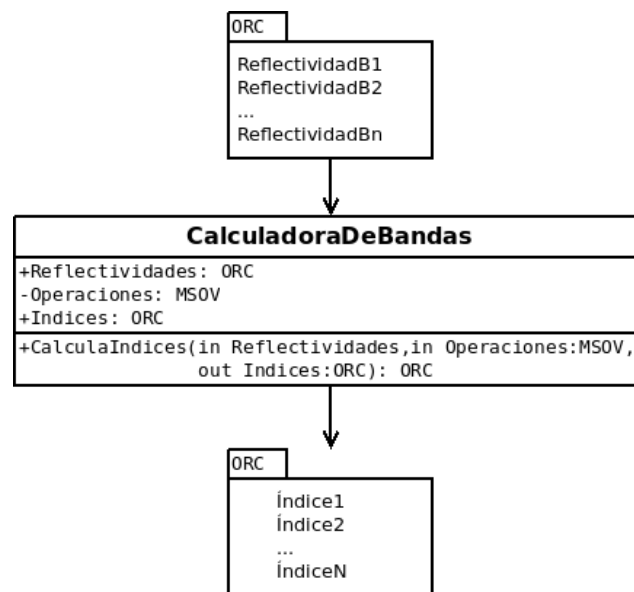


Figura 3.7: Modelización de la obtención de índices cuantitativos, a partir de sus expresiones, mediante operaciones aritmético-lógicas con las bandas de información.

valores medios de ciertos parámetros en cada término municipal, en el caso de documentos cuantitativos (Figura 3.9).

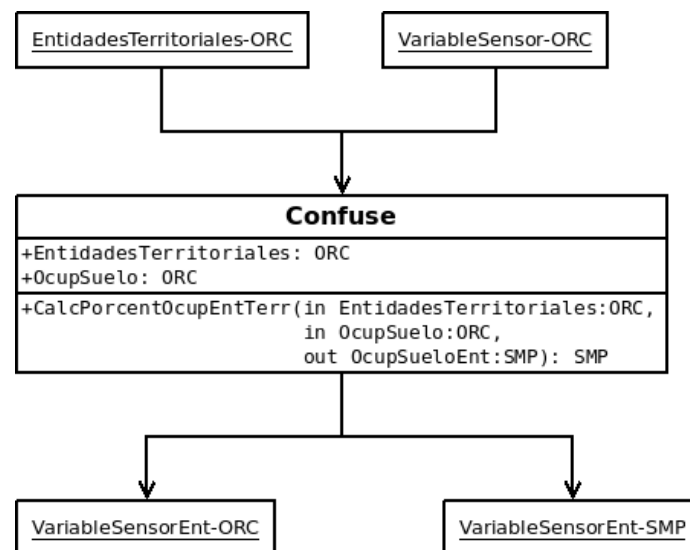


Figura 3.8: Estructura del módulo de obtención de documentos derivados de resultados de tipo cualitativo (porcentajes de ocupación).

En el caso de tratarse de documentos cualitativos (clasificados), la salida será del tipo “porcentaje de ocupación de cada entidad por cada clase”, mientras que el caso de documentos cuantitativos (índices), se devolverá un valor medio del parámetro en la entidad.

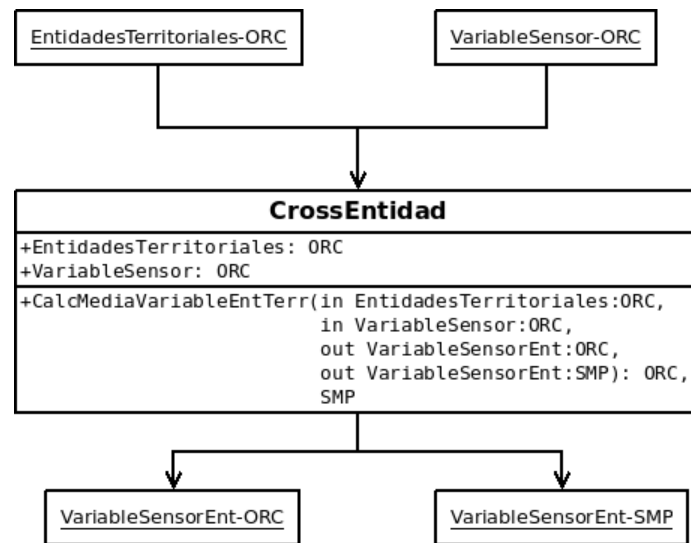


Figura 3.9: Estructura del módulo de obtención de documentos derivados de resultados cuantitativos (valores medios por entidad territorial).

3.3.5. Presentación y difusión de resultados.

Como fase final del proceso, se hace necesario difundir y presentar los resultados. Dada la prevalencia de internet sobre otros canales de difusión, se ha optado por adoptarla como estándar de presentación de resultados.

El módulo encargado de presentar los resultados deberá ser, por tanto, capaz de modificar el formato de los resultados obtenidos en los procesos previos, generalmente ORC+RAW a un formato compatible con los estándares de presentación de imágenes en la web (por ejemplo, JPG), así como conectar con los servidores de almacenamiento remotos, en los que se alojarán dichas imágenes. El esquema del procedimiento correspondería con el mostrado en la Figura 3.10.

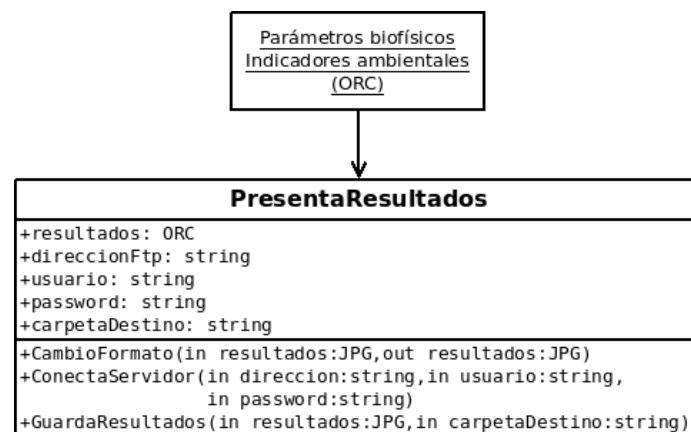


Figura 3.10: Estructura del módulo de presentación de resultados.

Las opciones que tenemos de presentación, son diversas, ya que existen estructuras y aplicaciones específicamente adaptadas a estos fines. Dado que uno de los fines perseguidos en esta tesis es trabajar con estructuras y modelos de datos lo más estandarizados posibles, las opciones de visualización pasan por las aplicaciones desarrolladas con estos fines. Unas de estas aplicaciones, son los conocidos como *Web Map Server* (WMS), Servidor de Mapas en Red, los cuáles permiten visualizar y componer mapas, a petición del usuario, a partir de documentos cartográficos alojados en servidores remotos, a través del navegador, o bien descargando una aplicación que debe ejecutarse desde el equipo del cliente. Dado que esta opción presenta algunos inconvenientes, como pueden ser los problemas de compatibilidad e integración de los distintos clientes del visualizador de mapas, con los navegadores de internet disponibles en el mercado, debe elegirse una solución que evite estos inconvenientes.

La solución adoptada en este trabajo pasa por utilizar la aplicación de visualización de mapas de Google, Google Maps API v3, la cuál consta de un conjunto de funciones que permiten superponer a la cartografía de base, diferentes capas de tipo vectorial y ráster, en el que se encuentran los documentos obtenidos en los procesos de cálculo previos y que pueden ser adaptadas a nuestras necesidades.

Para efectuar la presentación de resultados al usuario, el visualizador de Google Maps, se integra perfectamente en los navegadores de internet de uso mayoritario (Mozilla Firefox, Internet Explorer, Google Chrome y Opera, entre otros), sin necesidad de descargar ningún tipo de complemento.

El acceso a los resultados, se integra en una página web, en formato html estándar, en el que se realiza la llamada al visor cartográfico, incluyendo el código mostrado en el Algoritmo 3.1, al comienzo del archivo.

Listado 3.1 Inicialización de la API de Google Maps en el archivo html.

```
<script type="text/javascript"
src="http://maps.google.com/maps/api/js?sensor=false">
</script>
```

Una vez hecho esto, la aplicación del visualizador de mapas está lista para ser utilizada sin más que efectuar las llamadas a las funciones predefinidas en la aplicación y que se encuentran documentadas en diversas publicaciones (Svennerberg, 2010; Purvis et al., 2006; Brown, 2006).

Por otro lado, además de las funciones básicas disponibles en la aplicación, en su versión 3, es posible diseñar nuevas funciones utilizando diversos

lenguajes de programación orientados a internet, como pueden ser PHP o JavaScript, que realicen las operaciones con las capas de resultados, con el fin de integrarlas en el visor.

Para nuestra aplicación, se han diseñado una serie de funciones que permiten seleccionar la capa de datos que se va a mostrar, así como un control de transparencia, que permite visualizar la base cartográfica, bajo la capa temática seleccionada, la cuál puede ser elegida a través de un control desplegable del tipo *ComboBox*, con aspecto similar al que se muestra en la Figura 3.11.

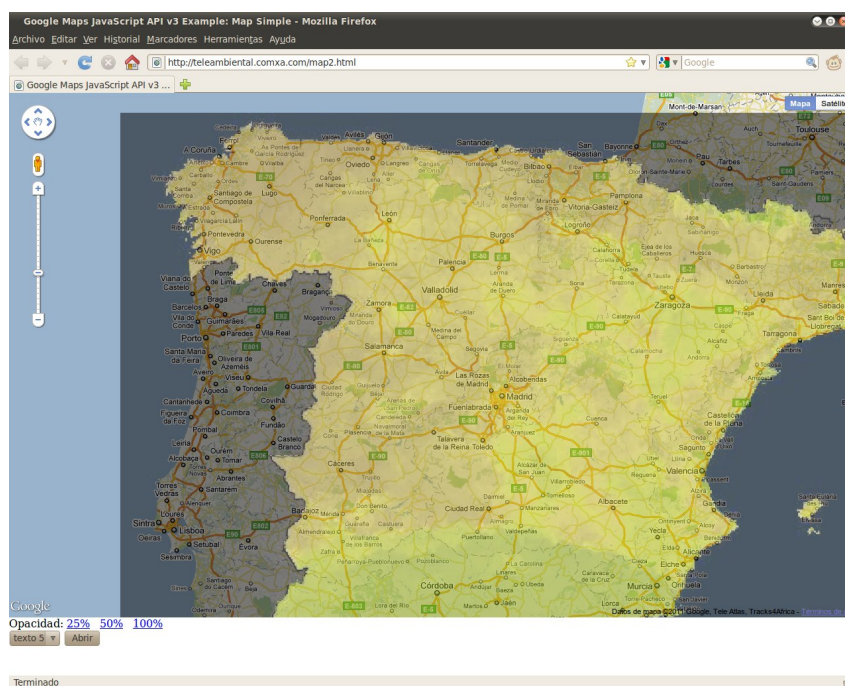


Figura 3.11: Vista de la interface de acceso a los resultados. Las capas temáticas obtenidas, se superponen a la base cartográfica proporcionada por GoogleMaps.

La ventaja principal de esta solución frente a otras, es que su implementación es más sencilla, ya que podemos controlar todos los parámetros del equipo encargado de la realización de los cálculos, en lo relativo a características del procesador, memoria disponible, capacidad de los discos duros o sistema operativo, entre otros, ya que todos los programas necesarios para efectuar los procesos de descarga de datos, procesado y posterior obtención de resultados, pueden almacenarse y ejecutarse en cualquier máquina, siempre que cumpla unos requerimientos mínimos en cuanto a potencia de cálculo, si bien prácticamente cualquier equipo de sobremesa o portátil actual los supera. Una vez obtenidos los resultados deseados, este

mismo equipo se encargará, a través de una conexión de red, de actualizar los archivos del servidor remoto, que aloja solamente la interface de la página web y las imágenes ráster con las distintas informaciones temáticas. De esta forma, se protege el contenido del equipo principal, encargado de alojar todos los programas necesarios, al no necesitar estar conectado a la red más que en el momento de actualizar los archivos remotos.

3.4. Subsistemas complementarios.

3.4.1. Generación de mosaicos y recorte de imágenes.

En el caso de que el área de trabajo se extienda por más de una escena, como puede ser al trabajar en regiones extensas, o debido a que, según la división de los datos por regiones, por parte de las agencias (tal como sucede en el caso de los datos procedentes de MODIS), previamente a la realización de los cálculos, sería necesario efectuar un proceso de generación de mosaicos, con el fin de unir las diferentes teselas de datos descargados. Del mismo modo, si el área de estudio fuese menor que una escena, es imperativo el realizar un recorte, para minimizar el volumen de información procesada, con el fin de reducir los tiempos de cálculo y las necesidades de almacenamiento. El módulo encargado de llevar a cabo estas funciones, deberá ser capaz de realizar las tareas mostradas en la Figura 3.12.

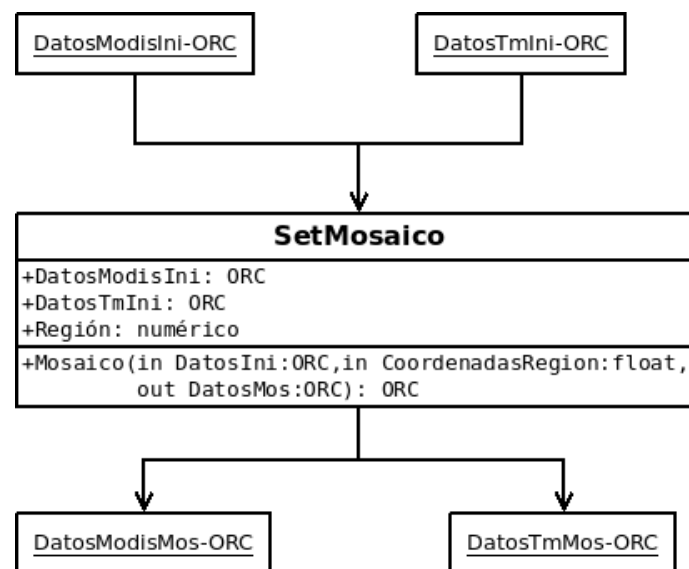


Figura 3.12: Estructura del módulo de generación de mosaicos y recorte de datos.

3.4.2. Cambio de sistema de referencia y proyección.

Para conseguir la integración de los distintos documentos en formato ráster, generalmente es necesario efectuar un cambio de proyección o de sistema de referencia, con el fin de que todos ellos sean superponibles. La Figura 3.13 muestra el esquema del módulo de cambio de proyección y sistema de referencia.

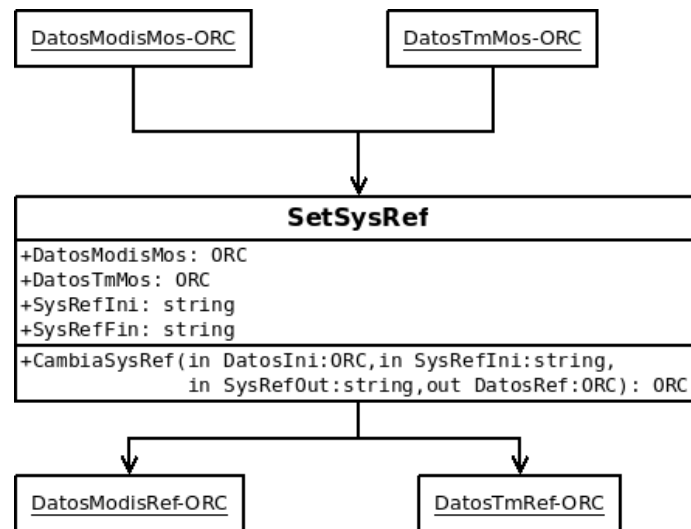


Figura 3.13: Estructura del módulo de cambio de proyección y sistema de referencia.

3.4.3. Consideración de condiciones ambientales.

Como se ha puesto de manifiesto, las condiciones ambientales influyen en la obtención de ciertos parámetros ambientales, por lo que deben ser tenidas en cuenta a la hora de su cálculo.

Este procedimiento debe ser tenido en cuenta en el proceso de obtención de las variables de base, pues es donde se muestra su influencia, en especial la nubosidad y la pluviometría, que afectan directamente al valor calculado.

3.4.3.1. Cobertura nubosa.

En el caso de utilizar datos procedentes de MODIS, en concreto de los productos MOD09GQ y MOD09GA, existen varios procedimientos disponibles para considerar la cobertura nubosa de una imagen, a partir de los datos de calidad de las observaciones contenidos junto con los datos, como capas adicionales de información, obtenidos según la metodología descrita por

Ackerman et al. (1998) y Platnick et al. (2003). En las tablas I.16, I.10 se detalla el formato de los mismos, de forma que podemos utilizar los datos correspondientes a la cobertura nubosa y enmascarar la imagen con el fin de no obtener resultados erróneos en los cálculos. En la figura 3.14 se muestra un ejemplo de píxeles nubosos, así como los situados en la zona de sombra de la nube.

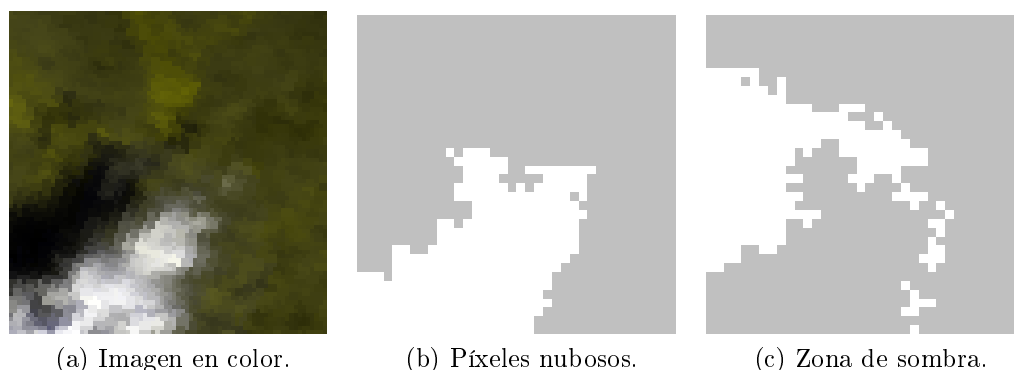


Figura 3.14: Consideración de la cubierta de nubes. Imagen de la Zona de Palencia.

Otra posibilidad para eliminar de forma automatizada las zonas afectadas por la presencia de nubes, sería fijar un umbral de reflectividad en todas o alguna de las bandas (Martins et al., 2002; King et al., 2002; Ackerman et al., 2008), de forma que los píxeles afectados por la nube sean eliminados del cálculo. Dada la diferente respuesta espectral de las nubes en las diferentes bandas, los resultados pueden no ser del todo precisos, confundiéndose píxeles muy brillantes como nubosos, o bien que no se delimiten correctamente los contornos de la nube, por lo que es conveniente efectuar alguna comprobación periódica de los valores umbrales. Este método será de elección en el caso de no disponer de datos de cobertura nubosa, como sucede, por ejemplo, con la utilización de los sensores TM o ETM+, los cuales no proporcionan esta información junto con los datos de reflectividad.

3.4.3.2. Fuentes de datos meteorológicos.

En cuanto a la influencia de las lluvias, la información auxiliar de pluviometría deberá obtenerse de estaciones meteorológicas repartidas por la zona de estudio, pues no es posible obtenerla directamente de las observaciones. El formato de los datos de entrada deberá adaptarse para ser integrado en el entorno de trabajo, de forma que se establezcan las condiciones que afectan a las observaciones y que impidan realizar los cálculos.

La disponibilidad de los datos condiciona la aplicabilidad de los mismos, dado que no existen datos meteorológicos que cubran todo el territorio con una disponibilidad casi en tiempo real, como sucede con los datos de satélite. En este trabajo, se han considerado como fuentes de datos los procedentes del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, iniciado en el año 1998 y cuyo objetivo es el ahorro de agua de riego proporcionando una mayor exactitud en la determinación de las necesidades de riego de los cultivos. En la actualidad está integrado por casi 400 estaciones propiedad del Ministerio y algunas otras más pertenecientes a redes de las Comunidades Autónomas (en la Figura 3.15, se muestra el aspecto del SIAR de Castilla La Mancha) y 12 centros zonales que dan servicio de asesoramiento al regante y difusión de la información de necesidades de riego a través de diferentes medios (Pérez de los Cobos Marín, 2002, 2005).

El Sistema se estructura en tres niveles: estaciones agroclimáticas automáticas, Centros Zonales y un Centro Nacional. Los Centros Zonales, uno por Comunidad Autónoma, obtienen diariamente y de forma automática mediante telefonía GSM, los datos capturados por cada una de las estaciones, siendo transmitida dicha información al Centro Nacional, que actúa como concentrador de la información así como coordinador general del SIAR. Es en estos centros, tanto Zonales como Nacional, donde se produce la explotación de la información, para lo que se han desarrollado los oportunos programas de gestión y cálculo. Dependiendo de la comunidad autónoma, el proyecto se denomina de forma diferente, y el acceso a los datos no sigue un mismo procedimiento, por lo que el acceso a los datos debe hacerse de forma específica en cada uno de ellos. Así, el acceso a los datos adquiridos para el proyecto SIAR ha de hacerse a través de distintas interfaces de consulta, según la región:

- El sistema InfoRiego de la Consejería de Agricultura y Ganadería de la Junta de Castilla y León.
URL: <http://www.inforiego.org/opencms/opencms>
- El servicio integral de asesoramiento al regante (SIAR) de la consejería de Agricultura de la Junta de Castilla-La Mancha.
URL: <http://crea.uclm.es/siar/datmeteo/constbl3.php>
- La Asesoría de Riegos para Cultivos, del Instituto Canario de Investigaciones Agrarias.
URL: <http://www.icia.es/icia/>

3.4. Subsistemas complementarios.



Figura 3.15: Interface de acceso a los datos del SIAR (Castilla-La Mancha).

- La Oficina del Regante, del Departamento de Agricultura y Alimentación del Gobierno de Aragón.
URL: <http://servicios.aragon.es/oresa/>
- El Servicio de Información Agroclimática, del Gobierno de la Rioja.
URL:
<http://www.larioja.org/npRioja/default/defaultpage.jsp?idtab=438495>
- La información meteorológica proporcionada por el Departamento de Desarrollo Rural e Innovación, del Gobierno de Navarra.
URL: <http://meteo.navarra.es/>
- La Red de Asesoramiento al Regante de la Dirección General de Infraestructuras e Industrias Agrarias, de la Junta de Extremadura.
URL: <http://agralia.juntaex.es/REDAREX/>
- El Sistema de Asistencia al Regante en Andalucía, de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía.
URL:
<http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/sar/servlet/FrontController>
- El Sistema de Información Agraria de Murcia, de la Región de Murcia.
URL: <http://siam.imida.es/apex/f?p=101:1:2308153556701036>

- El Servicio de Tecnología del Riego, de la Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación de la Comunitat Valenciana.

URL: <http://estaciones.ivia.es/estacion/>

Los datos disponibles de cada estación de los sistemas anteriores incluyen temperaturas máxima, mínimas, medias, pluviometría y evapotranspiración, entre otras, de forma diaria, o a través de resúmenes semanales y mensuales. El hecho de que cada portal esté estructurado de forma diferente, así como la ausencia, en algunos casos, de información almacenada en ficheros estandarizados, hace que la información no sea fácilmente utilizable en aplicaciones automatizadas por la complejidad de acceder a la misma, dado que la organización de los datos, así como su forma de distribución no está estandarizada, proporcionándose muchas veces esta información bajo demanda, como resultado de una consulta realizada por un operador (como puede verse en la Figura 3.16).



Centro Regional de Estudios del Agua



UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA

RECAS



Castilla-La Mancha
Consejería de Agricultura

22/02/2011//22/02/2011

FECHA	Tm °C	TMA °C	tma °C	Hr %	Hrmax %	Hrmin %	RS MJ/m ²	V m/s	HS horas	P mm	ET ₀ mm
22/02/2011	10.9	14.9	7.7	71.4	94.2	48.8	14.41	2.8	9.4	0.0	2.2

Tm = Temperatura media

TMA = Temperatura Máxima absoluta

tma = temperatura mínima absoluta

Hr = Humedad relativa

Hrmax = Humedad relativa máxima

Hrmin = Humedad relativa mínima

RS = Radiación Solar media

V = Velocidad media del viento

HS = Horas de Sol

P = Precipitación

ET₀ = Evapotranspiración de referencia

Figura 3.16: Resultado de una consulta en el SIAR-Castilla La Mancha.

Por otro lado, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), a partir de diciembre de 2010, ha comenzado a proporcionar acceso gratuito a los datos de aproximadamente 780 estaciones meteorológicas automáticas distribuidas por todo el territorio nacional. Los datos disponibles, y que pueden resultar de interés en este trabajo, incluyen los siguientes:

- Datos diezminutales de aproximadamente 700 estaciones, con datos actualizados cada 10 minutos.
- Resúmenes diarios de 780 estaciones (diciembre de 2011), con información de temperaturas medias, máximas y mínimas, así como

3.4. Subsistemas complementarios.

precipitación total (24h) y descompuesta en intervalos de 6 horas (0h a 6h, 6h a 12h, 12h a 18h y 18h a 24h).

- Series climatológicas diarias y anuales de estaciones meteorológicas seleccionadas.



Índice de ftp://ftpdatos.aemet.es/datos_observacion/resumenes_diarios/

🏠 Subir al directorio superior.

Nombre	Tamaño	Última modificación
Archivo: 20110216_resudia.csv.gz	24 KB	19/02/11 08:25:00
Archivo: 20110217_resudia.csv.gz	23 KB	20/02/11 08:25:00
Archivo: 20110218_resudia.csv.gz	22 KB	21/02/11 08:25:00
Archivo: 20110219_resudia.csv.gz	24 KB	22/02/11 08:25:00
Archivo: 20110220_resudia.csv.gz	23 KB	23/02/11 08:25:00
Archivo: 20110221_resudia.csv.gz	23 KB	23/02/11 08:25:00
Archivo: 20110222_resudia.csv.gz	22 KB	23/02/11 08:25:00
Archivo: LEEME.txt	2 KB	23/11/10 09:41:00
Archivo: LEEME_DATOS.txt	3 KB	23/11/10 09:41:00
Archivo: NOTA_LEGAL.txt	2 KB	19/11/10 11:44:00

Figura 3.17: Estructura de directorios del portal de acceso a los datos de la AEMET.

En este caso, los conjuntos de datos necesarios se corresponderán generalmente con los resúmenes diarios, así como a las series climatológicas, en caso de trabajar con imágenes adquiridas hace tiempo, pues los datos de resúmenes diarios se mantienen en el servidor un periodo de 7 días, pasando en ese momento a englobar los datos de series climatológicas.

El acceso de los datos de la AEMET se realiza a través de un servidor ftp, en la dirección ftp://ftpdatos.aemet.es (ver Figura 3.17), cuya estructura de directorios es fija, así como los criterios de asignación de nombres a los archivos, por lo que puede ser utilizado en aplicaciones automatizadas. Los archivos se almacenan en formato ASCII, con campos separados por punto y coma (CSV) y una estructura documentada, descrita en otros ficheros accesibles desde el propio servidor.

Otros fenómenos meteorológicos que pueden alterar los resultados de algunos parámetros calculados mediante los métodos propuestos, pueden ser la nieve, la cual puede ser obtenida bien mediante los datos de calidad de las observaciones MODIS, bien mediante la información disponible en la AEMET, en forma de archivos diezminutales, lo que dificulta su integración en el procedimiento, de forma que es preferible utilizar la máscara de nieve de MODIS, o bien obtenerla mediante el índice de nieve de diferencia normalizada, *NDSI* (Hall et al., 1995).

3.4.3.3. Integración de datos meteorológicos en el proceso.

Dada la influencia de ciertos fenómenos meteorológicos, esta información deberá ser tomada en cuenta previamente al cálculo numérico de los parámetros biofísicos, dado que, generalmente, no toda la escena estará afectada.

El flujo de proceso, deberá permitir considerar o no estos fenómenos, de forma que el cálculo se realice de forma normal, o bien, tal y como se ha adoptado en este trabajo, enmascarar las zonas cubiertas de nubes o, que estando despejadas, hayan registrado precipitaciones en las 24 horas anteriores al momento de la toma de imágenes.

Para la determinación de las zonas que pueden estar afectadas por la precipitación caída anteriormente a la toma de imágenes, el procedimiento seguido es el que se muestra en la Figura 3.18.

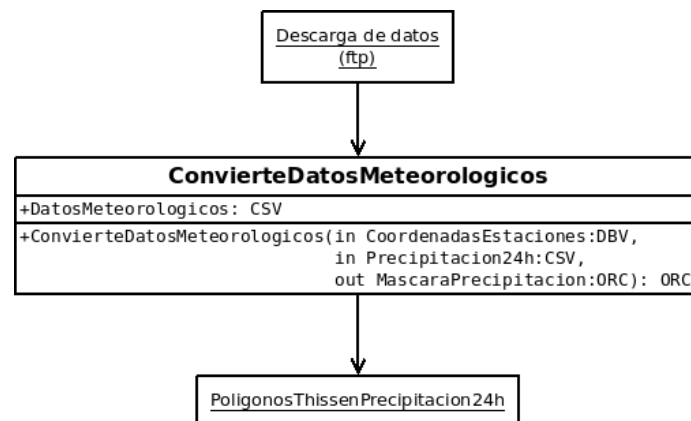


Figura 3.18: Estructura del módulo encargado del proceso de integración de datos meteorológicos con los procedentes de otras fuentes.

El resultado del proceso de conversión de los datos de precipitación es un archivo de tipo ráster, en el que se definen los polígonos Thiessen correspondientes a cada estación, con el volumen total de precipitación en cada uno de ellos. El resultado, es tratado posteriormente como una capa booleana, de forma que las áreas de influencia de estaciones sin precipitación son incluidas en el cálculo, mientras que aquellas que han registrado precipitaciones en las 24 horas anteriores son excluidas del cálculo.

3.4.4. Interpolación temporal.

Mediante este procedimiento podemos ajustar la escala de trabajo, ajustando la resolución espacial de los datos procedentes del sensor MODIS, permitiendo obtener datos con una resolución espacial de 30 m, al mismo

tiempo que conserva su resolución temporal de 1 día. La Figura 3.19 muestra el proceso seguido.

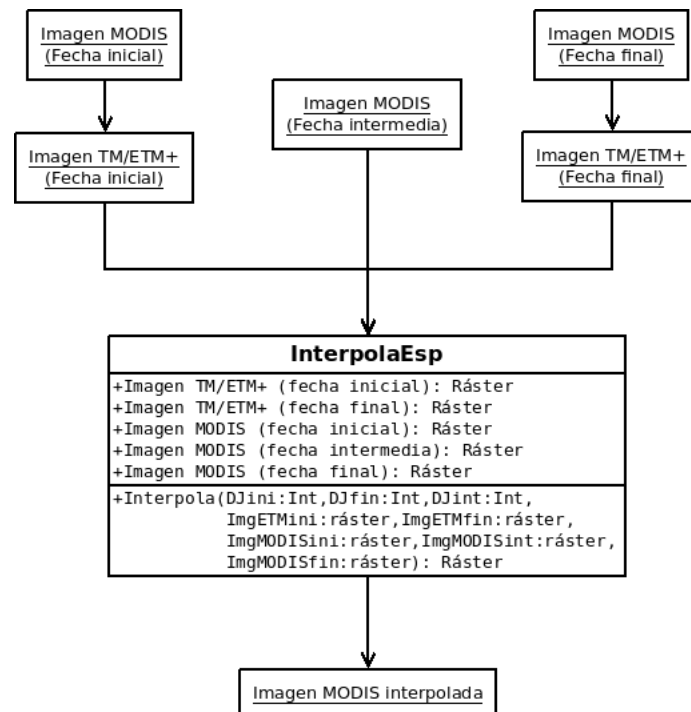


Figura 3.19: Estructura del módulo encargado del procedimiento de interpolación espacial.

3.5. Consideraciones sobre metodologías, estructuras y datos.

Debido a que, dependiendo del conjunto de datos considerado, ha sido necesario integrar diferentes estructuras de almacenamiento de información, por lo que se han desarrollado herramientas de conversión desde los formatos nativos de cada uno de ellos al formato propio del conjunto de aplicaciones desarrolladas en este trabajo.

3.5.1. Lenguajes de modelado.

Un lenguaje de modelado, es un conjunto de *palabras* y una estructura sintáctica, que permite definir secuencias de procesos. En este caso, la estructura está basada en una pila LIFO (*Last Input - First Output*), que opera con capas ráster de información, así como con constantes numéricas.

La aplicación utilizada (SovMap), permite la utilización de archivos de secuencias de comandos, que implementan las operaciones necesarias, según el parámetro elegido, y devuelven un archivo con tantas capas como parámetros solicitemos.

El concepto aplicado, es el de calculadora de bandas ráster, de forma que los datos de entrada, se presentan como capas de información, con los *inputs* apropiados (generalmente reflectividad, pero también datos de elevación, temperaturas, etc.), devolviendo el resultado en tantas capas o bandas, como parámetros se soliciten.

3.5.2. Estructuras de datos.

Dada la diversidad de formatos disponibles, en los que se encuentran los datos, se ha optado por una solución intermedia, de forma que los diferentes formatos de entrada se convierten al formato interno de la aplicación, en el que se realizan todos los procedimientos intermedios. En cuanto a la difusión de los resultados, el formato de los mismos puede elegirse entre el formato interno del software, o bien, utilizar el formato HDF, con una estructura interna adaptada a los requerimientos específicos de este trabajo.

3.6. Especificaciones técnicas del modelo.

El modelo desarrollado en la presente tesis, está formado por diversos componentes, cada uno con sus particularidades y características, por lo que es conveniente el estudio por separado de cada uno de ellos.

Los módulos, se evalúan en función de una serie de parámetros, tales como tiempo de ejecución, diversidad de formatos soportados, adaptabilidad a los diferentes formatos de entrada de datos, volumen máximo procesable, formatos de salida de resultados o datos intermedios y resolución geométrica/temporal, entre otros.

3.6.1. Módulo de descarga de datos.

El primer proceso que debe realizarse, es la descarga de los datos de partida. En este caso, los datos utilizados son accesibles a través de servidores ftp, por lo que la aplicación de descarga debe ser capaz de soportar el protocolo *File Transfer Protocol* (ftp), con acceso de forma anónima, o mediante usuario y contraseña. La solución adoptada se basa en el comando del sistema *wget*, que

permite acceder a directorios remotos y descargar los archivos seleccionados. Los datos de entrada para este proceso son los siguientes:

- Dirección del servidores ftp y datos de acceso (usuario y contraseña).
- Producto estándar de MODIS seleccionado.
- Fecha de los datos que queremos descargar.
- Tesela que queremos descargar, según la nomenclatura de MODIS.
- Directorio en el que se guardarán los archivos descargados.

La aplicación es capaz de generar los nombres necesarios, según la estructura de directorios que está documentada por Teague et al. (2010), y proceder a su descarga. En caso de que un archivo no pueda ser correctamente descargado, se producirá un mensaje de error, con el fin de evitar el resto de procesos posteriores.

Dado el volumen de los datos, el tiempo de descarga puede variar en función del tipo de conexión disponible, así como de diversos factores externos, como la saturación del propio servidor. Por ejemplo, la cobertura completa de la Península Ibérica, con datos del producto estándar MOD09GA requiere la descarga de aproximadamente 300 MB, que a una velocidad de 500 kB, habituales en muchos casos, supondrían 10 minutos, aproximadamente.

3.6.2. Preproceso de datos.

El siguiente paso, es la preparación y conversión de los datos, para que se adecúen a nuestras estructuras, así como efectuar la selección del área de interés y cambio de sistema de referencia, si fuera necesario.

Previamente a la importación de los datos al software de proceso (SovMap), es necesario proceder a la concatenación de las distintas teselas que cubren la zona de trabajo. Para ello, se utilizan las herramientas *MODIS Reprojection Tools* (Land Processes DAAC USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, 2008), que nos permiten efectuar el mosaico correspondiente y seleccionar el área de interés, así como efectuar el cambio de datum y proyección original de los datos (sinusoidal) a los de nuestra elección que será, generalmente, la UTM-WGS84. La precisión geométrica de los datos es, generalmente, mejor que el tamaño del píxel, situándose en torno a los 150 m, siendo en el caso de los píxeles próximos al nadir de unos 50 m (Wolfe et al., 1999, 2002), por lo que se puede considerar aceptable. En este paso, es posible

hacer una selección de las capas de datos que nos resultan de interés, con el fin de descartar las restantes y eliminar datos innecesarios en todas las fases posteriores.

Tras esta primera fase, se debe usar la herramienta ImpExpSov, la cuál está diseñada para admitir un amplio número de formatos de archivos de entrada, entre ellos el HDF, en el que se encuentran los datos procedentes del sensor MODIS y convertirlas a los tipos de datos de la aplicación SovMap. Esta aplicación es capaz de acceder a las estructuras habituales de estos archivos, en concreto a los datos de tipo ráster y tabulares. Puesto que el tipo de datos soportado por las aplicaciones desarrolladas en este trabajo, es el mismo que soporta la aplicación SovMap, debe ser capaz de permitir diversas opciones de importación. En concreto, se pueden dar las siguientes posibilidades:

- HDF con datos sólo en formato ráster: Serán transformados a imágenes multibanda del tipo ORC+RAW.
- HDF con datos sólo en formato tabular: Permitirá elegir al usuario el tipo de salida deseada: bien archivos tabulares de SovMap, en formato SMP, bien en formato de imagen multibanda ORC+RAW, si el tipo de datos coincide con los soportados por esta última aplicación: 8 bits-unsigned int, 16 bits-signed int, 32 bits-float, que serán convertidos a imágenes de tipo BYTE, INTEGER o REAL, respectivamente. En otro caso, sólo se producirá una salida en formato SMP.
- HDF con datos de tipo ráster y tabulares: Como en los casos anteriores, los datos ráster se almacenarán en archivos ORC+RAW y los tabulares, según la elección del usuario, si el tipo de datos lo permite.

Los archivos generados en este proceso serán utilizados en todos los siguientes.

3.6.3. Cálculo de variables.

Este módulo es el de mayor complejidad, pues debe ser capaz de obtener diversas variables, previamente definidas por el productor, sin necesidad de modificar el código de la aplicación. Para ello, se ha diseñado un lenguaje de modelado, basado en una estructura de pila LIFO (*Last Input-First Output*), que permite realizar diversas operaciones habituales entre las distintas capas de información de entrada, así como con variables numéricas, permitiendo la salida de archivos multibanda, cada una de ellas almacenando una variable diferente.

Las operaciones soportadas incluyen las siguientes:

- Operaciones aritméticas básicas: suma, resta, multiplicación y división.
- Operaciones lógicas: comparaciones, AND, OR y NAND.
- Operaciones matemáticas con funciones trigonométricas, logarítmicas, exponenciales, raíces cuadradas, potencias, etc.
- Cálculos estadísticos: media, desviación típica, varianza y valores mínimo y máximo.
- Análisis espacial básico: mínima distancia a un píxel.
- Operaciones de control de pila: intercambio de bandas (swap) y duplicación de capas.
- Conversión del tipo de datos de salida: BYTE, INTEGER o REAL.

En el anejo III se incluye el manual de referencia de la aplicación.

En el caso de tratarse de la obtención de documentos cualitativos de ocupación del suelo, la metodología difiere considerablemente, pues el proceso totalmente automatizado, habitualmente, no produce resultados plenamente satisfactorios, siendo necesaria la revisión por parte de un operador. Por otro lado, no se considera necesario el disponer de un documento de cubierta del suelo con una frecuencia temporal diaria, por lo que éste puede ser obtenido cada dos semanas, de forma supervisada, y actualizado en la página web.

3.6.4. Presentación de resultados.

Con el fin de difundir los resultados obtenidos, estos deben ser presentados de forma que los usuarios puedan acceder a ellos.

La solución adoptada se basa en una página web, que utiliza la aplicación de visualización de cartografía de Google Maps, con el fin de mostrar los resultados en formato ráster, superpuestos a la base cartográfica, facilitando así la interpretación por parte de un usuario medio.

La aplicación de actualización de resultados debe ser capaz de permitir elegir al usuario los resultados que se actualizarán. Dado que el acceso y visualización de la página web se hace a través de un navegador de internet, es necesario modificar el formato de las capas de resultados, ya que éstos, sólo admiten los formatos JPEG, GIF, PNG y BMP de forma nativa, sin necesidad de instalar complementos adicionales.

Por otro lado, la proyección cartográfica que se utiliza en la cartografía de Google Maps es la proyección Mercator y el dátum el WGS84, siendo necesario efectuar un nuevo cambio de proyección de la UTM30N, utilizada en los cálculos intermedios, a esta otra. Para ello, se hace uso del conjunto de aplicaciones proporcionados por la *Geospatial Data Abstraction Library* (GDAL), la cual se trata de un conjunto de aplicaciones de software libre que permite efectuar el cambio de proyección del archivo ORC+RAW de resultados, así como cambiar el formato de salida a JPEG (Warmerdam, 2008).

Tras el proceso de cambio de proyección y formato de almacenamiento, es necesario actualizar las capas que se visualizan en la página web. Para ello, es necesario que la aplicación pueda conectarse a un servidor ftp remoto, en el que está todo almacenado y actualice los archivos que se encuentran allí con los nuevos. La conexión se realiza mediante un acceso a un directorio ftp con usuario y contraseña, por lo que debe soportar este tipo de conexiones.

Dado que el tamaño de las imágenes resultantes es pequeño (al tratarse de archivos JPEG), el tiempo necesario para copiarlas al servidor no es muy grande, dependiendo de la velocidad de conexión.

3.6.5. Automatización de los procesos.

Los módulos descritos anteriormente, pueden funcionar mediante la introducción manual de los datos necesarios a través de un formulario mostrado por la aplicación, o bien deberán ser capaces de aceptar todos los parámetros, con vistas a su automatización total. Para ello, se han diseñado de forma que puedan operar en modo manual/supervisado o en modo automático/no supervisado. De esta forma, todas las aplicaciones descritas anteriormente pueden ser ejecutadas por un operador en el modo habitual, dentro del entorno gráfico del propio sistema operativo, y la aplicación mostrará un formulario desde el que es posible proporcionar todos los datos requeridos para el proceso, como se muestra en la Figura 3.20.

Por otro lado, dado que se busca la total automatización del proceso, las distintas aplicaciones deben ser capaces de recibir los argumentos de forma que no sea precisa la intervención de un operador. De este modo, están preparadas para recibir los distintos archivos y opciones desde la línea de comandos, siendo posible su integración en archivos de proceso por lotes, programables para

3.6. Especificaciones técnicas del modelo.

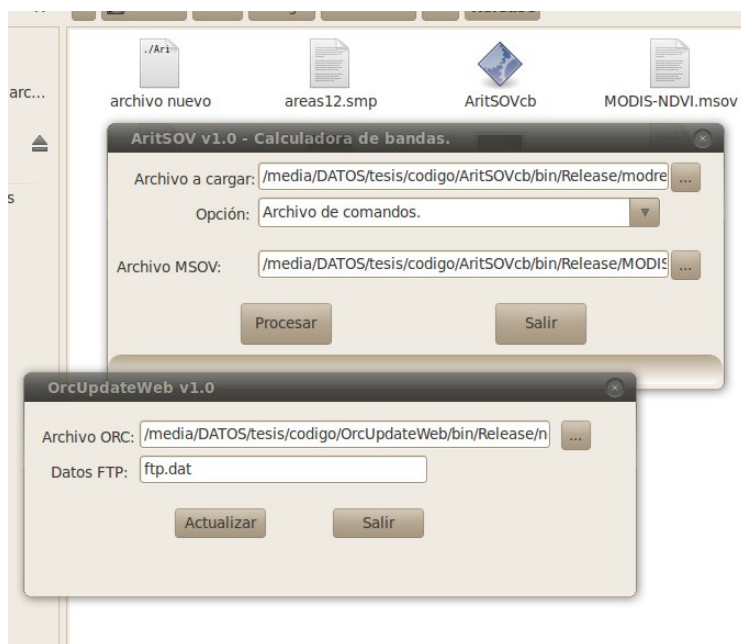


Figura 3.20: Utilización de las aplicaciones en el “*Modo manual/supervisado*”.

que se ejecuten con una determinada frecuencia temporal y realicen todos los proceso de forma autónoma, tal como se ve en la figura 3.21.

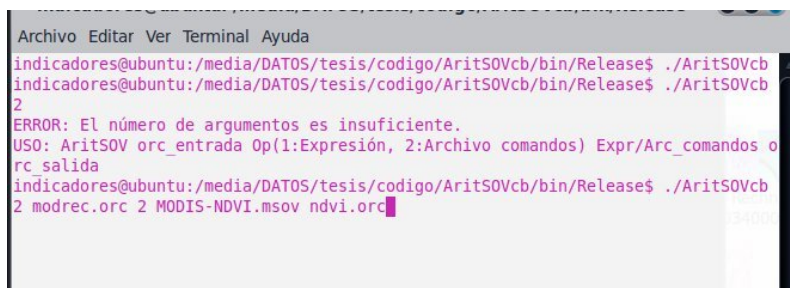


Figura 3.21: Ejemplo de utilización de aplicaciones en el “*Modo automático/no supervisado*”, a través de la línea de comandos.

En este trabajo, se ha utilizado la distribución Ubuntu del sistema operativo Linux, por su robustez, pero los procedimientos descritos anteriormente podrían adaptarse para ejecutarse sobre el sistema operativo Microsoft Windows.

La secuencia de comandos necesarios para efectuar todas las operaciones se pueden añadir a un archivo de texto (un *script*), que realiza todos los pasos, mediante la ejecución de un único archivo.

En el Listado 3.2, se muestra un ejemplo que realiza la actualización automática de las capas de pluviometría y temperatura media diurna, mediante

la conexión al servidor de datos de la AEMET, devolviendo los resultados agregados por términos municipales.

Listado 3.2 Ejemplo de script (actualiza_aemet.sh).

```
1  #! /bin/bash
   anyo=$(date +%Y);
3  mes=$(date +%m);
   dia=$(date +%d);
5  echo $anyo;
   echo $mes;
7  echo $dia;
   ./import_aemet D $dia $mes $anyo /media/DATOS/
   estaciones_aemet.csv /media/DATOS/meteo 1021069
   -66464 4858130 3980954 2000
9  ./CalcMedEntTerr /media/DATOS/muni.orc /media/DATOS/
   meteo_p.orc /media/DATOS/pluv.orc
   ./CalcMedEntTerr /media/DATOS/muni.orc /media/
   DATOSmeteo_t.orc /media/DATOS/tempe.orc
11 ./OrcUpdateWeb /media/DATOS/tempe.orc /media/DATOS/
   ftp.dat
   ./OrcUpdateWeb /media/DATOS/pluv.orc /media/DATOS/ftp
   .dat
```

La secuencia de operaciones necesaria para conseguirlo, es la siguiente:

- Obtención de fecha actual.
- Descarga de los datos del servidor de la AEMET, así como la obtención de las celdas de Voronoi de los datos de temperatura media y precipitación 24h, de toda la Península Ibérica, con una resolución espacial de 2000 m.
- Obtención de los valores medios por entidad territorial (en este ejemplo, términos municipales), de las dos capas anteriores.
- Cambio de formato y proyección cartográfica de los resultados, con el fin de hacerlos compatible con la aplicación de Google Maps.
- Actualización de los archivos en el servidor ftp que aloja la página web.

La programación de la ejecución de las aplicaciones se haría a través del comando *cron*, del propio sistema operativo Linux, que permite la ejecución de aplicaciones en segundo plano a intervalos regulares. Para ello, debe configurarse el archivo *crontab*, situado en el directorio */etc*, para definir el intervalo temporal y el *script* que debe ejecutarse. Pueden programarse varios, de forma que unas operaciones se realicen diariamente y otras con otra periodicidad diferente. En el cuadro se muestra un posible archivo *crontab* que ejecuta el *script* anterior (cuadro 3.2) todos los días a las 10:00.

Listado 3.3 Ejemplo de archivo *crontab*.

```
SHELL=/bin/bash
2 PATH=/sbin:/bin:/usr/sbin:/usr/bin
MAILTO=root
4 HOME=/
# run-parts
6 01 * * * * root nice -n 19 run-parts /etc/cron.hourly
50 0 * * * root nice -n 19 run-parts /etc/cron.daily
8 22 4 * * 0 root nice -n 19 run-parts /etc/cron.weekly
42 4 1 * * root nice -n 19 run-parts /etc/cron.
    monthly
10 00 10 * * * root /home/scripts/actualiza_aemet.sh
00 11 * * * root /home/scripts/actualiza_modis.sh
```

La obtención de productos derivados de los datos adquiridos por MODIS, es ligeramente diferente, siendo los procesos necesarios los siguientes:

- Obtención de fecha actual.
- Descarga de los datos del servidor ftp, pudiendo ser necesario descargar varias teselas para cubrir totalmente la zona de estudio.
- Preproceso de los datos, en donde se efectuará la unión de las teselas formando un mosaico, la selección de las capas de información necesarias para los siguientes procesos, así como el cambio de proyección, de sinusoidal a UTM.
- Importación de los datos, en formato HDF al propio de la aplicación de proceso.

- Obtención de índices o parámetros derivados de los datos.
- Obtención de los valores medios por entidad territorial (en este ejemplo, términos municipales), de cada parámetro obtenido en el punto anterior.
- Cambio de formato y proyección de los resultados, con el fin de adaptarlos a formatos compatibles con los navegadores de internet y a la aplicación de Google Maps.
- Actualización de los archivos del servidor ftp que aloja la página web.

La automatización del procedimiento anterior es posible, mediante la utilización de un *script* que ejecuta todos los pasos. El código de dicho archivo se muestra en el cuadro 3.4.

Listado 3.4 Automatización del proceso. MODIS.

```
1  #! /bin/bash
2  let anyo=$(date +%Y);
3  mes=$(date +%m);
4  dia=$(date +%d);
5  let "d=dia-1"
6  echo $anyo;
7  echo $mes;
8  echo $dia;
9  #descarga de todas las teselas
10 ./DescargaModis MOD09GA $d $mes $anyo 17 04
11 ./DescargaModis MOD09GA $d $mes $anyo 17 05
12 ./DescargaModis MOD09GA $d $mes $anyo 18 04
13 ./DescargaModis MOD09GA $d $mes $anyo 18 05
14 #Calculo de indices y de medias por entidades
    territoriales. Actualización de la web
15 ./PreprocesaModis /home/indicadores/PruebasModelo/
    modis/ -66464 1021069 3980954 4858130 2500 "0 0 0 0
    0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1"
16 ./ImpHdf /home/indicadores/PruebasModelo/modis/region
    .hdf /home/indicadores/PruebasModelo/modis/region.
    orc 1 "o"
17 rm region.hdf
18 rm mosaico.hdf
```



```
19 ./AritSOVcb /home/indicadores/PruebasModelo/modis/
    region.orc 2 /home/indicadores/PruebasModelo/modis/
    indices.msov /home/indicadores/PruebasModelo/modis/
    indices.orc
20 ./CalcMedEntTerr /home/indicadores/PruebasModelo/
    modis/muni.orc /home/indicadores/PruebasModelo/
    modis/indices.orc /home/indicadores/PruebasModelo/
    modis/indET.orc
21 ./OrcUpdateWeb /home/indicadores/PruebasModelo/modis/
    indices.orc /home/indicadores/PruebasModelo/modis/
    updfstp.dat
22 ./OrcUpdateWeb /home/indicadores/PruebasModelo/modis/
    indET.orc /home/indicadores/PruebasModelo/modis/
    updfstp.dat
23 #Calculo de indices y de medias por entidades
    territoriales. Actualización de la web.
    CONSIDERANDO COBERTURA NUBOSA
24 ./PreprocesaModis /home/indicadores/PruebasModelo/
    modis/ -66464 1021069 3980954 4858130 2500 "0 1 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0"
25 ./ImpHdf /home/indicadores/PruebasModelo/modis/region
    .hdf /home/indicadores/PruebasModelo/modis/qa.orc 1
    "0"
26 rm region.hdf
27 rm mosaico.hdf
28 ./leeMOD09QA /home/indicadores/PruebasModelo/modis/qa
    .orc /home/indicadores/PruebasModelo/modis/cobnum.
    orc 3
29 ./AritSOVcb /home/indicadores/PruebasModelo/modis/
    cobnum.orc 2 /home/indicadores/PruebasModelo/modis/
    nubes.msov /home/indicadores/PruebasModelo/modis/
    nubes.orc
30 ./AritSOVcb /home/indicadores/PruebasModelo/modis/
    regionynubes.orc 2 /home/indicadores/PruebasModelo/
    modis/indicesnubes.msov /home/indicadores/
    PruebasModelo/modis/indicesnubes.orc
```

```
31 ./OrcUpdateWeb /home/indicadores/PruebasModelo/modis/  
    indicesnubes.orc /home/indicadores/PruebasModelo/  
    modis/updftp.dat  
32 ./OrcUpdateWeb /home/indicadores/PruebasModelo/modis/  
    indETnubes.orc /home/indicadores/PruebasModelo/  
    modis/updftp.dat
```

3.6.6. Tiempos de proceso y volumen de datos.

La ejecución de todas las aplicaciones anteriores, requieren de unos determinados tiempos de proceso, algunos fijos y otros variables, como pueden ser las descargas de datos desde los servidores remotos. Dado que el flujo de operaciones difiere según la fuente de los datos (MODIS y AEMET), se han considerado los tiempos de ejecución por separado.

3.6.6.1. Obtención y actualización de variables obtenidas a partir de datos MODIS.

Se ha considerado, como ejemplo para cuantificar el tiempo de proceso necesario para la obtención de diversos parámetros biofísicos, a partir de datos de reflectividad MODIS, los índices *Normalize Difference Vegetation Index* (NDVI) y *Bare Soil Index* (BSI):

$$NDVI = \frac{B2 - B1}{B2 + B1} \quad (3.1)$$

$$BSI = \frac{(B6 + B1) - (B2 + B3)}{(B6 + B1) + (B2 + B3)} \quad (3.2)$$

, donde

- B1= reflectividad en Banda 1 (0.620 - 0.670 μm).
- B2= reflectividad en Banda 2 (0.841 - 0.876 μm).
- B3= reflectividad en Banda 3 (0.459 - 0.479 μm).
- B6= reflectividad en Banda 6 (1.628 - 1.652 μm).

El código, en el lenguaje propio de la calculadora de bandas sería el que se muestra en el cuadro .

Listado 3.5 Obtención de NDVI y BSI a partir de datos MODIS.

```
//MODIS NDVI y BSI, escalados a 0-255
2 $1
  $2
4 -
  $1
6 $2
  +
8 /
  %-1
10 #>=v
  %1
12 #<=v
  %128
14 *
  %128
16 +
  $6
18 $1
  +
20 $2
  $3
22 +
  -
24 $6
  $1
26 +
  $2
28 $3
  +
30 +
  /
32 #dup
  #min
34 +
  #dup
```

```
36 #max  
/  
38 %255  
*  
40 #tipo:BYTE
```

Los datos necesarios son, por tanto, los correspondientes a la reflectividad superficial, con una resolución espacial de 500 m, que se corresponde con el producto estándar MOD09GA. Además de los propios índices, se ha considerado también la posibilidad de obtener los valores medios de los mismos por entidades territoriales (en este caso, municipios), con el fin de mostrar las capacidades de la aplicación desarrollada.

El equipo en el que se han realizado las pruebas tiene las siguientes características principales:

- Procesador Intel Pentium 4 a 3.0 Ghz.
- Memoria RAM: 1 Gb.
- Disco duro ATA de 160Gb, con 2.2 Gb de espacio libre no fragmentado en la partición de pruebas.
- Sistema operativo Ubuntu 10.04, con versión del núcleo Linux 2.6.32-30-generic.
- Realización de todas las pruebas con el equipo recién iniciado, sin programas adicionales cargados.

La ejecución del proceso descrito en el conlleva los siguientes tiempos:

1. Descarga de los datos: Es necesario descargar 4 teselas, para poder cubrir completamente el territorio de la Península Ibérica. Cada tesela del producto MOD09GA ocupa cerca de 80 MB, por lo que el volumen de datos a descargar es, aproximadamente, de 80 MB/Tesela x 4 Teselas, 320 MB, que a velocidades habituales de descarga (400 kB/s), suponen alrededor de 13 minutos.
2. Preproceso de los datos: Incluye los procedimientos de generación de mosaicos, recorte, cambio de proyección y selección de bandas, en este caso, 4 bandas, supone un tiempo de 2.5 minutos, para una resolución de 500 m, coincidente con la del producto MOD09GA. En esta fase, se genera un archivo HDF de aproximadamente 52 MB.

3. Importación de archivos al formato nativo de la aplicación. La conversión del archivo HDF resultante del proceso anterior a un archivo en formato ORC+RAW multibanda (4 bandas), implica un tiempo de 3 segundos. El volumen de datos que es necesario almacenar en esta operación, asciende a 52 MB.
4. Obtención de variables e índices. El proceso de obtención de los dos índices anteriores (Ecuaciones 3.1 y 3.2) a partir de los datos de reflectividad, supone un tiempo de 4 segundos. Con el fin de permitir la visualización de los resultados, éstos son reescalados para que se encuentren en un rango comprendido entre 0 y 255 y puedan ser almacenados como variables de tipo BYTE (8 bits, entero sin signo). La cantidad de espacio necesario en disco, es variable en función del número de índices calculados, pero se puede estimar en torno a 3.6 MB, por cada índice, para una cobertura completa de la península con una resolución espacial de 500 m.
5. Cálculo de variables por entidad territorial. En el caso de desear la obtención de valores medios de las variables obtenidas en el proceso anterior por entidad territorial que, en este caso, han sido los términos municipales, se requiere un tiempo de proceso adicional de 4 segundos. En este apartado, es necesario contar con la capa ráster de términos municipales, que ocupa un espacio de 7.3 MB, además de los 13 MB que ocupa cada capa de valores medios.
6. Consideración de cobertura nubosa. Extraer la máscara de píxeles cubiertos por nubes a partir de los datos del producto MOD09GA y aplicarla a los resultados del cálculo de los índices, implica un tiempo total de proceso de 16 segundos, frente a los 4 segundos que se tarda en obtener los índices sin considerar la cobertura nubosa. En lo referente al espacio de almacenamiento, las necesidades de espacio son las mismas que en los procesos anteriores, añadiendo 36 MB de información adicional, contenida en el archivo de información relativa a la calidad de los datos.
7. Conversión de formato y cambio de proyección. Previamente a actualizar los archivos del servidor, es necesario transformar el formato de la aplicación (ORC+RAW) a un formato gráfico que pueda ser visualizable en un navegador web, así como estar en la misma proyección cartográfica de la base cartográfica de Google Maps (Mercator). En este caso, la

conversión de cada archivo de resultados (con dos capas de información o índices), así como su transferencia al servidor, lleva un tiempo aproximado de 11 segundos, que puede ser variable en función de la saturación de la propia red. Las imágenes generadas en este proceso, al tratarse de archivos de tipo JPEG, ocupan muy poco espacio en disco, oscilando en torno a 0.2 MB por cada índice o capa que se quiera actualizar.

Con ello, es posible estimar el tiempo total de proceso en unos **16** minutos. Como se puede comprobar, el mayor condicionante es la descarga de información, que además de suponer más de un 80 % del tiempo total, es el paso que está sujeto a mayores fluctuaciones por la dependencia de la velocidad de la conexión. En la Tabla 3.1 se muestran, de manera sintética, las actividades, así como los tiempos de cálculo requeridos por cada una de ellas y el volumen de información generada.

Por otro lado, en cuanto a necesidades de espacio en disco, es necesario disponer de aproximadamente 470 MB de espacio fijo, más 17 MB por cada índice o variable calculada. Dado que al final del proceso, no toda la información es necesaria, por tratarse de resultados intermedios, pueden eliminarse todos los archivos, excepto los correspondientes a los resultados en formato ORC+RAW, que ocupan alrededor de 4 MB por índice.

3.6.6.2. Obtención y actualización de variables obtenidas a partir de datos meteorológicos de la AEMET.

Aunque el objetivo prioritario de esta investigación es aplicar los datos procedentes del sensor MODIS a la obtención de diversos parámetros biofísicos, dado que en ciertos casos es necesario considerar la influencia de la pluviometría en los valores de reflectividad, ha sido necesario diseñar e implementar un conjunto de herramientas que permitan acceder a la información meteorológica facilitada por la AEMET en su página web, en concreto a los datos de temperatura media y pluviometría. El proceso necesario para integrar estos efectos en la reflectividad, pasa por estimar los valores de pluviometría total en 24 h, que son conocidos en un conjunto de estaciones, a la totalidad de los píxeles de los datos de reflectividad MODIS. Para ello, se ha optado por generar las celdas de Voronoi, por estar ampliamente difundida su utilización en meteorología.

3.6. Especificaciones técnicas del modelo.

Tabla 3.1: Tiempos de cálculo y requerimientos de espacio, para la obtención de variables a partir de datos MODIS.

Actividad	Tiempo de proceso (minutos)	Espacio en disco necesario (MB)
Descarga de datos desde el servidor.	13	320
Preproceso.	2.5	52
Importación.	0.05	52
Cálculo de variables.	0.07 (por variable)	3.6 (por variable)
Análisis territorial.	0.07	13 (por variable)
Consideración de cobertura nubosa.	0.3	3.6 (por variable) + 36 (capa de nubes)
Presentación de resultados.	0.2	0.2 (por variable)
Total	16	480

La secuencia de procesos, así como sus tiempos de ejecución, se muestran a continuación, particularizados a la obtención de sendos documentos en formato ráster, con la precipitación total, así como la temperatura media.

1. Descarga de datos del servidor e interpolación, mediante celdas de Voronoi. En esta primera fase y, aunque la velocidad de conexión es variable, dado el pequeño volumen de información que es necesario transmitir (aproximadamente 20 kB), la velocidad de conexión no juega un papel determinante, en comparación con la obtención de las celdas de Voronoi de precipitación y temperatura, que con una resolución espacial de 500 m y sobre una región idéntica al ejemplo anterior empleando datos MODIS (toda la península), supone 2.5 minutos. En este proceso se crean dos capas ráster, de 3.6 MB cada una.
2. Obtención de valores por entidades territoriales. Idéntico a la utilización de MODIS, pues los datos son los mismos. Aproximadamente 4 segundos.
3. Actualización de los resultados de la web. Si se quiere disponer de dichas capas ráster de temperatura y pluviometría en la web, el proceso de cambio de formato y proyección, así como procedimiento de carga al

servidor, es idéntico al proceso equivalente empleando datos MODIS. Supone, por tanto, 10 segundos aproximadamente.

Como se puede comprobar, dado que la cantidad de información que es necesario descargar es limitada, el tiempo de proceso se reduce considerablemente, suponiendo aproximadamente **3** minutos, tal como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Tiempos de cálculo para la obtención de variables a partir de datos meteorológicos AEMET.

Actividad	Tiempo de proceso (minutos)	Espacio en disco necesario (MB)
Descarga de datos desde el servidor.	2.5	7.2
Análisis territorial.	0.07	13 (por variable)
Presentación de resultados.	0.1	0.4 (por variable)
Total	3	21

3.6.6.3. Interpolación temporal de datos MODIS.

Algunas de las aplicaciones desarrolladas en este trabajo permiten la obtención de imágenes multiespectrales diarias, mejorando la resolución espacial de MODIS, de 250 m a 1000 m, según banda espectral, a una resolución espacial de 30 m, coincidente con la del sensor TM/ETM+. En este procedimiento, es necesario disponer de dos imágenes TM/ETM+ que abarquen un determinado periodo de tiempo, limitado por la resolución temporal de este sensor a un mínimo de 16 días, así como las imágenes MODIS adquiridas en esas mismas fechas.

Dado que el trabajo con altas resoluciones espaciales implica un gran volumen de información, se ha limitado la aplicación de este procedimiento a regiones concretas, con el fin de analizar los tiempos de proceso.

Los pasos necesarios para conseguir imágenes interpoladas son los que se describen a continuación:

1. Descarga de los datos TM/ETM+. Esta operación será necesario efectuarla cada vez que esté disponible una nueva escena de este sensor, que cubra la zona de interés. Dado que cada escena requiere

aproximadamente 216 MB de espacio en disco, por lo que el tiempo de descarga será de unos 9 minutos (suponiendo una velocidad de descarga de 400 kB/s).

2. Descarga de los datos MODIS diarios. La reflectividad MODIS diaria requiere, como se ha mencionado anteriormente, 80 MB de espacio en disco por cada tesela. Como el área de aplicación generalmente estará incluido en una sola, será necesario descargar diariamente 80 MB, lo que supone un tiempo aproximado de 3.5 minutos.
3. Importación de las imágenes al software de proceso. El preproceso de los datos se realiza de forma análoga a la descrita en apartados anteriores, pudiéndose estimar un tiempo medio de 2.5 minutos.
4. Interpolación temporal. Se ha realizado el procedimiento en un área de $30 \times 30 \text{ Km}^2$, obteniéndose unos tiempos de proceso de 6 segundos.

Por tanto, puede estimarse el tiempo necesario para obtener cada imagen interpolada entorno a **7** minutos, descontando el tiempo necesario para descargar y preprocesar las imágenes TM/ETM+, puesto que sólo es necesario realizar la operación al disponer de una nueva imagen (mínimo cada 16 días), como se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Tiempos de cálculo de la interpolación espacial de datos MODIS.

Actividad	Tiempo de proceso (minutos)	Espacio en disco necesario (MB)
Descarga de datos desde el servidor de datos TM. (Sólo cuando sea necesario).	9	216
Preproceso de datos TM. (Sólo cuando sea necesario).	3	12
Descarga de datos desde el servidor de datos MODIS.	3.5	80
Preproceso de datos MODIS.	2.5	52
Interpolación.	0.05	52
Total	9	412

3.6.7. Análisis comparativo.

El conjunto de procedimientos y aplicaciones desarrolladas en este trabajo, presenta una serie de mejoras comparado con otras aplicaciones similares o con otros servicios de obtención de parámetros e índices a partir de información procedente de satélites espaciales.

Entre las mejoras, cabe citar el reducido tiempo de proceso necesario para la obtención de dichos parámetros, dado que todos los procesos se pueden ejecutar de forma totalmente automatizada, sin ningún tipo de intervención por parte del operador.

Otra de las mejoras, es la escalabilidad del modelo, pues no se restringe a una determinada zona, como se ha mostrado anteriormente, pudiendo ser aplicado a zonas de diferente extensión, así como cualquier situación geográfica.

La posibilidad de obtener multitud de índices y variables derivadas de la información radiométrica, así como la posibilidad de acceder a virtualmente todos los productos estándar distribuidos por el *Goddard Space Flight Center*, de la NASA, permite ampliar el número de parámetros que es posible calcular, así como adaptarlos a distintas zonas.

El hecho de que se haya separado el sistema de obtención del de presentación, permite mayor flexibilidad en la actualización de los contenidos, pues ésta se puede llevar a cabo desde cualquier máquina conectada a internet, pues los requisitos de memoria y procesador no son muy exigentes. La principal ventaja derivada de esto es que, en caso de tener un problema con el equipo que se encargue de realizar los cálculos, estos pueden ser, temporalmente, llevados a cabo en cualquier otro, hasta que sea posible solucionar el problema con dicho equipo.

En el apartado de presentación de resultados, la integración de los mismos con el visor cartográfico de Google Maps, elimina, en gran medida, los problemas derivados de la falta de compatibilidad entre diferentes navegadores de internet y sistemas operativos, pues es soportada de forma nativa por los más habituales (Mozilla Firefox, Internet Explorer, Google Chrome y Opera), sin necesidad de instalar programas adicionales.

El hecho de trabajar con MODIS, nos permite aprovechar su elevada resolución temporal y su media resolución espacial, apropiada en trabajos que abarquen regiones extensas pudiendo, además, ser mejorada mediante el procedimiento de interpolación desarrollado y que permite obtener imágenes multispectrales de 30 m de resolución espacial, idéntica a la del sensor *Thematic Mapper*.

El flujo de procesos y las aplicaciones, están diseñadas específicamente para operar con datos procedentes de MODIS, si bien, el sistema es lo suficientemente flexible para aceptar datos procedentes de otros sensores actuales, tales como MERIS o TM, o integrarse con la información adquirida por los futuros sensores *Operational Land Imager*, OLI, sustituto de TM (Irons and Masek, 2006; Behrens, 2009), o del *Visible Infrared Imager Radiometer Suite*, VIIRS, encargado de asegurar la continuidad de las series de datos iniciadas por MODIS (Lee et al., 2006).

Aunque existen algunas páginas que distribuyen índices obtenidos a partir de información adquirida por satélites espaciales, ninguna ofrece un número tan amplio de posibilidades, ni con la misma resolución espacial y/o temporal, así como con un retardo tan pequeño. A continuación se muestran, a modo de ejemplo, algunas páginas españolas e internacionales, pero que distribuyen información global, así como los productos disponibles, que están directamente relacionados con la temática de este trabajo:

- Página web: Agencia Estatal de Meteorología, AEMET.
URL: <http://www.aemet.es>
Descripción de contenidos: En la web de la *Agencia Estatal de Meteorología*, se pueden encontrar como productos derivados de información espacial, un índice de vegetación, obtenido a partir de la combinación de los canales visible e infrarrojo próximo del satélite NOAA-18 (1.1 km de resolución espacial), así como una estimación de la temperatura del agua del mar, obtenida a partir de información procedente de los satélites NOAA-17 y NOAA-18, si bien en ambos casos, la imagen es estática y no está georreferenciada.
- Página web: *Office of Satellite Data Processing and Distribution*, OSDPD.
URL: <http://www.osdpd.noaa.gov/ml/index.html>
Descripción de contenidos: Desde la página de la *Office of Satellite Data Processing and Distribution* es posible acceder a información obtenida a partir de la información adquirida por los satélites de la NOAA y del DPD (*Department Of Defense*), en un ámbito global. En ella, se pueden encontrar algunos índices de vegetación (NDVI y GVI), algunos parámetros relativos a la cubierta de nieve, así como temperaturas del suelo, entre otras. En todos los casos, la resolución espacial es baja (1 km a 50 km), no así la temporal, pues la página se actualiza cada día (Thomas, 2009). Aunque algunos parámetros se distribuyen con una

cobertura global, gran parte de ellos se restringe al continente americano (norte y sur).

- Página web: *Sistema Múltiple de Análisis de los Cultivos por Teledetección*, SIMANCTEL.

URL: http://simanctel.awardspace.com/evi_tseries.html

Descripción de contenidos: La página web del *Sistema Múltiple de Análisis de los Cultivos por Teledetección*, ofrece series temporales del *Enhanced Vegetation Index* obtenido de MODIS, de la región de Andalucía, si bien parece que no se encuentra operativa en la actualidad, mostrándose información obsoleta (Rodríguez Pérez et al., 2005).

- Página web: *Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, CHG*.

URL:

<http://idechg.chguadalquivir.es/geoportal/es/teledeteccion/modis.html>

Descripción de contenidos: En esta web se muestra el valor de series temporales de NDVI en el ámbito territorial de la confederación, obtenidos con los datos suministrados por MODIS (Cifuentes Sánchez and González Rojas, 2010).

- Página web: Google Earth Engine.

URL: <http://earthengine.googlelabs.com>

Descripción de contenidos: Desde esta web, es posible acceder a múltiples datos obtenidos a partir de la información adquirida por MODIS, si bien con un considerable retardo, pues los últimos datos publicados en dicha web tienen una antigüedad mayor a un mes, con respecto a la fecha de consulta. Por otro lado, en el cálculo de las distintas variables, no parecen tener en cuenta los efectos perturbadores de la cubierta nubosa, entre otros. Ésta es, de todas las web analizadas, la que ofrece mayor cantidad de información procedente del sensor MODIS, además de utilizar su propio visor cartográfico, idéntico al utilizado en este trabajo.

- Página web: *Global Land Cover Facility*, GLCF.

URL: <http://glcf.umiacs.umd.edu/>

Descripción de contenidos: Desde este porta, dependiente de la Universidad de Maryland, es posible acceder a diversos parámetros obtenidos a partir de varios sensores espaciales (ASTER, Landsat, MODIS, AVHRR, y GOES), si bien no ofrece una colección que se actualice de forma periódica, presentándose únicamente como cálculos

estáticos. El acceso a los datos se hace a través de un servicio FTP, desde el que es posible su descarga sin coste por parte del usuario.

- Página web: *USGS Global Visualization Viewer*, GloVis.
URL: <http://glovis.usgs.gov/>
Descripción de contenidos: Este completo portal de visualización y descarga de datos procedentes de satélite, proporciona acceso a información registrada por numerosos sensores espaciales. En concreto, dadas las aplicaciones de este trabajo, distribuye los productos estándar precalculados de MODIS, con un breve retardo tras su adquisición (4 días). La distribución se hace en el mismo formato que los datos originales (teselas en formato HDF), sin ningún tipo de proceso adicional.
- Página web: Laboratorio de teledetección de la Universidad de Valladolid, LATUV.
URL: <http://www.latuv.uva.es/modis.html>
Descripción de contenidos: El laboratorio cuenta con una instalación receptora de MODIS propia, que permite el acceso directo a la información adquirida por el sensor, así como su proceso posterior, mediante la implementación de los procedimientos estándar de MODIS, incluyendo dos parámetros, NDVI y Temperatura Superficial, obtenida mediante procedimientos desarrollados por el propio laboratorio. Cuenta además con un visor de imágenes MODIS en el que se muestra una combinación en color verdadero de gran parte de Europa, así como del norte de África. Desde la página, no existe posibilidad de acceso y descarga de los productos obtenidos, ni información acerca de la periodicidad de obtención o de los formatos de distribución de los mismos.
- Página web: Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio, INDUROT.
URL: <http://www.indurot.uniovi.es/paginas/default.aspx>
Descripción de contenidos: Este organismo, dependiente de la Universidad de Oviedo, cuenta con un sistema propio de adquisición de datos MODIS, lo que le permite disponer de los datos crudos directamente adquiridos por el sensor, si bien no están accesibles. La única información a la que es posible acceder, es a una combinación color, en formato JPG, de un mes anterior a la fecha de consulta, no especificándose el modo de acceso al resto de datos, así como a posible productos calculados, formatos, resoluciones, etc.

Se hace notar otra ventaja adicional que se presenta en este trabajo, que es la posibilidad de cambiar rápidamente los procedimientos de obtención de determinadas variables o de añadir otros nuevos efectuando un número mínimo de operaciones, dada la estructura modular del sistema.

En la Tabla 3.4 se reseñan las características principales de las páginas analizadas, junto con la aplicación desarrollada en este trabajo, en cuando al número de parámetros a los que es posible acceder, la frecuencia con la que se actualizan los contenidos, así como la resolución geométrica de los mismos. En ella, se ha utilizado el siguiente código de colores, según el grado de aceptabilidad, de cada aspecto analizado, según los planteamientos de esta investigación:

- Verde: Aceptable.
- Amarillo: Aspecto mejorable.
- Rojo: Aspecto no satisfactorio.

En el caso del número de parámetros disponibles, en este trabajo se puede considerar un número prácticamente ilimitado pues, además de permitir el acceso directo a los productos estándar de MODIS (83 distribuidos por el servidor LANCE-MODIS y 68 por el LP-DAAC), puede programarse la obtención de innumerables índices (en los apartados 1.3.2.4, 1.3.2.5 y 1.3.2.6 se detallan las expresiones para la obtención de 35 de ellos, a partir de los datos adquiridos por MODIS) u operaciones algebraicas de interés entre las distintas capas de información disponibles.

3.7. Resumen del capítulo.

El trabajo llevado a cabo en este capítulo, puede ser resumido en los siguientes puntos:

- Se han definido tanto la estructura general del modelo, como las características principales de los subsistemas que le integran y que permiten la obtención de diversos parámetros biofísicos e indicadores ambientales, con datos multiespectrales procedentes de satélites y otros auxiliares, si fueran necesarios.
- Los resultados obtenidos en las pruebas de rendimiento del modelo, permiten asegurar que es un sistema operativo y que se adapta a los objetivos generales previstos en este trabajo.

Tabla 3.4: Comparativa entre servidores de productos derivados de satélites.

Web	Nº de parámetros suministrados	Frecuencia de actualización de los datos	Resolución geométrica
Desarrollo propio	185	Diaria	30 m - 250 m - 500 m
AEMET	2	Diaria	1.1 km
OSDPD	56	1h - 24h	1km - 50 km
SIMANCTEL	1 (EVI)	–	Puntual
CHG	1 (NDVI)	16 días	250 m
Google Earth Engine	7	Diaria (retardo considerable)	Variable (250 m en adelante)
GLCF	16	No tiene	Variable (250 m en adelante)
GloVis	24	Diaria	Variable (250 m en adelante)
LATUV	25	–	–
INDUROT	1 (Comb. color)	Diaria (1 mes de retardo)	–

- La comparación con otros sistemas de obtención de productos ambientales derivados de información espacial, ha puesto de manifiesto la versatilidad y capacidad de adaptación a diferentes necesidades del sistema propuesto.

Capítulo 4

ENSAYO Y VALIDACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. APLICACIÓN.

4.1. Objetivos parciales.

En este capítulo, se plantean los siguientes objetivos parciales:

1. Comparar los datos radiométricos proporcionados por los sensores TM/ETM+ y MODIS, con el fin de determinar si es posible su integración.
2. Proponer una metodología de interpolación espacio-temporal, que permita la obtención de datos multiespectrales con una alta resolución espacial y temporal, mediante la utilización conjunta de datos adquiridos por TM y por MODIS.
3. Estudiar la influencia que tienen los episodios de lluvia en la obtención de documentos cuantitativos y cualitativos, a partir de datos procedentes de satélite.
4. Analizar las posibles efectos que el método de interpolación propuesto pudiera tener en la obtención de documentos cuantitativos y cualitativos.

4.2. Validación radiométrica de los datos MODIS. Caso práctico 1.

Debido a la diferente naturaleza y resolución de los sensores ETM+ y MODIS, es necesario comprobar los valores de reflectividad para una misma

zona de trabajo a partir de la comparación de imágenes coincidentes. En este trabajo, el producto estándar MODIS que se ha utilizado es el MOD09GQ, reflectividad superficial diaria, con resolución espacial de 250 m.

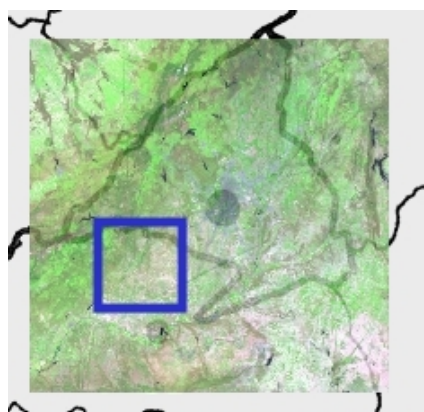
Todos los cálculos y procesos se han realizado con el software SOVMAP, que permite la importación y tratamiento de los datos provenientes de los sensores MODIS y ETM+, entre otros.

4.2.1. Zona de estudio y preproceso de los datos.

Inicialmente, se seleccionó la zona de estudio, atendiendo, entre otros, a criterios de diversidad de cubiertas presentes, ausencia de nubes y disponibilidad de imágenes simultáneas. La zona seleccionada en este análisis se encuentra en el interior de la Península Ibérica, y se trata de un rectángulo de $48 \times 54 \text{ km}^2$, aproximadamente, delimitado por las coordenadas UTM, huso30 y datum WGS84 (366895, 4469197), la esquina superior izquierda, y (414895, 4415197), la esquina inferior derecha (Figura 4.1).



(a) Vista general.



(b) Detalle.

Figura 4.1: Localización del área de estudio.

La zona seleccionada está en la provincia de Toledo, e incluye parte de la cuenca del río Alberche, así como las estribaciones de la Sierra de Gredos. La

vegetación predominante incluye, fundamentalmente, zonas de encinar, pinar, matorral, pastizal, cultivos, de secano (cereal) y, en menor medida, de regadío en las cercanías de los cauces de los ríos, así como suelos desnudos (barbechos), como puede verse en la Figura 4.2.

La imagen ETM+ se corresponde con la p201/r032 (centro peninsular), en el sistema de referenciación de las imágenes Landsat (WRS), del día 22/04/2002 y la imagen MODIS se corresponde con la misma zona y fecha, de forma que es posible el análisis comparativo entre ambas.

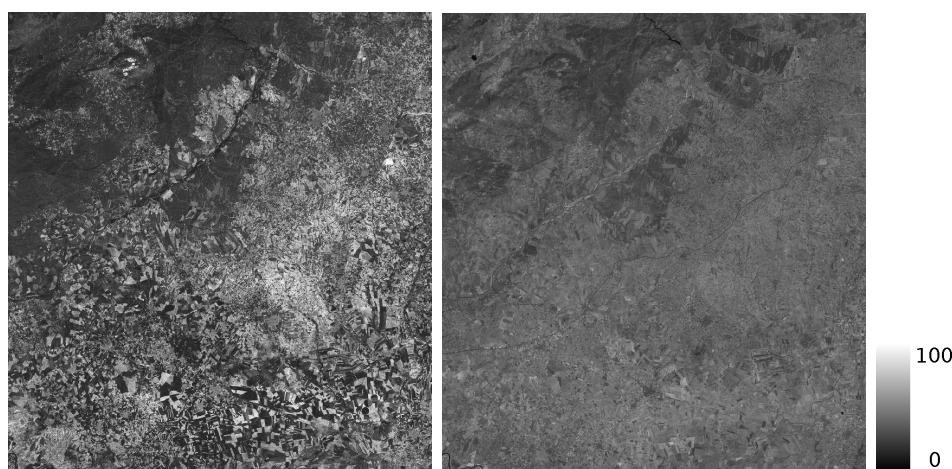


Figura 4.2: Aspecto de la zona de trabajo (Reflectividad en bandas 3 y 4 de ETM+).

La imagen ETM+ se ha descargado del *Global Land Cover Facility*, de la Universidad de Maryland (<http://glcf.umd.edu/index.shtml>), en formato *Tiff* ortorrectificada, junto con los correspondientes metadatos, en formato *ASCII*.

Por otro lado, la imagen MODIS de la zona, se ha obtenido del *Land Processes Distributed Active Archive Center*, LP-DAAC, (<http://edcdaac.usgs.gov/dataproducts.asp>) en formato HDF-EOS. Debido a la división en teselas de los datos distribuidos de MODIS, para formar la imagen, ha sido necesario efectuar el mosaico de las teselas h17v04 y h17v05 y recortar posteriormente la zona de interés.

Puesto que en el análisis se exige que ambas imágenes puedan superponerse, es necesario corregistrarlas rigurosamente. En el caso de la imagen ETM+, tal registro se ha realizado por un ajuste polinómico de grado dos, por medio de puntos de apoyo, cuyas coordenadas se han extraído de la *Infraestructura de Datos Espaciales Española* (IDEE), en sistema ETRS89 (a efectos de este trabajo, equivalente a WGS84), y obteniéndose un EMC de 0.371 píxeles,

mientras que la corrección de la imagen MODIS se ha efectuado con el software MODIS Reprojection Tool (EROS Data Center, 2006), distribuido por el LP-DAAC, que efectúa el cambio de proyección de la sinusoidal a la UTM, en que se distribuyen los datos MOD09GQ, si bien existen otros métodos de cambio de coordenadas como el propuesto por (Gu et al., 2010).

4.2.2. Obtención de datos de referencia.

4.2.2.1. Cálculo de radiancias y reflectividades de la imagen ETM+.

Los valores de la imagen ETM+ son niveles digitales, que es necesario transformar a valores de radiancia y reflectividad para poder compararlos con la imagen MODIS. En el presente trabajo se han considerado únicamente las bandas del rojo y del infrarrojo próximo, dada la importancia de las mismas para estudios ambientales y la mayor resolución de MODIS en ellas.

El cálculo de la radiancia a partir de estos niveles digitales, se hace a través de los coeficientes que se incluyen en los metadatos de la imagen por medio de la conocida expresión (Markham and Barker, 1986)

$$L_{\lambda} = \frac{L_{max_{\lambda}} - L_{min_{\lambda}}}{254} * QCAL + L_{min_{\lambda}} \quad (4.1)$$

siendo $L_{max_{\lambda}}$ y $L_{min_{\lambda}}$, las radiancias máximas y mínimas posibles para la banda, $QCAL$, el nivel digital, y 255 el rango de valores posible en la banda.

Una vez obtenida la radiancia, para calcular la reflectividad, se puede emplear la fórmula (Markham and Barker, 1986)

$$\rho = \frac{\pi * d^2 * (L - L_p)}{\tau_v * ESUN * \cos \theta_S} \quad (4.2)$$

donde:

ρ , es la reflectividad en la superficie.

d^2 , es la distancia Tierra-Sol en la fecha de la toma, al cuadrado.

L , es la radiancia espectral.

L_p , es la radiancia de la atmósfera.

τ_v , Transmitancia a través de la capa de la atmósfera desde la superficie del terreno al sensor.

$ESUN$, Irradiancia espectral solar al exterior de la atmósfera, en $V/(m^2 * \mu m)$.

θ_S , ángulo cenital solar.

La radiancia de la atmósfera, L_p , se calcula por el método DOS (Dark Object Subtraction), y equivale a la radiancia correspondiente a un objeto oscuro en la imagen, generalmente vegetación natural densa o aguas profundas, de la que se supone que su radiancia proviene de la dispersión atmosférica. El coeficiente τ_v tiene un valor para las bandas 1 a 4 de ETM+ de (0.4, 0.78, 0.85 y 0.91) respectivamente (Chavez, 1989), mientras que para las bandas 4 y 7 se supone una transmitancia total.

Todos los valores anteriores pueden extraerse del archivo de metadatos que acompaña a la imagen ETM+, el cuál se encuentra en el formato específico Landsat CPF (*Calibration Parameter File*), cuya estructura se encuentra especificada por Micijevic (2009).

Para el cálculo de radiancias y reflectividades, se ha utilizado la aplicación SOVMAP, que permite procesar modelos de cálculo introducidos por el usuario empleando un lenguaje de modelado específico. El código de dichos modelos se encuentran en los anejos IV.1 y IV.2.

4.2.2.2. Remuestreo de la imagen ETM+.

Puesto que la resolución de la imagen ETM+ es de 30 m y la de MODIS 250 m, es necesario remuestrear la imagen ETM+ para adaptarla a la resolución de MODIS. En este trabajo se ha desarrollado una aplicación que realiza este cálculo. El código de la misma se encuentra en el anejo V.1.

En este proceso, se ha calculado la media, la mediana, la desviación típica y la entropía de una serie de ventanas de la imagen ETM+, equivalentes a 250 m, de forma que los datos procedentes de MODIS y los parámetros calculados en el proceso de remuestreo puedan superponerse. Como resultado se obtiene una imagen de 4 bandas interpoladas a partir de cada una de las dos bandas de ETM+ que se han considerado (R e Ir_P).

En la Tabla (4.1), se muestran estadísticos sobre la reflectividad obtenida a partir de MODIS y la estimada mediante el remuestreo (media) de los datos ETM+.

Tabla 4.1: Comparación de reflectividad MODIS-ETM+ (media).

	B1 MODIS	B3 ETM+	B2 MODIS	B4 ETM+
Máximo	0.3588	0.4026	0.5732	0.5982
Mínimo	0.0200	0.0109	0.0443	0.0207
Media	0.1207	0.1144	0.3344	0.3254
Desv. Est.	0.0511	0.0598	0.0549	0.0605

4.2.3. Análisis de las diferencias.

Una vez realizado el remuestreo por medias de la imagen ETM+, y tras un análisis píxel a píxel, se ha comprobado que existen ciertas diferencias a nivel de reflectividad entre las imágenes. Ello puede ser debido a la respuesta de los sensores a los cambios de reflectividad en los detalles de tamaño inferior a la resolución del mismo. Las diferencias entre la media de la imagen ETM+ y MODIS se muestra en la Tabla 4.2. Como se indicó en la tabla anterior, B1 y B2 corresponden a MODIS y B3 y B4 a ETM+, siendo B1 y B3 del rojo, y B2 y B4 del infrarrojo próximo.

Tabla 4.2: Análisis de las diferencias, en valor absoluto y % de reflectividad.

	B1-B3	B2-B4	B1-B3 (%)	B2-B4 (%)
Máximo	0.2258	0.1790	NC	NC
Mínimo	-0.2529	-0.2059	NC	NC
Media	-0.0010	0.0090	-1.53	1.91
Desv. Est.	0.0339	0.0271	29.47	8.39

A la vista de los resultados (Figura 4.3 y Tabla 4.2), puede apreciarse una relativamente pequeña diferencia media tanto en el canal R (bandas 1 y 3 de MODIS y ETM+, respectivamente), como en el Ir_p (bandas 2 y 4 de MODIS y ETM+, respectivamente), en valores absolutos, que corresponde a diferencias inferiores al 2 % en términos relativos. En la tabla anterior y en las siguientes, NC indica que no se ha considerado el valor en cuestión.

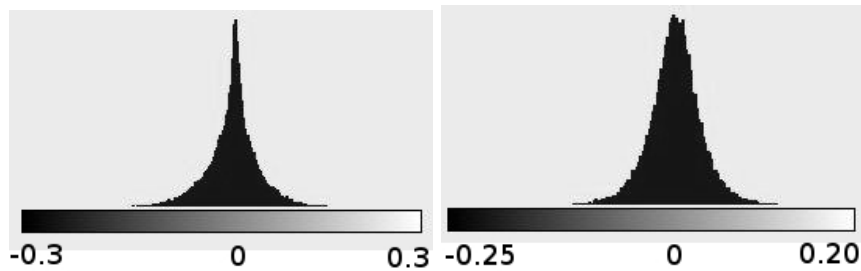


Figura 4.3: Histograma de diferencias debidas al remuestreo. B1-B3 y B2-B4.

Se ha realizado un análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante el procedimiento anterior, promediando la reflectividad de ETM+, hasta alcanzar la resolución de MODIS, con los resultados obtenidos aplicando la metodología propuesta por Liang et al. (2002), expuesta en el apartado 1.3.1.1, basada en predecir la reflectividad de MODIS a partir de la

reflectividad de ETM+ por medio de las siguientes expresiones (sólo se indican las relativas a las bandas consideradas en este estudio):

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,0798 * r_2 + 0,9209 * r_3 \\ R_2 &= 0,1711 * r_1 - 0,2007 * r_2 + 1,0107 * r_4 + 0,0427 * r_5 \end{aligned} \quad (4.3)$$

En la Tabla 4.3, se muestran los parámetros relativos a la aplicación de la metodología propuesta por el autor citado.

Tabla 4.3: Diferencias entre MOD09GQ y la reflectividad predicha, en valor absoluto y %.

	B1-B1p	B2-B2p	B1-B1p (%)	B2-B2p (%)
Máximo	0.1528	0.2254	NC	NC
Mínimo	-0.1973	-0.2020	NC	NC
Media	0.0014	0.0034	2.89	1.21
Desv. Est	0.0269	0.0244	23.79	6.98

Como puede deducirse del análisis de las dos tablas anteriores, los resultados, entre una y otra metodología, son similares, es decir, aparentemente la transformación lineal, no aporta una mejora sustancial en relación con un simple cálculo de las medias, claro es, para el caso de las dos bandas consideradas. Resultado, por otra parte previsible, dadas las características radiométricas de estas bandas.

En la Figura 4.4, se muestra la distribución espacial de las diferencias tanto en el Rojo, como en el Infrarrojo próximo. En ellas se puede distinguir la distribución de zonas homogéneas y otras con cambios más o menos abruptos.

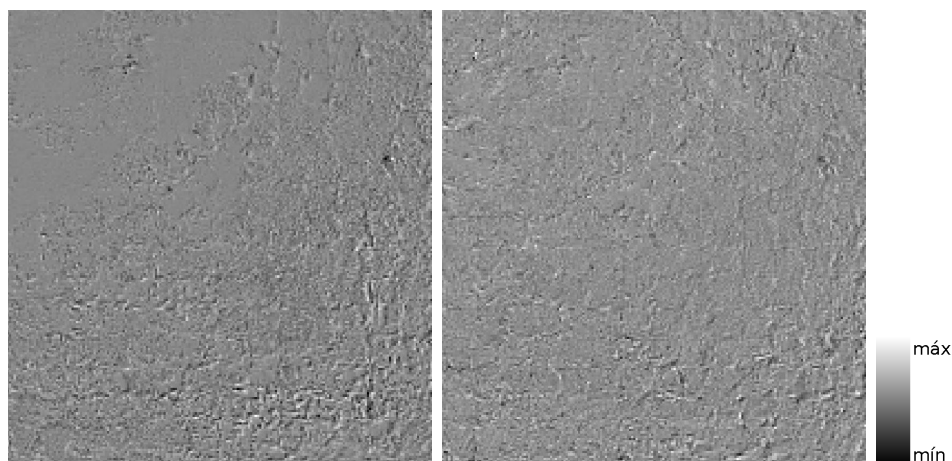


Figura 4.4: Distribución espacial de las diferencias (izq. B1-B3. Dcha. B2-B4).

Se ha estudiado la influencia de la variabilidad espacial de la reflectividad sobre la estimación de los valores de MODIS a partir de ETM+, análisis justificado a la vista de las imágenes anteriores.

En este caso, se han considerado los parámetros *entropía*, *desviación típica* y documento de *altas frecuencias* para analizar la correlación entre éstos y el valor de las diferencias entre las imágenes. La aplicación desarrollada para este trabajo, cuyo código se detalla en el anejo V.1, permite obtener simultáneamente todos los parámetros anteriores.

En teoría de la información, la entropía se utiliza como medida de la cantidad de información que contiene una señal, imagen, o conjunto de datos y está relacionada con la función de densidad de probabilidad de los diferentes valores que pueden tomar cada uno de los elementos presentes en ella. En el caso de una imagen bidimensional, está relacionada, en cierto modo, con la variabilidad espacial de la información, de forma que cuánto mayor sea esta variabilidad, mayor será el valor de la entropía. Para su cálculo, se ha utilizado la fórmula propuesta por Shannon and Weaver (1949):

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (4.4)$$

en donde n , el número de posibles valores (en el caso de imágenes ETM+, $n=255$) y $p(x_i)$ la probabilidad de un cierto valor x_i , mientras que el filtrado de altas frecuencias se ha realizado por medio de un filtro paso alto, empleando la Transformada Rápida de Fourier (*FFT*).

En la obtención de los parámetros indicados anteriormente, se ha procedido de forma idéntica a la comparación de la media y la mediana, dividiendo la imagen ETM+ en ventanas superponibles con MODIS, y obteniendo el valor de la entropía, de la desviación típica, y la media del resultado de un filtrado paso alto, en cada una de tales ventanas, mostrándose los resultados en las figuras 4.5 y 4.6.

En la Tabla 4.4 se exponen los coeficientes de correlación entre parámetros considerados y las diferencias entre las reflectividades estimadas y medidas, tanto para el rojo como para el infrarrojo próximo.

A la vista los anteriores resultados, se observa que la mayor correlación, en valor absoluto, se produce con el documento de altas frecuencias de la imagen ETM+, alcanzando un valor de -0.64 y -0.58, en las bandas del Rojo y del Infrarrojo próximo, respectivamente. Es decir, previsiblemente, tal parámetro tiene una influencia significativa (aproximadamente el 60 %) en la estimación

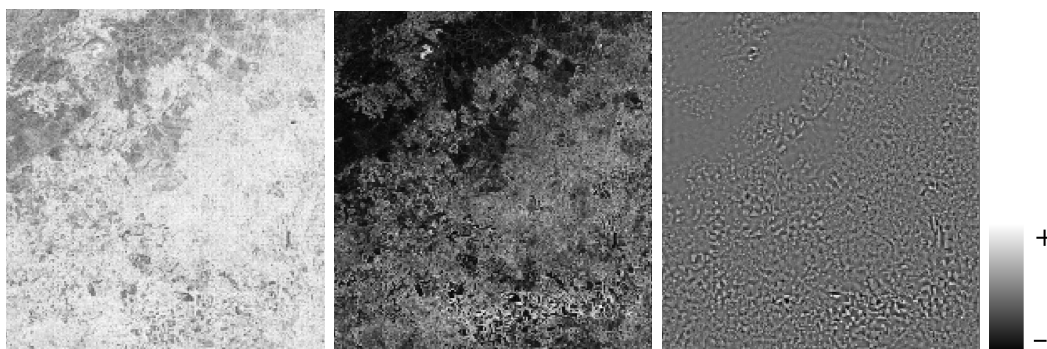


Figura 4.5: Entropía, desviación típica y filtrado paso alto, banda 3, ETM+. Cuanto más claro, mayor es el valor del parámetro representado.

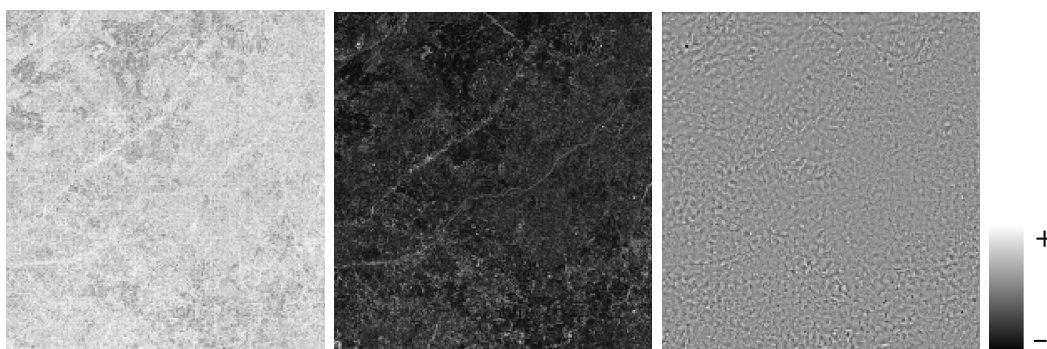


Figura 4.6: Entropía, desviación típica y filtrado paso alto, banda 4, ETM+. Cuanto más claro, mayor es el valor del parámetro representado.

Tabla 4.4: Correlación entre capas.

	Dif B1-B3	Dif B2-B4
MOD09GQ	0.05	0.03
Media ETM+	-0.52	-0.42
Mediana ETM+	-0.54	-0.42
Desv. típ.. ETM+	-0.22	-0.05
Entropía ETM+	-0.25	-0.07
AltFrec. ETM+	-0.64	-0.58

correcta de la reflectividad de MODIS a partir de ETM+. Es de destacar que medidas de dispersión, tales como la desviación típica o la entropía, tienen una escasa influencia en dicha estimación.

4.2.4. Influencia del relieve.

En el análisis comparativo de la reflectividad superficial de MODIS y ETM+, realizado anteriormente, no se ha considerado el efecto de la topografía. Uno de los métodos utilizados para evaluar la influencia del relieve es el método

de corrección del coseno, propuesto por Itten and Meyer (1993), el cual es una aproximación trigonométrica que asume una reflexión lambertiana y que no considera la presencia de atmósfera. Tal influencia es posible obtenerla por medio de la expresión

$$L_H = L_T \frac{\cos(s_z)}{\cos(i)} \quad (4.5)$$

siendo L_H y L_T la radiancia sobre una superficie horizontal y sobre una superficie inclinada, s_z el ángulo cenital solar e i , el ángulo de incidencia del sol respecto a la normal al terreno en el centro del píxel. Analizando el modelo geométrico de incidencia de la radiación electromagnética sobre una determinada superficie, se deduce la siguiente expresión

$$\cos(i) = \cos \theta_0 \cos \beta + \sin \theta_0 \sin \beta \cos(\Phi_0 - A) \quad (4.6)$$

siendo θ_0 el ángulo cenital solar, β el ángulo de la línea de máxima pendiente, Φ_0 el acimut solar y A el ángulo acimutal de la normal al píxel (orientación o aspecto).

Este método de corrección, puede ser implementado en el módulo del programa AritSOV. El código del modelo desarrollado para la obtención de la influencia del terreno en los valores almacenados en una imagen procedente del sensor ETM+, se encuentra detallado en el anejo IV.3.

La corrección del coseno únicamente modeliza la componente directa de la irradiancia. Dado que las zonas menos iluminadas reciben una cantidad considerable de radiación difusa, tales zonas presentan un brillo desproporcionado cuando se corrigen (Itten and Meyer, 1993).

Para evaluar los efectos de la topografía, hemos utilizado el modelo digital del terreno SRTM3 (*Shuttle RADAR Topography Mission*), de 3" de resolución, lo que representa, en la zona de trabajo aproximadamente 76 m x 90 m de tamaño de celda.

La altitud de la zona varía entre un valor máximo de 1755m y un mínimo de 384m, con una media de 568m, para una superficie de unos 2600 km^2 (Figura 4.7).

Las pendientes oscilan entre el 0 % y el 87.8 %, con un valor medio de 4.3 % y una desviación típica de 6.2 %, es decir, se trata de una zona poco accidentada en lo que respecta al relieve, tanto más, si se considera la baja resolución del sensor MODIS (Figura 4.8).

Utilizando el modelo anterior y efectuando los procesos ya descritos con anterioridad, se ha procedido a la obtención de los estadísticos de la

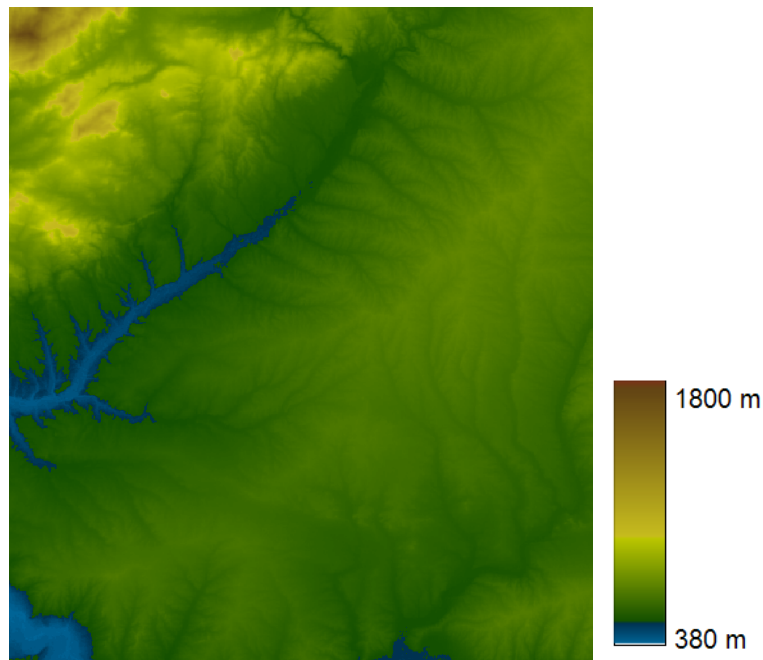


Figura 4.7: Elevaciones de la zona de estudio, según el modelo SRTM3.

reflectividad de las bandas 3 y 4 de ETM+ remuestreadas a la resolución de MODIS (Tabla 4.5).

Comparando los resultados de la anterior tabla con los expuestos en la Tabla 4.1, se observa que los estadísticos son muy similares, probablemente

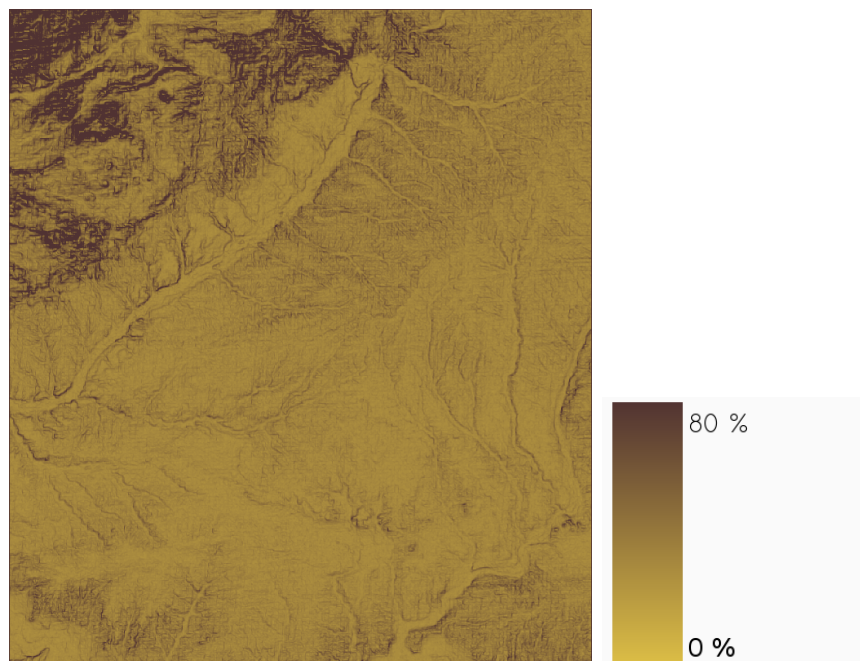


Figura 4.8: Pendientes de la zona de estudio, calculadas a partir del modelo SRTM3.

Tabla 4.5: Estadísticos de la imagen ETM+ remuestreada, con corrección por relieve.

	B3 ETM+	B4 ETM+
Máximo	0.5028	0.7371
Mínimo	-0.0042	0.0073
Media	0.1132	0.3119
Desv. Est.	0.0567	0.0655

debido a que se trata de una zona sin grandes pendientes, en la cual el efecto del relieve queda atenuado por la menor resolución geométrica de MODIS.

4.2.5. Influencia de la ocupación del suelo.

Se ha analizado, así mismo, la influencia de la clase de pertenencia del área en cuestión sobre la estimación de la reflectividad. Para ello, se ha realizado la clasificación no supervisada de la imagen ETM+, agrupando el resultado en tres clases bien diferenciadas: Cultivos (C), suelo desnudo (SD) y vegetación natural (VN). En las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se muestran imágenes del tipo de cubiertas presentes en cada grupo.



Figura 4.9: Zona de cultivos (C). (Fotografías: Google StreetView).



Figura 4.10: Suelo desnudo (SD). (Fotografías: Google StreetView).

El resultado de la clasificación se muestra en la Figura 4.12.

El presente análisis se ha realizado a través de una muestra de píxeles pertenecientes a cada una de las clases, obteniéndose los resultados que se indican en la Tabla 4.6.



Figura 4.11: Vegetación natural (VN). (Fotografías: Google StreetView).

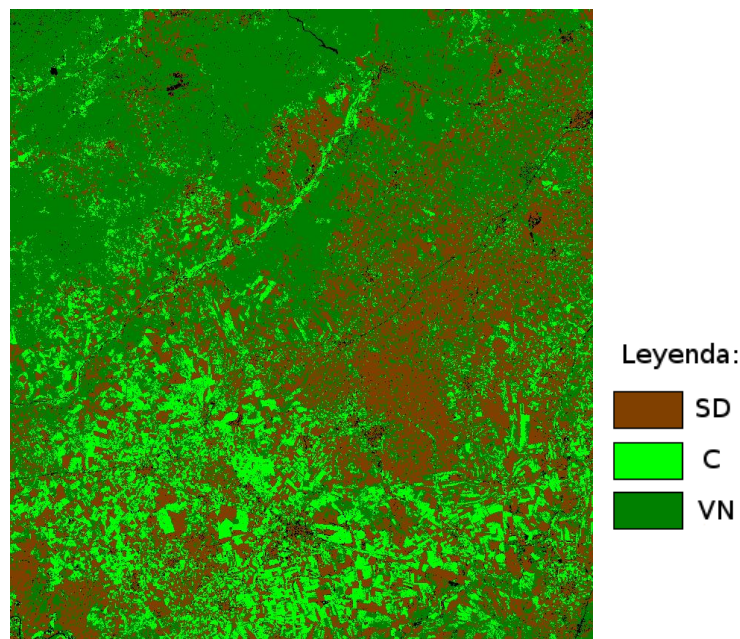


Figura 4.12: Clasificación de la imagen ETM+. *SD*, hace referencia a la clase Suelo Desnudo, *C*, a la de Cultivos y *VN* a la de Vegetación Natural.

Tabla 4.6: Diferencias entre MOD09GQ y estimación ETM+, según la clase de ocupación.

	C-B1	SD-B1	VN-B1	C-B2	SD-B2	VN-B2
Máximo	0.1473	0.0706	0.0329	0.1249	0.0624	0.0541
Mínimo	-0.2143	-0.0569	-0.0130	-0.1303	-0.0826	-0.0110
Media	-0.0039	0.0050	0.0087	0.0122	0.0070	0.0166
Desv. Est.	0.0483	0.0216	0.0086	0.0340	0.0247	0.0156

A la vista de los anteriores valores, la vegetación natural presenta la influencia más negativa, ahora bien, su comportamiento es sistemático dado lo limitado de su desviación estándar. Aparentemente, los cultivos y los suelos desnudos presentan un comportamiento análogo dado el carácter complementario del uno con respecto al otro, en una zona de explotación agrícola.

En la Tabla 4.7 se muestran los coeficientes de correlación entre los parámetros estadísticos citados y las diferencias, según la clase de ocupación del suelo.

Tabla 4.7: Correlación entre estadísticos y clases de ocupación. (B1 y B2 de MODIS)

	C-B1	SD-B1	VN-B1	C-B2	SD-B2	VN-B2
MOD09GQ	0.3200	-0.0752	-0.1710	0.2080	-0.0371	-0.0888
Media ETM+	-0.4114	-0.3724	-0.5970	-0.2407	-0.4471	-0.5264
Mediana ETM+	-0.4088	-0.3927	-0.5831	-0.3028	-0.4454	-0.5050
Desv. Est ETM+	-0.3110	-0.1947	-0.6084	0.1764	-0.1315	-0.0733
Entropía ETM+	-0.2163	-0.1404	-0.5497	0.1026	-0.0637	-0.2505
AltFrec ETM+	-0.6775	-0.6380	-0.7383	-0.6948	-0.4543	-0.4827

Volvemos a constatar que una dificultad para estimar correctamente los valores de MODIS a partir de ETM+ proviene de la existencia de altas frecuencias en la zona considerada, encontrándose tales valores entre un $-45,43\%$ y un $-73,83\%$ de correlación dependiendo de la ocupación del suelo.

4.3. Interpolación espacio-temporal de datos MODIS. Caso práctico 2.

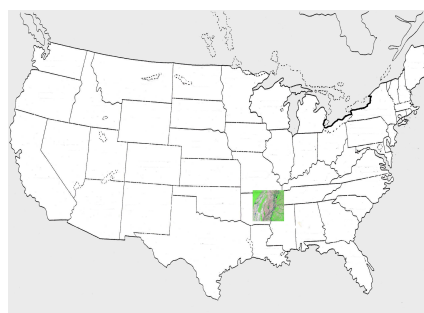
4.3.1. Objetivos.

Mediante el trabajo que se expone a continuación, se ha pretendido obtener una imagen sintética de 30 m de resolución espacial, a partir del producto estándar de MODIS MOD09GQ (reflectividad superficial), cuya resolución espacial es de 250 m y 1 día (2 días en zonas próximas al Ecuador) de resolución temporal, valiéndonos de la información radiométrica aportada por ETM+, de 30 m de resolución espacial y 16 días de resolución temporal, lo cual nos permitiría disponer de datos de reflectividad diaria con 30 m de resolución espacial.

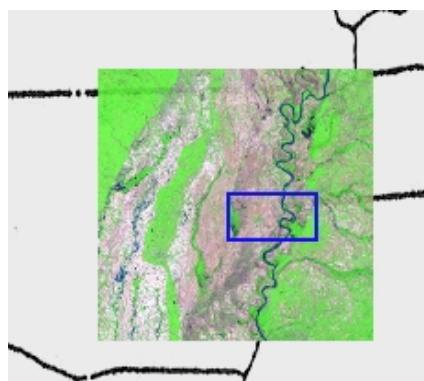
La consecución de los objetivos propuestos exige disponer de dos escenas ETM+ de fechas cercanas con sus imágenes MODIS simultáneas en el tiempo, y otra MODIS de una fecha intermedia entre las citadas. Para validar los resultados, se ha utilizado una escena ETM+, correspondiente a la fecha intermedia.

4.3.2. Zona de control.

Las imágenes seleccionadas corresponden a una zona de Estados Unidos, delimitadas por las coordenadas UTM15, datum WGS84, (771000, 4000930) la esquina superior izquierda y (817920, 3971020), la esquina inferior derecha. La imagen TM en la que está incluida es la p023, r35, según el sistema de referencia Landsat WRS (Figura 2.1). La elección de esta región, ha estado motivada por las características del estudio que se pretende llevar a cabo, y que requieren de la disponibilidad de tres escenas de la misma región adquiridas en el menor intervalo de tiempo posible, que en el caso del sensor TM, es de 32 días entre la primera y la última.



(a) Vista general.



(b) Detalle.

Figura 4.13: Localización del área de estudio.

Junto a los condicionantes temporales, se ha considerado la diversidad de cubiertas, así como los diferentes grados de parcelación de la misma. En este caso, en la imagen se aprecian parcelas de cultivo de tamaño relativamente pequeño en relación con la resolución geométrica de MODIS e incluye, así mismo, zonas urbanas, cauces fluviales y áreas de vegetación natural. En las figuras 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17, se muestran imágenes del tipo de cubiertas presentes en dicha escena.



Figura 4.14: Suelos desnudos o con poca vegetación. (Fotografías: Google StreetView).



Figura 4.15: Áreas urbanas y superficies artificiales. (Fotografía: Google StreetView).

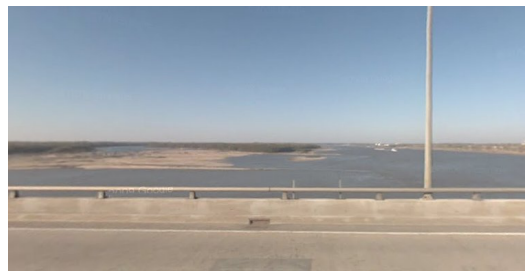


Figura 4.16: Cauces fluviales. (Fotografía: Google StreetView).

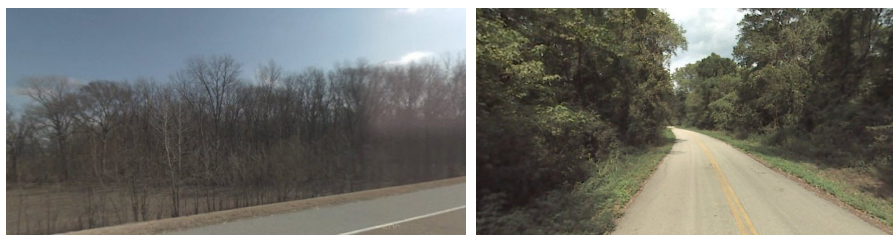


Figura 4.17: Vegetación natural. (Fotografías: Google StreetView).

Las fechas de los datos son el día 14/11/2001, el día 24/12/2001 y el día 02/02/2002. En todas ellas, se dispone de una imagen ETM+ (mostrada en la Figura 4.18) y una MODIS (Figura 4.19) que se remuestrea posteriormente a 30 m, para efectuar el análisis píxel a píxel.

Es necesario que todas las imágenes estén georreferenciadas y sean coincidentes, ya que el análisis se hace píxel a píxel. Para georreferenciar las imágenes ETM+, se han utilizado los metadatos de las mismas, haciendo una

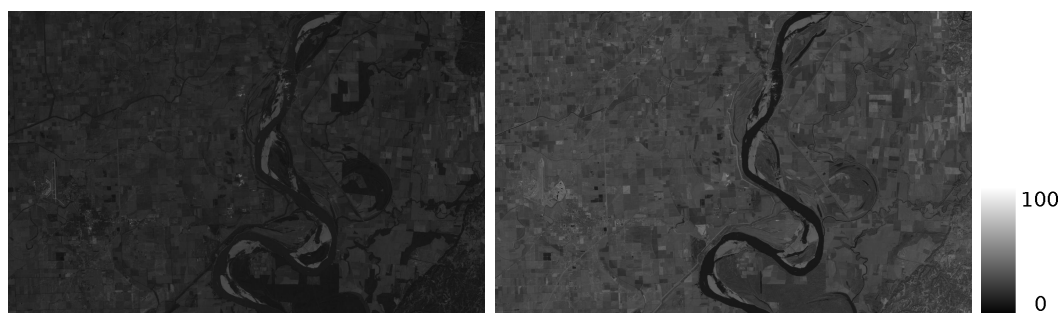


Figura 4.18: Zona de análisis. Reflectividad en Bandas 3 y 4 de la imagen ETM+ (14/11/2001).

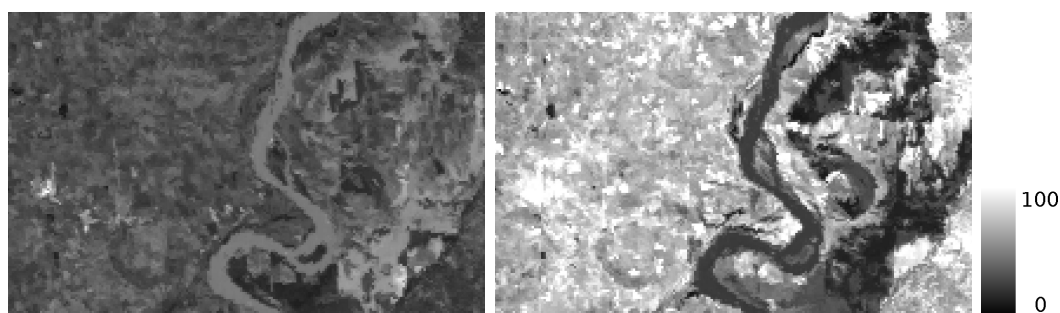


Figura 4.19: Reflectividad en Bandas 1 y 2 de MOD09GQ, remuestreadas a 30 m. (24/12/2001)

comprobación posterior de algunos puntos con la herramienta *NASA World Wind* (Maxwell et al., 2007), mientras que para la georreferenciación de las imágenes MODIS, se ha utilizado el conjunto de aplicaciones MRT (*MODIS Reprojection Tool*). Las imágenes MODIS se distribuyen en proyección sinusoidal y dátum WGS84, siendo necesario transformarlas al sistema de referencia de análisis elegido que, en este caso, se trata de la proyección UTM, huso 15, dátum WGS84.

4.3.3. Aumento de la resolución espacial de MODIS a partir de ETM+.

Inicialmente se hizo el supuesto de que las diferencias entre los píxeles de ETM+ y los de MODIS se mantienen constantes en el tiempo. Partiendo de una imagen tomada en la misma fecha, remuestreando los datos MODIS hasta los 30 m de resolución espacial, procedemos al cálculo de las diferencias. A continuación, se obtiene la imagen de resolución mejorada en la fecha deseada (Figura 4.20), sin más que sumar las diferencias, píxel a píxel, a la imagen MODIS de la fecha en cuestión. Para validar la bondad del proceso, comparamos la imagen obtenida con una ETM+ simultánea en el tiempo.

Al obtener esta imagen, aparecen píxeles con valores negativos, que no tienen significado físico, al tratarse de reflectividades, y surgen como anomalías a la hora de obtener el valor del píxel a partir de las diferencias calculadas con la imagen inicial. Por ello, se ha optado por asignarles el valor 0.000. Tales píxeles con valores negativos suponen aproximadamente el 2.5 % del total. Los estadísticos de esta imagen sintética se muestran en la Tabla 4.8.

En la interpretación de las tablas que siguen, recordemos que B1 y B3 se refieren a las bandas del rojo en MODIS y ETM+ respectivamente, mientras que B2 y B4 se corresponden con el infrarrojo próximo en dichos sensores. El sufijo *s* se refiere a *imagen sintética*.

Tabla 4.8: Estadísticos de la imagen sintética (BXs) sin valores negativos.

	B1s	ETM+ B3	MOD09GQ B1	B2s	ETM+ B4	MOD09GQ B2
Máximo	0.5546	0.7323	0.2148	0.5770	0.9826	0.4557
Mínimo	0.0000	-0.0164	-0.0189	0.0000	-0.0404	0.0136
Media	0.0604	0.0674	0.0743	0.1279	0.1256	0.1322
Desv. Est.	0.0330	0.0268	0.0202	0.0626	0.0709	0.0550

Las diferencias entre la imagen sintética y la ETM+ de control son las que se indican en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Diferencias entre la imagen sintética (BXs) y la reflectividad ETM+.

	B1s-B3	B2s-B4	B1s-B3 (%)	B2s-B4 (%)
Máximo	0.4313	0.5345	NC	NC
Mínimo	-0.5563	-0.8875	NC	NC
Media	-0.0070	0.0021	-11.0	3.5
Desv. Est.	0.0283	0.0510	39.1	63.3

Por otro lado, se ha analizado la correlación entre la imagen sintética generada a partir de la MOD09GQ y la ETM+ de control, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Correlación entre la imagen sintética (BXs) y la ETM+ de control.

	B1s	B3	B2s	B4
B3	0.56	1.00	-	-
B1	0.56	0.57	-	-
B4	-	-	0.72	1.00
B2	-	-	0.76	0.69

A la vista de la tabla anterior, queda de manifiesto que el método de interpolación propuesto anteriormente no mejora la correlación entre la imagen

MODIS, de 250 m y la ETM+ de 30 m de resolución espacial, siendo prácticamente iguales los valores a los existentes entre la imagen original y la sintética.

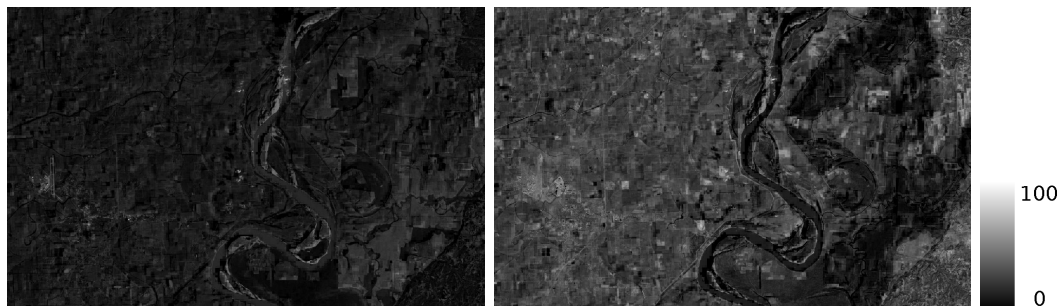


Figura 4.20: Imagen sintética generada. (Reflectividad en Bandas 1 y 2).

4.3.4. Propuesta y validación de un método de interpolación espacio-temporal.

4.3.4.1. Fundamentos teóricos.

En el apartado anterior se ha considerado que la diferencia entre el valor de reflectividad de la imagen ETM+ y la MODIS se mantiene constante en el tiempo. Ésta suposición puede no cumplirse en el caso de píxeles heterogéneos, en los que haya zonas cuyas propiedades radiométricas varíen de forma desigual en el tiempo, por lo que este principio de invarianza de las diferencias no tiene por qué cumplirse. En este trabajo proponemos un método que considera la posibilidad de que la diferencia de reflectividad entre las imágenes ETM+, corregidas por el efecto de las atmósfera, y las del producto MOD09GQ, varíen a lo largo del tiempo y puedan obtenerse por interpolación lineal a partir de dos imágenes ETM+ y MODIS de fechas cercanas, para que se cumpla la condición de linealidad.

Según se deduce de la Figura 4.21, el valor de δ puede obtenerse a partir de la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{\delta_1 - \delta_0}{t_1 - t_0}t + \delta_0 \quad (4.7)$$

siendo δ_0 y δ_1 las diferencias entre el valor de la reflectividad superficial obtenida a partir de ETM+ y la del producto MOD09GQ en las fechas inicial y final, respectivamente, t_0 y t_1 las fechas inicial y final, expresadas en días, y t , la fecha en la que se desea realizar la interpolación.

Puesto que las variaciones de reflectividad a lo largo del tiempo son debidas a múltiples factores, la suposición de linealidad será tanto más ajustada a la

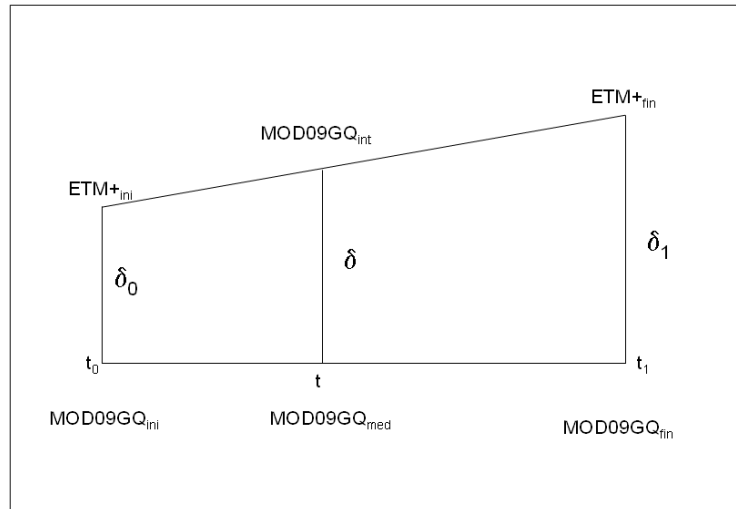


Figura 4.21: Esquema del método de interpolación temporal lineal, propuesto.

real, cuánto menor sea el intervalo de tiempo entre las imágenes ETM+ de control.

La implementación del modelo descrito anteriormente, escrito en el lenguaje de modelado de SOVMAP, se puede encontrar en el anejo IV.4, considerando solamente las bandas 1 y 2 de MODIS.

4.3.4.2. Interpolación y validación del proceso.

El cálculo de la radiancia y reflectividad superficial de las imágenes ETM+ se ha efectuado aplicando las expresiones (4.1) y (4.2). Tras el anterior proceso, es posible calcular las diferencias, δ , entre dicha reflectividad y el producto MOD09GQ, y aplicar la expresión (4.7) para obtener la imagen interpolada a partir de MODIS.

Para validar el proceso de interpolación, utilizamos la imagen ETM+ correspondiente a la fecha intermedia, de forma que se ha obtenido la diferencia entre la reflectividad superficial proveniente de ETM+ con la interpolada a partir de MODIS.

Los estadísticos de la imagen sintética generada se comparan con los de la imagen ETM+ de control y el producto MOD09GQ.

Puesto que en la imagen interpolada aparecen píxeles con valores negativos, al igual que en el caso anterior, se ha procedido a asignar el valor 0.0000 a todos ellos, obteniéndose los resultados mostrados en la tablas (4.11) y 4.12.

Del análisis de la tabla anterior se deduce un aumento de similaridad entre el documento sintético y las correspondientes bandas de ETM+, tal como muestra el referido coeficiente de correlación. Tal aumento se manifiesta

Tabla 4.11: Estadísticos de la imagen sintética (BXs) con el método propuesto.

	B1s	B3	B1	B2s	B4	B2
Máximo	0.3704	0.7323	0.2148	0.4722	0.9826	0.4557
Mínimo	0.0000	-0.0164	-0.0189	0.0000	-0.0404	0.0136
Media	0.0659	0.0674	0.0743	0.1252	0.1256	0.1322
Desv. Est.	0.0269	0.0268	0.0202	0.0592	0.0709	0.0550

Tabla 4.12: Coeficiente de correlación entre la imagen sintética (BXs) y las iniciales.

	B1s	B3	B2s	B4
B3	0.72	1.00	-	-
B1	0.69	0.57	-	-
B4	-	-	0.84	1.00
B2	-	-	0.82	0.69

también en la media y la desviación típica. De manera que puede decirse que dicho documento sintético se parece más a la imagen ETM+ de control que a la propia MODIS remuestreada y tomada simultáneamente con ella. Los coeficientes de correlación son del 72 % en la banda del rojo y del 84 % en la banda del infrarrojo próximo, frente al 57 % y 69 %, respectivamente, de los documentos iniciales.

Las diferencias entre la imagen sintética y la de control se muestran en la Tabla 4.13, en reflectividad y en porcentaje, mostrando una pequeña dispersión de las mismas, como se ve en la Figura 4.22. Los valores calculados, medidos en unidades de reflectividad, concuerdan con los obtenidos por Gao et al. (2006), siguiendo la metodología descrita en el apartado 1.3.1.2, ya que están en el mismo orden de magnitud, e incluso superándolos en algún caso.

Tabla 4.13: Diferencias entre la imagen sintética y la reflectividad ETM+.

	B1s-B3	B2s-B4	B1-B3 (%)	B2-B4 (%)
Máximo	0.2220	0.3392	NC	NC
Mínimo	-0.4660	-0.9120	NC	NC
Media	-0.0015	-0.0006	-3.2	0.2
Desv. Est.	0.0199	0.0393	27.5	48.8

En la Figura 4.23, se muestra el documento sintético obtenido, a partir de la integración de los datos de reflectividad procedentes de MODIS y de ETM+.

En la Figura (4.24), se muestra en detalle una zona de la imagen MODIS original (a la izquierda), y la misma zona en la imagen sintética (a la derecha). Los dos casos que se presentan son ilustrativos de la mejora que se consigue

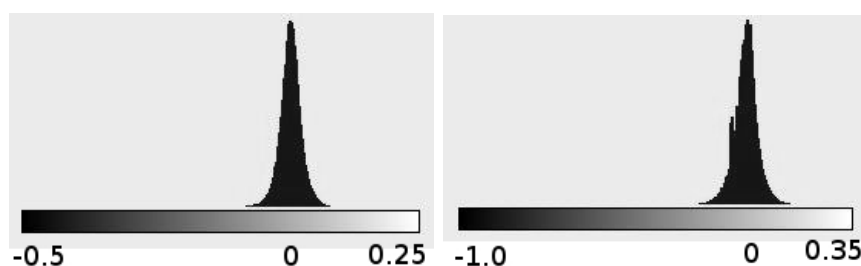


Figura 4.22: Histograma de diferencias de reflectividad entre la imagen sintética y la de control. (Bandas 1 y 2).

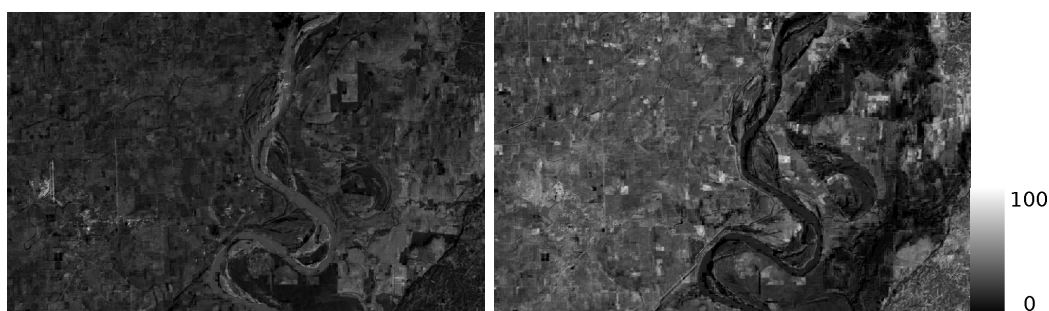


Figura 4.23: Imagen obtenida mediante interpolación. (Reflectividad en Bandas 1 y 2).

mediante el procedimiento propuesto, y que va más allá de la correspondiente a los coeficientes de correlación, por un mejor perfilado de los bordes existentes en la imagen que posibilitan una mejor interpretación de la misma.

En el análisis de la distribución espacial de las diferencias (Figura 4.25), se observa como los mayores valores se producen en zonas de gran variabilidad espacial, así como en zonas en las que tiene lugar un cambio no lineal entre las imágenes ETM+ de los extremos (zona del cauce del río), ya que el presente método de interpolación hace el supuesto de linealidad de la variación entre la imagen ETM+ y la MODIS.

En la Figura 4.26 se muestra un ejemplo de variación no lineal en el tiempo que altera los resultados de la interpolación. Se trata de una crecida del nivel del río que se ha producido entre la imagen inicial y la intermedia, manteniéndose constante este nivel hasta la foto final, lo que produce que el resultado en la imagen interpolada sea erróneo.

4.3.4.3. Análisis de la interpolación por zonas.

Debido al efecto señalado en el apartado anterior, se ha efectuado un análisis de la bondad de la interpolación por zonas, evitando aquellas en las que se produjeran variaciones bruscas de reflectividad.

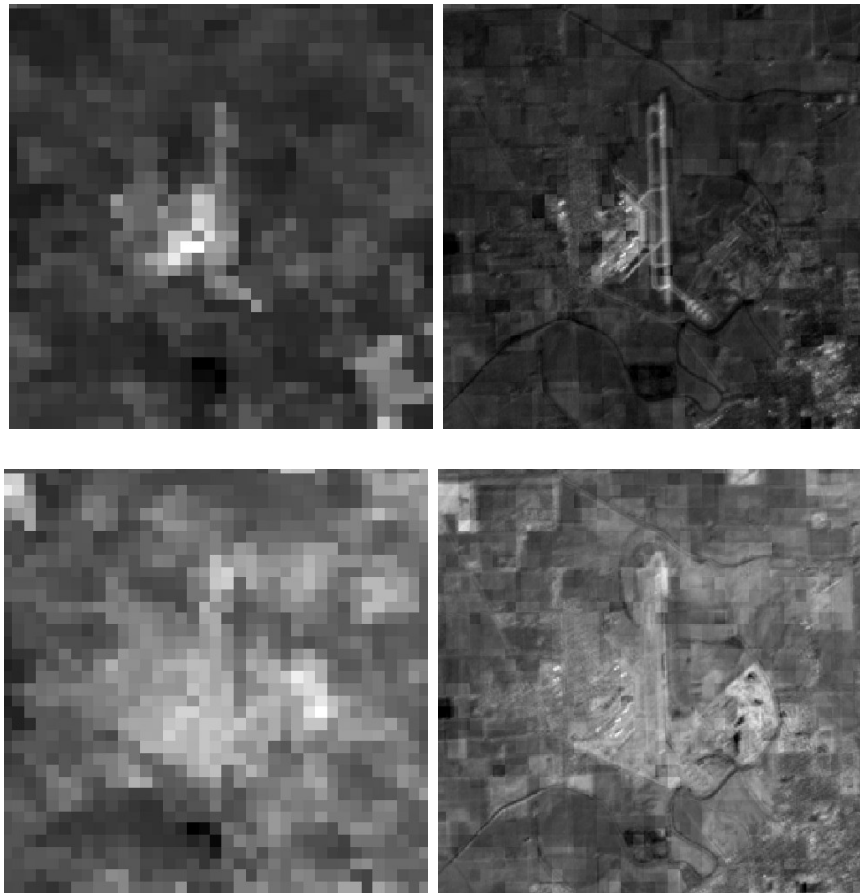


Figura 4.24: Mejora de resolución de la imagen interpolada (derecha), con respecto a la imagen original (izquierda). (B1 arriba; B2 abajo).

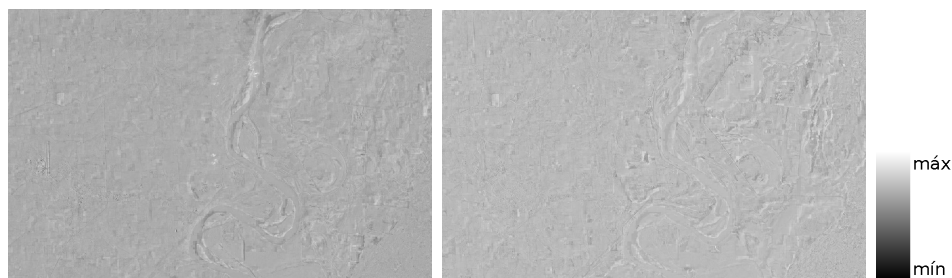


Figura 4.25: Diferencias entre la imagen sintética y la ETM+ de comprobación. (Bandas 1 y 2).

Para ello, hemos considerado las cuatro zonas que se indican a continuación (Figura 4.27), las cuales, además del tipo de ocupación, se diferencian en la variabilidad espacial de la información.

- Zona 1. Predominantemente campos de cultivo.
- Zona 2. Mezcla de campos de cultivo y zonas urbanas.
- Zona 3. Predominantemente vegetación natural.

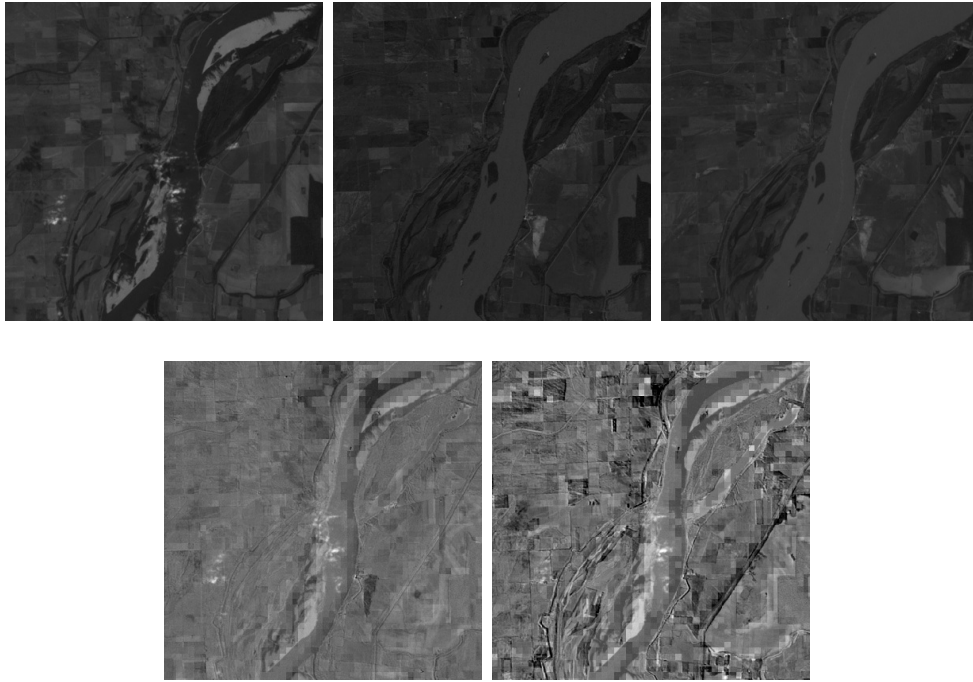


Figura 4.26: Aparición de artefactos en la imagen interpolada (en el cauce del río), como consecuencia de la variación no lineal de la reflectividad entre las imágenes inicial y final.

- Zona 4. Mezcla de vegetación natural y campos de cultivo.

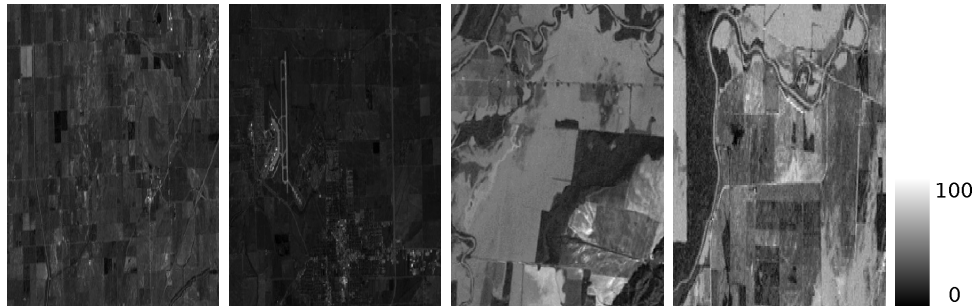


Figura 4.27: Zonas de análisis seleccionadas.

Los estadísticos de la diferencia entre la imagen sintética y la ETM+ de control, así como los coeficientes de correlación para cada una de las diferentes zonas, se muestran en las Tablas 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17.

A la vista de los resultados anteriores (Tabla 4.18), la mayores mejoras a consecuencia de la interpolación, se producen en las zonas 1 y 2, dada su mayor variabilidad espacial y la escasa resolución de MODIS para registrar las correspondientes diferencias. Tal circunstancia se produce en menor cuantía en las zonas 3 y 4, donde la variabilidad espacial es menor y consecuentemente, las diferencias se encuentran mejor adaptadas a la resolución de MODIS.

Tabla 4.14: Estadísticos Zona 1.

	B1s-B3	B2s-B4	B1s-B3 (%)	B2s-B4 (%)
Máximo	0.0908	0.3392	NC	NC
Mínimo	-0.2226	-0.2491	NC	NC
Media	-0.0064	-0.0067	-10.2	-5.1
Desv. Est.	0.0160	0.0319	24.1	21.6

	B1s	B3	B2s	B4
B3	0.60	1.00	-	-
B1	0.58	0.39	-	-
B4	-	-	0.74	1.00
B2	-	-	0.65	0.42

Tabla 4.15: Estadísticos Zona 2.

	B1s-B3	B2s-B4	B1s-B3 (%)	B2s-B4 (%)
Máximo	0.2175	0.2298	NC	NC
Mínimo	-0.4616	-0.4323	NC	NC
Media	-0.0058	-0.0046	-8.6	-3.1
Desv. Est.	0.0215	0.0340	26.9	19.8

	B1s	B3	B2s	B4
B3	0.75	1.00	-	-
B1	0.62	0.45	-	-
B4	-	-	0.80	1.00
B2	-	-	0.72	0.53

Tabla 4.16: Estadísticos Zona 3.

	B1s-B3	B2s-B4	B1s-B3 (%)	B2s-B4 (%)
Máximo	0.1090	0.1594	NC	NC
Mínimo	-0.1559	-0.1960	NC	NC
Media	-0.0008	0.0011	-2.4	-3.1
Desv. Est.	0.0231	0.0380	28.8	74.6

	B1s	B3	B2s	B4
B3	0.79	1.00	-	-
B1	0.69	0.55	-	-
B4	-	-	0.84	1.00
B2	-	-	0.88	0.80

Es de destacar, así mismo, que en las zonas 3 y 4 se obtienen mayores aumentos de correlación en la banda del rojo, que en la del infrarrojo próximo,

Tabla 4.17: Estadísticos Zona 4.

	B1s-B3	B2s-B4	B1s-B3 (%)	B2s-B4 (%)
Máximo	0.0769	0.2581	NC	NC
Mínimo	-0.0825	-0.3646	NC	NC
Media	0.0035	-0.0031	3.1	-5.5
Desv. Est.	0.0185	0.0576	26.0	81.0

	B1s	B3	B2s	B4
B3	0.72	1.00	-	-
B1	0.69	0.51	-	-
B4	-	-	0.76	1.00
B2	-	-	0.85	0.65

Tabla 4.18: Aumento del coeficiente de correlación entre imagen sintética y de control, para las diferentes zonas.

	$\Delta\rho$ B1	$\Delta\rho$ B2
Zona 1	0.21	0.32
Zona 2	0.30	0.27
Zona 3	0.24	0.04
Zona 4	0.21	0.11

dado que en las mismas hay un predominio de áreas de vegetación que, unido a la menor variabilidad espacial, hacen que las características radiométricas de tales áreas (más determinadas por el Ir_P) estén aceptablemente registradas en MODIS.

4.3.4.4. Influencia de la clase de pertenencia en el error de interpolación.

Con el fin de estudiar la influencia de la clase de pertenencia de un píxel en el error debido a la interpolación, se ha procedido a clasificar la imagen ETM+, considerando 5 clases: Agua (Ag), arena (Ar), vegetación natural (VN), suelo desnudo claro (SD I), y suelo desnudo oscuro (SD II). La imagen clasificada se muestra en la Figura (4.28).

La clasificación se ha realizado sobre la imagen ETM+ de la fecha inicial, de forma que los suelos desnudos que aparecen en el cauce del río, dejan de estar presentes en las siguientes imágenes debido al aumento de caudal.

Las firmas espectrales de las 5 clases consideradas se muestran en la Figura 4.29.



Figura 4.28: Ocupación del suelo del área de estudio. Se han considerado 5 clases. Agua, Arena, Vegetación Natural y dos tipos de suelos.

Una vez realizada la clasificación, se han analizado las diferencias entre la imagen sintética y la de control, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla (4.19). Del análisis de dicha tabla, se deduce que los resultados son similares a los de la Tabla (4.13), siendo ligeramente peores los correspondientes a la clase Arena (Ar), ya que dicha clase prácticamente desaparece al crecer el nivel del río. Este hecho confirma los resultados anteriores, en los que ya se expuso el problema que se presenta cuando hay zonas que varían de forma rápida y no lineal entre las imágenes.

Tabla 4.19: Análisis de diferencias, por clase de pertenencia. Bandas 1 y 2.

B1s-B3	Ag	Ar	VN	SD I	SD II
Máximo	0.0774	0.1081	0.0727	0.1178	0.0928
Mínimo	-0.1027	-0.1197	-0.1266	-0.1609	-0.1233
Media	-0.0112	0.0178	-0.0004	-0.0007	-0.0043
Desv. Est.	0.0261	0.0285	0.0182	0.0193	0.0180

B2s-B4	Ag	Ar	VN	SD I	SD II
Máximo	0.1244	0.1571	0.2004	0.2092	0.2024
Mínimo	-0.2157	0.1287	-0.1931	-0.2130	-0.3051
Media	0.0008	0.0171	0.0056	0.0004	-0.0070
Desv. Est.	0.0359	0.0504	0.0356	0.0385	0.0412

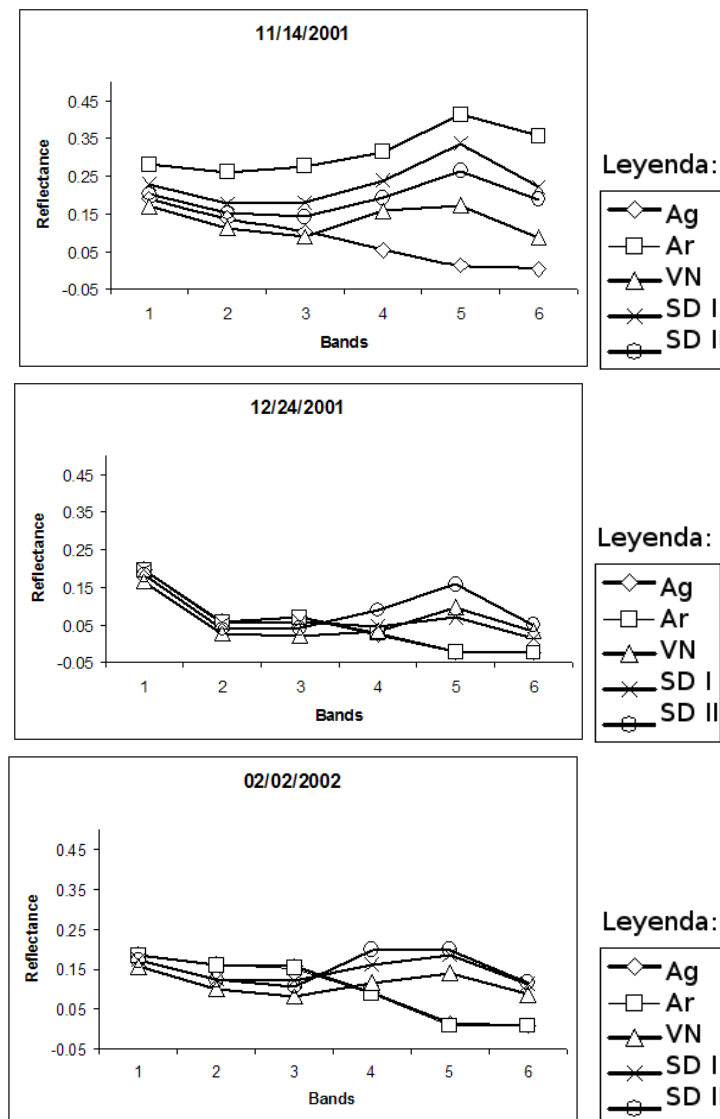


Figura 4.29: Firmas espectrales de las tres fechas consideradas, para cada una de las cubiertas.

4.4. Influencia de la pluviometría en los datos de reflectividad. Caso práctico 3.

4.4.1. Introducción.

En este análisis se ha estudiado la influencia que tienen los episodios de lluvia sobre los valores de reflectividad, así como sobre los índices derivados de éstos. Se han considerado dos casos: el primero, sobre los valores de reflectividad correspondientes a píxeles homogéneos de los que se conoce su cubierta, mientras que en el segundo de los casos, se ha considerado la imagen completa, en la que pueden aparecer píxeles mixtos. Para tal fin, se ha

seleccionado una zona del centro peninsular, situada en la cercanía de la ciudad de Palencia, en la que aparecen diversas cubiertas, entre ellas, vegetación natural, cultivos de regadío y diversos tipos de suelos más o menos desprovistos de vegetación, tales como rastrojos, barbechos, etc. (Figura 4.30). La selección de la zona, se ha efectuado teniendo en cuenta el grado de parcelación, que pueda ser representativo de varias zonas peninsulares, considerando la limitada resolución espacial del sensor MODIS, así como por el conocimiento de los cultivos presentes en las diferentes parcelas y la existencia de un registro de datos meteorológicos de las mismas fechas que las imágenes disponibles.

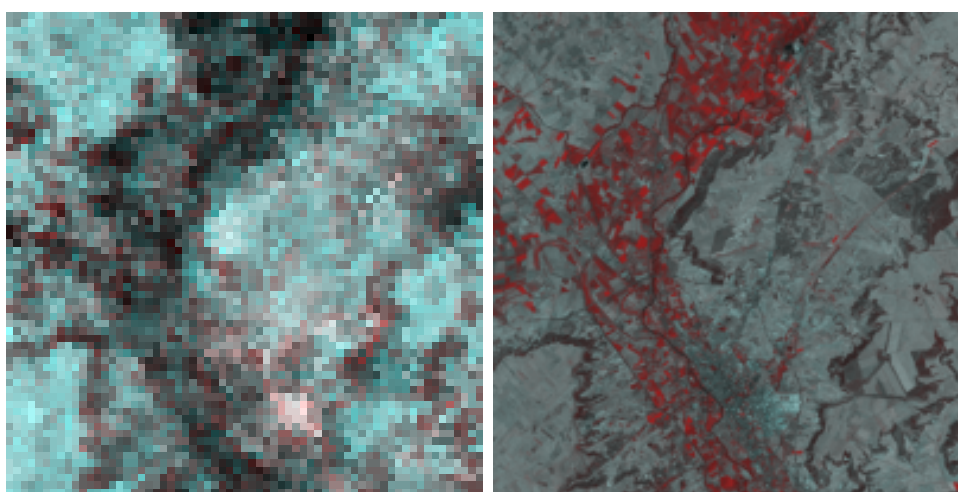


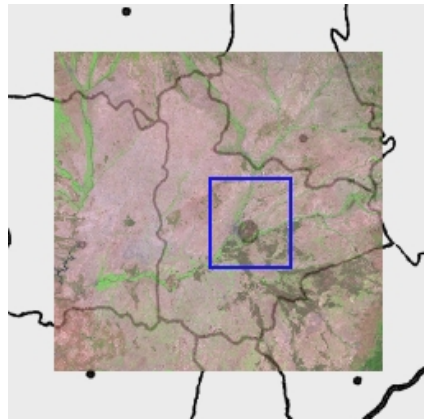
Figura 4.30: Vista general de la zona, MODIS (izq.) y ETM+ (dcha.). Combinación color RGB 432.

4.4.2. Selección del área de estudio.

Para la realización de este estudio, se ha seleccionado una región del centro peninsular, en la provincia de Palencia, en una región delimitada por las coordenadas UTM (356001, 4638650.58) y (391213, 4673794), referidas al Huso 30 y dátum WGS84. En el sistema de referencia establecido para la difusión de las imágenes adquiridas por los satélites Landsat (Figura 2.1), se corresponde con la escena p202, r031. La situación de dicha región se muestra en la Figura 4.31. Como se ve en la Figura 4.30, comprende regiones de cultivos de regadío (situados en la Vega del río Carrión), cultivos de secano y barbechos, así como áreas de vegetación natural y superficies artificiales. La tipología de estas regiones características, se muestra en las figuras 4.32, 4.33 y 4.34, con unos ejemplos representativos de cada una de ellas.



(a) Vista general.



(b) Detalle.

Figura 4.31: Localización del área de estudio.

4.4.3. Muestreo puntual.

4.4.3.1. Identificación de parcelas y clases de ocupación.

Dada la resolución espacial de MODIS, se ha optado por utilizar las imágenes correspondientes a la misma zona, adquiridas con el sensor ETM+, georreferenciadas y de tres fechas diferentes (diciembre de 2006 y febrero y agosto de 2007), con el fin de obtener información adicional sobre el tipo de cubierta vegetal en los puntos seleccionados, a través de su variación estacional.



Figura 4.32: Alrededores de Palencia. Cultivos de regadío. (Fotografías: Google StreetView).



Figura 4.33: Alrededores de Palencia. Cultivos de secano. (Fotografías: Google StreetView).



Figura 4.34: Alrededores de Palencia. Vegetación natural. (Fotografías: Google StreetView).

Las parcelas se han seleccionado según su tamaño y homogeneidad de uso, con el fin de poder identificarlas en el sensor MODIS, así como elegir muestras en su interior, con un entorno homogéneo mayor que el tamaño de píxel de MODIS. Una vez seleccionada una serie de parcelas representativas de las clases de ocupación Laboreo, Regadío y Vegetación natural, se procedió a la elección de muestras (píxeles) con el fin de obtener su perfil espectral tanto en ETM+ como en MODIS, en las tres fechas citadas, como se muestra en la Figura (4.35).

4.4.3.2. Variaciones periódicas de las variables.

Para establecer el comportamiento estacional de las diversas cubiertas, se ha procedido al análisis diacrónico de una serie de datos registrados con MODIS, comprendidos entre el 1 de agosto de 2007 y el 30 de septiembre de ese mismo año, apreciándose una serie de variaciones periódicas a lo largo del intervalo. Entre estas variaciones cabe destacar las debidas a los episodios de lluvia, así como las debidas a la posición del sensor y del sol en el momento de la toma, en relación al área de estudio.

La elección de este intervalo de fechas, está motivado por la presencia de episodios de lluvias breves, cielos despejados, así como temperaturas relativamente altas, que permiten el rápido secado de la superficie tras la lluvia, lo que nos permite cuantificar el efecto de la misma, sobre las variables consideradas.

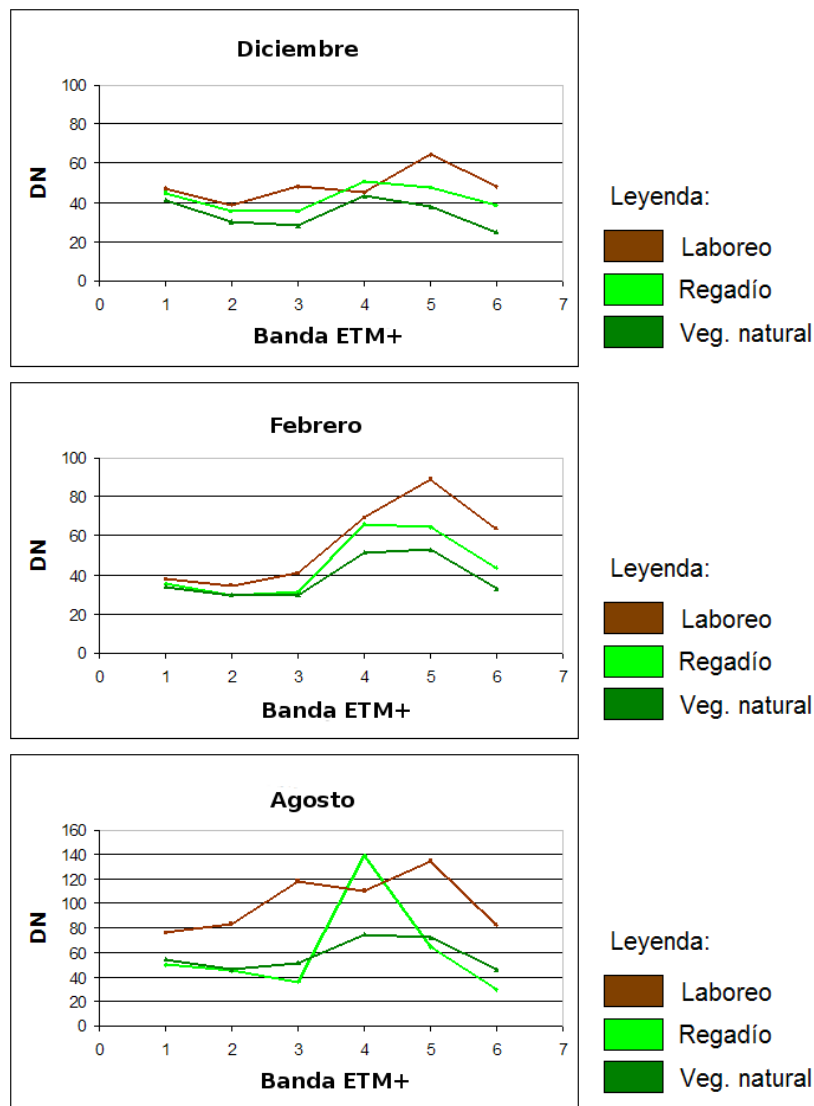


Figura 4.35: Evolución temporal de las perfiles espectrales de las clases seleccionadas, registradas por el sensor ETM+ en los meses de diciembre, febrero y agosto.

Influencia de la posición del sensor y del sol. Se ha verificado que existe una variación de la reflectividad espectral, tanto en la banda 1 (R), como en la banda 2 (IR_p), en coincidencia con la variación de la posición del satélite respecto del objeto debido a que, por la configuración orbital del satélite, éste adquiere imágenes consecutivas alternando periódicamente la posición respecto del objeto.

Debido a ello, no solo se produce una variación en la posición del sensor respecto del objeto, si no también del sol respecto del mismo, ya que no todos los datos se adquieren a la misma hora solar en imágenes consecutivas. Tal circunstancia queda claramente de manifiesto en las figuras 4.36 y 4.37, donde

se muestra la influencia de éstos ángulos cenitales en la reflectividad de las bandas seleccionadas, así como en el valor del NDVI calculado, en función del tipo de cubierta del suelo.

Como se observa en la Figura 4.36, mientras que la reflectividad de las dos bandas cambia siguiendo un patrón periódico, de acuerdo con el ángulo cenital, el NDVI, calculado a partir de datos de reflectividad, muestra un comportamiento mucho más uniforme, lo que indica que, tanto el ángulo cenital del sensor, como el del sol en el momento de la toma de datos, afecta de forma similar a las dos bandas espectrales. Los cambios bruscos de valores del NDVI en las figuras anteriores son debidos a la presencia de nubes, que alteran las medidas de reflectividad.

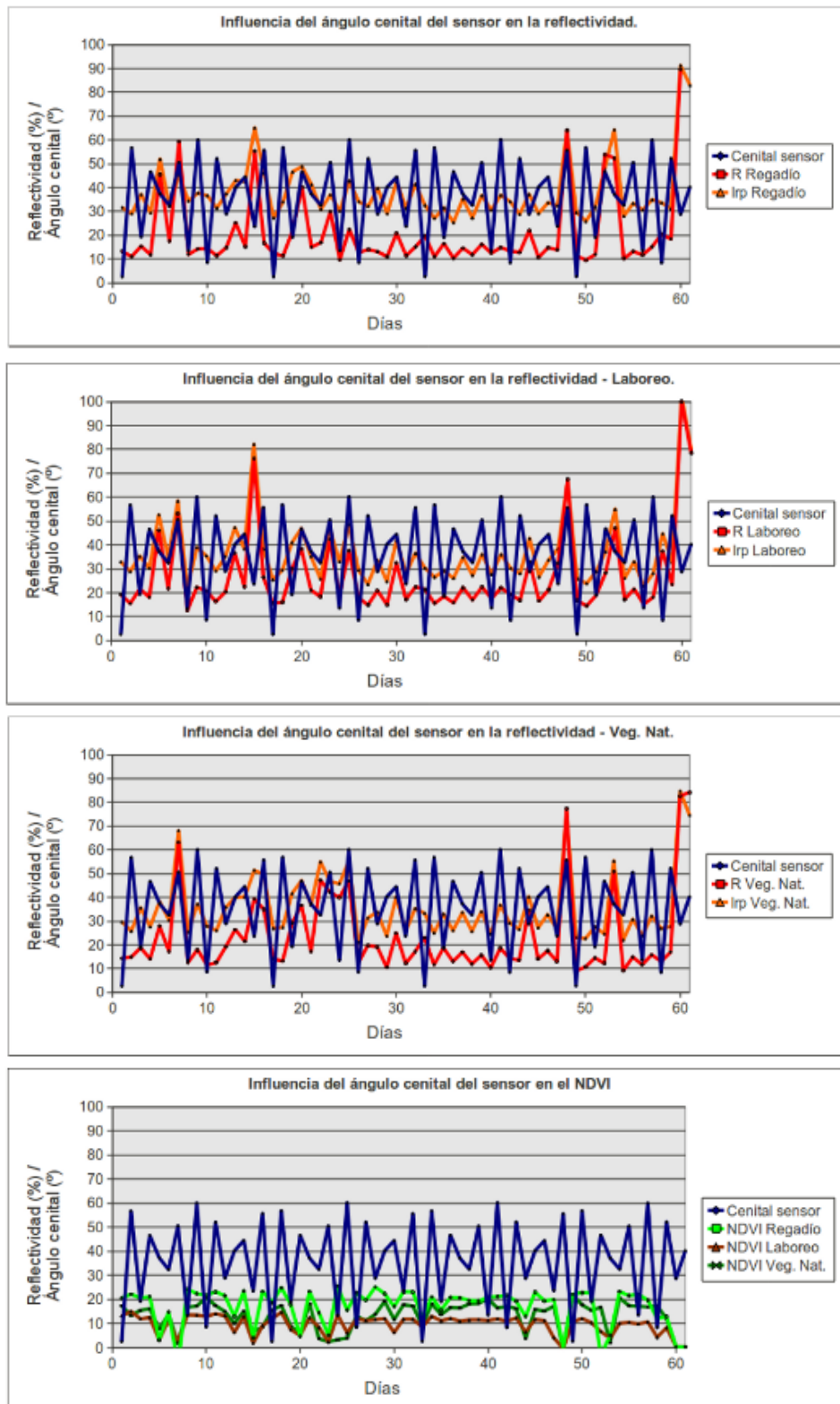


Figura 4.36: Influencia ángulo cenital del sensor en la reflectividad (bandas R e IRp) y en el NDVI, en las diferentes cubiertas analizadas. La reflectividad no se mantiene constante en el periodo considerado, presentando variaciones diarias.

4.4. Influencia de la pluviometría en los datos de reflectividad. Caso práctico 3.

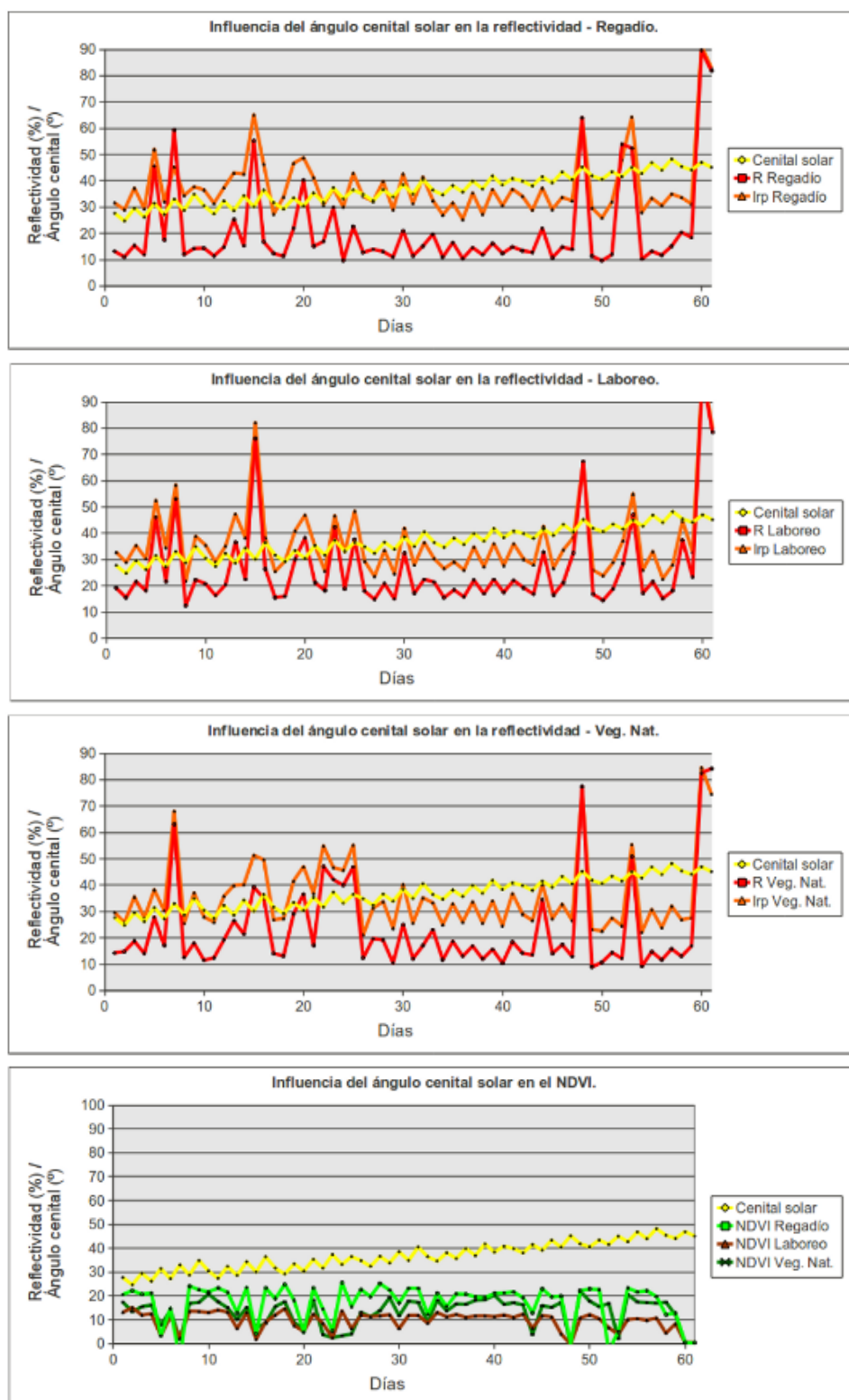


Figura 4.37: Influencia del ángulo cenital solar en la reflectividad (bandas R e IRp) y en el NDVI, en las diferentes cubiertas analizadas. Se observa un patrón de variación de los valores almacenados, en concordancia con la posición del sol en el momento de la toma.

Mediante un análisis de los coeficientes de correlación entre los ángulos cenitales y las reflectividades en las bandas 1 y 2 de MODIS, así como sobre el NDVI, (ver Tabla 4.20) se comprueba la influencia que tiene el ángulo cenital solar sobre la reflectividad, especialmente en el infrarrojo, así como sobre el NDVI, siendo considerablemente menor la ejercida por el ángulo cenital del sensor, en el momento de la toma, de dichos ángulos en las variables analizadas, con independencia del tipo de cubierta.

Tabla 4.20: Coeficientes de correlación entre ángulos cenitales del sensor y solar y la reflectividad o el NDVI.

	Correlación cenital sensor (%)	Correlación cenital solar (%)
NDVI regadío	19.75	-17.25
NDVI laboreo	1.15	-11.02
NDVI veg. nat.	15.24	-12.60
R regadío	-1.56	50.91
R laboreo	4.68	38.16
R veg. nat.	-2.27	45.55
IR regadío	8.94	63.03
IR laboreo	17.65	64.42
IR veg. nat.	9.23	67.23

Influencia de la pluviometría. En el caso de ser necesaria una alta resolución temporal, en el caso de ciertas prácticas de cultivos, se constata que los episodios de lluvia alteran los valores de la reflectividad, en concordancia con lo observado por Kimura et al. (2000), referido a estudios de laboratorio.

Los datos de pluviometría utilizados en este trabajo se obtuvieron del registro del Sistema Inforiego (SIAR) de Castilla y León, en concreto los procedentes de la estación “Villamuriel de Cerrato”, por ser la más próxima a la zona de estudio. Este registro incluye datos diarios de, entre otros, medidas de pluviometría, temperaturas medias, horas de insolación y evapotranspiración.

En las siguientes gráficas se aprecia el efecto que tienen los episodios de lluvia sobre la reflectividad, así como sobre el Índice de Vegetación, según el tipo de cubierta considerada.

4.4. Influencia de la pluviometría en los datos de reflectividad. Caso práctico 3.

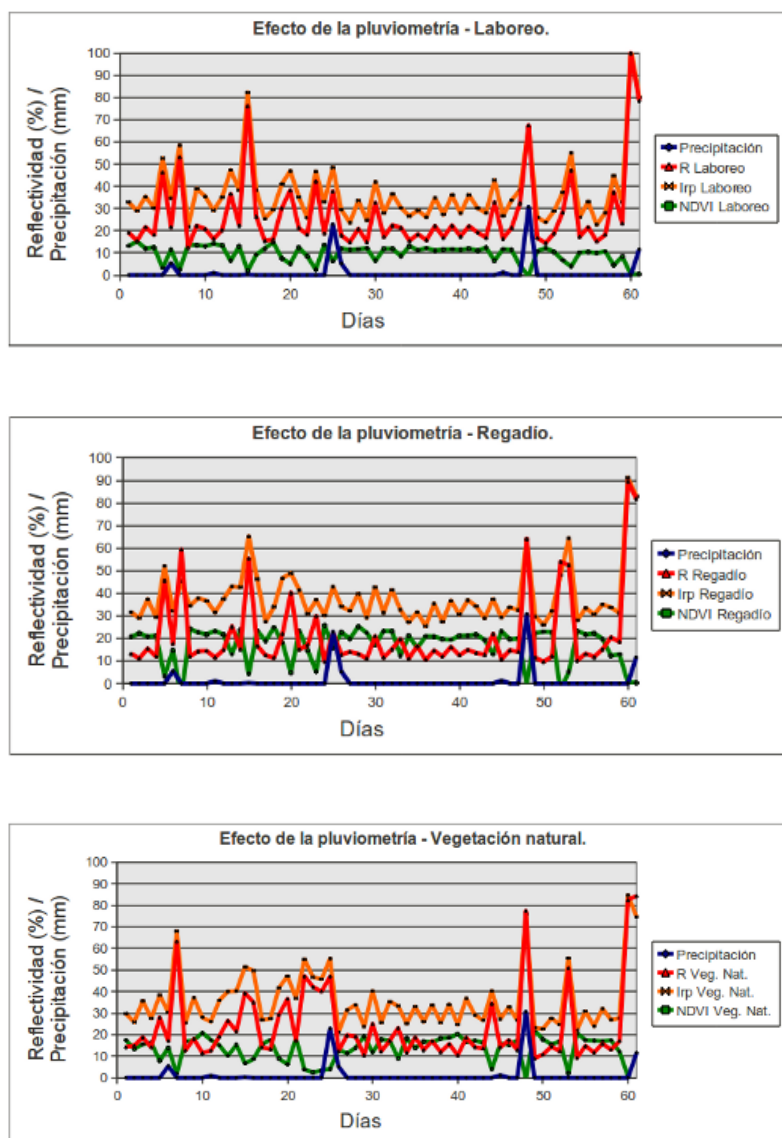


Figura 4.38: Influencia de la pluviometría en la reflectividad, según tipo de cubierta.

En la Figura 4.38, se muestra en color azul la precipitación diaria, así como las reflectividades en el canal rojo, infrarrojo próximo y NDVI para cada día del periodo analizado.

Como se puede comprobar, se producen una serie de cambios bruscos en los valores de reflectividad, debidos algunos de ellos, a la presencia de nubes (picos más altos), y otros menores, debidos a la posición del sensor y del sol en el momento de la toma, y ya analizados anteriormente.

Por otro lado, el comportamiento del NDVI, es más estable, estando afectado principalmente por la presencia de nubes, lo que disminuye su valor.

Con el fin de estudiar la influencia de la pluviometría, el procedimiento seguido ha sido considerar el día despejado inmediatamente anterior al episodio de lluvia, así como los siguientes posteriores, de los cuales, el más cercano al episodio lluvioso se considerará aún con el suelo mojado, y el siguiente, de control, con el suelo seco. Debido al mencionado efecto de la posición del sensor, ambos valores deben tomarse en unas condiciones similares, para poder ser comparables. Así, se han considerado el día 21 de agosto de 2007, como fecha anterior al episodio de lluvia, con el suelo seco, el día 26 de agosto, como día inmediatamente posterior, ya que la precipitación se produjo en la tarde-noche del día 25, por lo que puede considerarse que el suelo está aún húmedo y el día 28 de agosto, como fecha de referencia para considerar de nuevo la cubierta como 'seca'.

Así, con estas consideraciones, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.39 y en la tabla 4.21, agrupados por clase de pertenencia.

Tabla 4.21: Influencia de la pluviometría en las diferentes cubiertas, en cada una de las fechas consideradas.

Laboreo.	$NDVI$	R	IR_p
Anterior (seco)	0.22	23.38	36.71
Inmediato posterior (húmedo)	0.23 ± 0.02	17.77 ± 1.70	28.54 ± 2.08
Siguiente (seco)	0.23	21.88	35.00
Interpolado	0.23	22.95	36.22
Diferencia (absoluta)	-0.01	5.19	7.68
Diferencia (%)	-3.42	29.19	26.91

Regadío.	$NDVI$	R	IR_p
Anterior (seco)	0.47	15.05	41.34
Inmediato posterior (húmedo)	0.45 ± 0.17	12.78 ± 5.79	34.05 ± 8.67
Siguiente (seco)	0.50	13.11	14.149
Interpolado	0.48	14.49	40.89
Diferencia (absoluta)	0.03	1.71	13.38
Diferencia (%)	7.24	13.38	20.09

Vegetación natural	$NDVI$	R	IR_p
Anterior (seco)	0.37	17.17	36.90
Inmediato posterior (húmedo)	0.26 ± 0.07	12.37 ± 2.16	21.14 ± 0.51
Siguiente (seco)	0.28	19.13	33.81
Interpolado	0.34	17.73	36.01
Diferencia (absoluta)	0.08	5.36	14.87
Diferencia (%)	29.29	43.33	70.36

4.4. Influencia de la pluviometría en los datos de reflectividad. Caso práctico 3.

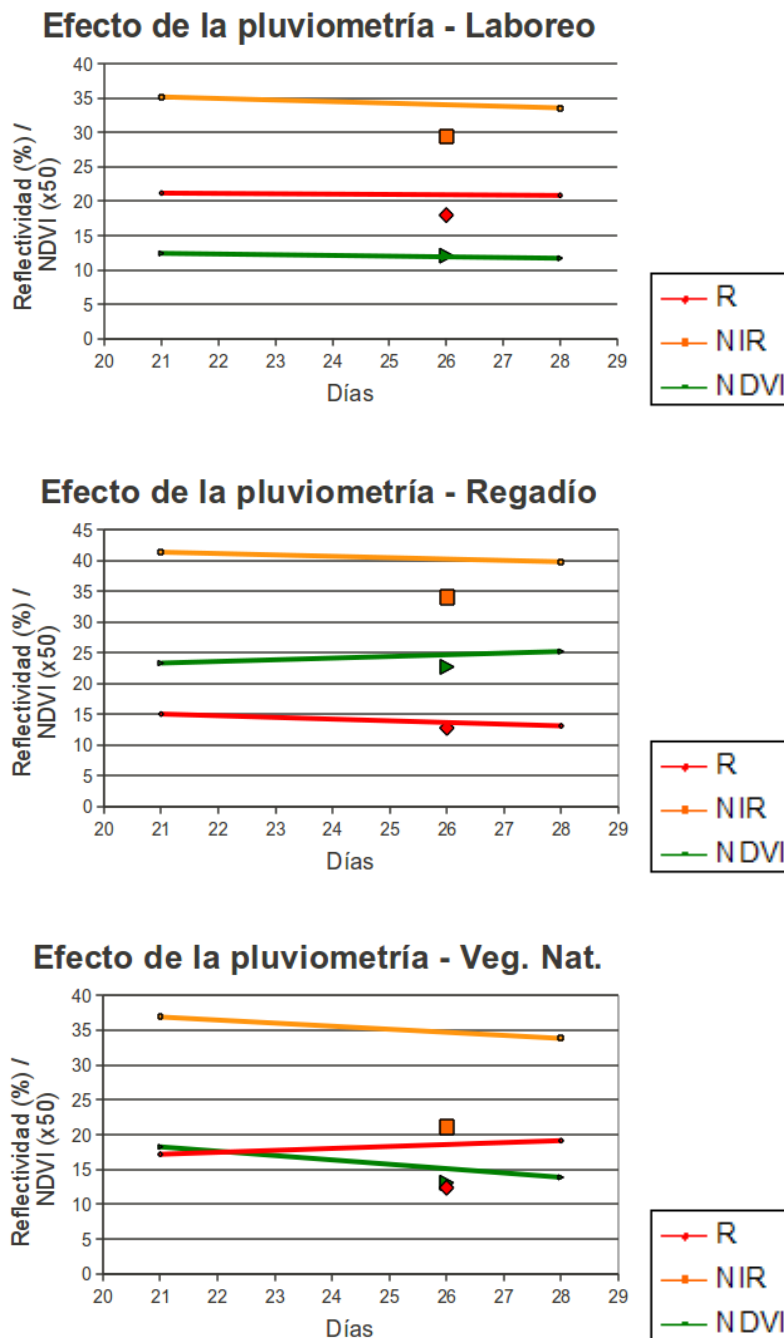


Figura 4.39: Influencia de la pluviometría en las diferentes cubiertas. Se han considerado las bandas Roja (R) e Infrarroja próxima (NIR), así como el NDVI.

A la vista de los anteriores resultados, se confirma que existe un descenso sistemático de la reflectividad superficial provocado por la lluvia, que tiende a desaparecer conforme pasa el tiempo y el suelo vuelve a secarse. Cuantitativamente, este descenso puede ser de hasta un 50 % del valor medido en la banda R y de hasta un 64 % en la Ir_p , siendo esta variación menor en

el caso del *NDVI*, cuya variación puede suponer hasta un 15 % de su valor calculado, según el tipo de cubierta.

4.4.4. Distribución espacial de los datos.

4.4.4.1. Antecedentes.

Con este experimento, lo que se pretende es comprobar el efecto que tienen los episodios de lluvia sobre la respuesta espectral de las diferentes cubiertas presentes en una escena adquirida por el sensor MODIS.

4.4.4.2. Zona de estudio.

Como se mostró en la Figura 4.30, la zona seleccionada se encuentra en las proximidades de la ciudad de Palencia, en la zona centro de la Península Ibérica, en una región delimitada por las coordenadas UTM (356001, 4638650.58) y (391213, 4673794), referidas al Huso 30 y dátum WGS84. Unos ejemplos de las distintas tipologías de cubiertas presentes en ella, se muestran en las figuras 4.32, 4.33 y 4.34.

4.4.4.3. Metodología y datos de partida.

Dado que lo que se pretende es estudiar la influencia que tienen los episodios de lluvia en la identificación de la cobertura del suelo, se ha buscado un día de precipitación aislada, en un periodo de temperaturas altas, con el fin de que el suelo se seque con la mayor rapidez posible y se han seleccionado cuatro imágenes de la misma zona, una anterior a la precipitación, otra al día siguiente (ya con el cielo despejado de nubes), y las otras dos posteriores, con el fin de analizar la evolución temporal.

En este caso, las fechas seleccionadas han sido los días 21, 26 y 28 de agosto y 6 de septiembre. El episodio de lluvia tiene lugar el día 25 de agosto, según los datos meteorológicos disponibles de un pluviómetro incluido dentro de la zona de estudio.

Se han considerado dos conjuntos de datos de reflectividad superficial, procedentes del sensor MODIS: El producto estándar MOD09GA, con información de las 7 bandas de la región óptica, con una resolución espacial de 500 m, y otra mixta, con la misma información anterior, en el que se han sustituido las bandas correspondientes al Rojo e Infrarrojo próximo, por las de 250 m de resolución espacial (producto MOD09GQ).

4.4. Influencia de la pluviometría en los datos de reflectividad. Caso práctico 3.

Con el fin de minimizar sus efectos, las zonas que aparecen cubiertas de nubes en cualquiera de las imágenes han sido excluidas, mediante un proceso de enmascarado, con lo que dichos píxeles quedan fuera del análisis.

En las tablas 4.22 y 4.23 se pueden observar los valores medios, así como las correspondientes desviaciones típicas de las imágenes utilizadas, correspondientes a los productos MOD09GA y MOD09GQ. Tal como se aprecia, tanto los valores medios, como las desviaciones típicas de las bandas 1 y 2, son muy similares en ambos productos.

Tabla 4.22: Características de las imágenes de partida (MOD09GA). Reflectividad media y desviación típica, en cada fecha estudiada.

(a) Medias de las diferentes bandas.

Banda	Fecha (DJ).			
	233	238	240	249
B3	687.63±6.30	636.07±5.56	690.81±6.09	623.34±5.56
B4	1166.54±10.28	1011.34±8.66	1110.79±9.64	1096.79±9.60
B1	1503.74±13.62	1247.05±10.95	1393.13±12.47	1410.54±12.75
B2	2779.48±23.43	2258.91±18.95	2565.22±21.46	2605.66±21.78
B5	3518.95±30.04	2735.15±23.06	3213.27±27.20	3282.32±27.97
B6	3115.20±27.01	2351.52±20.18	2950.39±25.51	3045.32±26.28
B7	1998.28±17.95	1402.98±12.39	1938.51±17.42	2039.69±18.26

(b) Desviaciones típicas.

Banda	Fecha (DJ).			
	233	238	240	249
B3	455.1037	401.5606	439.4561	401.0522
B4	742.2380	625.5621	695.6852	693.0379
B1	983.2424	790.1623	900.1633	920.0936
B2	1691.5862	1368.3446	1549.1439	1572.1428
B5	2168.9055	1664.7301	1963.8473	2019.4484
B6	1949.5852	1456.4828	1841.6880	1897.1176
B7	1292.5834	894.7150	1257.3527	1318.5262

Se observa, así mismo (tablas 4.22a y 4.23a), un descenso sistemático de prácticamente la totalidad de los valores medios de la imagen correspondiente al día juliano 238, debido a que el suelo está aún mojado, apareciendo más “oscura” en la misma.

Tabla 4.23: Características de los datos MOD09GQ, bandas 1 y 2. Media y desviación típica en las cuatro fechas.

Banda	Fecha (DJ).			
	233	238	240	249
B1	1498.27±13.89	1243.86±11.02	1393.36±12.66	1409.80±12.98
B2	2779.92±23.67	2256.51±19.04	2566.77±21.60	2604.13±21.91

(a) Valores Medios de cada banda.

Banda	Fecha (DJ).			
	233	238	240	249
B1	1002.7180	795.3695	913.7256	936.9030
B2	1708.7688	1374.6053	1559.4915	1581.5194

(b) Desviaciones típicas de cada banda.

Proceso de clasificación. La identificación de clases de ocupación del suelo se realizó a través de la interpretación de una imagen de ETM+ de la misma época, por lo que se han definido 4 clases diferenciadas de ocupaciones: Cultivos de regadío, vegetación natural y dos tipos de suelos más o menos desprovistos de vegetación y de un color más o menos claro (Tabla 4.24). La elección de estas cuatro clases viene dada por la limitada resolución espacial de los datos de MODIS (250 - 500 m) y por el grado de parcelación de la zona.

Tabla 4.24: Clases de ocupación consideradas.

Clase de ocupación	Identificación
Cultivo de regadío	C1
Vegetación natural	C2
Suelo desnudo	C3
Suelo desnudo-rastrojo	C4

El procedimiento seguido, consistió en una clasificación preliminar de la imagen correspondiente al día 21 de agosto, a partir de las áreas de entrenamiento seleccionadas en la imagen ETM+. A partir de esta imagen, se realiza un muestreo sistemático de puntos, de tal forma que se obtienen las curvas de valores espectrales de todos los píxeles de la imagen, así como la clase de pertenencia en esta primera clasificación, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 4.40.

Estas curvas de valores fueron sometidas a un proceso de filtrado, con el fin de eliminar las áreas de entrenamiento mal identificadas y obtener la firma espectral representativa de cada una de las clases de interés seleccionadas,

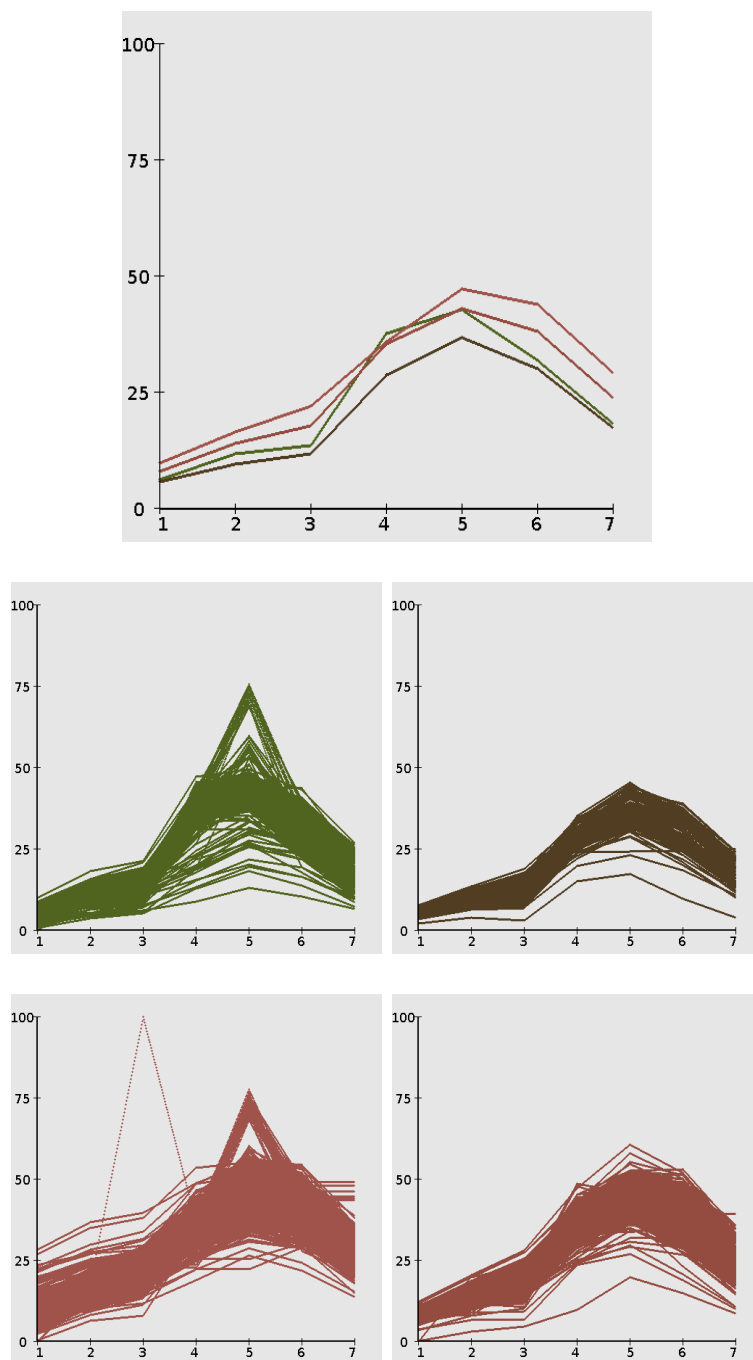


Figura 4.40: Firmas espectrales de la clasificación preliminar (promedios de cada clase en la parte superior y clases individuales en la inferior). Clases C1, C2, C3 y C4. Eje X: Banda MODIS. Eje Y: Reflectividad (%).

de modo que sea posible la obtención de la imagen clasificada. Este método de filtrado está basado en la consideración de un intervalo de amplitud con respecto a la media en cada una de las bandas, así como a la superación por cada uno de los perfiles espectrales, de un umbral mínimo de probabilidad de pertenencia a la clase considerada, resultado de un proceso de clasificación

borrosa (*fuzzy*). Los resultados del filtrado de las firmas espectrales iniciales, son los mostrados en la Figura 4.41.

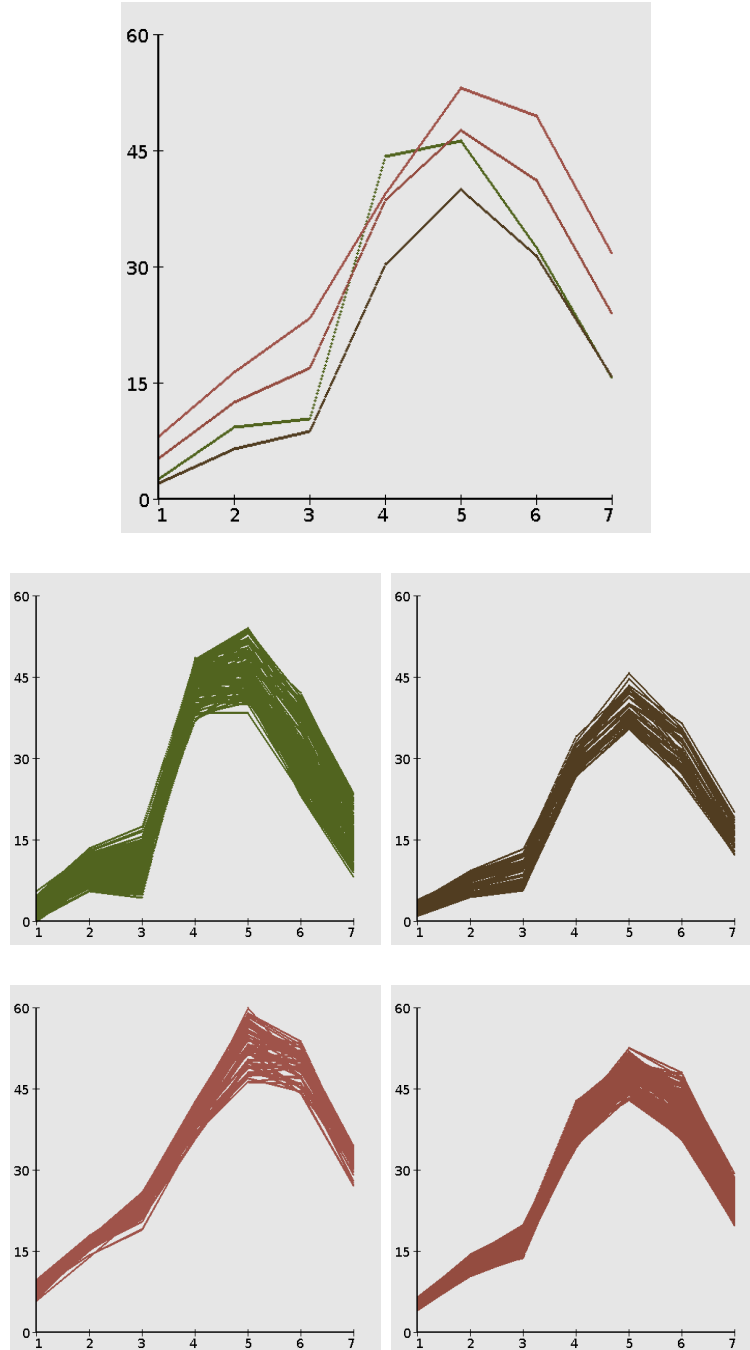


Figura 4.41: Firmas espectrales filtradas (promedios de cada clase en la parte superior y clases individuales en la inferior). Clases C1, C2, C3 y C4. Eje X: Banda MODIS. Eje Y: Reflectividad (%).

Obtención de parámetros biofísicos. Dada el número de parámetros biofísicos de tipo cuantitativo que es posible derivar a partir de datos

procedentes de satélite, se han analizando los efectos que tiene la pluviometría en la obtención de los mismos, concretamente en el cálculo del NDVI, obtenido mediante la expresión

$$NDVI = \frac{Ir_p - R}{Ir_p + R} \quad (4.8)$$

Este análisis se hace, debido a que en el caso de la obtención de documentos de ocupación se utilizan los valores de reflectividad de forma absoluta, mientras que en la obtención de índices se utilizan cocientes entre bandas, que pueden estar afectadas de igual o diferente forma por la pluviometría.

4.4.4.4. Obtención de documentos de ocupación el suelo.

Utilización de datos MOD09GA. En el caso de trabajar con los datos del producto estándar MOD09GA, que incluye la reflectividad superficial en las siete bandas del intervalo óptico de MODIS, con una resolución superficial de 500 m.

Utilizando las curvas de valores digitales mostradas en la Figura 4.41, se procede a la obtención de la imagen clasificada en cada fecha, observándose que tras las precipitaciones, se produce un aumento de la clase “cultivos de regadío”, debida, probablemente, al encharcamiento del suelo que hace desaparecer casi por completo las otras clases (Figura 4.42).

Tal como se muestra en la Tabla 4.25, analizando las matrices de error (Story and Congalton, 1986) de cada una de las clasificaciones y, considerando los píxeles que cambian de clase entre fechas sucesivas (F_i), se observa la influencia de la precipitación en los resultados obtenidos.

A partir de las matrices de error, se obtiene la precisión de la clasificación global, siguiendo la metodología descrita por Story and Congalton (1986), mostrándose los valores resultantes en la tabla 4.26. Los parámetros utilizados son la *precisión del usuario*, la *precisión del productor* y la *precisión global*, que se definen en las ecuaciones siguientes, ya citadas con anterioridad (4.9).

$$\begin{aligned} \text{precisión del usuario}_{Ci} &= \frac{M_{ii}}{\sum_{k=1-n, j=i} (M_{kj})} \\ \text{precisión del usuario}_{Ci} &= \frac{M_{ii}}{\sum_{k=1-n, j=i} (M_{jk})} \\ \text{precisión global} &= \frac{\sum_{i=1-n} M_{ii}}{\sum_{k=1-n, j=1-n} (M_{kj})} \end{aligned} \quad (4.9)$$

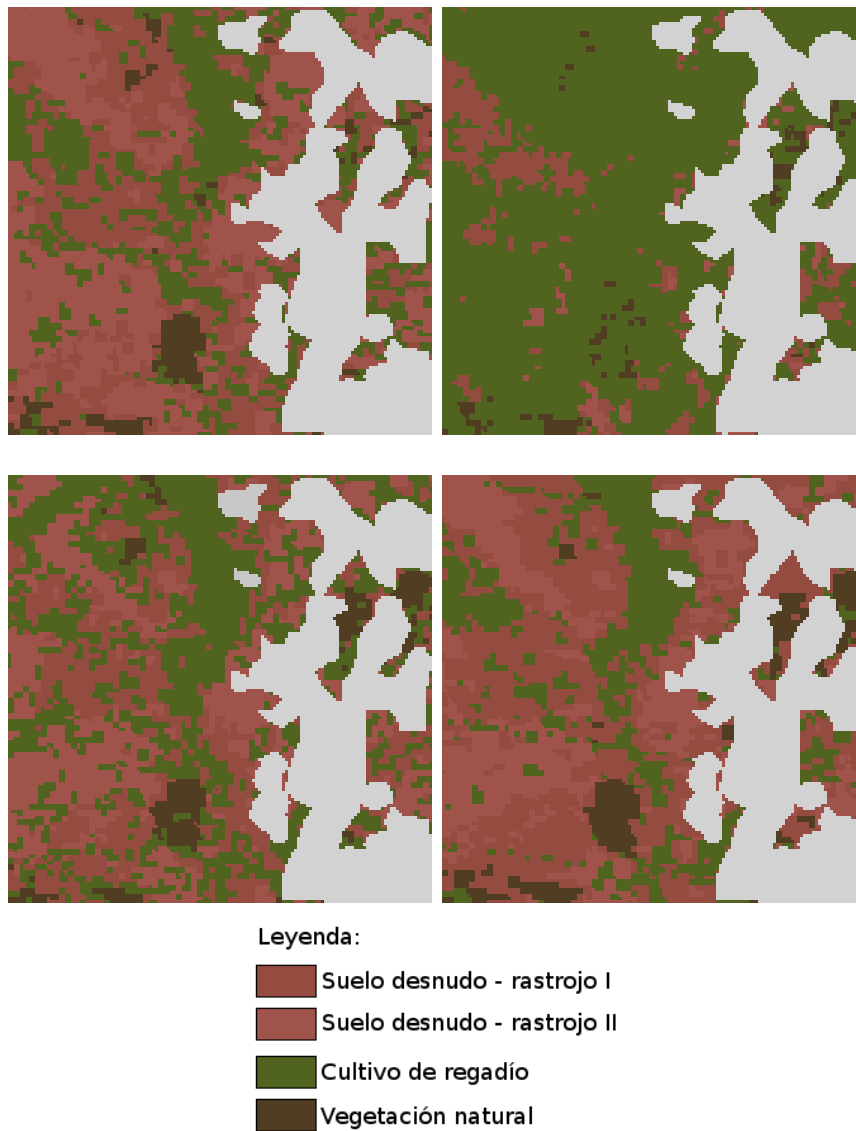


Figura 4.42: Imágenes clasificadas, a partir de los datos MOD09GA, en las cuatro fechas consideradas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.

A la vista de los valores obtenidos en las tablas 4.25 y 4.26, se aprecia que la pluviometría influye negativamente en la identificación de las clases C3 y C4, *suelos desnudos* y *suelos desnudos con restos de vegetación*, respectivamente, que se confunden con la clase *cultivos de regadío* (C1).

Se observa también que, conforme avanza el tiempo, las mencionadas clases C3 y C4 vuelven a distinguirse.

Utilización mixta de datos MOD09GA y MOD09GQ. En este caso, se trata de combinar la información de 500 m de resolución espacial

4.4. Influencia de la pluviometría en los datos de reflectividad. Caso práctico 3.

Tabla 4.25: Matrices de error de la clasificación, empleando los datos procedentes del producto MOD09GA, en las fechas consideradas (Días juliano 233 (F1), 238 (F2), 240 (F3) y 249 (F4).

F1/F2	C1	C2	C3	C4	F1/F3	C1	C2	C3	C4
C1	182	0	0	36	C1	200	1	1	16
C2	45	27	0	0	C2	12	56	0	4
C3	86	0	1	2	C3	13	0	63	10
C4	188	4	1	33	C4	77	11	9	129

F1/F4	C1	C2	C3	C4
C1	188	4	0	26
C2	6	63	0	3
C3	3	0	66	20
C4	65	16	3	142

F2/F3	C1	C2	C3	C4	F2/F4	C1	C2	C3	C4
C1	265	46	70	120	C1	230	54	67	150
C2	7	22	0	2	C2	2	28	0	1
C3	1	0	1	0	C3	0	1	1	0
C4	32	0	2	37	C4	30	0	1	40

F3/F4	C1	C2	C3	C4
C1	223	16	9	57
C2	3	61	0	4
C3	1	0	55	17
C4	35	6	5	113

del producto MOD09GA, con la información de las bandas 1 y 2 (R e Ir_p) respectivamente, adquiridas con 250 m de resolución espacial.

Realizando los procesos descritos anteriormente, se obtienen los documentos de ocupación de suelo mostrados en la Figura 4.43.

Analizando las matrices de error (Story and Congalton, 1986) de cada una de las clasificaciones (Tabla 4.27), considerando los píxeles que cambian de clase entre fechas sucesivas (F_i), se observa la influencia de la precipitación.

A partir de las matrices de error, se obtienen la precisión de la clasificación global, aplicando los parámetros definidos en la expresión 1.45, con los valores mostrados en la Tabla 4.28.

A la vista de los valores obtenidos en las Tablas 4.27 y 4.28, se aprecia que la pluviometría influye negativamente en la identificación de las clases C3 y C4, *suelos desnudos* y *suelos desnudos con restos de vegetación*, respectivamente, que se confunden con la clase *cultivos de regadío* (C1).

Tabla 4.26: Precisión de la clasificación, empleando datos procedentes del producto MOD09GA.

Precisión del usuario (en %)					
Fecha 1	Fecha 2	C1	C2	C3	C4
233	238	83	37	1	14
233	240	91	77	70	57
233	249	86	87	64	72
238	240	52	70	50	52
238	249	45	90	50	56
240	249	73	89	75	71
Precisión del productor (en %)					
Fecha 1	Fecha 2	C1	C2	C3	C4
233	238	36	87	50	46
233	240	65	82	86	81
233	249	71	75	95	74
238	240	86	32	1	23
238	249	87	33	1	20
240	249	85	73	79	59
Precisión global (en %)					
Fecha 1	Fecha 2	Precision			
233	238	40			
233	240	74			
233	249	75			
238	240	53			
238	249	49			
240	249	74			

Se observa también que, conforme avanza el tiempo, las mencionadas clases C3 y C4 vuelven a distinguirse.

4.4.4.5. Obtención de índices cuantitativos.

A partir de MOD09GA. En el cálculo del NDVI a partir de los datos espectrales de 500 m, se puede apreciar que el efecto que tiene la lluvia sobre el valor de índice es menor, si bien apreciable, que en el caso de la obtención de documentos de ocupación del suelo debido, probablemente, a que la influencia de la pluviometría es similar en las dos bandas (véase Figura 4.44 y Tabla 4.29). En la Figura 4.44, las zonas grises representan las áreas cubiertas de nubes en alguna de las cuatro fechas.

En la Figura 4.45, se muestran los valores medios según clase de pertenencia, apreciándose un descenso del valor del NDVI en la imagen

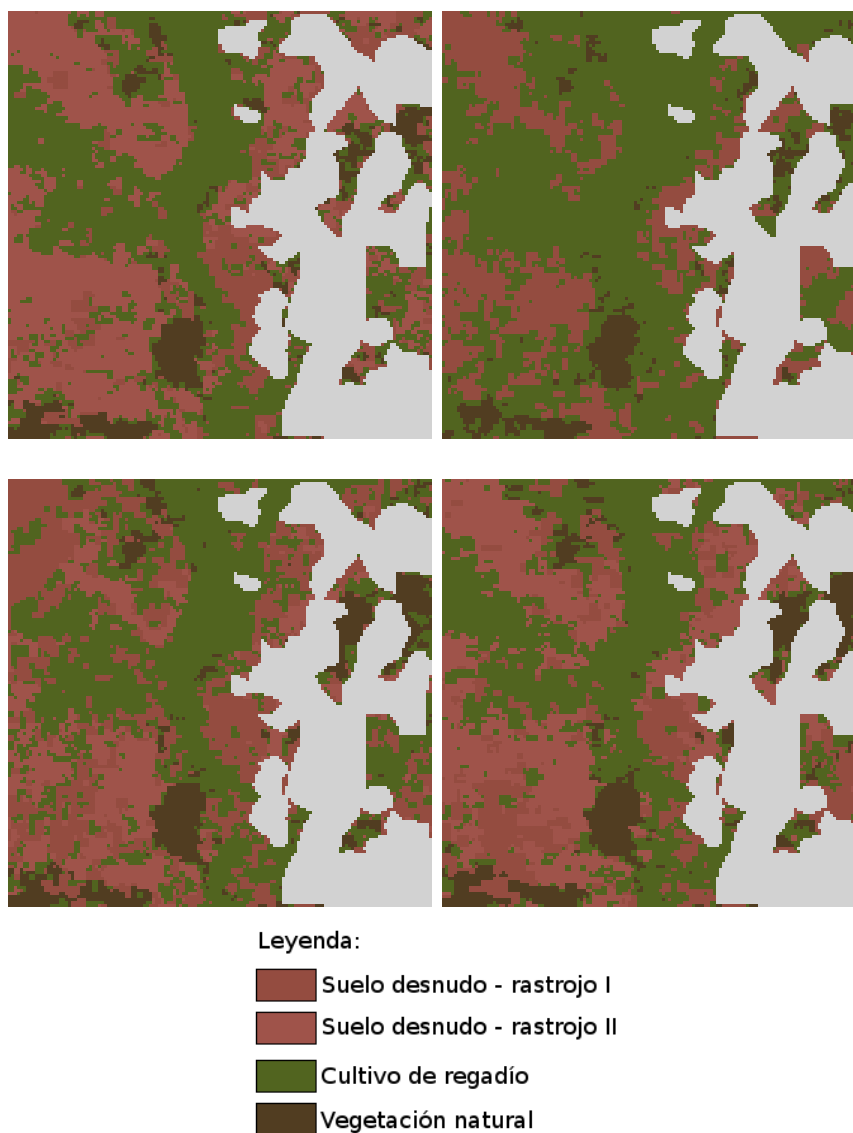


Figura 4.43: Imágenes clasificadas a partir de los datos mixtos MOD09GA y MOD09GQ, en las cuatro fechas seleccionadas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.

correspondiente al día siguiente a la lluvia, especialmente en las clases que presentan algún tipo de cobertura vegetal (C1, C2 y C4).

Si analizamos la evolución temporal de los valores medios, desglosados según la clase de pertenencia (tal como se muestra en la figura 4.45), se obtienen los resultados mostrados en la tabla 4.30.

En ella vemos como las clases más afectadas por la pluviometría son las que tienen cobertura vegetal en mayor o menor medida, probablemente debido a que la lluvia afecta a la respuesta espectral de las cubiertas vegetales.

Tabla 4.27: Matrices de error de la clasificación, empleando los datos procedentes de los productos MOD09GA y MOD09GQ, en las fechas consideradas (Días juliano 233 (F1), 238 (F2), 240 (F3) y 249 (F4).

F1/F2	C1	C2	C3	C4	F1/F3	C1	C2	C3	C4
C1	1573	1	0	21	C1	1497	10	11	77
C2	39	182	0	4	C2	8	213	0	4
C3	1133	10	0	1174	C3	678	6	915	718
C4	86	12	0	27	C4	42	13	1	69

F1/F4	C1	C2	C3	C4
C1	1535	14	13	33
C2	5	220	0	0
C3	295	11	1651	360
C4	34	18	10	63

F2/F3	C1	C2	C3	C4	F2/F4	C1	C2	C3	C4
C1	1920	59	369	483	C1	1478	68	704	311
C2	13	179	0	13	C2	4	190	5	6
C3	0	0	0	0	C3	0	0	0	0
C4	292	4	558	372	C4	117	5	965	139

F3/F4	C1	C2	C3	C4
C1	1603	27	458	137
C2	15	224	0	3
C3	83	4	766	74
C4	168	8	450	242

A partir de MOD09GQ. En el cálculo del NDVI a partir de los datos espectrales de 250 m, se puede apreciar que el efecto que tiene la lluvia sobre el valor de índice es menor que en el caso de la obtención de documentos de ocupación del suelo debido, probablemente, a que la influencia de la pluviometría es similar en las dos bandas, como se puede comprobar en la Figura 4.46 y Tabla 4.31.

Si analizamos el comportamiento de los valores medios, desglosados según la clase de pertenencia (tal como se muestra en la figura 4.47), obtenemos los resultados mostrados en la Tabla 4.32.

En la tabla anterior, se puede comprobar como el valor del NDVI desciende en la imagen inmediatamente posterior al episodio de lluvia, especialmente en las clases que tienen algo de cobertura vegetal (C1, C2 y C4), no apreciándose un cambio de valor significativo en el suelo desnudo.

4.4. Influencia de la pluviometría en los datos de reflectividad. Caso práctico 3.

Tabla 4.28: Precisión de la clasificación obtenida a partir de los datos MOD09GA y MOD09GQ.

Precisión del usuario (en %)					
Fecha 1	Fecha 2	C1	C2	C3	C4
233	238	98	80	0	21
233	240	93	94	39	55
233	249	96	97	71	50
238	240	67	87	0	30
238	249	61	92	0	11
240	249	72	92	82	27
Precisión del productor (en %)					
Fecha 1	Fecha 2	C1	C2	C3	C4
233	238	55	88	0	2
233	240	67	88	98	7
233	249	82	83	98	13
238	240	86	73	0	42
238	249	93	72	0	30
240	249	85	85	45	53
Precisión global (en %)					
Fecha 1	Fecha 2	Precision			
233	238	41			
233	240	63			
233	249	81			
238	240	57			
238	249	48			
240	249	66			

Tabla 4.29: Valores del NDVI, calculado a partir de MOD09GA.

	Fecha (DJ)			
	233	238	240	249
$\bar{x}_{NDVI}$	0.3949±0.0101	0.3620±0.0138	0.3846±0.0152	0.3841±0.0128
σ_{NDVI}	0.1267	0.1142	0.1301	0.1267

4.4.4.6. Obtención del índice de estrés hídrico.

Dado que la finalidad es determinar la influencia que tienen los episodios de lluvia sobre la obtención de índices cuantitativos, se ha considerado también un índice que está directamente relacionado con el contenido de humedad de la vegetación, tal como el índice de estrés hídrico, *Moisture Stress Index*, (MSI), el cuál se obtiene mediante la expresión (Rock et al., 1986; Vogelmann and Rock, 1985)

$$MSI = \frac{R_{1,6}}{R_{0,8}} \quad (4.10)$$

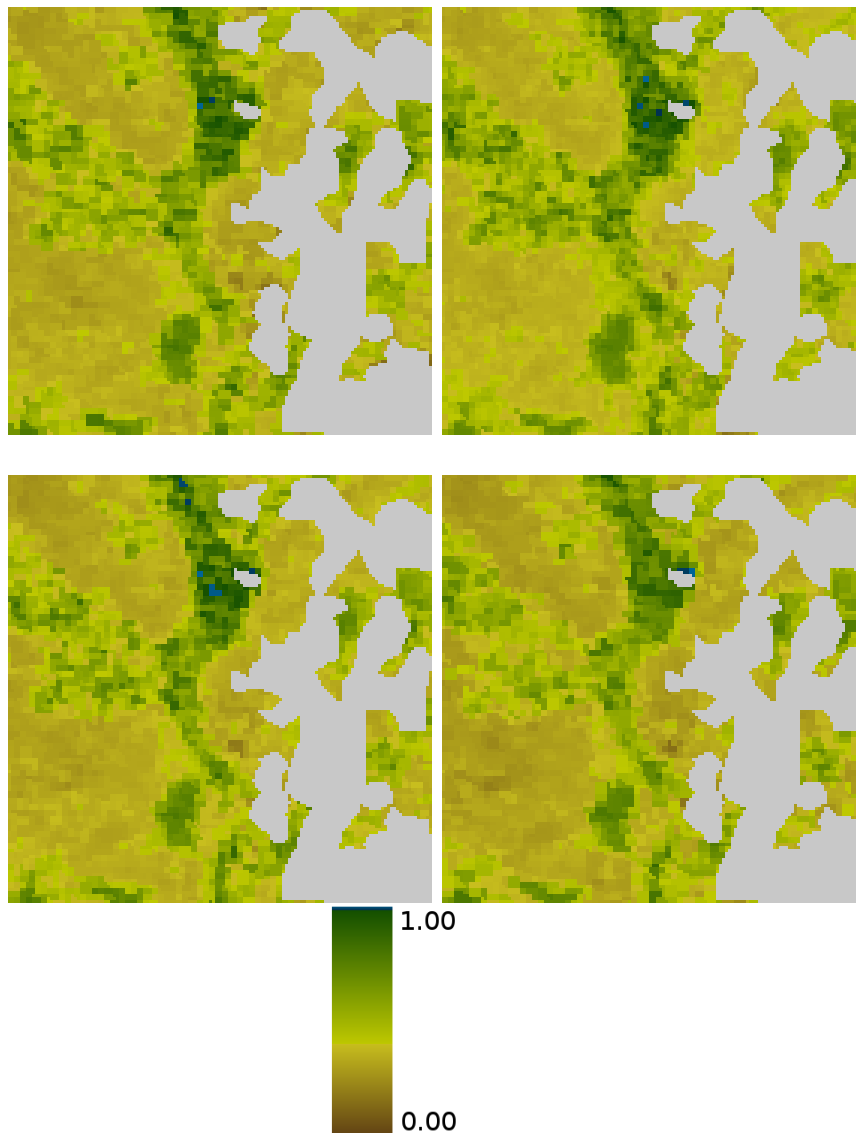


Figura 4.44: NDVI obtenido a partir del producto MOD09GA, en las diferentes fechas analizadas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.

siendo $R_{1,6}$ y $R_{0,8}$ las reflectividades en las longitudes de onda de $1.6\mu m$ y $0.8\mu m$ que en el caso de utilizar el sensor MODIS, se refieren a las bandas 2 y 6.

A partir de MOD09GA. En el caso de trabajar sólo con datos procedentes del producto MOD09GA, de 500 m de resolución espacial, los resultados que se obtienen en cada una de las cuatro fechas analizadas son los que se muestran en la Figura 4.48.

Si consideramos los valores, independientemente de la clase a la que estén asignados, como en los apartados anteriores, obtenemos los valores reseñados en la Tabla 4.33.

4.4. Influencia de la pluviometría en los datos de reflectividad. Caso práctico 3.

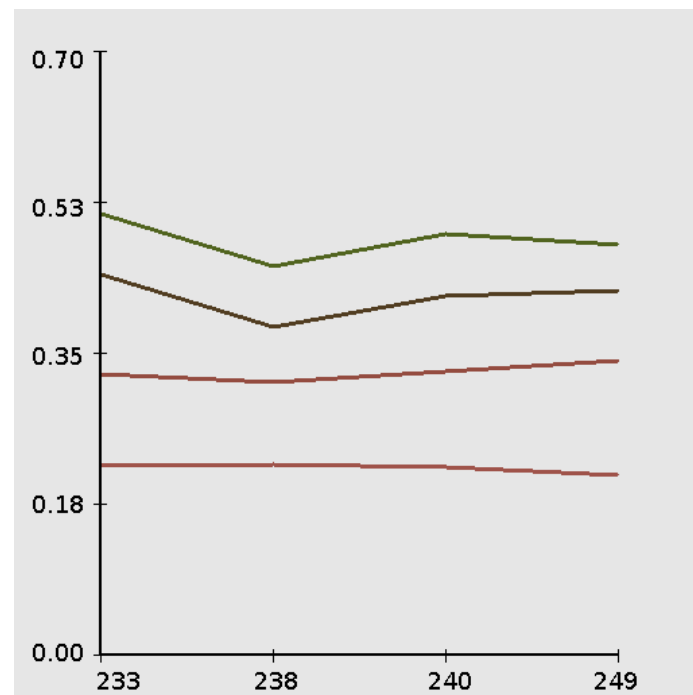


Figura 4.45: Evolución NDVI, calculado a partir de los datos MOD09GA, según clases de pertenencia. Eje X: Fecha (DJ). Eje Y: Valor NDVI.

Tabla 4.30: NDVI. Valores medios y desviación típica, según clase de pertenencia, en cada fecha.

Parámetro	Fecha (DJ)			
	233	238	240	249
$\bar{x}_{C1}$	0.5164 ± 0.0130	0.4546 ± 0.0138	0.4938 ± 0.0152	0.4805 ± 0.0128
σ_{C1}	0.0976	0.1042	0.1145	0.0966
$\bar{x}_{C2}$	0.4462 ± 0.0112	0.3849 ± 0.0178	0.4208 ± 0.0175	0.4275 ± 0.0267
σ_{C2}	0.0485	0.0772	0.0757	0.1154
$\bar{x}_{C3}$	0.2223 ± 0.0035	0.2240 ± 0.0067	0.2215 ± 0.0046	0.2115 ± 0.0096
σ_{C3}	0.0171	0.0320	0.0224	0.0462
$\bar{x}_{C4}$	0.3294 ± 0.0056	0.3198 ± 0.0086	0.3321 ± 0.0097	0.3453 ± 0.0102
σ_{C4}	0.0428	0.0663	0.0742	0.0781

Tabla 4.31: Valores del NDVI, calculados a partir de MOD09GQ, en cada fecha.

	Fecha (DJ)			
	233	238	240	249
$\bar{x}_{NDVI}$	0.3929 ± 0.0114	0.3650 ± 0.0099	0.3907 ± 0.0113	0.3895 ± 0.0117
σ_{NDVI}	0.1435	0.1242	0.1415	0.1462

Analizando los valores desglosados, según se clase de pertenencia, los resultados que se obtienen son los que se muestran en la Tabla 4.34.

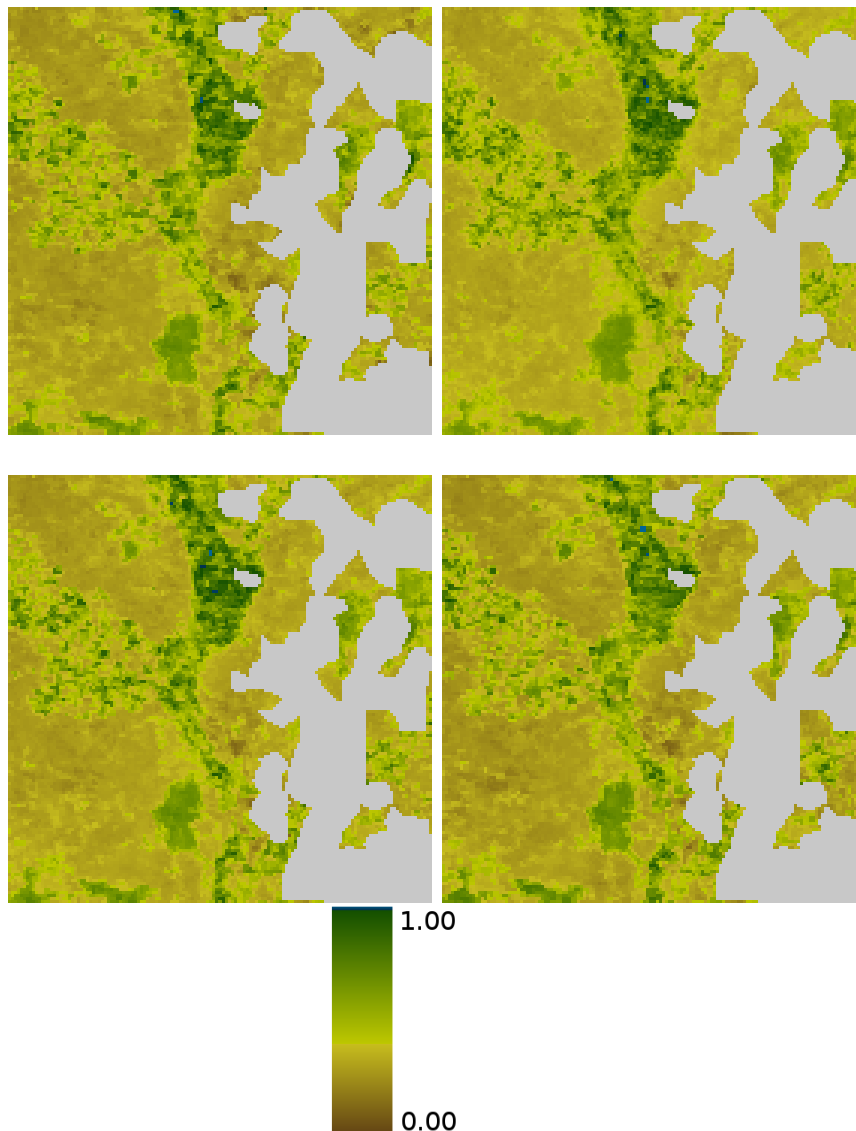


Figura 4.46: NDVI obtenido a partir de MOD09GQ, en las diferentes fechas analizadas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.

A partir de datos mixtos MOD09GA y MOD09GQ. Dado que la banda 2 de MODIS está disponible con una resolución espacial de 250 m, se ha efectuado un análisis utilizando la información de esta banda de mayor resolución junto con la banda 6, de 500 m y remuestreada a la misma resolución espacial de la 2 (250 m), lo que es de esperar que produzca resultados más aproximados, al aumentar su resolución espacial, tal como se muestra en la Figura 4.49 y en la Tabla 4.35.

A la vista de los resultados de la Tabla 4.34, se observan unos valores similares a los obtenidos mediante la utilización de la reflectividad del producto MOD09GA, de 500 m de resolución espacial.

4.4. Influencia de la pluviometría en los datos de reflectividad. Caso práctico 3.

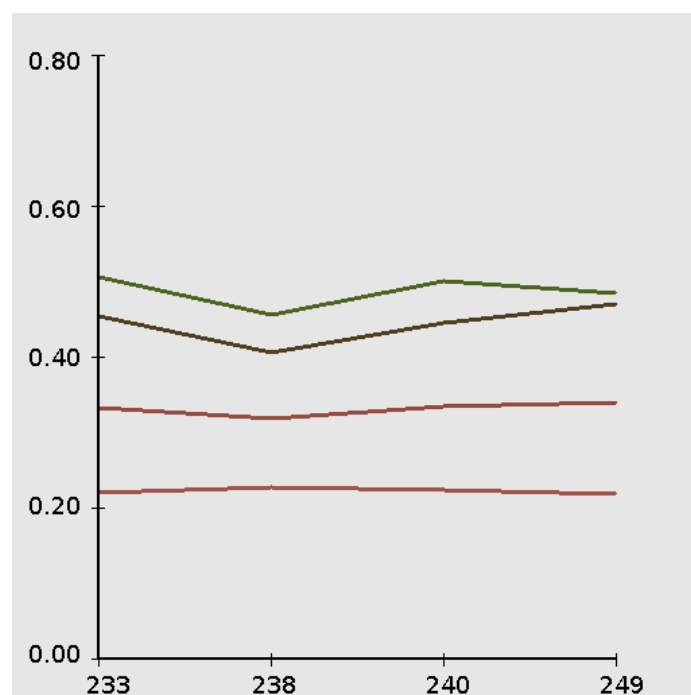


Figura 4.47: Evolución NDVI, calculado a partir de los datos MOD09GQ, según clases de pertenencia. Eje X: Fecha (DJ). Eje Y: Valor NDVI.

Tabla 4.32: NDVI. Valores medios y desviación típica, según clase de pertenencia y fecha.

Parámetro	Fecha (DJ)			
	233	238	240	249
$\bar{x}_{C1}$	0.5044 ± 0.0175	0.4548 ± 0.0169	0.4993 ± 0.0182	0.4837 ± 0.0194
σ_{C1}	0.1317	0.12760	0.1369	0.1463
$\bar{x}_{C2}$	0.4540 ± 0.0213	0.4065 ± 0.0139	0.4442 ± 0.0161	0.4694 ± 0.0194
σ_{C2}	0.0922	0.0600	0.0698	0.0839
$\bar{x}_{C3}$	0.2213 ± 0.0072	0.2287 ± 0.0085	0.2249 ± 0.0076	0.2192 ± 0.0094
σ_{C3}	0.0344	0.0407	0.0364	0.0452
$\bar{x}_{C4}$	0.3334 ± 0.0108	0.3189 ± 0.0101	0.3342 ± 0.0110	0.3401 ± 0.0124
σ_{C4}	0.0829	0.0777	0.0843	0.0954

Tabla 4.33: Índice de estrés hídrico (MSI) obtenido a partir de MOD09GA, en las cuatro fechas consideradas.

	Fecha (DJ)			
	233	238	240	249
$\bar{x}_{MSI}$	0.9743 ± 0.0155	0.9106 ± 0.0158	0.9922 ± 0.0180	1.0301 ± 0.0154
σ_{MSI}	0.1950	0.1985	0.2255	0.1937

En los dos casos, se observa como el valor del MSI es menor en los cultivos de regadío (C1), por su mayor contenido en agua y mayor en el caso del suelo desnudo (C3).

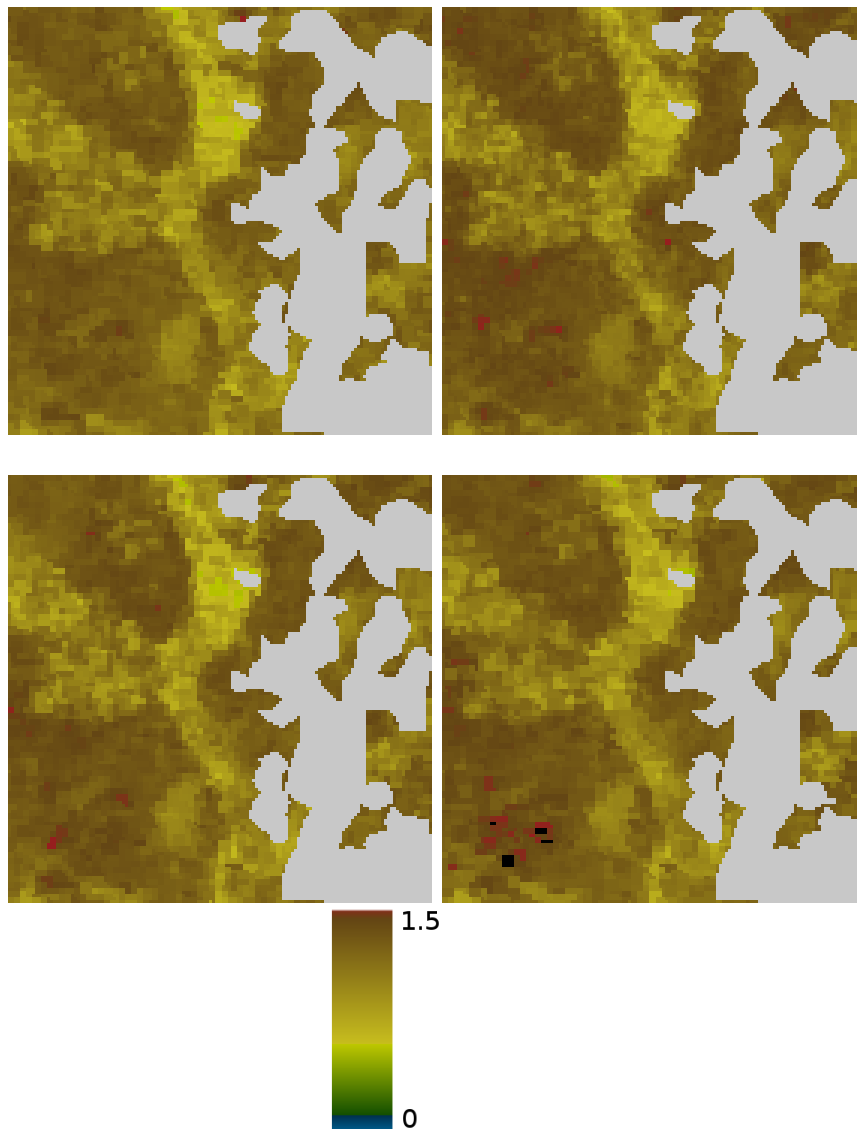


Figura 4.48: Índice de estrés hídrico (MSI), calculado a partir del producto MOD09GA, en las cuatro fechas seleccionadas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.

4.5. Interpolación espacial. Aplicación a la obtención de documentos de ocupación del suelo. Caso práctico 4.

4.5.1. Antecedentes.

Con este experimento, lo que se pretende es comprobar si el proceso de interpolación espacial interfiere en los resultados de un proceso de clasificación con el fin de determinar las diferentes cubiertas presentes en una imagen, con la

4.5. Interpolación espacial. Aplicación a la obtención de documentos de ocupación del suelo. Caso práctico 4.

Tabla 4.34: Índice de estrés hídrico (MSI), calculado a partir de MOD09GA en las diferentes fechas, desglosado según clases de pertenencia.

Parámetro	Fecha (DJ)			
	233	238	240	249
$\bar{x}_{C1}$	0.7595±0.0162	0.7438±0.0210	0.7960±0.0192	0.8615±0.0219
σ_{C1}	0.1218	0.1581	0.1444	0.1650
$\bar{x}_{C2}$	1.0307±0.0119	0.9556±0.0405	1.0345±0.0453	1.0686±0.0216
σ_{C2}	0.0516	0.1751	0.1960	0.0937
$\bar{x}_{C3}$	1.2276±0.0085	1.1444±0.0102	1.2583±0.0294	1.2804±0.0099
σ_{C3}	0.0410	0.0491	0.1416	0.0474
$\bar{x}_{C4}$	1.0637±0.0111	0.9650±0.0178	1.0632±0.0207	1.0818±0.0161
σ_{C4}	0.0848	0.1367	0.1589	0.1234

Tabla 4.35: Valores del índice de estrés hídrico (MSI), calculado con datos mixtos MOD09GA y MOD09GQ.

	Fecha (DJ)			
	233	238	240	249
$\bar{x}_{MSI}$	0.9668±0.0191	0.9222±0.0158	0.9958±0.0195	1.0262±0.0184
σ_{MSI}	0.2389	0.19787	0.2445	0.2274

Tabla 4.36: Índice de estrés hídrico (MSI), obtenido a partir de los datos mixtos MOD09GA y MOD09GQ, según clase de pertenencia y fecha.

Parámetro	Fecha (DJ)			
	233	238	240	249
$\bar{x}_{C1}$	0.8182±0.0221	0.7844±0.0217	0.8308±0.0256	0.8924±0.0245
σ_{C1}	0.1798	0.1770	0.2082	0.1999
$\bar{x}_{C2}$	0.9953±0.0546	0.9792±0.0215	1.0504±0.0425	1.0422±0.0471
σ_{C2}	0.2193	0.0864	0.1707	0.1894
$\bar{x}_{C3}$	1.1804±0.0556	1.1521±0.0145	1.2674±0.0318	1.2400±0.0507
σ_{C3}	0.2676	0.0696	0.1532	0.2439
$\bar{x}_{C4}$	1.0534±0.0235	0.9786±0.0212	1.0693±0.0250	1.0973±0.0195
σ_{C4}	0.1690	0.1520	0.1798	0.1401

finalidad de determinar si es posible obtener documentos de ocupación del suelo a partir de los datos derivados del proceso de interpolación, lo que aumentaría las áreas de aplicación del sensor MODIS, mejorando su resolución espacial hasta alcanzar los 30 m del sensor ETM+.

4.5.2. Zona de estudio.

Se ha considerado la misma zona del centro peninsular que en el apartado 4.4.4.2 (alrededores de la ciudad de Palencia), en la que aparecen diversas

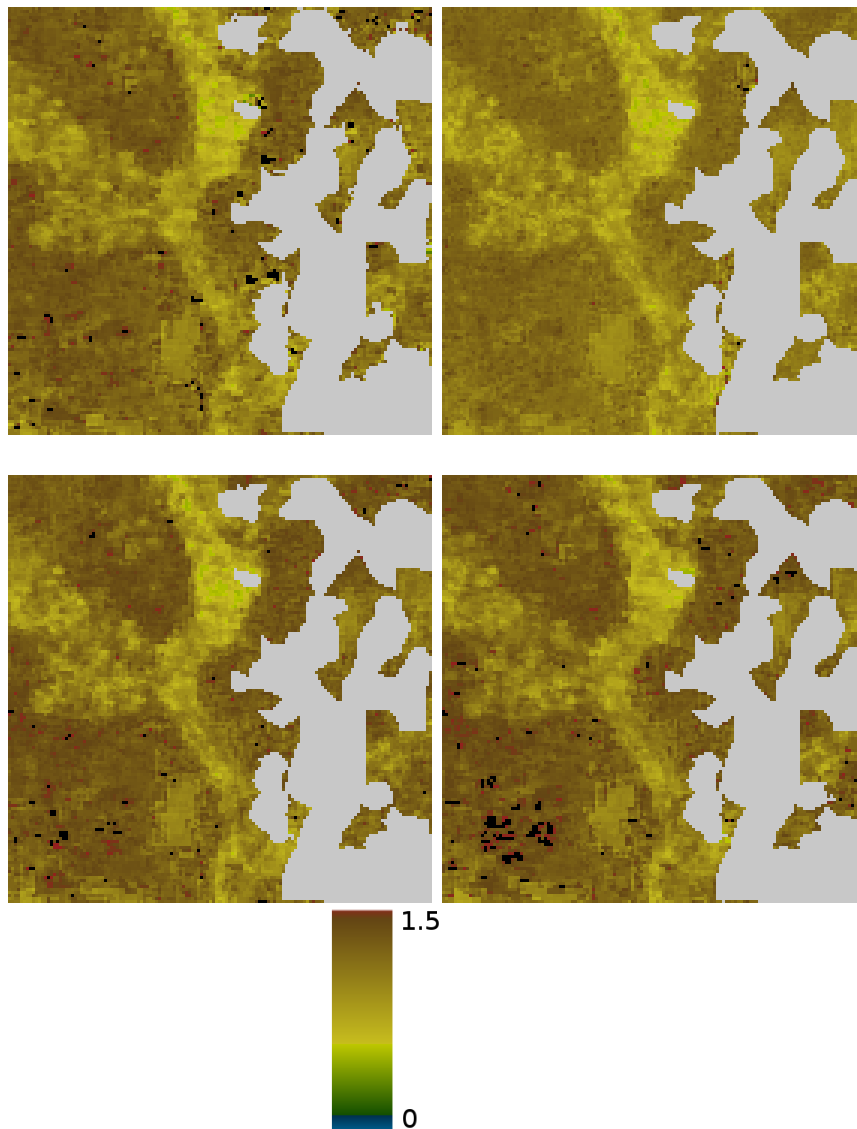


Figura 4.49: Índice de estrés hídrico (MSI), obtenido a partir de la utilización conjunta de MOD09GA y MOD09GQ, en las cuatro fechas consideradas. En color gris, aparecen las zonas cubiertas por nubes.

cubiertas, entre ellas, vegetación natural, cultivos de regadío y diversos tipos de suelos más o menos desprovistos de vegetación (rastros, barbechos, etc.). La selección de la zona, se ha efectuado teniendo en cuenta el grado de parcelación, que pueda ser representativo de varias zonas peninsulares, teniendo en cuenta la limitada resolución espacial del sensor MODIS.

4.5.3. Metodología.

Con el fin de estudiar la posible influencia del proceso de interpolación en la clasificación, se han elegido un par de imágenes TM de la zona de

estudio, así como las MODIS correspondientes a esa misma fecha, más otra de fecha próxima a la primera, que servirá como comprobación. Se procedió a la clasificación de la imagen TM de la fecha inicial, de forma que tendremos un documento de ocupación de suelo de referencia y, tras un proceso de interpolación de la imagen MODIS intermedia, se procedió a su clasificación. El que ambas imágenes sean de fechas próximas, es debido a que las cubiertas naturales cambian conforme pasa el tiempo, por lo que la validación de los resultados sólo será posible si no transcurre un intervalo temporal amplio entre ambas imágenes.

De este modo, las fechas de las imágenes seleccionadas son los días 9 de agosto de 2007 y 10 de septiembre de 2007, mientras que la imagen MODIS objeto de estudio será la correspondiente al día 11 de agosto de 2007, con el fin de que el periodo de tiempo entre la imagen TM de referencia sea el menor posible.

4.5.4. Proceso de interpolación.

Según el método desarrollado en el apartado 4.3, el proceso de interpolación temporal requiere de dos imágenes adquiridas con el sensor de baja resolución temporal y alta resolución espacial, en este caso TM y de dos imágenes adquiridas con el sensor de baja resolución espacial (MODIS) de la misma fecha que las anteriores, así como de una o varias imágenes adquiridas en fechas intermedias.

En la Figura 4.50 se muestra una combinación color de las imágenes TM y MODIS correspondientes a las tres fechas. En ella, en la columna central de la fila superior, aparece el resultado de la interpolación de la imagen MODIS correspondiente al día 11 de agosto de 2007.

4.5.5. Proceso de clasificación.

Para clasificar la imagen inicial TM, se ha recurrido a un proceso de clasificación no supervisada de la imagen, que se descompone en las siguientes fases:

- Selección de áreas de entrenamiento, mediante un muestreo sistematizado.
- Agrupamiento o *clustering*, de esas áreas de entrenamiento en un número determinado de clases, que se ha fijado en 12, por ser el que proporciona un mayor valor del coeficiente κ (Figura 4.51).

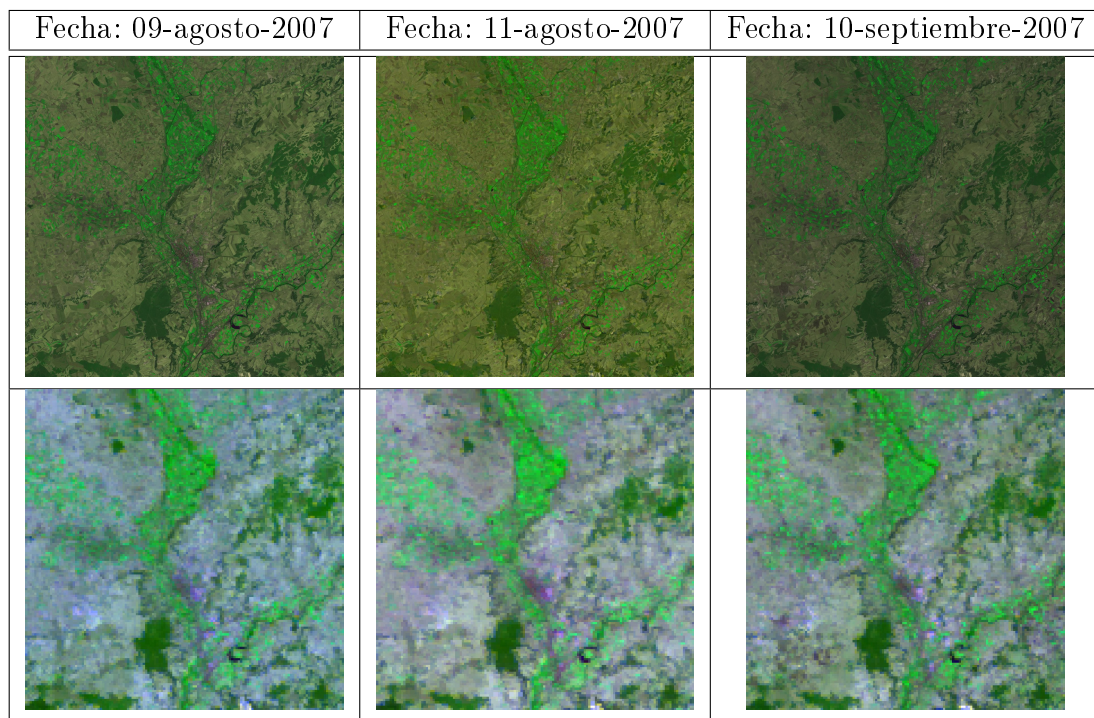


Figura 4.50: Imágenes TM (fila superior, izquierda y derecha) y MODIS (fila inferior) iniciales, finales e interpolada (fila superior, centro). Combinación color RGB:342.

- Filtrado de las áreas de entrenamiento, con el fin de que dichas áreas representen conjuntos espectralmente homogéneos.
- Clasificación de la imagen TM de referencia.

Una vez clasificada la imagen TM de referencia, se procede a utilizar las mismas áreas de entrenamiento, pues son las que se corresponden con la “*verdad terreno*”, esto es, con lo que nosotros consideramos como ocupación del suelo de referencia. Para proceder a la clasificación de la imagen MODIS, simplemente se aplicó el procedimiento de clasificación, tanto a la imagen interpolada como a la no interpolada, con el fin de estudiar las diferencias entre ambas.

Con el fin de evaluar el efecto del procedimiento de interpolación en el proceso de clasificación, se procedió a la clasificación de forma automatizada de la imagen TM, así como de la MODIS original y la MODIS interpolada, realizando una clasificación no supervisada en 12 clases. Para seleccionar el número de clases óptimo, se ha procedido a agrupar las áreas de entrenamiento en 6, 8, 10, 12, 14 y 16 clases, obteniéndose el mejor valor del coeficiente Kappa para 12 clases (Figura 4.51). Pese a que con 6 clases el valor del coeficiente Kappa es próximo al obtenido con 12 clases, se ha elegido este número de

clases al permitir una mayor discriminación del tipo de cubiertas presentes en la escena.

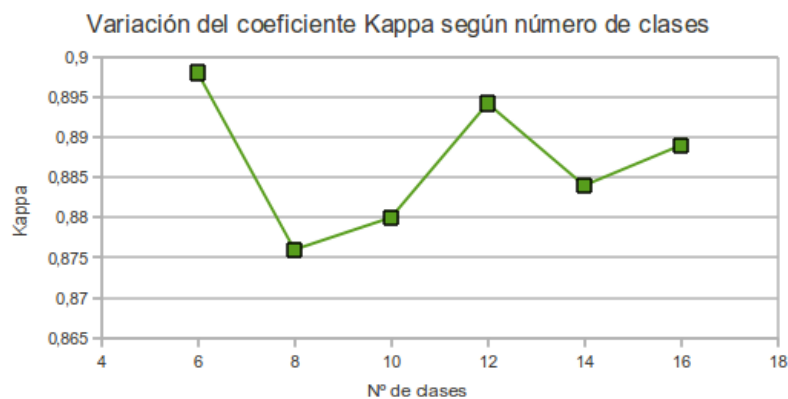


Figura 4.51: Variación del coeficiente Kappa, según el número de clases consideradas. Un agrupamiento en 12 *clústers* o clases, proporciona el mayor valor

Posteriormente, y en base a criterios de similaridad de cubiertas, se efectuaron distintas reclasificaciones, resultando 4, 5 y 12 clases, con el fin de estudiar la bondad de los procesos de clasificación, así como la posible influencia del proceso de interpolación temporal de imágenes MODIS. Según se puede apreciar en la Figura 4.52, hay varias clases que pueden ser agrupadas por ser similares.

1. Sin reclasificar (12 clases).

Las tablas 4.37, 4.38 y 4.39, muestran las matrices de contingencia, los coeficientes Kappa de cada clases, así como el global del proceso, obtenidos al comparar la imagen TM, la MODIS interpolada, así como la MODIS original, clasificadas en 12 clases de pertenencia. Los resultados de la clasificación se muestran en la Figura 4.53.

2. Reclasificación en 4 clases.

Dada la similaridad entre varias de las clases identificadas anteriormente, se ha procedido a una reclasificación de las 12 clases originales, con el fin de reducir la variabilidad. Las tablas 4.40, 4.41 y 4.42, muestran las matrices de contingencia, los coeficientes Kappa de cada clases, así como el global del proceso, obtenidos al comparar la imagen TM, la MODIS interpolada, así como la MODIS original, clasificadas y tras efectuar una reclasificación en 4 clases. Los resultados de la correspondiente clasificación y posterior reclasificación, se muestran en la Figura 4.54.

Tabla 4.37: Comparación TM - MODIS interpolada (12 clases).

TM/MODISint	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
C0	82788	3331	5071	4939	3741	4802	5501	3315	2179	1902	4119	5603	5374
C1	2367	29993	1271	7322	47	358	173	31	1686	7	137	65	2
C2	5426	1181	58888	4576	281	9540	5820	158	0	50	4998	5917	8
C3	2861	2610	3194	48035	0	4	7	0	2629	1150	2147	69	0
C4	8388	535	702	0	101395	12174	13639	14554	0	0	0	270	1525
C5	7006	817	11252	11	19410	84034	8598	20739	0	0	18	476	940
C6	7770	536	9879	6	18746	11006	78155	218	0	0	420	14551	16
C7	7167	452	296	0	23090	19839	208	141905	0	0	0	11	21252
C8	3957	353	3	1921	0	0	0	0	27648	8260	144	0	0
C9	4404	0	95	1932	0	0	2	0	6550	68267	9686	221	0
C10	5701	121	5804	5127	3	26	353	1	144	11285	57777	12226	0
C11	7054	331	6975	193	219	478	13922	5	0	152	12209	56402	2
C12	6918	5	0	0	572	105	2	11349	0	0	0	0	41085
Clase		Kappa											
C1		0.721217											
C2		0.61199											
C3		0.790443											
C4		0.652253											
C5		0.518573											
C6		0.53822											
C7		0.625723											
C8		0.711945											
C9		0.769588											
C10		0.592037											
C11		0.58933											
C12		0.760367											
Kappa global		0.631767											

Tabla 4.38: Comparación TM - MODIS (12 clases).

TM/MODIS	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
C0	16646	2937	6901	13844	23869	8684	6691	9066	2779	8707	3511	19475	9555
C1	939	13890	2817	18122	654	3323	226	821	1036	240	441	522	428
C2	1417	2676	12764	20026	13070	10883	5385	7111	1546	6545	2366	10617	2437
C3	954	8347	7675	29192	1600	4308	1027	1022	2406	2126	1567	2091	391
C4	1983	534	3392	2634	83527	9130	7139	25346	195	1981	726	9112	7483
C5	2390	1879	10432	10972	43230	20050	7819	27722	733	6419	1576	12562	7517
C6	2531	571	6486	6378	54366	9417	17066	12005	550	6925	2321	18544	4143
C7	2730	1386	4841	4152	68637	15574	4707	75372	333	3970	1126	8684	22708
C8	956	3192	1427	7392	589	1072	489	290	6487	15729	1001	3481	181
C9	1415	382	2008	3673	2594	2928	1868	1451	3316	58825	2544	9440	713
C10	2735	1054	5235	12741	8954	4600	4890	3852	2441	24948	6018	19385	1715
C11	2377	592	4178	7433	21021	4910	9935	5338	1106	10662	4291	23490	2609
C12	2062	377	805	852	11029	3317	790	20610	52	966	347	2338	16491

Clase	Kappa
C1	0.30706
C2	0.0878281
C3	0.413977
C4	0.402503
C5	0.0649513
C6	0.0770441
C7	0.245642
C8	0.142908
C9	0.611579
C10	0.0439284
C11	0.164251
C12	0.243441
Kappa global	0.215592

Tabla 4.39: Comparación MODIS interpolada - MODIS (12 clases).

MODIS _{int} /MODIS	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
C0	21019	4305	6940	16255	23399	10982	7393	9320	3384	11349	4698	21258	11505
C1	850	13993	2599	15647	500	3184	169	927	670	163	362	564	637
C2	1579	2509	15633	23694	11364	13239	5410	6596	1573	6827	2792	10180	2034
C3	1172	9613	8851	35869	1503	4819	1089	1065	3407	2352	1815	2135	352
C4	1819	316	2698	1637	97645	6355	7543	30096	168	2014	912	9323	6978
C5	1181	1424	10821	9700	37045	22718	6798	26139	493	5708	1357	12231	6751
C6	1937	251	4425	3421	53035	8135	17659	10816	315	5402	1933	15985	3066
C7	1584	833	3547	2974	60734	11988	3581	73103	214	3671	925	7935	21186
C8	770	3361	1831	9018	584	1009	485	279	6361	12362	1019	3563	194
C9	933	216	2088	3181	2521	2613	1980	1399	3087	61152	2691	8661	551
C10	1993	473	5084	10096	8862	4519	4771	3667	2313	23740	5250	19485	1402
C11	2330	210	3423	4989	21797	4900	10184	4833	909	11661	3670	24633	2272
C12	1968	313	1021	930	14151	3735	970	21766	86	1642	411	3768	19443
Clase		Kappa											
C1		0.336765											
C2		0.108062											
C3		0.435982											
C4		0.449256											
C5		0.0961784											
C6		0.0969352											
C7		0.275921											
C8		0.145004											
C9		0.637748											
C10		0.0403194											
C11		0.184126											
C12		0.244705											
Kappa global		0.245352											

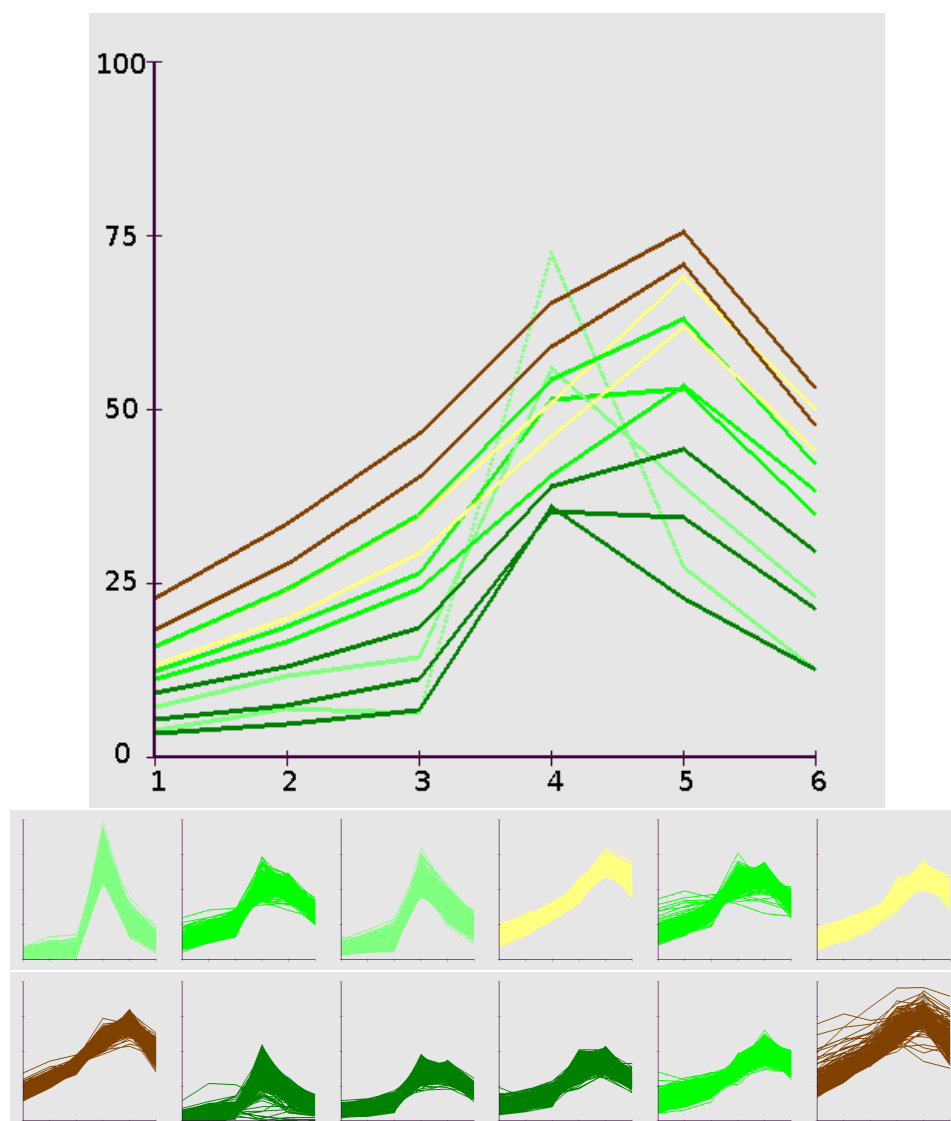


Figura 4.52: Perfiles espectrales de las 12 clases (promedios de cada clase en la parte superior y clases individuales en la inferior). Eje X: Banda MODIS (Ordenadas según equivalencia con TM). Eje Y: Reflectividad (%).

3. Reclasificación en 5 clases.

Al igual que en el apartado anterior, se ha reducido el número de clases original (12 clases), con el fin de facilitar la interpretación, pero sin reducir excesivamente la cantidad de información ofrecida en el documento clasificado, por lo que se ha optado por mantener 5 clases. Las tablas 4.43, 4.44 y 4.45, muestran las matrices de contingencia, los coeficientes Kappa de cada clases, así como el global del proceso, obtenidos al comparar la imagen TM, la MODIS interpolada, así como

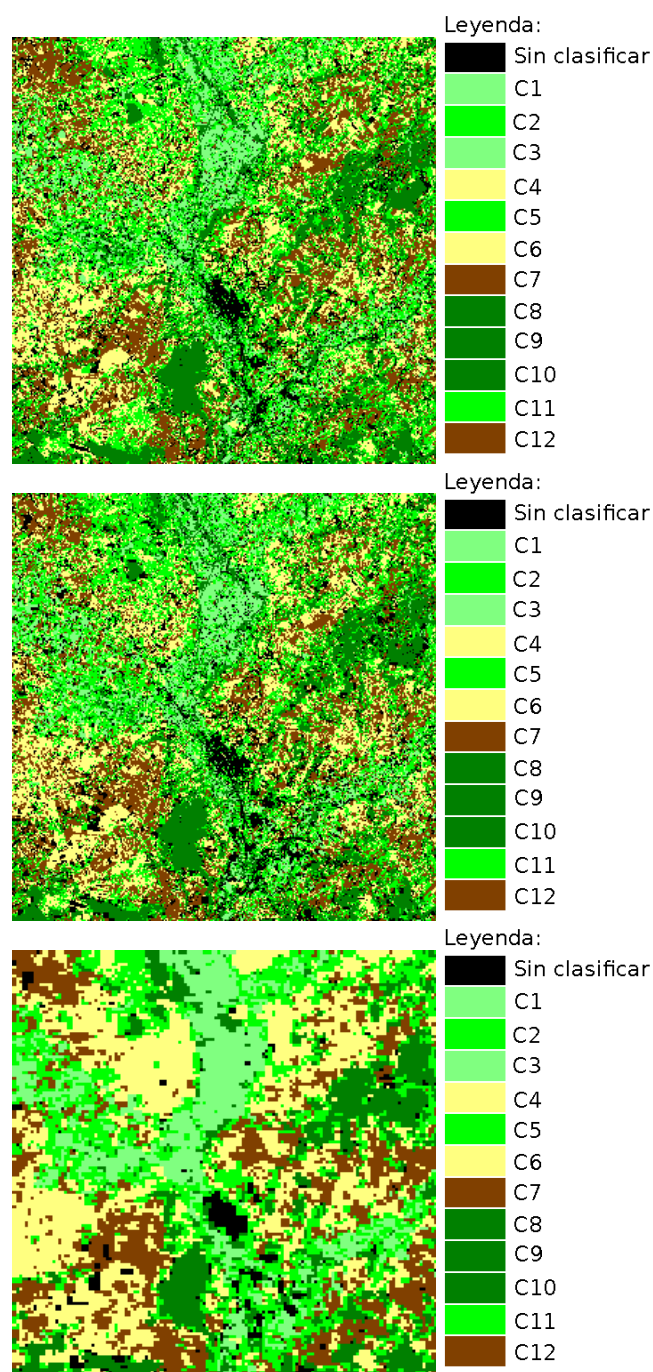


Figura 4.53: Clasificación no supervisada (12 clases). En ella se han representado del mismo color las clases similares.

la MODIS original, clasificadas y tras efectuar dicha reclasificación, en la que se conservan 5 clases informativas. Los resultados de la clasificación se muestran en la Figura 4.55.

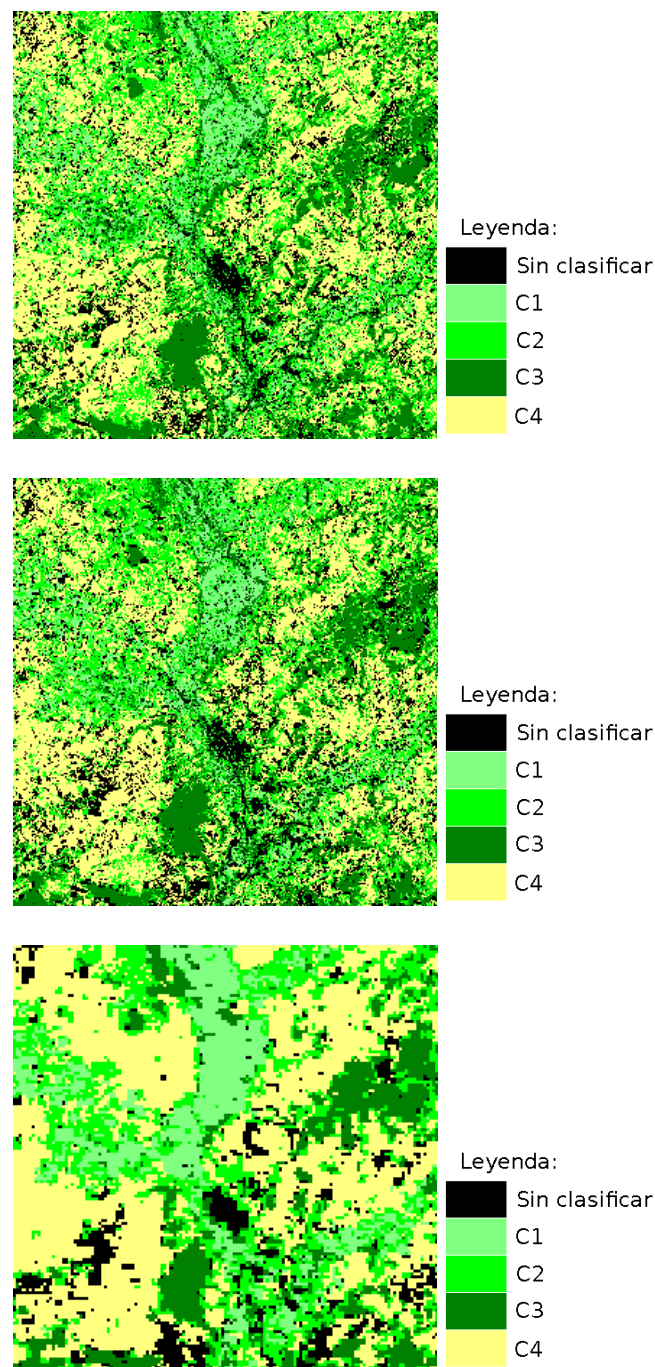


Figura 4.54: Clasificación no supervisada (4 clases).

En todos los casos anteriores, se observa como el grado de similaridad entre la imagen TM utilizada como referencia y la imagen MODIS derivada del proceso de interpolación es mayor que entre la TM y la imagen MODIS original, así como entre esta y la interpolada, lo que nos permite afirmar que el proceso

Tabla 4.40: Comparación TM - MODIS interpolada (4 clases).

TM/MODISint	C0	C1	C2	C3	C4
C0	136165	8275	15581	8200	24480
C1	5230	87960	4961	7756	258
C2	20436	7109	233962	17427	69152
C3	14062	9454	18375	189761	359
C4	46118	1529	68728	420	391910

Clase	Kappa
C1	0.857861
C2	0.595016
C3	0.839502
C4	0.738264

Kappa global	0.732484
--------------	----------

Tabla 4.41: Comparación TM - MODIS (4 clases).

TM/MODIS	C0	C1	C2	C3	C4
C0	44754	18010	41520	16362	72055
C1	2712	69551	20736	7816	5350
C2	18747	43578	109886	35244	140631
C3	7715	28434	49576	121309	24977
C4	41578	15655	85180	18127	348165

Clase	Kappa
C1	0.619016
C2	0.127758
C3	0.451863
C4	0.526847

Kappa global	0.390551
--------------	----------

Tabla 4.42: Comparación MODIS interpolada - MODIS (4 clases).

MODISint/MODIS	C0	C1	C2	C3	C4
C0	53935	21803	47704	21570	76999
C1	3011	75122	22172	8769	5253
C2	16147	42526	117778	34990	130166
C3	5843	26345	48853	117975	24548
C4	36570	9432	70391	15554	354212

Clase	Kappa
C1	0.622379
C2	0.166121
C3	0.454226
C4	0.602948

Kappa global	0.428295
--------------	----------

de interpolación mejora la discriminación de cubiertas naturales a partir del sensor MODIS.

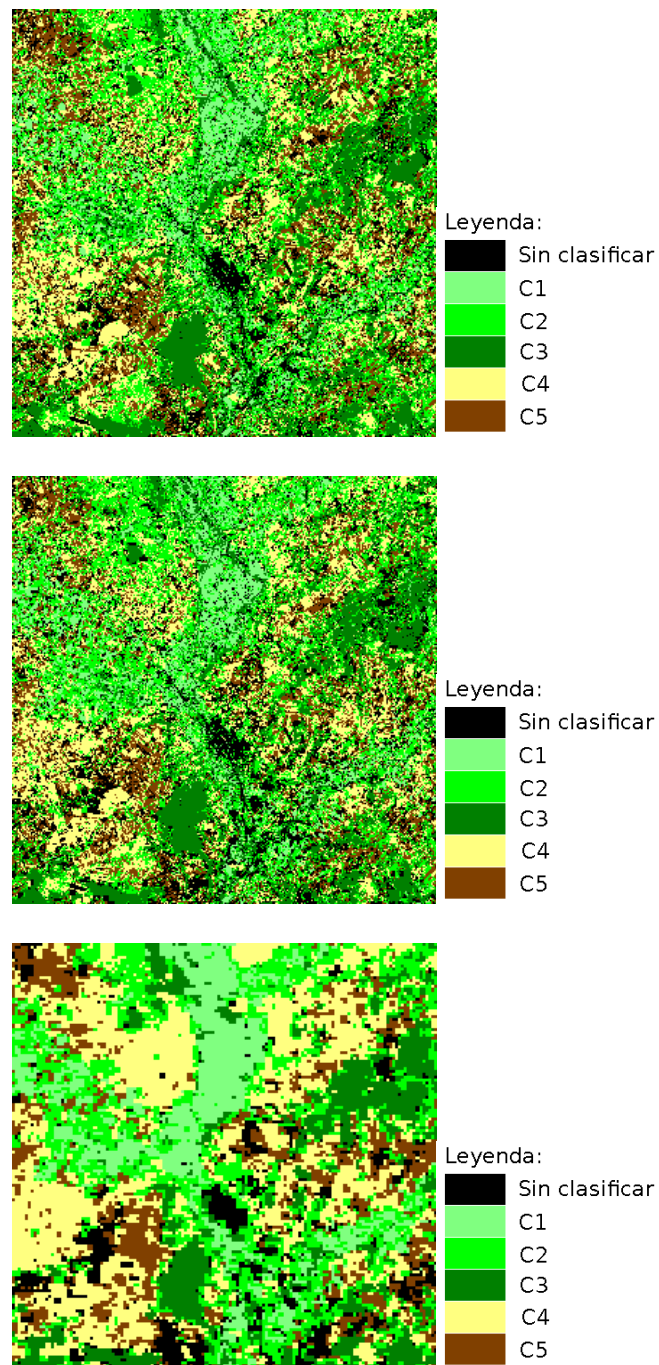


Figura 4.55: Clasificación no supervisada (5 clases).

Tabla 4.43: Comparación TM - MODIS interpolada (5 clases).

TM/MODIS _{int}	C0	C1	C2	C3	C4	C5
C0	136165	8275	15581	8200	9816	14664
C1	5230	87960	4961	7756	227	31
C2	20436	7109	233962	17427	48250	20902
C3	14062	9454	18375	189761	358	1
C4	17699	1077	48582	420	211935	14772
C5	28419	452	20146	0	23298	141905
		Clase	Kappa			
		C1	0.857861			
		C2	0.595016			
		C3	0.839502			
		C4	0.68503			
		C5	0.718701			
			Kappa global	0.71681		

Tabla 4.44: Comparación TM - MODIS (5 clases).

TM/MODIS	C0	C1	C2	C3	C4	C5
C0	44754	18010	41520	16362	42379	29676
C1	2712	69551	20736	7816	3507	1843
C2	18747	43578	109886	35244	100460	40171
C3	7715	28434	49576	121309	19384	5593
C4	16140	10117	56081	12698	162098	37351
C5	25438	5538	29099	5429	73344	75372
		Clase	Kappa			
		C1	0.619016			
		C2	0.127758			
		C3	0.451863			
		C4	0.386596			
		C5	0.299328			
			Kappa global	0.333969		

Tabla 4.45: Comparación MODIS interpolada - MODIS (5 clases).

MODIS _{int} /MODIS	C0	C1	C2	C3	C4	C5
C0	136165	8275	15581	8200	9816	14664
C1	5230	87960	4961	7756	227	31
C2	20436	7109	233962	17427	48250	20902
C3	14062	9454	18375	189761	358	1
C4	17699	1077	48582	420	211935	14772
C5	28419	452	20146	0	23298	141905
		Clase	Kappa			
		C1	0.622379			
		C2	0.166121			
		C3	0.454226			
		C4	0.451459			
		C5	0.335648			
			Kappa global	0.369183		

4.6. Detección y seguimiento de procesos contaminantes en aguas embalsadas. Caso práctico 5.

4.6.1. Introducción.

Como se ha mencionado anteriormente, la utilización del sensor MODIS permite la obtención de datos diarios de reflectividad superficial en 36 bandas espectrales, con resoluciones espaciales que oscilan entre los 250 m y los 1000 m, según la banda, lo que posibilita la realización del seguimiento de fenómenos superficiales que suceden en zonas amplias del territorio. La calidad de las aguas embalsadas, es un parámetro importante de determinar, por sus implicaciones en la salud humana, en la agricultura o en el turismo, ya que las reservas almacenadas en los embalses repartidos por la geografía española tienen diversos usos, desde el consumo humano, a la utilización en el riego de cultivos, así como con fines turísticos y de ocio.

La metodología propuesta en apartados previos, se puede adaptar de tal forma que permita el seguimiento temporal de ciertos parámetros ambientales. Como ejemplo particular de aplicación, se ha realizado un seguimiento de la cantidad de materia orgánica contenida en el agua del embalse de As Conchas, en el río Limia, del cuál se ha divulgado que sufre un importante proceso de eutrofización, así como en los embalses de Lindoso y de Salas, que sirven como comprobación de la metodología, al estar libres de estos procesos, o no se han producido con la misma intensidad, durante el periodo analizado.

4.6.2. Materiales y métodos.

4.6.2.1. Caracterización de la zona de estudio.

El embalse de As Conchas (Figura 4.56) se encuentra situado en el cauce del río Limia, en los municipios de Lovios y Muíños, en la provincia de Orense y pertenece a la cuenca hidrográfica del Miño-Sil. Las obras de construcción finalizaron en 1949 y sus características principales se muestran en la tabla 4.46 (extraído del Inventario de presas y embalses, MARM, 2011).

El nivel de embalse se ha mantenido relativamente constante desde el inicio del periodo de estudio, según la información extraída del *Sistema Automático de Información Hidrológica* (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, situándose entre el 70 % y el 80 % de su capacidad máxima (Figura 4.57).



Figura 4.56: Vista del embalse de As Conchas (Imagen: Google Maps)

Tabla 4.46: Características principales del embalse de As Conchas (Inventario de presas y embalses, MARM, 2011).

Superficie de embalse	645 ha
Capacidad máxima	71.51 Hm ³
Cota máxima	549 m (snm)
Tipo de presa	Gravedad
Altura desde cimientos	48 m
Longitud de coronación	303.72 m

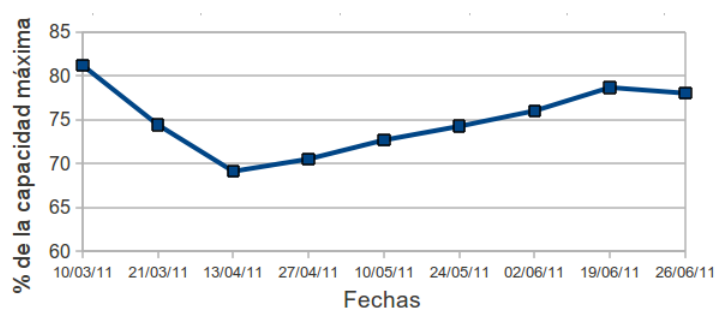


Figura 4.57: Evolución del nivel del embalse de As Conchas, durante el periodo estudiado.

4.6.2.2. Determinación de la cantidad de Clorofila-a.

El estudio de la calidad de las masas de agua es de gran importancia, por ser un recurso natural muy valioso. Dada su variabilidad temporal y espacial, los sensores espaciales se constituyen como una alternativa fiable y económica para

la adquisición de datos encaminados a la determinación de diversos parámetros que cuantifiquen esa calidad. Por ello, se han propuesto distintas metodologías que permiten calcular índices cuantitativos, relacionados con la presencia de distintas sustancias en dichas masas de agua. Una de estas sustancias, es la Clorofila-a, la cuál está directamente relacionada con la cantidad de algas en suspensión, lo que permite determinar el estado trófico de las aguas.

Con la finalidad de relacionar los datos adquiridos por los diversos sensores espaciales, con la cantidad de Clorofila-a, se han desarrollado distintas metodologías. Concretamente, para el sensor MODIS, que es el empleado en este trabajo, se ha propuesto del modelo OC3M (O'Reilly et al., 2000), que nos permite obtener la concentración de Clorofila-a a partir de los datos de reflectividad mediante la expresión:

$$C_a = 10,0^{(0,2830-2,753R_{3M}+1,457R_{3M}^2-0,659R_{3M}^3-1,403R_{3M}^4)} \quad (4.11)$$

siendo C_a la concentración de Clorofila-a, expresada en $mg \cdot m^{-3}$, $R_{3M} = \log_{10} \left(\max \left(\frac{R_{443}}{R_{550}}, \frac{R_{0,490}}{R_{0,550}} \right) \right)$, con R_{443} , R_{490} y R_{550} , las reflectividades en las bandas 9, 10 y 12 de MODIS.

Las aplicaciones del modelo OC3M están orientadas, principalmente, a océanos y grandes masas de agua, ya que la resolución espacial de las bandas 9, 10 y 12 de MODIS es de 1000 m. Dado que el objetivo de este trabajo es determinar la cantidad de Clorofila-a en embalses, de tamaño más reducido, existe un modelo anterior, que utiliza las bandas 3 y 4, con una resolución espacial de 500 m. Este algoritmo es el denominado OC2 (*Ocean Colour v2*), desarrollado por O'Reilly et al. (2000), que nos permite obtener la cantidad de Clorofila-a en los cuerpos de agua a partir de la siguiente expresión:

$$C_a = 10,0^{(0,319-2,336R_{2S}+0,879R_{2S}^2-0,135R_{2S}^3)} - 0,071 \quad (4.12)$$

donde C_a representa la concentración de Clorofila-a expresada en $mg \cdot m^{-3}$, $R_{2S} = \log_{10} \left(\frac{R_{490}}{R_{555}} \right)$, siendo R_{490} y R_{555} , las reflectividades en las bandas 3 y 4 de MODIS.

Este modelo, OC2, es posible ejecutarle, empleando el lenguaje de modelado propio de la aplicación desarrollada en este trabajo (ver apartado II.4), de forma que se integre en el procedimiento de obtención de otras variables biofísicas. El código que implementa la ecuación 4.12 se muestra en el listado 4.1.

Listado 4.1 Implementación del modelo OC2 en el lenguaje de modelado de la aplicación AritSOV.

```
// MODIS Concentración de clorofila (OC2v4) expresada
    en mg*m-3
$3
$4
/
5 #log10
#dup

%4
#swap
10 #pow
%-0.071
*
#swap
#dup
15 %3
#swap
#pow
%-0.135
*
20 #swap
#dup
%2
#swap
#pow
25 %0.879
*
#swap
%-2.336
*
30 %0.319
+
+
+
```

4.6. Detección y seguimiento de procesos contaminantes en aguas embalsadas. Caso práctico 5.

```
+
35 %10
#pow$3
$4
/
#log10
40
#dup
%3
#pow
%-0.135
45 *

#swap
#dup
%2
50 #pow
%0.879
*

#swap
55 %-2.336
*

%0.319
+
60 +
+

%10
#swap
65 #pow

%-0.071
+
```

4.6.3. Resultados.

Con el fin de establecer la evolución temporal de la cantidad de Clorofila-a presente en el agua de los embalses, se han descargado los datos reflectividad superficial recogidos por el sensor MODIS en las siguientes fechas: 10/marzo/2011, 21/marzo/2011, 13/abril/2011, 27/abril/2011, 10/mayo/2011, 24/mayo/2011, 02/junio/2011, 19/junio/2011 y 25/junio/2011. El intervalo temporal entre cada conjunto de datos, se ha procurado que sea lo más uniforme posible, si bien esto ha supuesto algún inconveniente, por la frecuente cubierta nubosa de la zona.

Dado que la aplicación debe restringirse a las masas de agua, existe una máscara de cuerpos de agua a nivel global, adaptada a las características geométricas de MODIS, que también puede obtenerse libremente desde los mismos servidores que el resto de datos del sensor, bajo la denominación MOD44W (Carroll et al., 2009). Este producto tiene una resolución espacial de 250 m, la cual se ha considerado suficiente, dadas las características de los embalses involucrados en este estudio. Por ello, previamente al cálculo, los datos brutos han sido enmascarados, con el fin de delimitar las masas de agua. En la Figura 4.58 se muestran los tres embalses presentes en la zona de estudio: Lindoso, a la izquierda en color verde, Salas, a la derecha en color azul y As Conchas, en el centro, en color anaranjado.

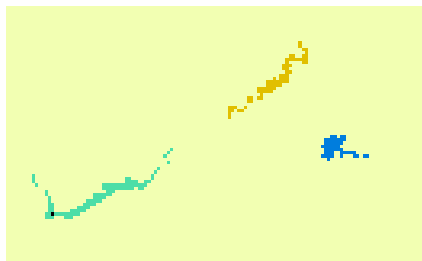


Figura 4.58: Masas de agua. En color verde se muestra el embalse de Lindoso, en naranja, As Conchas y en azul, el de Salas).

Aplicando la expresión 4.12, se ha obtenido la cantidad de Clorofila-a presente en cada uno de píxeles pertenecientes a los tres embalses analizados, se obtiene la secuencia de imágenes mostrada en la Figura 4.59. Como se puede observar, a partir del 10 de mayo, comienza a aumentar significativamente la cantidad de Clorofila-a presente en el embalse de As Conchas, no así en los de Lindoso o Salas, en los que el valor se mantiene relativamente estable.

Analizando la evolución de los valores medios en los tres embalses, se obtienen los perfiles representados en la Figura 4.60, donde se puede apreciar

4.6. Detección y seguimiento de procesos contaminantes en aguas embalsadas.
Caso práctico 5.

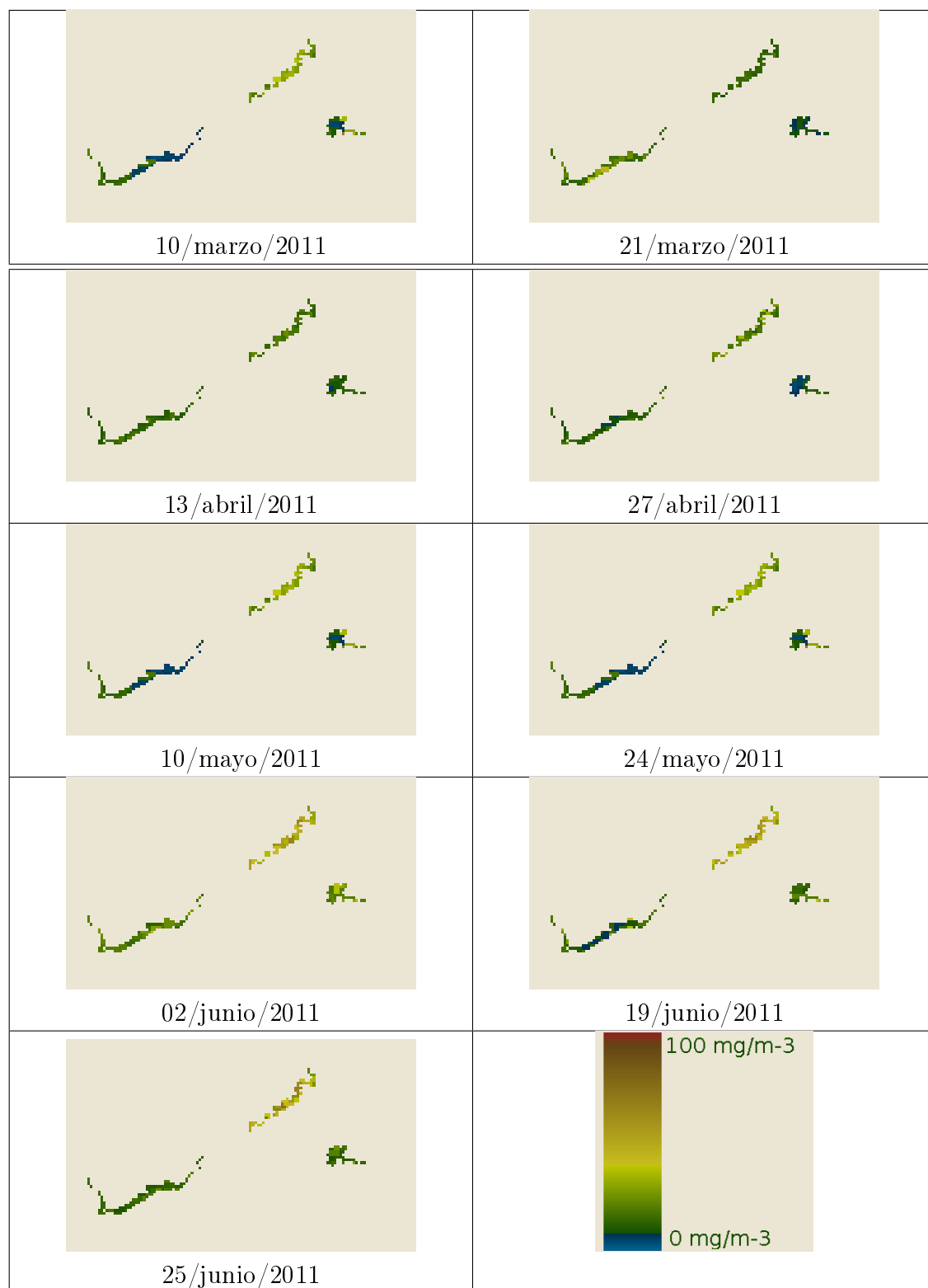


Figura 4.59: Evolución temporal de la concentración de Clorofila-a.

el aumento de la cantidad media de Clorofila-a presente en el embalse de As Conchas, a partir de los datos correspondientes al día 10 de mayo de 2011,

coincidente con el episodio de proliferación descontrolada de algas que se produjo en el mismo.

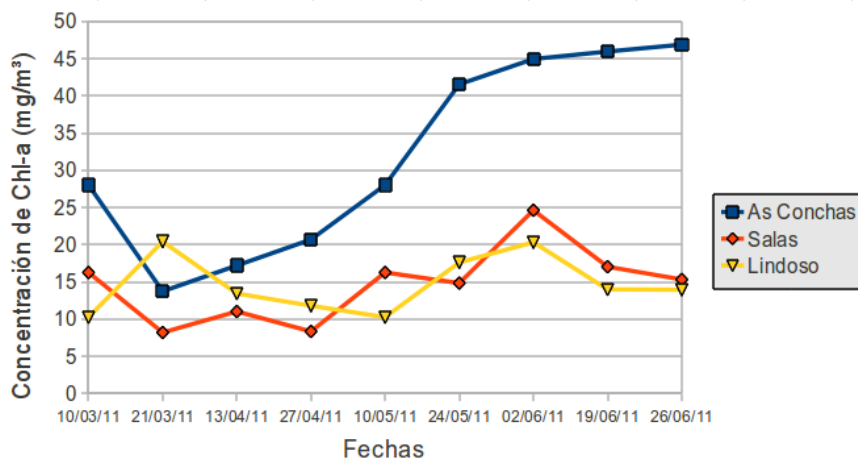


Figura 4.60: Evolución temporal de los valores medios de Clorofila-a. En el eje X, se indican las 9 fechas consideradas, mientras que en el eje Y se indica la concentración media de Clorofila-a, mg/m^3 , en cada uno de los embalses.

Analíticamente, las concentraciones medias y máxima de Clorofila-a en estos tres embalses, durante el periodo analizado, se muestran en las Tablas 4.47 y 4.48.

Tabla 4.47: Concentraciones medias de Clorofila-a (en mg/m^3).

Fecha \ Embalse	Lindoso	Salas	As Conchas
10/marzo	10.2679	16.2679	28.0266
21/marzo	20.4152	8.2078	13.7448
13/abril	13.4511	11.0318	17.2036
27/abril	11.801	8.3514	20.7012
10/mayo	10.2679	16.2758	28.0266
24/mayo	17.6238	14.8460	41.5569
02/junio	20.3206	24.6267	44.9582
19/junio	14.0007	17.0471	45.9523
25/junio	13.9579	15.3359	46.8859

En estos valores máximos de concentraciones de Clorofila-a, se puede ver como en el embalse de Salas, aparecen dos valores significativamente más altos, en las imágenes correspondientes al 10 de marzo y al 10 de mayo, en los que se alcanza una concentración máxima de $68.57 mg/m^3$, si bien, estos valores no parecen ser representativos, al producirse en el mismo píxel, el cual se encuentra en una zona de estrechamiento del vaso del embalse, por lo que puede producirse confusión debido a la resolución espacial del sensor (500 m), ya que

el resto de valores en ese embalse y en esas mismas fechas son apreciablemente inferiores.

Tabla 4.48: Concentraciones máximas de Clorofila-a (en mg/m^3).

Fecha\Embalse	Lindoso	Salas	As Conchas
10/marzo	20.12	68.57	39.98
21/marzo	45.26	12.11	18.90
13/abril	18.62	15.57	23.44
27/abril	24.83	26.96	38.78
10/mayo	20.11	68.57	38.98
24/mayo	28.93	31.33	64.44
02/junio	41.51	46.39	65.15
19/junio	50.42	40.36	64.69
25/junio	22.75	27.82	74.01

Adicionalmente, se ha dispuesto de los registros históricos de la estación *Río Limia en Ponteliñares*, situada aguas arriba del embalse de As Conchas, e integrada en el sistema SAIH/SAICA (Sistema Automático de información de Calidad de las Aguas) de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (Jiménez Requena, 2009). En concreto, se dispone de valores medios diarios durante el intervalo de tiempo considerado, de los siguientes parámetros:

- Nivel río Limia en Ponteliñares.
- Nivel río Limia en Ponteliñares sobre nivel mar.
- pH del río Limia en Ponteliñares.
- Conductividad del río Limia en Ponteliñares.
- Temperatura del río Limia en Ponteliñares.
- Oxígeno del río Limia en Ponteliñares.
- Turbidez del río Limia en Ponteliñares.
- Amonio del río Limia en Ponteliñares.
- Fosfatos del río Limia en Ponteliñares.
- Temperatura en Ponteliñares.

Los valores medidos por la estación en las fechas de referencia se indican en la tabla 4.49 y su variación temporal se muestra gráficamente en la Figura

Tabla 4.49: Valores de los parámetros registrados por la estación automática *Río Limia en Pontelinares*. (Fuente: SAIH Miño-Sil).

Fecha	Oxígeno (mg/l)	Temperatura del agua(°C)	Temperatura (°C)
10/03/2011	9,8	10	8,6
21/03/2011	9,9	11,1	9,9
13/04/2011	8,8	15,4	14,7
27/04/2011	7,7	15,2	13,9
10/05/2011	7,9	14,9	15,9
24/05/2011	6	18,4	18,1
2/06/2011	6,6	16,6	13,9
19/06/2011	5,8	17,3	16,3
26/06/2011	3,7	20,2	25,1

Fecha	pH	Fosfatos (mg/l)	Conductividad ($\mu S/cm$)	Turbidez (NTU)
10/03/2011	6,5	0,04	98	11
21/03/2011	6,5	0,04	100	10
13/04/2011	6,6	0,03	98	14
27/04/2011	6,6	0,05	93	15
10/05/2011	6,6	0,06	88	5
24/05/2011	6,3	0,06	92	8
2/06/2011	6,3	0,04	98	9
19/06/2011	6,4	0	110	11
26/06/2011	6,3	0	111	12

4.61. Como se puede observar, previamente al aumento de la concentración de Clorofila-a, se produce un aumento notable de la cantidad de fosfatos presentes en el agua del río Limia, lo que unido al aumento de las temperaturas, pudiera explicar la proliferación de algas en el vaso del embalse a consecuencia del efecto fertilizante de dicho macronutriente, si bien no alcanzan en ningún caso el valor de 0.096 ppm a partir del cual pueden producirse problemas de eutrofización en lagos (Prat, 1980, citado por Martínez Vidal et al., 1987). No obstante, los valores de concentración media en el embalse de As Conchas, a partir del día 10 de mayo, superan los niveles establecidos para considerarle un ecosistema hipereutrófico, según los criterios establecidos internacionalmente (Vollenweider and Kerekes, 1982) y aplicables en las masas de aguas españolas (Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, 2000), que se muestran en la tabla 4.50. De acuerdo con estos criterios, en especial el del valor medio

4.6. Detección y seguimiento de procesos contaminantes en aguas embalsadas. Caso práctico 5.

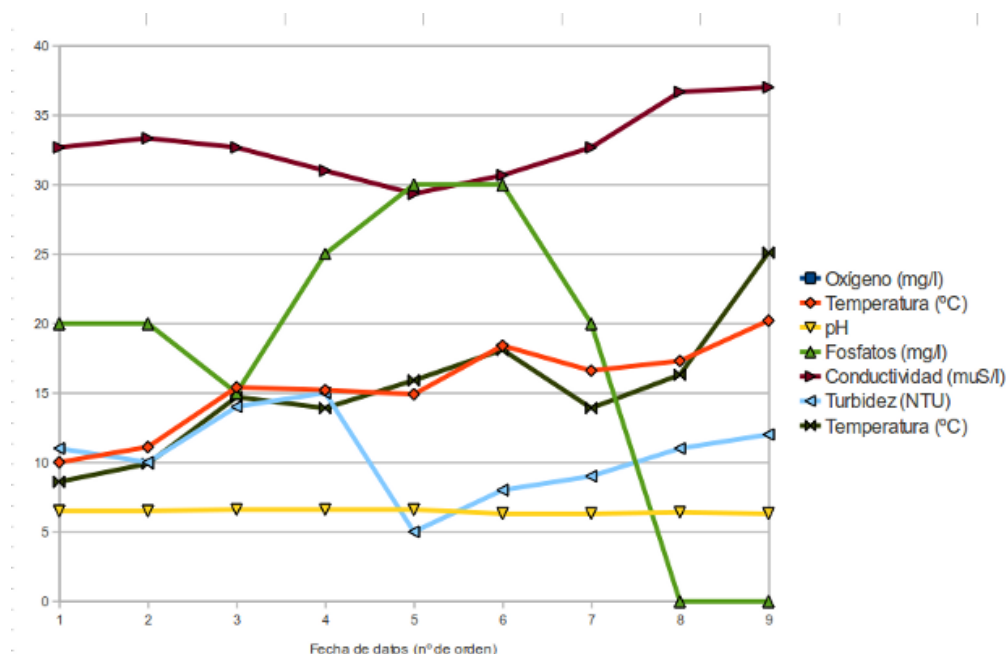


Figura 4.61: Evolución temporal de los parámetros registrados en la estación *Río Limia en Pontelinares*, integrada en el SAIH/SAICA Miño-Sil, en cada una de las 9 fechas analizadas. Los valores correspondientes a la conductividad y a los fosfatos, están escalados para permitir una mejor visualización de los mismos ($\times 0.3$ y $\times 500$, respectivamente).

de la concentración de Clorofila-a, los embalses de Lindoso y Salas estarían también en la categoría de *eutróficos*, si bien no se ha avisado de ningún proceso de contaminación. Dado que se ha utilizado la máscara de cuerpos de agua disponible para MODIS (producto estándar MOD44W) y esta representa niveles habituales de las láminas de agua, puede suceder que en el caso de embalses, en los que el nivel en el momento de la toma de datos sea inferior al correspondiente a la máxima capacidad, se estén considerando en el cálculo de la cantidad de clorofila píxeles totalmente desprovistos de agua o mixtos con parte de agua y parte de suelo desnudo, correspondientes a la franja que aparece en estos casos en la orilla del embalse, lo que puede alterar los resultados, ya que los valores parecen disminuir conforme nos situamos en los píxeles centrales de la masa de agua, tal como se muestra en la Figura 4.62. No obstante, este fenómeno también pudiera ser debido a que en las zonas menos profundas, y por tanto de temperaturas más elevadas, la proliferación de algas es mayor.

Tabla 4.50: Clasificación del grado trófico (Vollenweider and Kerekes, 1982).

Categoría trófica	Clorofila media (mg/m^3)	Clorofila máxima (mg/m^3)
Ultraoligotrófico	< 1.0	< 2.5
Oligotrófico	$1.0 - 2.5$	$2.5 - 8.0$
Mesotrófico	$2.5 - 8.0$	$8 < 25$
Eutrófico	$8 - 25$	$25 < 75$
Hipereutrófico	> 25	> 75

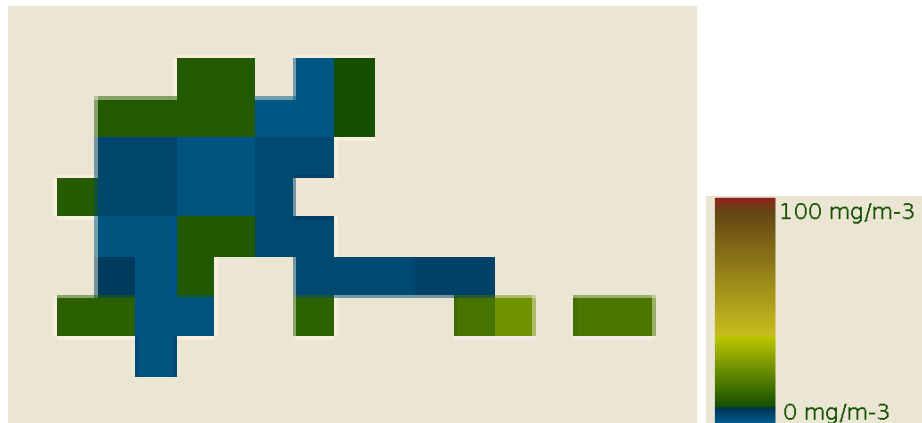


Figura 4.62: Distribución espacial de la concentración media de Clorofila-a. Embalse de Salas (24/mayo/2011).

4.7. Resultados parciales.

Finalizado el capítulo, las conclusiones extraídas son las siguientes, referidas a los diferentes casos prácticos.

Con respecto a los casos prácticos 1 y 2, tras comparar la reflectividad obtenida mediante MODIS y la estimada a partir de ETM+, podemos afirmar que, para estudios en los que la resolución del sensor MODIS sea suficiente, la reflectividad que nos proporciona dicho sensor es similar a la obtenida mediante ETM+, siendo tanto mejor la estimación cuanto mayor sea la homogeneidad de la zona de estudio, medida en términos de existencia de altas frecuencias, ya que la menor resolución de MODIS no detecta objetos inferiores a cierto tamaño y cuya reflectividad se desvíe de la predominante en el entorno.

El método utilizado en este trabajo, simplifica los cálculos con respecto a los propuestos por Liang et al. (2002), ya que calculando el promedio de reflectividad de los píxeles ETM+ que forman el píxel de MODIS, los resultados son buenos en términos generales, si bien es cierto que tal afirmación se refiere únicamente a las bandas del rojo e infrarrojo próximo, que son las consideradas

en el presente estudio, y que en MODIS presentan una resolución de 250 m, a diferencia de lo considerado por Liang, que se refería a todas las bandas con 500 m.

Puesto que la zona analizada no presenta un relieve muy acusado, en relación con la resolución de MODIS, la influencia del mismo en la estimación de la reflectividad no tiene una importancia significativa.

Como se ha comprobado, la clase de pertenencia no afecta prácticamente a los resultados, pues como se ha puesto de manifiesto, la mayor diferencia entre la reflectividad promediada y la de MODIS se produce en zonas con mayor densidad de límites abruptos, estén o no, vinculados a una determinada clase de pertenencia.

Puede afirmarse que el método propuesto para la obtención de imágenes interpoladas MODIS, a partir de otras dos ETM+ consigue mejorar la resolución espacial de las mismas, ya que la correlación entre la imagen generada y la ETM+ de control, aumenta en todos los casos analizados. Tal circunstancia permite disponer de imágenes multiespectrales con una frecuencia temporal de 1-2 días, y una resolución espacial igual a la de ETM+, lo que amplía las posibilidades de utilización del sensor MODIS.

El método consistente en suponer constantes las diferencias entre valores digitales, no ha resultado ser válido para mejorar la calidad de las imágenes interpoladas, por lo que no se recomienda su utilización. Por otro lado, el método que obtiene la diferencia entre reflectividades por interpolación lineal de dos imágenes coincidentes en el tiempo, sí que ha conseguido aumentar la correlación entre la imagen MODIS y la ETM+ de control, siendo un método sencillo de implementar, por lo que puede utilizarse de forma sistemática para la obtención de imágenes sintéticas de 30 m de resolución espacial y 1 día de resolución temporal.

Los dos análisis globales expuestos en el presente trabajo, sobre validación radiométrica de MODIS a partir de ETM+ y el desarrollo de un método de interpolación temporal para la obtención de imágenes MODIS con una resolución espacial de 30 m, han demostrado que los datos proporcionados por los citados sensores, son similares en lo que a valores de reflectividad superficial se refiere, coincidiendo en esto con lo ya expuesto por otros autores (Liang et al., 2002; Hall et al., 1991) así como que es posible aumentar la resolución espacial de MODIS a partir de dos imágenes ETM+ de fechas relativamente cercanas, mediante interpolación lineal de los valores de diferencias entre

píxeles, mediante un método sencillo y cuyos resultados son comparables a los expuestos por Gao et al. (2006).

Con este trabajo, se ha constatado que es posible la utilización del sensor MODIS para la obtención de parámetros de interés ambiental que pueden ser aplicados a un mayor rango de escalas del inicialmente previsible.

Con respecto al caso práctico 3, se ha señalado que uso de datos diarios de reflectividad para hacer estudios temporales de ciertos parámetros biofísicos, está condicionado por la presencia de nubes, por la posición del sensor y por el ángulo cenital del sol en el momento de la adquisición de los datos, así como por los efectos de la pluviometría.

Mientras que los valores de reflectividad están afectados por estos tres factores, el NDVI se muestra más independiente del efecto producido por la posición del sensor, ya que éste afecta de forma similar a las dos bandas espectrales utilizadas en su cálculo. No obstante, a la vista de los resultados, podemos afirmar que, mientras que la posición del sol afecta de forma similar a la reflectividad en dichas bandas, lo que implica una baja correlación con el NDVI, el ángulo cenital del sensor afecta de forma diferente a cada una de ellas, provocando una mayor correlación entre dicho ángulo y el NDVI.

Los episodios de lluvia alteran las características espectrales de las cubiertas, dificultando la comparación entre valores obtenidos al analizar series temporales de datos con el fin de detectar variaciones estacionales, debiendo prestar atención a los datos de pluviometría correspondientes al periodo analizado.

En el caso de considerar la distribución espacial de los valores de reflectividad, se ha demostrado que la pluviometría influye de forma apreciable a la hora de obtener documentos de ocupación de suelo, debiendo ser tenida en cuenta tal circunstancia a la hora de efectuar la selección de datos.

Por otro lado, tal como queda de manifiesto, cuando se trata de obtener documentos cuantitativos (índices), basados en operaciones entre bandas, dado que la pluviometría parece influir de forma similar en todas las bandas, circunstancia por otra parte lógica, pues la respuesta espectral del agua en las bandas analizadas es muy característica, presentando una alta absorción en todas ellas, los efectos son menores, aunque siguen siendo significativos, por lo que tal circunstancia deberá ser tenida en cuenta en los cálculos.

En lo referente al caso práctico 4, se ha comprobado como el proceso de interpolación espacial de imágenes MODIS, produce un aumento significativo de la precisión de los documentos temáticos derivados a partir de este

sensor, al compararlos con los obtenidos con el sensor TM. Ello nos permite afirmar que es posible utilizar el sensor MODIS con la finalidad de obtener documentos cualitativos de ocupación del suelo en un ámbito regional/local, con la resolución temporal de este sensor (1 día), mejorando la capacidad de seguimiento de la evolución temporal del desarrollo de cultivos.

Relativo al estudio de la eutrofización de lagos y embalses (caso práctico 5), se puede afirmar que los datos procedentes de sensores espaciales de alta resolución temporal se han mostrado útiles a la hora de realizar un seguimiento de la evolución de las concentraciones de Clorofila-a en masas de agua cuyo tamaño sea superior al tamaño del píxel de los mismos, que en este caso, es de 500 m.

Como se ha mostrado, se produce un aumento de los valores calculados de la concentración de Clorofila-a a partir del día 10 de mayo, coincidiendo con la información recogida en prensa (La Voz de Galicia, 25/mayo/2011 y 01/junio/2011, El País, 13/junio/2011), lo que certifica que la metodología se ha aplicado correctamente, y que el modelo OC2, desarrollado inicialmente para aguas oceánicas, puede ser utilizado también en el caso de aguas interiores y, más concretamente, de embalses artificiales.

La utilización de datos adquiridos por los sensores de alta resolución temporal, pero baja resolución espacial, está limitada por las dimensiones de las masas de agua de las cuales se va a realizar el seguimiento. No obstante, aunque los resultados puedan no ser cuantitativamente precisos, sí se ha demostrado su utilidad como modo de seguimiento y control, permitiendo activar alarmas en caso de aumentos significativos de la concentración de Clorofila-a o superarse ciertos umbrales, que puedan estar relacionadas con episodios de eutrofización en lagos o embalses. No obstante, en el caso de detectarse un posible caso de contaminación, es necesario determinar con mayor precisión la superficie realmente cubierta por la lámina de agua, con el fin de reducir los errores que se producen al introducir en el cálculo píxeles mixtos tierra-agua, correspondientes a la franja de suelo desnudo que aparece en el perímetro del embalse.

El hecho de que sea posible utilizar este sensor para realizar un seguimiento de ciertos parámetros relacionados con la calidad de las aguas, proporciona una herramienta de coste reducido para el usuario (puesto que los datos se distribuyen de forma gratuita) y que adquiere datos de calidad homogénea en amplias zonas del territorio, por lo que puede resultar de gran interés en ciertos ámbitos.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y POSIBLES LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.

5.1. Conclusiones generales.

Como consecuencia del trabajo de investigación realizado en la presente Tesis, se ha establecido una metodología para la obtención de parámetros biofísicos e indicadores agroambientales, a partir de datos procedentes de satélite de alta resolución temporal.

A continuación, se presentan las principales conclusiones y aportaciones al conocimiento, derivadas de dicha investigación.

- La teledetección espacial, si bien constituye una valiosa fuente de obtención de datos para aplicaciones ambientales, presenta deficiencias en aspectos tales como carencia de alta resolución temporal y espacial simultáneamente, lo que es conveniente subsanar, mediante la introducción de metodologías tales como las propuestas.
- Es posible la integración de datos de alta y baja resolución espacial procedentes de TM/ETM+ y MODIS, al registrar ambos sensores unos valores de reflectividad concordantes. Por otro lado, la interpolación espacial propuesta permite la obtención de datos sintéticos de alta resolución espacial y temporal, que posibilitan un mejor seguimiento de procesos dinámicos.
- Aunque el número de indicadores ambientales normalizados que pueden obtenerse, exclusivamente, con el tipo de sensores contemplados en este trabajo, es limitado, la optimización de las metodologías y la aplicación

de los mismos de forma generalizada, es útil para proponer y establecer nuevos indicadores, o modificaciones de los existentes, basados en datos adquiridos con este tipo de sensores.

- El número de parámetros que es posible obtener mediante esta metodología es prácticamente ilimitado, ya que pueden implementarse nuevas ecuaciones y modelos de obtención, conforme sean publicados, siendo el usuario especialista el que decida cuál es el que mejor se adapta a sus necesidades.
- Una de las causas de la dificultad para la aplicación de los modelos de forma generalizada, proviene de la necesidad de incluir datos externos, entre los que se encuentran los meteorológicos (termométricos y pluviométricos, principalmente), los de elevación, edafológicos, geológicos, etc. que no proceden de satélite y cuya disponibilidad no siempre está asegurada, así como la periodicidad de los mismos, que puede no ser óptima, echándose de menos, tal vez, una mayor estandarización en los procedimientos de difusión y acceso a los mismos.
- La aplicabilidad temporal de las metodologías desarrolladas en este trabajo, está asegurada a medio y largo plazo, dadas las características de las mismas, y por la continuidad temporal de los tipos de sensores utilizables (multiespectrales de media y baja resolución espacial y alta resolución temporal), en especial, por la continuidad de los conjuntos de datos comparables con los proporcionados por MODIS y TM/ETM+.
- Para permitir una mayor adaptabilidad de las metodologías propuestas, los modelos presentados se pueden adaptar a datos procedentes de otro tipo de sensores, pues la estructura modular del conjunto de aplicaciones creadas permite la integración y proceso de datos procedentes de múltiples fuentes, siendo posible la modificación de los módulos de preparación de datos, con el fin de adaptarle a las características de los nuevos sensores empleados.
- La metodología presentada es escalable y trasladable, lo que permite aplicarla a diversas regiones geográficas, así como a distintas escalas territoriales.
- La automatización de procesos permite realizar un seguimiento sistemático de aspectos ambientales, quedando registros de parámetros

e indicadores que permitirán controlar y gestionar de forma eficiente los recursos naturales en el área de estudio.

5.2. Posibles líneas de investigación futuras .

En el presente trabajo, se ha presentado un modelo de obtención de parámetros ambientales, a partir de datos procedentes de sensores espaciales de alta resolución temporal. La metodología propuesta, permite integrar datos radiométricos procedentes del sensor MODIS, junto con datos meteorológicos de la AEMET y otra información auxiliar, con la finalidad de obtener un determinado número de índices cuantitativos y/o cualitativos. Algunos aspectos de la presente investigación pueden ser ampliados y completados con trabajos posteriores, como los que se indican a continuación:

- Considerar datos provenientes de otros sensores, incluyendo los correspondientes algoritmos de preproceso y adaptación de formatos.
- La funcionalidad del modelo puede ser aumentada, mediante la inclusión de nuevos parámetros ambientales, que puedan ser derivados a partir de los sensores considerados inicialmente, o bien a partir de nuevos sensores.
- Establecer un modelo de corrección de la influencia de la pluviometría en la reflectividad, con el fin de minimizar sus efectos.
- Proponer, en su caso, una estructura intermedia, para las fuentes de datos auxiliares, que permita integrar nuevos orígenes de los citdos datos.
- Optimizar la *interface* de acceso a los resultados, mejorando la interacción del usuario con la aplicación de visualización y, en su caso, de descarga de los mismos.

Bibliografía

Ackerman, S. A., Holz, R. E., Frey, R., Eloranta, E. W., Maddux, B. C., McGill, M., 2008. Cloud detection with MODIS. part II: Validation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25 (7), 1073–1086.

URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2007JTECHA1053.1>

Ackerman, S. A., Strabala, K. I., Menzel, W. P., Frey, R. A., Moeller, C. C., Gumley, L. E., et al., 1998. Discriminating clear sky from clouds with MODIS. *Journal of Geophysical Research* 103 (D24), 32–141.

Adobe Developers Association, 1992. TIFF (TM) Revision 6.0 Final.

Agate, S. J., Drury, C. G., 1980. Electronic calculators: which notation is the better? *Applied Ergonomics* 11 (1), 2 – 6.

URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003687080901143>

Bally, P., Angleraud, C., Somer, Y., Oct 2000. The spot image coherence product and dimap: A new format for a new product. In: Harris, R. A., Ouwehand, L. (Eds.), *SAR Workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites; Working Group on Calibration and Validation*. Vol. 450. European Space Agency, 2000.

Baret, F., Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35 (2-3), 161 – 173.

URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-48BK8FF-1B/2/44379b7ec48e94418f4bd5657f05ec0e>

Bartholomé, E., Belward, A. S., 2005. Glc2000: a new approach to global land cover mapping from earth observation data. *International Journal of Remote Sensing* 26 (9), 1959 – 1977.

URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=17210907&site=ehost-live&scope=site>

- Batanero, C., 2001. Aleatoriedad, modelización, simulación. In: X Jornadas sobre el Aprendizaje y la Enseñanza de las Matemáticas, Zaragoza, 2001.
- Bauer, M. E., Burk, T. E., Ek, A. R., Coppin, P. R., Lime, S. D., Walsh, T. A., Walters, D. K., Belfort, W., Heinzen, D. F., 1994. Satellite inventory of minnesota forest resources. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 60 (3), 287–298.
- Behrens, C. E., 2009. Landsat and the Data Continuity Mission. CRS Report Congress R40594. Congressional Research Service, Washington, DC.
- Birth, G. S., McVey, G. R., 1968. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. *Agronomy Journal* 60 (6), 640–643.
- Brachet, G., 1985. Description du programme francais spot. In: de Télédétection, A. Q. (Ed.), *Télédétection et gestion des ressources: l'aspect opérationnel*. Vol. 5. Association Québécoise de Télédétection, Association Québécoise de Télédétection, pp. 13 – 21.
- Broge, N. H., Leblanc, E., 2001. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment* 76 (2), 156 – 172.
- URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-42Y63V7-2/2/9f6643f420dba07fd3b15841f8cef9b6>
- Brown, M. C., 2006. *Hacking Google Maps and Google Earth*. Wiley Publishing, Inc.
- Büttner, G., Feranec, J., Jaffrain, G., Mari, L., Maucha, G., Soukup, T., 2004. The corine land cover 2000 project. *EARSeL eProc* 3 (3), 331–346.
- Carroll, M., Townshend, J., Di Miceli, C., Noojipady, P., Sohlberg, R., 2009. A new global raster water mask at 250 meter resolution. *International Journal of Digital Earth* 2 no. 4, 7 – 17.
- Ceccato, P., Gobron, N., Flasse, S., Pinty, B., Tarantola, S., 2002. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1: Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment* 82 (2-3), 188 – 197.
- URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-45WGGK8-1/2/5d8451e685b5f2ba0248731ea63b77de>

- Centro de Publicaciones. Ministerio de Medio Ambiente, 2000. Indicadores ambientales. Una propuesta para España., 1st Edition. Ministerio de Medio Ambiente de Medio Ambiente, iISBN: 84-8320-098-8.
- Chavez, P., 1989. Radiometric calibration of landsat thematic mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55, 1285–1294.
- Chen, J. M., 1996. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. *Canadian Journal of Remote Sensing* 22 (3), 229–242.
- Cifrián Bemposta, E., Muñoz García, Y., Andrés, A., Coz Fernandez, A., Viguri Fuente, J., 2006. Punto focal de residuos de cantabria: Sistemas de indicadores. In: VIII Congreso Nacional de Medio Ambiente.
- Cifuentes Sánchez, V. J., González Rojas, D., 2010. Tecnologías de la información geográfica: La información geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Ch. Infraestructura de Datos Espaciales de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, pp. 1221–1235.
- Clevers, J. G. P. W., 1991. Application of the WDV in estimating LAI at the generative stage of barley. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 46 (1), 37 – 47.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VF4-48DYW5N-2J/2/92286fa0736cc1399c9edef02183cbd2>
- Cohen, J., 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement* 20 (1), 37–46.
- Cohen, W. B., Spies, T. A., Fiorella, M., 1995. Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western oregon, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing* 16 (4), 721–746.
URL <http://www.informaworld.com/10.1080/01431169508954436>
- Collins, J. B., Woodcock, C. E., 1996. An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal landsat TM data. *Remote Sensing of Environment* 56 (1), 66 – 77.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-3VVT36S-7/2/eb109c91d4382c8a0f02e08472e68555>

- Congalton, R. G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 37 (1), 35 – 46.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-48C787H-4S/2/077102f9b16cc7db72874ecb5a7343d3>
- Crist, E. P., 1985. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment* 17 (3), 301 – 306.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-48CGKYK-K/2/5e20689f4f04bfccdef44d20312ed86c>
- Crist, E. P., Cicone, R. C., May 1984. A physically-based transformation of thematic mapper data—the TM tasseled cap. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on GE-22* (3), 256 –263.
- Crist, E. P., Kauth, R. J., 1986. The tasseled cap de-mystified. transformations of MSS and TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52, 81–86.
- Davis, S. M., Landgrebe, D. A., Phillips, T. L., Swain, P. H., Hoffer, R. M., Lindenlaub, J. C., Silva, L. F., 1978. *Remote sensing: The quantitative approach*. New York, McGraw-Hill International Book Co.
- Demcsak, M. F., 1997. *Hdf-eos library users guide for the ecs project volume 2: Function reference guide*. Tech. rep., Document 170-TP-006-003, Hughes Applied Information Systems Upper Marlboro, Maryland.
- Dymond, C. C., Mladenoff, D. J., Radeloff, V. V., 2002. Phenological differences in Tasseled Cap indices improve deciduous forest classification. *Remote Sensing of Environment* 80 (3), 460 – 472.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-45B5P0C-9/2/8c02ccc0f2f9f100411b502e2bcf89c7>
- EROS Data Center, enero 2006. *MODIS Reprojection Tool. User Manual*. EROS Data Center, 3rd Edition.
- Fensholt, R., Sandholt, I., 2003. Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment* 87 (1), 111 – 121.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-49G44VH-5/2/e5b71d0cd1ca6007c2a6e10055a852ff>

- Folk, M., McGrath, R. E., Yeager, N., 1999. HDF: an update and future directions. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International. Vol. 1. pp. 273 –275 vol.1.
- Foody, G. M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 80 (1), 185 – 201.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425701002954>
- Fortner, B., May 1998. HDF: The hierarchical data format. *Dr. Dobb's Journal* 23 (5), 42–48.
- Gabrielsen, P., Bosch, P., 2003. Environmental Indicators: typology and use in reporting. European Environment Agency. EEA internal working paper August.
- Gamon, J. A., Surfus, J. S., 1999. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist* 143 (1), 105–117.
- Gao, B., 1996. NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58 (3), 257 – 266.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-3VVT5PP-B/2/b6ca2db31b6fbfb55f91a795fa08468f>
- Gao, F., Masek, J., Schwaller, M., Hall, F., 2006. On the blending of the landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily landsat surface reflectance. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 44 (8), 2207–2218.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Merzlyak, M. N., 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 58 (3), 289–298.
- Goddard Space Flight Center, 1972. ERTS-1 data user's handbook. document no. 71sd4249. Tech. rep., Goddard Space Flight Center.
- Goetz, A. F. H., Wellman, J. B., Barnes, W. L., 1985. Optical remote sensing of the earth. *Proceedings of the IEEE* 73 (6), 950 – 969.
- Grenier, M., Labrecque, S., Benoit, M., Allard, M., 2008. Accuracy assessment method for wetland object-based classification. In: *Proceedings GEOBIA. GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century*.

- Gu, L., Ren, R., Wang, H., 2010. MODIS imagery geometric precision correction based on longitude and latitude information. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications* 17 (Supplement 1), 73 – 78.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B8H14-50KTYMG-G/2/cfea6d39e1909f2f1efcc0c0f5723a5b>
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., 1995. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment* 54 (2), 127 – 140.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-3YYMS35-Y/2/3dd7bcf5b69478eb6a18b383f9029331>
- Hall, F. G., Strebel, D. E., Nickeson, J. E., Goetz, S. J., 1991. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. *Remote Sensing of Environment* 35, 11–27.
- Hamilton, E., Sept 1992. JPEG file interchange format. version 1.02. Tech. rep., C-Cube Microsystems, 1778 McCarthy Blvd. Milpitas, CA 95035.
- Herold, M., Woodcock, C. E., di Gregorio, A., Mayaux, P., Belward, A. S., Latham, J., Schmullius, C. C., July 2006. A joint initiative for harmonization and validation of land cover datasets. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 44 (7), 1719 –1727.
- Herrera, R. J., López, M. D. M., 1996. Indicadores ambientales: Una propuesta para España. Ministerio de Medio Ambiente.
- Huete, A., Justice, C., Leeuwen, W., 1999. MODIS vegetation index (MOD 13). algorithm theoretical basis document. Tech. rep., University of Arizona.
- Huete, A., Justice, C., Liu, H., 1994. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment* 49 (3), 224–234.
- Huete, A. R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25 (3), 295 – 309.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-488Y05B-3/2/ceaf1252c7c2e35b1b4929b7bc7095d7>
- Hunt Jr, E. R., Rock, B. N., 1989. Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. *Remote sensing of environment* 30 (1), 43–54.

- Irons, J. R., Masek, J. G., 2006. Requirements for a landsat data continuity mission. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 72 (10), 1102.
- Irons, J. R., Murphy-Morris, J., 23-28 July 2007 2007. An operational land imager for the landsat data continuity mission. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007. IGARSS 2007. IEEE International. pp. 2808 – 2810.
- Itten, K. I., Meyer, P., 1993. Geometric and radiometric correction of TM data of mountainous forested areas. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 31 (4), 764–770.
- Jensen, J. R., 1996. *Introductory digital image processing. A remote sensing perspective*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Jesinghaus, J., 1998. A european system of environmental pressure indices: Introduction to the political and theoretical background. Excerpts from the *Environmental Pressure Indices handbook*, prepared for the Advanced Study Course.
- Jiménez Requena, E., 2009. Integración de los sistemas saih y saica en la cuenca miño-limia. In: *Congreso Nacional de Medio Ambiente, CONAMA*.
- Jin, S., Sader, S. A., 2005. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment* 94 (3), 364 – 372.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-4F2B7GS-1/2/e03885f8af8274fbe8b6792ac39a5a22>
- Justice, C., Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D., Csiszar, I., Morisette, J., Kaufman, Y., 2006. *MODIS Fire Products. Algorithm Theoretical Basis Document*. MODIS Science Team, version 2.3 Edition.
- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R. E., Saleous, N., Roy, D. P., Morisette, J. T., 2002. An overview of MODIS land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment* 83 (1-2), 3 – 15.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-46P1SXS-2/2/9deb80a73b79082c10e5a4670d78f305>

- Kasprzyk, D. M., Drury, C. G., Bialas, W. F., 1979. Human behaviour and performance in calculator use with algebraic and reverse polish notation. *Ergonomics* 22 (1), 1011–1019.
- Kaufman, Y. J., Tanre, D., 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 30 (2), 261–270.
- Kauth, R. J., Thomas, G. S., 1976. The Tasseled Cap. a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by landsat. In: *Proceedings of the symposium on machine processing of remotely sensed data*. Vol. 29.
- Kendall, G., Sep. 2001. Introduction to artificial intelligence. Web.
URL <http://www.cs.nott.ac.uk/~gxxk/courses/g5aiai/006neuralnetworks/neural-networks.htm>
- Kendall, L. C., 2004. High Spectral Resolution MODIS Algorithms for Ocean Chlorophyll in Case II waters. NAS5-31716 Final Report. NASA Goddard Space Flight Center.
- Kimura, R., Kimura, K., Tanakamaru, S., Otsuki, K., 2000. The effect of rainfall on the spectral reflectance of the leaf and spectral vegetation vigor index. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources* 13, No 5, 355–361.
- King, M. D., Kaufman, Y. J., Menzel, W. P., Tanre, D., 2002. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 30 (1), 2–27.
- Knyazikhin, Y., Glassy, J., Privette, J. L., Tian, Y., Lotsch, A., Zhang, Y., Wang, Y., Morisette, J., Votava, P., Myneni, R., 1999. MODIS leaf area index (LAI) and fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) product (MOD15). algorithm theoretical basis document. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, versión 4.0 Edition.
- Lambin, E. F., Strahler, A. H., 1994. Indicators of land-cover change for change-vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales. *International Journal of Remote Sensing* 15 (10), 2099–2119.

- Land Processes DAAC USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Febrero 2008. MODIS Reprojection Tool Users Manual, release 4 Edition. Vol. 1. Land Processes DAAC USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center.
- Landsat Team, April 2007. Landsat 7 Level 1 Data Format Control Book. Department of the Interior. U.S. Geological Survey, Sioux Falls, South Dakota., 11th Edition.
- Lee, C., 1974. Modelos de planificación. Editorial Pirámide.
- Lee, T. E., Miller, S. D., Turk, F. J., Schueler, C., Julian, R., Deyo, S., Dills, P., Wang, S., 2006. The NPOESS VIIRS day/night visible sensor. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87 (2), 191–199.
- Liang, S., Fang, H., Chen, M., Shuey, C. J., Walthall, C., Daughtry, C., Morisette, J., Schaaf, C., Strahler, A., 2002. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products. methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment* 83 (1), 149–162.
- Liu, C., Frazier, P., Kumar, L., 2007. Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment* 107 (4), 606 – 616.
- URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425706004068>
- Lobser, S. E., Cohen, W. B., 2007. MODIS tasselled cap: land cover characteristics expressed through transformed MODIS data. *International Journal of Remote Sensing* 28 (22), 5079–5101.
- Lowry, I. S., 1965. A short course in model design. *Journal of the American Institute of Planners* 31 (2), 158 – 166.
- Major, D. J., Baret, F., Guyot, G., 1990. A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *International Journal of Remote Sensing* 11 (5), 727–740.
- Markham, B. L., Barker, J. L., 1986. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. *EOSAT Landsat Technical Notes* 1, 3–8.
- Martins, J. V., Tanré, D., Remer, L., Kaufman, Y., Mattoo, S., Levy, R., 2002. MODIS cloud screening for remote sensing of aerosols over oceans using spatial variability. *Geophysical Research Letters* 29 (12), 4.

- Martín, M., Gómez, I., Chuvieco, E., 2005. Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping mediterranean burned scars from MODIS data. In: Eds. Paris, U. d. Z. (Ed.), Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment. (J. Riva, PérezCabello, F. y Chuvieco, E.,. Vol. 193. p. 198.
- Martín, M. P., Chuvieco, E., 1998. Cartografía e inventario de incendios forestales en la península ibérica partir de imágenes NOAA-AVHRR. Serie Geográfica 7, 109–128, ISSN: 1136-5277.
- Martínez Vidal, J. L., Río Jiménez, M. T., Aguilar Ruiz, J., 1987. Estudio sobre la eutrofización de las albuferas de adra (almería). Paralelo 37 11 (11), 6.
- Maxwell, C., Kim, R., Gaskins, T., Kuehnel, F., Hogan, P., 2007. Nasa's world wind. <http://worldwind.arc.nasa.gov>.
URL <http://worldwind.arc.nasa.gov/>
- McDonald, R. A., 1997. CORONA: Between the sun and the earth: The first NRO reconnaissance eye in space. ASPRS (Bethesda, Md.).
URL <http://www.nro.gov/corona/facts.html>
- Micijevic, E., Ago. 2009. Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM) Calibration Parameter File (CPF) definition. Tech. Rep. Version 5, U.S. Geological Survey.
- Ministerio de Medio Ambiente, 2000. Tronco común de indicadores. Ministerio de Medio Ambiente.
- Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, 2011. Banco público de indicadores ambientales. página web.
URL http://www.mma.es/portal/secciones/calidad_contaminacion/indicadores_ambientales/banco_publico_ia/index.htm
- Morisette, J. T., Privette, J. L., Justice, C. O., 2002. A framework for the validation of MODIS land products. Remote Sensing of Environment 83 (1-2), 77 – 96.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-4700BJP-5/2/74d3ab1c6491129e597d531a4206d3c3>

- Myneni, R., Knyazikhin, Y., Glassy, J., Votava, P., Shabanov, N., 2003. User's Guide FPAR, LAI (ESDT: MOD15A2) 8-day Composite. Terra MODIS Land Team.
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., Marshak, A. L., mar. 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 33 (2), 481 –486.
- NASA, Earth Observing System, 2011. NASA EOS mission profiles. Web page. URL http://eospso.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/mission_profiles/show_mission_list.php?id=20
- Neumann, K., Herold, M., Hartley, A., Schullius, C., 2007. Comparative assessment of corine2000 and glc2000: Spatial analysis of land cover data for europe. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9 (4), 425 – 437.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243407000141>
- Observatorio de la Sostenibilidad, 2005. Primer informe del observatorio de la sostenibilidad en españa. *Ambienta: La revista del Ministerio de Medio Ambiente* 47, 6–15.
- O'Reilly, J., Hooker, S., Firestone, E., O'brien, M., Siegel, D., Toole, D., Menzies, D., Smith, R., Mueller, J., Mitchell, B., Kahru, M., et al., 2000. Seawifs postlaunch calibration and validation analyses, part 3. NASA Technical Memorandum 11, NASA Goddard Space Flight Center.
- Organisation for Economic Co-operation and Development, 1991. *Environmental Indicators. A Preliminary Set*. OECD Publications and Information Center, 2001 L Street, N.W. Suite 700, Washington, DC 20036.
- Organisation for Economic Co-operation and Development, 1993. *OECD core set of indicators for environmental performance reviews*. OECD Publications and Information Center, 2001 L Street, N.W. Suite 700, Washington, DC 20036.
- Organisation for Economic Co-operation and Development, 2008. *OECD key environmental indicators*. OECD.
- Ormeño, S., 1993. *Teledetección fundamental*. Universidad Politécnica de Madrid.

- Ormeño Villajos, S., Arozarena Villar, A., Martínez Peña, M., Palomo Arroyo, M., Villa Alcázar, G., Peces Morera, J. J., Pérez García, L., 2009. Los satélites de media y baja resolución espacial como fuente de datos para la obtención de indicadores ambientales. In: IX Congreso Nacional de Medio Ambiente.
- Palomo Arroyo, M., 2006. El formato HDF para el almacenamiento de información relativa a imágenes de satélite. importación y exportación en SOV de ficheros HDF. Trabajo del curso de doctorado Cartografía Ambiental, E.T.S.I. Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid.
- Pinty, B., Verstraete, M. M., 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Plant Ecology* 101, 15–20, 10.1007/BF00031911. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF00031911>
- Platnick, S., King, M. D., Ackerman, S. A., Menzel, W. P., Baum, B. A., Riedi, J. C., Frey, R. A., 2003. The MODIS cloud products: algorithms and examples from terra. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 41 (2), 459 – 473.
- Prosise, J., 1994. The BMP file format. *PC Magazine* 13 (15), 357. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=9409080370&site=ehost-live&scope=site>
- Purvis, M., Sambells, J., Turner, C., 2006. *Beginning Google maps applications with PHP and Ajax: from novice to professional*. Springer.
- Pérez de los Cobos Marín, P., 2002. Sistema de información agroclimática para el regadío. *Mapping* 83, 52–61.
- Pérez de los Cobos Marín, P., 2005. El sistema de información agroclimática para el regadío ya se puede consultar en internet. *Vida rural* 12 (212), 28–31.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., Sorooshian, S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 48 (2), 119 – 126. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-487DJV8-9/2/49f44d41118b9451c6e9f92cd17493a1>
- Qi, J., Marsett, R., Heilman, P., Biedenbender, S., Moran, S., Goodrich, D., Weltz, M., 2002. RANGES improves satellite-based information and land

- cover assessments in southwest united states. EOS Transactions 83, 601–606.
- Quade, E., Boucher, W., 1968. Systems analysis and policy planning: applications in defense. American Elsevier Pub. Co.
- Rapid Spacecraft Development Office, 2010. RSDO Rapid III 300HP specification/data sheet.
URL <http://rsdo.gsfc.nasa.gov/images/catalog2010/300HP.pdf>
- Rapport, D., Friend, A., 1979. Towards a comprehensive framework for environmental statistics: a stress-response approach. Minister of Supply and Services Canada.
- Richardson, A. J., Wiegand, C. L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information (by gray mapping of landsat MSS data). Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 43, 1541–1552.
- Rikimaru, A., Roy, P. S., Miyatake, S., 2002. Tropical forest cover density mapping. Tropical Ecology 43 (1), 39–47.
- Ritter, N., Ruth, M., 1995. GeoTIFF Format Specification. GeoTIFF Revision 1.0.
- Rock, B. N., Vogelmann, J. E., Williams, D. L., Vogelmann, A. F., Hoshizaki, T., 1986. Remote detection of forest damage. BioScience 36 (7), 439–445.
- Rodríguez Pérez, A. J., Baños Calvo, S., Fuentelsaz Pérez, M., M., D. P. J., Muñoz Rastrero, A., 21–23 Septiembre 2005. La aplicación web de teledetección SIMANCTEL (sistema múltiple de análisis de los cultivos por teledetección): un ejemplo de difusión de datos. In: XI Congreso Nacional de Teledetección.
- Rothenberg, J., Ago 1989. AI, Simulation & Modeling. John Wiley & Sons, Inc., Ch. The Nature of Modeling., pp. 75 – 92.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. NASA Special Publication 351, 309–317.
- Rubio, M. A., Riaño, D., Cheng, Y. B., Ustin, S. L., 2006. Estimation of canopy water content from MODIS using artificial neural networks trained with radiative transfer models. 6th EMS/6th ECAC. Ljubljana , Slovenia.

- Running, S. W., Nemani, R., Glassy, J. M., Thornton, P. E., Abril 1999. MODIS Daily photosynthesis (PSN) and annual Net Primary Production (NPP) Product (MOD17). Algorithm Theoretical Basis Document. MODIS Science Team, version 3.0 Edition.
- Ríos, S., sept. 1995. Modelización, 1st Edition. Alianza Editorial.
- Schowengerdt, R. A., 2007. Remote sensing: models and methods for image processing. Academic Press, San Diego.
- Schweiss, R. J., Ho, E., Ullman, R., Samadi, S., 312006-aug.4 2006. The NPOESS preparatory project science data segment: Brief overview. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference on. pp. 1284 –1287.
- Schweiss, R. J., Hunter, M., Samadi, S., 2008. The NPOESS preparatory project science data segment: The final as built description. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International. Vol. 4. pp. IV –609 –IV –612.
- Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, 2000. Libro blanco del agua en España. Ministerio de Medio Ambiente.
URL <http://www.marm.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/libro-blanco-del-agua/>
- Shannon, C. E., Weaver, W., 1949. The Mathematical Theory of Communication. Urbana: University of Illinois Press.
- Skakun, R. S., Wulder, M. A., Franklin, S. E., 2003. Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage. Remote Sensing of Environment 86 (4), 433 – 443.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-494PCFR-2/2/d8c9aed8888936ccd575d509cc9e3496>
- Skodras, A., Christopoulos, C., Ebrahimi, T., sep 2001. The JPEG 2000 still image compression standard. Signal Processing Magazine, IEEE 18 (5), 36 –58.
- Smeets, E., Weterings, R., Agency, E. E., TNO Centre for Strategy, T., Policy, voor Toegepast-Natuurwetenschappelijk, N., 1999. Environmental indicators: Typology and overview. European Environment Agency.

- Steven, M. D., Malthus, T. J., Baret, F., Xu, H., Chopping, M. J., 2003. Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. *Remote Sensing of Environment* 88 (4), 412 – 422.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-49V3JCT-2/2/f51ab8e2175c48c116a86991bcef622b>
- Story, M., Congalton, R. G., 1986. Accuracy assessment: a user's perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52 (3), 397–399.
- Strahler, A., Muchoney, D., Borak, J., Friedl, M., Gopal, S., Lambin, E., Moody, A., 1999. Modis land cover product algorithm theoretical basis document (ATBD) version 5.0. Tech. rep., Center for Remote Sensing, Department of Geography, Boston University, Boston, MA.
- Strahler, A. H., Muller, J. P., Abril 1999. MODIS BRDF/Albedo Product. Algorithm Theoretical Basis Document. MODIS Science Team, version 5.0 Edition.
- Svennerberg, G., 2010. Introducing the Google Maps API. In: Wade, M., Andres, C., Anglin, S., Beckner, M., Buckingham, E., Cornell, G., Gennick, J., Hassell, J., Lowman, M., Moodie, M., Parkes, D., Pepper, J., Pohlmann, F., Pundick, D., Renow-Clarke, B., Shakeshaft, D., Welsh, T., Tobin, M., Blackwell, J. L., Wimpsett, K. (Eds.), *Beginning Google Maps API 3*. Apress, pp. 1–6.
URL http://dx.doi.org/10.1007/978_1_4302_2803-5_1
- Teague, M., Schmaltz, J. E., Ilavajhala, S., Ye, G., Masuoka, E., Murphy, K. J., Michael, K., 2010. The generation of near-real time data products for MODIS. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 1. p. 02.
- The HDF Group, 2008. *HDF Specification and Developers Guide*. HDF4 Release 2.3. Board of Trustees of the University of Illinois.
- The HDF Group, 2010a. *HDF4 Reference Manual*. HDF4 Release 2.5. Board of Trustees of the University of Illinois.
- The HDF Group, 2010b. *HDF4 Users Guide*. HDF4 Release 2.5. Board of Trustees of the University of Illinois.
- Thomas, M. R., 2009. NOAA/NESDIS satellite products and direct readout overview. In: *37th Conference on Broadcast Meteorology*.

- Tomlin, C., 1990. Geographic information systems and cartographic modeling. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8 (2), 127 – 150.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-48C7856-3S/2/b35638209345aeb59628ca40b66594bb>
- Turner, J. C., 1986. *Matemática moderna aplicada*. Alianza Editorial.
- Ullman, R. E., 1999. HDF-EOS, NASAs standard data product distribution format for the earth observing system data information system. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International*. Vol. 1. pp. 276 –278 vol.1.
- United Division Statistics Division, 1984. *Framework for the Development of Environment Statistics*. United Division Statistics Division.
- United Division Statistics Division, 1988. *Concepts and methods of environment statistics: Human settlements statistics*. United Division Statistics Division.
- United Division Statistics Division, 1991. *Concepts and methods of environment statistics: Statistics of the natural environment*. United Division Statistics Division.
- United Division Statistics Division, 1995. *List of environmental indicators*.
URL <http://unstats.un.org/unsd/environment/indicators.htm>
- Urquía Moraleda, A., 2008. *Simulación. Texto base de teoría*. UNED. ETS de ingeniería informática.
- Van Deventer, A. P., Ward, A. D., Gowda, P. H., Lyon, J. G., 1997. Using thematic mapper data to identify contrasting soil plains and tillage practices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63, 87–93.
- Vermote, E. F., Kotchenkova, S. Y., 2008. *MOD09, Surface Reflectance, User Guide*. MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility.
- Vermote, E. F., Vermeulen, A., 1999. Atmospheric correction algorithm: Spectral reflectances (MOD09), MODIS ATBD. Dept. of Geography, University of Maryland 1, 1–107.

- Vogelmann, J. E., Rock, B. N., 1985. Spectral characterization of suspected acid deposition damage in red spruce(*Pinus rubens*) stands from Vermont. In: Proc. of the Airborne Imaging Spectrometer Data Anal. Workshop p 51-55(SEE N 86-11618 02-43).
- Vollenweider, R. A., Kerekes, J., 1982. Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Wallace, J., Campbell, N., 1998. Evaluation of the feasibility of remote sensing for monitoring national state of the environment indicators. Environment Australia, Department of the Environment.
- Wan, Z., 1999. MODIS land-surface temperature. algorithm theoretical basis document (LST ATBD). Tech. rep., Institute for Computational Earth System Science. University of California, Santa Barbara.
- Wan, Z., 2007. Collection-5. MODIS land surface temperature products. users' guide. Tech. rep., ICESS, University of California, Santa Barbara.
- Warmerdam, F., 2008. The geospatial data abstraction library. In: Hall, G. B., Leahy, M. G. (Eds.), Open Source Approaches in Spatial Data Handling. Vol. 2 of Advances in Geographic Information Science. Springer Berlin Heidelberg, pp. 87-104.
URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74831-1_5
- Weiers, S., Bock, M., Wissen, M., Rossner, G., 2004. Mapping and indicator approaches for the assessment of habitats at different scales using remote sensing and GIS methods. Landscape and Urban Planning 67 (1-4), 43 – 65, development of European Landscapes.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V91-484SNRH-1/2/2cb43c4a2055d0c9b40c0adc334fde94>
- Wolf, R., Just, D., Ago 1999. Lrit/hrit global specification. Tech. rep., Coordination Group for Meteorological Satellites, EUMETSAT, Am Kavalleriesand 31, P.O.Box 100555, D-64205 Darmstadt, Germany.
- Wolfe, R. E., Nishihama, M., Fleig, A. J., Kuyper, J. A., Roy, D. P., Storey, J. C., Patt, F. S., 2002. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. Remote Sensing of Environment 83 (1-2), 31 – 49.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6V-4700BJP-3/2/6c706dcafd0fe7774f03281d66c8c15a>

- Wolfe, R. E., Nishihama, M., Fleig, A. J., Roy, D. P., 1999. The MODIS operational geolocation error analysis and reduction methodology. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International. Vol. 1. pp. 449 –451 vol.1.
- Wynne, D., Klein, L., Gejjagaraguppe, R., Ilg, D., 1997. Hdf-eos library users guide for the ecs project, volume 1: Overview and examples. Tech. rep., Document 170-TP-005-004, Hughes Applied Information Systems Upper Marlboro, Maryland.
- Xiao, J., Shen, Y., Tateishi, R., Bayaer, W., 2006. Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 27 (12), 2411–2422.
URL <http://www.informaworld.com/10.1080/01431160600554363>
- Zancajo Jimeno, J. J., 2003. Modelización cartográfica para la evaluación de procesos de erosión del suelo: Aplicación a un área del sudeste peninsular. Ph.D. thesis, Universidad de Salamanca.
- Zarco-Tejada, P. J., Ustin, S. L., 2002. Modeling canopy water content for carbon estimates from modis data at land eos validation sites. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS'01. IEEE 2001 International. Vol. 1. IEEE, pp. 342–344.
- Zhang, X., Schaaf, C. B., Friedl, M. A., Strahler, A. H., Gao, F., Hodges, J. C. F., jun. 2002. MODIS tasseled cap transformation and its utility. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International 2, 1063 – 1065 vol.2.
- Zurita Milla, R., 2003. Determinación de variables biofísicas mediante teledetección en el marco de la agricultura de precisión. Ph.D. thesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba.

Anejos

Anejo I

CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES ESPACIALES CONSIDERADOS.

En este anejo se detallan las características principales de los sensores TM y ETM+ y MODIS, utilizados en este trabajo.

I.1. TM y ETM+.

I.1.1. Sensor TM.

Embarcado a bordo de los satélites Landsat 4 y 5, almacena información en 7 bandas espectrales, tal como se detalla en la tabla I.1.

Tabla I.1: Bandas multiespectrales del sensor ETM+.

Banda	Intervalo espectral (μm)	Región espectral	Resolución espacial (m)
1	0.45 - 0.52	Azul	30
2	0.52 - 0.60	Verde	30
3	0.63 - 0.69	Rojo	30
4	0.76 - 0.90	Infrarrojo próximo	30
5	1.55 - 1.75	Infrarrojo medio	30
6	10.4 - 12.50	Infrarrojo térmico	120
7	2.08 - 2.35	Infrarrojo medio	30

I.1.2. Bandas espectrales del sensor ETM+.

La Tabla I.2 muestra la disposición, así como la resolución espacial de las 8 bandas con las que cuenta el sensor ETM+, del satélite Landsat 7.

Tabla I.2: Bandas multiespectrales del sensor ETM+.

Banda	Intervalo (μm)	Región espectral	Resolución espacial (m)
1	0.45 - 0.52	Azul	30
2	0.52 - 0.60	Verde	30
3	0.63 - 0.69	Rojo	30
4	0.76 - 0.90	Infrarrojo próximo	30
5	1.55 - 1.75	Infrarrojo medio	30
6	10.4 - 12.50	Infrarrojo térmico	60
7	2.08 - 2.35	Infrarrojo medio	30
8	0.52 - 0.90	Pancromática	15

I.2. Características de MODIS y estructura de la información de los productos estándar MOD09GA y MOD09GQ.

La Tabla I.3 muestra las 36 bandas espectrales del sensor MODIS, así como su resolución espacial, variable, según la banda.

Tabla I.3: Bandas multiespectrales del sensor MODIS-TERRA.

Banda	Intervalo espectral (μm)	Zona_espectro	Resolución espacial (m)
1	0.62 - 0.67	Rojo	250
2	0.841 - 0.876	Infrarrojo Próximo	250
3	0.459 - 0.479	Azul	500
4	0.545 - 0.565	Verde	500
5	1.23 - 1.25	Infrarrojo Próximo	500
6	1.628 - 1.652	Infrarrojo Medio	500
7	2.105 - 2.155	Infrarrojo Medio	500

I.2. Características de MODIS y estructura de la información de los productos estándar MOD09GA y MOD09GQ.

Banda	Intervalo espectral (μm)	Zona_espectro	Resolución espacial (m)
8	0.405 - 0.42	Azul	1000
9	0.438 - 0.448	Azul	1000
10	0.483 - 0.493	Azul	1000
11	0.526 - 0.536	Verde	1000
12	0.546 - 0.556	Verde	1000
13	0.662 - 0.672	Rojo	1000
14	0.673 - 0.683	Rojo	1000
15	0.743 - 0.753	Infrarrojo próximo	1000
16	0.862 - 0.877	Infrarrojo próximo	1000
17	0.89 - 0.92	Infrarrojo próximo	1000
18	0.931 - 0.941	Infrarrojo próximo	1000
19	0.915 - 0.965	Infrarrojo próximo	1000
20	3.66 - 3.84	Infrarrojo térmico	1000
21	3.929 - 3.989	Infrarrojo térmico	1000
23	4.02 - 4.08	Infrarrojo térmico	1000
24	4.433 - 4.498	Infrarrojo térmico	1000
25	4.482 - 4.549	Infrarrojo térmico	1000
26	1.36 -1.39	Infrarrojo medio	1000
27	6.535 - 6.895	Infrarrojo térmico	1000
28	7.175 - 7.475	Infrarrojo térmico	1000
29	8.4 - 8.7	Infrarrojo térmico	1000
30	9.58 - 9.88	Infrarrojo térmico	1000
31	10.78 - 11.28	Infrarrojo térmico	1000
32	11.77 - 12.27	Infrarrojo térmico	1000
33	13.185 - 13.485	Infrarrojo térmico	1000
34	13.485 - 13.785	Infrarrojo térmico	1000
35	13.785 - 14.085	Infrarrojo térmico	1000
36	14.085 - 14.385	Infrarrojo térmico	1000

ANEJO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES ESPACIALES
CONSIDERADOS.

Denominación de los productos MODIS distribuidos por el *Land Atmosphere Near real-time Capability for EOS* (LANCE) (Tabla I.5):

Tabla I.5: Denominación de los productos MODIS - LANCE.

Producto	Código
<i>Spacecraft Ephemeris Data</i>	AM1EPHN0
<i>Extrapolated Orbital Data</i>	AM1EPHNE
<i>L0 PDS Data, Session-Based</i>	MOD00S
<i>L0 PDS Data, 5-Min Swath</i>	MOD00F
<i>L1A Raw Radiances, 5-Min Swath</i>	MOD01
<i>Geolocation, 5-Min Swath 1 km</i>	MOD03
<i>L1B Calibrated Radiances, 5-Min Swath 1 km</i>	MOD021KM
<i>L1B Calibrated Radiances, 5-Min Swath 500 m</i>	MOD02HKM
<i>L1B Calibrated Radiances, 5-Min Swath 250 m</i>	MOD02QKM
<i>L1B Subsampled Calibrated Radiances, 5-Min Swath 5 km</i>	MOD02SSH
<i>L2 Temperature and Water Vapor Profiles, 5-Min Swath 5 km</i>	MOD07_L2
<i>L2 Cloud Mask, 5-Min Swath 250 m and 1 km</i>	MOD35_L2
<i>L2 Aerosol, 5-Min Swath 10 km</i>	MOD04_L2
<i>L2 Total Precipitable Water Vapor, 5-Min Swath 1 km and 5 km</i>	MOD05_L2
<i>L2 Clouds, 5-Min Swath 1km and 5 km</i>	MOD06_L2
<i>L2 Snow Cover, 5-Min Swath 500 m</i>	MOD10_L2
<i>L2 Coarse Snow Cover, 5-Min Swath 5 km</i>	MOD10L2C
<i>L2 Sea Ice Extent, 5-Min Swath 1 km</i>	MOD29
<i>L2 Coarse Sea Ice Extent, 5-Min Swath 5 km</i>	MOD29L2C
<i>L2 Thermal Anomalies / Fire, 5-Min Swath 1 km</i>	MOD14
<i>L2 Coarse Thermal Anomalies / Fire, 5-Min Swath 5 km</i>	MOD14CRS
<i>L2 Surface Reflectance, 5-Min Swath 250 m, 500 m, and 1 km</i>	MOD09
<i>L2 Coarse Surface Reflectance, 5-Min Swath 5 km</i>	MOD09CRS
<i>L2 Surface Temperature and Emissivity, 5-Min Swath 1 km</i>	MOD11_L2
<i>L2G Daytime Geolocation Angles, Daily 1 km</i>	MODMGGAD
<i>L2G Daytime Pointers, Daily 500 m</i>	MODPTHKM
<i>L2G Daytime Pointers, Daily 250 m</i>	MODPTQKM

I.2. Características de MODIS y estructura de la información de los productos estándar MOD09GA y MOD09GQ.

Producto	Código
<i>L2G Light Surface Reflectance - Daily 500 m and 1km</i>	MOD09GA
<i>L2G Light Surface Reflectance - Daily 250 m</i>	MOD09GQ
<i>L2G Surface Reflectance - Daily 500 m</i>	MOD09GHK
<i>L2G Surface Reflectance - Daily 250 m</i>	MOD09GQK
<i>L2G Surface Reflectance State - Daily 1km</i>	MOD09GST
<i>L2G Daytime Thermal Bands - Daily 1km</i>	MODTBGD
<i>L3 Aerosol Optical Thickness, Climate Modeling Grid</i>	MOD09CMA
<i>L3 Surface Reflectance, Climate Modeling Grid</i>	MOD09CMG
<i>GBAD Data, Session-Based</i>	MYDGBAD
<i>GBAD Data, 5-Min Swath</i>	MYDGB0
<i>GBAD Spacecraft Attitude Data</i>	PM1ATTNR_NRT
<i>GBAD Spacecraft Ephemeris Data</i>	PM1EPHND_NRT
<i>L0 PDS Data, Session-Based</i>	MYD00S
<i>L0 PDS Data, 5-Min Swath</i>	MYD00F
<i>L1A Raw Radiances, 5-Min Swath</i>	MYD01
<i>Geolocation, 5-Min Swath 1km</i>	MYD03
<i>L1B Calibrated Radiances, 5-Min Swath 1km</i>	MYD021KM
<i>L1B Calibrated Radiances, 5-Min Swath 500 m</i>	MYD02HKM
<i>L1B Calibrated Radiances, 5-Min Swath 250 m</i>	MYD02QKM
<i>L1B Subsampled Calibrated Radiances, 5-Min Swath 5km</i>	MYD02SSH
<i>L2 Temperature and Water Vapor Profiles, 5-Min Swath 5km</i>	MYD07_L2
<i>L2 Cloud Mask, 5-Min Swath 250 m and 1km</i>	MYD35_L2
<i>L2 Aerosol, 5-Min Swath 10 km</i>	MYD04_L2
<i>L2 Total Precipitable Water Vapor, 5-Min Swath 1km and 5 km</i>	MYD05_L2
<i>L2 Clouds, 5-Min Swath 1km and 5 km</i>	MYD06_L2
<i>L2 Snow Cover, 5-Min Swath 500 m</i>	MYD10_L2
<i>L2 Coarse Snow Cover, 5-Min Swath 5 km</i>	MYD10L2C
<i>L2 Sea Ice Extent, 5-Min Swath 1km</i>	MYD29
<i>L2 Coarse Sea Ice Extent, 5-Min Swath 5 km</i>	MYD29L2C
<i>L2 Thermal Anomalies / Fire, 5-Min Swath 1km</i>	MYD14
<i>L2 Coarse Thermal Anomalies / Fire, 5-Min Swath 5 km</i>	MYD14CRS
<i>L2 Surface Reflectance, 5-Min Swath 250 m, 500 m, and 1km</i>	MYD09

ANEJO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES ESPACIALES
CONSIDERADOS.

Producto	Código
<i>L2 Coarse Surface Reflectance, 5-Min Swath 5 km</i>	MYD09CRS
<i>L2 Surface Temperature and Emissivity, 5-Min Swath 1 km</i>	MYD11_L2
<i>L2G Daytime Geolocation Angles, Daily 1 km</i>	MYDMGGAD
<i>L2G Daytime Pointers, Daily 500 m</i>	MYDPTHKM
<i>L2G Daytime Pointers, Daily 250 m</i>	MYDPTQKM
<i>L2G Light Surface Reflectance - Daily 500 m and 1 km</i>	MYD09GA
<i>L2G Light Surface Reflectance - Daily 250 m</i>	MYD09GQ
<i>L2G Surface Reflectance - Daily 500 m</i>	MYD09GHK
<i>L2G Surface Reflectance - Daily 250 m</i>	MYD09GQK
<i>L2G Surface Reflectance State - Daily 1 km</i>	MYD09GST
<i>L2G Daytime Thermal Bands - Daily 1 km</i>	MYDTBGD
<i>L3 Aerosol Optical Thickness, Climate Modeling Grid</i>	MYD09CMA
<i>L3 Surface Reflectance, Climate Modeling Grid</i>	MYD09CMG
<i>One Degree Global Data Assimilation System Data from NOAA NCEP</i>	GDAS_0ZF
<i>Global Forecast System Data, Three Hour Predicted</i>	GFS_03H
<i>Global Forecast System Data, Six Hour Predicted</i>	GFS_06H
<i>Global Forecast System Data, Nine Hour Predicted</i>	GFS_09H
<i>Global Forecast System Data, Twelve Hour Predicted</i>	GFS_12H
<i>Near Real-Time Global Ice and Snow Extent from NSIDC</i>	NISE
<i>Reynolds Weekly Sea Surface Temperature from NOAA NCEP</i>	REYNSST
<i>Ice Concentration from NOAA NCEP</i>	SEA_ICE
<i>One Degree Global TOVS & SBUV/2 Column Ozone from NOAA NCEP</i>	TOAST

El listado de la Tabla I.5, se refiere a los productos disponibles casi en tiempo real. Existe otro portal de distribución, también gestionado por *United States Geological Survey* (USGS), el *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP-DAAC), el cual proporciona los siguientes conjuntos de datos:

Tabla I.7: Productos MODIS, LP-DAAC.

I.2. Características de MODIS y estructura de la información de los productos estándar MOD09GA y MOD09GQ.

Código	Satélite	Nombre del producto	Resolución (m)	Frecuencia
MCD45A1	Combinado	<i>Burned Area</i>	500	Mensual
MOD09GA	Terra	<i>Surface Reflectance Bands 1-7</i>	500/1000	Diaria
MYD09GA	Aqua	<i>Surface Reflectance Bands 1-7</i>	500/1000	Diaria
MOD09GQ	Terra	<i>Surface Reflectance Bands 1-2</i>	250	Diaria
MYD09GQ	Aqua	<i>Surface Reflectance Bands 1-2</i>	250	Diaria
MOD09CMG	Terra	<i>Surface Reflectance Bands 1-7</i>	5600	Diaria
MYD09CMG	Aqua	<i>Surface Reflectance Bands 1-7</i>	5600	Diaria
MOD09A1	Terra	<i>Surface Reflectance Bands 1-7</i>	500	8 Días
MYD09A1	Aqua	<i>Surface Reflectance Bands 1-7</i>	500	8 Días
MOD09Q1	Terra	<i>Surface Reflectance Bands 1-2</i>	250	8 Días
MYD09Q1	Aqua	<i>Surface Reflectance Bands 1-2</i>	250	8 Días
MOD13A1	Terra	<i>Vegetation Indices</i>	500	16 Días
MYD13A1	Aqua	<i>Vegetation Indices</i>	500	16 Días
MOD13A2	Terra	<i>Vegetation Indices</i>	1000	16 Días
MYD13A2	Aqua	<i>Vegetation Indices</i>	1000	16 Días
MOD13Q1	Terra	<i>Vegetation Indices</i>	250	16 Días
MYD13Q1	Aqua	<i>Vegetation Indices</i>	250	16 Días
MOD13A3	Terra	<i>Vegetation Indices</i>	1000	Mensual
MYD13A3	Aqua	<i>Vegetation Indices</i>	1000	Mensual
MOD13C1	Terra	<i>Vegetation Indices</i>	5600	16 Días
MYD13C1	Aqua	<i>Vegetation Indices</i>	5600	16 Días
MOD13C2	Terra	<i>Vegetation Indices</i>	5600	Mensual
MYD13C2	Aqua	<i>Vegetation Indices</i>	5600	Mensual
MOD44W	Terra	<i>Land Water Mask Derived</i>	250	—

ANEJO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES ESPACIALES
CONSIDERADOS.

Código	Satélite	Nombre del producto	Resolución (m)	Frecuencia
MOD11_L2	Terra	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	1000	Diaria
MYD11_L2	Aqua	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	1000	Diaria
MOD11A1	Terra	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	1000	Diaria
MYD11A1	Aqua	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	1000	Diaria
MOD11A2	Terra	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	1000	8 Días
MYD11A2	Aqua	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	1000	8 Días
MOD11B1	Terra	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	6000	Diaria
MYD11B1	Aqua	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	6000	Diaria
MOD11C1	Terra	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	5600	Diaria
MYD11C1	Aqua	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	5600	Diaria
MOD11C2	Terra	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	5600	8 Días
MYD11C2	Aqua	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	5600	8 Días
MOD11C3	Terra	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	5600	Mensual
MYD11C3	Aqua	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	5600	Mensual
MOD14	Terra	<i>Thermal Anomalies & Fire</i>	1000	Diaria
MYD14	Aqua	<i>Thermal Anomalies & Fire</i>	1000	Diaria
MOD14A1	Terra	<i>Thermal Anomalies & Fire</i>	1000	Diaria
MYD14A1	Aqua	<i>Thermal Anomalies & Fire</i>	1000	Diaria
MOD14A2	Terra	<i>Thermal Anomalies & Fire</i>	1000	8 Días
MYD14A2	Aqua	<i>Thermal Anomalies & Fire</i>	1000	8 Días

I.2. Características de MODIS y estructura de la información de los productos estándar MOD09GA y MOD09GQ.

Código	Satélite	Nombre del producto	Resolución (m)	Frecuencia
MCD15A2	Combinado	<i>Leaf Area Index - FPAR</i>	1000	8 Días
MOD15A2	Terra	<i>Leaf Area Index - FPAR</i>	1000	8 Días
MYD15A2	Aqua	<i>Leaf Area Index - FPAR</i>	1000	8 Días
MOD17A2	Terra	<i>Gross Primary Productivity</i>	1000	8 Días
MYD17A2	Aqua	<i>Gross Primary Productivity</i>	1000	8 Días
MCD43A3	Combinado	<i>Albedo</i>	500	16 Días
MCD43B3	Combinado	<i>Albedo</i>	1000	16 Días
MCD43C3	Combinado	<i>Albedo</i>	5600	16 Días
MCD43A1	Combinado	<i>BRDF-Albedo Model Parameters</i>	500	16 Días
MCD43B1	Combinado	<i>BRDF-Albedo Model Parameters</i>	1000	16 Días
MCD43C1	Combinado	<i>BRDF-Albedo Model Parameters</i>	5600	16 Días
MCD43A2	Combinado	<i>BRDF-Albedo Quality</i>	500	16 Días
MCD43B2	Combinado	<i>BRDF-Albedo Quality</i>	1000	16 Días
MCD43C2	Combinado	<i>BRDF-Albedo Snow-free Quality</i>	5600	16 Días
MCD43A4	Combinado	<i>Nadir BRDF-Adjusted Reflectance</i>	500	16 Días
MCD43B4	Combinado	<i>Nadir BRDF-Adjusted Reflectance</i>	1000	16 Días
MCD43C4	Combinado	<i>Nadir BRDF-Adjusted Reflectance</i>	5600	16 Días
MOD12Q1	Terra	<i>Land Cover Type</i>	1000	Anual
MCD12Q1	Combinado	<i>Land Cover Type</i>	500	Anual
MOD12Q2	Terra	<i>Land Cover Dynamics</i>	1000	Anual
MCD12Q2	Combinado	<i>Land Cover Dynamics</i>	500	Anual
MOD12C1	Terra	<i>Land Cover Type</i>	5600	Anual
MCD12C1	Combinado	<i>Land Cover Type</i>	5600	Anual
MOD44B	Terra	<i>Vegetation Continuous Fields</i>	500	Anual

En la tabla I.9, se indican los conjuntos de datos incluidos en los archivos HDF en los que se distribuye la información adquirida por MODIS, referida

ANEJO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES ESPACIALES
CONSIDERADOS.

al producto estándar MOD09GQ, Reflectividad superficial en bandas 1 y 2 (250 m). Con respecto a los otros productos, en las respectivas páginas web se encuentra toda la información sobre las capas de datos y sobre la información de calidad relativa a ellos, en un formato similar.

Tabla I.9: MOD09GQ. Capas de información.

Conjuntos de datos (SDS): 5	Unidades	Tipo	Valor de relleno	Rango	Factor de escala
Número de observaciones por píxel	—	<i>8-bit signed integer</i>	-1	0–127	1
Reflectividad superficial en banda 1 (620-670 nm)	Reflectividad	<i>16-bit signed integer</i>	-28672	-100–16000	0.0001
Reflectividad superficial en banda 2 (841-876 nm)	Reflectividad	<i>16-bit signed integer</i>	-28672	-100–16000	0.0001
Calidad de la información	Ver tablaI.10	<i>16-bit unsigned integer</i>	2995	0–4096	1
Porcentaje de celda cubierta ¹	%	<i>8-bit signed integer</i>	-1	0–100	0.001

La Tabla I.10 describe el formato en el que se codifica la información relativa a la calidad de la información adquirida, e incluida entre las capas de información suministradas junto con los datos de reflectividad, destacando, entre ella, la referente a la cobertura nubosa, por su influencia en las observaciones.

Tabla I.10: MOD09GQ. Calidad de la información.

I.2. Características de MODIS y estructura de la información de los productos estándar MOD09GA y MOD09GQ.

Bit N°	Parámetro	Bit Comb.	Significado
0-1	<i>MODLAND QA bits</i>	00	Producto corregido con un nivel cercano al ideal en todas las bandas
		01	Producto corregido con un nivel menor al ideal en alguna o en todas las bandas
		10	Producto no corregido debido a la presencia de nubes
		11	Producto no corregido debido a otros motivos
2-3	Cobertura nubosa	00	Despejado
		01	Nuboso
		10	Mixto
		11	Sin especificar (despejado, por defecto)
4-7	Calidad de los datos de banda 1	0000	Calidad óptima
		1000	Fallo en el detector. Intepolación.
		1001	ángulo cenital solar $\geq 86^\circ$
		1010	$85^\circ \leq$ ángulo cenital solar $< 86^\circ$
		1011	Fallo en el registro
		1100	Datos meteorológicos no válidos para corrección atmosférica
		1101	Desbordamiento tras la corrección.
		1110	Fallo del registro de datos L1B

ANEJO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES ESPACIALES
CONSIDERADOS.

Bit N°	Parámetro	Bit Comb.	Significado
		1111	Sin procesar debido a nubes o aguas profundas
8–11	Calidad de los datos de banda 2		Idéntico a banda 1
12	Corrección atmosférica	1	Sí
		0	No
13	Corrección por adyacencia	1	Sí
		0	No
14–15	No usado	-	—

En la tablas I.12 y I.14, se indican los conjuntos de datos incluidos en los archivos HDF en los que se distribuye la información adquirida por MODIS, referida al producto estándar MOD09GA, Reflectividad superficial en bandas 1 a 7 (500 m), así como información auxiliar, tal como, ángulos cenitales solares y del sensor (con una resolución espacial de 1 km). En ella, se desglosa la información según el conjunto de datos sea de 500 m de resolución espacial o de 1000 m, cada uno con diferentes parámetros medidos.

Tabla I.12: MOD09GA. Capas de información. Bandas de 1000 m.

Conjunto de datos	Información	Unidades	Tipo	Valor de relleno	Rango	Factor de escala
1 km	Número de observaciones por píxel	—	<i>8-bit signed integer</i>	-1	0 – 127	1
	Calidad de las observaciones	Ver Tabla I.16	<i>16-bit unsigned integer</i>	65535	0 – 57335	1
	Ángulo cenital sensor	°	<i>16-bit signed integer</i>	-32767	0 – 18000	0.01

I.2. Características de MODIS y estructura de la información de los productos estándar MOD09GA y MOD09GQ.

Conjunto de datos	Información	Unidades	Tipo	Valor de relleno	Rango	Factor de escala
	Ángulo acimutal sensor	°	<i>16-bit signed integer</i>	-32767	-18000 – 18000	0.01
	Distancia píxel-sensor	m	<i>16-bit unsigned integer</i>	65535	27000 – 65535	25
	Ángulo cenital solar	°	<i>16-bit signed integer</i>	-32767	0 – 18000	0.01
	Ángulo acimutal solar	°	<i>16-bit signed integer</i>	-32767	-18000 – 18000	0.01
	<i>Flag</i> estado (gflags)	Ver tabla	<i>8-bit unsigned integer</i>	255	0 – 248	1
	Puntero orbital (orbit_pnt)	–	<i>8-bit signed integer</i>	-1	0 – 15	1

Tabla I.14: MOD09GA. Capas de información. Bandas de 500 m.

Conjunto de datos	Información	Unidades	Tipo	Valor de relleno	Rango	Factor de escala
500 m	Nº de observaciones por píxel	–	<i>8-bit signed integer</i>	-1	0 – 127	1
	Reflectividad superficial en banda 1 (620-670 nm)	Reflectividad	<i>16-bit signed integer</i>	-28672	-100 – 16000	0.0001

ANEJO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES ESPACIALES
CONSIDERADOS.

Conjunto de datos	Información	Unidades	Tipo	Valor de relleno	Rango	Factor de escala
	Reflectividad superficial en banda 2 (841-876 nm)	Reflectividad	<i>16-bit signed integer</i>	-28672	-100 – 16000	0.0001
	Reflectividad superficial en banda 3 (459-479 nm)	Reflectividad	<i>16-bit signed integer</i>	-28672	- 100–16000	0.0001
	Reflectividad superficial en banda 4 (545-565 nm)	Reflectividad	<i>16-bit signed integer</i>	-28672	-100 – 16000	0.0001
	Reflectividad superficial en banda 5 (1230-1250 nm)	Reflectividad	<i>16-bit signed integer</i>	-28672	-100 – 16000	0.0001
	Reflectividad superficial en banda 6 (1628-1652 nm)	Reflectividad	<i>16-bit signed integer</i>	-28672	- 100–16000	0.0001
	Reflectividad superficial en banda 7 (2105-2155 nm)	Reflectividad	<i>16-bit signed integer</i>	-28672	-100 – 16000	0.0001
	Calidad de las observaciones	Ver tabla I.18	<i>32-bit unsigned integer</i>	787410671	0 – 4294966019	1

I.2. Características de MODIS y estructura de la información de los productos estándar MOD09GA y MOD09GQ.

Conjunto de datos	Información	Unidades	Tipo	Valor de relleno	Rango	Factor de escala
	Cobertura del píxel	%	<i>8-bit signed integer</i>	-1	0 – 100	0.01
	Nº de observaciones	–	<i>8-bit unsigned integer</i>	255	0 – 254	1
	Información de los datos de 250 m	Ver tabla I.21	<i>8-bit unsigned integer</i>	255	0 – 255	1

En las tablas I.16 y I.18, se describe el formato en el que se codifica la información relativa a la calidad de la información adquirida e incluida en el producto estándar MOD09GA, e incluida junto con las capas de los datos de reflectividad y auxiliares, siendo de especial importancia la referida a cobertura nubosa, por afectar directamente a los valores registrados de reflectividad. La información de la calidad de los datos, es desglosada en diferentes aspectos, según se trate de los de 500 m o de 1000 m de resolución espacial.

Tabla I.16: MOD09GA. Calidad de la información (1000 m).

Bit Nº	Parámetro	Bit Comb.	Significado
0–1	Cobertura nubosa	00	Despejado
		01	Nuboso
		10	Mixto
		11	Sin definir
2	Sombra de nubes	1	Sí
		0	No
3–5	Tierra/Agua	00	Aguas poco profundas (océano)
		01	Tierra
		10	Línea de costa/orilla de lagos

ANEJO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES ESPACIALES
CONSIDERADOS.

Bit Nº	Parámetro	Bit Comb.	Significado
		11	Aguas interiores poco profundas
		100	Aguas estacionales
		101	Aguas interiores profundas
		110	Océano, zona intermedia
		111	Océano profundo
6-7	Concentración de aerosoles	00	Falta climatología
		01	Baja
		10	Intermedia
		11	Alta
8-9	Detección de cirros	00	No
		01	Pequeño
		10	Intermedio
		11	Alto
10	Detección de nubes automáticas	1	Nube
		0	No nube
11	Foco de incendio	1	Fuego
		0	No fuego
12	MOD35 nieve/hielo	1	Sí
		0	No
13	Píxel adyacente a nube	1	Sí
		0	No
14	Corrección BRDF	1	Sí
		0	No
15	Cubierta nevada	1	Nieve
		0	No nieve

Tabla I.18: MOD09GA. Calidad de la información (500 m).

I.2. Características de MODIS y estructura de la información de los productos estándar MOD09GA y MOD09GQ.

		01	Producto corregido con un nivel menor al ideal en alguna o en todas las bandas
Bit N°	Parámetro	Bit Comb.	Significado
0–1	MODLAND QA bits	00	Producto corregido con un nivel cercano al ideal en todas las bandas
		10	Producto no corregido debido a la presencia de nubes
		11	Producto no corregido debido a otros motivos
2–5	Calidad de los datos de banda 1	0000	Calidad óptima
		1000	Fallo en el detector. Intepolación.
		1001	ángulo cenital solar $\geq 86^\circ$
		1010	$85^\circ \leq$ ángulo cenital solar $< 86^\circ$
		1011	Fallo en el registro
		1100	Datos meteorológicos no válidos para corrección atmosférica
		1101	Desbordamiento tras la corrección.
		1110	Fallo del registro de datos L1B
		1111	Sin procesar debido a nubes o aguas profundas
6–9	Calidad de los datos de banda 2		Idéntico a banda 1
10–13	Calidad de los datos de banda 3		Idéntico a banda 1
14–17	Calidad de los datos de banda 4		Idéntico a banda 1
18–21	Calidad de los datos de banda 5		Idéntico a banda 1
22–25	Calidad de los datos de banda 6		Idéntico a banda 1
26–29	Calidad de los datos de banda 7		Idéntico a banda 1

ANEJO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES ESPACIALES
CONSIDERADOS.

		01	Producto corregido con un nivel menor al ideal en alguna o en todas las bandas
30	Corrección atmosférica	1	Sí
		0	No
31	Corrección de adyacencia	1	Sí
		0	No

En las tablas I.20 y I.21, se muestra el criterio de codificación de la información referente a la georreferenciación efectuada a los datos crudos adquiridos por el sensor, en un paso previo a la distribución de los mismos y, en concreto, de los relativos a los productos MOD09GQ y MOD09GA.

Tabla I.20: MOD09GA. Datos de georreferenciación.

Bit nº	Descripción	Combinación	Significado
0-2	Relleno	00	Relleno
3	Datos dentro de rango	0	Sí
		1	No
4	Calidad del MDT	0	Adecuada
		1	No adecuada
5	Validez del MDT	0	Válido
		1	No válido
6	Elipsoide	0	Válido
		1	No válido
7	Datos de entrada	0	Válido
		1	No válido

Tabla I.21: MOD09GA. Información sobre los datos de 250 m.

0	Falta observación en cuadrante 4 [+0.5 fila, +0.5 columna]	1	Sí
Bit N°	Parámetro	Combinación	q_scan
		0	No
1	Falta observación en cuadrante 3 [+0.5 fila, -0.5 columna]	1	Sí
		0	No
2	Falta observación en cuadrante 2 [-0.5 fila, +0.5 columna]	1	Sí
		0	No
3	Falta observación en cuadrante 1 [-0.5 fila, -0.5 columna]	1	Sí
		0	No
4	Observación en el cuadrante 4 [+0.5 fila, +0.5 columna]	1	Igual
		0	Diferente
5	Observación en el cuadrante 3 [+0.5 fila, +0.5 columna]	1	Igual
		0	Diferente
6	Observación en el cuadrante 2 [+0.5 fila, +0.5 columna]	1	Igual
		0	Diferente
7	Observación en el cuadrante 1 [+0.5 fila, +0.5 columna]	1	Igual
		0	Diferente

I.3. Posibilidades futuras.

En las tablas I.23, I.24 y I.25, se especifican las características de las bandas espectrales de los futuros sensores *Operational Land Imager* (OLI) y el *Thermal InfraRed Sensor* (TIRS), así como del *Visible Infrared Imager Radiometer Suite* (VIIRS), que se perfilan como los sustitutos de TM/ETM+ y MODIS, respectivamente.

Tabla I.23: Características del sensor OLI.

Banda nº.	Banda	$\lambda_{min}(nm)$	$\lambda_{max}(nm)$	$\lambda_{centro}(nm)$	GSD (m)
1	<i>Coastal</i>	433	453	443	30
2	<i>Blue</i>	450	515	482	30
3	<i>Green</i>	525	600	562	30
4	<i>Red</i>	630	680	655	30
5	<i>NIR</i>	845	885	865	30
6	<i>SWIR 1</i>	1560	1660	1610	30
7	<i>SWIR 2</i>	2100	2300	2200	30
8	<i>Panchromatic</i>	500	680	590	15
9	<i>Cirrus</i>	1360	1390	1375	30

Tabla I.24: Características del sensor TIRS.

Banda nº.	Banda	$\lambda_{min}(nm)$	$\lambda_{max}(nm)$	$\lambda_{centro}(nm)$	GSD (m)
1	<i>Thermal 1</i>	10300	11300	10800	120
2	<i>Thermal 2</i>	11500	12500	12000	120

Tabla I.25: Características del sensor VIIRS.

Banda	$\lambda(\mu m)$	Tamaño del píxel (km) (ancho x alto)
M1	0.412	0.742×0.259
M2	0.445	0.742×0.259
M3	0.488	0.742×0.259
M4	0.555	0.742×0.259
I1	0.64	0.371×0.387
M5	0.672	0.742×0.259
M6	0.746	0.742×0.776
I2	0.865	0.371×0.387
M7	0.865	0.742×0.259
DNB	0.7	0.742×0.742
M8	1.24	0.742×0.776
M9	1.38	0.742×0.776
M10	1.61	0.742×0.776
I3	1.61	0.371×0.387
M11	2.25	0.742×0.776
M12	3.70	0.742×0.776
I4	3.74	0.371×0.387
M13	4.05	0.742×0.259
M14	8.55	0.742×0.776
M15	10.76	0.742×0.776
I5	11.45	0.371×0.387
M16	12.01	0.742×0.776

Anejo II

MANUAL DE REFERENCIA DE LAS APLICACIONES PROPUESTAS.

En este apartado se detallan las funcionalidades de las distintas aplicaciones generadas, así como el pseudocódigo de cada una de ellas. La estructura de los pseudocódigos está organizada del siguiente modo:

- **variables**, donde se especifican el tipo de variables y si son de entrada (**in**), salida (**out**) o privadas (**priv**).
- **int**, **float**, **string**, **bool** hacen referencia al tipo de datos que almacenan las variables definidas a continuación. De tipo **int**, se entiende cualquier valor entero (sin especificar el número de bits que se requiere para su almacenamiento interno), **float** indica un número real, en coma flotante, que puede ser de 32 ó 64 bits. En una variable de tipo **string** se almacena una cadena de caracteres, mientras que un dato de tipo **bool**, permite almacenar dos valores: 0 y 1, que representan los estados Verdadero y Falso.
- **ORC**, define una estructura de tipo Archivo de cabecera + Bandas de información (RAW). La estructura de este formato se define por Ormeño (1993).
- **SMP**, hace referencia a un tipo de archivo ASCII, que almacena datos en formato tabular con un formato descrito en Ormeño (1993).
- **DBV**, está referido a un tipo de archivo ASCII, orientado al almacenamiento de datos vectoriales de tipo puntual, lineal o poligonal (Ormeño, 1993).

- Los símbolos [], a continuación de la definición del tipo de datos, indican que la variable se trata de una matriz de datos, cuyas dimensiones se especifican en formato [filas x columnas].
- inicio, donde se especifica el flujo del programa. Este bloque finaliza con la sentencia fin_función.

II.1. Aplicación DescargaModis.

Es la aplicación encargada de la descarga de los datos MODIS desde los servidores de almacenamiento remoto. Los parámetros que es necesario proporcionar son los datos de conexión al servidor MODIS seleccionado (LANCE o LP-DAAC), especificando dirección, usuario y contraseña, así como el código del producto a descargar, la fecha de adquisición, la tesela correspondiente al área de interés (según la disposición de la figura 2.3) y el directorio en el que se almacenará el archivo HDF descargado. El nombre de este archivo se generará automáticamente en función del servidor de descarga, del producto estándar seleccionado, de la fecha y de la tesela. La función devuelve el valor 0, si el proceso finaliza correctamente, y el archivo se ha descargado y guardado correctamente.

Listado II.1 Aplicación DescargaModis.

```

1 función DescargaModis
   variables
       string Servidor (in) /* Dirección ftp del
                               servidor. */
       string Usuario (in) /* Nombre de usuario. */
       string Contraseña (in) /* Contraseña de acceso
                                al servidor. */
6      int Día, Mes, Año (in) /* Fecha de los datos. */
       int TeselaH, TeselaV (in) /* Coordenadas H y V
                                   de la tesela MODIS requerida. */
       string Producto (in) /* Código del producto
                               estándar MODIS. */
       string Destino (in) /* Directorio en el que se
                              descargarán los datos. */

```

```

        string NombreArchivo (out) /* Nombre del archivo
            que se descargará. */
11    bool Estado=0 (out) /* 0, si la operación se ha
            realizado con éxito. Otro valor, en caso
            contrario. */

    inicio
        leer(Servidor, Usuario, Contraseña, Día, Mes,
            Año, TeselaH, TeselaV, Producto, Destino)
        NombreArchivo=(Servidor+Producto+Día+Mes+Año+
            TeselaH+TeselaV)+".hdf"
        Estado=conecta(Servidor, Usuario, Password)
16    si (Estado=0) entonces
            Estado=guardararchivo(NombreArchivo en
                Destino)
            si (Estado!=0) entonces
                salir(Estado)
            fin_si
21    sino
        salir(Estado)
    fin_si
fin_función

```

II.2. Aplicación PreprocesaModis.

Previamente al procesamiento de los datos descargados, es necesario efectuar ciertas operaciones de formateo, así como selección del área de interés y las capas de datos que es preciso seleccionar.

La función creada al efecto, permite la generación de mosaicos, a partir de las teselas individuales descargadas con anterioridad, el recorte de la zona de interés, el cambio de proyección de las imágenes, de sinusoidal a UTM, así como la extracción de determinadas capas de datos, con el fin de minimizar el volumen de información que se utilizará en fases posteriores.

Las operaciones de generación de mosaicos, así como de recorte y cambio de proyección son llevadas a cabo mediante llamadas internas de la aplicación a las herramientas proporcionadas en las *MODIS Reprojection Tools* (Land Processes DAAC USGS Earth Resources Observation and Science (EROS)

Center, 2008), que permiten el procesamiento de los archivos HDF procedentes de MODIS. Concretamente, las herramientas *mrtmosaic*, encargada de la generación de mosaicos de archivos, y la *mrtresample*, encargada de los cambios de proyección y selección de áreas y capas de interés.

Los argumentos de entrada de esta función son el directorio en el que se encuentran los archivos HDF descargados, el nombre con el que se guardará el resultado del proceso, las coordenadas UTM que definen la ventana del área de interés, la resolución, en metros, de la imagen de salida, el huso de la proyección UTM al que se refieren las coordenadas y una cadena binaria en la que se indican las capas que se extraerán. Por ejemplo, la cadena “1 0 1 0 0 1”, indica que se extraerán de los archivos originales las capas 1, 3 y 6. El resultado es un archivo HDF, con la estructura interna de los archivos HDF-EOS, en proyección UTM, de la zona seleccionada y con las capas de datos de interés.

Listado II.2 Aplicación PreprocesaModis.

```

1 función PreprocesaModis
   variables
       string Directorio (in) /* Directorio donde se
                               encuentran los archivos descargados. */
       HDF NombreArchivo (in) /* Nombre del archivo HDF
                                de salida. */
       float Xmin,Xmax,Ymin,Ymax (in) /* Coordenadas del
                                         área de interés (UTM). */
6      float Resolución (in) /* Resolución, en m, de la
                               imagen resultante. */
       string Capas (in) /* Cadena binaria con las capas
                           a extraer. */
       int Huso (in) /* Huso UTM de la imagen de salida.
                       */
       string Archivos (priv) /* Nombres de archivos HDF
                                en el directorio. */
       string Mosaico (out) /* Nombre del mosaico HDF
                              resultante. */

```

```

11      bool Estado=0 (out) /* 0, si la operación se ha
           realizado con éxito. Otro valor, en caso
           contrario. */
inicio
    leer(Directorio, NombreArchivo, Xmin, Xmax, Ymin,
        Ymax, Resolución, Capas, Huso)
    Archivos=listado(Directorio/*.hdf)
    Estado=ejecuta(Mosaico=mrtmosaic(Archivos))
16    si (Estado!=0)
        salir(Estado)
    fin_si
    Estado=ejecuta(NombreArchivo=mrtresample(Mosaico,
        capas))
    si (Estado!=0) entonces
21        salir(Estado)
    fin_si
    salir(Estado)
fin_función

```

II.3. Aplicación ImpHdf.

Se trata de la aplicación encargada de la conversión de los archivos HDF al formato nativo de SovMap, ORC+RAW. Dada la diversidad de formatos y estructuras que pueden ser almacenadas en un archivo HDF (ver 2.3.6.2), puede que no todas estén correctamente soportadas, o que no puedan ser convertidas satisfactoriamente a un formato compatible con el de SovMap. Las estructuras en las que se ha probado y funcionan correctamente, son las de tipo *Raster Images* (RI), *Scientific Data Sets* (SDS), así como los metadatos de la información, en la que se incluyen las coordenadas de los extremos de la imagen, en coordenadas UTM.

Con el fin de dotar de mayor versatilidad a esta aplicación, se han implementado diversos modos de tratamiento de las tablas de datos (SDS) n-dimensionales, siendo capaz de procesar correctamente las tablas almacenadas con las siguientes estructuras:

- [filas x columnas x n^o de dimensiones]: Es el formato habitual en la distribución de datos de reflectividad procedentes de MODIS. Se

identifica con el código 1, como valor del parámetros **Tipo**, de entrada a la función.

- [nº de dimensiones x filas x columnas]: En algunos productos estándar distribuidos por el servidor LP-DAAC, puede emplearse esta estructura de almacenamiento de tablas. Se indica con el valor 2, en el parámetro de entrada **Tipo**.
- [filas x nº de dimensiones x columnas]: Se emplea en la distribución de datos de otros sensores espaciales, tales como *Hyperion*. Se identifica con el valor 3, en el parámetro **Tipo**.

Por otro lado, dado que no todos los tipos de datos almacenados en los conjuntos de datos SDS, pueden ser alojados en una estructura de imagen soportada por la estructura ORC+RAW, utilizada por el resto de aplicaciones, en caso de ser necesario extraerlas, pueden ser almacenadas en estructuras tabulares, en formato ASCII, del tipo SMP. Para ello, se dispone del parámetro **FormatoSalida**, que puede tomar el valor o y t, según la salida se realice en formato ORC o SMP, respectivamente.

Listado II.3 Aplicación ImpHdf.

```

1  función ImpHdf
    variables
        HDF ArchivoHDF (in) /* Nombre del archivo HDF de
                               entrada. */
        ORC ArchivoSalida (out) /* Nombre del archivo ORC
                                  de salida. */
        int Tipo (in)/* Estructura de las tablas del
                       archivo HDF (SDS). */
6   string FormatoSalida (in)/* Formato de
                               almacenamiento de las tablas de salida. */
        int Nimg,Tipoimg,Nsds,Tiposds (in)/* Número y tipo
                                             de imágenes y de SDS */
        bool Estado=0 (out) /* 0, si la operación se ha
                               realizado con éxito. Otro valor, en caso
                               contrario. */
    inicio

```

```

    leer(ArchivoHDF, ArchivoORC, Tipo, FormatoSalida)
11  Estado=comprobarestructura(ArchivoHDF)
    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
    fin_si
    Nimg, Tipoimg=leeimg(ArchivoHDF)
16  Nsds, Tiposds=leesds(ArchivoHDF)
    si (Nimg>0 & Tipoimg==BYTE, INTEGER o REAL)
        entonces
            desde 1 hasta Nimg
                escribeimg(ArchivoORC)
            fin_desde
21  sino si (Nsds>0 & Tiposds==BYTE, INTEGER o REAL)
        entonces
            si (FormatoSalida=='o') entonces
                desde 1 hasta Nsds
                    escribeimg(ArchivoSalida)
                fin_desde
26  si_no si (FormatoSalida=='t') entonces
            desde 1 hasta Nsds
                escribetabla(ArchivoSMP)
            fin_desde
        fin_si
31  fin_si
    salir(Estado)
fin_función

```

II.4. Aplicación AritSOV.

Es la aplicación encarga de la obtención de los diversos parámetros biofísicos. Los argumentos de entrada, son un archivo ORC multibanda de tipo BYTE, INTEGER o REAL, que contiene los datos de partida necesarios para el cálculo de los parámetros deseados. Tales capas pueden ser, en la mayoría de los casos, los valores de reflectividad en diferentes regiones del espectro.

El archivo de comandos, es la implementación del modelo procesal de obtención de las distintas variables que se deseen obtener a partir de los

datos de entrada. Esta estructurado de tal forma que permite la obtención de resultados con múltiples bandas, una por cada parámetro.

La implementación de los modelos procesales, se realiza utilizando la Notación Polaca Inversa, RPN, que ha demostrado ser más eficiente en términos operativos (Kasprzyk et al., 1979; Agate and Drury, 1980), así como más fácil de implementar al utilizar estructuras de pilas LIFO (*Last Input - First Output*), habituales en los lenguajes de programación.

De este modo, la expresión para la obtención del NDVI,

$$NDVI = \frac{Ir_p - R}{Ir_p + R} \quad (II.1)$$

convertida a notación RPN quedaría como se muestra en el Listado II.4.

Listado II.4 Ejemplo de archivo de comandos MSOV.

```

1 //Obtención del NDVI a partir de MODIS
2 $2
3 $1
4 -
5 $2
6 $1
7 +
8 /

```

siendo \$1 y \$2, las bandas 1 y 2 de MODIS, correspondientes a los canales Rojo e Infrarrojo próximo. En el ejemplo anterior, se ha añadido una línea al comienzo del archivo de comandos que debe ser un comentario descriptivo, el cual será ignorado en el proceso, pero que sirve para aportar información sobre el procedimiento implementado en el archivo.

La notación para designar a los diferentes tipos de datos, que admite el archivo de comandos es la siguiente:

- \$, para indicar que se trata de una banda del archivo ORC. Por ejemplo, la banda 4 sería \$4.
- %, para indicar que se trata de una constante, π se representaría como %3.14159.
- #, para indicar que se trata de una operación matemática. Las operaciones matemáticas soportadas por la aplicación son las siguientes:

- $+$, $-$, $*$, $/$: operaciones algebraicas suma, resta, multiplicación y división.
- $\#<<$: Menor que (resultado binario).
- $\#>>$: Mayor que (resultado binario).
- $\#<=$: Menor o igual que (resultado binario).
- $\#>=$: Mayor o igual que (resultado binario).
- $\#==$: Igual que (resultado binario).
- $\#<<v$: Menor que (manteniendo el valor).
- $\#>>v$: Mayor que (manteniendo el valor).
- $\#<=v$: Menor o igual que (manteniendo el valor).
- $\#>=v$: Mayor o igual que (manteniendo el valor).
- $\#==v$: Igual que (manteniendo el valor).
- $\#\sin$, $\#\cos$, $\#\tan$: Operaciones trigonométricas seno, coseno y tangente.
- $\#\text{fmod}$: Calcula el resto de coma flotante de la división de $\$1/\2 .
- $\#\log$: Logaritmo de una banda.
- $\#\log10$: Logaritmo en base 10 de una banda.
- $\#\exp$: Exponencial de una banda.
- $\#\sqrt{}$: Raíz cuadrada de una banda.
- $\#\text{sq}$: Eleva una banda al cuadrado.
- $\#\text{floor}$: Devuelve el entero menor o igual que el valor.
- $\#\text{ceil}$: Devuelve el entero mayor o igual que el valor.
- $\#\text{trunc}$: Trunca el valor.
- $\#\text{abs}$: Valor absoluto de una banda.
- $\#\text{pow}$: Eleva una banda a una potencia que puede ser una constante, o los valores de otra banda.
- $\#\text{max}$: Máximo valor de una banda.
- $\#\text{min}$: Mínimo valor de una banda.
- $\#\text{media}$: Media de una banda.
- $\#\text{sdev}$: Desviación estándar de una banda.
- $\#\text{dist}$: Mínima distancia al píxel distinto de cero más cercano.

- **#hdist:** Mínima distancia horizontal al píxel distinto de cero más cercano.
- **#vdist:** Mínima distancia vertical al píxel distinto de cero más cercano.
- **#AND, #OR, #NAND:** Operadores lógicos AND, OR y NAND
- **#swap:** Intercambio de dos niveles de la pila.
- **#dup:** Duplica el último nivel de la pila.
- **#tipo:REAL,INTEGER,BYTE:** Establece el tipo de la imagen multibanda de salida.

Listado II.5 Aplicación AritSOV.

```

función AritSOV
2  variables
    ORC ArchivoEntrada (in) /* Nombre del archivo ORC
        de entrada (multibanda). */
    ORC ArchivoSalida (out) /* Nombre del archivo ORC
        de salida. */
    MSOV Comandos (in) /* Secuencia de comandos a
        aplicar al archivo de entrada. */
    int f,c (priv) /* Filas y columnas de la imagen de
        entrada */
7   string L (priv) /* Línea del archivo de comandos.
        */
    float[] Pila (priv) /* Pila temporal de resultados
        intermedios. [variable x (f*c) */
    int n=0 (priv) /* Nivel de profundidad de la pila
        */
    int nb (priv) /* No de bandas del archivo de
        salida */
    bool Estado=0 (out) /* 0, si la operación se ha
        realizado con éxito. Otro valor, en caso
        contrario. */
12  inicio
    Estado=leer(ArchivoORC,Comandos,ArchivoSalida)

```

```

    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
    fin_si
17  f,c=dimensiones(ArchivoEntrada)
    L=leelinea(comandos)  /* Lectura de las lineas del
        archivo de comandos */
    mientras (L!=EOF) hacer
        si (L[0]='$') entonces  /* Caso de leer una
            banda */
            pila[n]=cargabanda(ArchivoEntrada.L[1])
22         n++
        sino si (L[0]='%') entonces  /* Caso de leer
            una constante */
            pila[n]=constante(L[1])
            n++
        sino si (L[0]='#') entonces  /* Caso de leer
            una operación */
27         pila[n]=opera(L[1],pila[n+1],pila[n+2])
            n--
        fin_si
        L=leelinea(comandos)
    fin_mientras
32  nb=n
    ArchivoSalida=pila
    Estado=escribe(ArchivoSalida)
    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
37  fin_si
    salir(Estado)
fin_función

```

II.5. Aplicación CalcMedEntTerr.

Los parámetros de entrada, son el nombre del archivo de Entidades territoriales, de tipo ráster BYTE o INTEGER y una capa y el de parámetros

biofísicos, de las mismas dimensiones que el de entidades, pero puede ser multibanda y de tipos BYTE, INTEGER y REAL.

Listado II.6 Aplicación CalcMedEntTerr.

```
1  función CalcMedEntTerr
    variables
        ORC ArchivoEntTerr (in) /* Archivo de entidades
            territoriales. */
        ORC ArchivoParam (in) /* Archivo con las variables
            (multibanda). */
        ORC ArchivoSalidaORC (out) /* Archivo ORC de
            salida. */
6   SMP ArchivoSalidaSMP (out) /* Archivo SMP de
            salida. */
        int[] EntTerr (priv) /* ID de Entidades
            territoriales. [f x c]*/
        float[] Param (priv) /*Valores de los parámetros.
            Array de dimensiones [f x c] */
        float[] AcuPar, Medias (priv) /* Acumuladores para
            el cálculo de medias por entidad territorial [1
            x nEntTerr]. */
        float[] ParM (priv) /* Valores medios por EntTerr.
            [f x c] */
11  int nEntTerr (priv) /* Número de entidades
            territoriales. */
        int f,c,nb (priv) /* Filas, columnas y número de
            bandas de la imagen de las variables biofísicas.
            */
        bool Estado=0 (out) /* 0, si la operación se ha
            realizado con éxito. Otro valor, en caso
            contrario. */
    inicio
        Estado=leer(ArchivoEntTerr, ArchivoParam,
            ArchivoSalidaORC)
16  si (Estado!=0) entonces
            salir(Estado)
```



```

    fin_si
    EntTerr=carga(ArchivoEntTerr)
    f,c=dimensiones(EntTerr)
21    nEntTerr=contar(EntTerr)
    Param=carga(ArchivoParam)
    desde i=0 hasta i<nEntTerr /* Carga de datos */
        desde j=0 hasta j<f*c
            si (EntTerr[j]=i) entonces
26                AcuPar[i]=AcuPar[i]+Param[j]
                Medias[i]++
            fin_si
        fin_desde
    fin_desde
31    desde i=0 hasta i<nEntTerr /* Cálculo de medias */
        Medias[i]=AcuPar[i]/Medias[i]
    fin_desde
    desde j=0 hasta j<f*c /* Asignación de valores en
        el Archivo ráster de medias */
        ParM[j]=Medias[EntTerr[j]]
36    fin_desde
    ArchivoSalidaORC=ParM
    Estado=escribe(ArchivoSalidaORC)
    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
41    fin_si
    ArchivoSalidaSMP=Medias
    Estado=escribe(ArchivoSalidaSMP)
    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
46    fin_si
    salir(Estado)
fin_función

```

II.6. Aplicación leeMODQA.

Es la aplicación encargada de interpretar los datos de calidad de los datos procedentes del sensor MODIS.

Listado II.7 Aplicación leeMODQA.

```
función leeMODQA
2  variables
    ORC ArchivoQA (in) /* Archivo ORC que contiene los
        datos QA codificados (monobanda). [f x c] */
    ORC QAdescod (out) /* Archivo ORC que almacena los
        datos QA descodificados (multibanda) [f x c] */
    int Tipo (in) /* Tipo de datos de QA, necesario
        para descodificación */
    txt DefQA (in) /* Si Tipo=5, es necesario
        especificar el archivo con la definición de la
        estructura de los datos QA. */
7   int f,c (priv) /* Dimensiones de las imágenes */
    int nCapas (priv) /* N° de capas de información
        relativa a calidad. */
    int nBitsTot (priv) /* N° de bits totales
        empleados en la codificación de la QA. */
    int[] nBits (priv) /* N° de bits de cada capa de
        información. [1 x nCapas] */
    int[] QA (priv) /* Matriz que almacenará la
        información relativa a cada capa. [f x c] */
12  bool Estado=0 (out) /* 0, si la operación se ha
        realizado con éxito. Otro valor, en caso
        contrario. */
inicio
    Estado=leer(ArchivoQA, QAdescod, Tipo, DefQA)
    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
17  fin_si
    Estado=carga(ArchivoQA)
    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
```

```

    fin_si
22    si Tipo=1 entonces /* Definición de las
        estructuras de información */
        nCapas=6
        nBitsTot=14
        nBits=[2,2,4,4,1,1]
    sino si Tipo=2 entonces
27        nCapas=11
        nBitsTot=16
        nBits=[2,1,3,2,2,1,1,1,1,1,1]
    sino si Tipo=3 entonces
        nCapas=10
32        nBitsTot=32
        nBits=[2,4,4,4,4,4,4,4,1,1]
    sino si Tipo=4 entonces
        nCapas=4
        nBitsTot=8
37        nBits=[2,2,2,2]
    sino si Tipo=5 entonces
        Estado=carga(DefQA)
        si (Estado!=0) entonces
            salir(Estado)
42        fin_si
        nBitsTot=lee(DefQA)
        nCapas=lee(DefQA)
        desde i=0 hasta i<nCapas
            nBits[i]=lee(DefQA)
47        fin_desde
    fin_si
    desde i=0 hasta i<nCapas
        desde j=0 hasta j<f*c
            QA[j]=extraebits(nBits[i], ArchivoQA)
52        fin_desde
        QAdescod[i]=QA
    fin_desde
    Estado=escribe(QAdescod, banda i)
    si (Estado!=0) entonces

```

```
57      salir(Estado)
      fin_si
      salir(Estado)
fin_función
```

II.7. Aplicación OrcUpdateWeb.

Se trata de la aplicación encargada de efectuar las operaciones necesarias para alojar los resultados, en formato ORC, en el servidor de visualización. Los parámetros de entrada que admite son los datos de conexión y el nombre del archivo ORC, que puede ser monobanda o multibanda y de cualquiera de los tipos soportados (BYTE, INTEGER o REAL). La proyección de la imagen de entrada, debe ser la UTM y el dátum WGS84, con el fin de que las transformaciones se realicen correctamente.

Las operaciones que efectúa, son la carga del fichero, el cambio de proyección, para adaptarlo a la proyección de Google Maps, cambio de formato, pasando de ORC a JPG (un archivo por cada banda) y alojamiento del resultado en el servidor remoto especificado.

Si el archivo ORC posee datos de paleta de color, se utilizará ésta como paleta de la imagen de salida. En caso contrario, la paleta será una escala de grises, asignándose el color negro al valor mínimo valor presente en cada banda y el blanco al máximo.

Listado II.8 Aplicación OrcUpdateWeb.

```
función OrcUpdateWeb
variables
    string Servidor (in) /* Dirección ftp del servidor
                           y directorio remoto. */
    string Usuario (in) /* Nombre de usuario. */
5   string Contraseña (in) /* Contraseña de acceso al
                           servidor. */
    ORC ArchivoORC (in) /* Archivo que se alojará en
                           la web. */
```

```

    int HusoUTM (in) /* Huso de la proyección UTM del
        archivo de entrada. */
    bool Estado=0 (out) /* 0, si la operación se ha
        realizado con éxito. Otro valor, en caso
        contrario. */
inicio
10     Estado=leer(Servidor, Usuario, Contraseña,
        ArchivoORC)
    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
    fin_si
    Estado=carga(ArchivoORC)
15     si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
    fin_si
    Estado=reproyecta(ArchivoORC,HusoUTM) /*
        Reproyección utilizando las aplicaciones GDAL */
    si (Estado!=0) entonces
20         salir(Estado)
    fin_si
    Estado=cambiaformatográfico(ArchivoORC) /* Cambio
        de ORC a JPEG utilizando GDAL */
    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
25     fin_si
    Estado=conecta(Servidor,Usuario,Password)
    si (Estado=0) entonces
        Estado=upload(ArchivoORC)
        si (Estado!=0) entonces
30            salir(Estado)
        fin_si
    sino
        salir(Estado)
    fin_si
35     salir(Estado)
fin_función

```

II.8. Aplicación UploadColorCombi.

La aplicación admite como parámetros de entrada, los datos de conexión al servidor, el nombre del archivo multispectral a partir del cual se generará la combinación color, y las bandas que se emplearán, correspondientes a los canales R, G y B. Dadas las características de la aplicación, la imagen de entrada debe encontrarse en coordenadas UTM. Con el fin de mejorar la apariencia visual de la imagen resultante, la aplicación permite realizar un realce de contraste de las bandas, mediante una expansión lineal del histograma, con recorte de las colas del mismo, en las tres bandas simultáneamente. El parámetro que indica la cantidad de realce, se refiere al porcentaje de valores que se deshecharán en cada extremo del histograma, por lo que el valor total de valores desechados será el doble del especificado.

Como resultado, se obtendrá una imagen reproyectada, en formato JPG, que se almacenará en el servidor remoto y se integrará en el entorno de visualización.

Listado II.9 Aplicación UploadColorCombi.

```
función UploadColorCombi
variables
    string Servidor (in) /* Dirección ftp del servidor
                           y directorio remoto. */
4    string Usuario (in) /* Nombre de usuario. */
    string Contraseña (in) /* Contraseña de acceso al
                           servidor. */
    ORC ArchivoORC (in) /* Archivo que se alojará en
                           la web. */
    JPG ColorCombi (out) /* Combinación color */
    int R, G, B (in) /* Número de banda que se
                       asignará a cada canal de color. */
9    bool Realce (in) /* booleano que indica si se
                       realizará realce de la imagen. */
    int CantRealce (in) /* Cantidad de realce que se
                       aplicará a la imagen de salida. Debe
                       especificarse con un valor comprendido entre 0 y
                       100. */
```

```

    int HusoUTM (in) /* Huso de la proyección UTM de
        los datos de entrada. */
    bool Estado=0 (out) /* 0, si la operación se ha
        realizado con éxito. Otro valor, en caso
        contrario. */
inicio
14     Estado=leer(Servidor, Usuario, Contraseña,
        ArchivoORC, R, G, B)
    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
    fin_si
    Estado=carga(ArchivoORC)
19     si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
    fin_si
    ColorCombi=combi(ArchivoORC, R, G, B) /*
        Generación de la combinación color en un ORC
        tribanda */
    si (Realce!=0) entonces /* Expansión lineal de
        las bandas de la combinación color */
24     ColorCombi.Banda1=expansióonlineal(ColorCombi.
        Banda1,CantRealce)
        ColorCombi.Banda2=expansióonlineal(ColorCombi.
        Banda2,CantRealce)
        ColorCombi.Banda3=expansióonlineal(ColorCombi.
        Banda3,CantRealce)
    fin_si
    Estado=reproyecta(Colorcombi,HusoUTM) /*
        Reproyección utilizando las aplicaciones GDAL */
29     si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
    fin_si
    Estado=cambiaformatográfico(ColorCombi) /* Cambio
        de ORC a JPEG utilizando GDAL */
    si (Estado!=0) entonces
34     salir(Estado)
    fin_si

```

```

Estado=conecta(Servidor,Usuario,Password)
si (Estado=0) entonces
    Estado=upload(ColorCombi)
39     si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
    fin_si
sino
    salir(Estado)
44 fin_si
    salir(Estado)
fin_función

```

II.9. Aplicación PorcentOcupEntTerr.

Un documento derivado que puede obtenerse a partir de un documento de tipo cualitativo (por ejemplo, un documento de ocupación del suelo, resultado de un proceso de clasificación), es el porcentaje de ocupación de cada clase, en cada entidad territorial suministrada. Para ello, esta aplicación requiere como datos de entrada los archivos ráster de entidades territoriales y de la clasificación. El archivo de entidades territoriales, puede ser de tipo BYTE, admitiendo valores de 8 bits, entre 0 y 255 o de tipo INTEGER, admitiendo valores de 16 bits entre 0 y 65535, mientras que el documento de ocupación de suelo debe ser de tipo BYTE.

La aplicación devuelve, como resultado, un archivo de tipo ORC multibanda, de tipo BYTE, con valores comprendidos entre 0 y 100, del porcentaje de ocupación de cada clase, en cada entidad territorial, organizado en bandas de información. Así, la primera banda, corresponderá a los porcentajes de ocupación de la primera clase y así sucesivamente. También se devuelve un archivo de tipo tabular, SMP, en el que se muestran los resultados organizados por filas, con el siguiente formato:

```
ID_EntTerr%_Clase1%_Clase2 ... %_Clasen ID_EntTerr
```

con tantas columnas como clases de pertenencia haya.

Listado II.10 Aplicación PorcentOcupEntTerr.

```

función PorcentOcupEntTerr
variables
    ORC ArchivoEntTerr (in) /* Archivo de entidades
        territoriales (BYTE o INTEGER). */
4    ORC ArchivoLandCover (in) /* Archivo con el Land
        Cover (BYTE). */
    ORC ArchivoSalidaORC (out) /* Archivo ORC de
        salida. Multibanda, una por cada clase. */
    SMP ArchivoSalidaSMP (out) /* Archivo SMP de
        salida. Tantas columnas como clases */
    int nEntTerr (priv) /* Número de entidades
        territoriales. */
    int f,c,nClas (priv) /* Filas, columnas y número
        de clases presentes en el Land Cover. */
9    int[] EntTerr (priv) /* ID de Entidades
        territoriales. [f x c]*/
    int[] LandCover (priv) /* Imagen clasificada. [f x
        c]*/
    int[] TamEntTerr (priv) /* Tamaño (en celdas) de
        cada entidad territorial. Dimensiones [nEntTerr
        x 1]*/
    int[] TamLcEt (priv) /* No de celdas de cada clase
        , contenidas en cada entidad territorial.
        Dimensiones [nEntTerr x nClas] */
    float[] PorcentOcup (priv) /* Porcentajes de
        ocupación. Dimensiones [f x c]*/
14    bool Estado=0 (out) /* 0, si la operación se ha
        realizado con éxito. Otro valor, en caso
        contrario. */
inicio
    Estado=leer(ArchivoEntTerr,ArchivoParam,
        ArchivoSalidaORC)
    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
19    fin_si
    EntTerr=carga(ArchivoEntTerr)
    f,c=dimensiones(EntTerr)

```

```
nEntTerr=contar(EntTerr)
desde i=0 hasta i<f*c /* Contador de celdas de
    cada entidad territorial */
24     TamEntTerr[EntTerr[i]]++
fin_desde
LandCover=carga(ArchivoLandCover)
desde i=0 hasta i<f*c /* Carga de datos*/
    TamLcEt[EntTerr[i]][LandCover[i]]++
29 fin_desde
desde i=0 hasta i<nEntTerr /*Cálculo de
    porcentajes de ocupación */
    desde j=0 hasta j<nClas
        TamLcEt[i][j]=TamLcEt[i][j]/TamEntTerr[i]
    fin_desde
34 fin_desde
desde i=0 hasta i<nClas
    desde j=0 hasta j<f*c /* Asignación de valores
        en el Archivo ráster de porcentajes */
        PorcentOcup[j]=TamLcEt[EntTerr[j]][i]/
            TamEntTerr[EntTerr[j]]
    fin_desde
39 ArchivoSalidaORC=PorcentOcup
Estado=escribe(ArchivoSalidaORC) /* Escritura
    de cada banda de porcentajes */
si (Estado!=0) entonces
    salir(Estado)
    fin_si
44 fin_desde
ArchivoSalidaSMP=TamLcEt
Estado=escribe(ArchivoSalidaSMP)
si (Estado!=0) entonces
    salir(Estado)
49 fin_si
salir(Estado)
fin_función
```

II.10. Aplicación interpolaSOV.

La aplicación está diseñada para permitir la interpolación de imágenes MODIS, a las que se ha reorganizado sus bandas, para hacerlas coincidir con las equivalentes a TM/ETM+. Estas imágenes MODIS se deben encontrar en formato INTEGER y, dado que almacenan valores de reflectividad a los que se les ha aplicado un cambio de escala, para adaptarlos a valores enteros entre 1 y 16000, es necesario realizar la conversión de los valores digitales de TM/ETM+ (0 - 255) a valores de reflectividad (según las expresiones (4.1) y (4.2), cuyos modelos implementados en el lenguaje propio de la calculadora de bandas desarrollada en este trabajo, se especifican en los apartados IV.1 y IV.2) y ajustarlos al mismo rango (1 - 16000).

Por otro lado, las imágenes deben estar convenientemente remuestreadas, con el fin de que las dimensiones de MODIS y TM coincidan, por lo que las primeras deberán ajustarse a una resolución espacial de 30 m.

La expresión que permite obtener los valores de la imagen interpolada, se detalló en el apartado 4.3, en la ecuación (4.7).

Listado II.11 Aplicación interpolaSOV.

```
función interpolaSOV
variables
    ORC ETMini,MODISini (in) /* Imágenes TM y MODIS
        del inicio del periodo (INTEGER, multibanda). */
4    ORC MODISint (in) /* Imagen MODIS a interpolar (
        multibanda). */
    ORC ETMfin,MODISfin (in) /* Imágenes TM y MODIS
        del final de periodo (INTEGER, multibanda). */
    ORC ETMint (out) /* imagen MODIS interpolada (
        INTEGER, multibanda). */
    int D1,D2,D3 (in) /* Fechas de la imagen inicial,
        intermedia y final (día del año). */
    int f,c,nb (priv) /* No de bandas de las imágenes.
        */
9    int[] DifIni, DifFin (priv) /* Diferencias entre
        MODIS y TM en las fechas inicial y final. [f x c
        ] */
```

```
int[] Interpolada (priv) /* Valores interpolados.
    [f x c] */
bool Estado=0 (out)/* 0, si la operación se ha
    realizado con éxito. Otro valor, en caso
    contrario. */
inicio
    Estado=leer(ETMini,MODISini,MODISint,ETMfin,
        MODISfin,D1,D2,D3)
14 si (Estado!=0)
        salir(Estado)
    fin_si
    f,c=dimensiones(ETMini)
    nb=numerodebandas(ETMini)
19 desde i=0 hasta i<nb
        Dif1=ETMini[i]-MODISini[i] /* Diferencias
            entre MODIS y TM, fecha inicial. */
        Dif2=ETMfin[i]-MODISfin[i] /* Diferencias
            entre MODIS y TM, fecha final. */
        desde j=0 hasta j<f*c /* Contador de celdas de
            cada entidad territorial */
            Interpolada[j]=MODISint[j]+((Dif2[j]-Dif1[j]
                ])/(D3-D1) * (D2-D1) + Dif1[j])
24 fin_desde
        ETMint[i]=Interpolada
    fin_desde
    Estado=escribe(ETMint)
    si (Estado!=0) entonces
29 salir(Estado)
    fin_si
    salir(Estado)
fin_función
```

II.11. Aplicación import_aemet.

Es la aplicación encargada de la gestión de los datos procedentes de la Agencia Estatal de Meteorología. Puede trabajar en modo *Local* o *Descarga*. En

el primer caso, el archivo que contiene los datos meteorológicos, se encuentra en un directorio del equipo que ejecuta la aplicación, mientras que en el segundo, se procede a la descarga de los datos desde el propio servidor de la AEMET, cuyo acceso se realiza, hasta la fecha, de forma anónima. El fichero de datos, se encuentra en formato CSV propio de la AEMET, por lo que será necesario extraer la información relativa a Temperatura Media y Precipitación 24 h, del mismo, y asignar estos valores a las estaciones meteorológicas presentes en el archivo especificado (en formato CSV). El resultado son dos archivos vectoriales, del tipo DBV (Ormeño, 1993).

Posteriormente, se procede a la obtención de las celdas de Voronoi (Polígonos Thiessen) de los mismos, con lo que el resultado será un archivo ORC de dos bandas, de tipo REAL, con los valores de las mismas y cuyas dimensiones dependerán del parámetro *Resolución*, expresado en metros.

Listado II.12 Aplicación import_aemet.

```
función import_aemet
variables
3   string Op (int) /* Modo de trabajo: L=Archivo CSV
    local; D=Descarga del archivo CSV desde el
    servidor. */
    CSV DatosMet (in) /* Archivo de datos
    meteorológicos, en formato CSV-AEMET. */
    DBV DatosPluvio (priv) /* Archivo vectorial, con
    las coordenadas de las estaciones y el valor de
    la pluviometría. */
    DBV DatosTemp (priv) /* Archivo vectorial, con las
    coordenadas de las estaciones y el valor de la
    temperatura media. */
    CSV EstMet (in) /* Archivo con las coordenadas de
    las estaciones meteorológicas, en el formato CSV
    -AEMET. */
8   string Servidor (in) /* Dirección ftp del servidor
    y directorio remoto. */
    string Usuario (in) /* Nombre de usuario. */
    string Contraseña (in) /* Contraseña de acceso al
    servidor. */
```

```
int Día,Mes,Año (in) /* Fecha de los datos. */
float Xmin,Xmax,Ymin,Ymax (in) /* Coordenadas del
    área de interés (UTM). */
13 float Resolución(in) /* Resolución, en m, de la
    imagen resultante. */
ORC ArchivoORC (out) /* Archivo que se alojará en
    la web (2 bandas: Temp. y Pluvio.). */
float[] Temp,Pluvio (priv) /* Matrices de
    temperatura media y pluviometría 24 h. */
int f,c (priv) /* Dimensiones de las capas ráster
    de pluviometría y temperatura. */
bool Estado=0 (out) /* 0, si la operación se ha
    realizado con éxito. Otro valor, en caso
    contrario. */
18 inicio
    si (Op=L) entonces
        Estado=leer(DatosMet,EstMet,Día,Mes,Año,Xmin,
            Xmax,Ymin,Ymax,Resolución,ArchivoORC)
        si (Estado!=0)
            salir(Estado)
23    fin_si
    sino si (Op=D) entonces
        Estado=leer(EstMet,Día,Mes,Año,Xmin,Xmax,Ymin,
            Ymax,Resolución,ArchivoORC)
        si (Estado!=0)
            salir(Estado)
28    fin_si
    DatosMet=(Servidor+Día+Mes+Año+".csv")
    Estado=conecta(Servidor,Usuario>Password)
    si (Estado=0) entonces
        Estado=guardararchivo(NombreArchivo)
33    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
    fin_si
    sino
        salir(Estado)
38    fin_si
```

```

    fin_si
    f=(Ymax-Ymin)/Resolución
    c=(Xmax-Xmin)/Resolución
    DatosPluvio=carga(EstMet,DatosMet.Pluvio) /* Carga
        del archivo de valores XYZ_pluviometría */
43  DatosTemp=carga(EstMet,DatosMet.Temp) /* Carga del
        archivo de valores XYZ_temperatura */
    Pluvio=voronoi(DatosPluvio,Xmax,Xmin,Ymax,Ymin,
        Resolución) /* Celdas de Voronoi de la pluvio */
    Temp=voronoi(DatosTemp,Xmax,Xmin,Ymax,Ymin,
        Resolución) /* Celdas de Voronoi de la temp */
    ArchivoORC.Banda1=Pluvio /* Asignación de bandas
        del archivo de salida */
    ArchivoORC.Banda2=Temp
48  Estado=escribe(ArchivoORC)
    si (Estado!=0) entonces
        salir(Estado)
    fin_si
    salir(Estado)
53 fin_función

```


Anejo III

MANUAL DE USUARIO DE LAS APLICACIONES PROPUESTAS.

Cada una de las aplicaciones creadas en este trabajo admite un cierto número de parámetros, con el fin de hacerlas flexibles y permitir un mayor ámbito de aplicación. En el caso de que las aplicaciones se ejecuten sin ningún parámetro en la línea de comandos, despliegan un menú desde el que se puede acceder a todas las opciones de la misma, facilitando la interacción con el usuario.

III.1. Aplicación DescargaModis.

Es la encargada de acceder al servidor de datos MODIS y proceder a la descarga de los mismos (Figura III.1).

Utilización:

```
DescargaModis Producto_estandar dia mes anyo teselaH  
teselaV Servidor
```

Los parámetros que admite en la línea de comandos son

- **Producto_estándar:** Se debe indicar el código del producto estándar deseado, de acuerdo a la denominación dada por MODIS, tal como se indica en las tablas I.5 y I.7 del anejo I.
- **Día, mes y año:** fecha de la imagen que se quiere descargar.

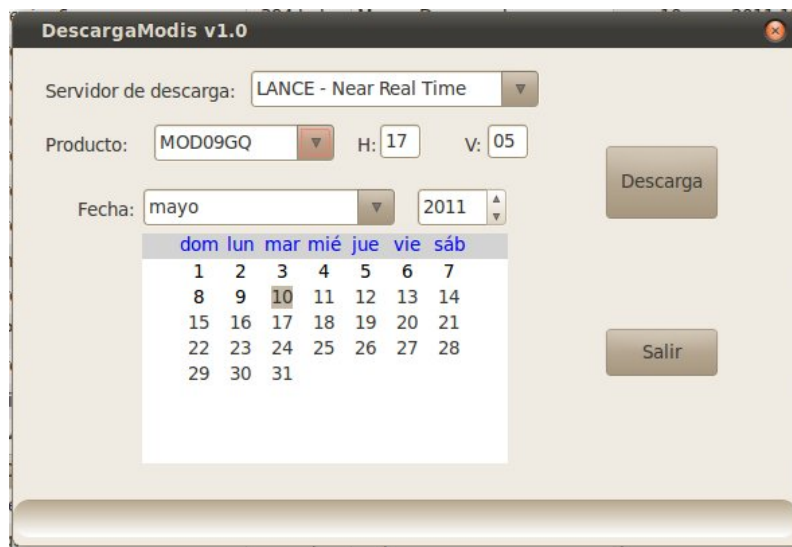


Figura III.1: Interfaz de usuario de la aplicación DescargaModis.

- **TeselaH y TeselaV:** Coordenadas H y V de la tesela deseada, según la proyección sinusoidal de distribución de productos MODIS.
- **Servidor:** Este parámetro admite los valores 1, para indicar que la descarga se hará desde el servidor LANCE y 2, para indicar el servidor LP-DAAC. Ciertos productos estándar de MODIS pueden ser descargados tras su adquisición en un breve periodo de tiempo, desde el servidor LANCE MODIS, mientras que otros sólo están disponibles en el servidor LP-DAAC, transcurridos algunos días desde su adquisición.

De ser necesario la descarga de varias teselas para abarcar la zona de interés, la aplicación deberá ser ejecutada tantas veces como teselas sean necesarias.

Ejemplo de ejecución:

```
DescargaModis MOD09GA 09 05 2011 17 04 1
```

Este comando descarga la tesela H17V04, del producto estándar MOD09GA, correspondiente al día 9-abril-2011, desde el servidor de LANCE-MODIS.

III.2. Aplicación PreprocesaModis.

Tras la descarga de las teselas que sean necesarias para cubrir la zona de interés, es necesario unirlas para formar un mosaico, así como seleccionar la zona sobre la que se trabajará, lo que generalmente implica efectuar un cambio

de proyección, con el fin de trabajar en proyección UTM, que es la oficial en el ámbito de la península ibérica, así como en el Dátum ETRS89, lo cuál permite integrar datos procedentes de fuentes diversas.



Figura III.2: Interfaz de usuario de la aplicación PreprocesaModis.

La ejecución de la aplicación PreprocesaModis (Figura III.2), admite los siguientes parámetros

```
PreprocesaModis directorioHDF nombreHDF xmin xmax  
ymin ymax resol(*) capas(**) husoUTM
```

Siendo,

- **directorioHDF**, el directorio en el que se encuentran las teselas descargadas en el paso previo.
- **nombreHDF**: especifica el nombre que se dará al archivo resultante de la unión de las teselas, cambiada de proyección y recortada.
- **xmin, xmax, ymin e ymax**: Límites de la zona de interés, en coordenadas UTM.
- **resol**: resolución geométrica de los datos resultantes.
- **capas**: Esta opción nos permite seleccionar las capas que se procesarán. Está formada por cadena entrecomillada de 1 y 0, indicando las capas que serán extraídas.
- **husoUTM**, indica el huso de la proyección UTM, al que se reproyectarán los datos originales.

Ejemplo de ejecución:

```
PreprocesaModis /home/modis mod09.hdf -66464 1021069
3980954 4858130 500 "0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1
1 1" 30
```

El comando procede a la selección de las capas 11 a 17 de los datos almacenados en el directorio `/home/teledeteccion/modis`, almacenando el resultado en un archivo llamado `mod09.hdf`, que cubre la zona seleccionada y cuya resolución espacial es de 500 m.

III.3. Aplicación ImpHdf.

Dado que los datos del sensor MODIS se almacenan y distribuyen en formato HDF, es necesario convertirlos al formato interno del resto de las aplicaciones, derivadas de la aplicación SovMap, las cuáles trabajan con un tipo de archivos binarios genéricos formados por un archivo con extensión ORC, en el que se almacena la información de los datos y un conjunto de archivos con extensión RAW, que contienen los valores de cada banda.



Figura III.3: Interfaz de usuario de la aplicación ImpHdf.

La ejecución de esta aplicación (Figura III.3) se realiza mediante el comando

```
ImpHdf hdf_entrada orc_salida Op(1:f,c,ndims; 2:ndims
,f,c; 3:f,ndims,c) Tablas/imagenes ("t";"o")
```

donde,

- `hdf_entrada`, es el nombre del archivo HDF de entrada.
- `orc_salida`, hace referencia al archivo ORC de salida (las bandas se almacenarán en archivos RAW independientes).

- **Op**, hace referencia a la estructura interna de los datos tabulares del archivo HDF. Se soportan las estructuras [f,c,ndims], [ndims,f,c] y [f,ndims,c], siendo f y c, las filas y columnas de las tablas y ndims, el número de dimensiones de las mismas, ya que pueden ser n-dimensionales. En el caso de tratarse de datos HDF-MODIS, el formato utilizado es el 1, [f,c,ndims]. La elección se realiza por medio de un número: 1, 2 o 3.
- **Tablas/imágenes**. Dado que los datos tabulares pueden contener datos no compatibles con los formatos de almacenamiento de imágenes de nuestra aplicación de proceso, es posible seleccionar entre dos formatos de salida: “t”, para salida en forma de tablas ASCII y “o”, para una salida en formato de imagen (ORC+RAW).

Ejemplo de ejecución:

```
ImpHdf /home/modis/mod09.hdf /home/modis/region.orc 1  
"o"
```

Mediante este comando, se realiza la importación del archivo /home/modis/mod09.hdf, cuya estructura de tablas es del tipo 1 y que se guardarán en el archivo /home/modis/region.orc, en formato de imagen.

III.4. Aplicación AritSOV.

Esta aplicación (Figura III.4) es la encargada de efectuar los cálculos de índices y parámetros biofísicos a partir de los datos procedentes de MODIS.



Figura III.4: Interfaz de usuario de la aplicación AritSOV.

La ejecución de esta aplicación se realiza mediante el comando

```
AritSOV orc_entrada Op(1:Expresión, 2:Archivo  
comandos) Expr/Arc_comandos orc_salida
```

donde,

- `orc_entrada`, es el nombre del archivo ORC de entrada.
- `Op`. Se permiten la introducción de dos tipos de operaciones: *Expresiones algebraicas* y *archivos de comandos*. La opción más polivalente es la de archivo de comandos, pues en éste se pueden especificar los procedimientos para la obtención de diversos parámetros a partir de un único archivo de entrada. La elección se realiza por medio de un número: 1 o 2.
- `Expr/Arc_comandos`. En función de la opción anterior, se deberá especificar la expresión algebraica o bien, la ruta del archivo con las secuencias de comandos apropiadas.
- `orc_salida`, hace referencia al archivo ORC de salida de resultados. En caso de que se obtengan varios índices, el resultado será un archivo multibanda.

Ejemplo de ejecución:

```
AritSOV /home/modis/region.orc 2 /home/modis/indices.  
msov /home/modis/indices.orc
```

Mediante este comando, se ejecutan las secuencias de comandos definidas en el archivo `/home/modis/indices.msos` sobre el archivo con los datos de entrada `/home/modis/region.orc`, guardándose los resultados en el archivo `/home/modis/indices.orc`.

III.5. Aplicación CalcMedEntTerr.

En el caso de disponerse de una capa de información de entidades territoriales, los parámetros biofísicos pueden obtenerse referidos a ellas (la media), en formato gráfico y tabular, mediante esta aplicación (Figura III.5).

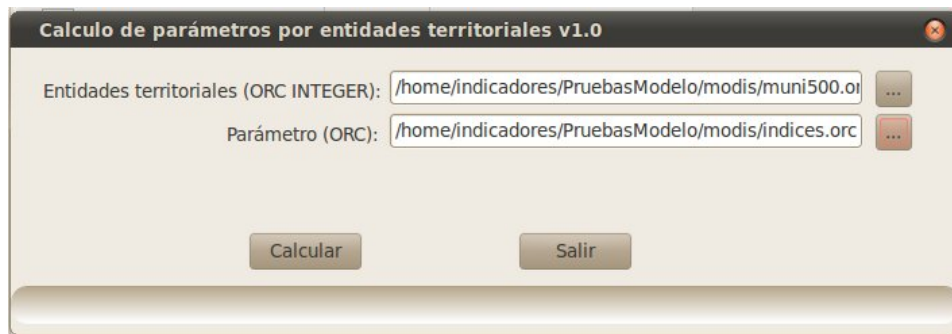


Figura III.5: Interfaz de usuario de la aplicación CalcMedEntTerr.

La ejecución se realiza mediante el comando

```
CalcMedEntTerr orc_ent_terr orc_parametro orc_salida
```

donde,

- **orc_ent_terr**, es el nombre del archivo ORC de entidades territoriales, en formato ráster y de tipo BYTE o INTEGER. La resolución geométrica de este archivo y, por tanto, el número de filas y columnas, debe coincidir con la del archivo con los valores de los parámetros biofísicos.
- **orc_parametro**, es el nombre del archivo ORC con los valores de los diversos parámetros biofísicos obtenidos anteriormente. En caso de ser un archivo multibanda, se obtendrán los valores medios del parámetro por entidad territorial en cada una de ellas.
- **orc_salida**, hace referencia al archivo ORC de salida de resultados, conteniendo cada banda el valor medio del respectivo parámetro, por entidad territorial.

Ejemplo de ejecución:

```
CalcMedEntTerr /home/modis/muni.orc /home/modis/  
indices.orc /home/modis/indET.orc
```

El comando anterior obtiene el valor medio de cada índice almacenado en las bandas del archivo `/home/modis/indices.orc` en cada una de las entidades territoriales definidas en el archivo `/home/modis/muni.orc`, almacenando el resultado en el archivo `/home/modis/indET.orc`.

III.6. Aplicación leeMODQA.

Es la aplicación encargada de extraer e interpretar la información relativa a la calidad de los datos MODIS descargados (Figura III.6).

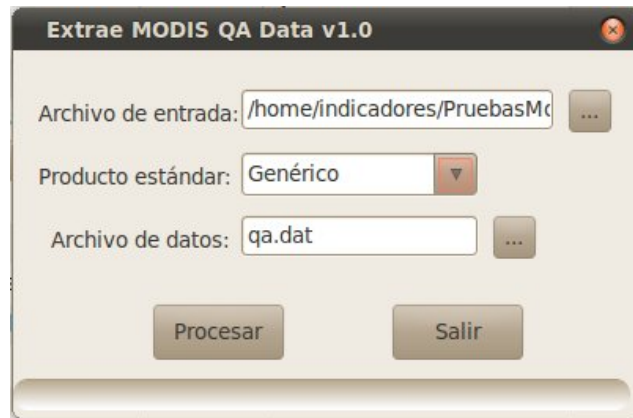


Figura III.6: Interfaz de usuario de la aplicación leeMODQA.

La ejecución se realiza mediante el comando

```
leeMODQA archivo_entrada archivo_salida tipo  
archivo_definicion_QA [sólo si tipo=5]
```

donde,

- **archivo_entrada**, es el nombre del archivo ORC resultado de importar al formato propio, la capa de información de calidad de los datos originales.
- **archivo_salida**, especifica el archivo ORC en el que se guardarán las diversas capas con información relativa a distintos aspectos relacionados con la calidad y que dependen del producto estándar MODIS.
- **tipo**. Dado que la información de calidad tiene una estructura específica en cada producto estándar MODIS, es necesario definirla con el fin de poder realizar una correcta interpretación y extracción de la misma. La aplicación incorpora algunas estructuras, referidas a los productos MOD09GA, MOD09GQ y MOD11A1, permitiendo, además, la definición de estructuras específicas por parte del usuario. La selección del tipo se hace a través de un código numérico, atendiendo al siguiente esquema:

- 1: MOD09GQ.

- 2: MOD09GA, las capas de 1 km de resolución espacial.
- 3: MOD09GA, las capas de 500 m de resolución espacial.
- 4: MOD11A1.
- 5: Definido por el usuario. En este caso, además, es necesario especificar el nombre del archivo en el que se define la estructura de los datos de calidad. El formato del mismo, se detalla en el Listado III.1.

Listado III.1 Definición de la estructura de los datos de calidad.

```
//Estructura del archivo de definición de datos de calidad MODIS:
// - 4 líneas de información y comentarios (no se usan, pero deben
// estar presentes)
// - 1 línea con la estructura de la información de calidad: nº de
// bandas de información y nº de bits de cada una de ellas
// - ejemplo (calidad MOD09GQ: 7 capas, 16 bits en total): 7 2 2 4 4 1
1 2
11 2 1 3 2 2 1 1 1 1 1 1
```

Ejemplo de ejecución:

```
leeMODQA /home/modis/qa.orc /home/modis/cobnum.orc 2
```

El comando anterior extrae la información de calidad del archivo /home/modis/qa.orc, relativos al producto estándar MOD09GA (1 km) y almacena el resultado en el archivo /home/modis/cobnum.orc.

III.7. Aplicación OrcUpdateWeb.

Finalizado el proceso de obtención de indicadores y variables, los resultados pueden ser alojados en servidores remotos, desde los que estén accesibles a los usuarios. Para ello, se ha desarrollado esta aplicación (Figura III.7), que extrae la información de los archivos de resultados y realiza una conversión de formato, para transformarlos a JPEG, compatible con los navegadores de internet más extendidos, así como efectúa un nuevo cambio de proyección, para adaptarlo a la variante de la proyección Mercator utilizada en la cartografía de Google Maps, que sirve de base para el portal de visualización. La proyección de los datos de entrada, debe ser la UTM, referida al dátum WGS84, con el fin de que las conversiones se realicen correctamente.



Figura III.7: Interfaz de usuario de la aplicación OrcUpdateWeb.

La ejecución se realiza mediante el comando

```
OrcUpdateWeb nombre_orc datos_ftp husoUTM
```

donde,

- **nombre_orc**, es el nombre del archivo ORC de resultados, el cual puede ser monobanda o multibanda.
- **datos_ftp**, es el nombre del archivo que contiene los datos de conexión al servidor FTP en el que se guardarán los resultados. Estos datos son el directorio base, el nombre de usuario y la contraseña de acceso a la cuenta, cada uno de ellos, en una línea diferente.
- **husoUTM**, indica el huso en al que están referidas las coordenadas del archivo ORC de entrada.

Ejemplo de ejecución:

```
OrcUpdateWeb /home/modis/indices.orc /home/modis/  
updfp.dat 30
```

El resultado es la actualización de los contenidos almacenados en el servidor, con los resultados extraídos del archivo `/home/modis/indices.orc`, el cual se encuentra en proyección UTM, huso 30, efectuando la conexión al servidor ftp remoto, con los parámetros especificados en el archivo `/home/modis/updfp.dat`.

III.8. Aplicación UploadColorCombi.

Esta aplicación (Figura III.8) tiene como finalidad el generar una combinación color a partir de los datos multiespectrales contenidos en un

archivo ORC y actualizar los ficheros del servidor remoto con ella. Con este fin, el procedimiento es extraer la información de radiometría del archivo original, generar la combinación color especificada por el usuario, realizar una conversión de formato, de ORC multibanda a JPG color, así como efectúa un cambio de proyección, de UTM a la proyección Mercator utilizada en la cartografía de Google Maps, y subir el archivo al directorio remoto especificado.



Figura III.8: Interfaz de usuario de la aplicación UploadColorCombi.

La ejecución se realiza mediante el comando

```
UploadColorCombi Archivo_ORC Archivo_JPG Datos_ftp
BandaR BandaG BandaB Realce(1,0) CantRealce(%)
husoUTM
```

donde,

- **Archivo_ORC**, es el nombre del archivo ORC con información de radiometría (multibanda).
- **Archivo_JPG**, es el nombre del archivo JPG que se generará, con la combinación color resultante.
- **Datos_ftp**, es el nombre del archivo que contiene los datos de conexión al servidor FTP en el que se guardarán los resultados. Estos datos son el directorio base, el nombre de usuario y la contraseña de acceso a la cuenta, cada uno de ellos, en una línea diferente.
- **BandaR**, **BandaG** y **BandaB**, indican el número de banda que se utilizará en cada canal de color (Rojo, Verde y Azul).

- **Realce**, es un parámetro que admite dos valores: 1 y 0, para indicar si se desea efectuar un realce radiométrico de la imagen, mediante una expansión lineal del histograma, con recorte de las colas del mismo.
- **CantRealce**, define la cantidad de valores (en tanto por ciento del total) que se eliminarán de ambas colas del histograma, a fin de que los valores extremos no afecten al resultado del realce.
- **husoUTM**, indica el huso en al que están referidas las coordenadas del archivo ORC de entrada.

Ejemplo de ejecución:

```
UploadColorCombi /home/modis/region.orc /home/modis/  
combi431.jpg /home/modis/updftp.dat 1 4 3 1 5 30
```

El resultado es la actualización de la combinación color almacenada en el servidor remoto y generada situando la banda 1 por el canal rojo, la 4 por el canal verde y la 3 por el azul, utilizando la información de radiometría procedente del archivo `/home/modis/region.orc`, incluyendo un realce radiométrico con un recorte del 5% de las colas, así como los datos de conexión definidos en `/home/modis/updftp.dat`. En el proceso, se genera el archivo `/home/modis/combi431.jpg` con la combinación color.

III.9. Aplicación PorcentOcupEntTerr.

Mediante esta aplicación (Figura III.9) es posible obtener el porcentaje de ocupación de cada clase de pertenencia, en un documento clasificado (del tipo de ocupación del suelo, por ejemplo), en cada entidad territorial.



Figura III.9: Interfaz de usuario de la aplicación interpolaSOV

La ejecución se realiza mediante el comando

```
PorcentOcupEntTerr orc_ent_terr orc_clasificado
orc_salida
```

donde,

- `orc_ent_terr`, es el nombre de un archivo ORC, de tipo BYTE o INTEGER, que contiene las entidades territoriales en formato ráster.
- `orc_clasificado`, es el nombre del archivo ORC, que contiene el resultado de una clasificación (documento cualitativo).
- `orc_salida`, es el nombre de archivo ORC, en el que se guardarán los resultados de la operación. Se trata de un archivo multibanda, con tantas bandas como clases de pertenencia tenga el documento clasificado, en el que se almacena, para entidad territorial, el porcentaje de ocupación de cada uno de ellas, por cada una de las clases. Así, la banda 1 corresponderá al porcentaje de ocupación de cada entidad por la clase de pertenencia 0, la banda 2 por la clase 1 y así, sucesivamente. Además del archivo ORC y los correspondientes RAW, se genera también un archivo tabular, con extensión SMP, en el que se almacenan en formato ASCII los valores anteriores.

Ejemplo de ejecución:

```
PorcentOcupEntTerr /home/clasif/muni.orc /home/clasif
/landcover.orc /home/clasif/confuse.orc
```

El resultado es la determinación de los porcentajes de ocupación de cada una de las 4 clases definidas en el archivo `/home/clasif/landcover.orc` en cada uno de los términos municipales definidos en el archivo `/home/clasif/muni.orc` que se almacenan en `/home/clasif/confuse.orc` (en formato gráfico) y en `/home/clasif/muni.smp` (en formato tabular).

III.10. Aplicación interpolaSOV.

La finalidad de esta aplicación (Figura III.10), es la de obtener los valores de radiometría derivados de los datos diarios proporcionados por el sensor MODIS, de 250 m ó 500 m de resolución espacial, con una resolución de 30 m, mediante interpolación temporal, utilizando, para ello, dos imágenes de la misma zona, adquiridas por el sensor ETM+/TM, con una resolución temporal

de 30 m y 16 días de resolución temporal. Los fundamentos del método están documentados en el apartado 4.3.



Figura III.10: Interfaz de usuario de la aplicación interpolaSOV

La ejecución se realiza mediante el comando

```
interpolaSOV ETMini MODISini MODISint ETMfin MODISfin  
DJETMini DJMODISint DJETMfin MODISinterp
```

donde,

- **ETMini**, es el nombre del archivo ORC que contiene la imagen TM/ETM+ multibanda del comienzo del periodo.
- **MODISini**, es el nombre del archivo ORC que contiene la imagen MODIS multibanda del comienzo del periodo, adquirida en la misma fecha que la anterior.
- **MODISint**, es el nombre del archivo ORC que contiene la imagen MODIS multibanda que se desea interpolar.
- **ETMfin**, es el nombre del archivo ORC que contiene la imagen TM/ETM+ multibanda del comienzo del periodo.
- **MODISfin**, es el nombre del archivo ORC que contiene la imagen MODIS multibanda del comienzo del periodo, adquirida en la misma fecha que la anterior.
- **DJETMini**, **DJMODISint** y **DJETMfin**, son las fechas de las imágenes inicial, intermedia y final, respectivamente, expresadas en forma ordinal como día del año.

- MODISinterp, es el nombre del archivo ORC en el que se guardará la imagen MODIS multibanda interpolada.

Ejemplo de ejecución:

```
interpolaSOV /home/interp/ref09ago.orc /home/interp  
/222r.orc /home/interp/238r.orc /home/interp/  
ref10septi.orc /home/interp/252r.orc 222 238 252 /  
home/interp/interp.orc
```

El resultado es la interpolación temporal de los datos MODIS adquiridos el día 25 de agosto (día 238), a partir de los datos MODIS y TM de los días 9 de agosto (día 222) y 10 de septiembre (día 252), guardando el resultado en el archivo /home/interp/interp.orc.

III.11. Aplicación import_aemet.

Este programa (Figura III.11) es el encargado de la descarga y proceso de los datos de precipitación y temperaturas, procedentes de la AEMET. El ciclo de operaciones que efectúa comprende la descarga y la generación de los polígonos Thiessen (celdas de Voronoi) para los datos de Precipitación total (24 h) y Temperatura media diaria, del conjunto de estaciones meteorológicas de las cuáles están disponibles los datos.

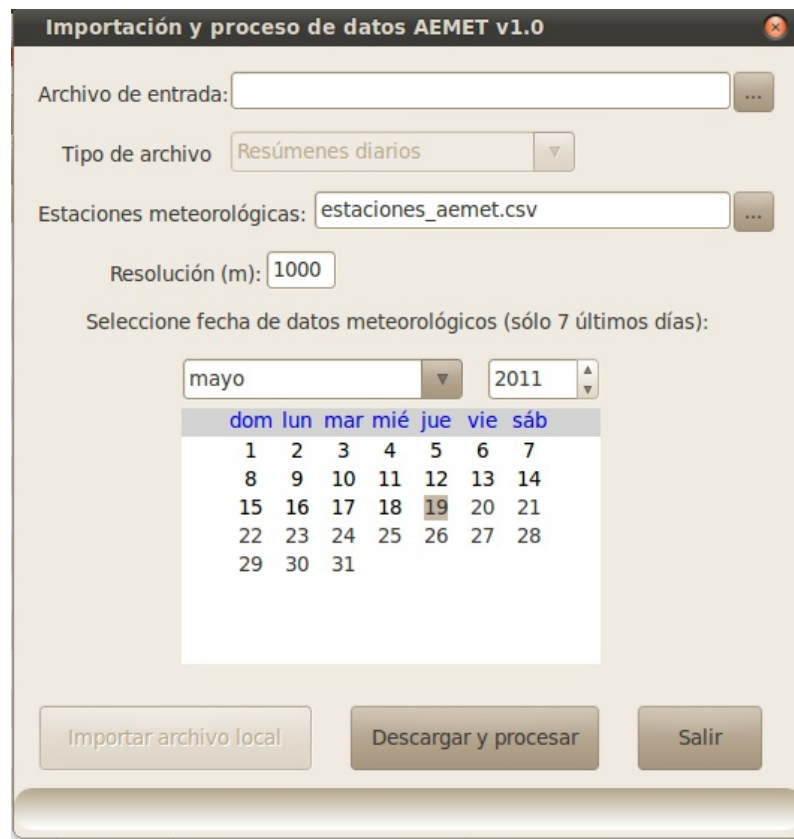


Figura III.11: Interfaz de usuario de la aplicación import_aemet.

Existen dos modos de trabajo, que se detallan a continuación.

1. Trabajo con archivos locales. Este modo se usará cuando se dispone de los archivos de datos meteorológicos distribuidos por la AEMET. Para ello, se debe ejecutar el siguiente comando:

```
import_aemet L arch_entrada arch_est_met  
arch_salida xmx xmn ymx ymn resolución(m) 0 0
```

Siendo

- a) L, indica el modo Local de trabajo. Este modo no necesita conexión a la red.
- b) **arch_entrada**, hace referencia al archivo que incluye la información meteorológica, en el formato AEMET. Generalmente, se trata de un archivo con extensión CSV.
- c) **arch_est_met**, indica el nombre del archivo en el que se listan las coordenadas de las estaciones meteorológicas de las cuáles, la AEMET proporciona información, con extensión CSV.

- d)* **arch_salida**. En este campo, debemos indicar la ruta y el comienzo del nombre de los archivos de salida, **sin extensión**.
 - e)* **xmx**, **xmn**, **ymx** y **ymn**, indican los límites de la zona de interés, en coordenadas UTM.
 - f)* **resolución**, indica la resolución de los documentos de salida, en metros.
 - g)* **0 0**, son parámetros no usados.
2. Descarga de datos desde el servidor FTP de AEMET. En este caso, la estructura del comando es la que sigue:

```
import_aemet D dia mes año
               arch_est_meteorologicas arch_salida xmx xmn ymx
               ymn resolución(m)
```

Siendo

- a)* **D**, indica el modo Descarga de trabajo. Este modo no necesita conexión a la red.
- b)* **dia**, **mes** y **año**, fecha de los datos.
- c)* **arch_est_meteorologicas**, indica el nombre del archivo en el que se listan las coordenadas de las estaciones meteorológicas de las cuáles, la AEMET proporciona información.
- d)* **arch_salida**. En este campo, debemos indicar la ruta y el comienzo del nombre de los archivos de salida, **sin extensión**.
- e)* **xmx**, **xmn**, **ymx** y **ymn**, indican los límites de la zona de interés, en coordenadas UTM.
- f)* **resolución**, indica la resolución de los documentos de salida, en metros.

Ejemplo de ejecución:

```
import_aemet D 10 05 2011 /home/estaciones_aemet.csv
               /home/meteo 1021069 -66464 4858130 3980954 2000
```

Como resultado, se obtienen dos archivos en formato ORC, uno con los polígonos Thiessen de los datos de pluviometría total (**/home/meteo_p.orc**)

y otro con los de temperatura media (`/home/meteo_t.orc`) del día 10-mayo-2011.

Anejo IV

MODELOS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE LA APLICACIÓN ARITSOV.

IV.1. Cálculo de radiancia de imágenes TM/ETM+.

```
//calculo de la radiancia ETM+
%191.60
%-6.2
4 -
%254.0
/
$1
%1.0
9 -
*
%-6.2
+
%196.50
14 %-6.4
-
%254.0
/
$2
19 %1.0
-
*
```

ANEJO IV. MODELOS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS
MEDIANTE LA APLICACIÓN ARITSOV.

24 % - 6 . 4
 +
 % 152 . 90
 % - 5 . 0
 -
 % 254 . 0
 /
 29 \$ 3
 % 1 . 0
 -
 *
 % - 5 . 0
 34 +
 % 241 . 1 0 0
 % - 5 . 1
 -
 % 254 . 0
 39 /
 \$ 4
 % 1 . 0
 -
 *
 44 % - 5 . 1
 +
 % 31 . 0 6 0
 % - 1 . 0 0
 -
 49 % 254 . 0
 /
 \$ 5
 % 1 . 0
 -
 54 *
 % - 1 . 0
 +
 % 10 . 8 0 0
 % - 0 . 3 5 0
 59 -
 % 254 . 0
 /
 \$ 6
 % 1 . 0
 64 -
 *
 % - 0 . 3 5 0
 +

IV.2. Cálculo de reflectividad de imágenes TM/ETM+.

```
//calculo de la reflectividad en imagenes TM con corr
    atm
%3.1415926535897932384626433832795
3 $1
%41.3032
-
*
%1.010025
8 *
%0.7
%1969.00
*
%0.59933864923086105280922306113691
13 #cos
*
/
%3.1415926535897932384626433832795
$2
18 %24.7539
-
*
%1.010025
*
23 %0.78
%1840.00
*
%0.59933864923086105280922306113691
#cos
28 *
/
%3.1415926535897932384626433832795
$3
%11.7846
33 -
*
%1.010025
*
%0.85
38 %1551.00
*
%0.59933864923086105280922306113691
```

ANEJO IV. MODELOS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS
MEDIANTE LA APLICACIÓN ARITSOV.

```

#cos
*
43 /
%3.1415926535897932384626433832795
$4
%5.5622
-
48 *
%1.010025
*
%0.91
%1044.00
53 *
%0.59933864923086105280922306113691
#cos
*
/
58 %3.1415926535897932384626433832795
$5
%0.3884
-
*
63 %1.010025
*
%0.95
%225.70
*
68 %0.59933864923086105280922306113691
#cos
*
/
73 %3.1415926535897932384626433832795
$6
%0.0012
-
*
%1.010025
78 *
%0.97
%82.07
*
%0.59933864923086105280922306113691
83 #cos
*
/

```

IV.3. Corrección topográfica de imágenes ETM+.

```

//correccion topografica ETM
%0.82570886112188846438067355561185
$3
%0.017453292519943295769236907684886
5 *
#cos
%0.82570886112188846438067355561185
*
$3
10 %0.017453292519943295769236907684886
*
#sin
%0.56409651360808276918897430237459
*
15 %2.419793877982644079962631251996
$4
%0.017453292519943295769236907684886
*
-
20 #cos
*
+
#dup
%0.57
25 #<<
#swap
%0.57
#>=v
+
30 /
$1
*
%0.82570886112188846438067355561185
$3
35 %0.017453292519943295769236907684886
*
#cos
%0.82570886112188846438067355561185
*
40 $3
%0.017453292519943295769236907684886

```

```

*
#sin
%0.56409651360808276918897430237459
45 *
%2.419793877982644079962631251996
$4
%0.017453292519943295769236907684886
*
50 -
#cos
*
+
#dup
55 %0.57
#<<
#swap
%0.57
#>=v
60 +
/
$2
*

```

IV.4. Interpolación lineal de imágenes MODIS.

```

//interpolacion espacio-temporal de datos MODIS
2 $7
$8
-
$1
$2
7 -
-
%80.0
/
%40.0
12 *
$1
$2
-
+
17 $5
+

```


\$9
\$10
-
22 \$3
\$4
-
-
%80.0
27 /
%40.0
*
\$3
\$4
32 -
+
\$6
+

Anejo V

CÓDIGO FUENTE DE APLICACIONES COMPLEMENTARIAS.

V.1. Programa remuestreo.cpp.

```
//Remuestreo.cpp: Remuestrea una escena ETM+ para  
adaptar su resolución a la de MODIS  
//  
#include <cstdlib>  
#include <iostream>  
5 #include <iomanip>  
#include <fstream>  
#include <sstream> // Necesaria para stringstream  
#include <string.h>  
#include <stdio.h>  
10 #include <math.h>  
#include <cmath>  
#include <vector>  
#include <algorithm>  
#include <cstdio>  
15 #include <list>  
#include <ctime>  
using namespace std;  
#define string wxString  
#define max(arg1,arg2) arg1>arg2?arg1:arg2;  
20 #define min(arg1,arg2) arg1<arg2?arg1:arg2;  
string IntToString (int valor){ //conversion de int a  
string  
std::ostringstream oss;  
oss<< valor;  
return oss.str();
```

```
25 }
    template < typename T > T **Allocate2DArray( int
        nRows, int nCols){
        T **ppi;
        T *pool;
        T *curPtr;
30     ppi = new T*[nRows];
        pool = new T [nRows * nCols];
        curPtr = pool;
        for( int i = 0; i < nRows; i++){
            *(ppi + i) = curPtr;
35         curPtr += nCols;
        }
        return ppi;
    }
    template < typename T > void Free2DArray(T** Array){
40     delete [] *Array;
        delete [] Array;
    }
    inline float Mediana(float *vec,int n,int tama){
        float mediana=0;int pos=0;
45     float *vectmp;
        vectmp=new float[tama];
        for(int i=0;i<n;i++) if(vec[i]!=0.0){ vectmp[pos]=
            vec[i];pos++;}
        sort(vectmp,vectmp+tama);
        int m=tama/2;
50     if(tama%2==0)
            mediana=(vectmp[m-1]+vectmp[m])/2;
        else
            mediana=vectmp[m];
        delete [] vectmp;
55     return (mediana);
    }
    inline float Media(float *vec,int n){
        float media=0;int tama=0;
        for(int i=0;i<n;i++){ media+=vec[i]; vec[i]!=0?
            tama++:vec[i];}
60     media/=(float)tama;
        return (media);
    }
    inline float Varianza(float *vec,int n) {
        float media=0;int tama=0.0;
65     float suma=0;
        for(int i=0;i<n;i++){ media+=vec[i];suma+=vec[i]*
            vec[i];vec[i]!=0.0?tama++:vec[i];}
```

```
        media/=(float)tama;
        float varianza=sqrt((suma/tama)-(media*media)); //
            para la desv tipica
        return (varianza);
70 }
    inline float Entropia(float *vector,int n,int tama,
        float vmax,float vmin) {
        float *vec;
        vec=new float[tama];
        int pos=0;
75 for(int i=0;i<n;i++) if(vector[i]!=0.0){ vec[pos]=
            vector[i];pos++;}
        double entropia=0;
        int i;
        int nint=256; //numero de intervalos del
            histograma
        int *hist;
80 hist=new int[nint];
        double *prob;
        prob=new double[nint];
        int ni; //numero de intervalo en el que está un
            valor
        for(i=0;i<nint;i++) hist[i]=0;
85 for(i=0;i<tama;i++){ //calculo del histograma
            ni=(int)floor(((double)vec[i]-vmin)/(double)(
                vmax-vmin)*(double)nint);
            ni>=nint?ni--:ni;
            hist[ni]++;
        }
90 for(i=0;i<nint;i++) prob[i]=(double)hist[i]/(
            double)tama; //probabilidad
        for(i=0;i<nint;i++){
            prob[i]!=0.0?entropia-=prob[i]*log(prob[i]):
                entropia;
        }
        entropia/=log(2.0);
95 delete []hist;
        delete []prob;
        return ((float)entropia);
    }
    //
    ////////////////////////////////////////

100 //
    // FUNCION remuestrea
    //
```



```
        for(j=0;j<c;j++){ //columnas, c
            df=i*8+contf;
            dc=j*8+contc;
145            hf=i*8+((i%3)+corr[(i%3)])-1+contf;
            hc=j*8+((j%3)+corr[(j%3)])-1+contc;
            tamf=(i%3)+corr[(i%3)];
            tamc=(j%3)+corr[(j%3)];
150            vec=new float[tamf*tamc];
            tama=tamf*tamc;
            for(int ii=df;ii<df+tamf;ii++){
                for(int jj=dc;jj<dc+tamc;jj++){
                    if(ii>=F||jj>=C) {
155                        vec[(ii-df)*tamc+(jj-dc)]=0.0; tama
                            --;
                    } else {
                        vec[(ii-df)*tamc+(jj-dc)]=ETM[ii][
                            jj];
                    }
                }
160            }
            mediana=Mediana(vec,tamf*tamc,tama);
            MEDIANA[i][j]=mediana;
            media=Media(vec,tamf*tamc);
            MEDIA[i][j]=media;
165            varianza=Varianza(vec,tamf*tamc);
            VARIANZA[i][j]=varianza;
            entropia=Entropia(vec,tamf*tamc,tama,vmax,
                vmin);
            ENTROPIA[i][j]=entropia;
            (j%3)+corr[(j%3)]==9?contc++:contc;
170            delete [] vec;
        }
        (i%3)+corr[(i%3)]==9?contf++:contf;
        contc=0;
    }
175    contf=0;
    //escritura de resultados
    ofstream fout;
    fstream raw;
    fout.open("remetm"+nban+".orc",ios::out);
180    fout<<"Version:_1.0"<<endl<<"Datos_Imagen:_ "<<
        endl
        <<"Descripcion:_ Media,_ mediana,_ varianza"<<
            endl<<"Fecha_Img:_ "<<endl
        <<"Sensor:_ SNDEF"<<endl<<"Tipo_Datos:_ REAL"<<
            endl
```

```

        <<"Columnas_:_:"<<c
        <<endl<<"Filas_:_:"<<f<<endl<<"Nbandas_:_:"<<4<<
        endl;
185 fcout<<"Banda1"<<"_:_:"<<("medetm"+nban).c_str()<<
        endl;
fcout<<"Banda2"<<"_:_:"<<("medinetm"+nban).c_str()<<
        endl;
fcout<<"Banda3"<<"_:_:"<<("varetm"+nban).c_str()<<
        endl;
fcout<<"Banda4"<<"_:_:"<<("entetm"+nban).c_str()<<
        endl;
nraw="medetm"+nban+".raw";
190 raw.open(nraw,ios::out|ios::binary);
for(i=0;i<f;i++)
    for(j=0;j<c;j++)
        raw.write((char*)&MEDIA[i][j],1*sizeof(float
            ));
raw.close();
195 nraw="medinetm"+nban+".raw";
raw.open(nraw,ios::out|ios::binary);
for(i=0;i<f;i++)
    for(j=0;j<c;j++)
        raw.write((char*)&MEDIANA[i][j],1*sizeof(
            float));
200 raw.close();
nraw="varetm"+nban+".raw";
raw.open(nraw,ios::out|ios::binary);
for(i=0;i<f;i++)
    for(j=0;j<c;j++)
205 raw.write((char*)&VARIANZA[i][j],1*sizeof(
        float));
raw.close();
nraw="entetm"+nban+".raw";
raw.open(nraw,ios::out|ios::binary);
for(i=0;i<f;i++)
210 for(j=0;j<c;j++)
        raw.write((char*)&ENTROPIA[i][j],1*sizeof(
            float));
raw.close();
fcout<<"Sis_Ref._:_:RNDDEF"<<endl<<"Tipo_Coord._:_:
PLANAS"<<endl
    <<"Unidad_:_:METRO"<<endl<<"Min.X_:_:"<<
        setprecision(10)<<360895.000<<endl
215 <<"Max.X_:_:"<<495615.000<<endl<<"Min.Y_:_:"
        <<4395498.000<<endl
        <<"Max.Y_:_:"<<4538197.000<<endl;

```



```
    fout.close();
    Free2DArray(VARIANZA);
    Free2DArray(MEDIA);
220   Free2DArray(MEDIANA);
    Free2DArray(ENTROPIA);
    Free2DArray(ETM);
    return(0);
}
```