

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA**

**DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN Y PROSPECCIÓN DE MINAS
ÁREA DE INGENIERÍA CARTOGRÁFICA, GEODÉSICA Y FOTOGRAMETRÍA**

TRABAJO FIN DE GRADO

INVESTIGACIÓN APLICADA

**ESTUDIO DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE LAS
ESCOMBRERAS DE ASTURIAS**

AUTOR: JAVIER VIÑUELA ÁLVAREZ

DIRECTORAS: M^a DEL ROSARIO GONZÁLEZ MORADAS

M^a DEL CARMEN RECONDO GONZÁLEZ

JUNIO 2015

*A mi familia y amigos, cuyo apoyo ha sido directamente
proporcional a la dificultad de la situación.*

Al INDUROT por la cesión gratuita de imágenes de satélite.

*A mis tutoras, por la ayuda prestada y la atención
puesta en el trabajo.*

*«Cada día, al llegar la hora, anochece. Pero el mundo ya no es el
mismo que el día anterior. Tú, no eres el mismo que ayer.»*

Murakami, Haruki. Kafka en la Orilla, 2002.

*<<No son los caminos que emprendemos, es lo que llevamos en el
interior lo que hace que nos convirtamos en lo que somos.>>*

O. Henry.



ÍNDICE GENERAL

1. ANTECEDENTES	12
2. OBJETIVOS Y LOCALIZACIÓN	15
2.1. OBJETIVOS	16
2.2. LOCALIZACIÓN	18
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	20
3.1. LA TELEDETECCIÓN	21
3.1.1. INTRODUCCIÓN	21
3.1.2. SATÉLITES EMPLEADOS: LANDSAT	27
3.1.3. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA.....	31
3.1.4. CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA.....	35
3.1.5. CONVERSIÓN A PARÁMETROS FÍSICOS	40
3.2. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	45
3.2.1. INTRODUCCIÓN	45
3.2.2. TIPOS DE ARCHIVO	48
4. METODOLOGÍA	52
4.1. TELEDETECCIÓN.....	53
4.1.1. OBTENCIÓN DE LAS IMÁGENES	54
4.1.2. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA.....	58
4.1.3. CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA.....	64
4.1.4. CONVERSIÓN A RADIANCIA	83
4.1.5. CONVERSIÓN A REFLECTIVIDAD	91
4.1.6. CÁLCULO DEL NDVI.....	94
4.2. ESTUDIO MEDIANTE SIG.....	96
4.2.1. IMPLEMENTACIÓN Y FLUJO DE TRABAJO	96
4.2.2. ESTUDIO DE ESCOMBRERAS POR TIPO	99
4.2.3. ESTUDIO POR NÚCLEO DE ACUMULACIÓN	107
4.2.4. INSERCIÓN DE LOS RESULTADOS AL SHAPEFILE.....	111
4.2.5. ESTUDIO TEMPORAL.....	114
4.2.6. OTROS ESTUDIOS	117
5. RESULTADOS	122



5.1. RESULTADOS TELEDETECCIÓN.....	123
5.1.1. PRODUCTOS INTERMEDIOS.....	123
5.1.2. PRODUCTO FINAL: NDVI.....	125
5.2. RESULTADOS ESTUDIO SIG.....	126
5.2.1. NDVI DE LAS ESCOMBRERAS.....	126
5.2.2. DIFERENCIAS DE NDVI CON EL ENTORNO.....	129
5.2.3. ESTUDIO DE LA SUPERFICIE VEGETADA.....	131
5.2.4. OTROS ESTUDIOS EN LAS ESCOMBRERAS.....	134
5.2.5. RESULTADOS DEL ESTUDIO TEMPORAL.....	136
5.2.6. ARCHIVOS OBTENIDOS.....	138
6. CONCLUSIONES.....	140
7. BIBLIOGRAFÍA.....	146
ANEXOS.....	151
I: PARÁMETROS DE LAS IMÁGENES.....	152
II: ESTADÍSTICAS DE LAS ZONAS DE AGUA.....	160
III: ESTUDIO INDIVIDUAL DE LAS ESCOMBRERAS.....	163
IV: PLANOS.....	183



ÍNDICE DE FIGURAS

1. Zona de estudio de las escombreras	17
2. Localización de Asturias	18
3. División del Principado de Asturias por comarcas	18
4. Ejemplo de distribución de datos en imágenes de satélite	22
5. Espectro de la luz desglosado	23
6. Firmas espectrales de distintos elementos	24
7. Ilustración de satélite de la serie Landsat	27
8. Historia de la serie Landsat a lo largo del tiempo	28
9. Ilustración del satélite Landsat 5	28
10. Imagen del satélite Landsat 7	30
11. Transmisión atmosférica según su longitud de onda	31
12. Gráfica de la dispersión Rayleigh	33
13. Generación de la sombra sólida	35
14. Representación gráfica del vector gradiente topográfico	36
15. Representación gráfica del vector solar	37
16. Representación gráfica del ángulo de incidencia	38
17. Representación gráfica del ángulo de observación	39
18. Representación gráfica de la recta de conversión a radiancia	42
19. Representación gráfica del NDVI	43
20. Esquema del SIG desde punto de vista funcional	46
21. Tipos de relaciones espaciales	48
22. Esquemas de tipos de archivos	49
23. Ejemplo de archivo raster	49
24. Distribución de datos en un archivo raster	50
25. Ejemplo de un archivo vectorial	51
26. Tipos de archivos vectoriales, representación gráfica	51
27. Esquema del procedimiento en Teledetección en el actual trabajo	53
28. Ejemplo de imagen distribuida por USGS	56
29. Imagen con polígonos de agua	59
30. Imagen con polígonos de agua eliminados al haber nubes	60



31. Algoritmo de la imagen de 1990 en ER Mapper	61
32. Fórmula de la corrección atmosférica en ER Mapper para 1990.....	61
33. Imagen de 1990 antes y después de la corrección atmosférica.....	62
34. Esquema de dos métodos de corrección topográfica	64
35. Modelo Digital de Elevaciones de Asturias	65
36. Filtro p_x	65
37. Filtro p_y	65
38. Fórmula en ER Mapper para el cálculo del coseno de e	66
39. Modelo representando el coseno del ángulo e	67
40. Distribución de capas algoritmo coseno de i	67
41. Fórmula en ER Mapper para el cálculo del coseno de i y aislamiento de valores positivos	68
42. Modelo representando el coseno del ángulo i	68
43. Modelo representando y_1 (ejemplo)	69
44. Modelo representando y_1 y la zona k	70
45. Modelo representando y_1 y la zona k esquivando las nubes.....	71
46. Estadísticas de k para 1990 en ER Mapper.....	71
47. Disposición de las bandas en el algoritmo τ	72
48. Fórmula en ER Mapper para la obtención de τ	72
49. Modelo de τ	73
50. Disposición de las bandas en el algoritmo de la corrección topográfica manual .	73
51. Fórmula en ER Mapper de la corrección topográfica manual	74
52. Imagen corregida de topografía manualmente.....	74
53. Algoritmo en ER Mapper para la obtención de las y y más la x (A y B en él).....	76
54. Fórmula en ER Mapper para la obtención de la y	77
55. Fórmula en ER Mapper para la obtención de la x	77
56. Modelo de y_1 (mediante algoritmos) con zona k	79
57. Algoritmo en ER Mapper para la obtención de la imagen corregida de topografía por algoritmos	80
58. Fórmula en ER Mapper para la obtención de la imagen corregida de topografía por algoritmos	81
59. Variables de ER Mapper para la corrección topográfica	81



60. Imagen corregida de topografía mediante algoritmos.....	82
61. Esquema elaborado para la conversión a radiancia.....	84
62. <i>Data manager</i> de ENVI.....	85
63. Herramienta de exportación de datos de ENVI.....	86
64. Herramienta de guardado de ENVI.....	86
65. Gain y offset de la cabecera de la imagen.....	87
66. Archivo ASCII con los datos de <i>Gain</i> y <i>offset</i>	87
67. Resultado de insertar el ASCII <i>Gain</i> y <i>offset</i> en la cabecera.....	88
68. Comando <i>Gain and Offset Values</i> con los valores introducidos.....	89
69. Comprobación de la conversión a radiancia en un píxel aleatorio.....	90
70. Comprobación de la conversión a reflectividad en un píxel aleatorio.....	93
71. Comando NDVI de ENVI.....	94
72. Modelo de NDVI para 1985.....	94
73. Esquema del flujo de trabajo de este proyecto.....	96
74. NDVI de Asturias en ArcGIS.....	98
75. Diferencias entre ED50 y WGS84.....	98
76. Mapa de las escombreras diferenciadas por tipos.....	99
77. Escombrera 01 sobre NDVI de 1985.....	100
78. Escombrera 01 sobre NDVI recortado de 1985.....	101
79. Histograma que compara frecuencia (y) con valor (x) del NDVI en 1989.....	102
80. Gráfico que compara valor (y) con año (x) del NDVI medio de las escombreras de carbón.....	102
81. Escombreras por tipo junto a sus zonas de influencia a 500 m.....	103
82. Gráfico que compara valor (y) con año (x) del NDVI medio de la zona circundante en 500 m a las escombreras de carbón.....	104
83. Gráfico que compara porcentaje (y) con año (x) de la superficie vegetada de las escombreras de carbón.....	105
84. Visualización de parte de los núcleos de acumulación del estudio.....	108
85. NDVI recortado para el núcleo de acumulación 01 en 1989.....	109
86. Histograma del núcleo de acumulación 01 para 1985.....	109
87. Superficie vegetada para el núcleo de acumulación 01 en 1989.....	110
88. Gráfico de superficie vegetada para el núcleo de acumulación 01.....	110



89. Malla de puntos sobre el núcleo de acumulación 01	111
90. Mapa temático de NDVI medio en las escombreras	113
91. Modelo de edad de la vegetación en el núcleo de acumulación 01	115
92. Modelo de evolución de la vegetación en el núcleo de acumulación 01	116
93. Escombreras sobre MDE de Asturias	117
94. Escombreras sobre modelo de pendientes de Asturias	118
95. Escombreras sobre modelo de orientaciones de Asturias	119
96. Leyenda del mapa de litología	120
97. Escombreras sobre mapa de litología.....	121
98. Escombreras sobre mapa de vegetación.....	121
99. Imagen ejemplo corregida de atmósfera. Año 2007	123
100. Imagen ejemplo corregida de topografía. Año 2007.....	124
101. Imagen ejemplo convertida a radiancia. Año 2007.....	124
102. Imagen ejemplo convertida a reflectividad. Año 2007	125
103. Modelo ejemplo de NDVI. Año 1989.....	125
104. Gráfica de la evolución temporal del NDVI para cada tipo de escombrera.....	127
105. Gráfica de la evolución temporal del NDVI para el núc. de acumulación 01 ...	128
106. Comparación gráfica de la evolución temporal del NDVI para escombreras de carbón y su zona circundante	129
107. Comparación gráfica de la evolución temporal del NDVI para otros depósitos antrópicos y su zona circundante	130
108. Comparación gráfica de la evolución temporal del NDVI para escombreras de hierro y su zona circundante	130
109. Gráfica de la evolución temporal del NDVI para cada tipo de escombrera.....	131
110. Gráfica de la evolución temporal del NDVI para núcleo de acumulación 01 ...	132
111. Histograma de frecuencia del estudio temporal de la superficie vegetada para todas las escombreras.....	136
112. Histograma de frecuencia del estudio de evolución de la superficie vegetada para todas las escombreras	137
113. Tendencia de los tipos de escombrera.....	143



ÍNDICE DE TABLAS

1. Características Landsat 4-5	29
2. Características Landsat 7 ETM+	30
3. Radiancia del agua según Bukata et al	35
4. Imágenes disponibles para el estudio	54
5. Estado de las imágenes disponibles.....	55
6. Información general de las imágenes obtenidas en PNT-ESA y USGS-Glovis	57
7. Parámetros de Bukata para el agua en ND para distintos sensores y épocas	58
8. Archivos vectoriales elaborados para el agua en la corrección atmosférica	60
9. Ejemplo de estadísticas del agua para agosto de 1990	60
10. Ejemplo de estadísticas del agua antes y después de la corrección atmosférica para agosto de 1990	62
11. ND medio del agua en la imagen corregida frente al esperado teóricamente	63
12. ND medio del agua en la imagen corregida para diversos años.....	63
13. Extensión y resolución del MDE.....	65
14. Modelos de pendientes en x e y.....	66
15. Disposición de las capas algoritmo del coseno de i	67
16. Disposición de las capas archivo con coseno de e y coseno de i	68
17. Algoritmos del cálculo de y y x	69
18. Disposición de las capas archivo con todas las y y x	70
19. Estadísticas de k necesarias para el cálculo de sus parámetros	71
20. Variables utilizadas en el cálculo de τ	72
21. Disposición de las capas para la corrección topográfica manual	73
22. Disposición de las capas para archivo que combine las bandas con el MDE	75
23. Extensión de los archivos involucrados en la creación de los archivos con bandas + MDE	76
24. Ángulos solares de todas las imágenes.....	78
25. Extensiones de los archivos involucrados en la creación de los archivos y y x	79
26. Parámetros k para todas las imágenes a corregir de topografía.....	80
27. Extensiones de los archivos involucrados en la corrección por topografía de la imagen	82



28. Estadísticas ejemplo corrección topográfica manual	83
29. Estadísticas ejemplo corrección topográfica mediante algoritmos	83
30. <i>Gain</i> y <i>offset</i> para las imágenes del GLOVIS	88
31. <i>Gain</i> y <i>offset</i> para las imágenes del PNT	88
32. Comprobación de todas las bandas para 1985.....	90
33. Parámetros solares necesarios para conversión a reflectividad.....	91
34. Constantes por las que multiplicar las imágenes de radiancia para obtener reflectividad	92
35. Ejemplo de aplicación del comando <i>Gain and Offset Values</i> para la conversión a reflectividad	93
36. Distribución del espacio de trabajo en ArcGIS	97
37. Número de polígonos y núcleos de acumulación por tipo de escombrera	99
38. Archivos procedentes del NDVI recortado por tipo de escombrera.....	101
39. Ejemplo de 1989 del NDVI medio del interior y exterior de las escombreras.....	104
40. Tabla ejemplo de celdas y porcentaje de superficie vegetada para 1989	106
41. Número, tipo y forma de los núcleos de acumulación	107
42. Archivos procedentes del NDVI recortado por núcleo de acumulación	109
43. Tabla ejemplo de celdas y porcentaje de superficie vegetada para 1989 en el núcleo 01	110
44. Distribución de los nuevos atributos y valores en la malla de puntos.....	112
45. División de los 22 años a estudiar en cuatro partes.....	112
46. Distribución de los nuevos valores y atributos (NDVI) en los polígonos.....	113
47. Distribución de los nuevos valores y atributos (%Veg) en los polígonos.....	113
48. Leyenda que relaciona valores y descripción en el estudio temporal	114
49. Leyenda que relaciona valores y descripción en el estudio de la evolución	116
50. Archivos generados a partir del MDE para cada núcleo de acumulación.....	118
51. Archivos generados a partir del modelo de pendientes para cada núcleo de acumulación.....	119
52. Imágenes intermedias obtenidas en el estudio.....	125
53. NDVI medios para todos los años por tipo de escombrera	126
54. NDVI medios para todos los años por núcleo de acumulación (1-10).....	127
55. NDVI medios para todos los años por núcleo de acumulación (11-19).....	128



56. NDVI medios de la superficie circundante a las escombreras para todos los años por tipo de escombrera	129
57. Diferencia de NDVI medio entre interior y exterior de la escombrera por año y tipo.....	130
58. Porcentaje de superficie vegetada por tipo de escombrera y año	131
59. Porcentajes medios de superficie vegetada para todos los años por núcleo de acumulación (01-10).....	132
60. Porcentajes medios de superficie vegetada para todos los años por núcleo de acumulación (11-19).....	133
61. Recopilación de la información física de las escombreras.....	134
62. Recopilación de la vegetación predominante en la zona de las escombreras.....	135
63. Recopilación de la litología predominante en la zona de las escombreras.....	135
64. Archivos creados en el estudio mediante SIG	138
65. Atributos para las escombreras creados en el estudio mediante SIG	139
66. Atributos para la malla de puntos creados en el estudio mediante SIG	139



ÍNDICE DE ECUACIONES

1. Vector gradiente topográfico	37
2. Vector solar	37
3. Ángulo de incidencia	38
4. Coseno de i	38
5. Ángulo de observación	38
6. Coseno de e	39
7. Modelo de Minnaert	39
8. Modelo de Minnaert linealizado	40
9. Parámetro τ	40
10. Parámetro τ (2)	40
11. Fórmula de la radiancia por pendiente y ordenada en el origen	41
12. Fórmula de la radiancia por <i>gain</i> y <i>bias</i>	41
13. Fórmula de <i>gain</i>	41
14. Fórmula de <i>bias</i>	41
15. Conversión a reflectividad	42
16. Fórmula del NDVI	43
17. Corrección atmosférica por los parámetros de Bukata	59
18. Fórmula de y (corrección topográfica)	69
19. Fórmula de x (corrección topográfica)	69
20. Parámetros k de la corrección topográfica	71
21. Corrección topográfica	73
22. Conversión a reflectividad a partir de radiancia	90
23. Conversión a reflectividad mediante <i>gain</i> y <i>offset</i>	92
24. Expresión de NDVI para zona no vegetada	105



MEMORIA



1. ANTECEDENTES



1.1: ANTECEDENTES

Desde hace años, se han ido reforestando antiguas escombreras de minas a cielo abierto. Es muy complicado seguir año a año de manera fiable la evolución de la vegetación de todas ellas. Además, se conoce la existencia de escombreras sin identificar. Estos dos problemas llevan años siendo objeto de estudio.

Desde la misma Universidad de Oviedo se han estudiado las imágenes de los satélites Landsat del Principado de Asturias, principalmente para estudiar los incendios, tanto los habidos (históricos) como potenciales (modelos de riesgos de incendios) (Recondo, 2002; 2007; Chuvieco, 2014; Sánchez, 2013; etc.). Sin embargo, nunca se habían obtenido estudios del índice de vegetación NDVI de cara al estudio de una zona como las escombreras distribuidas por el Principado.

Del mismo modo, en los anteriores estudios se trabajó con diferente software para realizar los distintos procesos en el tratamiento digital de las imágenes y se estableció la metodología a utilizar usando cada uno de ellos. Sin embargo, en la Universidad no se había utilizado el ENVI para la conversión de la imagen a parámetros físicos. Por ello, un estudio de este software para esta tarea era necesario.

Por otra parte, con anterioridad se habían estudiado las escombreras de Asturias, aunque desde un punto de vista de la geología o enfocándose en la identificación de las mismas mediante métodos complejos que involucraban trabajo de campo (García, Moradas, 2013), sin centrarse en su capacidad de reforestación ni en su índice de vegetación.

Con motivo de la gran cantidad de datos y cálculos que habría que hacer para tener en cuenta todos los factores realizados y archivos generados, se ha optado por efectuar el actual análisis con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG).



Se han utilizado los SIG para realizar estudios de la vegetación en distintas zonas, demostrando así la efectividad de utilizar dichas técnicas para la consecución de unos resultados detallados de toda la información y todos los cálculos necesarios para obtener unas conclusiones lógicas al estudio.

Así, el trabajo ha combinado técnicas de Teledetección y SIG para realizar un estudio de la vegetación en las escombreras de Asturias de un modo que no se había realizado antes, replicando y actualizando metodologías de trabajos anteriores, combinándolas y realizando operaciones por primera vez para obtener así una tendencia a analizar en la vegetación.



2. OBJETIVOS Y LOCALIZACIÓN



2.1: OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo ha sido la observación del índice de vegetación de las escombreras de Asturias (Figura 01) para la obtención de unas conclusiones que permitan analizar su comportamiento de forma lógica.

Los objetivos particulares del estudio han sido:

- Estudiar el NDVI de las escombreras para descubrir si hay una tendencia clara y de pendiente positiva respecto a la revegetación, al ser lógico desde el punto de vista teórico que los suelos van a ir recuperándose y la vegetación extendiéndose.
- Conseguir diferenciar líneas de tendencia para cada tipo de escombrera, de modo que el NDVI para cada año siga una norma distinta para cada uno de modo que se pueda reconocer el tipo de cada una de ellas sin conocerlo previamente
- El estudio de la zona circundante a las escombreras de cara a saber si existe alguna diferencia entre ellos y sus tendencias, así como para encontrar un modo de identificar escombreras desconocidas o sin ubicar basándose en dicha diferencia de índice de vegetación.
- Realizar un estudio exhaustivo de la superficie vegetada por cada escombrera a los largo de los diferentes años, de cara a conocer la edad de la vegetación, la evolución de la misma y saber si ha habido movimiento o zonas que han perdido su vegetación.
- Encontrar las causas por las que el NDVI varía para escombreras del mismo tipo atendiendo a otros parámetros como elevación, vegetación predominante, etc.
- Evaluar el grado de impacto que producen las escombreras en el entorno del Principado de Asturias, suministrando fichas resumen de cada escombrera en la zona de estudio (Anexo III).



Debido al carácter del estudio y a la amplitud de terreno a abarcar, así como la gran cantidad de datos a procesar, se ha optado por la utilización de información proporcionada por satélites. De forma simultánea se presentan objetivos particulares para el estudio mediante Teledetección:

- Obtención de imágenes del Principado de Asturias corregidas en el periodo estudiado (1985-2011) de atmósfera y topografía.
- Obtener las imágenes en parámetros físicos (radiancia y reflectividad) mediante el uso de los parámetros de conversión más actuales y precisos.
- Obtener, del mismo modo, imágenes del índice de vegetación NDVI de todo el Principado de Asturias para cada año.
- Realizar un estudio de software, desarrollar guías prácticas y encontrar la manera más eficiente de realizar correctamente las correcciones, valiéndose de programación en ASCII y utilización de algoritmos.

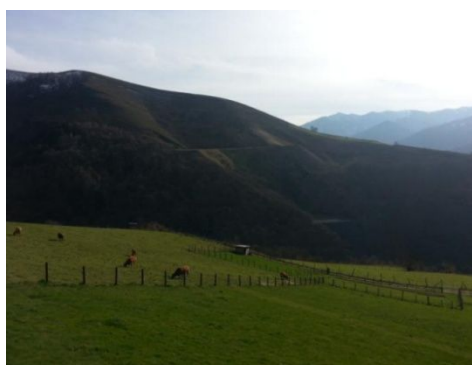


Figura 01: Zona de estudio de las escombreras. Fuente: García, 2013.

Por el mismo motivo que el que ha llevado al uso de la Teledetección en el estudio, los cálculos y operaciones realizados sobre los datos obtenidos mediante satélite se han solventado mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica.



2.2: LOCALIZACIÓN

El estudio ha abarcado toda el área del Principado de Asturias, comunidad autónoma española situada al noroeste de la península ibérica (Figura 02).



Figura 02: Localización de Asturias.

El Principado de Asturias está dividido en 78 concejos y 8 comarcas (Figura 03). Las escombreras que se han estudiado se encuentran repartidas por Quirós, Teverga, Lena, Somiedo y Proaza.



Figura 03: División del Principado de Asturias por comarcas.

Aunque el estudio posee una alta replicabilidad y podría utilizarse para cualquier escombrera (así como identificar escombreras nuevas), ha habido 41 polígonos de escombreras en las que se disponía de una información mayor y más precisa. Éstas han sido utilizadas, así pues, para un estudio detallado.



Los 41 polígonos que representan las escombreras se dividen en tres tipos:

- **Escombreras de Carbón:** De mayor superficie, conforman el estudio para este tipo 30 polígonos de escombrera agrupados en 12 núcleos de acumulación repartidos por Lena, Quirós y Teverga.
- **Escombreras de Hierro:** Las de menor superficie. Formado por 4 polígonos de escombrera agrupados en 2 núcleos de acumulación situados en Quirós.
- **Otros Depósitos Antrópicos:** 7 polígonos de escombrera agrupados en 5 núcleos de acumulación situados en Proaza, Quirós, Somiedo y Teverga.



3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS



3.1. LA TELEDETECCIÓN

3.1.1. INTRODUCCIÓN

Atendiendo a la descripción genérica de la teledetección o detección remota (*remote sensing* en inglés), se entiende que es la adquisición de información a pequeña o gran escala de un objeto o fenómeno, ya sea usando instrumentos de grabación o instrumentos de escaneo en tiempo real inalámbricos o que no están en contacto directo con el objeto. (Campbell, 2002).

En el caso de la teledetección espacial aplicada a la observación de la superficie terrestre, dicha adquisición se produce a través de sensores espaciales, transportados a bordo de satélites que tienen un recorrido fijo sobre la tierra, y cuyas altitudes varían entre los 400 y 900 km. A medida que el satélite va circundando la tierra, los sensores registran la energía que los elementos de la superficie terrestre reflejan tras haber interactuado con una fuente de energía (el Sol en el caso de la Teledetección óptica o el propio sensor en el caso de los radares) o emiten como cuerpos calientes que son.

3.1.1.1. Elementos característicos.

En el proceso de interacción energética se ven involucrados:

1. La fuente de energía: Es el origen del flujo energético detectado por el sensor y emitido o reflejado por el objeto. En la teledetección pasiva (la fuente de energía es el Sol), se mide la luz solar reflejada o la energía emitida por la superficie terrestre. También existe la teledetección activa, en la cual es la propia plataforma la que emite la energía.
2. El objeto observado: la cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas. También lo es la atmósfera.
3. El sistema sensor: consta del sensor propiamente dicho y de la plataforma que lo sustenta. El sensor es el dispositivo que detecta la energía procedente del objeto. La plataforma el soporte donde ésta se transforma en señales codificadas transmisibles al sistema de recepción terrestre (Recondo, 2015).



3.1.1.2. La interacción energética.

Algunos satélites de observación de la Tierra poseen sensores calibrados para codificar la cantidad de energía que es reflejada o emitida por unidad de superficie en un rango de valores de números enteros (comúnmente entre 0 y 255) para, posteriormente, traducirlos en Niveles Digitales (ND) en una imagen digital (Figura 04).

Cada píxel (unidad mínima de muestra de la superficie) tiene asignado un valor de radiancia espectral (definido en la Sección 3.1.1.5) o ND de acuerdo al elemento o elementos presentes dentro del mismo. En cada pasada se obtienen imágenes de un mismo sitio en diferentes segmentos del espectro, denominadas “bandas espectrales”, donde la tonalidad clara es directamente proporcional al valor del ND.

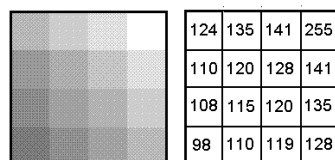


Figura 04: Ejemplo de distribución de datos en imágenes satélite. Fuente: foro soonet.ca

Una vez los sensores espaciales hayan finalizado el proceso de recogida de información, ésta debe ser procesada y dispuesta en formatos legibles.

3.1.1.3. El espectro electromagnético y la firma espectral.

Uno de los principios de la teledetección está basado en el tipo de interacción que la energía electromagnética puede tener con los elementos: absorción, transmisión y reflexión. Dependiendo de las propiedades químicas, físicas y biológicas de cada elemento y de la longitud de onda de la energía electromagnética que recibe, varía la proporción de energía que es reflejada (denominada firma espectral) y posteriormente captada por el sensor.

Se entiende como espectro electromagnético el conjunto de ondas electromagnéticas o radiación electromagnética que emite o absorbe una sustancia. Así, cada sustancia poseerá un espectro de emisión y uno de absorción. La utilización de uno u otro varía en función de las características a estudiar.



Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, empleadas más frecuentemente con la tecnología actual (Figura 05).

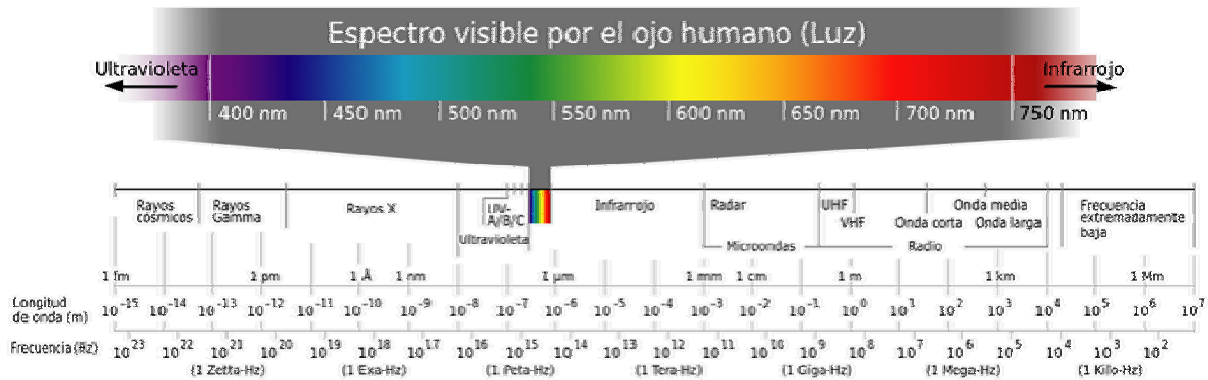


Figura 05: Espectro de la luz desglosado.

- **Espectro visible** (de 0.4 a 0.7 μm): es el intervalo perceptible por el ojo humano y que es coincidente con las longitudes de onda donde tiene su máximo la radiación solar.
 - Azul (de 0,4 μm - 0,5 μm),
 - Verde (de 0,5 μm - 0,6 μm)
 - Rojo (0,6 μm - 0,7 μm),
- **Infrarrojo próximo** (Near Infrared, NIR, 0,7 μm - 1,3 μm), de gran utilidad para el estudio de masas vegetales y concentraciones de humedad.
- **Infrarrojo medio de onda corta** (Short Wavelength Infrared, SWIR, 1,3 μm - 2,5 μm): Estudio de la humedad en la vegetación.
- **Infrarrojo medio** (Mean Infrared, MIR, 2,5 μm - 8 μm): Detección de altas temperaturas.
- **Infrarrojo lejano o térmico** (Thermal Infrared, TIR, 8 μm - 14 μm): De gran utilidad para detectar el calor que emiten las cubiertas terrestres o sus cambios de temperatura.
- **Microondas** (1 mm - 100 cm): Normalmente empleado en sensores activos. Bastante transparente a la atmósfera (Recondo, 2015).



De cara a la identificación de objetos en la superficie terrestre, el parámetro a estudiar es la reflectividad (porcentaje de superficie reflejada frente a la incidente) de los mismos en las diferentes longitudes de onda. Cada tipo de material (vegetación, suelo, agua, etc.) refleja la radiación incidente de diferente modo, lo que le permite así ser distinguido de los demás. La representación gráfica de la reflectividad para cada longitud de onda de un elemento es conocido como su firma espectral (Figura 06).

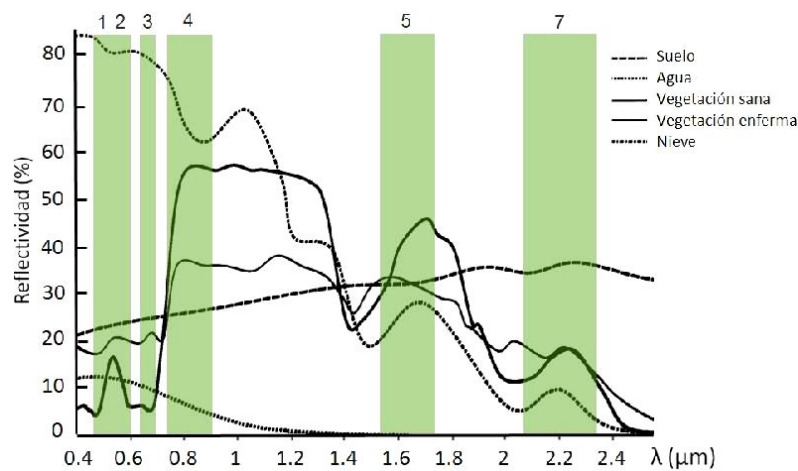


Figura 06: Firmas espectrales de distintos elementos. Fuente: Chuvieco, 1996.

De esta forma, vinculando la firma espectral con la región captada por la banda es posible la identificación de los distintos elementos de la cobertura terrestre pudiéndose aplicar procedimientos matemáticos y estadísticos para la clasificación automática de grandes superficies. El resultado final es una imagen digital clasificada de la superficie terrestre que permite calcular las superficies y distribución de cada clase de imagen identificada (Chuvieco, 1996).

3.1.1.4. Las resoluciones de un sensor.

A la hora de tener en cuenta la utilización de un sensor u otro para la realización de un estudio que tiene la teledetección como base, conviene tener en cuenta los cuatro tipos de resoluciones que éstos poseen, y que afectarán en una u otra medida a la imagen resultante (Recondo, 2015):



- **Resolución radiométrica:** Hace referencia a la sensibilidad del sensor, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia medida, es decir, el número de intervalos que pueden captarse. Cuando se emplean 8 bits se presentan $2^8=256$ valores disponibles (de 0 a 255).
- **Resolución espacial:** Tamaño del píxel o la dimensión del objeto más pequeño que podrá aparecer en la imagen. Una alta resolución espacial es de gran utilidad cuando el estudio busca un nivel de detalle elevado.
- **Resolución espectral:** Número y anchura de las bandas espectrales en las que el sensor puede captar radiación electromagnética. Cada banda constituye una variable para caracterizar la superficie captada. Es positivo que haya entonces suficiente número de ellas, lo suficientemente estrechas como para diferenciar elementos.
- **Resolución temporal:** Indica el intervalo de tiempo entre cada imagen obtenido por la plataforma, es decir, la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre.

El aumento en cualquiera de estas resoluciones supone un incremento importante en el volumen de datos que el sensor debe procesar y enviar a las estaciones terrestres. Así, dependiendo de las diferentes aplicaciones, han de primar unas resoluciones frente a otras. Así, por ejemplo, en el caso del óptico son cruciales la resolución espacial y la espectral; en el térmico la radiométrica y sobre todo la temporal (Recondo, 2015).

3.1.1.5. Análisis de la información.

De todo este proceso surgirá una nueva cadena, que será la del análisis de la información. En ella interviene una serie de nuevos intermediarios: el sistema de recepción y comercialización, que se encargará de las correcciones más básicas de los datos y su distribución; el intérprete, que analiza la información en forma de imágenes y que las procesa para obtener los resultados finales, convirtiendo los datos en clave temática, cualitativa o cuantitativa; y por último, el usuario final, que será el encargado de interpretar los resultados finales y dictaminar las consecuencias de que ellos se deriven.



Para interpretar una imagen obtenida mediante un sensor orbital, han de tenerse en cuenta las siguientes definiciones relativas a los parámetros físicos que mide dicho sensor:

- **Nivel Digital (ND):** Valor que almacena el sensor del satélite para cada píxel. No es el valor real que capta, por lo que, previamente a su almacenaje, se realiza una normalización de sus valores que puede variar con el sensor, satélite e incluso la fecha de captura. Son valores que suelen ir de 0 (ó 1) a 255. No tiene representación física y no suele ser utilizado en análisis porque es variable con el satélite.
- **Radiancia espectral (L_λ):** Energía total detectada por unidad de área (proyectada en la dirección de radiación), por ángulo sólido y por unidad de tiempo en una determinada longitud de onda. Es la unidad física que captan los sensores en teledetección. Se mide en (Wattios/ estereorradián · metro cuadrado · micra) = $(W/sr \cdot m^2 \cdot \mu m)$.
- **Reflectividad (ρ):** Relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie. Se mide en valores de 0 % a 100 %, Segundo parámetro físico más utilizado en teledetección.
- **Irradiancia radiante (E):** Energía total detectada sobre unidad de área y por unidad de tiempo. Se mide en Vattios por metro cuadrado (W/m^2).
- **Emitancia o excitancia radiante (M):** Energía total radiada por una fuente desde una unidad de área y por unidad de tiempo. También se mide en W/m^2 . Si es por longitud de onda, sería la emitancia espectral (M_λ). El emisor ideal es un cuerpo negro, que emite lo máximo a una temperatura determinada y cuya emitancia total y espectral se expresan M_n y $M_{n,\lambda}$, respectivamente.
- **Emisividad (ϵ):** Cociente entre la emitancia de una superficie (M) y la que ofrecería un emisor perfecto o cuerpo negro (M_n).
- **Absortividad (α):** Relación entre el flujo incidente y el absorbido por una superficie.
- **Transmisividad (τ):** relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.



3.1.2: SATÉLITES EMPLEADOS: LANDSAT.

"Las tecnologías de teledetección espacial han mejorado la capacidad de localización a un nivel local, regional, nacional y mundial. Gracias a detectores sensibles al espectro luminoso y a las radiaciones infrarrojas, instalados en plataformas existentes, que perciben los anormales cambios de la temperatura y el estado de la cubierta vegetal." (Glodammer y Price, 1997).

Cabe destacar, como satélite altamente apto para el cálculo del índice de vegetación de una superficie mediante sensores óptico-electrónicos el norteamericano Landsat (Figura 07), con sus sensores MSS (Multispectral Scanner), TM (Thematic Mapper) o el más reciente ETM+ (Enhanced Thematic Mapper).



Figura 07: Ilustración de satélite de la serie Landsat.

La agencia espacial norteamericana (NASA) diseñó a finales de los años 60 el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos terrestres. Fruto de estos trabajos fue la puesta en órbita del primer satélite de la serie ERTS que posteriormente fue rebautizada como Landsat. La serie Landsat es la encargada del registro más largo de información sobre la superficie terrestre obtenido de forma global y repetitiva desde el espacio.

Actualmente en el desarrollo de la serie (Figura 08) participan 3 agencias: la NASA, la NOAA y la USGS, que recogen, procesan y distribuyen los datos y se encargan de mantener el archivo de datos (Chandler *et al.*, 2003).

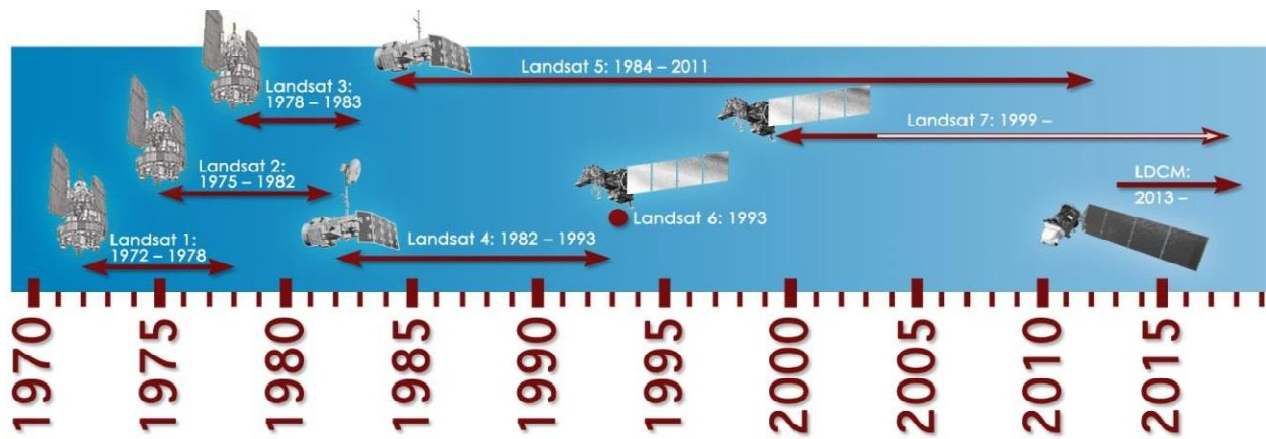


Figura 08: Historia de la serie Landsat a lo largo del tiempo. Fuente: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

3.1.1.1. Landsat 5 TM

El 1 de marzo de 1984 la NASA lanzó el satélite Landsat 5, diseñado y construido simultáneamente al Landsat 4 y equipado con los mismos sensores

- Multispectral Scanner System (MSS)
- Thematic Mapper (TM).

Debido a un problema de transmisión de las imágenes y a la falta de un sistema de almacenamiento a bordo, en agosto de 1995 se decide apagar definitivamente el sensor MSS (Figura 09).

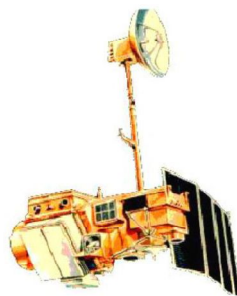


Figura 09: Ilustración de satélite Landsat 5. Fuente: ENGESAT.

El sensor TM siguió siendo operacional 27 años más tarde de la vida útil que se le había predicho en su diseño original. Los datos eran adquiridos regularmente en estaciones en EEUU y Australia, que se encargan de que las imágenes pasen al archivo de los EEUU, siendo éstas disponibles posteriormente vía internet.



En noviembre de 2011, el Instituto Geológico de los Estados Unidos cesa la adquisición de imágenes mediante el sensor TM por una rápida degradación de los componentes electrónicos. En vez de continuar adquiriendo imágenes hasta un fallo definitivo en el sistema de transmisión, pudiendo éste significar el fin de la misión, los ingenieros del USGS suspenden las actividades de imágenes para explorar todas las posibilidades para recuperar los sistemas dañados (Tabla 01).

Satélite	Tiempo de vida	Caract. Orbitales	Sensor	Banda	Resolución Espectral	Resolución Espacial
Landsat 4-5	Landsat 4 16/07/1982 -	Altitud 710km Órbita polar heliosíncrona	MSS	4	0.5-0.6 μm	82 m
				5	0.6-0.7 μm	82 m
				6	0.7-0.8 μm	82 m
				7	0.8-1.1 μm	82 m
	Landsat 5 15/06/2001 -	R. Temporal 16 días Barrido 185 km Inclinación 98.2º	TM	1	0.45-0.52 μm	30 m
				2	0.52-0.60 μm	30 m
				3	0.63-0.69 μm	30 m
				4	0.76-0.90 μm	30 m
				5	1.55-1.75 μm	30 m
				6	10.4-12.5 μm	120 m
				7	2.08-2.35 μm	30 m

Tabla 01: Características Landsat 4-5.

3.1.1.2. Landsat 7 ETM+

El satélite Landsat 7 (Figura 10) fue puesto en órbita con éxito el 15 de Abril de 1999. El sensor incluido en este satélite, el ETM+, conserva las cualidades del TM incluido en Landsat 4 y 5, más algunas características que lo convertían en el sensor con calibración más precisa de toda la Tierra:

- Banda pancromática con 15 m de resolución espacial.
- Calibración radiométrica a bordo y controlada.
- Banda en infrarrojo térmico de 60 m de resolución espacial.
- Almacenamiento de datos a bordo.

En octubre de 2008, el USGS hizo todas las imágenes Landsat 7 gratuitas al público, junto con las imágenes del resto de satélites Landsat en 2009.



En 2003, un componente del satélite falló y no se pudo arreglar remotamente, provocando errores de bandeado. Por ello, las imágenes utilizadas para el estudio únicamente proceden del Landsat 7 en momentos anteriores a 2003 y si no existiera ese año una imagen disponible del Landsat 5. Aun así, el satélite sigue operativo y sigue captando imágenes con hasta un 75% de datos válidos y con la misma precisión y calidad de calibrado y se vale de una máscara que indica los píxeles erróneos para el correcto procesado del resto de la imagen (Manual Landsat 7, 2010).



Figura10: Imagen del satélite Landsat 7.

En la Tabla 02 se especifican las características del sensor Landsat 7 ETM+

Satélite	Tiempo de vida	Caract. Orbitales	Sensor	Banda	Resolución Espectral	Resolución Espacial
Landsat 7	15/04/1999 - actualidad	Altitud 705 km Órbita polar heliosíncrona R. Temporal 16 días Barrido 185 km Inclinación 98.2º	ETM+	1	0.5-0.6 μm	30 m
				2	0.6-0.7 μm	30 m
				3	0.7-0.8 μm	30 m
				4	0.8-1.1 μm	30 m
				5	0.45-0.52 μm	30 m
				6	0.52-0.60 μm	60 m
				7	0.63-0.69 μm	30 m
				8	0.76-0.90 μm	30 m

Tabla 02: Características Landsat 7 ETM+.



3.1.3: CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

La atmósfera se presenta como una barrera entre el sensor del satélite que recoge las radiancias procedentes de la superficie terrestre y el suelo que se quiere estudiar. Toda materia que recibe radiación electromagnética reacciona reflejándola, absorbiéndola y/o transmitiéndola. Los gases, aerosoles y vapor de agua en la atmósfera no son menos, por lo que modifican las radiancias que llegan del Sol a la superficie, y de la superficie al sensor que las capta. La corrección atmosférica elimina de la imagen la influencia de la atmósfera que se interpone entre la superficie terrestre y el sensor. Se realiza en la mayoría de los trabajos de teledetección, pero se hace especialmente imprescindible cuando se quiere trabajar con combinaciones de bandas, modelización entre niveles digitales y parámetros físicos y en estudios multitemporales.

Todos los efectos producidos por la atmósfera, principalmente absorción y dispersión, son mayores en el rango visible del espectro electromagnético y en el infrarrojo, siendo prácticamente despreciable en la región de las microondas (Figura 11).

Absorción: Los diferentes gases que componen la atmósfera, según su estructura molecular, permiten una mayor o menor transmisión de radiación dependiendo de la longitud de onda de la luz.

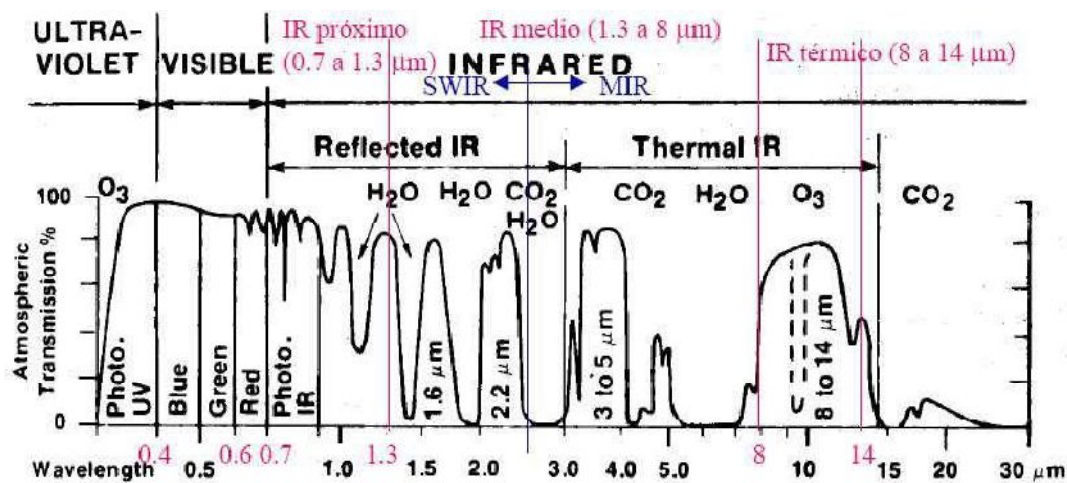


Figura 11: Transmisión atmosférica según longitud de onda. Fuente: Recondo, 2015.



Los gases componentes de la atmósfera son el nitrógeno (78%), oxígeno (21%), vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), ozono (O₃) y argón. Además de producir el efecto de absorción, también contribuyen a la dispersión dependiendo de su densidad y presión. La relación de bandas en las que actúan son:

- El ozono elimina la radiación ultravioleta inferior a 0.3 μm y pequeños sectores en el infrarrojo térmico y microondas.
- El vapor de agua produce una fuerte absorción en la zona del espectro de las 6 μm y en zonas superiores a 27 μm . También actúa entre 0.6-2 μm .
- El dióxido de carbono absorbe en el infrarrojo térmico (por encima de 15 μm) y en importantes franjas del infrarrojo medio (entre 2.5 y 4.5 μm).

Pero los gases no son los únicos componentes atmosféricos, también afectan a la atmósfera los aerosoles y las nubes. Éstas últimas además de imposibilitar la visualización de la superficie bajo ellas, producen altas reflectividades en las bandas del visible y del NIR y bajas temperaturas en el térmico. Las nubes pequeñas tienen unos efectos muy difíciles de cuantificar.

Dispersión: Es un efecto mucho más importante. Su presencia no modifica realmente las propiedades de la radiancia captada por el sensor, sino que existe una redistribución de la energía en diferentes direcciones. El resultado final es una ligera modificación en los niveles digitales captados por el sensor, además de una disminución en el contraste de los objetos observados produciéndose así una degradación de los contornos. Sus efectos son menores a medida que aumenta la longitud de onda.

Las partículas causantes de esta distorsión pueden cuantificarse, pero resultan muy variables con el tiempo. Dependiendo de la relación entre el diámetro de las partículas de los aerosoles, el cual es muy variable, y la longitud de onda del espectro electromagnético, se producirán diferentes tipos de distorsión.



a) **Dispersión Rayleigh ($D < \lambda$):**

Se produce cuando el diámetro de la partícula es menor que la longitud de onda, por lo que es principalmente producida por las moléculas de gas. Su efecto más significativo se produce en el rango de 0.4 a 1 μm (visible y NIR).

Cuanto menor es la longitud de onda (λ), mayor es el efecto de esta dispersión ya que aproximadamente cumple la relación: $1/\lambda^4$. En el campo de la teledetección es la de más influencia, y es la causante del color azul del cielo. En teledetección, las bandas del visible se ven deterioradas, especialmente la del azul (Figura 12).

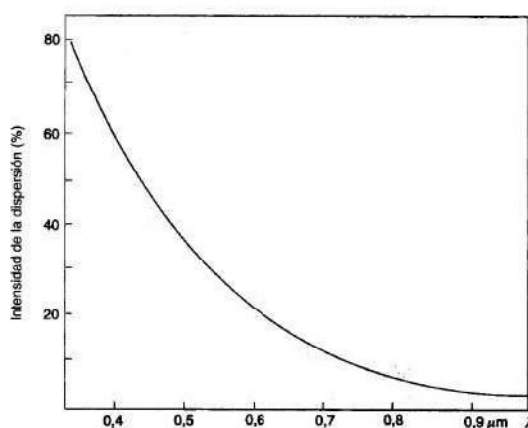


Figura 12: Gráfica de la dispersión Rayleigh. Fuente: Chuvieco, 1996.

b) **Dispersión de Mie ($D \approx \lambda$):**

Se produce cuando el diámetro de las partículas y la longitud de onda son muy semejantes, así que sus principales responsables son los aerosoles.

Sus mayores efectos se producen en el visible y en el infrarrojo, y al igual que en la dispersión de Rayleigh, su influencia será mayor a longitudes de onda más cortas, aunque no tan pronunciadamente. Su relación es de aproximadamente $1/\lambda^n$ (donde n puede ir 1 a 4). El efecto que produce en la imagen final es un deterioro generalizado en el espectro óptico en condiciones de fuerte neblina.



c) Dispersión no selectiva ($D > \lambda$):

Producida cuando el diámetro de las partículas es mucho mayor que la longitud de onda ($D > 10 \cdot \lambda$). Esta condición solo se produce cuando la atmósfera se encuentra muy cargada de polvo en suspensión, humo o nubes.

3.1.3.1. Homogeneización radiométrica multitemporal entre imágenes

Existen diversos métodos de corrección atmosférica, tales como la corrección del histograma por sus valores mínimos o corrección por el método de Chávez, modelos de transferencia radiativa con atmósferas estándar. Sin embargo, se ha optado por la homogeneización radiométrica multitemporal entre imágenes.

Esta corrección se basa en datos más realistas que buscan eliminar el error del método anterior por la suposición del valor cero de las zonas de agua. Se trata de una corrección relativa que permite comparar unas imágenes con otras si trabajamos con series multitemporales al buscar zonas comunes entre unas escenas y otras e iguala sus firmas espectrales.

El método se basa en la localización de píxeles de radiancia constante entre diferentes fechas, preferiblemente de baja reflectividad. Tras consultar su firma espectral, se ajusta la media de cada banda a unos valores medidos en campo.

De este modo, cada escena, en fechas diferentes, tendrá unos valores medios en las zonas elegidas distintos en cada banda, siempre superiores a los asumidos como referencia de las medidas de campo debido al exceso atmosférico. La diferencia entre los valores para una fecha determinada y los de referencia se restará convenientemente de cada una de las bandas de cada escena y así se ajustarán los histogramas convenientemente. En esto consistirá la corrección atmosférica de cada imagen.

En este caso se han considerado como referencia las radiancias sobre el agua (Bukata *et al.*, 1983) específica para Landsat, utilizadas en numerosos estudios (Tabla 03).



Banda (Landsat)	L ($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$)
1	12.3
2	7.2
3	11.2
4	0
5	0
7	0

Tabla 03: Radiancia del agua según Bukata et al. 1983.

La corrección final consiste restarle al nivel digital de la imagen el ND medio de las zonas de agua menos el valor en nivel digital del agua calculado por Bukata.

3.1.4: CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA

El relieve o topografía, con sus ángulos de pendiente y orientación de la superficie, modifican la distribución de la radiancia directa y difusa recibida en la Tierra del Sol. Diferencias en los ángulos de incidencia solar propician variaciones en los valores de radiancia captados por los sensores espaciales, aun poseyendo las zonas cubiertas y propiedades biofísicas similares (Figura 13).

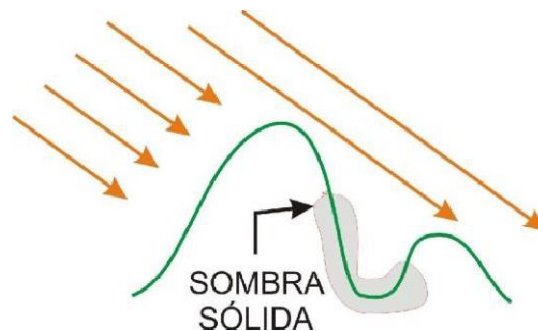


Figura 13: Generación de la sombra sólida Fuente: Sánchez, 2013.

El objetivo de la corrección topográfica es compensar las diferencias de irradiancia solar recibida en unas laderas y otras con diferente orientación y pendiente. Dicha corrección permite obtener valores de radiancia y reflectividad teóricos en dichas superficies como si éstas fueran horizontales.



Conocer la topografía del área de estudio se hace, por tanto, fundamental y para ello se recurre a los Modelos Digitales del Terreno o Elevaciones (MDT o MDE).

Uno de los principales inconvenientes de las imágenes de invierno es la baja altura del Sol sobre el horizonte. Existen zonas en las que no hay incidencia directa del Sol, por lo que los valores captados por el sensor se deben exclusivamente a la radiación difusa. A estas zonas se les denomina sombra sólida o sombra total y, aunque tras la corrección éstas se homogeneicen con el resto de la escena, se desconoce realmente cómo es la superficie en ese sitio en concreto, ya que la información que recibe el sensor es falsa: se basa en reflejos de zonas adyacentes, dispersión de la radiación, etc.

3.1.2.1. Ángulos y vectores involucrados en la corrección topográfica.

Una vez vista la necesidad de la corrección topográfica es necesario el estudio de todos los vectores y ángulos involucrados en la corrección:

a) El vector gradiente topográfico, \vec{g}

También conocido como vector normal, su dirección es perpendicular a la superficie del terreno (Figura 14).

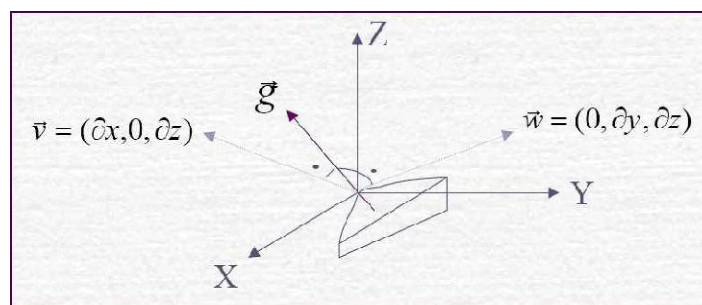


Figura 14: Representación gráfica del vector gradiente topográfico. Fuente: Recondo, 2015.

Realizando el siguiente producto vectorial es posible la obtención del vector gradiente (Ecuación 1):



$$\vec{g} = \vec{v} \times \vec{w} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \partial x & 0 & \partial z \\ 0 & \partial y & \partial z \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} -\partial y \partial z \\ -\partial x \partial z \\ \partial x \partial y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\partial z / \partial x \\ -\partial z / \partial y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -p_x \\ -p_y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

b) El vector solar, \vec{s}

Como indica su definición, es el vector que indica la dirección del Sol. Forma los ángulos vertical (V) con la vertical y acimutal (θ), entre la proyección del vector solar en la horizontal y la dirección del Norte (Figura 15).

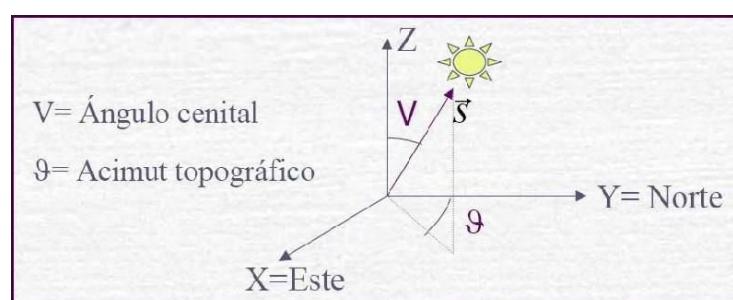


Figura 15: Representación gráfica del vector solar. Fuente: Recondo, 2015.

Gracias a que el acimut (topográfico) y el ángulo cenital del Sol son conocidos (vienen en los metadatos de las imágenes), podemos hallar las componentes del vector solar (Ecuación 2):

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\vec{s}| \sin V \sin \theta \\ |\vec{s}| \sin V \cos \theta \\ |\vec{s}| \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan V \sin \theta \\ \tan V \cos \theta \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

c) Ángulo de incidencia (i).

Los ángulos de incidencia y observación son los utilizados, mediante el cálculo de sus cosenos, para la obtención del parámetro τ que permitirá realizar la corrección topográfica en las imágenes obtenidas (Figura 16).

Así, el ángulo i es el comprendido entre los vectores de iluminación solar y el gradiente, por lo que podrá ser expresado matemáticamente de la siguiente manera (Ecuación 3):

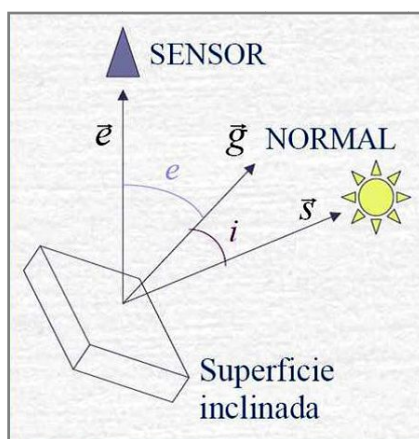


Figura 16: Representación gráfica del ángulo de incidencia. Fuente: Recondo, 2015.

$$\vec{g} \cdot \vec{s} = |\vec{g}| \cdot |\vec{s}| \cdot \cos i \quad (3)$$

Según dicho desarrollo, se puede despejar el coseno de i (Ecuación 4):

$$\cos i = \frac{1 - p_x \cdot s_x - p_y \cdot s_y}{\sqrt{1 + p_x^2 + p_y^2} \cdot \sqrt{1 + s_x^2 + s_y^2}} \quad (4)$$

Tras su cálculo, los valores negativos de $\cos i$ han de ser descartados ya que corresponden a valores del ángulo de incidencia entre 90° y 180° , lo que implica que la superficie no recibe iluminación directa del Sol y su radiancia directa será cero.

d) Ángulo de observación (e).

Utilizado para calcular el parámetro τ utilizado para corregir la imagen de topografía junto al ángulo de incidencia i . Se trata del ángulo formado por el vector de observación y el vector gradiente. Para los sensores de observación cenital, como los de los satélites Landsat, el vector de observación tiene una expresión muy sencilla (Figura 17).

Desarrollando el producto escalar del vector gradiente y del vector de observación (Ecuación 5):

$$\vec{g} \cdot \vec{e} = |\vec{g}| \cdot |\vec{e}| \cdot \cos e \quad (5)$$



Podemos obtener la expresión para el coseno de e (Ecuación 6):

$$\cos e = \frac{1}{\sqrt{1 + p_x^2 + p_y^2}} \quad (6)$$

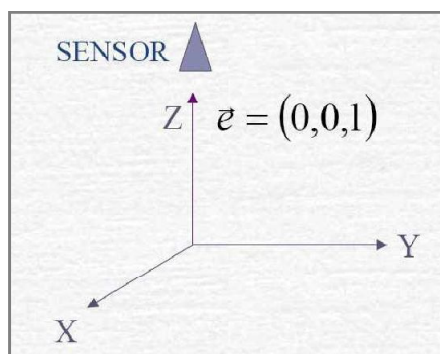


Figura 17: Representación gráfica del ángulo de observación Fuente: Recondo, 2015.

3.1.2.2. Parámetro τ .

Una vez conocidos todos los datos anteriores, es posible el cálculo de τ . Dicho cálculo sería muy simple para superficies lambertianas, es decir, suponiendo que la superficie captada dispersara uniformemente en todas las direcciones toda la luz que le llegase. Sin embargo, ninguna superficie es perfectamente lambertiana.

El caso más realista se centra en las superficies que dispersan la luz de una manera no uniforme, es decir, superficies no lambertianas. Existen múltiples modelos para el cálculo de la radiancia de este tipo de superficies. Se ha optado por el modelo de Minnaert (Ecuación 7), utilizado con buenos resultados en múltiples proyectos y trabajos en Asturias utilizando imágenes Landsat (por ejemplo, los trabajos ya citados de Recondo, 2002; 2007; Sánchez, 2013; etc.).

$$L(i, e, \lambda) = C \cdot (\cos i)^{k(\lambda)} \cdot (\cos e)^{k(\lambda)-1} \quad (7)$$

En la Ecuación 7, L es la radiancia observada por el sensor para una superficie cualquiera; i y e son los ángulos de incidencia y el ángulo de observación respectivamente. La constante k de Minnaert será exclusiva de cada banda o cada longitud de onda (λ).



Linealizando la Ecuación 7 se obtiene la Ecuación 8:

$$L \cdot \cos e = C (\cos i)^k \cdot (\cos e)^k \rightarrow \ln(L \cdot \cos e) = \ln C + k \cdot \ln(\cos i \cdot \cos e) \quad (8)$$

Donde se puede considerar que las radiancias (L) de cada banda son proporcionales a los niveles digitales (ND), por lo que no influirá en el cálculo trabajar con unas o con otros.

El parámetro τ (Ecuación 9) se obtiene del cociente entre L_H o radiancia observada para una superficie horizontal y L_I o radiancia observada para una superficie inclinada, siendo este parámetro exclusivo de cada banda, ya que el valor de la constante k de Minnaert también lo es.

$$\tau = \frac{L_H}{L_I} = \frac{L(i_H, 0, \lambda)}{L(i_I, e, \lambda)} \quad (9)$$

Desarrollando (Ecuación 10):

$$\tau = \frac{(\cos i)_H^k}{(\cos i)_I^k \cdot (\cos e)^{k-1}} = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{1 + s_x^2 + s_y^2}}\right)^k}{\left(\frac{1 - p_x \cdot s_x - p_y \cdot s_y}{\sqrt{1 + p_x^2 + p_y^2} \cdot \sqrt{1 + s_x^2 + s_y^2}}\right)^k \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + p_x^2 + p_y^2}}\right)^{k-1}} \quad (10)$$

La corrección topográfica por el método de Minnaert se basará en la obtención de las imágenes $\cos i$ y $\cos e$, y el valor de la constante k (Recondo, 2015).

3.1.3: CONVERSIÓN A PARÁMETROS FÍSICOS

Una vez la imagen esté corregida de atmósfera y de topografía, se podrá comenzar con su análisis. Para ello, han de realizarse unas conversiones para obtener modelos reales basados en parámetros físicos.



3.1.3.1. Conversión a radiancia (calibración radiométrica).

El primer paso consiste en la conversión de los Niveles Digitales (ND) de la imagen, parámetro no físico que únicamente describe un método de almacenaje de los datos de la imagen en el sensor, en un parámetro físico real. Éste será la radiancia, ya que es aquél que tiene un método de conversión directa estandarizado para cada imagen, al conocerse los datos para realizar esta conversión. La fórmula de la radiancia para cada ND de una imagen es una de las siguientes (Ecuaciones 11 y 12):

$$L = a_0 + a_1 \cdot ND \quad (11)$$

o bien

$$L = G \cdot ND + B \quad (12)$$

Siendo L la radiancia de un píxel, ND su nivel digital, a_0 y a_1 los parámetros de calibración del sensor; y G y B la ganancia y el bias, respectivamente, que es otra forma de nombrarlos. Los parámetros de calibración se encuentran en los metadatos de la imagen, proporcionados por el organismo emisor de las mismas. O bien, se incluyen los datos de la radiancia mínima y máxima (L_{min} y L_{max} , respectivamente), para poder obtener el bias y la ganancia mediante las Ecuaciones 13 y 14:

$$G = \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{ND_{cal\ max} - ND_{cal\ min}} \quad (13)$$

$$B = L_{min\lambda} - (G * ND_{cal\ min}) \quad (14)$$

- ND_{cal} = es la radiancia calibrada, modificado a escala en ND.
- $L_{min\lambda}$, es la radiancia espectral en $ND_{cal} = ND_{cal\ min}$.
- $L_{max\lambda}$, es la radiancia espectral en $ND_{cal} = ND_{cal\ max}$.

Hay que tener en cuenta que los valores de ND_{min} y ND_{max} no son siempre los mismos para las diferentes agencias suministradoras de los datos. Por ejemplo, la Agencia Espacial Europea (ESA) utiliza 0-255 y la NASA utiliza 1-255.



Las Ecuaciones 13 y 14 también se pueden representar como ecuaciones de una recta; donde Bias, es el término independiente, valores de la radiancia espectral y gain es la pendiente de la recta (Figura 18).

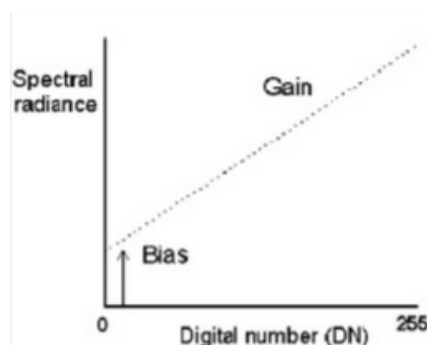


Figura 18: Representación gráfica de la recta de conversión a radiancia.

3.1.3.2. Conversión a reflectividad.

El parámetro físico con el que se calculará de manera directa el índice de vegetación de las imágenes es la reflectividad.

ρ es la fracción de la radiación incidente que refleja la superficie receptora, se mide en tanto por uno (o en tanto por ciento, %) y es por tanto adimensional, siendo diferente para cada superficie receptora y para cada cuerpo. Corregida la imagen de atmósfera y topografía, la reflectividad aparente se calcula entonces como (Ecuación 15):

$$\rho_{\lambda} = \frac{d^2 \cdot \pi \cdot L_{\lambda}}{E_{\lambda} \cdot \cos V} \quad (15)$$

Siendo E_{λ} la irradiancia espectral que llega a la superficie terrestre procedente del Sol, considerando una distancia media Tierra-Sol y que el Sol está en el cénit, L_{λ} es la radiancia espectral recibida por el sensor y d^2 la distancia Tierra-Sol medida en unidades astronómicas (Chandler et al., 2009).



3.1.3.3. Índice de vegetación NDVI.

El Índice de vegetación de diferencia normalizada, también conocido como NDVI (normalized difference vegetation index), es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación y está basado en la medición de la reflectividad en dos bandas espectrales donde la vegetación vigorosa tiene un mínimo (rojo) y un máximo (infrarrojo cercano).

Las plantas absorben radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa (región roja del visible), la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis. Las células vegetales han evolucionado para dispersar la radiación solar en la región espectral del infrarrojo cercano, la cual lleva aproximadamente la mitad del total de la energía solar. Por tanto, la vegetación aparece relativamente oscura en la región de radiación fotosintética activa y relativamente brillante en el infrarrojo cercano. En contraste, las nubes y la nieve tienden a ser bastante brillantes en visible (incluido el rojo), y bastante oscura en el infrarrojo cercano (Figura 19).

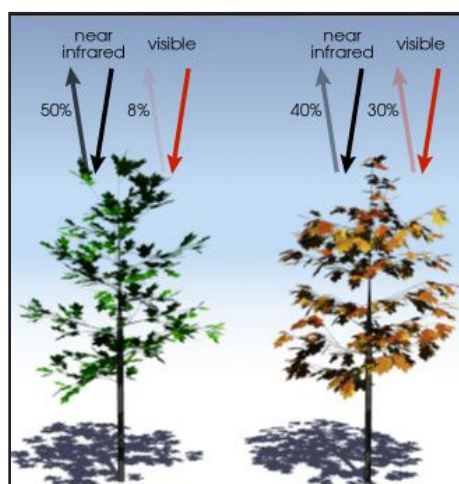


Figura 19: Representación gráfica del NDVI.

Debido a que los primeros instrumentos usados para la observación terrestre adquirirían datos en el rojo e infrarrojo cercano, fue natural hacer uso de las marcadas diferencias en la reflexión vegetal para determinar su distribución espacial en las imágenes de satélite. El índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI, se calcula a partir de estas medidas (Ecuación 16):



$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Rojo}}{\rho_{NIR} + \rho_{Rojo}} \quad (16)$$

Donde las variables Rojo y NIR están definidas por las medidas de reflexión espectral adquiridas en las regiones del rojo e infrarrojo cercano, respectivamente. Estas reflexiones espectrales son en sí cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral individual; por tanto, éstos toman valores entre un rango de 0 a 1. El NDVI varía como consecuencia entre -1 y +1.

Según investigaciones realizadas, se ha encontrado que el NDVI, está directamente relacionado con la capacidad fotosintética y, por tanto, con la absorción de energía por la cobertura arbórea (Gates, 1980).



3.2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

«Conjunto integrado de medios y métodos informáticos, capaz de recoger, verificar, almacenar, gestionar, actualizar, manipular, recuperar, transformar, analizar, mostrar y transferir datos espacialmente referidos a la Tierra...» Instituto Geográfico Nacional, 2012.

3.2.1. INTRODUCCIÓN.

Se entiende por "Sistema de Información" la conjunción de información con herramientas informáticas (programas informáticos o software). Si el objeto concreto de un sistema de información (información+software) es la obtención de datos relacionados con el espacio físico, entonces estaremos hablando de un Sistema de Información Geográfica o SIG (GIS en su acrónimo inglés, Geographic Information Systems).

Así pues, un SIG es un software específico que permite a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos.

El uso de este tipo de sistemas facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, desde mapas de carreteras hasta sistemas de identificación de parcelas agrícolas o de densidad de población. (CEA, 2010).

3.2.1.1. Funcionamiento de un SIG.

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, al señalarse un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.



La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma (Langlé, 2011). El funcionamiento de un SIG sigue las normas expuestas en el esquema representado en la Figura 20.

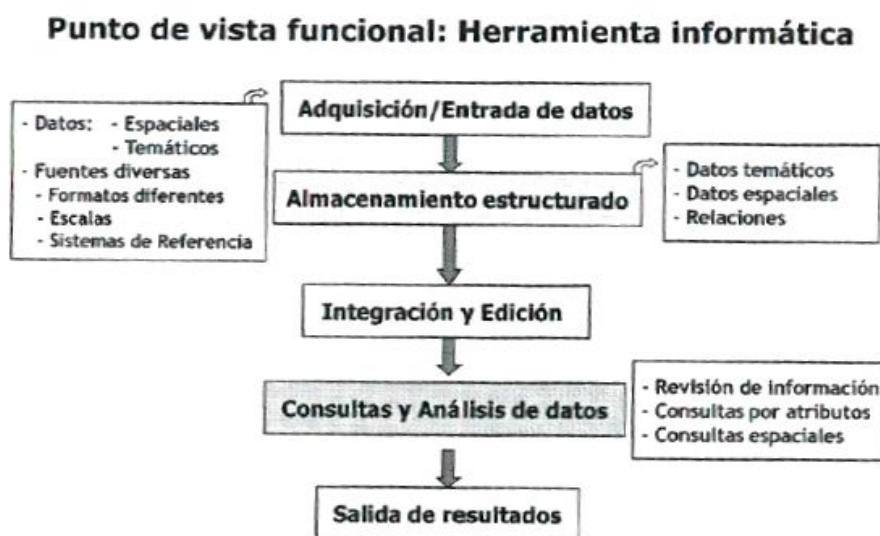


Figura 20: Esquema del SIG desde punto de vista funcional. Fuente: Moreno, 2007.

3.2.1.2. Las escalas de los SIG.

Para entender el concepto de Sistema de Información Geográfica, así como su funcionamiento real, se ha de conocer el concepto de las diferentes escalas. En un Sistema de Información Geográfica se diferencian tres tipos de escalas referidas a los datos georreferenciados:

- **Escala nominal:** En la que se distingue exclusivamente por clases distintas. No suele ser numérica, sino que tiene un código.
- **Escala ordinal:** Establece un orden dentro de las unidades espaciales. Relación de jerarquía en la que se establece
- **Escala de intervalos:** Diferentes distancias entre unidades. Cuantifica de forma única cada unidad espacial existente.



3.2.1.3. Los mapas y la información geográfica.

Rara vez se obtiene la información geográfica de forma directa a partir de trabajo de terreno o de levantamientos topográficos. Por ello es frecuente utilizar cartografía institucional obtenida mediante métodos directos para que sirvan así de base para la introducción de la propia información. Los mapas pueden ser clasificados usándose múltiples criterios (Gutiérrez, portal web cartomap):

- **Formato:** Puede ser analógico o digital. El formato se distingue en cartografía SIG (la utilizada en este estudio) y cartografía CAD.
- **Tipo:** Se diferencian entre topográficos y temáticos, según si su información es básica territorial o hacen referencia a un tema en concreto, física o políticamente.
- **Escala:** Además de lo explicado en el apartado anterior, se entiende como escala los distintos niveles administrativos que se pueden cubrir (local, comunal, provincial, regional y nacional).
- **Difusión:** Alcance que tiene la cartografía. Se distingue entre pública, privada y restringida.
- **Zona:** A distinguir entre terrestre, aeronáutico y marítima.

3.2.1.4. Relaciones espaciales.

Uno de los aspectos más importantes de un SIG son las relaciones espaciales entre sus elementos. Éstas determinan las interrelaciones geométricas y topológicas entre elementos en el espacio.

Todas ellas se pueden responder a partir de la geometría o la topología. De otra manera, se puede decir que la topología tiene en cuenta las relaciones de carácter cualitativo mientras que la geometría es cuantitativa. La distancia entre dos puntos medida en metros sería una relación geométrica mientras que la contigüidad entre dos elementos sería topológica.



No siempre los sistemas incluyen de forma automática las relaciones espaciales entre los objetos. De hecho, en muchos de ellos se necesita ejecutar comandos específicos para que el programa tenga en cuenta las relaciones topológicas (es lo que en algún caso se denomina dar topología). Quizás sea ésta una de las características más complejas tanto por el elevado número de posibles relaciones espaciales como por las complicadas operaciones que debe realizar el programa para establecerlas. Algunas de las relaciones espaciales se muestran en la Figura 21.



Figura 21: Tipos de relaciones espaciales. Fuente: Van Westen et al, 2005.

3.2.2. TIPOS DE ARCHIVO.

Los datos SIG representan los objetos del mundo real (carreteras, el uso del suelo, altitudes). Los objetos del mundo real se pueden dividir en dos abstracciones: objetos discretos (una casa) y continuos (cantidad de lluvia caída, una elevación). Existen dos formas de almacenar los datos en un SIG: raster y vectorial. (Figura 22).

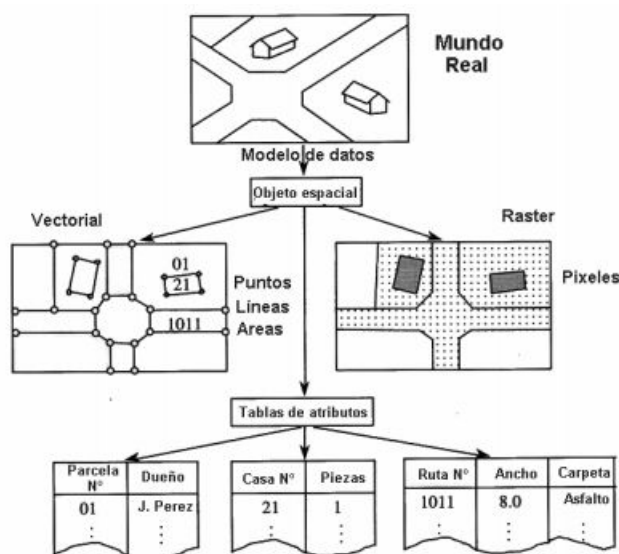


Figura 22: Esquema de tipos de archivos. Fuente: portal web cartomap.

3.2.2.1. Archivos raster

Un tipo de datos raster es, en esencia, cualquier tipo de imagen digital representada en tramas de celdas o píxeles en las que cada una de ellas tiene una única propiedad espacial. En los modelos raster lo que interesa es la propiedad espacial más que los límites exactos. Utiliza una base teórica similar a la teledetección, por lo que la integración de la información geográfica obtenida a través de las imágenes satélite es más sencilla y directa entre modelos raster.

Al igual que para las imágenes por satélite, la celda es el elemento básico de este modelo, formándose un entramado regular (Figura 23). Con su tamaño se determina la escala de la imagen que se está introduciendo. Lógicamente, cuanto más pequeña sea ésta, mayor será la escala de resolución que se obtenga. (Gutiérrez, portal web cartomap).

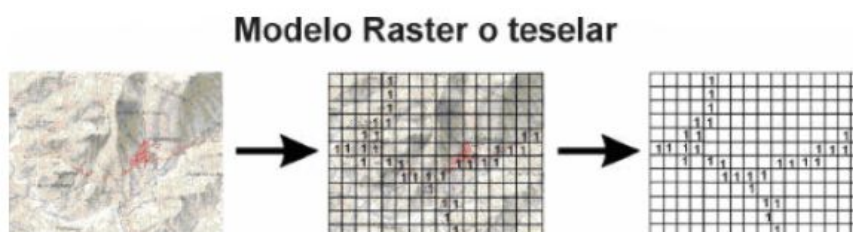


Figura 23: Ejemplo de archivo raster. Fuente: portal web cartomap.



En el modelo raster, los límites no quedan recogidos de forma explícita sino que se deben suponer de la delimitación de las celdas que forman la tesela. La información se estructura en niveles que contienen elementos de una misma variable (Figura 24).

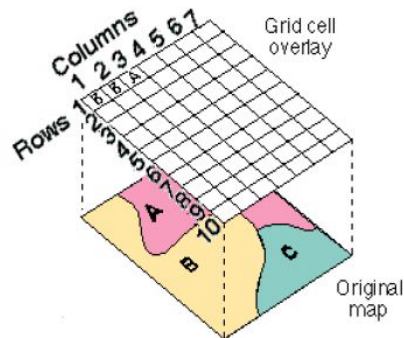


Figura 24: Distribución de datos en un archivo ráster. Fuente: Van Westen et al., 2005.

Divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor. Se trata de un modelo de datos muy adecuado para la representación de variables continuas en el espacio. Los valores registrados para cada celda puede ser un valor discreto, como el uso del suelo, valores continuos, como temperaturas, o un valor nulo si no se dispone de datos. Si bien una trama de celdas almacena un valor único, estas pueden ampliarse mediante el uso de diferentes bandas, o una tabla extendida de atributos con una fila para cada valor único. (Bolstad, 2005).

3.2.2.2. Archivos vectoriales

En un SIG, las características geográficas se expresan con frecuencia como vectores, manteniendo las características geométricas de las figuras.

En los datos vectoriales, el interés de las representaciones se centra en la precisión de la localización de los elementos geográficos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son discretos, es decir, de límites definidos (Figura 25). Cada una de estas geometrías está vinculada a una fila en una base de datos que describe sus atributos. Esta información puede ser utilizada para crear un mapa que describa un atributo particular contenido en la base de datos. Además, las diferentes geometrías de los elementos también pueden ser comparadas.

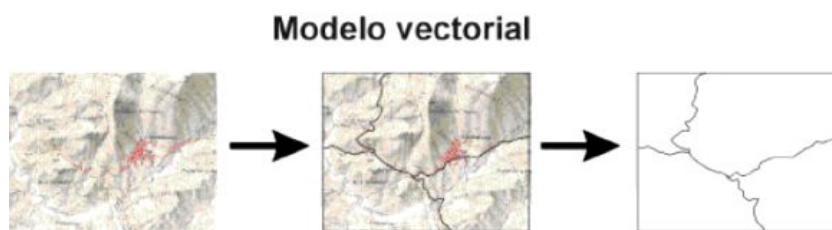


Figura 25: Ejemplo de archivo vectorial. Fuente: portal web cartomap.

Los elementos vectoriales pueden crearse respetando una integridad territorial a través de la aplicación de unas normas topológicas tales como que "los polígonos no deben superponerse". Los datos vectoriales se pueden utilizar para representar variaciones continuas de fenómenos (Burrough, 1998).

Existen tres tipos distintos de archivos vectoriales(Figura 26):

Puntos: Los puntos se utilizan para las entidades geográficas que mejor pueden ser expresadas por un único punto de referencia. En otras palabras: la simple ubicación. También se pueden utilizar para representar zonas a una escala pequeña.

Líneas o polilíneas: Usadas para rasgos lineales como ríos, caminos, ferrocarriles, rastros, líneas topográficas o curvas de nivel. De igual forma que en las entidades puntuales, en pequeñas escalas pueden ser utilizados para representar polígonos. En los elementos lineales puede medirse la distancia.

Polígonos: Los polígonos bidimensionales se utilizan para representar elementos geográficos que cubren un área particular de la superficie de la tierra. Los polígonos transmiten la mayor cantidad de información en archivos con datos vectoriales y en ellos se pueden medir el perímetro y el área.

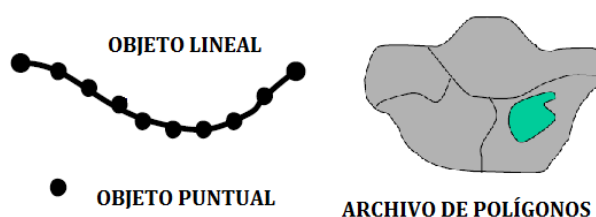


Figura 26: Tipos de archivos vectoriales, representación gráfica.



4. METODOLOGÍA



4.1: TELEDETECCIÓN

Para el estudio se ha elaborado el siguiente flujo de trabajo (Figura 27).

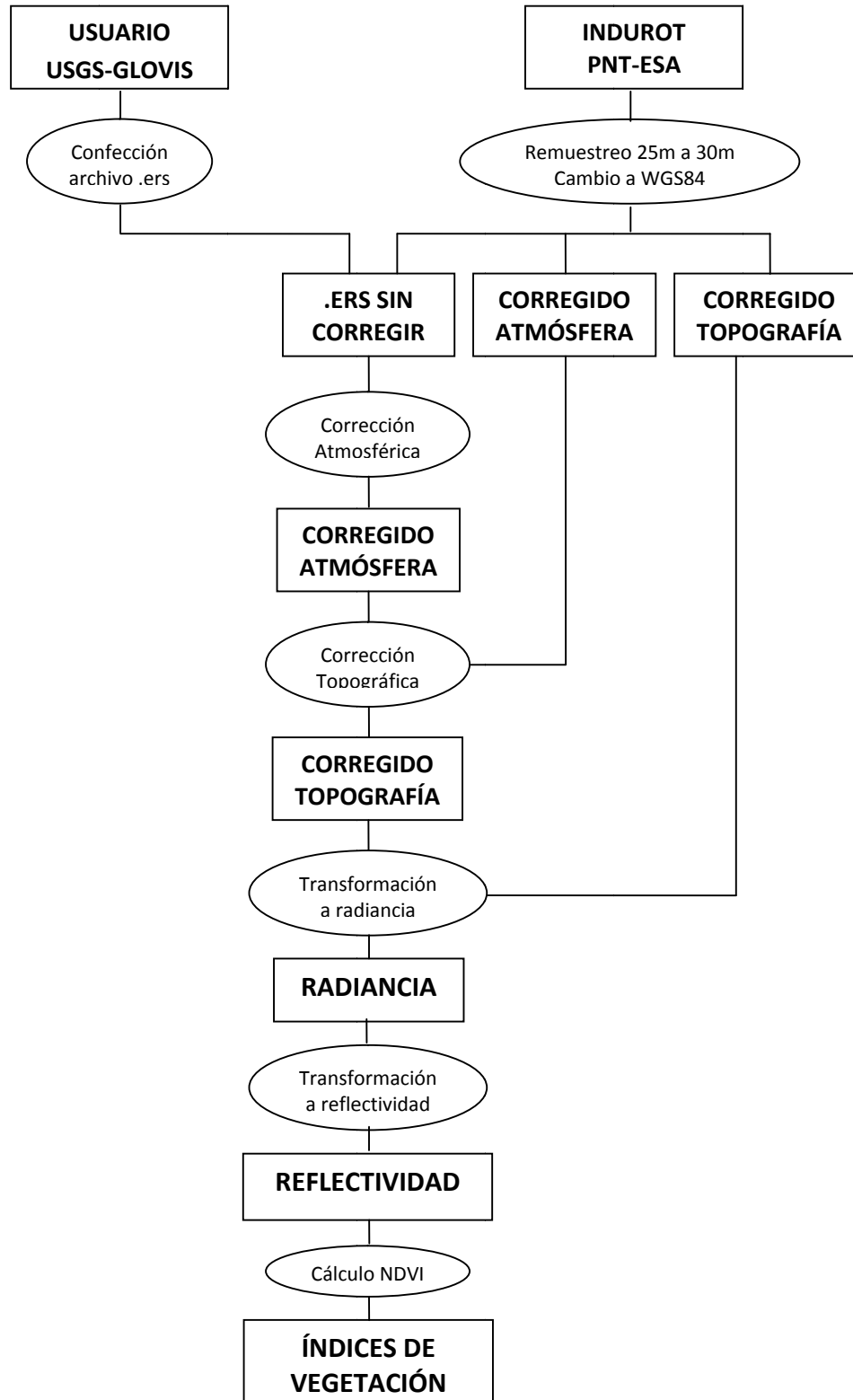


Figura 27: Esquema del procedimiento en Teledetección del actual trabajo



4.1.1: OBTENCIÓN DE LAS IMÁGENES

El primer paso a realizar en cualquier estudio que involucre técnicas como la teledetección espacial será el de la selección y recopilación de todas las imágenes de satélite necesarias para su elaboración.

Como el estudio ha consistido en el estudio a través del tiempo del índice de vegetación de las escombreras de Asturias, es de gran utilidad la posesión de una imagen por año en la franja de tiempo más amplia que se pueda alcanzar dentro de las posibilidades del carácter del proyecto. Así, se ha escogido siempre que se ha podido, una imagen por año desde 1985 hasta 2011. A su vez, es de gran interés que todas las imágenes sean de un momento del año, cuanto menos, similar entre ellas. Se ha optado por elegir los meses de verano para el estudio, ya que es la época del año con más días despejados y mayor iluminación (Tabla 04).

FECHAS DE ADQUISICIÓN DE LAS IMÁGENES				
1985 29 de abril	1986 6 de agosto	1987 10 de septiembre	1988 No hay datos	1989 19 de junio 1 de octubre
1990 1 de agosto	1991 25 de mayo 7 de octubre	1992 No hay datos	1993 8 de julio	1994 No hay datos
1995 No hay datos	1996 14 de junio	1997 14 de abril	1998 7 de agosto	1999 9 de julio
2000 26 de junio 7 de octubre	2001 20 de junio	2002 27 de septiembre	2003 5 de agosto	2004 2 de junio
2005 27 de septiembre	2006 No hay datos	2007 31 de julio	2008 2 de agosto	2009 2 de junio 6 de septiembre
2010 21 de junio	2011 24 de junio	A partir de 2011, el sensor Landsat 5 TM dejó de estar operativo. Asimismo, las imágenes de Landsat 7 ETM+ poseen errores en esas fechas.		

Tabla 04: Imágenes disponibles para el estudio



Se han encontrado cuatro años en los que había disponibles para su estudio tanto una imagen a principios del verano como una en otoño. Se ha elegido en cualquier caso la imagen correspondiente a verano.

Existen dos maneras principales de obtener las imágenes provenientes de un sensor de la serie Landsat.

- **USGS-Glovis.** De acceso libre.
- **PNT-ESA.** De acceso restringido a entidades públicas como universidades, imágenes gratuitas para estos organismos desde 2005.
- **Compra directa a la ESA a través del INTA.** Hemos usado las imágenes compradas por el INDUROT para distintos proyectos (las comprendidas entre 1986 y 2004) y cedidas para este proyecto fin de grado.

Así, se ha realizado previamente una búsqueda exhaustiva por los archivos del INDUROT para localizar y utilizar la mayor cantidad de imágenes posibles y, también en medida de lo posible, con algunas de las correcciones realizadas. Tras ello, se han encontrado una serie de imágenes con distintos grados de corrección. Otras han tenido que extraerse del portal Glovis para el estudio actual (Tabla 05). Disponibles en el Anexo I.

USGS-GLOVIS	OBTENIDAS POR EL INDUROT		
	.ERS sin correcciones	Ya corregidas de atmósfera	Ya corregidas de atmósfera y topografía
29 de abril de 1985 (TM5) 16 de junio de 1989 (TM5) 25 de mayo de 1991 (TM5) 31 de julio de 2007 (TM5) 6 de sept. de 2009 (TM5) 21 de junio de 2010 (TM5) 24 de junio de 2011 (TM5)	27 de sept. 2005 (formato .ISO) (TM5)	2 de junio de 2004 (TM5) 2 de agosto de 2008 (TM5)	6 de agosto de 1986 (TM5) 10 de sept. de 1987 (TM5) 1 de octubre de 1989 (TM5) 1 de agosto de 1990 (TM5) 7 de octubre de 1991 (TM5) 8 de julio de 1993 (TM5) 16 de junio de 1996 (TM5) 14 de abril de 1997 (TM5) 7 de agosto de 1998 (TM5) 9 de julio de 1999 (TM5) 25 de junio de 2000 (TM5) 7 de octubre de 2000 (ETM+7) 20 de junio de 2001(ETM+7) 27 de sept. de 2002 (ETM+7) 5 de agosto de 2003 (TM5) 2 de junio de 2009. (TM5)

Tabla 05: Estado de las imágenes disponibles.



Se ha actuado de manera consecuente, introduciendo cada imagen en el proceso de corrección y conversión de acuerdo con el esquema de la Figura 27 presentado al inicio de la Sección 4.1.

4.1.1.1. USGS-Glovis.

USGS-Glovis es un servicio gratuito de adquisición de imágenes, así como de distribución de las mismas, que se ha utilizado para la obtención de varias imágenes (Tabla 05) sobre las que se ha realizado este estudio. Corre a cargo del Gobierno de los Estados Unidos y la NASA (Figura 28).

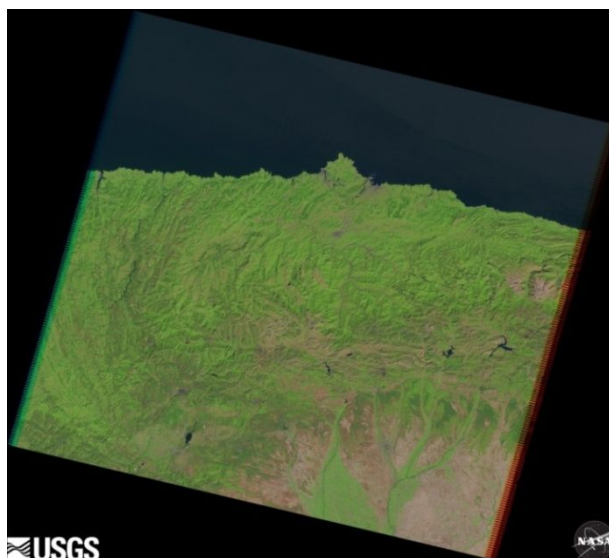


Figura 28: Ejemplo de imagen distribuida por USGS.

Las características de las imágenes extraídas del portal son las expuestas en la Tabla 06.

3.1.1.2. PNT-ESA.

El Plan Nacional de Teledetección (PNT) se enmarca dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT), ambos coordinados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).



Su objetivo principal es coordinar la adquisición de imágenes de satélite del territorio español entre la Administración General del Estado (AGE) y las comunidades autónomas y fomentar su uso masivo y el de sus productos derivados (Tabla 06).

Información general de las imágenes	PNT-ESA	USGS-Glovis
Satélite utilizado en el estudio	Landsat 4-5 TM y Landsat 7 ETM+	Landsat 4-5 TM y Landsat 7 ETM+
Rango de ND	0-255	1-255
Método de remuestro	Vecino más próximo	Convolución cúbica
Tamaño de celda	30 m convertido a 25 m	30 m
Metadatos	Un archivo por banda	Un archivo por imagen
Datos de conversión a radiancia	Ganancia y Offset (Bias)	L_{max} y L_{min}
Formato	.img	Un GEOTIFF por banda
Accesibilidad	Sólo entidades públicas registradas	Acceso libre
Coste	Gratuito	Sólo algunas imágenes están disponibles de modo libre y gratuito

Tabla 06: Información general de las imágenes obtenidas en PNT-ESA y USGS-Glovis.

Además de la Agencia Espacial Europea (ESA), el USGS es proveedor de algunas de las imágenes del PNT, por lo que dichas imágenes poseerán las características mencionadas en el apartado anterior.



4.1.2: CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

El primer paso de todos, una vez todas las imágenes se han recopilado y organizado según el nivel de corrección con el que se han obtenido, ha sido la corrección atmosférica de todas aquellas imágenes que no lo estaban.

Como se ha expuesto en la parte de fundamentos teóricos (Sección 3), el método a utilizar consistirá en la localización de píxeles de radiancia constante entre diferentes fechas, preferiblemente de baja reflectividad. Para homogeneizar la escenas se ha de efectuar adecuadamente el cálculo en base al ND medio del agua para cada una de las bandas de cada escena y así se ajustarán los histogramas convenientemente.

4.2.1.1. ND de referencia a utilizar.

En este caso se han considerado las radiancias sobre el agua (Bukata et al., 1983) específica para Landsat, utilizadas en numerosos estudios (Tabla 07). Como queremos trabajar en este proceso con las imágenes en ND, ya que ocupan menos al ser datos enteros, hemos convertido los valores de radiancia en el agua de Bukata et al. (L_{Bukata}) a los valores correspondientes de ND para las diferentes fechas y sensores (ND_{Bukata}) usando los parámetros de calibración mostrados más adelante en las las Tablas 30 y 31 e invirtiendo la Ecuación 12. Los resultados para los distintos sensores y años se muestra en la Tabla 07. Disponibles en el Anexo I.

BANDAS	L_{Bukata}	ND_{Bukata}					
		Imágenes PNT			Imágenes GLOVIS		
		ETM+7	TM5	TM5	TM5	TM5	TM5
		2000-2002	1984 - 2008	2009-2011	1985-1988	1989-1991	1992-2011
B1	12,3	24	23	18	22	21	19
B2	7,2	17	9	7	9	9	8
B3	1,2	10	3	2	3	3	3
B4	0	8	2	2	3	3	3
B5	0	8	3	3	4	4	4
B6	0	-22	-22	-22	-21	-21	-21
B7	0	8	3	2	3	3	3

Tabla 07: Parámetros de Bukata para el agua en ND para distintos sensores y épocas.



La fórmula para corregir de atmósfera una imagen se obtiene de restar a cada ND la diferencia entre el ND medio de las zonas de agua y el nivel digital del agua observado por Bukata (Ecuación 17).

$$ND_{ATMO} = ND - (ND_{med}^{Agua} - ND_{Bukata}) \quad (17)$$

4.2.1.2. Definición de las zonas de agua.

Para poder corregir la imagen de atmósfera es necesaria la creación de zonas de agua en el archivo .ers que se ha confeccionado.

Para ello, se recurre a ER Mapper. Así, se introduce un archivo vectorial creado a partir de los mayores embalses que se puedan encontrar en una imagen del Principado de Asturias (Figura 29).



Figura 29: Imagen con polígonos de agua.

Así, se ha de introducir el mismo fichero para todas las imágenes a fin de realizar un estudio multitemporal. Sin embargo, es necesaria la modificación en algunos de los archivos si las zonas de agua a estudiar están cubiertas por nubes. Como se ha realizado un exhaustivo análisis acerca de qué imágenes seleccionar, las únicas modificaciones necesarias son la eliminación puntual de algunos polígonos de pequeño tamaño o la modificación de los mismos para bordear nubes de pequeño tamaño. En la imagen de la Figura 30 se ha optado por eliminar el polígono que aparece en rojo por estar cubierto por nubes casi en su totalidad



Figura 30: Imagen con polígonos de agua eliminados al haber nubes.

Los archivos vectoriales creados a raíz de la necesidad de realizar dichas modificaciones son los mostrados en la Tabla 08.

Nombre	Descripción
Embalses.erv	Archivo vectorial estándar utilizado de forma general para la corr. atmosférica.
Embalses_2003.erv	Eliminado un pequeño polígono de agua. No utilizado ya que existe una versión del PNT ya corregida de la misma imagen.
Embalses_2005.erv	Eliminado un pequeño polígono de agua.
Embalses_2007.erv	Eliminado un pequeño polígono de agua.

Tabla 08: Archivos vectoriales elaborados para el agua en la corrección atmosférica.

Toda vez se haya creado la zona de agua en las imágenes, se han calculado sus estadísticas a fin de obtener el nivel digital medio de cada una de las bandas para dicha zona (Tabla 09). El resto de estadísticas de las imágenes para la zona de agua se encuentran disponibles en el Anexo II.

Agosto de 1990	Banda1	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5	Banda6	Banda7
Mínimo	58	21	14	11	6	131	2
Máximo	72	24	18	14	12	139	8
Media	67.1	22.8	16.6	12.5	8.0	134.7	4.9
Mediana	69	23	17	12	8	136	5
σ	3.450	0.727	0.809	0.622	1.220	2.042	1.157
$\sigma (n-1)$	3.460	0.729	0.811	0.624	1.223	2.048	1.160

Tabla 09: Ejemplo de estadísticas del agua para la imagen del 1 de agosto de 1990.



4.2.1.3. Corrección atmosférica.

Una vez se ha introducido las zonas de agua a las imágenes, así como calculado sus estadísticas en dicha zona, se ha elaborado un algoritmo en ER Mapper en el cual, introduciendo una capa por cada banda, se ejecutará la fórmula teórica anteriormente descrita como ecuación dentro del algoritmo (Figura 31):



Figura 31: Algoritmo de la imagen 1990 en ER Mapper.

Seleccionando como input cada banda y la zona de agua como región a aplicar (Figura 32).

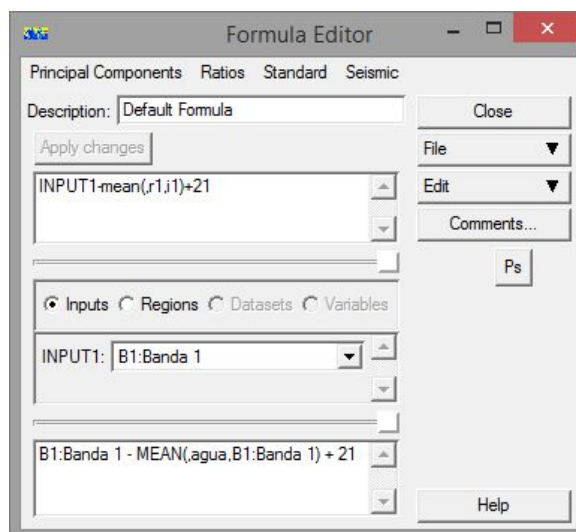


Figura 32: Fórmula de la corrección atmosférica en ER Mapper para 1990.

El resultado de la aplicación de las fórmulas en el algoritmo es la creación de un archivo de 7 bandas en las que todas menos la 6 están corregidas de atmósfera. Dicho archivo se ha de guardar, al estar formado por ND que van de 0 ó 1 a 255, como enteros sin signo de 8bits.

Visualizando la imagen antes y después de la corrección se ha de poder apreciar una clara mejora en la calidad de la misma (Figura 33).

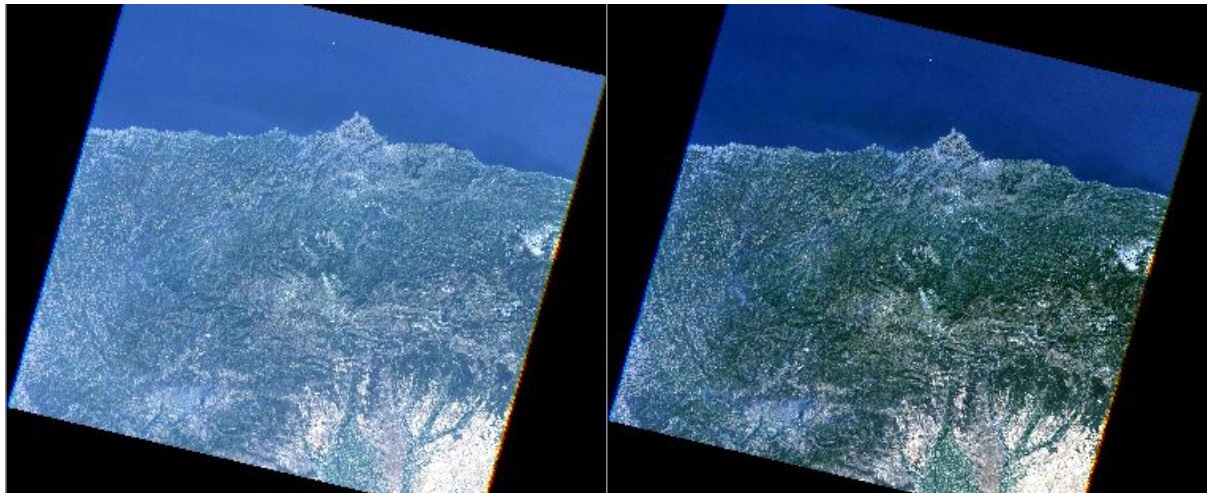


Figura 33: Imagen de 1990 antes y después de la corrección atmosférica.

Guardando el algoritmo creado, se hace posible la utilización del mismo para la corrección atmosférica automática de las imágenes. Para ello es necesario guardar un algoritmo diferente por cada grupo de imágenes que utilice ND_{Bukata} distintos. A pesar de la agilización del proceso que ello conlleva, sigue siendo necesario introducir la zona de agua una por una a cada imagen y calcular sus estadísticas para que el algoritmo funcione.

4.2.1.4. Comprobaciones.

Tras corregir la imagen de atmósfera, se han calculado las estadísticas nuevamente para la zona de agua para la comprobación de los niveles digitales medios de la misma. Por ejemplo, para la imagen del año 1990 (Tabla 10).

Agosto de 1990	Banda1		Banda2		Banda3		Banda4		Banda5		Banda6	Banda7	
	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.		Sin Corr.	Atmo.
Mínimo	58	12	21	7	14	0	11	2	6	2	131	2	0
Máximo	72	26	24	10	18	4	14	5	12	8	139	8	6
Media	67.1	21.1	22.8	8.8	16.6	2.6	12.5	3.5	8.0	4.0	134.7	4.9	2.9
Mediana	69	23	23	9	17	3	12	3	8	4	136	5	3
σ	3.450		0.727		0.809		0.622		1.220		2.042	1.157	
$\sigma (n-1)$	3.460		0.729		0.811		0.624		1.223		2.048	1.160	

Tabla 10: Ejemplo de estadísticas del agua antes y después de la corrección atmosférica para agosto de 1990.



Si la corrección ha sido exitosa, se ha de poder apreciar que los valores del ND medio de las zonas de agua, redondeados al entero más cercano (Tabla 11), corresponden a los ND de Bukata para el agua (ver los valores ND de Bukata de la Tabla 03):

	B1	B2	B3	B4	B5	B7
ND_{med}	21.1	8.8	2.6	3.5	4.0	2.9
ND_{Bukata}	21	9	3	3	4	3

Tabla 11: ND medio del agua en la imagen corregida frente al esperado teóricamente.

Se ha repetido el proceso para todas aquellas imágenes que se hayan obtenido sin una corrección previa de atmósfera, obteniendo los valores medios en la zona de agua mostrados en la Tabla 11.

ND_{med}	B1	B2	B3	B4	B5	B7
1985	21.7	9.5	3.0	3.1	4.5	2.9
1989	20.5	9.5	2.9	3.0	4.5	3.3
1991	21.3	9.5	2.7	3.4	4.3	2.8
2005	23.4	9.2	3.0	2.5	3.0	2.8
2007	18.7	8.6	2.7	3.2	3.8	2.7
2009	19.2	7.8	2.6	2.6	4.0	3.2
2010	19.3	8.3	3.3	3.4	3.5	3.1
2011	18.9	8.2	3.1	3.0	4.3	2.8

Tabla 12: ND medio del agua en la imagen corregida para diversos años.

Comprobando en todo caso que los ND medios de la zona de agua tras corregir sean iguales, redondeándolos al entero más cercano, a los ND_{Bukata} correspondientes a su fecha y método de adquisición (ver Tabla 12).



4.1.3. CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA

Tal como se ha explicado en la Sección 3.1.4, la corrección topográfica consiste en compensar las diferencias de irradiancia solar recibida en unas laderas y otras con diferente orientación y pendiente.

En el entorno ER Mapper, existen dos métodos de corrección topográfica: la aplicación manual de las definiciones teóricas de la misma y la utilización de algoritmos que automaticen el proceso (Figura 34). El segundo proceso mencionado es mucho más rápido y elimina posibles errores por parte del usuario, aunque ha de comprobarse la idoneidad del mismo comprobando al menos una vez los resultados de una imagen con el método manual.

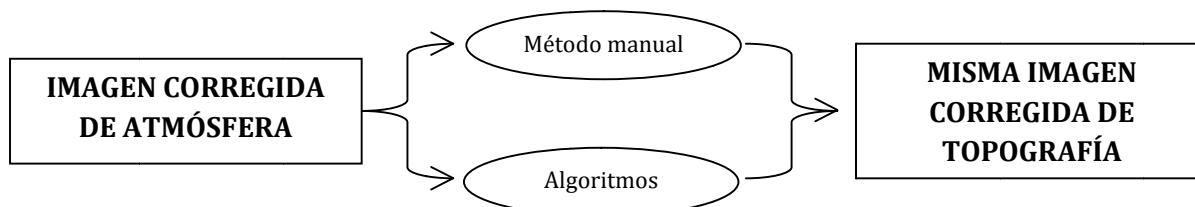


Figura 34: Esquema dos métodos de corrección topográfica.

4.1.3.1. Corrección topográfica manual a modo de comprobación.

La corrección topográfica, explicada de forma teórica anteriormente, se puede realizar de modo manual, aplicando directamente en ER Mapper, paso por paso, los cálculos teóricos sobre la misma. Si bien es un método mucho más lento que con la utilización de algoritmos, método que se trata más adelante, es necesaria una primera realización de la misma para comprobar que dichos algoritmos son válidos, además de para una mejor comprensión de su mecanismo.

1. Creación de p_x y p_y .

El primer paso consiste en la elaboración de una imagen que contenga dos modelos de pendientes correspondientes a las x y las y (pendientes horizontales y verticales respectivamente). Para este estudio, se ha partido de los datos de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que abarque todo el Principado de Asturias (Tabla 13), objetivo geográfico del proyecto, con una resolución igual a la de las imágenes tomadas por el sensor Landsat TM (Figura 35).



Tamaño de celda	30 m
Extensión (x)	7798.08
Extensión (y)	2953.03

Tabla 13: Extensión y resolución MDE.

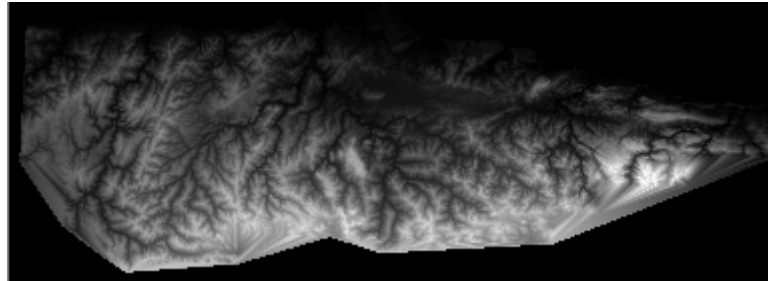


Figura 35: MDE de Asturias.

Para p_x se elabora el siguiente filtro o kernel, de dimensión 3x3 (Figura 36) y a dividir entre un factor de escala de 180 (3 x 2 x resolución espacial de la imagen en metros):

$$\begin{array}{c|c|c} -1 & 0 & 1 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -1 & 0 & 1 \end{array}$$

Figura 36: Filtro base para obtener p_x ha de dividirse por 180 para obtener p_x .

Y para p_y se realiza, con las mismas características que para p_x , el siguiente filtro (Figura 37) dividido por 180:

$$\begin{array}{c|c|c} 1 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & -1 & -1 \end{array}$$

Figura 37: Filtro base para obtener p_y ha de dividirse por 180 para obtener p_y .

En el entorno de ER Mapper, la elaboración de los mapas de pendientes se consigue creando un algoritmo de dos capas, en las que se cargan en ambas los datos del MDE y, a continuación, se le introducen los filtros con la herramienta correspondiente. El resultado es una imagen con las capas p_x y p_y común a todas las fechas a estudiar.

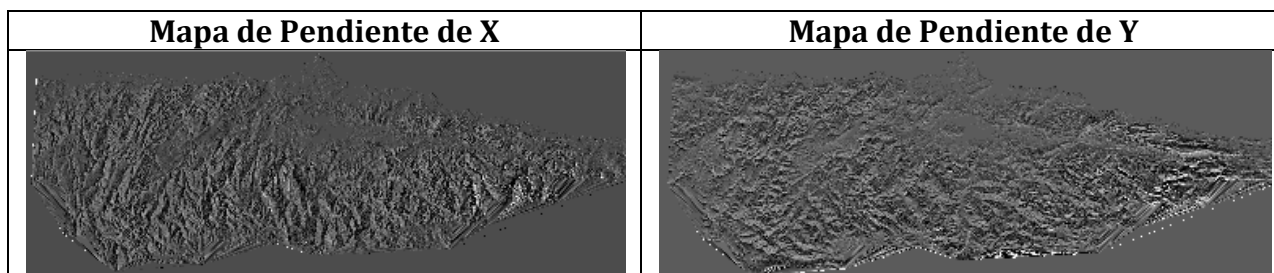


Tabla 14: Modelos de pendiente de x e y.

2. Ángulos de observación (e) e incidencia(i).

Los principales parámetros de la corrección topográfica, aquellos utilizados para el cálculo del resto de parámetros utilizados para obtener la imagen final corregida, son los ángulos de observación e incidencia, explicados en la Sección 3.1.4. Para el cálculo del coseno de e se utiliza la Ecuación 06.

Así, se procede a materializar el resultado de la fórmula en un entorno ER Mapper, mediante la elaboración de un algoritmo simple que, con una sola fórmula, y tomando como datos la pendiente de x y la pendiente de y, puede elaborar un modelo de coseno de e para la zona de estudio (Figura 38).

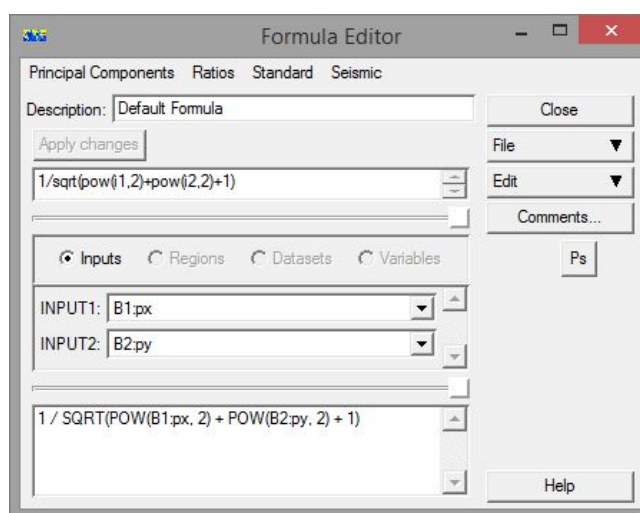


Figura 38: Fórmula en ER Mapper para el cálculo del coseno de e .

Resultando de ello un modelo en el que cada píxel esté representado el valor correspondiente al coseno del ángulo de observación en esa zona, con las mismas dimensiones que el MDE del que se ha partido (Figura 39).



Figura 39: Modelo representando el coseno del ángulo e .

Para la posterior utilización del modelo creado para el cálculo del coseno del ángulo de incidencia, es necesaria la elaboración de un archivo con las siguientes capas (Tabla 15):

Capa	Dato
1	Mapa de pendiente en x
2	Mapa de pendiente en y
3	Coseno de e

Tabla 15: Disposición de las capas algoritmo del coseno de i .

Del mismo modo que para el cálculo del coseno del ángulo e , se ejecuta la definición teórica de su fórmula (Ecuación 06) en el contexto de ER Mapper, de nuevo mediante una fórmula en un algoritmo creado con la imagen elaborada con p_x , p_y y $\cos e$.

Siendo s_x y s_y la tangente del ángulo vertical del sol multiplicada por el seno y el coseno del azimut solar respectivamente. Así, Se introduce entonces la fórmula en el programa de la forma mostrada en la Figura 40.

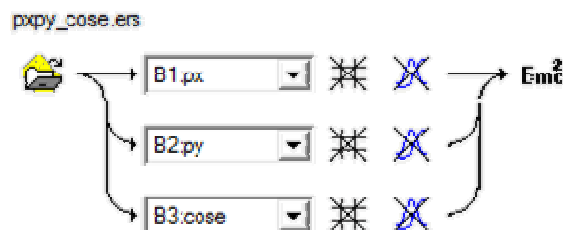


Figura 40: Distribución de capas algoritmo coseno de i .

El resultado es una imagen que representa el coseno del ángulo de incidencia i . Aún con el ángulo creado, es necesaria la realización de un paso adicional para conservar únicamente los valores positivos del modelo (Figura 41).

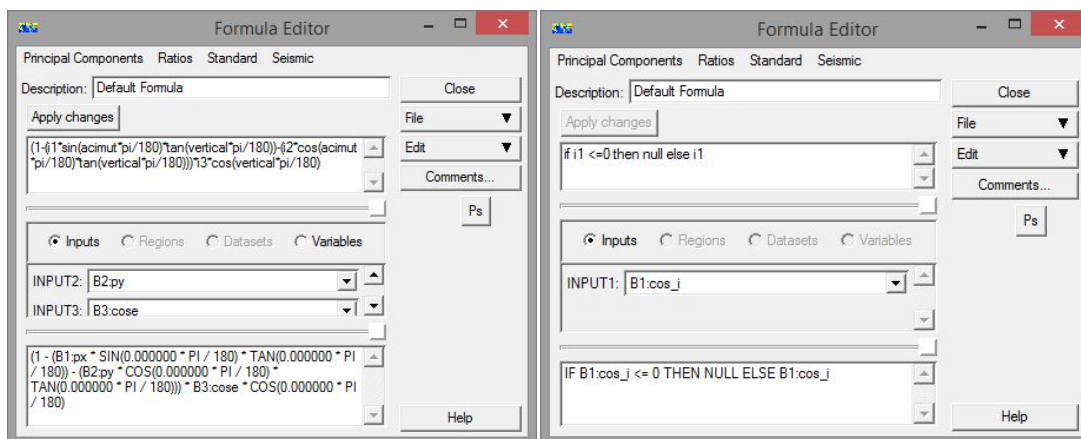


Figura 41: Fórmula en ER Mapper para el cálculo del coseno de i y aislamiento de valores positivos.

El modelo (Figura 42), entonces, contendrá en cada píxel su valor para el coseno del ángulo de incidencia, salvo para aquellas zonas en las que dicho valor sea menor o igual a 0, en las cuales el valor final será nulo.



Figura 42: Modelo representando el coseno del ángulo i .

El resultado de los modelos de los cosenos de ambos ángulos será, tal como se hizo en pasos anteriores, combinado en un nuevo archivo (Tabla 16).

Capa	Dato
1	Coseno de e
2	Coseno de i

Tabla 16: Disposición de las capas archivo con coseno de e y coseno de i .

3. Creación de X e Y.

El siguiente paso es necesario para la obtención de los factores k , uno por banda e imagen. Como se ha hecho anteriormente, se implementan en ER Mapper las Ecuaciones 18 y 19.



$$y_n = \ln(ND_n \cdot \cos e) \quad (18)$$

$$x = \ln(\cos i \cdot \cos e) \quad (19)$$

Siendo la información del coseno de i la obtenida al despreciar los valores iguales o menores a cero.

y (ej. banda 1)	x

Tabla 17: Algoritmos del cálculo de y y x .

El resultado (Figura 43) será una imagen que tenga una y para cada banda (salvo la banda 6, correspondiente al térmico y que no se va a corregir) para cada banda y una x . Se puede ver la distribución de capas de la imagen en la Tabla 18.

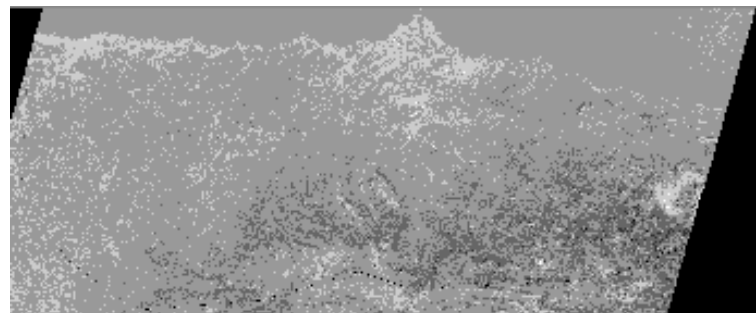


Figura 43: Modelo representando y_1 (ejemplo).



Capa	Dato
1	Y_1
2	Y_2
3	Y_3
4	Y_4
5	Y_5
6	Y_7
7	X

Tabla 18: Disposición de las capas archivo con todas las y y x.

4. Estadísticas de X e Y en la zona K.

El estudio que permitirá sacar unos coeficientes que se utilizarán para la elaboración de aquellos parámetros utilizados para la corrección topográfica se realiza sobre la zona K, que ha de ser lo más parecida posible en cada imagen. Para la definición de una zona K (Figura 44) en la imagen obtenida, se ha de implementar un vectorial que conforme uno o más polígonos relativos a la zona.

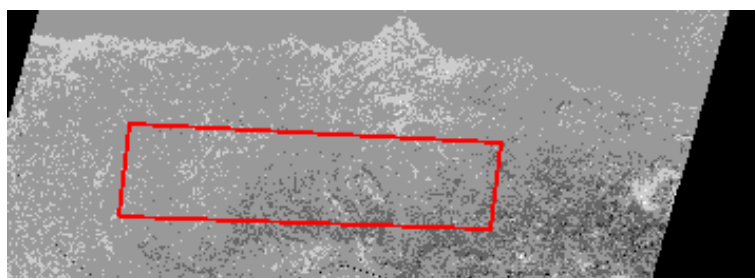


Figura 44: Modelo representando y1y la zona k.

Ha de tenerse en cuenta que, aunque es altamente conveniente que la zona K sea la misma para todas las imágenes, se han de evitar las nubes. Así pues, para algunas imágenes se ha creado una zona K específica a su fecha que busque la forma más semejante a la zona K genérica pero excluyendo las zonas con nubes (Figura 45). Así, se ha de crear una región K para cada imagen, muchas de ellas partiendo del mismo vectorial genérico.

Se calculan ahora las estadísticas de la imagen sobre la zona K delimitada anteriormente.

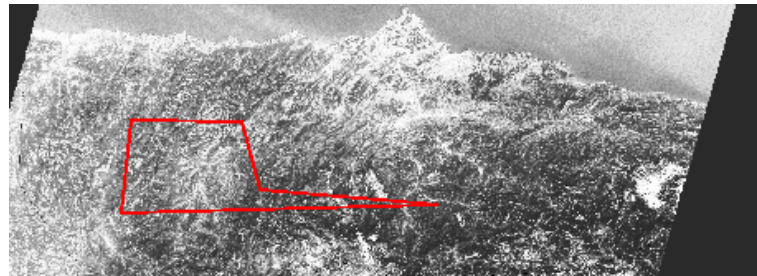


Figura 45: Modelo representando y_{1y} la zona k esquivando las nubes.

Calculando para cada banda el coeficiente k aplicando la siguiente fórmula de la pendiente de una regresión (Ecuación 20):

$$k_n = \frac{r_{Xn}}{\sigma_n} \cdot \sigma_X \quad (20)$$

Se obtiene una estadística como la mostrada en la Figura 46 para la imagen del año 1990, que tomamos como ejemplo de los valores obtenidos.

	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band6	Band7	Band8
Non-Null Cells	3107189	3107189	3107189	3107189	3107189	3107189	3107189	3107189
Area In Hectares	279647.010	279647.010	279647.010	279647.010	279647.010	279647.010	279647.010	279647.010
Area In Acres	691022.863	691022.863	691022.863	691022.863	691022.863	691022.863	691022.863	691022.863
Minimum	-0.616	-0.989	-0.957	-0.395	0.000	121.000	-1.391	-9.894
Maximum	5.342	4.754	5.000	5.166	5.519	255.000	5.529	0.000
Mean	2.961	2.600	2.251	4.196	4.245	149.018	3.208	-0.425
Median	2.968	2.600	2.301	4.232	4.269	147.695	3.177	-0.348
Std. Dev.	0.351	0.338	0.692	0.311	0.341	10.468	0.430	0.306
Std. Dev. (n-1)	0.351	0.338	0.692	0.311	0.341	10.468	0.430	0.306
Corr. Eigenval.	5.685	1.224	0.504	0.301	0.164	0.074	0.033	0.015
Cov. Eigenval.	110.156	0.403	0.142	0.038	0.024	0.017	0.005	0.002

Correlation Matrix	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band6	Band7	Band8
Band1	1.000	0.920	0.896	0.140	0.685	0.653	0.792	0.511
Band2	0.920	1.000	0.947	0.313	0.827	0.705	0.892	0.607
Band3	0.896	0.947	1.000	0.162	0.785	0.743	0.900	0.545
Band4	0.140	0.313	0.162	1.000	0.605	0.155	0.311	0.569
Band5	0.685	0.827	0.785	0.605	1.000	0.682	0.927	0.705
Band6	0.653	0.705	0.743	0.155	0.682	1.000	0.761	0.641
Band7	0.792	0.892	0.900	0.311	0.927	0.761	1.000	0.619
Band8	0.511	0.607	0.545	0.569	0.705	0.641	0.619	1.000
Determinant	0.000							

Figura 46: Estadísticas de k para 1990 en ER Mapper.

En este caso, los datos de interés para el cálculo de las k son los siguientes (Tabla 19):

σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_7	σ_X
0.351	0.338	0.692	0.311	0.341	0.430	0.306

Γ_{81}	Γ_{82}	Γ_{83}	Γ_{84}	Γ_{85}	Γ_{87}
0.511	0.607	0.545	0.569	0.705	0.619

Tabla 19: Estadísticas de k necesarias para el cálculo de sus parámetros.



Aunque la teoría indica que la k tiende a crecer con la longitud de onda, en la práctica no son pocas las excepciones a esta norma.

5. Obtención de τ y corrección topográfica.

Habiéndose calculado todos los parámetros y variables necesarios para el cálculo de los coeficientes τ utilizados para la corrección topográfica, el siguiente paso consiste en el cálculo de los mismos. La fórmula teórica de los coeficientes τ es la ya vista en la Ecuación 10:

Aplicándolo como fórmula en un algoritmo de ER Mapper (Figuras 47 y 48).

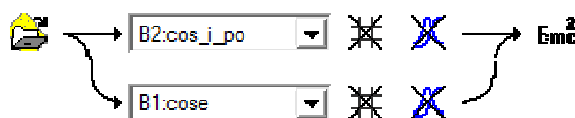


Figura 47: Disposición de las bandas en el algoritmo τ .

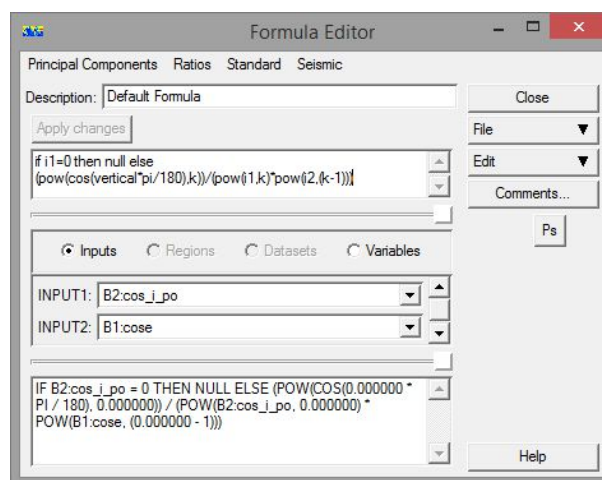


Figura 48: Fórmula en ER Mapper para la obtención de τ .

Siendo los inputs a utilizar los cosenos de i y de e , e introduciendo dos variables en las diferentes bandas (Tabla 20):

Variable 1	k_n
Variable 2	Ángulo vertical solar.

Tabla 20: Variables utilizadas en el cálculo de τ .

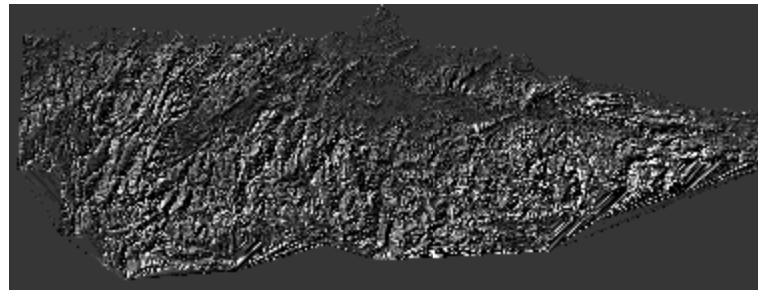


Figura 49: Modelo de τ .

Resultando así una τ para cada banda e imagen (Figura 49). Por último, la imagen corregida de topografía será el producto de multiplicar cada τ por su banda correspondiente, acorde a la fórmula vista en la Ecuación 21.

$$ND_{banda\ n}^{TOPO} = ND_{banda\ n} \cdot \tau_n \quad (21)$$

Se ha de crear, entonces, un archivo que contenga toda la información espectral de la imagen tomada por Landsat TM y, a su vez, todos los valores τ calculados previamente (Tabla 21).

Capa	Dato	Capa	Dato
1	Banda 1 atmo	8	τ_1
2	Banda 2 atmo	9	τ_2
3	Banda 3 atmo	10	τ_3
4	Banda 4 atmo	11	τ_4
5	Banda 5 atmo	12	τ_5
6	Banda 6	13	τ_7
7	Banda 7 atmo		

Tabla 21: Disposición de las capas para la corrección topográfica manual.

El último paso consiste en la creación de un algoritmo (Figuras 50 y 51) en el que, previa carga del archivo recién creado, se multiplique cada banda por su coeficiente τ correspondiente, exceptuando la banda 6 que seguirá inalterada.



Figura 50: Disposición de las bandas en el algoritmo de la corrección topográfica manual.

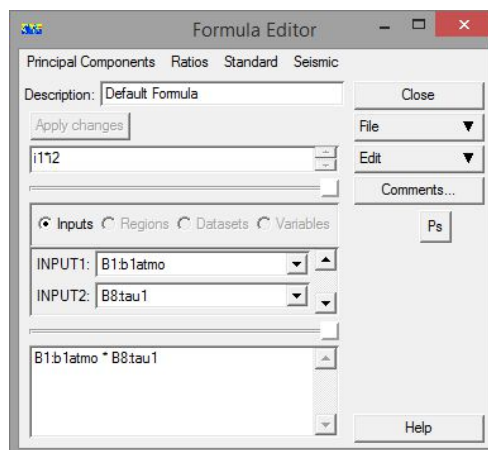


Figura 51: Fórmula en ER Mapper de la corrección topográfica manual.

El resultado será el de la imagen corregida de topografía (Figura 52). Se almacena como enteros de 8bits.

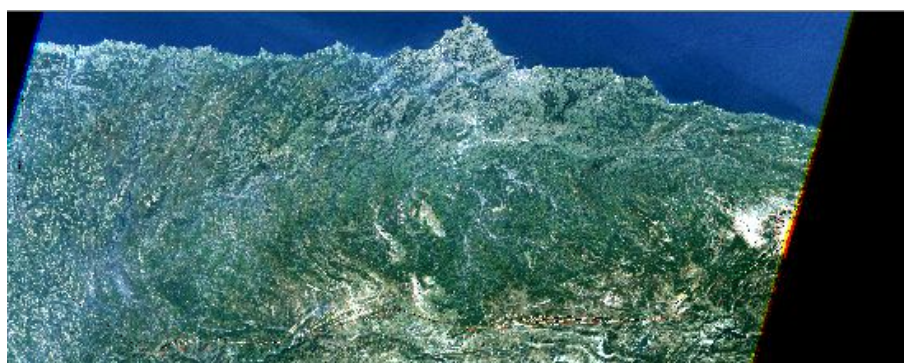


Figura 52: Imagen corregida de topografía manualmente.

El método empleado para la corrección topográfica es, en este caso, totalmente fiable. Sin embargo, es largo y con numerosos pasos en los que el usuario ha de introducir manualmente una larga serie de datos y calcular una gran cantidad de fórmulas. Todo ello provocando que sea mucho más fácil que se produzca un error por parte del mismo.

De esta manera, se ha de buscar un método mucho más automatizado y más corto a la larga, siempre y cuando se compruebe que los resultados entre ambos procesos son los mismos.



4.1.3.2. Corrección topográfica mediante algoritmos.

Teniendo en cuenta que ha de hacerse una vez la corrección a modo manual y mediante algoritmos para comprobar que los resultados son los mismos, la corrección topográfica mediante algoritmos en ER Mapper es, comparada con la manual, un método mucho más rápido y automático para corregir las imágenes.

1. Preparación de la zona k y la imagen con MDE.

En este paso será crucial tener siempre en cuenta los datos altimétricos de cada píxel en la imagen. Para ello, y por la definición de las fórmulas incluidas en los algoritmos a utilizar, el primer paso será elaborar un fichero que contenga las siete capas correspondientes a la imagen corregida de atmósfera, además de una octava capa que contenga el Modelo Digital de Elevaciones correspondiente al Principado de Asturias, zona a estudiar (Tabla 22).

Capa	Dato
1	Banda 1
2	Banda 2
3	Banda 3
4	Banda 4
5	Banda 5
6	Banda 6
7	Banda 7
8	MDE

Tabla 22: Disposición de las capas para archivo que combine las bandas con el MDE.

Debido a que las dos fuentes de datos poseen distintas extensiones, se normalizan las de la imagen final, en este caso, según la extensión de la imagen captada por el satélite.

Imagen corregida de atmósfera → Set geolink to window

Bandas_MDE → Set geolink to window



Así, en este caso, las extensiones quedarán de la siguiente forma (Tabla 23), aunque cada captura pueda tener distintas coordenadas, por lo que se pondrá como ejemplo 2004.

Imagen	Extensión X	Extensión Y
2004_atmo	8190.00	5737.00
MDE	7798.08	2953.03
2004_MDE	8190.00	5737.00

Tabla 23: Extensión de los archivos involucrados en la creación de los archivos con bandas + MDE.

La zona K se crea del mismo modo que para la corrección topográfica manual.

2. Estadísticas de k en x e y.

Una vez se posea un fichero en el cual a las siete bandas se les haya incluido una capa con el MDE y una región k, se procede a la ejecución del algoritmo que calcula x e y (B y A en el algoritmo; Figura 53) a partir del coseno de los ángulos de incidencia (i) y de observación (e). Para obtener x e y, se requiere información de las bandas de la imagen tomada y del MDE, por lo que se carga la imagen creada en el paso anterior.

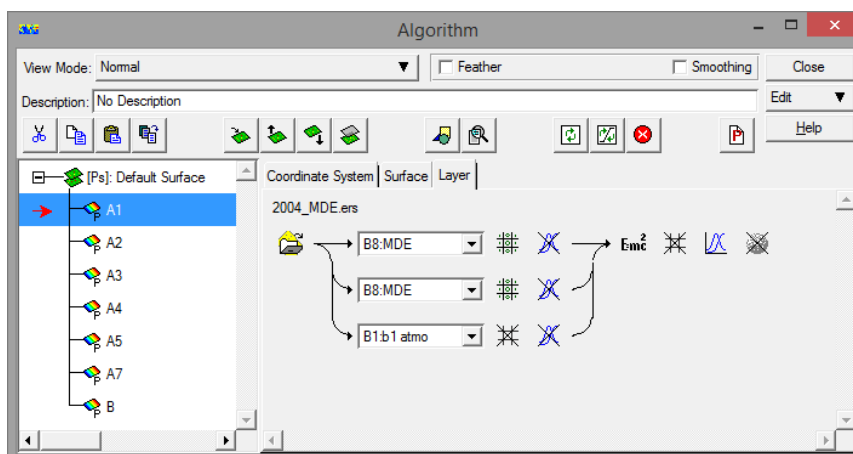


Figura 53: Algoritmo en ER Mapper para la obtención de las y más la x (A y B en él).

La fórmula empleada es resultado de la combinación de los diferentes pasos, teniendo en cuenta el cálculo de los diferentes parámetros a tener en cuenta para el cálculo de x e y, con el fin de calcular las estadísticas para la zona k de las mismas. Para una banda cualquiera, el cálculo de la y se muestra en la Figura 54:

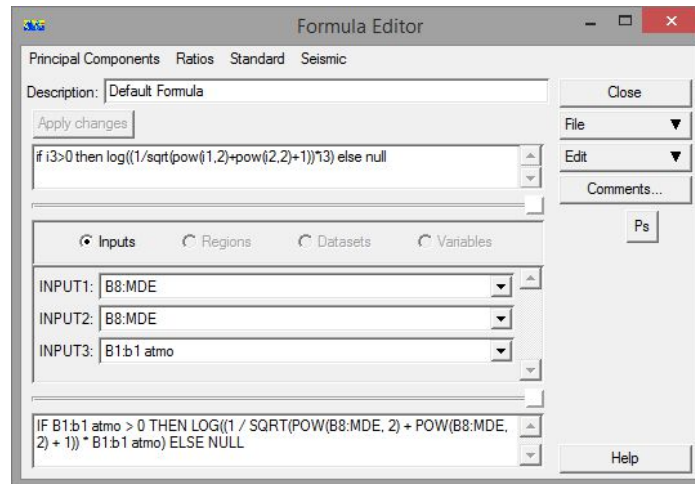


Figura 54: Fórmula en ER Mapper para la obtención de la y.

En este paso, el elemento diferenciador que tendrá cada archivo de y será la banda que, naturalmente, será la que corresponda a cada fecha.

En cuanto a la banda x de cada imagen, se elaborará únicamente con el MDE como dato. Así, las variables en cada caso serán el acimut solar y el ángulo vertical del Sol, diferente para cada fecha (Figura 55).

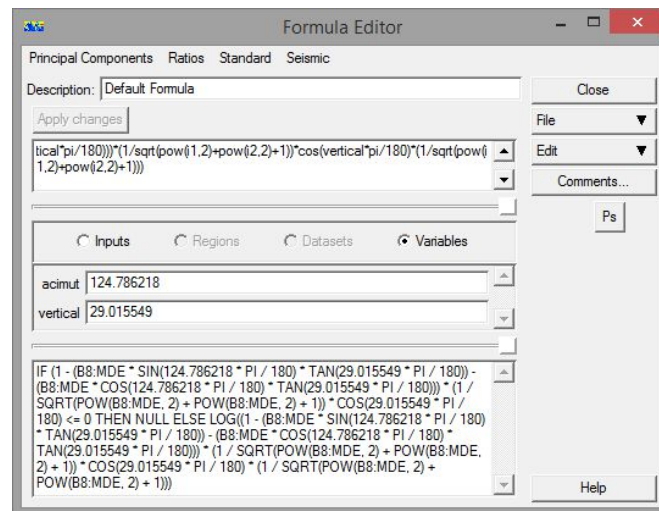


Figura 55: Fórmula en ER Mapper para la obtención de la x.

En los metadatos de las imágenes se indican el acimut y el ángulo horizontal del Sol; de éste último calculamos el ángulo vertical, ya que son complementarios. Los tres datos solares para las imágenes usadas en este estudio se muestran en la Tabla 24.



Fecha	Acimut del sol (°)	Elevación del sol (°)	Ángulo vertical (°)
29/04/1985	134.2459	53.7354	36.2645
06/08/1986	126.4558	53.1409	36.8590
10/09/1987	141.3200	46.0700	43.9300
19/06/1989	124.0554	60.7488	29.2512
01/10/1989	147.1108	38.2595	51.7404
01/08/1990	124.4132	53.8453	36.1544
25/05/1991	124.1759	57.2274	32.7726
07/10/1991	148.2496	36.3334	53.6665
08/07/1993	120.4535	57.7706	32.2293
14/06/1996	117.9558	57.6558	32.3441
14/04/1997	136.6189	48.7478	41.2521
07/08/1998	132.4220	55.2906	34.7093
09/07/1999	125.6197	60.0331	29.9668
25/06/2000	124.7862	60.9844	29.0154
20/06/2001	129.9860	44.1516	45.8483
27/09/2002	152.6776	41.6651	48.3349
05/08/2003	131.0926	55.5131	34.4869
02/06/2004	129.3330	61.6349	28.3651
27/09/2005	152.8718	44.1530	45.8470
31/07/2007	135.7768	58.7543	31.2457
02/08/2008	133.7744	57.2254	32.7746
02/06/2009	132,5474	62,4234	27,5766
06/09/2009	146.8154	48.5994	41.4005
21/06/2010	130.4014	63.2010	26.7990
24/06/2011	129.6599	62.9108	27.0891

Tabla 24: Ángulos solares de todas las imágenes.

En este caso, la extensión de la imagen será la misma que la del MDE, ya que los datos de la imagen que se encuentran fuera del mismo no resultan de interés para este estudio, ya que no se puede corregir de topografía una imagen sin poseer un MDE correspondiente a dicha zona. Así, se realiza la misma tarea que en el paso anterior, aunque se cambian las imágenes sobre las que se realiza.



MDE → *Set geolink to window*

YX → *Set geolink to window*

Así, las extensiones de los ficheros correspondientes, en este caso para el ejemplo del año 2004, resulta la siguiente (Tabla 25):

Imagen	Extensión X	Extensión Y
2004_MDE	8190.00	5737.00
MDE	7798.08	2953.03
YX_2004	7798.08	2953.03

Tabla 25: Extensiones de los archivos involucrados en la creación de los archivos y y x.

El resultado será una imagen con siete bandas: seis y, cada una correspondiente a cada una de las bandas Landsat (excluyendo la 6, que no se corrige); y una x, distinta para cada fecha al depender de los datos solares (Figura 56).

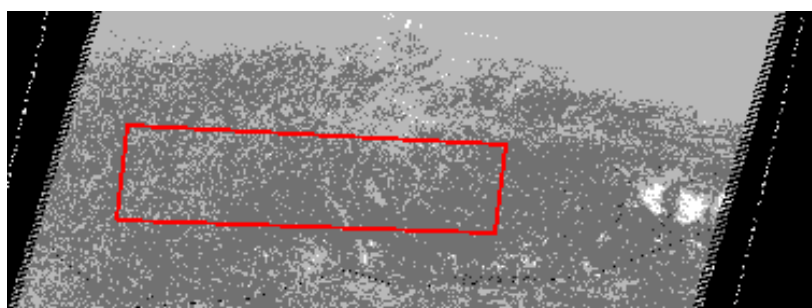


Figura 56: Modelo de y_1 (mediante algoritmos) con zona k.

El siguiente paso consiste en realizar las estadísticas para la zona K y, con ellas, calcular las variables k para cada banda e imagen, del mismo modo en que se ha realizado a como se realizó en el paso anterior (Ecuación 19).

3. Corrección topográfica.

De esta manera, se procede a la utilización de un segundo algoritmo que, tomando de nuevo como base la extensión de terreno del MDE y los datos del fichero creado a partir de las bandas más el MDE se obtiene la imagen corregida de topografía.



Este algoritmo posee una fórmula que integra p_x y p_y mediante sendos filtros, así como las bandas para la creación del parámetro τ , basándose también en los cosenos de los ángulos e e i . así como para su corrección topográfica final mediante su multiplicación por dicho parámetro en la misma fórmula (Figura 57).

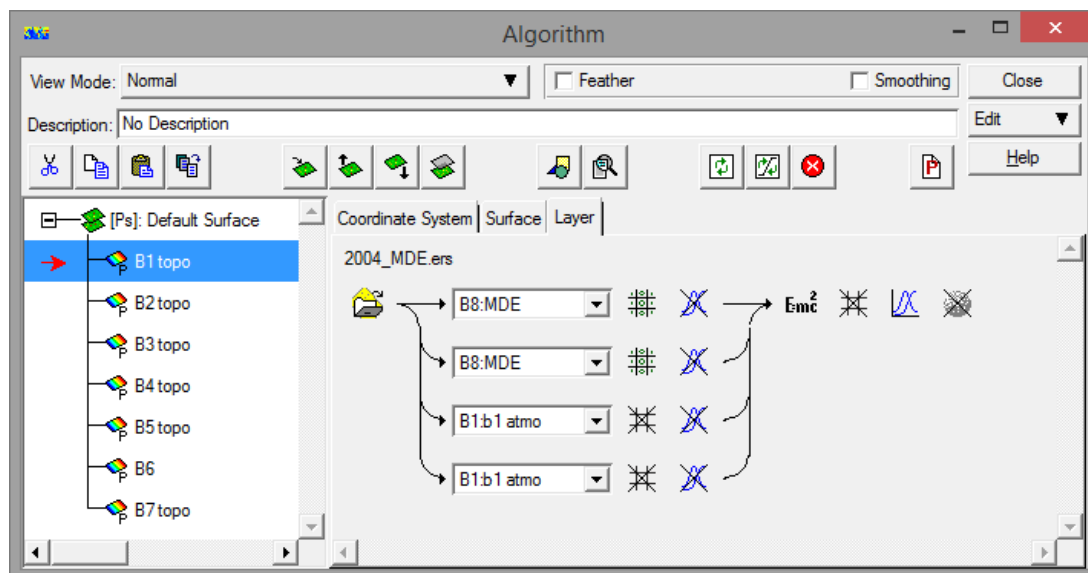


Figura 57: Algoritmo en ER Mapper para la obtención de la imagen corregida de topografía por algoritmos.

El algoritmo combina una serie de pasos para la realización en uno único de toda la corrección topográfica toda vez se conozcan tanto los ángulos solares, anteriormente utilizados, como las k , obtenidas en el paso anterior. Los valores k obtenidos para todas las imágenes se muestran en la Tabla 26.

	1985	1989	1990	1991	2004	2005	2007	2008	2009	2010	2011
K1	0,43	0,63	0,57	0,46	0,35	0,47	0,58	0,48	0,41	0,55	0,60
K2	0,54	0,65	0,67	0,53	0,45	0,59	0,59	0,60	0,54	0,60	0,66
K3	0,71	1,03	1,23	0,81	0,55	0,76	1,03	1,08	0,94	0,80	0,96
K4	0,78	0,62	0,58	0,71	0,61	0,74	0,49	0,59	0,57	0,71	0,57
K5	0,69	0,63	0,77	0,66	0,58	0,85	0,71	0,74	0,78	0,72	0,73
K7	0,64	0,65	0,87	0,65	0,56	0,82	1,37	0,77	0,83	0,73	0,81

Tabla 26: Parámetros k para todas las imágenes a corregir de topografía.

Así, para una de las bandas la fórmula a emplear es la expresada en la Figura 58.

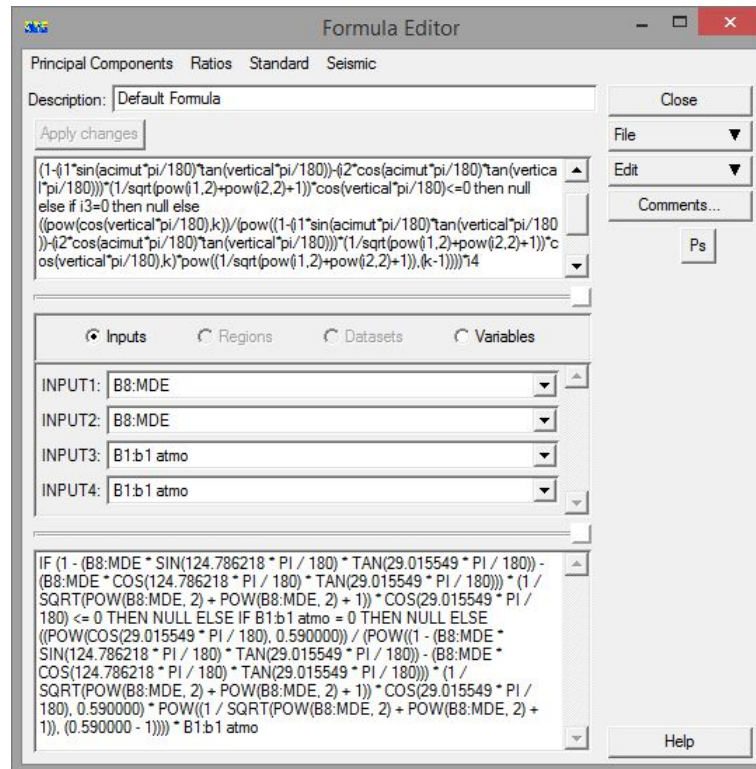


Figura 58: Fórmula en ER Mapper para la obtención de la imagen corregida de topografía por algoritmos.

Teniendo, además, las tres variables citadas anteriormente a utilizar (acimut solar, ángulo vertical del Sol y parámetro k) (Figura 59). Para cada imagen, los ángulos solares varían acorde a la Tabla 24. Asimismo, la k también varía para cada banda y para cada imagen según los valores vistos en la Tabla 26..

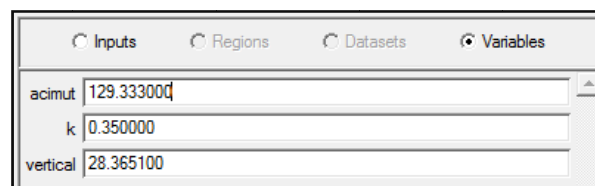


Figura 59: Variables de ER Mapper para la corrección topográfica.

La extensión de la imagen será la misma que la del MDE y de las x e y (Tabla 27 para ejemplo de 2004):



Imagen	Extensión X	Extensión Y
2004_MDE	8190.00	5737.00
MDE	7798.08	2953.03
2004_topo	7798.08	2953.03

Tabla 27: Extensiones de los archivos involucrados en la corrección por topografía de la imagen.

Siendo coherente con la tipología de los datos, y además siendo útil para la eliminación de posibles valores extremos que puedan salir en la utilización del algoritmo, se guarda la imagen como enteros de 8 bits (Figura 60).

El resultado de este paso será la obtención de una imagen corregida de atmósfera y topografía para cada fecha, lista para ser convertida a radiancia. (Figura 60).



Figura 60: Imagen corregida de topografía mediante algoritmos.

Como se puede apreciar, la utilización de este método es mucho más rápida y automática (da menos lugar a errores por parte del usuario) que la aplicación manual del proceso teórico. Así pues, tras la comprobación de que corrigiendo la misma imagen de los dos modos, la imagen resultante es la misma, se ha optado por la utilización de este método para la corrección topográfica de todas las imágenes del estudio. Para la comprobación se ha utilizado la imagen correspondiente a agosto de 1990, debido a que es la que se ha utilizado para la corrección manual. En la Tablas 28 y 29 se muestran los resultados del método manual y por algoritmos, respectivamente.



MANUAL	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
ND Mínimo	0	0	0	0	0	0	0
ND Máximo	255	255	255	255	255	255	255
ND Medio	20.753	13.048	12.024	51.159	60.644	123.685	23.919
Mediana	23	13	10	63	70	143	24
Desv. Típica	12.728	8.474	13.116	36.198	43.404	55.119	19.533

Tabla 28: Estadísticas ejemplo corrección topográfica manual.

ALGORITMOS	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
ND Mínimo	0	0	0	0	0	0	0
ND Máximo	255	255	255	255	255	255	255
ND Medio	20.741	13.048	12.028	51.159	60.605	123.685	24.353
Mediana	23	13	10	63	70	143	24
Desv. Típica	12.717	8.474	13.129	36.198	43.371	55.119	20.205

Tabla 29: Estadísticas ejemplo corrección topográfica mediante algoritmos.

Como se puede apreciar en las estadísticas, las diferencias entre ambas imágenes son despreciables o, incluso, nulas.

4.1.4. CONVERSIÓN A RADIANCIA

El objeto del estudio es la interpretación de una serie de resultados que están obtenidos a partir de parámetros reales. Como ya se ha visto con anterioridad, los sensores de los satélites Landsat almacenan los parámetros físicos en ND. Así pues, una vez la imagen ha pasado por todas las correcciones y comprobaciones necesarias, es necesaria la conversión de dichos ND a parámetros físicos.

Debido a su mayor idoneidad para la realización de la conversión a radiancia de los ND de las imágenes a estudiar, el proceso se realizará, en adelante, con el software ENVI. Existen dos maneras de conversión a radiancia (Siguiendo la Ecuación 12) mediante este software: editar y grabar en la cabecera (*header*) de la imagen la ganancia (*gain*) y el Bias (u *offset*) para la posterior ejecución del comando “*Apply Gain Offset*” automáticamente o la edición de G y B en el propio comando. Se ha optado por la primera, ya que así la información permanece almacenada en la imagen de partida. El esquema se muestra en la Figura 61.

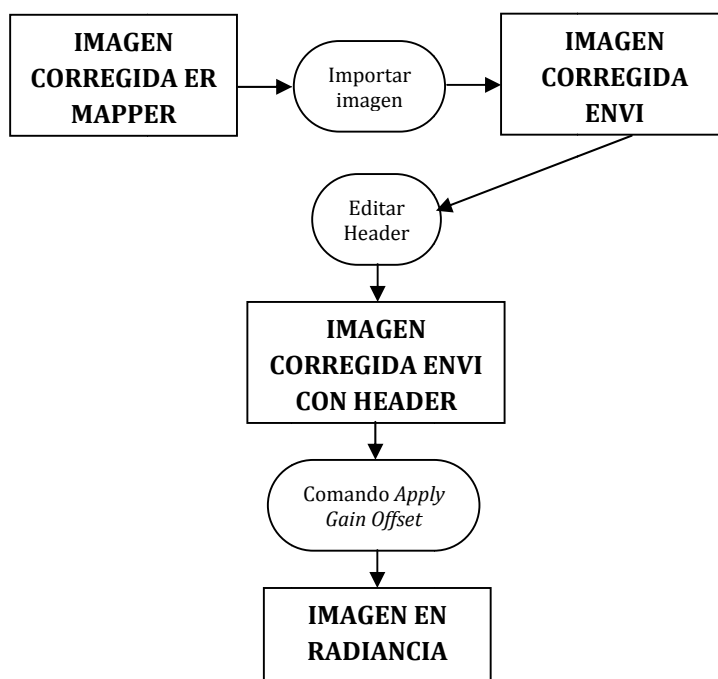


Figura 61: Esquema elaborado para la conversión a radiancia.

Aunque existen otros métodos de conversión de ND a radiancia (L_{max} y L_{min} , distintas ecuaciones, etc.), el método de ganancia y *offset* (G y B) es el método más común utilizado en Landsat, tanto en las imágenes proporcionadas por el PNT como por Glovis. Además, es la forma por defecto de ENVI de convertir las imágenes a radiancia.

4.2.3.1. Migración de los ficheros a ENVI.

ER Mapper, el software específico para teledetección utilizado hasta ahora para corregir las imágenes de atmósfera y topografía, utiliza un formato propio de extensión .ers para sus imágenes ráster (.erv para los vectoriales). Así, una vez se comience la sesión de trabajo en ENVI hay dos opciones de trabajo:

- Convertir la imagen corregida a formato ENVI.
- Importar la imagen .ers sin convertir.

Las nuevas versiones de ENVI permiten el trabajo con imágenes de otros formatos y programas. Así, es posible ahorrar tiempo y espacio trabajando en el formato de origen, ya que las nuevas imágenes se generan en un formato propio de ENVI.



Se pueden cargar diferentes imágenes en un mismo espacio de trabajo, así como distintas bandas (Figura 62). También pueden crearse distintas combinaciones RGB fácilmente. ENVI cuenta con un módulo llamado *Data Manager* que permite crear composiciones de color, seleccionar la banda a visualizar, así como la imagen. También proporciona toda la información de la imagen, como sistema de coordenadas, proyección, tamaño de la imagen o de píxel.

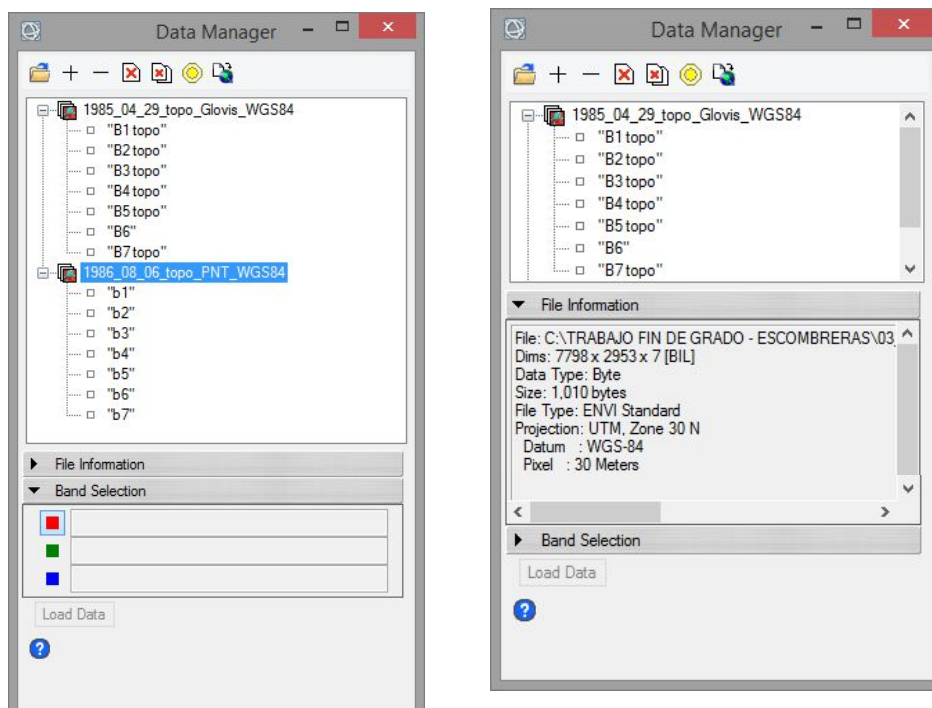


Figura 62: *Data manager* de ENVI.

ENVI 5.0 posee una herramienta propia de exportación de datos a diferentes formatos. En la propia interfaz permite la selección de la extensión a importar, así como la información del fichero. Posteriormente es posible seleccionar el tipo de fichero (Figura 63).

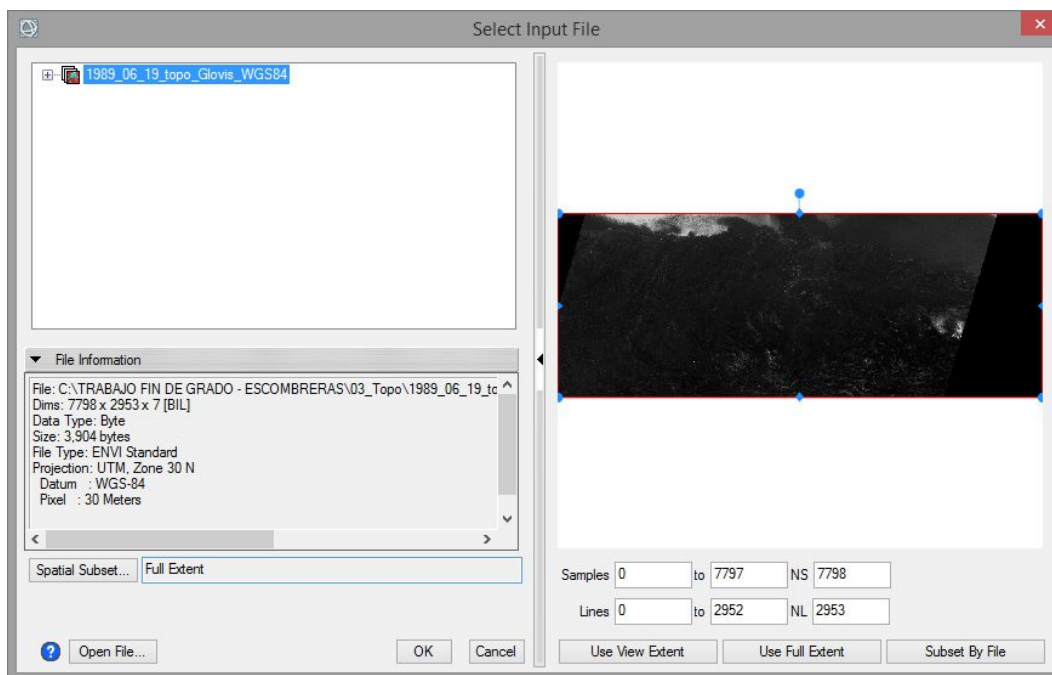


Figura 63: Herramienta de exportación de datos de ENVI.

Es posible guardar la imagen en cualquier formato propio de ENVI. Para ello, se ha de seleccionar *Save as*. (Figura 64).

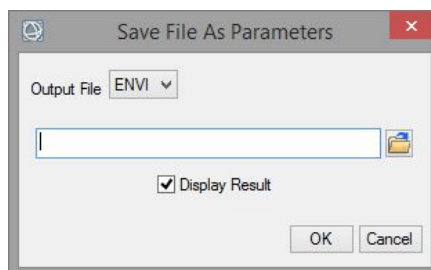


Figura 64: Herramienta de guardado de ENVI.

4.2.3.2. Edición de la cabecera de la imagen.

En el método seleccionado, los parámetros de conversión de ND a radiancia se introducen directamente en los metadatos de cada imagen. Así, permanecen grabados en ellas y su conversión en posteriores estudios será posible.

Así, dichos valores se introducen en los propios parámetros de la imagen mediante un comando de ENVI 5.0 llamado *Edit ENVI Header*. En él, entre la gran



cantidad de metadatos que se pueden modificar, se pueden añadir a la imagen tanto un *offset* para cada banda como una ganancia (Figura 65).

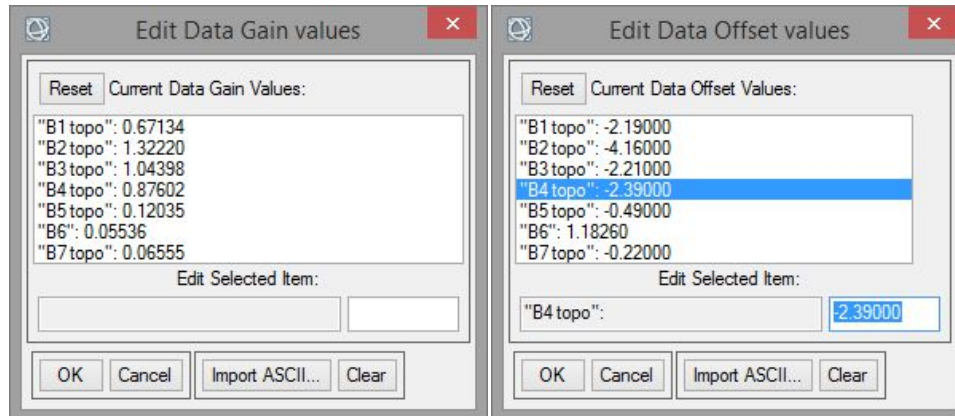


Figura 65: *Gain* y *offset* de la cabecera de la imagen.

Una manera más rápida de introducir estos valores en la cabecera de la imagen es mediante la creación de un archivo ASCII (Figura 66). Para ello, se crea un documento de texto que conste de dos columnas. Así, en cada una se introducen las ganancias y los *offsets*, respectivamente.

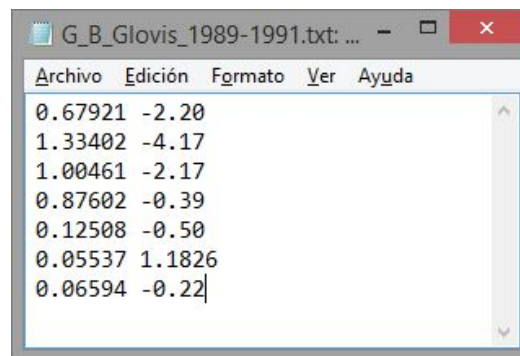


Figura 66: Archivo ASCII con los datos de *Gain* y *offset*.

Como no a todas las imágenes les corresponden los mismos parámetros de conversión a radiancia, pero muchas de ellas sí coinciden (las obtenidas en determinados períodos del mismo sensor), puede realizarse un documento ASCII por cada grupo distinto de parámetros, indicando para qué imágenes son aptos (Tablas 30 y 31).



Bandas	Imágenes GLOVIS					
	TM5		TM5		TM5	
	1985-1988		1989-1991		1992-2011	
	G	B	G	B	G	B
B1	-2,19	0,67134	-2,20	0,67921	-2,29	0,76583
B2	-4,16	1,32220	-4,17	1,33402	-4,29	1,44819
B3	-2,21	1,04398	-2,17	1,00461	-2,21	1,04398
B4	-2,39	0,87602	-2,39	0,87602	-2,39	0,87602
B5	-0,49	0,12035	-0,50	0,12508	-0,49	0,12035
B6	1,1826	0,05536	1,1826	0,05537	1,1826	0,05537
B7	-0,22	0,06555	-0,22	0,06594	-0,22	0,06555

Tabla 30: *Gain* y *offset* para las imágenes del GLOVIS.

Bandas	Imágenes PNT					
	ETM+7		TM5		TM5	
	2000-2002		1984-2008		2009-2011	
	G	B	G	B	G	B
B1	-6,20	0,77570	-1,50	0,60235	-1,52	0,76282
B2	-6,40	0,79570	-2,80	1,17490	-2,84	1,44250
B3	-5,00	0,61920	-1,20	0,80588	-1,17	1,03899
B4	-5,10	0,63730	-1,50	0,81451	-1,51	0,87258
B5	-1,00	0,12570	-0,37	0,10808	-0,37	0,11988
B6	3,20	0,03710	1,2378	0,05516	1,2378	0,05515
B7	-0,35	0,04370	-0,15	0,05698	-0,15	0,06529

Tabla 31: *Gain* y *offset* para las imágenes del PNT.

Al importarlo, ENVI permite seleccionar qué datos extrae de cada columna.

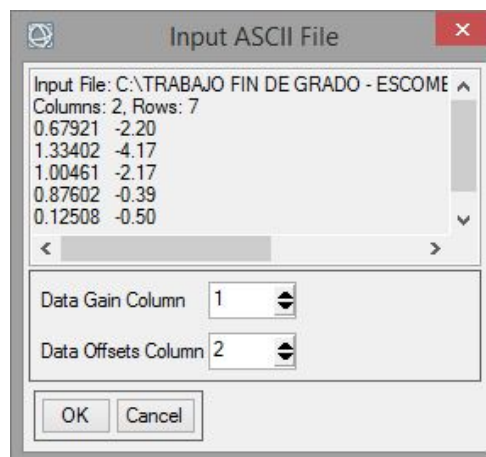


Figura 67: Resultado de insertar el ASCII *Gain* y *offset* en la cabecera.



4.2.3.3. Conversión a Radiancia.

Una vez se han introducido los parámetros de G y B en cada banda e imagen, se ha de aplicar el comando *Gain and Offset Values*. Al habérselo indicado en el *header*, los valores indicados aparecen por defecto en el comando (Figura 68).

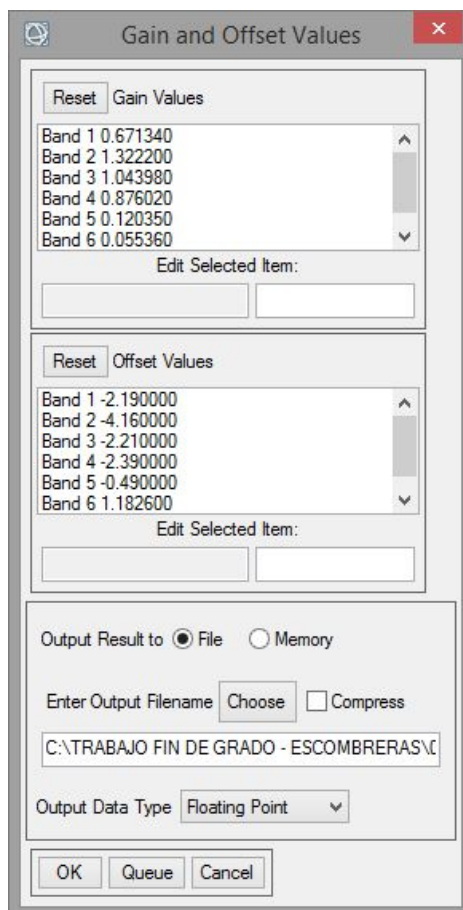


Figura 68: Comando *Gain and Offset Values* con los valores introducidos.

El resultado es la creación directa de un archivo de ENVI 5.0 que contenga las siete bandas convertidas a radiancia.

Para comprobar que la imagen se ha convertido correctamente, es necesaria la observación simultánea en ENVI de la misma banda de las dos imágenes, tanto la de partida en ND como la de salida en radiancia. Estando ambas visibles, se procede a observar su valor en un píxel aleatorio de la imagen. En él, la radiancia del píxel y su nivel digital deben de poseer una relación idéntica a la que sugiere su correspondiente fórmula de la Ecuación 12.



Siguiendo el procedimiento, se visualiza la banda 1 de ambas imágenes y se selecciona un píxel aleatorio (Figura 69).

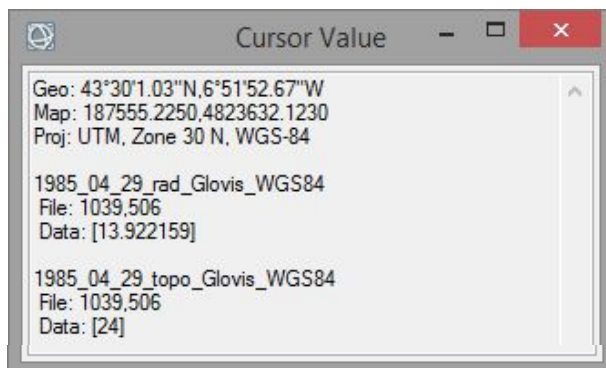


Figura 69: Comprobación de la conversión a radiancia en un píxel aleatorio.

Se ha comprobado que:

$$(24 \cdot 0.67134) - 2.19 = 13.922159$$

Del mismo modo que para la banda 1, se realiza la comprobación de la imagen completa comprobando un píxel aleatorio banda a banda (ejemplo en la Tabla 32).

Banda	Nivel Digital	Radiancia esperada	Radiancia observada
B1rad	24	13.922	13.922
B2rad	26	30.217	30.217
B3rad	12	10.318	10.318
B4rad	78	65.940	65.940
B5rad	75	8.563	8.563
B6rad	135	8.656	8.656
B7rad	48	2.926	2.926

Tabla 32: Comprobación de todas las bandas para 1985.

El que los valores de radiancia calculada y radiancia observada sean iguales indica que la imagen se ha convertido correctamente.



4.2.4. CONVERSIÓN A REFLECTIVIDAD

El índice de vegetación a partir de una imagen de satélite se calcula mediante la reflectividad en diferentes longitudes de onda. Así pues, una vez se ha calculado la radiancia de las imágenes a través de los ND ya corregidos de cada imagen, el siguiente paso ha de ser la conversión de éstas a reflectividad, mediante la aplicación de la fórmula ya vista en la Ecuación 15:

Siendo gran parte de los valores de la fórmula constantes físicas conocidas (Tabla 33).

Banda	$E_{SOL,k}(W/m^2 \mu m)$
1	1957.00
2	1829.00
3	1557.00
4	1047.00
5	219.30
7	74.52

π	3,141592654
D^2	1

Tabla 33: Parámetros solares necesarios para conversión a reflectividad.

Uno de los principales problemas de ENVI 5.0 es que dificulta considerablemente la operación con imágenes siempre que la salida sea una con más de una banda. Mientras que se podrían calcular, mediante el comando *band math*, las bandas una a una y luego combinarlas, se ha optado por la multiplicación de todas las bandas por una constante en cada una de ellas, (Ecuación 22).

$$\rho_{\lambda} = L_{\lambda} \frac{D \cdot \pi}{E_{SOL,\lambda} \cdot \cos V} = L_{\lambda} \cdot C_{\lambda}^n \quad (22)$$

Así, las constantes por las que multiplicar la imagen (Tabla 34) se han obtenido mediante la elaboración de una hoja de cálculo en la que se ha aplicado directamente la fórmula.



IMAGEN	V	C _{Banda 1}	C _{Banda 2}	C _{Banda 3}	C _{Banda 4}	C _{Banda 5}	C _{Banda 7}
29/04/1985	36,2645	0,199097	0,213031	0,250246	0,372142	1,776713	5,228572
06/08/1986	36,8590	0,200635	0,214676	0,252179	0,375017	1,790438	5,268962
10/09/1987	43,9300	0,222902	0,238501	0,280166	0,416637	1,989140	5,853710
19/06/1989	29,2512	0,183993	0,196869	0,231261	0,343910	1,641923	4,831908
01/10/1989	51,7404	0,259245	0,277388	0,325846	0,484568	2,313462	6,808135
01/08/1990	36,1544	0,198817	0,212731	0,249894	0,371619	1,774215	5,221221
25/05/1991	32,7726	0,190921	0,204282	0,239969	0,356860	1,703748	5,013847
07/10/1991	53,6665	0,270946	0,289907	0,340553	0,506438	2,417878	7,115414
08/07/1993	32,2293	0,189771	0,203052	0,238524	0,354710	1,693486	4,983649
14/06/1996	32,3441	0,190011	0,203309	0,238826	0,355159	1,695632	4,989962
14/04/1997	41,2521	0,213524	0,228468	0,268380	0,399109	1,905460	5,607453
07/08/1998	34,7093	0,195281	0,208947	0,245450	0,365009	1,742658	5,128353
09/07/1999	29,9668	0,185303	0,198272	0,232909	0,346360	1,653619	4,866326
25/06/2000	29,0154	0,183571	0,196418	0,230731	0,343122	1,638161	4,820838
20/06/2001	45,8483	0,230462	0,246591	0,289669	0,430769	2,056612	6,052268
27/09/2002	48,3349	0,241482	0,258381	0,303519	0,451365	2,154945	6,341647
05/08/2003	34,4869	0,194759	0,208389	0,244793	0,364033	1,737998	5,114640
02/06/2004	28,3651	0,182434	0,195202	0,229303	0,340997	1,628018	4,790986
27/09/2005	45,8470	0,230457	0,246585	0,289662	0,430759	2,056564	6,052127
31/07/2007	31,2457	0,187766	0,200907	0,236004	0,350964	1,675599	4,931010
02/08/2008	32,7746	0,190925	0,204287	0,239975	0,356868	1,703786	5,013960
20/06/2009	27,5766	0,181106	0,193780	0,227633	0,338514	1,616163	4,756099
06/09/2009	41,4005	0,214011	0,228989	0,268992	0,400019	1,909805	5,620239
21/06/2010	26,7990	0,179848	0,192434	0,226052	0,336163	1,604935	4,723057
24/06/2011	27,0891	0,180311	0,192930	0,226634	0,337029	1,609071	4,735228

Tabla 34: Constantes por las que multiplicar las imágenes de radiancia para obtener reflectividad.

Del mismo modo como se calcularon las radiancias, se han transformado las imágenes a reflectividad utilizando la herramienta *Gain Offset* para la materialización de la siguiente fórmula (Ecuación 23):

$$\rho_{\lambda} = L_{\lambda} \cdot G + B \quad (23)$$

Donde, en cada caso:

$$G = C \text{ y } B = 0$$



Así, por ejemplo, para la primera imagen, correspondiente a 1985 (Tabla 35):

Banda	Gain (a1) = K	Offset (a0)
1	0,199097	0
2	0,213031	0
3	0,250246	0
4	0,372142	0
5	1,776713	0
7	5,228572	0

Tabla 35: Ejemplo de aplicación del comando *Gain and Offset Values* para la conversión a reflectividad.

Ha de tenerse en cuenta que la banda 6 no se convierte a reflectividad, al pertenecer al infrarrojo térmico. Así pues, las opciones son eliminar la banda 6 con el gestor de archivos o convertirla a temperatura (no se ha realizado, ya que es un proceso laborioso y no es de utilidad para el actual estudio). Se ha optado, para mantener la coherencia en los archivos ASCII, por mantenerla con *offset* y *gain* 0 y, posteriormente, eliminarla. De nuevo, se ha aplicado el comando en ENVI 5.0.

El resultado es la creación de una imagen de seis bandas (1 a 5 y 7) de reflectividad y una banda en blanco (6). Se ha comprobado en un píxel aleatorio de la imagen de 1985 si se cumple la fórmula (Figura 70).

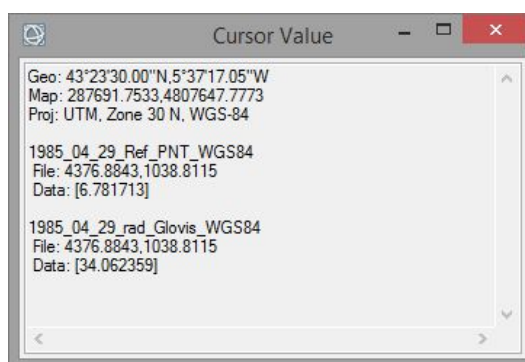


Figura 70: Comprobación de la conversión a reflectividad en un píxel aleatorio.

Se cumple que $0.199097 \cdot 34.062359 = 6.781713$, por lo que la imagen se ha convertido a reflectividad de forma satisfactoria.



4.1.6. CÁLCULO DEL NDVI

Una vez se han obtenido las reflectividades, el último paso para la obtención de los índices de vegetación de la zona a estudiar para cada imagen es la aplicación de la fórmula del NDVI (Ecuación 16).

En este caso, ENVI 5.0 posee un comando específico que calcula el NDVI de una imagen de reflectividades. Con la imagen ya cargada, se ha ejecutado el comando de ENVI *NDVI* (Figura 71).

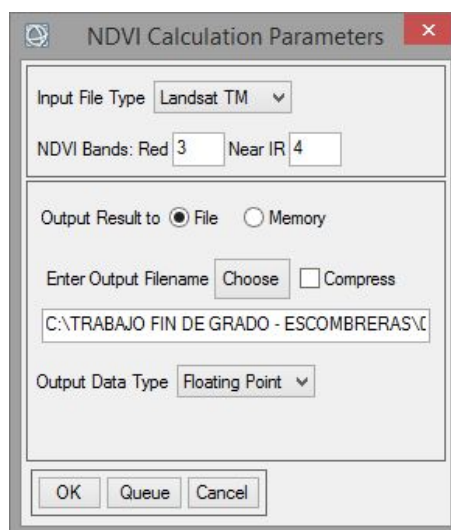


Figura 71: Comando NDVI de ENVI.

Donde se ha indicado que la banda correspondiente al rojo es la 3 y al NIR, la 4. Al seleccionar el tipo de sensor, siendo éste, por ejemplo, Landsat TM o ETM+, el propio programa lo establece por defecto (Figura 71).

Así, se han obtenido finalmente los índices de vegetación (Figura 72) que, mediante el uso de SIG, se utilizarán para el estudio multitemporal de la vegetación en las escombreras del Principado de Asturias.

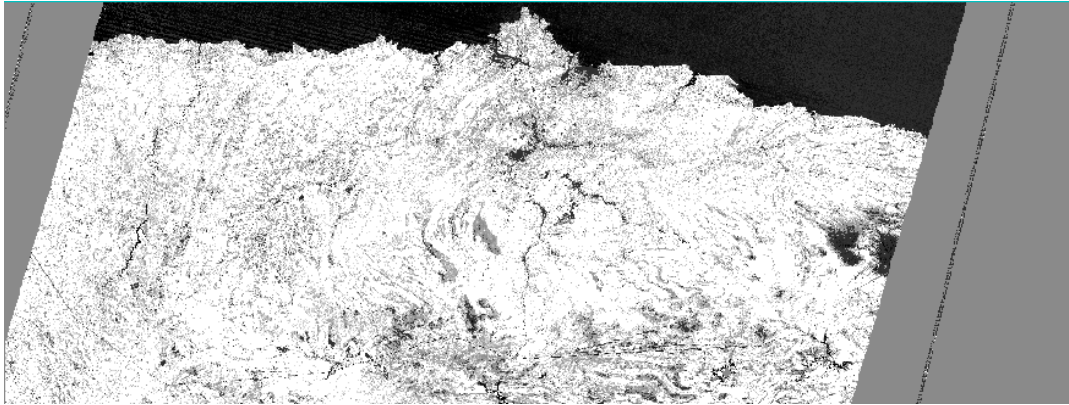


Figura 72: Modelo de NDVI para 1985.



4.2: ESTUDIO MEDIANTE SIG

Una vez los modelos de índice de vegetación se han calculado para todo el contexto geográfico y temporal del estudio, se elaborará un SIG (Sistema de Información Geográfica) para el posterior estudio temporal de la calidad de la vegetación en las escombreras de Asturias.

4.2.1. IMPLEMENTACIÓN Y FLUJO DE TRABAJO.

El primer paso, necesario para todo tipo de trabajo mediante Sistemas de Información Geográfica, ha consistido en la generación de un espacio de trabajo. Además, se ha de definir el flujo de trabajo para organizar y ordenar las funciones a elaborar, así como los archivos a crear, para obtener unos resultados que permitan llegar a unas conclusiones acorde a los objetivos del estudio.

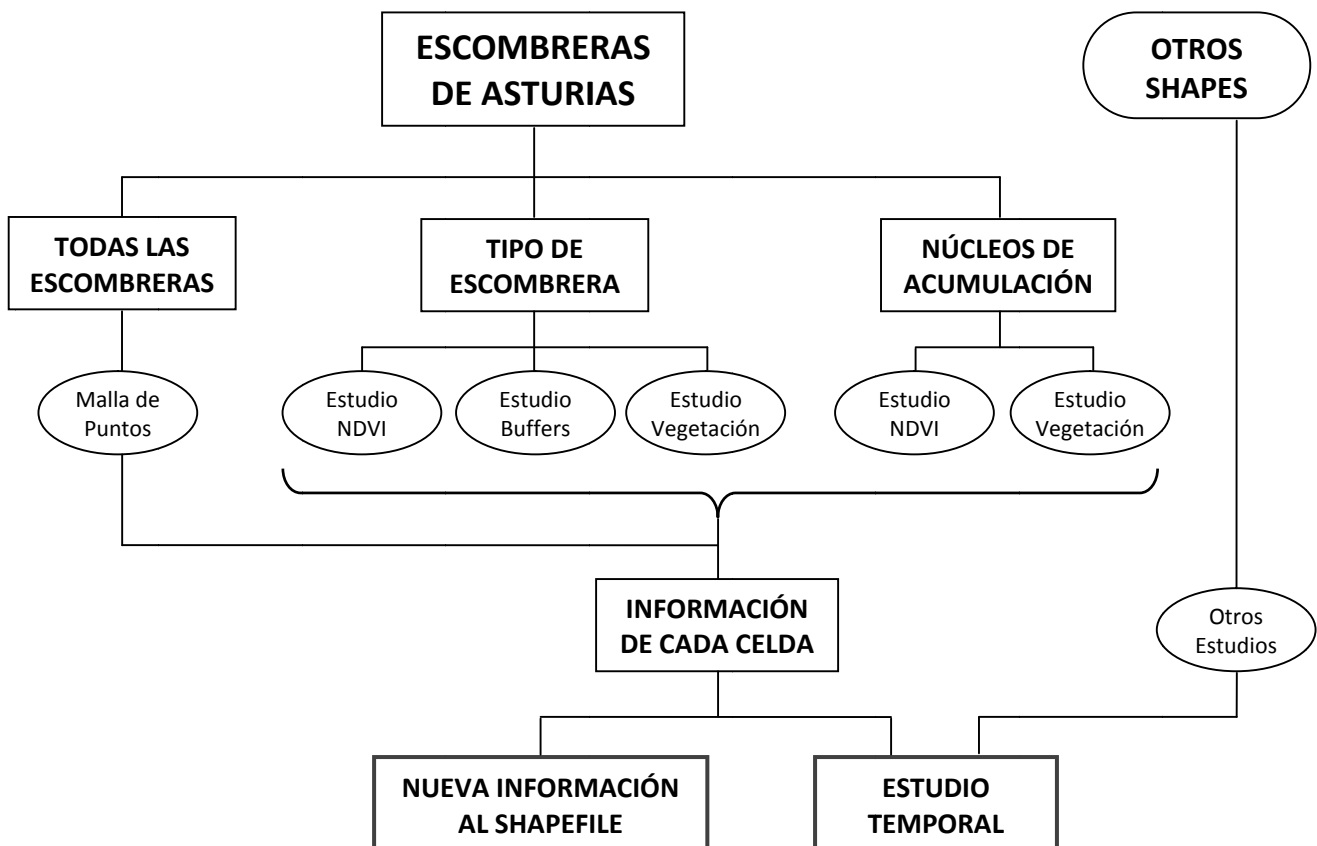


Figura 73: Esquema del flujo de trabajo de este proyecto.



Para el estudio actual en particular, se ha elaborado un flujo de trabajo que se representa en un esquema en la Figura 73.

Toda vez se haya diseñado en flujo de trabajo del estudio a realizar, es necesaria la adecuación de un espacio de trabajo que contenga, de forma coherente y ordenada, todos los archivos a utilizar para el estudio, además de poder almacenar todos aquellos que se generen como producto intermedio a final en el estudio. Para el estudio actual, se ha creado un espacio de trabajo que conste en la distribución de carpetas tal y como se representa en la tabla 36.

Carpeta	Descripción
EscombrerasWGS84	Archivos vectoriales de las escombreras, separadas por tipos, puntos interiores de las escombreras, etc.
Escombreras Buffers	Archivos vectoriales de las zonas de influencia correspondientes a los polígonos de las escombreras.
MDE	Modelo Digital de Elevaciones y modelos derivados del mismo.
NDVI	Imágenes de la escena Landsat escogida con NDVI obtenidos mediante Teledetección.
NDVI Buffers	Archivos ráster de los NDVI recortados por la zona de influencia de las escombreras.
NDVI Recortados	Archivos ráster de los NDVI recortados por las escombreras, todas juntas y por tipos.
Núcleos Acumulación	Polígonos de las escombreras separados por núcleos de acumulación y ráster temáticos recortados por cada uno de ellos.
Shapes	Shapefiles temáticos relacionados con el estudio, tales como vegetación o litología.
Vegetado	Archivos ráster relacionados con el grado de vegetación de las escombreras.

Tabla 36: Distribución del espacio de trabajo en ArcGIS.

Al igual que para todos los procesos utilizados en el apartado de Teledetección, todo el proyecto y espacios de trabajo se han homogeneizado en el sistema de referencia WGS 1984 y sistema de proyección UTM (Universal Transverse Mercator) correspondiente a la zona 30, Norte.



Por medio de imágenes satélite, se ha podido obtener el índice de vegetación para una escena que abarque al Principado de Asturias para cada año (con excepciones, tal y como explica la tabla 04) desde 1985. Su conversión a shapefile ha sido automático al ser ENVI 5.0 y ArcGIS softwares desarrollados por ESRI.

El resultado de una imagen de NDVI obtenida con ENVI 5.0 se visualiza en ArcGIS tal como refleja la figura 74. Se ha añadido a la carpeta NDVI del espacio de trabajo una imagen para cada año.



Figura 74: NDVI de Asturias en ArcGIS.

Por último, se han convertido a WGS84-30N todos los shapfiles utilizados como datos para el estudio para eliminar desfases (ver figura 75). Para ello se han utilizado los comandos *Project* y *Project Raster*.

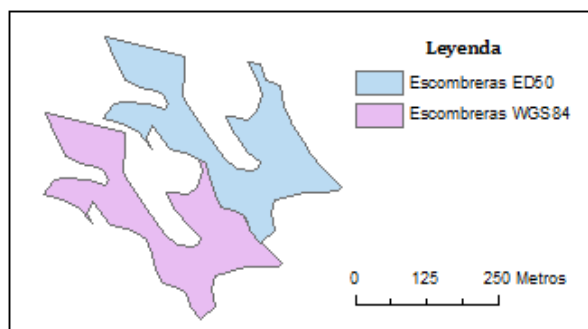


Figura 75: Diferencias entre ED50 y WGS84.

Una vez se han creado espacio y flujo de trabajo, y todos los datos se encuentran en el sistema de referencia y extensión adecuados, ubicados en la carpeta correspondiente, se ha iniciado el estudio temporal del índice de vegetación en las escombreras.



4.2.2. ESTUDIO DE LAS ESCOMBRERAS POR TIPOS.

El principal objetivo del presente estudio consiste en encontrar un elemento característico que permita diferenciar el tipo de escombrera sin necesidad de ir a campo o consultarlo en ninguna base de datos creada previamente. Por ello, el primer paso es diferenciar dichas escombreras por tipo (tabla 37).

Tipo de escombrera	Número de polígonos	Número de núcleos de acumulación
Escombrera de carbón	30	12
Escombrera de hierro	4	2
Otros depósitos antrópicos	7	5

Tabla 37: Número de polígonos y núcleos de acumulación por tipo de escombrera.

Se ha creado un archivo vectorial, así, por cada tipo de escombrera a partir del archivo principal de polígonos de todas las escombreras, siguiendo así dicha tabla. El resultado son tres shapefiles de polígonos con las características del previo de todas las escombreras, pero dividido en tres (ver figura 76).

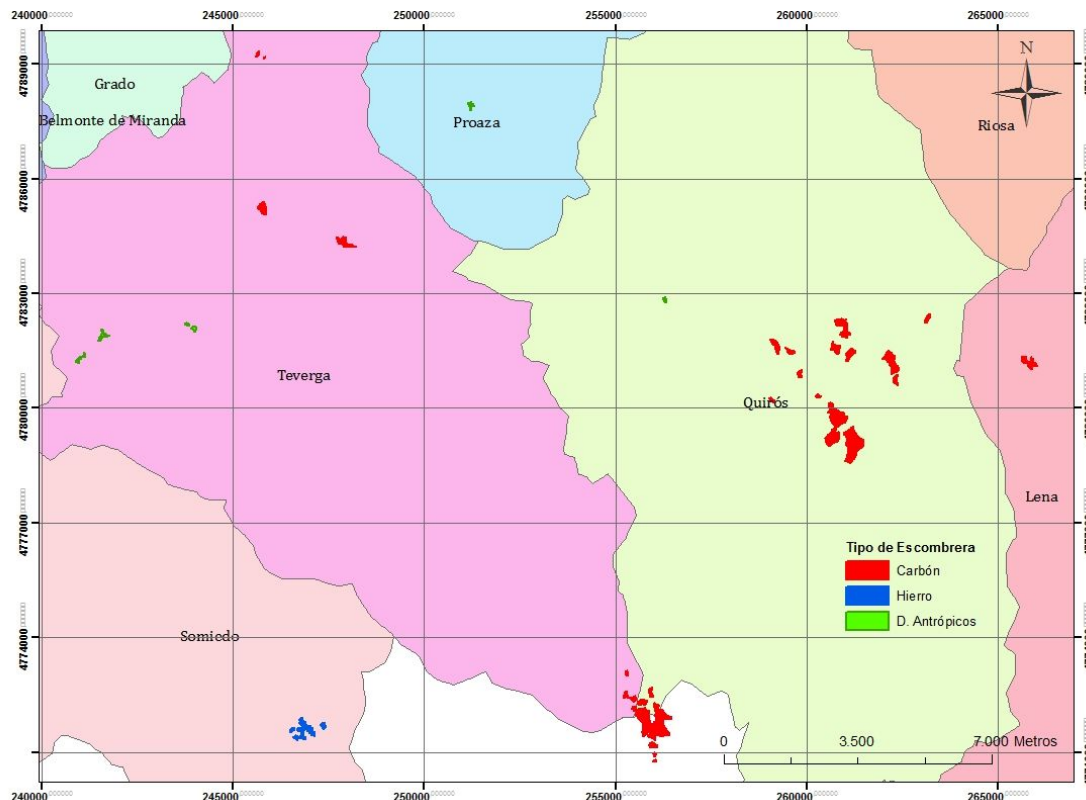


Figura 76: Mapa de las escombreras diferenciadas por tipos.



4.2.2.1. Estudio del NDVI por tipo de escombrera.

El principal elemento diferenciador buscado en el estudio para los tipos de escombrera es el índice de vegetación o NDVI. Mediante Teledetección se han obtenido los correspondientes al Principado de Asturias para 22 años (1985 a 2011 con años en blanco). Para ello se han de saber los NDVI correspondientes a las celdas de los modelos que se encuentren contenidas en el interior de las escombreras.

La visualización de la figura 77 demuestra que, tal como se buscaba al convertir todos los ficheros a WGS84, las zonas relativas a escombreras en los modelos de NDVI coinciden con los polígonos de las escombreras (en la imagen, la zona interior del polígono tiene NDVI más bajos, tal como la teoría indica que debería de ser).

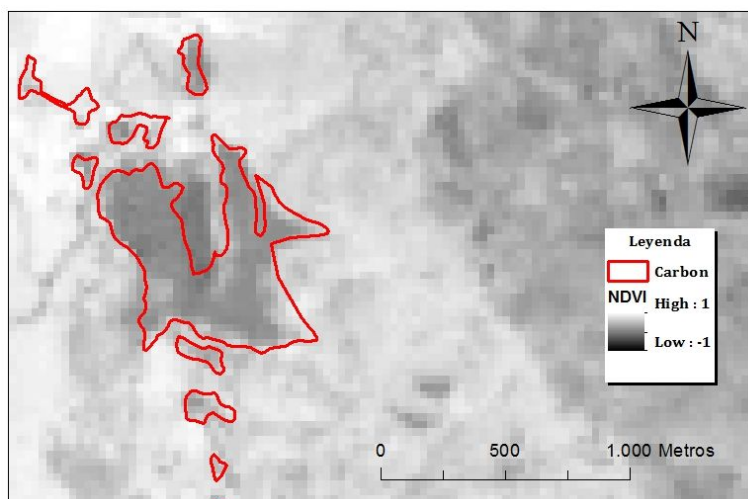


Figura 77: Escombrera 01 sobre NDVI de 1985.

Una vez hecha la comprobación se han de obtener los NDVI medios de las escombreras (en este caso particular, separadas por tipo). Para ello se han recortado todas las imágenes por tipo de escombrera, creando así tres imágenes ráster para cada año (22 imágenes, por lo que se han creado 66 ráster). Dichos archivos contendrán información del NDVI únicamente para los píxeles que se encuentren en el interior de las escombreras cuyo tipo corresponda a aquél que se haya utilizado para recortarlo.



En ArcGIS, el comando que se ha utilizado para obtener las 66 imágenes resultado ha sido el modo *batch* (uso múltiple del mismo comando en uno) de *Extract by Mask*, incluido en *Spatial Analyst Tools*. Se ha utilizado del modo expuesto en la tabla 38.

Imagen NDVI.	Elemento a recortar.		
	Esc. de Carbón.	Esc. de Hierro.	Dep. Antrópicos
1985_04_25_NDVI_WGS84	1985_Car	1985_Hie	1985_Ant
1986_08_06_NDVI_WGS84	1986_Car	1986_Hie	1986_Ant
...
2011_06_24_NDVI_WGS84	2011_Car	2011_Hie	2011_Ant

Tabla 38: Archivos procedentes del NDVI recortado por tipo de escombrera.

La figura 78 muestra el resultado de una de las imágenes obtenidas, donde se puede apreciar que la imagen sólo contiene datos en el interior de los polígonos de su temática correspondiente.

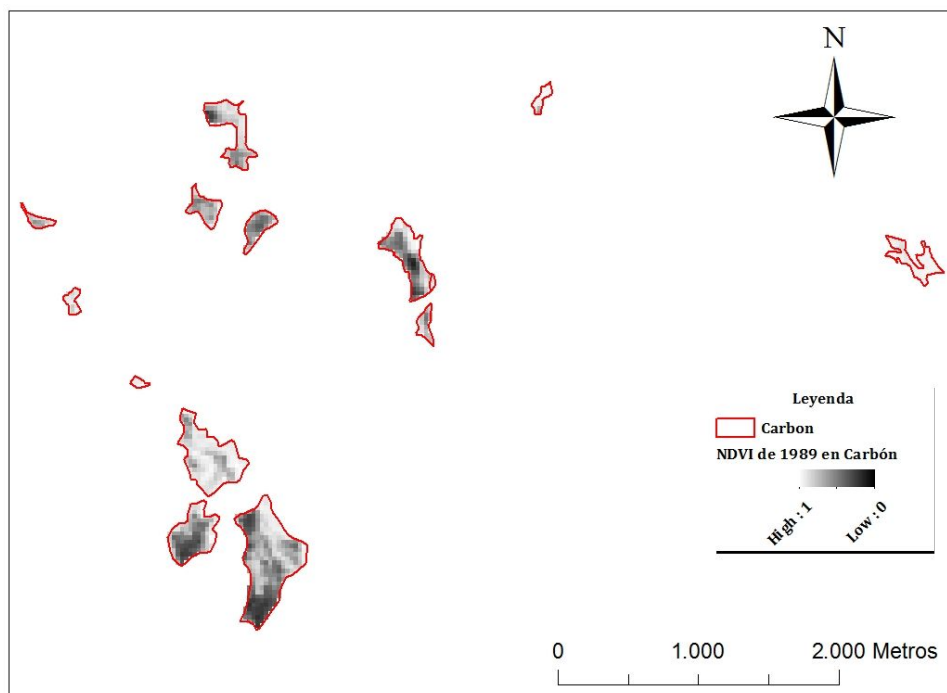


Figura 78: Escombrera 01 sobre NDVI recortado de 1985.

Para cada uno de los 66 archivos creados en este paso se han de obtener una serie de datos característicos, de cara a conseguir unos resultados para el estudio. Para ello se ha calculado el histograma.



Así, se analizan todas las imágenes creadas, estudiando la tendencia del histograma manualmente (Figura 79) y obteniendo el dato más importante de ellos para el estudio: la media. En ocasiones hay valores extremos que, de cara al cálculo de dicha media, se han de eliminar (el NDVI nunca es mayor de 1 y nunca menor de -1, rara vez de 0).

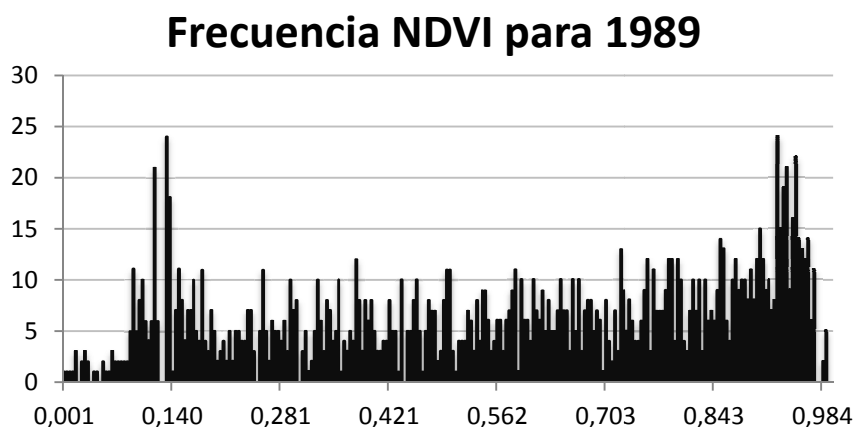


Figura 79: Histograma que compara frecuencia (y) con valor (x) del NDVI en 1989.

Se ha obtenido la media para cada año y tipo de escombrera, recopilándose las mismas en tablas y elaborándose gráficos de línea de cara a estudiar su tendencia, como ejemplifica la Figura 80.

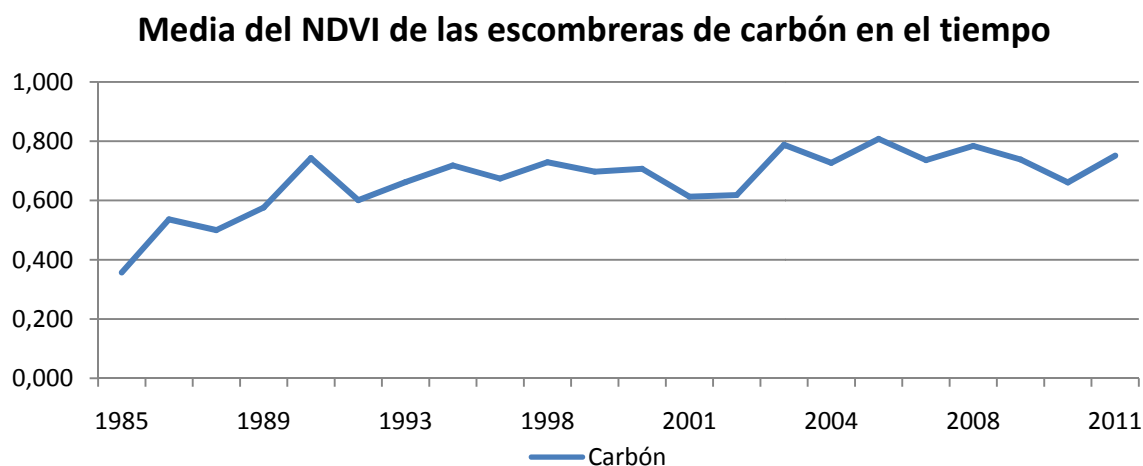


Figura 80: Gráfico que compara valor (y) con año (x) del NDVI medio de las escombreras de carbón.



4.2.2.2. Cálculo del NDVI en zonas cercanas a las escombreras.

Entre los objetivos del estudio no sólo está encontrar un elemento característico que ayude a distinguir los tipos de escombrera, sino que también lo es encontrar el modo de diferenciar las escombreras del resto de superficie circundante de modo automático, con el fin de utilizar la Teledetección como herramienta para la identificación de escombreras sin registrar mediante la comparación de dos NDVI consecutivos. Del mismo modo, se busca estudiar si el NDVI de las escombreras es el mismo que el del entorno, ya que el caso ideal de una escombrera con un nivel muy diferente al de su entorno podría no darse.

La manera de estudiar esto mediante SIG es la elaboración de una zona de influencia para cada tipo de escombrera. Se han elegido 500 m de radio al ser ésta una distancia coherente, teniendo en cuenta la naturaleza del estudio y los 30 m de lado que tiene cada píxel en una imagen Landsat (ver figura 81).

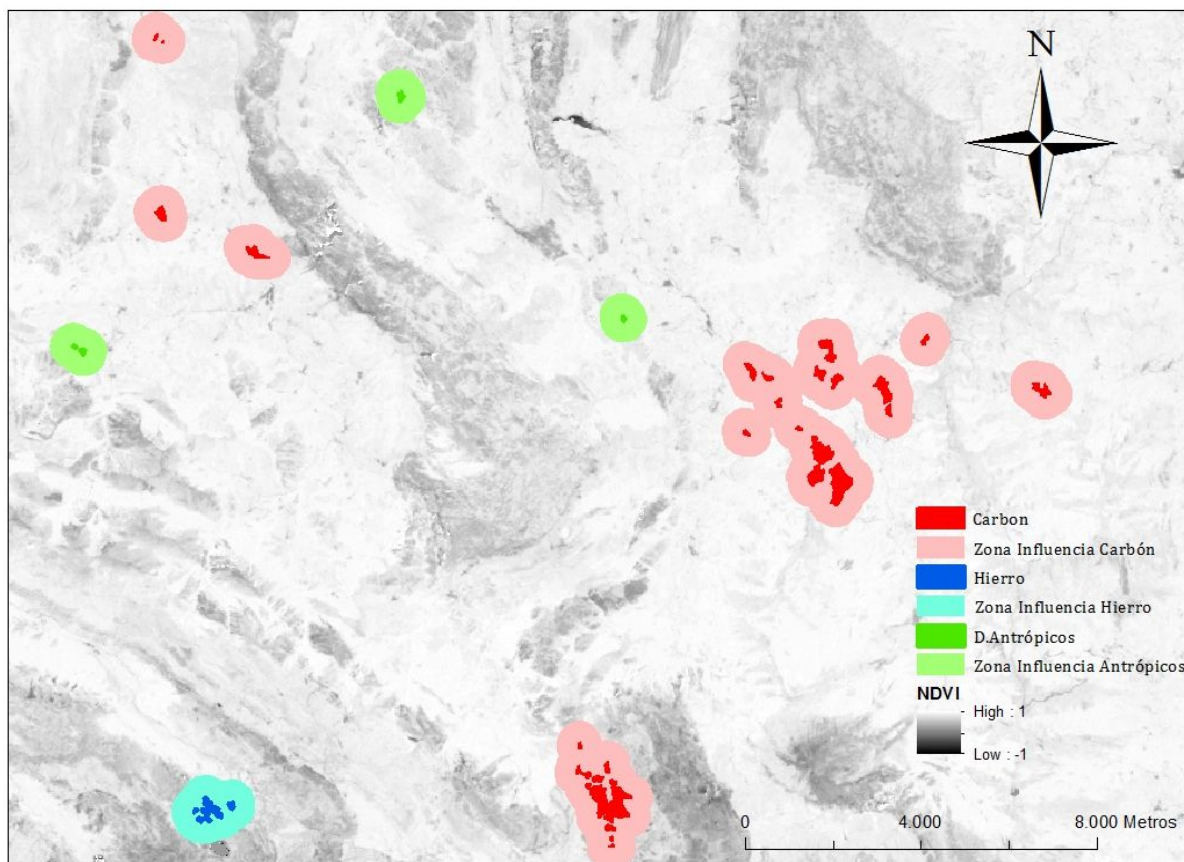


Figura 81: Escombreras por tipo junto a sus zonas de influencia a 500 m.



Como resultado, se obtienen otros 66 imágenes, 3 por cada tipo de escombrera por cada 22 años. Sin embargo, estas imágenes corresponden a las áreas que rodean a las escombreras, por lo que, si se cumple la teoría, sus NDVI deberían de ser superiores.

Tipo de Escombrera	NDVI medio escombrera	NDVI medio zona circundante
Carbón	0,576	0,889
Hierro	0,764	0,830
Antrópico	0,397	0,630

Tabla 39: Ejemplo de 1989 del NDVI medio del interior y exterior de las escombreras.

En la Tabla 39 se comprueba dicha diferencia. Al igual que con las zonas interiores de las escombreras, se han representado gráficamente los NDVI medios de las zonas de influencia (Figura 82).

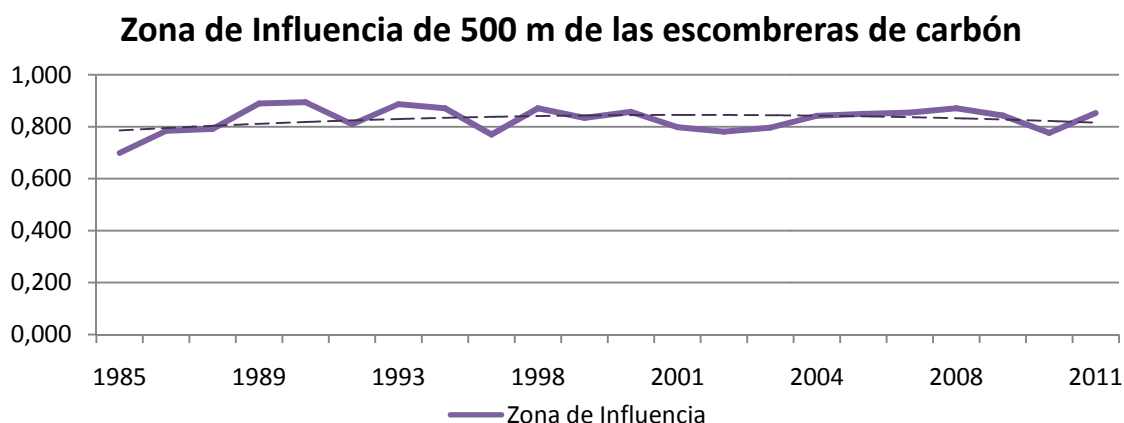


Figura 82: Gráfico que compara valor (y) con año (x) del NDVI medio de la zona circundante en 500 m a las escombreras de carbón.

4.2.2.3. Cálculo del porcentaje de superficie vegetada.

Pese a que es fundamental para el estudio conocer la calidad de la vegetación en las escombreras a lo largo de los años, es también de vital importancia conocer la cantidad de superficie vegetada en cada momento, así como la ubicación de las zonas vegetadas y no vegetadas. Esto permitirá un estudio posterior de la evolución temporal de dicha vegetación y su estabilidad (si se ha mantenido vegetada o lo ha dejado de estar).



De acuerdo con el entorno SIG en el que se ha trabajado, se ha procedido a la creación de modelos binarios de superficie vegetada para cada año. Considerando como vegetación mínimamente sana la representada por un NDVI mayor a 3,5 (Campo *et al*, 2005), se ha utilizado en modo *batch* el comando *raster calculator*, dentro del paquete *spatial analyst tools*. Se ha aplicado la Ecuación 22 a los NDVI recortados por las escombreras.

$$NDVI_N \geq 3,5 \quad (24)$$

Siendo el resultado para cada año una imagen ráster con valores 1, para aquellas celdas cuyo NDVI sea mayor o igual a 3.5 (es decir, celdas correspondientes a zonas vegetadas) y 0, para aquellos que no cumplan la expresión del comando (zona no vegetada).

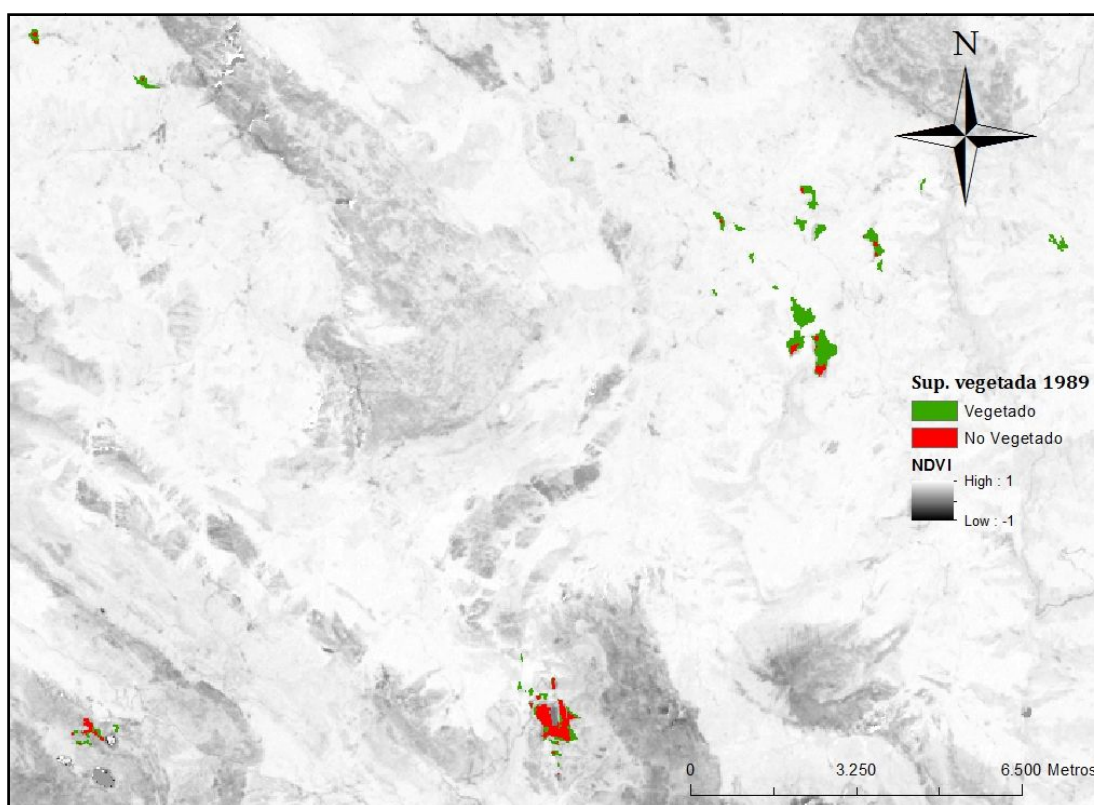


Figura 83: Mapa ejemplo de superficie vegetada en 1989.

Observando el número de celdas cuyo valor es 1 y el número de celdas cuyo valor es 0 se ha calculado el porcentaje de superficie vegetada por tipo de escombrera (Tabla 40).



Tipo de escombreras	1: Celdas vegetadas	0: Celdas no vegetadas	Celdas totales	Porcentaje de superficie vegetada
Carbón	1026	600	1626	63%
Hiero	46	22	68	68%
Antrópico	57	76	133	43%

Tabla 40: Tabla ejemplo de celdas y porcentaje de superficie vegetada para 1989.

Al igual que para el NDVI, se han obtenido gráficas (Figura 83), para el estudio de la tendencia con el tiempo, así como la comparación entre los distintos tipos de escombrera.

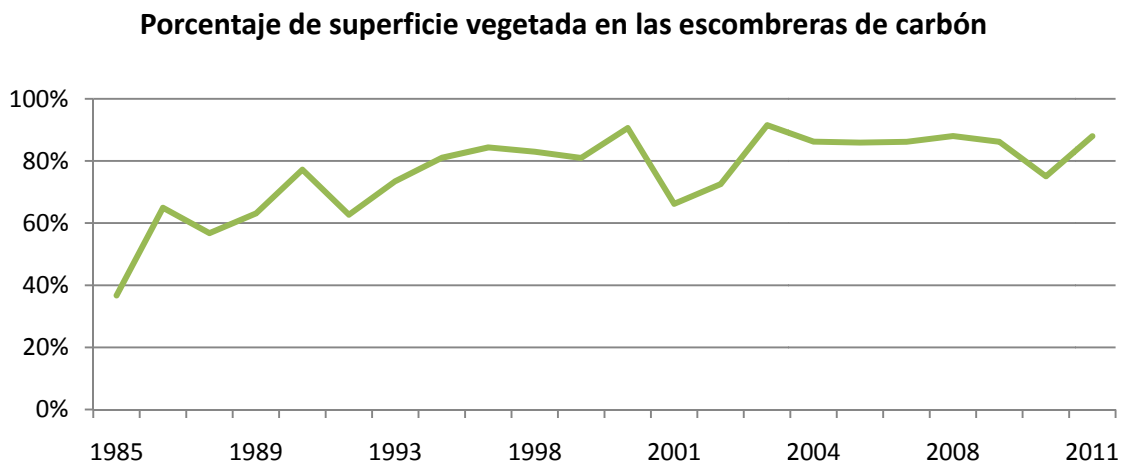


Figura 83: Gráfico que compara porcentaje (y) con año (x) de la superficie vegetada de las escombreras de carbón.



4.2.3. ESTUDIO POR NÚCLEO DE ACUMULACIÓN.

Como estudio complementario al de las escombreras por tipo, con el fin de identificar tendencias y comportamientos a un nivel más individual, añadiéndose más estudios al del NDVI para conseguir causas para dichos comportamientos, se ha realizado un estudio exhaustivo escombrera a escombrera.

Muchos polígonos en el SIG pertenecen a la misma escombrera, por lo que a partir de ahora se entenderá por núcleo de acumulación a todos los polígonos que forman una escombrera (ver tabla 41).

DISTRIBUCIÓN DE LOS NÚCLEOS DE ACUMULACIÓN			
<p>Núcleo 1</p> <p>Número de polígonos: 10 Escombrera de Carbón</p>	<p>Núcleo 2</p> <p>Número de polígonos: 1 Escombrera de Carbón</p>	<p>Núcleo 3</p> <p>Número de polígonos: 1 Escombrera de Carbón</p>	<p>Núcleo 4</p> <p>Número de polígonos: 2 Escombrera de Carbón</p>
<p>Núcleo 5</p> <p>Número de polígonos: 1 Escombrera de Carbón</p>	<p>Núcleo 6</p> <p>Número de polígonos: 1 Escombrera de Carbón</p>	<p>Núcleo 7</p> <p>Número de polígonos: 3 Escombrera de Carbón</p>	<p>Núcleo 8</p> <p>Número de polígonos: 3 Escombrera de Carbón</p>
<p>Núcleo 9</p> <p>Número de polígonos: 4 Escombrera de Carbón</p>	<p>Núcleo 10</p> <p>Número de polígonos: 2 Escombrera de Carbón</p>	<p>Núcleo 11</p> <p>Número de polígonos: 1 Escombrera de Carbón</p>	<p>Núcleo 12</p> <p>Número de polígonos: 1 Escombrera de Carbón</p>
<p>Núcleo 13</p> <p>Número de polígonos: 3 Escombrera de Hierro</p>	<p>Núcleo 14</p> <p>Número de polígonos: 1 Escombrera de Hierro</p>	<p>Núcleo 15</p> <p>Número de polígonos: 2 Otros dep. antrópicos</p>	<p>Núcleo 16</p> <p>Número de polígonos: 2 Otros dep. antrópicos</p>
<p>Núcleo 17</p> <p>Número de polígonos: 1 Otros dep. antrópicos</p>	<p>Núcleo 18</p> <p>Número de polígonos: 1 Otros dep. antrópicos</p>	<p>Núcleo 19</p> <p>Número de polígonos: 1 Otros dep. antrópicos</p>	

Tabla 41: Número, tipo y forma de los núcleos de acumulación.



Creándose así 19 núcleos de acumulación a partir de los 41 polígonos utilizados como datos de partida en el estudio. Los núcleos de acumulación poseen un tamaño y número de polígonos muy variable y heterogéneo (Figura 84).

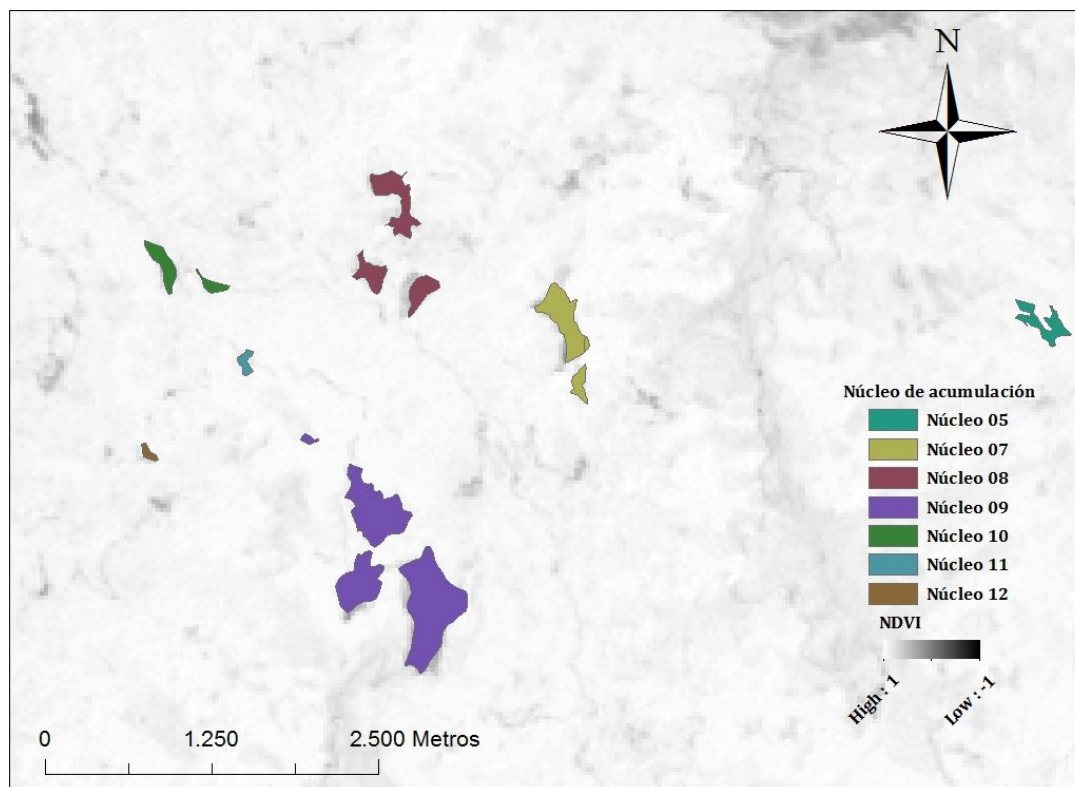


Figura 84: Visualización de parte de los núcleos de acumulación del estudio.

En ArcGIS se ha añadido un nuevo campo a cada polígono especificándosele el número asignado a su núcleo de acumulación y, posteriormente, se ha utilizado un comando perteneciente al paquete *Spatial Analyst Tools*, llamado *Extract by Attributes*, resultando así 19 nuevos shapefiles de iguales características que el inicial, cada uno con los datos correspondientes a su núcleo de acumulación, a almacenar en su correspondiente carpeta.

4.2.2.1. Estudio del NDVI por tipo de escombrera.

El estudio del NDVI para los núcleos de acumulación se ha realizado de forma análoga al de los tipos diferenciados de escombrera.



En esta ocasión se han recortado las 22 imágenes de NDVI a lo largo de los años por los 19 núcleos de acumulación, resultando de ello la creación de 418 imágenes (Tabla 42) cuyos histogramas (Figura 86), que ahora cuentan con frecuencias mucho más bajas al ser imágenes con muchos menos píxeles, se han analizado uno a uno.

Imagen NDVI.	Elemento a recortar.			
	Núcleo 01	Núcleo 02	...	Núcleo 19
1985_04_25_NDVI_WGS84	01_1985	02_1985	...	19_1985
1986_08_06_NDVI_WGS84	01_1986	02_1986	...	19_1986
...
2011_06_24_NDVI_WGS84	01_2011	02_2011	...	19_2011

Tabla 42: Archivos procedentes del NDVI recortado por núcleo de acumulación.

Siendo la figura 85 ejemplo del resultado de dichos recortes

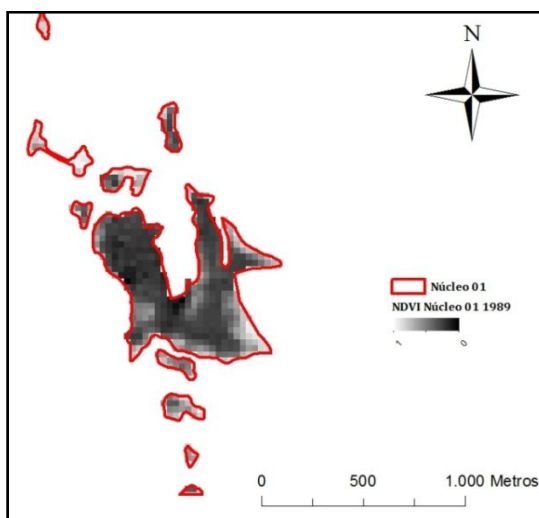


Figura 85: NDVI recortado para el núcleo de acumulación 01 en 1989.

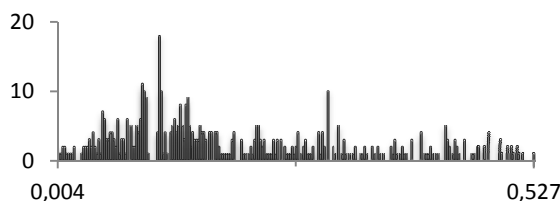


Figura 86: Histograma del núcleo de acumulación 01 para 1985.

Siendo resultado de todo ello la creación de una tabla con todos los valores NDVI medios de cada escombrera para cada año, pudiéndose analizar y comparar la tendencia de los núcleos de acumulación de manera individual.



4.2.2.3. Cálculo del porcentaje de superficie vegetada.

Elaborado del mismo modo que para los diferentes tipos de escombrera, se puede realizar el cálculo del porcentaje de superficie vegetada para cada núcleo de acumulación por separado (Figura 87).

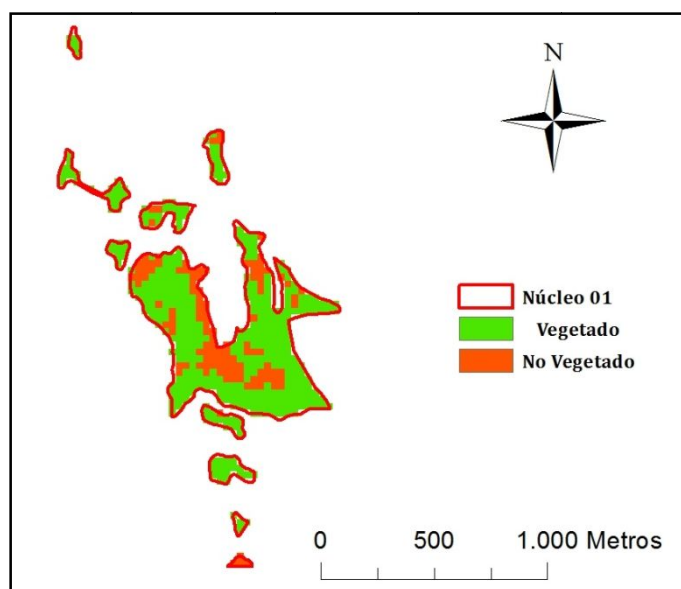


Figura 87: Superficie vegetada para el núcleo de acumulación 01 en 1989.

El cálculo se realiza de manera análoga, contando los píxeles vegetados y los no vegetados (Tabla 43).

Núcleo de acumulación	1: Celdas vegetadas	0: Celdas no vegetadas	Celdas totales	Porcentaje de superficie vegetada
Núcleo 01	137	391	528	26%

Tabla 43: Tabla ejemplo de celdas y porcentaje de superficie vegetada para 1989 en el núcleo 01.

Del mismo modo se ha estudiado cada gráfica de modo individual (Figura 88).

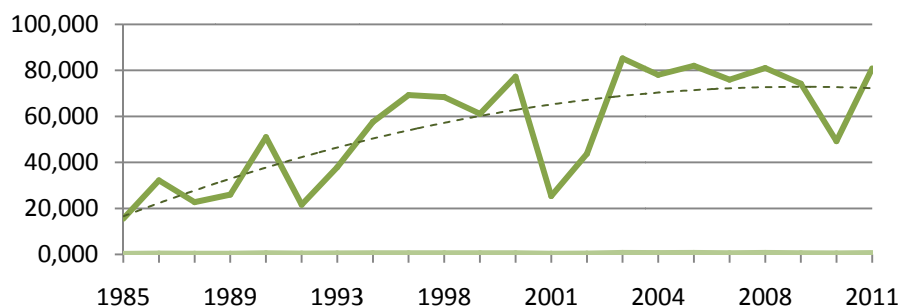


Figura 88: Gráfico de superficie vegetada para el núcleo de acumulación 01.



4.2.4. INSERCIÓN DE LOS RESULTADOS AL SHAPEFILE.

Con objeto de realizar determinados cálculos y comandos en el entorno de ArcGIS, ha sido necesaria la introducción de los datos y resultados del estudio hasta el momento en los shapefiles de las escombreras. Para ello, se ha introducido una serie de valores en una malla de puntos que tenga valores de las imágenes ráster, del mismo modo que los valores numéricos iguales para una misma escombrera o núcleo de acumulación se han añadido directamente como campo en su tabla de atributos.

4.2.4.1. Obtención de cada valor de los ráster mediante la creación de una malla de puntos.

Existe una manera de obtener, en un mismo archivo, información de todos los valores en cada celda de todos los archivos ráster, tanto de diferente temática como para distintos años. ArcGIS es capaz de añadir varios valores a un archivo de puntos por cada imagen ráster que contenga un valor en el mismo lugar que uno de los puntos del archivo. Así, para poder obtener un shapefile que contenga información de todos los ráster ya creados.

Como se ha trabajado con imágenes Landsat, de resolución 30 m, se ha creado una malla de puntos mediante la opción *raster to point*, habiendo convertido el archivo de escombreras previamente a raster.

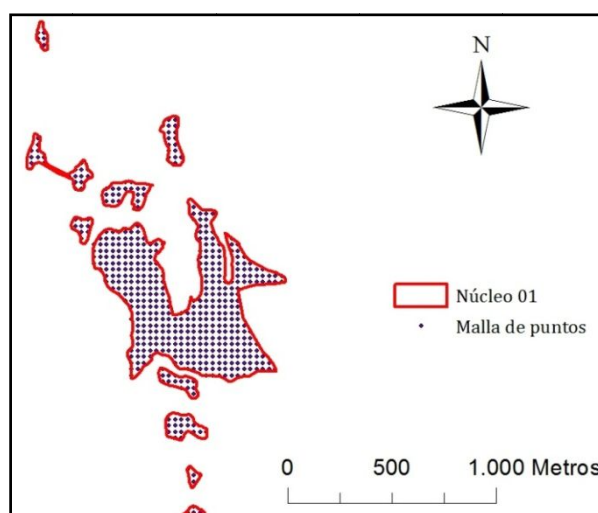


Figura 89: Malla de puntos sobre el núcleo de acumulación 01.



De ese modo se posee una malla de puntos equidistantes a 30 m que se encuentran coincidentes con los archivos ráster creados en el estudio, siendo cada punto coincidente con cada celda de los ráster exclusivamente (Figura 89).

Una vez se ha creado la malla de puntos, se han asociado las informaciones de los archivos ráster relativos al NDVI y la superficie vegetada para cada año. El resultado de ello es un archivo de puntos en el que cada punto posee valores distintos para los 44 atributos creados (dos valores, NDVI y superficie vegetada, por cada uno de los 22 años (Tabla 44).

Núcleo	Atributos					
Punto 01	NDVI ₁₉₈₅ ¹	...	NDVI ₂₀₁₁ ¹	Vegetado ₁₉₈₅ ¹	...	Vegetado ₂₀₁₁ ¹
...
Punto N	NDVI ₁₉₈₅ ^N	...	NDVI ₂₀₁₁ ^N	Vegetado ₁₉₈₅ ^N	...	Vegetado ₂₀₁₁ ^N

Tabla 44: Distribución de los nuevos atributos y valores en la malla de puntos.

Este modo de distribuir la información de la vegetación en las escombreras permitirá la elaboración de un estudio temporal de la vegetación en cuanto a calidad y evolución, ya que posee información ordenada de todos los años en formato binario, facilitando mucho la suma de valores para conocer el número de años vegetados, así como la capacidad para identificar en cuáles lo ha sido y en cuáles no.

4.2.4.2. Inserción de nuevos valores al vectorial.

Cara a la realización de operaciones y la visualización en la leyenda, se han insertado los valores calculados fuera del entorno de ArcGIS a los polígonos de las escombreras. Para facilitar un estudio temporal más sencillo se han dividido los años en cuatro partes (ver Tabla 45), que han sido las introducidas en la tabla de atributos, junto con el valor medio de todos los años, tanto para el NDVI como para la superficie vegetada.

Parte 1	Parte 2	Parte 3	Parte 4
1985-1991	1993-2000	2001-2005	2007-2011

Tabla 45: División de los 22 años a estudiar en cuatro partes.



Se han introducido, de esta forma, 10 nuevos atributos en los polígonos, tal y como se especifica en las tablas 46 y 47.

Núcleo	NDVI Parte 1	NDVI Parte 2	NDVI Parte 3	NDVI Parte 4	NDVI Medio
01	NDVI _{Parte1} ¹	NDVI _{Parte2} ¹	NDVI _{Parte3} ¹	NDVI _{Parte4} ¹	NDVI _{Medio} ¹
...
19	NDVI _{Parte1} ¹⁹	NDVI _{Parte2} ¹⁹	NDVI _{Parte3} ¹⁹	NDVI _{Parte4} ¹⁹	NDVI _{Medio} ¹⁹

Tabla 46: Distribución de los nuevos valores y atributos (NDVI) en los polígonos.

Núcleo	%Veg Parte 1	%VEG Parte 2	%VEG Parte 3	%VEG Parte 4	%VEG Medio
01	%VEG _{Parte1} ¹	%VEG _{Parte2} ¹	%VEG _{Parte3} ¹	%VEG _{Parte4} ¹	%VEG _{Medio} ¹
...
19	%VEG _{Parte1} ¹⁹	%VEG _{Parte2} ¹⁹	%VEG _{Parte3} ¹⁹	%VEG _{Parte4} ¹⁹	%VEG _{Medio} ¹⁹

Tabla 47: Distribución de los nuevos valores y atributos (%Veg) en los polígonos.

Además de permitir un mejor estudio, la adición de estos valores permite una visualización temática de los núcleos de acumulación (Figura 90).

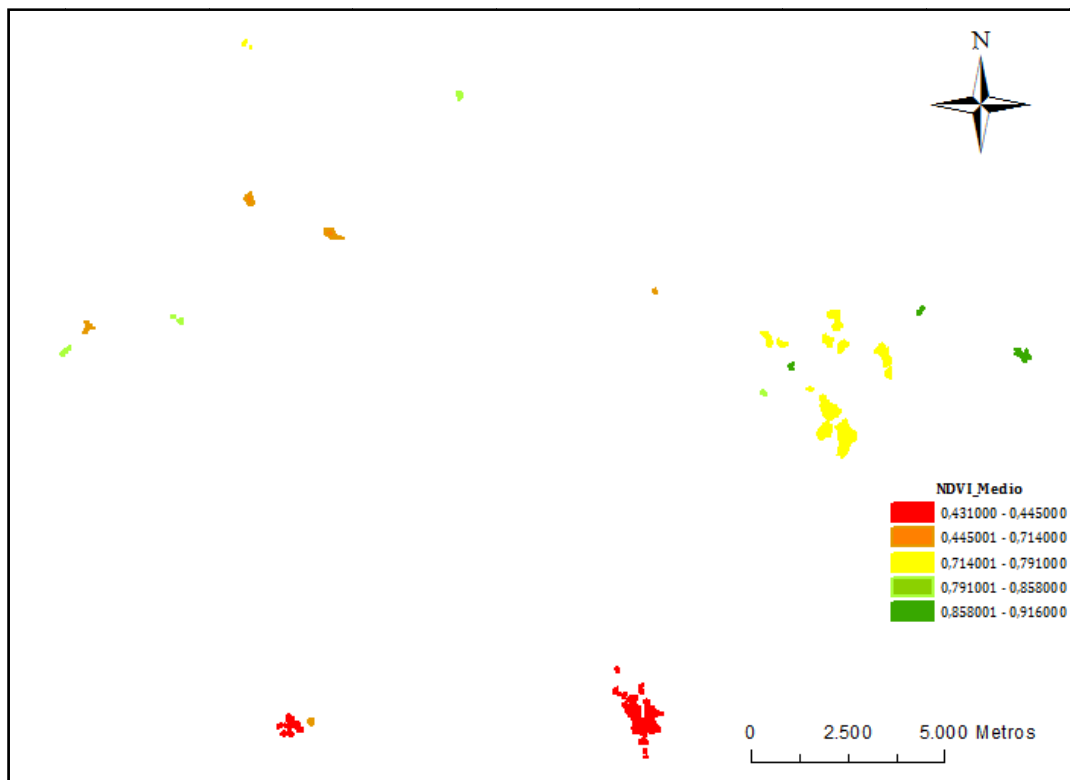


Figura 90: Mapa temático de NDVI medio en las escombreras.

Con posterioridad se le han añadido a los archivos otros atributos una vez se hayan realizado los estudios de evolución en la vegetación, altura media, etc.



4.2.5. ESTUDIO TEMPORAL EN LA VEGETACIÓN.

Aunque ya se ha visto que, mediante el cálculo de gráficas con sus líneas de tendencia se puede ver la evolución tanto en superficie vegetada como en calidad de la vegetación, mediante el estudio de la malla de puntos se pueden realizar dos estudios adicionales que, siendo parecidos, suponen una importante fuente de información para conocer la edad de la vegetación, así como qué píxeles poseen información variable y qué píxeles se mantienen constantes en el tiempo.

4.2.5.1. Estudio temporal de la superficie vegetada.

El estudio temporal de la superficie vegetada permite clasificar las celdas del ráster (o los puntos de la malla) en función del año en que se ha vegetado por primera vez. A cada punto se le ha asignado un valor según el primer momento en que ha sido vegetado:

- Nunca vegetado: Píxeles cuya suma total sea 0.
- Vegetación muy reciente: Vegetado por primera vez (primer 1) durante la cuarta etapa.
- Vegetación reciente: Vegetado por primera vez (primer 1) durante la tercera etapa.
- Vegetación poco reciente: Vegetado por primera vez (primer 1) durante la segunda etapa.
- Vegetación muy poco reciente: Vegetado desde la primera etapa.

Siendo el resultado el observado en la Tabla 48.

Código	Descripción
0	Nunca vegetado
4	Vegetación muy reciente
3	Vegetación reciente
2	Vegetación poco reciente
1	Vegetación muy poco reciente.

Tabla 48: Leyenda que relaciona valores y descripción en el estudio temporal.



Por último, se ha convertido a ráster utilizando como valor el código de evolución de la vegetación.

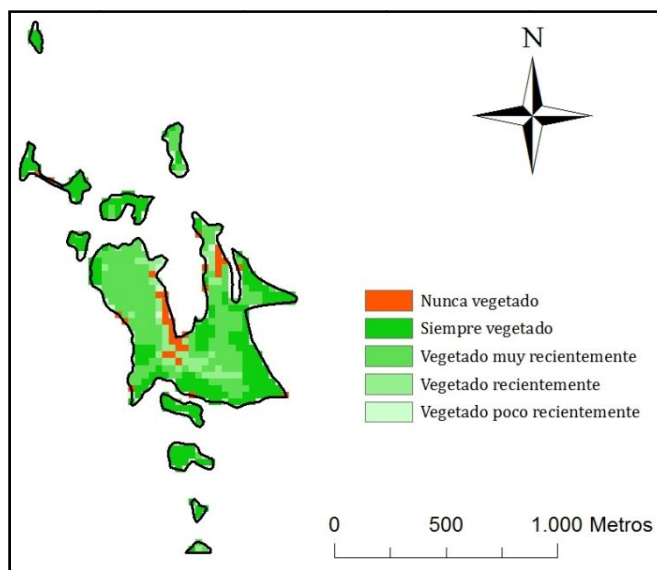


Figura 91: Modelo de edad de la vegetación en el núcleo de acumulación 01.

La Figura 91 representa el núcleo de acumulación 01, ejemplo perfecto del resultado de este paso al poseer gran número de píxeles pertenecientes a todas las clases.

4.2.5.2. Estudio de la evolución de la superficie vegetada.

De manera análoga a lo realizado para el estudio temporal de la vegetación, se han asignado valores a los puntos en función de la cantidad de años que ha sido vegetado, sin atender a qué año hace referencia. Aunque el valor de la superficie siempre vegetada deba de ser la suma de todos los años y el de la nunca vegetada cero, se ha añadido un margen de error de un año.

- Nunca vegetado: La suma de todos los años es 0 ó 1.
- Vegetación variable, poco frecuente: La suma de todos los años se encuentra entre 2 y 10.
- Vegetación variable, muy frecuente: La suma de todos los años se encuentra entre 11 y 20.
- Siempre vegetado: La suma de todos los años es 21 ó 22.



Siendo el resultado el observado en la Tabla 49.

Código	Descripción
0	Nunca vegetado
1	Vegetación variable poco frecuente
2	Vegetación variable muy frecuente
3	Siempre vegetado

Tabla 49: Leyenda que relaciona valores y descripción en el estudio de la evolución.

Mientras que los valores 0 del estudio, nunca vegetado, hacen referencia a lo mismo, los valores intermedios atienden a parámetros distintos: la primera vez que una celda estuvo vegetada y el número de veces que lo ha estado. Aunque pueda parecer que las celdas serán más frecuentemente vegetadas cuanto antes hayan empezado a estarlo, diferencias en los estudios permiten encontrar anomalías o puntos cuya vegetación ha dejado de existir (Figura 92).

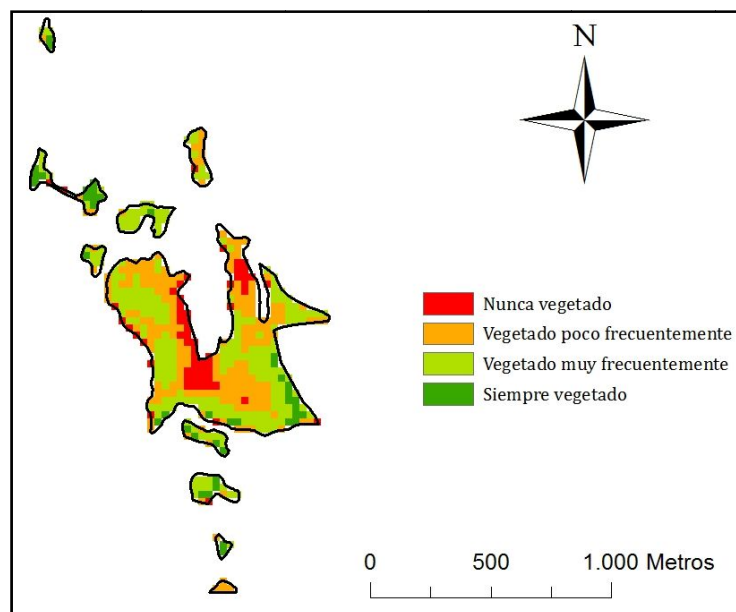


Figura 92: Modelo de evolución de la vegetación en el núcleo de acumulación 01.

Comparando así los valores intermedios del estudio (vegetado poco o muy frecuentemente y vegetado poco o muy recientemente) se puede llegar a conclusiones a modo individual, permitiendo saber en cada escombrera qué superficie estuvo vegetada pero ya no lo está, qué varía mucho en cuanto a años vegetado, qué vegetación tiene más estabilidad, etc.



4.2.6. OTROS ESTUDIOS EN LAS ESCOMBRERAS.

Hecho el estudio principal, puede darse que dos escombreras del mismo tipo tengan una evolución en la vegetación, tanto en edad como en calidad y frecuencia, totalmente distintas. Esto puede deberse a una gran serie de parámetros y factores físicos cuya totalidad sería imposible abarcar. Sin embargo, se han analizado los principales con el fin de encontrar alguna tendencia en las escombreras con NDVI más bajo.

4.2.6.1. Estudio de la altura de las escombreras.

Teóricamente sería lógico entender que la altura ocupa un papel fundamental en la calidad de la vegetación de una zona. En zonas muy elevadas la vegetación suele ser menor y más débil. Para realizar el estudio sobre ella se ha utilizado un MDE (Modelo Digital de Elevaciones) con resolución 5 m (conservando la coherencia en el sistema de proyección, WGS84-30N). Ver Figura 93.

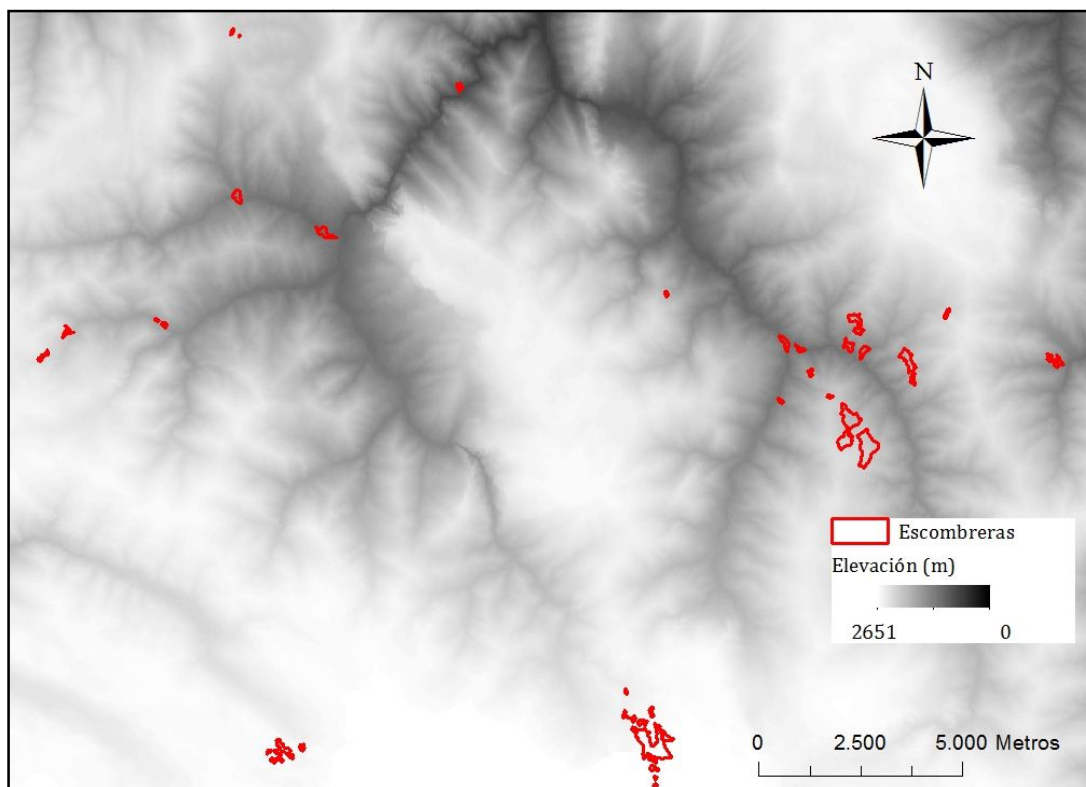


Figura 93: Escombreras sobre MDE de Asturias.



Del mismo modo que el empleado con otros ráster, tales como modelos de NDVI o de superficie vegetada, se ha recortado el MDE por cada escombrera de modo individual con la orden *extract by mask* y se ha procedido al estudio individual de los 22 modelos generados (Tabla 50).

Archivo Ráster	Elemento a recortar.			
	Núcleo 01	Núcleo 02	...	Núcleo 19
MDE	01_MDE	02_MDE	...	19_MDE

Tabla 50: Archivos generados a partir del MDE para cada núcleo de acumulación.

4.2.6.2. Estudio de la pendiente de las escombreras.

Del mismo modo que para las elevaciones, se ha realizado un estudio de las pendientes en las zonas cubiertas por las escombreras. Para ello, se ha obtenido un modelo de pendientes a partir del MDE y el comando *slope* del paquete *Spatial Analyst* (Figura 95).

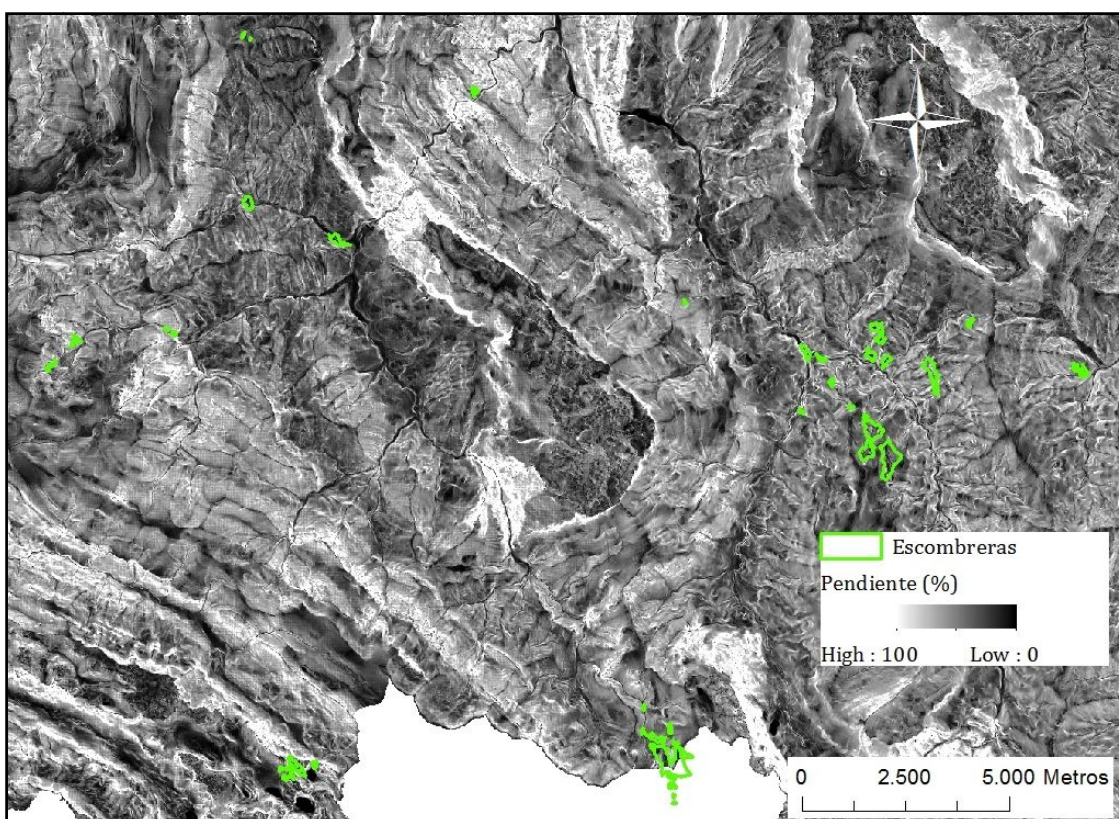


Figura 94: Escombreras sobre modelo de pendientes de Asturias.



De nuevo se generan 22 archivos a estudiar individualmente mediante el comando *extract by mask* (Tabla 51).

Archivo Ráster	Elemento a recortar.			
	Núcleo 01	Núcleo 02	...	Núcleo 19
Pendiente	01_Pend	02_Pend	...	19_Pend

Tabla 51: Archivos generados a partir del modelo de pendientes para cada núcleo de acumulación.

4.2.6.3. Estudio de la orientación de las escombreras.

Debido a la trayectoria solar, en cuanto al desarrollo de la vegetación es fundamental la orientación de la superficie sobre la que dicha vegetación se desarrolle. Por ello, ha sido uno de los aspectos a estudiar en el presente estudio. Al igual que el modelo de pendientes, el modelo de orientaciones se ha obtenido a partir del MDE mediante la función *aspect* del paquete *Spatial Analyst Tools* (Figura 95)

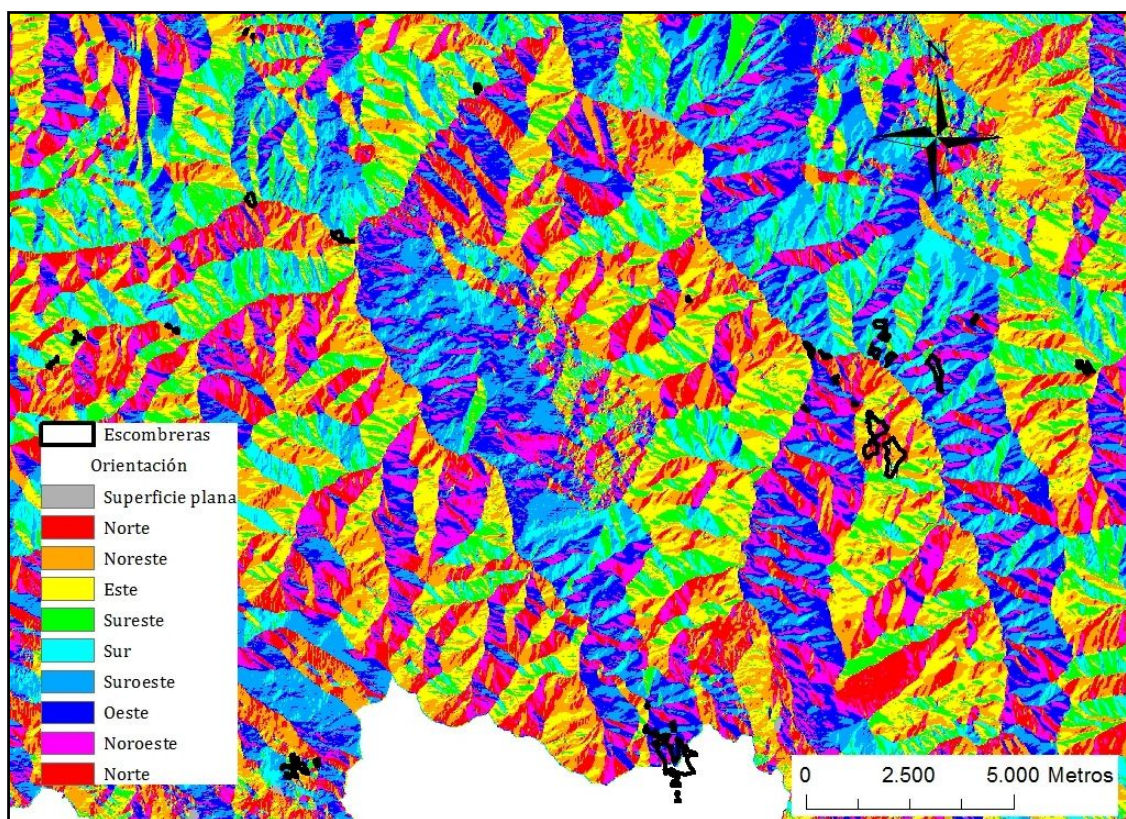


Figura 95: Escombreras sobre modelo de orientaciones de Asturias.



En este caso no será necesario recortar el archivo 22 veces por cada núcleo de acumulación, ya que lo que se busca es un valor nominal y no una cifra calculada por el programa. Así, se ha observado (Figura 96) el valor de la pendiente (coincidente con ocho direcciones más superficie plana) en cada núcleo de acumulación y se ha anotado, teniéndose en cuenta que una escombrera puede tener más de una orientación. En ese caso, se diferenciaría entre una escombrera con variedad de orientaciones y una con una clara orientación principal.

4.2.6.4. Área de las escombreras.

A la hora de revegetar una superficie, teóricamente será más fácil que se recupere antes una superficie pequeña que una superficie mayor. Para ello, se ha estudiado el área de las escombreras, dato que calcula ArcGIS automáticamente para cualquier archivo vectorial de polígonos. Se han recogido los datos para su posterior estudio junto a los demás parámetros.

4.2.6.5. Estudio de la litología.

También se ha recogido el tipo del suelo sobre el que se asientan las escombreras y su vegetación, observando directamente una a una el tipo de suelo (Figura 96) sobre el que se encuentran en el mapa de litología (Figura 97).

DEFINICION	
 Caliza de Montaña	 Formación Moniello - Santa Lucía
 Calizas de la Vid	 Formación Naranco - Huergas
 Conglomerados silíceos, areniscas, pizarras y carbón estefanienses	 Formación Oville
 Dolomías de la Vid	 Formación Piñeres – Candás (Areniscas del Devónico superior)
 Formación Alba	 Formación Portilla - Candás
 Formación Barrios	 Grupo Lena
 Formación Cándamo-Baleas-Calizas de las Portillas	 Grupo Rañeces – La Vid
 Formación Formigoso	 Grupo Sama
 Formación Furada - San Pedro	 Niveles de calizas en el Carbonífero superior
 Formación Láncara	 Pizarras de la Vid
	 San Emiliano y Formación Olleros

Figura 96: Leyenda del mapa de litología.

4.2.6.6. Estudio del tipo de vegetación.

Por último, se ha seguido el mismo método para la vegetación que para la litología, utilizando así el mapa de vegetación (figura 98).

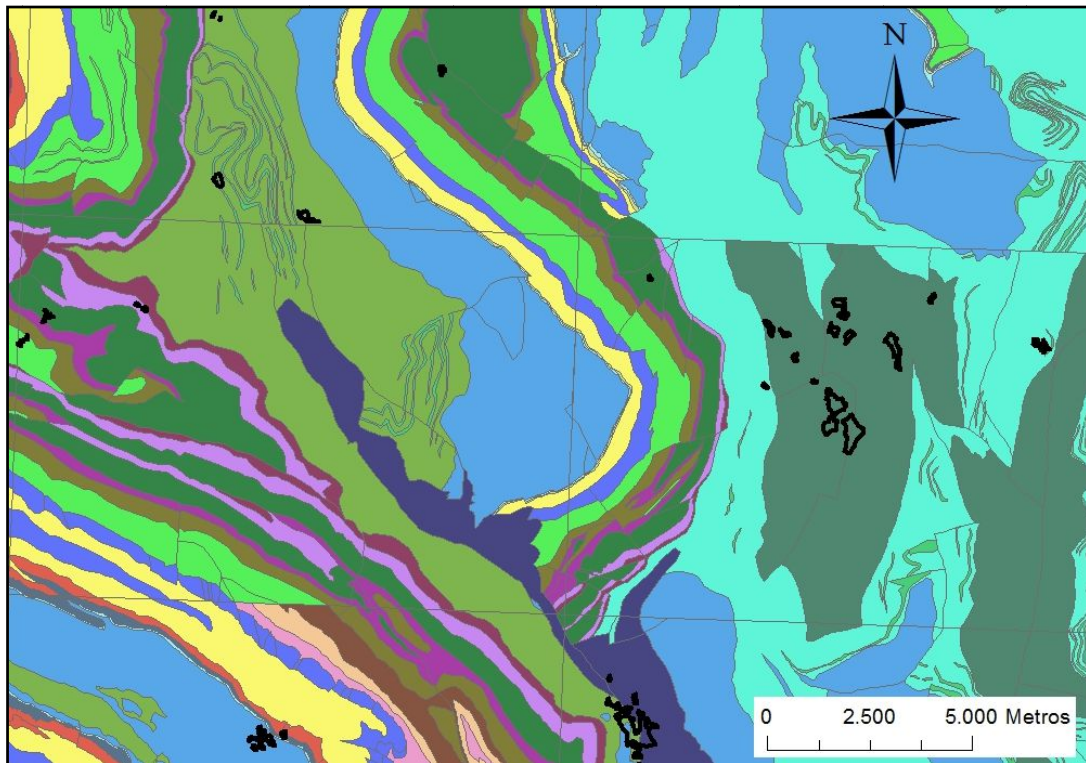


Figura 97: Escombreras sobre mapa de litología.

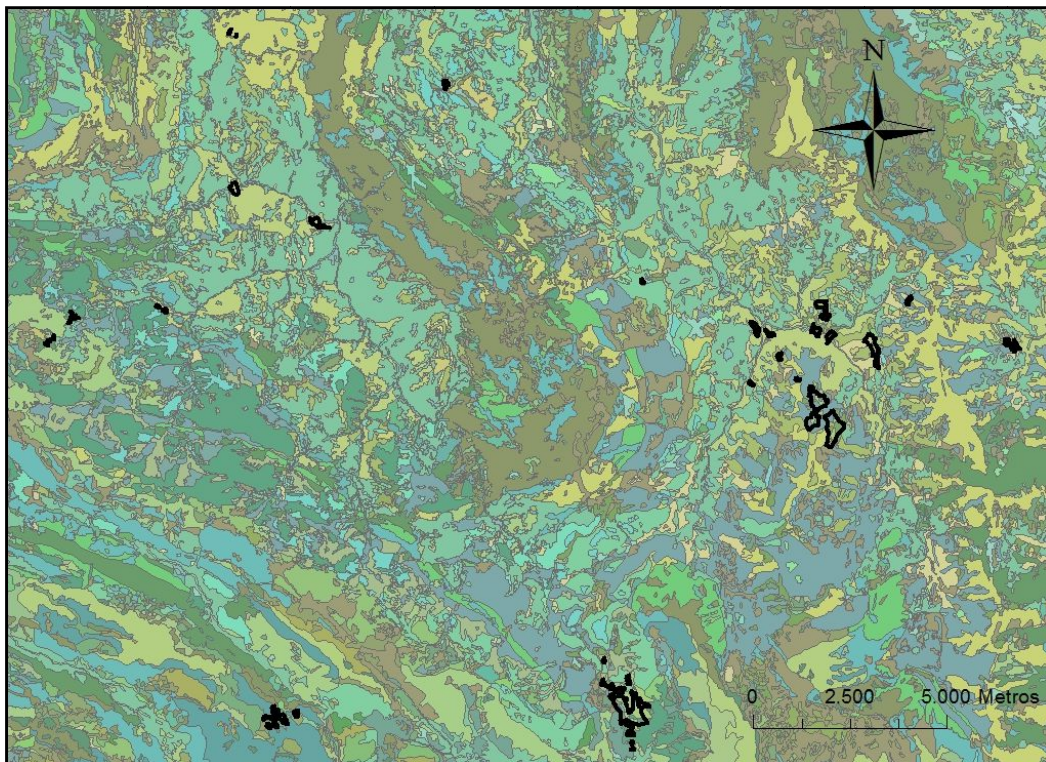


Figura 98: Escombreras sobre mapa de vegetación.



5. RESULTADOS



5.1. RESULTADOS TELEDETECCIÓN.

Mientras que el estudio final se ha realizado mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica, los principales datos para el mismo se han obtenido mediante Teledetección. Así, mediante una serie de operaciones, se han obtenido productos intermedio utilizables y un producto final de cara al estudio de las escombreras, objetivo principal del presente estudio.

5.2.1. PRODUCTOS INTERMEDIOS.

El estudio mediante Teledetección de las imágenes de satélite (Landsat) ha proporcionado, además del conjunto de imágenes finales de NDVI utilizadas como dato para el estudio mediante SIG, una serie de conjuntos de imágenes intermedias producto de corregir las imágenes de diversos factores o convertirlas a distintas unidades. Pese a que podrían no considerarse resultados reales para el estudio, pues no van a utilizarse para sacar conclusiones sobre el mismo, son una serie de conjuntos de imágenes absolutamente utilizables para otros estudios, ahorrando tiempo y recursos en corregir y convertirlas de nuevo.

5.2.1.1. Imágenes corregidas de atmósfera.

Como primer producto a partir de las imágenes originales extraídas directamente del distribuidor se han obtenido imágenes corregidas del efecto de la atmósfera (Figura 99).



Figura 99: Imagen ejemplo corregida de atmósfera. Año 2007.



5.2.1.2. Imágenes corregidas de topografía.

A partir de dichas imágenes y un Modelo Digital de Elevaciones se han obtenido también, previas correcciones y cálculo de los parámetros propios, imágenes cuya distorsión por la topografía ha sido corregida (Figura 100).



Figura 100: Imagen ejemplo corregida de topografía. Año 2007.

5.2.1.3. Imágenes en radiancia.

Mediante ENVI y la información en los metadatos de cada imagen, se ha obtenido un conjunto de ellas convertidas a parámetros físicos (radiancia) (Figura 101).

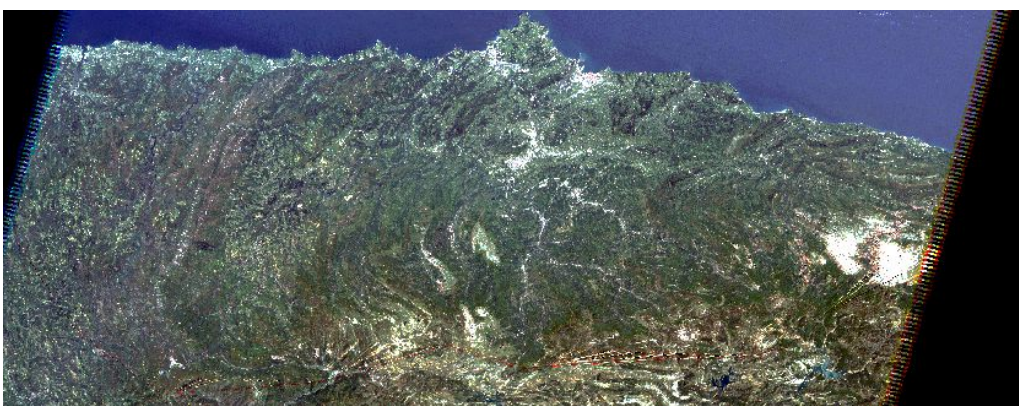


Figura 101: Imagen ejemplo convertida a radiancia. Año 2007.

5.2.1.4. Imágenes en reflectividad.

Por último, se ha obtenido una serie de imágenes expresadas en reflectividad, de gran utilidad para el estudio de un gran número de características (Figura 102).

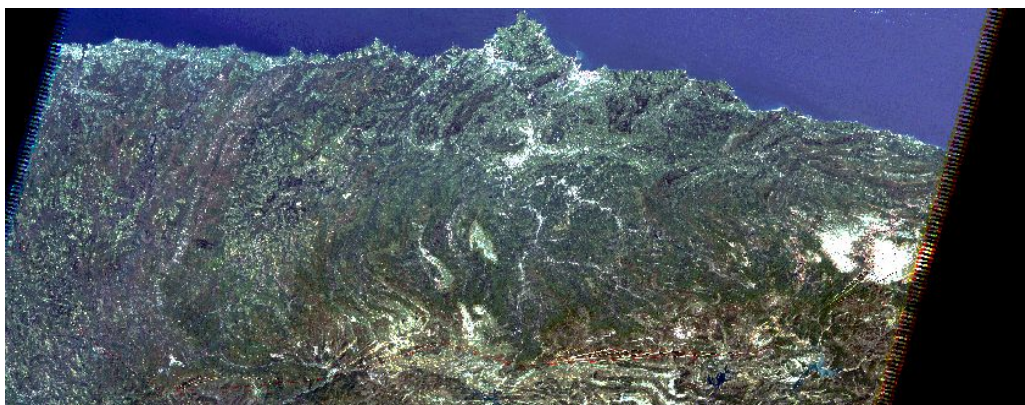


Figura 102: Imagen ejemplo convertida a reflectividad. Año 2007.

La Tabla 52 representa el conjunto de grupos de imágenes que se han obtenido en el estudio.

1985	...	2011
1985 _{ATMO}	...	2011 _{ATMO}
1985 _{TOPO}	...	2011 _{TOPO}
1985 _{RAD}	...	2011 _{RAD}
1985 _{REF}	...	2011 _{REF}

Tabla 52: Imágenes intermedias obtenidas en el estudio.

5.1.2. PRODUCTO FINAL: NDVI.

El producto final de la Teledetección ha sido un conjunto de imágenes de NDVI pertenecientes a 22 años distintos, con las que se ha realizado un estudio mediante SIG (Figura 103).

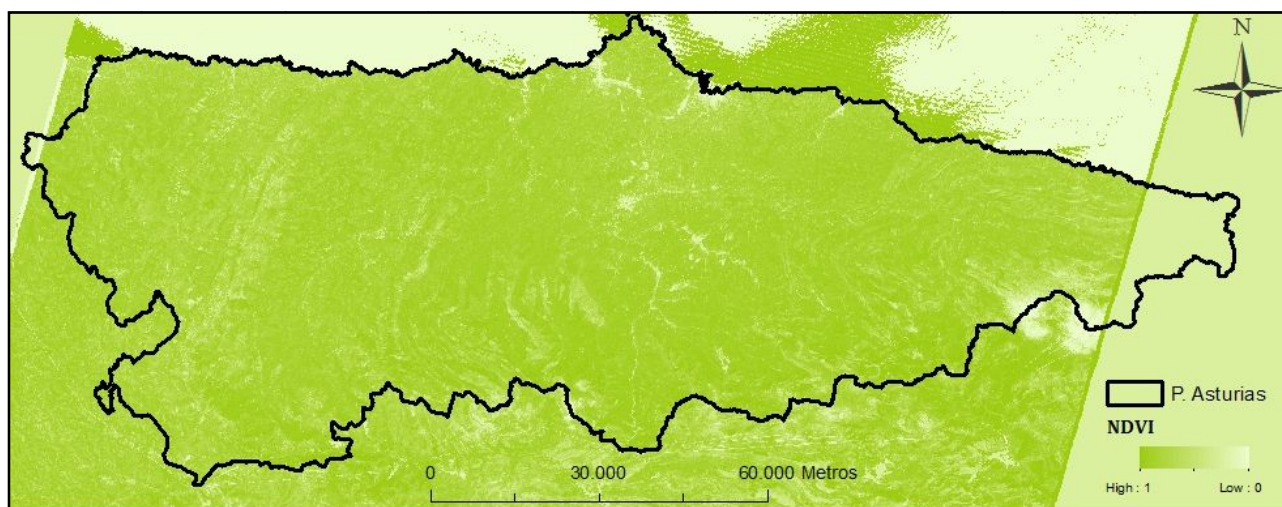


Figura 103: Modelo ejemplo de NDVI. Año 1989.



5.2. RESULTADOS DEL ESTUDIO MEDIANTE SIG.

Con los datos del NDVI obtenidos mediante Teledetección y el posterior estudio en ArcGIS se han obtenido los siguientes resultados:

5.2.1. NDVI DE LAS ESCOMBRERAS

Con el fin de obtener conclusiones en cuanto a la evolución de la calidad de la vegetación del interior de las escombreras, se han calculado y recopilado los datos del NDVI medio para cada año y se han estudiado mediante una gráfica.

5.2.1.1. Por tipo de escombrera.

Se han diferenciado los tipos de escombrera a la hora de calcular el NDVI medio para un conjunto de núcleos de acumulación distintos (Tabla 53).

Año	Carbón	Antrópicos	Hierro	Año	Carbón	Antrópicos	Hierro
1985	0,357	0,630	0,247	2000	0,707	0,807	0,536
1986	0,536	0,688	0,399	2001	0,613	0,687	0,289
1987	0,500	0,730	0,361	2002	0,618	0,731	0,282
1989	0,576	0,764	0,397	2003	0,788	0,916	0,589
1990	0,743	0,879	0,579	2004	0,727	0,823	0,524
1991	0,601	0,735	0,41	2005	0,808	0,850	0,616
1993	0,662	0,838	0,475	2007	0,736	0,818	0,424
1996	0,718	0,836	0,496	2008	0,784	0,861	0,541
1997	0,674	0,766	0,469	2009	0,738	0,800	0,481
1998	0,729	0,883	0,482	2010	0,661	0,717	0,359
1999	0,697	0,818	0,474	2011	0,751	0,799	0,534

Tabla 53: NDVI medios para todos los años por tipo de escombrera.

Mediante estos resultados se ha obtenido una gráfica conjunta para ellos, facilitándose así la comparación entre los mismos (Figura 104). Mediante la misma y la obtención de una línea de tendencia para cada tipo de escombrera queda clara la diferencia de NDVI entre tipos, suficientemente amplia para hablar de tendencia por tipo. También se aprecia la evolución en cada tipo mediante una curva ascendente.

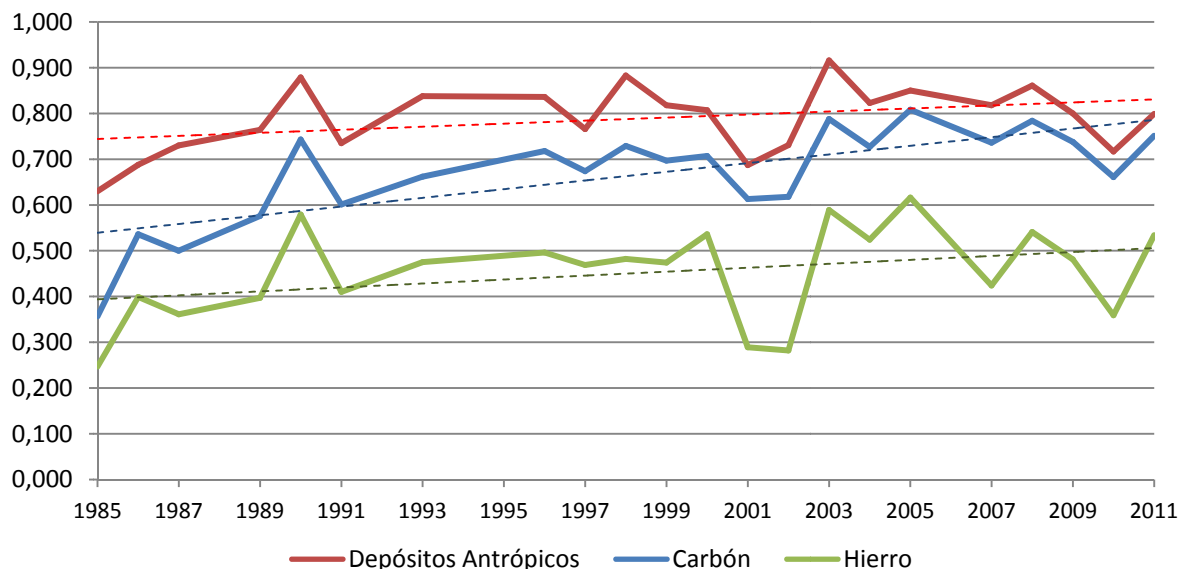


Figura 104: Gráfica de la evolución temporal del NDVI para cada tipo de escombrera.

5.2.1.2. Por núcleo de acumulación.

Del mismo modo, se ha realizado para todos los núcleos de acumulación de modo independiente (Tablas 54 y 55).

Año	Núcleo de Acumulación									
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
1985	0,217	0,564	0,561	0,675	0,797	0,740	0,411	0,327	0,381	0,529
1986	0,327	0,580	0,668	0,781	0,881	0,894	0,578	0,583	0,599	0,648
1987	0,260	0,623	0,588	0,747	0,904	0,906	0,574	0,545	0,588	0,637
1989	0,313	0,629	0,517	0,850	0,947	0,928	0,657	0,699	0,705	0,725
1990	0,478	0,727	0,583	0,912	0,975	0,937	0,771	0,814	0,833	0,805
1991	0,383	0,582	0,516	0,740	0,879	0,866	0,687	0,689	0,650	0,710
1993	0,388	0,638	0,633	0,870	0,934	0,924	0,788	0,825	0,811	0,714
1996	0,462	0,670	0,728	0,781	0,928	0,934	0,858	0,860	0,842	0,764
1997	0,490	0,612	0,660	0,678	0,854	0,865	0,814	0,776	0,755	0,658
1998	0,503	0,704	0,687	0,831	0,964	0,970	0,879	0,872	0,825	0,766
1999	0,466	0,662	0,667	0,742	0,907	0,873	0,832	0,836	0,821	0,724
2000	0,502	0,721	0,713	0,809	0,935	0,911	0,844	0,844	0,789	0,724
2001	0,287	0,606	0,659	0,700	0,928	0,877	0,824	0,762	0,779	0,612
2002	0,347	0,534	0,650	0,694	0,884	0,856	0,803	0,770	0,742	0,604
2003	0,630	0,726	0,814	0,851	0,956	0,988	0,924	0,889	0,887	0,805
2004	0,531	0,577	0,699	0,762	0,904	0,902	0,874	0,829	0,814	0,741
2005	0,661	0,907	0,937	0,887	0,973	0,961	0,931	0,928	0,818	0,956
2007	0,522	0,563	0,735	0,833	0,936	0,915	0,872	0,838	0,864	0,730
2008	0,601	0,666	0,770	0,819	0,940	0,925	0,896	0,883	0,895	0,799
2009	0,489	0,583	0,700	0,758	0,924	0,911	0,872	0,857	0,874	0,783
2010	0,386	0,650	0,667	0,734	0,882	0,850	0,838	0,822	0,799	0,755
2011	0,543	0,658	0,694	0,828	0,927	0,905	0,881	0,865	0,848	0,776

Tabla 54: NDVI medios para todos los años por núcleo de acumulación (1-10).



Año	Núcleo de Acumulación								
	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1985	0,644	0,752	0,225	0,443	0,594	0,794	0,566	0,686	0,367
1986	0,815	0,853	0,398	0,463	0,829	0,709	0,566	0,571	0,666
1987	0,829	0,787	0,339	0,513	0,792	0,787	0,682	0,668	0,512
1989	0,888	0,899	0,373	0,622	0,824	0,838	0,643	0,789	0,548
1990	0,940	0,821	0,558	0,715	0,873	0,911	0,918	0,905	0,757
1991	0,845	0,802	0,272	0,375	0,781	0,817	0,526	0,691	0,377
1993	0,906	0,800	0,449	0,709	0,884	0,902	0,769	0,868	0,683
1996	0,913	0,855	0,478	0,659	0,823	0,856	0,782	0,874	0,866
1997	0,839	0,730	0,456	0,606	0,777	0,739	0,805	0,821	0,755
1998	0,933	0,939	0,472	0,589	0,916	0,858	0,855	0,910	0,917
1999	0,902	0,868	0,457	0,622	0,878	0,757	0,769	0,819	0,837
2000	0,904	0,882	0,515	0,704	0,831	0,823	0,410	0,765	0,751
2001	0,888	0,803	0,259	0,475	0,810	0,732	0,457	0,773	0,685
2002	0,874	0,831	0,249	0,503	0,839	0,755	0,669	0,749	0,768
2003	0,957	0,966	0,576	0,711	0,931	0,879	0,883	0,949	0,978
2004	0,890	0,879	0,502	0,729	0,822	0,839	0,786	0,880	0,817
2005	0,970	0,942	0,628	0,555	0,847	0,950	0,789	0,951	0,946
2007	0,917	0,898	0,408	0,567	0,878	0,824	0,786	0,845	0,661
2008	0,922	0,918	0,524	0,713	0,866	0,871	0,830	0,927	0,821
2009	0,911	0,909	0,478	0,596	0,856	0,899	0,704	0,792	0,714
2010	0,872	0,838	0,345	0,538	0,750	0,818	0,632	0,724	0,604
2011	0,893	0,898	0,517	0,692	0,838	0,888	0,691	0,810	0,675

Tabla 55: NDVI medios para todos los años por núcleo de acumulación (11-19).

Se han obtenido gráficas para cada núcleo de acumulación, a modo de estudio de tendencia para cada núcleo de acumulación por separado (Figura 105, ir a Anexo III para ver gráficas de todos los núcleos de modo individual).

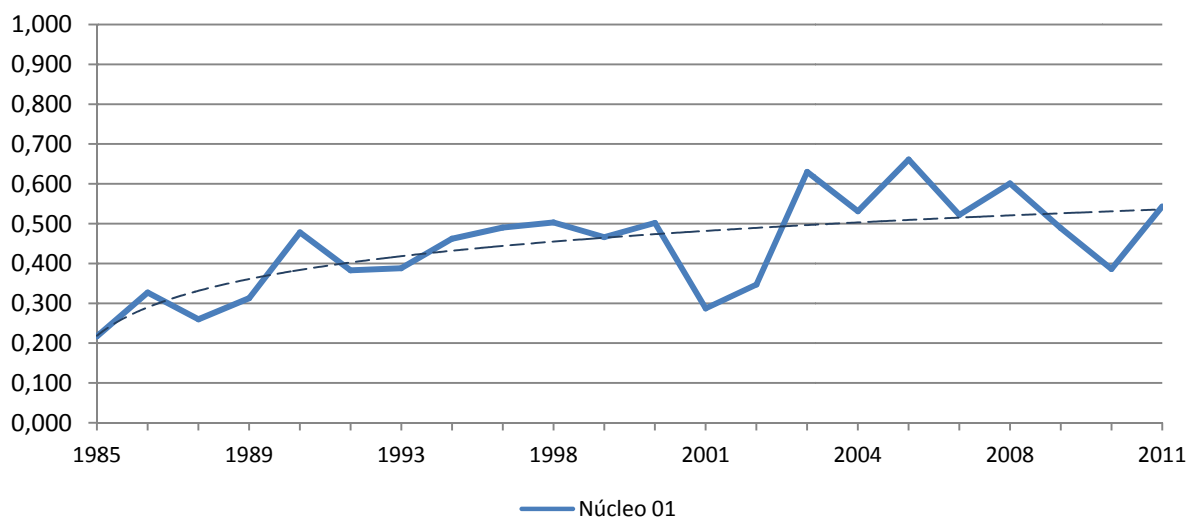


Figura 105: Gráfica de la evolución temporal del NDVI para cada núcleo de acumulación 01.



5.2.2. DIFERENCIAS DE NDVI CON EL ENTORNO.

Los NDVI medios de las zonas circundantes a las escombreras se han obtenido y recopilado para cada año (Tabla 56).

Año	Carbón	Antrópicos	Hierro	Año	Carbón	Antrópicos	Hierro
1985	0,699	0,710	0,330	2000	0,857	0,805	0,673
1986	0,784	0,744	0,562	2001	0,798	0,708	0,466
1987	0,791	0,761	0,529	2002	0,781	0,716	0,468
1989	0,889	0,830	0,630	2003	0,796	0,894	0,738
1990	0,894	0,878	0,713	2004	0,842	0,800	0,615
1991	0,809	0,767	0,593	2005	0,849	0,824	0,586
1993	0,887	0,847	0,670	2007	0,854	0,804	0,540
1996	0,871	0,834	0,700	2008	0,871	0,840	0,686
1997	0,770	0,741	0,598	2009	0,843	0,780	0,510
1998	0,871	0,861	0,656	2010	0,776	0,734	0,387
1999	0,834	0,790	0,644	2011	0,852	0,789	0,543

Tabla 56: NDVI medios de la superficie circundante a las escombreras para todos los años por tipo de escombrera.

Así, se le ha añadido la gráfica de la zona de influencia, con su línea de tendencia, a las gráficas de NDVI medio por tipo de escombrera para comparar sus tendencias y calidad de la calidad (Figuras 106, 107 y 108).

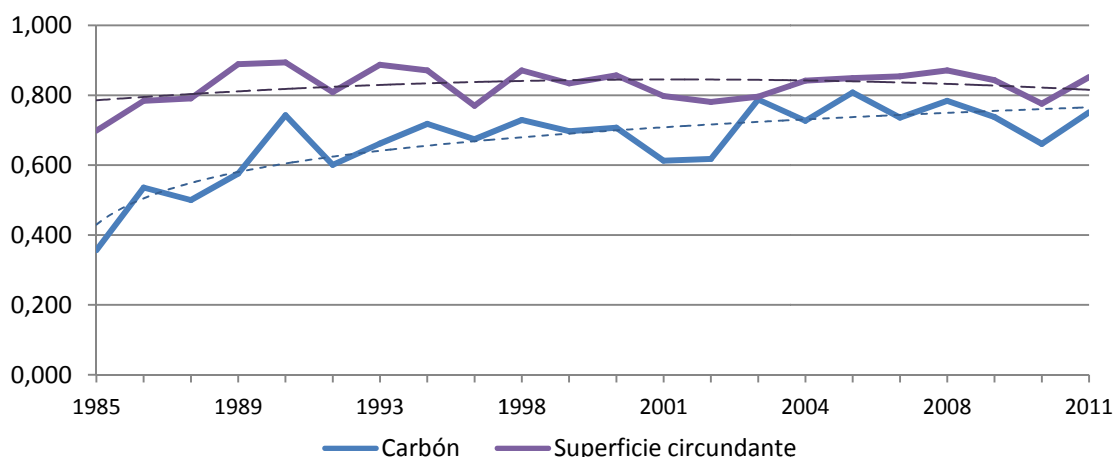


Figura 106: Comparación gráfica de la evolución temporal del NDVI para escombreras de carbón y su zona circundante.

Se puede apreciar una tendencia claramente estable en las zonas circundantes en comparación con la tendencia curva ascendente convexa de los núcleos de acumulación, haciéndose así la diferencia menor con el paso del tiempo. La excepción son los depósitos antrópicos, que se confunden con su entorno.

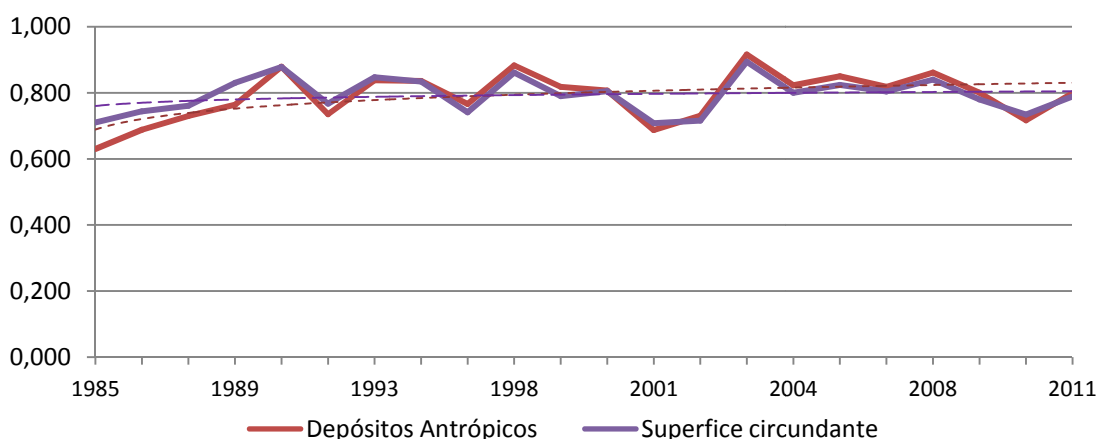


Figura 107: Comparación gráfica de la evolución temporal del NDVI para otros depósitos antrópicos y su zona circundante.

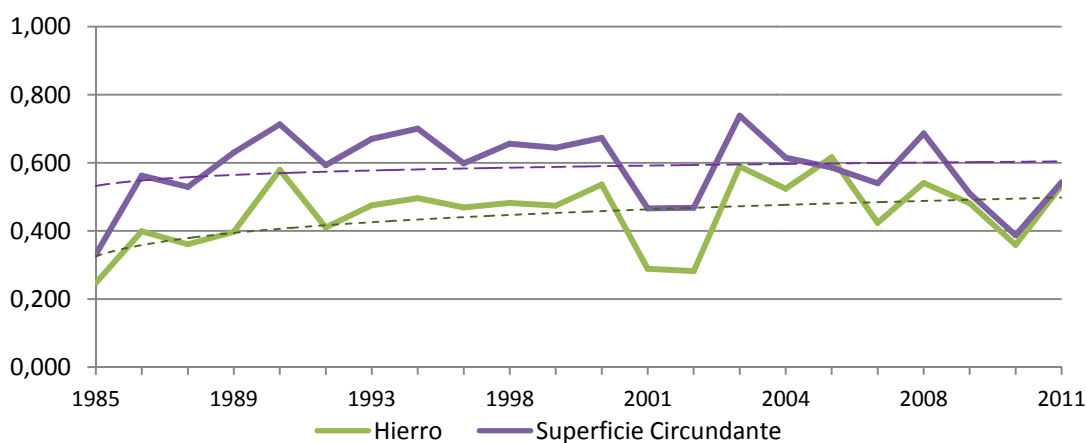


Figura 108: Comparación gráfica de la evolución temporal del NDVI para escombreras de hierro y su zona circundante.

La Tabla 57 refleja las diferencias entre los NDVI medios del interior y el exterior de las escombreras.

Año	Carbón	Antrópicos	Hierro	Año	Carbón	Antrópicos	Hierro
1985	0,342	0,080	0,083	2000	0,150	-0,002	0,137
1986	0,248	0,056	0,163	2001	0,185	0,021	0,177
1987	0,291	0,031	0,168	2002	0,163	-0,015	0,186
1989	0,313	0,066	0,233	2003	0,008	-0,022	0,149
1990	0,151	-0,001	0,134	2004	0,115	-0,023	0,091
1991	0,208	0,032	0,183	2005	0,041	-0,026	-0,030
1993	0,225	0,009	0,195	2007	0,118	-0,014	0,116
1996	0,153	-0,002	0,204	2008	0,087	-0,021	0,145
1997	0,096	-0,025	0,129	2009	0,105	-0,020	0,029
1998	0,142	-0,022	0,174	2010	0,115	0,017	0,028
1999	0,137	-0,028	0,170	2011	0,101	-0,010	0,009

Tabla 57: Diferencia de NDVI medio entre interior y exterior de la escombrera por año y tipo.



5.2.3. ESTUDIO DE LA SUPERFICIE VEGETADA.

De modo análogo al estudio del NDVI se ha recopilado y tratado información obtenida del SIG en relación a la superficie vegetada de las escombreras.

5.2.3. Por tipo de escombrera.

Se han obtenido los valores de porcentaje de superficie vegetada por año y por tipo de escombrera (Tabla 58) de cara a compararlos y estudiar su tendencia a lo largo del tiempo.

Año	Carbón	Antrópicos	Hierro
1985	36,72 %	69,12 %	14,29 %
1986	64,94 %	76,47 %	57,14 %
1987	56,77 %	76,47 %	45,11 %
1989	63,10 %	67,65 %	42,86 %
1990	77,18 %	67,65 %	80,45 %
1991	62,67 %	63,24 %	27,07 %
1993	73,49 %	77,94 %	66,92 %
1996	81,00 %	77,94 %	69,17 %
1997	84,38 %	77,94 %	73,68 %
1998	82,96 %	77,94 %	71,43 %
1999	80,93 %	77,94 %	67,67 %
2000	90,59 %	85,29 %	87,97 %
2001	66,17 %	75,00 %	28,57 %
2002	72,51 %	77,94 %	29,32 %
2003	91,51 %	82,35 %	79,70 %
2004	86,22 %	77,94 %	70,68 %
2005	85,92 %	69,12 %	83,46 %
2007	86,16 %	76,47 %	57,89 %
2008	88,01 %	76,47 %	81,95 %
2009	86,16 %	80,88 %	72,93 %
2010	75,03 %	67,65 %	42,86 %
2011	87,95 %	76,47 %	76,69 %

Tabla 58: Porcentaje de superficie vegetada por tipo de escombrera y año.

Disponiendo los valores en una gráfica se ha podido comprobar que siguen una tendencia similar al NDVI medio, aunque con más altibajos (Figura 109).

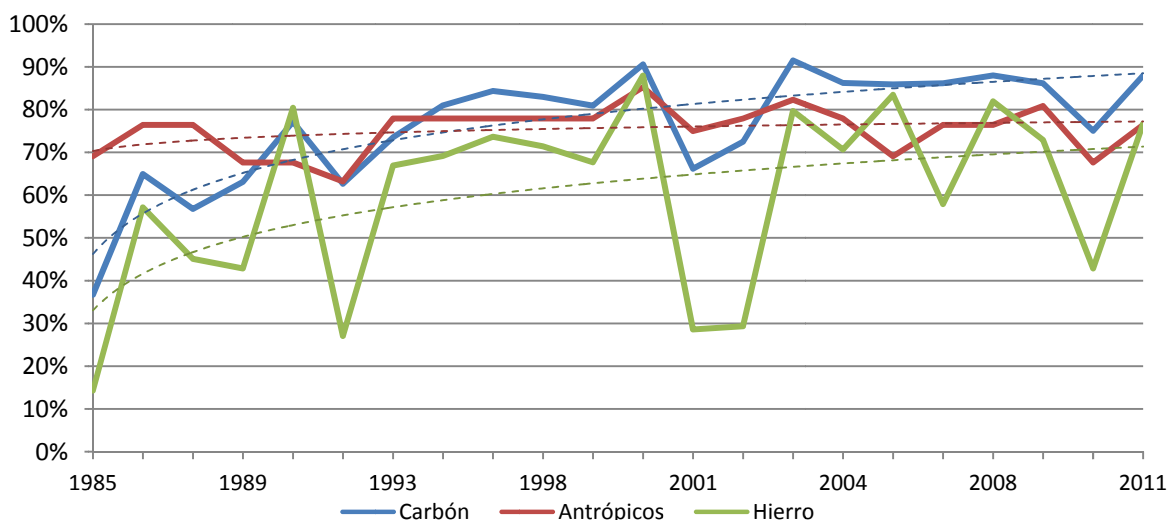


Figura 109: Gráfica de la evolución temporal del NDVI para cada tipo de escombrera.



5.2.4. Por núcleo de acumulación.

Se ha recopilado el porcentaje de superficie medio calculado para todos los núcleos de acumulación por cada año del estudio (Tablas 59 y 60).

Año	Núcleo de Acumulación									
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
1985	15,53 %	77,59 %	78,72 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	42,64 %	26,54 %	38,42 %	63,33 %
1986	32,20 %	77,59 %	91,49 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	70,54 %	82,72 %	79,89 %	75,00 %
1987	22,73 %	72,41 %	85,11 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	72,87 %	69,75 %	70,74 %	66,67 %
1989	25,95 %	79,31 %	65,96 %	85,71 %	75,93 %	80,00 %	79,07 %	88,89 %	81,69 %	73,33 %
1990	50,95 %	81,03 %	85,11 %	57,14 %	74,07 %	86,67 %	82,17 %	83,33 %	92,82 %	70,00 %
1991	21,59 %	72,41 %	68,09 %	85,71 %	75,93 %	80,00 %	80,62 %	90,12 %	84,38 %	76,67 %
1993	37,88 %	77,59 %	78,72 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	90,70 %	89,51 %	93,90 %	75,00 %
1996	57,58 %	82,76 %	91,49 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	91,47 %	89,51 %	94,97 %	78,33 %
1997	69,32 %	81,03 %	91,49 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	93,02 %	89,51 %	93,36 %	80,00 %
1998	68,37 %	82,76 %	85,11 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	93,02 %	89,51 %	90,48 %	80,00 %
1999	61,17 %	82,76 %	91,49 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	90,70 %	89,51 %	91,38 %	80,00 %
2000	77,27 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	99,22 %	100,00 %	95,15 %	91,67 %
2001	25,38 %	79,31 %	78,72 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	87,60 %	89,51 %	85,46 %	66,67 %
2002	43,75 %	62,07 %	89,36 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	86,05 %	88,27 %	88,51 %	66,67 %
2003	85,23 %	89,66 %	93,62 %	85,71 %	83,33 %	86,67 %	96,12 %	94,44 %	96,95 %	86,67 %
2004	78,03 %	58,62 %	91,49 %	57,14 %	83,33 %	80,00 %	93,02 %	87,04 %	94,25 %	75,00 %
2005	82,01 %	87,93 %	89,36 %	71,43 %	83,33 %	73,33 %	87,60 %	85,80 %	89,23 %	76,67 %
2007	75,95 %	67,24 %	91,49 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	92,25 %	88,89 %	94,61 %	75,00 %
2008	81,06 %	75,86 %	95,74 %	100,00 %	79,63 %	80,00 %	93,02 %	91,98 %	94,61 %	85,00 %
2009	74,24 %	72,41 %	85,11 %	57,14 %	85,19 %	93,33 %	93,02 %	90,12 %	95,69 %	73,33 %
2010	49,24 %	70,69 %	87,23 %	85,71 %	75,93 %	80,00 %	88,37 %	91,36 %	91,20 %	73,33 %
2011	80,87 %	72,41 %	91,49 %	71,43 %	83,33 %	86,67 %	93,02 %	89,51 %	94,25 %	75,00 %

Tabla 59: Porcentajes medios de superficie vegetada para todos los años por núcleo de acumulación (01-10).

Se ha elaborado una gráfica temporal por núcleo de acumulación (ir a Anexo III) con la estructura de la Figura 110.

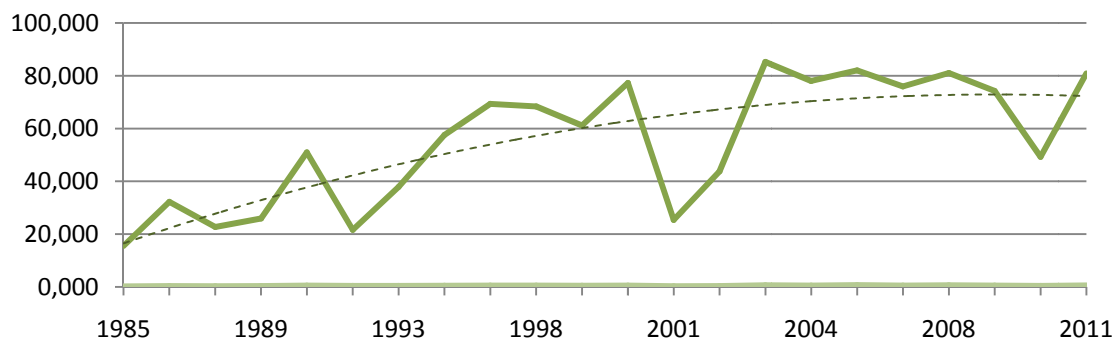


Figura 110: Gráfica de La evolución temporal del NDVI para cada núcleo de acumulación 01.



ESTUDIO DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE LAS ESCOMBRERAS DE ASTURIAS



Año	Núcleo de Acumulación								
	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1985	92,86 %	77,78 %	8,47 %	56,25 %	80,00 %	80,00 %	59,09 %	80,00 %	33,33 %
1986	92,86 %	77,78 %	53,39 %	81,25 %	80,00 %	80,00 %	72,73 %	80,00 %	66,67 %
1987	92,86 %	77,78 %	40,68 %	75,00 %	80,00 %	80,00 %	72,73 %	80,00 %	66,67 %
1989	85,71 %	55,56 %	39,83 %	62,50 %	30,00 %	73,33 %	72,73 %	80,00 %	66,67 %
1990	71,43 %	55,56 %	80,51 %	75,00 %	50,00 %	80,00 %	68,18 %	73,33 %	50,00 %
1991	85,71 %	55,56 %	24,58 %	43,75 %	30,00 %	73,33 %	63,64 %	80,00 %	50,00 %
1993	92,86 %	77,78 %	64,41 %	81,25 %	80,00 %	80,00 %	77,27 %	80,00 %	66,67 %
1996	92,86 %	77,78 %	66,95 %	81,25 %	80,00 %	80,00 %	77,27 %	80,00 %	66,67 %
1997	92,86 %	77,78 %	72,03 %	81,25 %	80,00 %	80,00 %	77,27 %	80,00 %	66,67 %
1998	92,86 %	77,78 %	69,49 %	81,25 %	80,00 %	80,00 %	77,27 %	80,00 %	66,67 %
1999	92,86 %	77,78 %	65,25 %	81,25 %	80,00 %	80,00 %	77,27 %	80,00 %	66,67 %
2000	100,00 %	100,00 %	86,44 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	54,55 %	100,00 %	100,00 %
2001	92,86 %	77,78 %	22,03 %	75,00 %	80,00 %	80,00 %	68,18 %	80,00 %	66,67 %
2002	92,86 %	77,78 %	24,58 %	62,50 %	80,00 %	80,00 %	77,27 %	80,00 %	66,67 %
2003	78,57 %	88,89 %	79,66 %	81,25 %	60,00 %	80,00 %	81,82 %	100,00 %	83,33 %
2004	92,86 %	77,78 %	68,64 %	81,25 %	80,00 %	80,00 %	77,27 %	80,00 %	66,67 %
2005	78,57 %	77,78 %	84,75 %	68,75 %	50,00 %	86,67 %	68,18 %	66,67 %	66,67 %
2007	92,86 %	77,78 %	54,24 %	81,25 %	80,00 %	80,00 %	77,27 %	80,00 %	50,00 %
2008	78,57 %	77,78 %	82,20 %	81,25 %	60,00 %	80,00 %	77,27 %	86,67 %	66,67 %
2009	92,86 %	77,78 %	71,19 %	81,25 %	80,00 %	80,00 %	77,27 %	93,33 %	66,67 %
2010	85,71 %	55,56 %	37,29 %	62,50 %	30,00 %	73,33 %	72,73 %	80,00 %	66,67 %
2011	92,86 %	77,78 %	75,42 %	81,25 %	80,00 %	80,00 %	77,27 %	80,00 %	50,00 %

Tabla 60: Porcentajes medios de superficie vegetada para todos los años por núcleo de acumulación (11-19).



5.2.4. OTROS ESTUDIOS EN LAS ESCOMBRERAS.

Una vez se haya realizado el estudio del NDVI y la superficie vegetada en base a los resultados obtenidos mediante Teledetección, se ha obtenido una serie de datos relativos a otras características físicas de las escombreras y la zona en la que están asentadas.

5.2.4.1. Información física sobre el espacio de las escombreras.

La información sobre área, altura, pendiente y orientación, es decir, toda aquella relacionada con la forma, tamaño y ubicación física de la misma, se ha recopilado en una tabla (Tabla 61) de cara a sacar condiciones sobre su influencia sobre la calidad de la vegetación.

Núcleo de Acumulación	Área de la escombrera	Altura media	Pendiente media	Orientación predominante
Núcleo 01	475200 m ²	1663,06 m	38,20 %	Oeste
Núcleo 02	52200 m ²	447,15 m	31,75 %	Norte
Núcleo 03	43044 m ²	541,31 m	27,48 %	Sureste
Núcleo 04	6300 m ²	1037,50 m	28,81 %	Todas
Núcleo 05	47772 m ²	639,67 m	57,77 %	Norte
Núcleo 06	13500 m ²	1083,70 m	57,18 %	Sur
Núcleo 07	116100 m ²	824,28 m	59,36 %	Noroeste
Núcleo 08	145800 m ²	681,51 m	43,75 %	Suroeste
Núcleo 09	501300 m ²	976,35 m	43,88 %	Noreste
Núcleo 10	54000 m ²	477,01 m	18,70 %	Noreste
Núcleo 11	12600 m ²	737,74 m	33,30 %	Norte
Núcleo 12	8012 m ²	568,97 m	46,99 %	Oeste
Núcleo 13	106200 m ²	1685,00 m	41,57 %	Este
Núcleo 14	14400 m ²	1603,00 m	21,75 %	Todas
Núcleo 15	9000 m ²	375,88 m	54,02 %	Sureste
Núcleo 16	13500 m ²	703,31 m	57,44 %	Suroeste
Núcleo 17	224188 m ²	1020,00 m	61,97 %	Este
Núcleo 18	13500 m ²	1241,78 m	70,09 %	Sureste
Núcleo 19	5400 m ²	846,73 m	58,18 %	Noreste

Tabla 61: Recopilación de la información física de las escombreras.

5.2.4.2. Información sobre el entorno de las escombreras.

A su vez, se ha estudiado el lugar sobre el que se asientan las escombreras en cuanto a vegetación (Tabla 62) y litología (Tabla 63).



Núcleo de Acumulación	Vegetación predominante
Núcleo 01	Brezales
Núcleo 02	Aliseda
Núcleo 03	Aliseda
Núcleo 04	Brezales
Núcleo 05	Castaño
Núcleo 06	Hayedos
Núcleo 07	Formaciones arbustivas
Núcleo 08	Prados
Núcleo 09	Hayedos
Núcleo 10	Castaño
Núcleo 11	Castaño
Núcleo 12	Castaño
Núcleo 13	Matorrales rastreros de alta montaña
Núcleo 14	Matorrales rastreros de alta montaña
Núcleo 15	Brezales
Núcleo 16	Castaño
Núcleo 17	Brezales
Núcleo 18	Prados
Núcleo 19	Brezales

Tabla 62: Recopilación de la vegetación predominante en la zona de las escombreras.

Núcleo de Acumulación	Formación.	Litología.
Núcleo 01	No.	Conglomerados silíceos, areniscas, pizarras y carbón estefanienses.
Núcleo 02	San Emiliano y Formación Olleros.	Pizarras, areniscas y calizas.
Núcleo 03	San Emiliano y Formación Olleros.	Pizarras, areniscas y calizas.
Núcleo 04	Grupo Lena.	Pizarras, calizas y areniscas.
Núcleo 05	Grupo Sama.	Pizarras y areniscas.
Núcleo 06	Grupo Sama.	Pizarras y areniscas.
Núcleo 07	Grupo Sama.	Pizarras y areniscas.
Núcleo 08	Grupo Sama.	Pizarras y areniscas.
Núcleo 09	Grupo Sama.	Pizarras y areniscas.
Núcleo 10	Grupo Sama.	Pizarras y areniscas.
Núcleo 11	Grupo Sama.	Pizarras y areniscas.
Núcleo 12	Grupo Lena.	Pizarras, calizas y areniscas.
Núcleo 13	No.	Caliza de montaña.
Núcleo 14	Formación Portilla - Candás.	Calizas.
Núcleo 15	Formación Barrios.	Cuarcitas.
Núcleo 16	Formación Láncara.	Calizas.
Núcleo 17	Formación Barrios.	Cuarcitas.
Núcleo 18	Grupo Rañeces - La Vid.	Composición mixta.
Núcleo 19	Formación Barrios.	Cuarcitas.

Tabla 63: Recopilación de la litología predominante en la zona de las escombreras.



5.2.5. RESULTADOS DEL ESTUDIO TEMPORAL Y DE EVOLUCIÓN DE LA VEGETACIÓN.

Se han obtenido estadísticas mediante el histograma de los archivos raster creados relativos al estudio temporal y a la evolución de la superficie vegetada para la zona interior de las escombreras.

5.2.5.1. Estudio temporal de la superficie vegetada.

La Figura 111 representa el histograma de frecuencias del resultado del estudio temporal de la superficie vegetada.

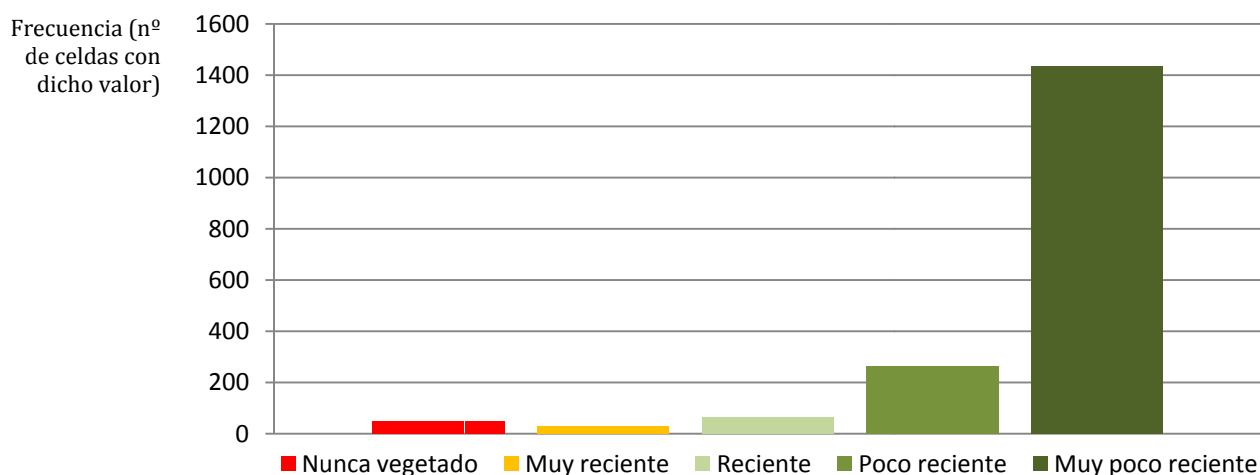


Figura 111: Histograma de frecuencia del estudio temporal de la superficie vegetada para todas las escombreras.

Tal como se podía suponer al observar un ejemplo de la curva de tendencia de superficie vegetada (Figura 88), cuya pendiente ascendente era mucho mayor durante los primeros años, la mayor parte de la vegetación se ha repoblado o ya estaba revegetada en los primeros años del estudio.

5.2.5.2. Estudio de la evolución de la superficie vegetada.

De la misma forma se ha obtenido el histograma de los resultados del estudio de la evolución de la superficie vegetada para todas las escombreras (Figura 112).

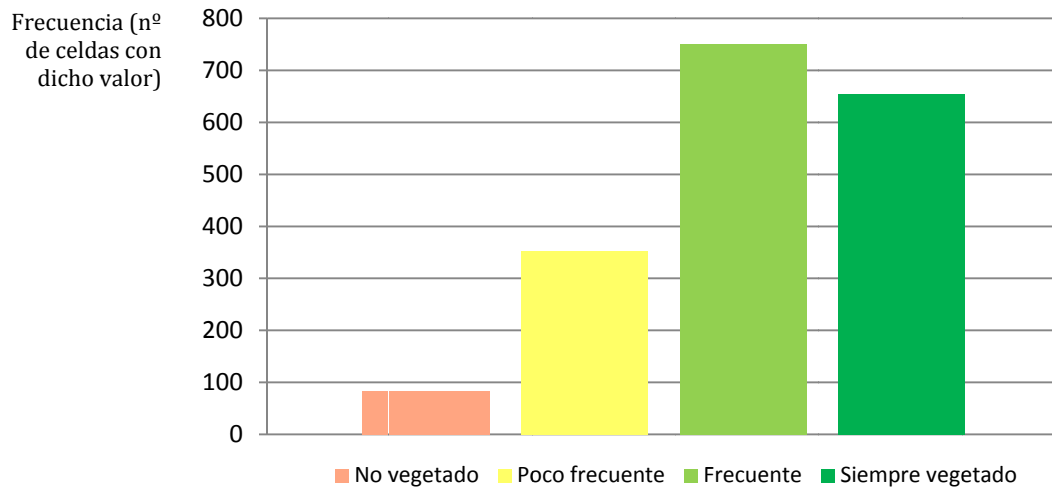


Figura 112: Histograma de frecuencia del estudio de evolución de la superficie vegetada para todas las escombreras.

Se aprecia más homogeneidad que en el gráfico del estudio temporal, estando la mayoría de vegetación presente en la mayoría de años del estudio.



5.2.6. ARCHIVOS OBTENIDOS.

En base a todos los cálculos realizados y resultados obtenidos se han elaborado mediante SIG diversos archivos que se han implementado en el espacio de trabajo explicado anteriormente. Además, se han añadido diversos campos con información calculada en relación al estudio.

5.2.6.1. Archivos creados.

Se han creado distintos archivos con la información suficiente como para realizar el estudio completo (Tabla 64).

Archivo	Tipo	Cantidad
Polígono de escombreras por tipo	Vectorial (polígonos)	3
Núcleos de acumulación	Vectorial (polígonos)	19
Zona de influencia de las escombreras	Vectorial (polígonos)	22
Malla de puntos	Vectorial (puntos)	1
NDVI por tipo de escombrera y año	Ráster	66
NDVI por núcleo de acumulación y año	Ráster	418
Superficie vegetada por año	Ráster	22
Modelo de evolución de la vegetación	Ráster	1
Modelo de estudio temporal de la vegetación	Ráster	1
TOTAL		553

Tabla 64: Archivos creados en el estudio mediante SIG.

A partir de dichos archivos se ha extraído información y se han obtenido resultados en entornos exteriores al SIG.

5.2.6.2. Atributos introducidos en el vectorial de escombreras.

Una vez se han realizado los cálculos y análisis ajenos al SIG, los resultados obtenidos se han introducido como atributos a los archivos vectoriales. Los valores medios se han introducido en el vectorial de los polígonos de escombreras (ver Tabla 65).



Atributo	Descripción
NDVI Parte 1	NDVI medio del núcleo de acumulación para la parte 1
NDVI Parte 2	NDVI medio del núcleo de acumulación para la parte 2
NDVI Parte 3	NDVI medio del núcleo de acumulación para la parte 3
NDVI Parte 4	NDVI medio del núcleo de acumulación para la parte 4
NDVI Medio	Media de los NDVI medios para cada núcleo de acumulación en la totalidad temporal del estudio
%Veg Parte 1	Porcentaje de vegetación medio del núcleo de acumulación para la parte 1
%Veg Parte 2	Porcentaje de vegetación medio del núcleo de acumulación para la parte 2
%Veg Parte 3	Porcentaje de vegetación medio del núcleo de acumulación para la parte 3
%Veg Parte 4	Porcentaje de vegetación medio del núcleo de acumulación para la parte 4
%Veg Medio	Media de los porcentajes de vegetación de cada núcleo de acumulación durante todos los años del estudio.
10	TOTAL

Tabla 65: Atributos para las escombreras creados en el estudio mediante SIG.

5.2.6.3. Atributos introducidos en la malla de puntos.

Los archivos pertenecientes a celdas individuales, así como los cálculos hechos en base a ellas, se han introducido en la malla de puntos de 30x30 m (Tabla 66).

Atributo	Descripción
Vegetado 1985	1 en caso de estar vegetado, 0 en caso de no estarlo
...
Vegetado 2011	1 en caso de estar vegetado, 0 en caso de no estarlo
NDVI 1985	Valor del NDVI para 1985 en la celda
...	...
NDVI 2011	Valor del NDVI para 2011 en la celda
Histórico	Suma de todos los valores para la vegetación en ese píxel
Parte 1	Suma de los valores Vegetado _N para la parte 1
Parte 2	Suma de los valores Vegetado _N para la parte 2
Parte 3	Suma de los valores Vegetado _N para la parte 3
Parte 4	Suma de los valores Vegetado _N para la parte 4
Evolución	Nivel de vegetación en el píxel.
Estudio Temporal	Nivel en el estudio temporal en el píxel.
51	TOTAL

Tabla 66: Atributos para la malla de puntos creados en el estudio mediante SIG.



6. CONCLUSIONES



6.1. CONCLUSIONES.

A raíz del estudio y la obtención de una serie de resultados y su correcta comparación e interpretación, se han podido extraer unas conclusiones satisfactorias para el estudio de la vegetación en las escombreras basado en el análisis del NDVI y otros factores importantes en el interior de las escombreras.

6.1.1. CONCLUSIONES RELATIVAS AL PROCESO MEDIANTE TELEDETECCIÓN.

Previamente al estudio de la vegetación se han obtenido imágenes de satélite, las cuales han sido corregidas y convertidas a diversos parámetros físicos para obtener el dato del NDVI. De dicho proceso se han obtenido las siguientes conclusiones:

6.1.1.1. La importancia de la planificación previa.

La adquisición de imágenes a lo largo del tiempo a través de distintos servidores se ha mostrado como una de las principales dificultades del estudio. Se han tenido que tener en cuenta las diferentes resoluciones, sistemas de proyección, dimensiones de las imágenes, etc. Además, el problema de disponibilidad ha resultado ser mayor del esperado en cuanto a imágenes descargables y permisos para obtenerlas, así como por meteorología, ya que la zona del Principado de Asturias se encuentra muy frecuentemente cubierta por nubes. Por ello, el estudio previo de las imágenes a obtener y su homogeneización es fundamental.

Ha de tenerse en cuenta también el espacio disponible en el equipo con el que se vaya a trabajar. En el estudio, además de los archivos creados con SIG, se han ocupado más de 300 Gb. en imágenes de satélite corregidas y productos intermedios.



6.1.1.2. Importancia de la corrección rigurosa.

Debido a efectos de atmósfera, topografía, radiación solar, etc. nunca se sabe directamente el valor exacto del nivel digital o de los parámetros físicos de radiancia y reflectividad, así como el valor correcto del NDVI. Así pues, las correcciones realizadas para eliminar estos efectos son necesarias, así como las conversiones del valor codificado de ND a parámetros físicos. Para realizar correctamente estos procesos se han de usar los modelos más actuales y los parámetros y coeficientes más precisos posibles, de cara a poseer un valor lo más cercano al real posible.

6.1.1.3. Es aconsejable el uso de diferente software.

Junto al conjunto de correcciones y transformaciones de las imágenes se ha realizado un estudio de software específico de Teledetección del cual se han obtenido las siguientes conclusiones:

- **ER Mapper:** De gran utilidad para realizar las correcciones al integrar muy eficientemente imágenes ráster y vectoriales. Sin embargo, es muy lento y poco automático para las conversiones.
- **ENVI 5.0:** Más moderno y automático, permite la conversión automática de las imágenes de unos factores físicos a otros, así como el cálculo del NDVI. Además, es altamente integrable en ArcGIS. Se ha descubierto, además, una forma de programación de modo que se introduzcan automáticamente los factores para convertir a radiancia.
- **ENVI Classic:** Necesario en lugar del ENVI 5.0 para el cambio de formato de algunos archivos (.img, etc.)

Por ello, se ha considerado la mejor opción la utilización de distinto software para un mismo estudio, integrando uno con otro para la obtención de los resultados óptimos en cada paso.



6.1.2. TENDENCIA DE LA VEGETACIÓN EN LAS ESCOMBRERAS.

Analizando mediante GIS los archivos de NDVI y sus derivados para las escombreras se ha llegado a los siguientes resultados:

6.1.2.1. La tendencia del NDVI.

Interpretando las gráficas se ha llegado a la conclusión de que la tendencia de la vegetación sigue una curva convexa de pendiente ascendente. De ello se entiende que las escombreras se recuperan rápidamente, durante los primeros años, hasta un índice de vegetación más estabilizado. Desde entonces, la calidad de la vegetación continúa mejorando (recuperándose) cada vez más lentamente hasta estabilizarse en un valor mucho más próximo a su entorno (Figura 114).

- **Carbón:** La curva es pronunciada y su estabilizado ronda el NDVI de 0,7.
- **Hierro:** Variación suave de la pendiente; valores bajos partiendo de medias cercanas al no vegetado. El NDVI estable ronda el valor de 0,5.
- **Otros depósitos antrópicos:** Se llega a confundir con el entorno con valores de NDVI superiores a 0,8 una vez estabilizado.

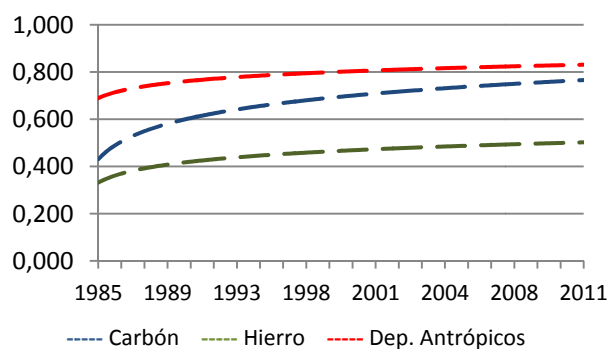


Figura 114: Tendencia de los tipos de escombrera.

Del mismo modo, las tendencias de la superficie vegetada para cada tipo son semejantes. Además, de igual manera lo son de modo individual para cada núcleo de acumulación, diferenciándose ligeramente la pendiente para cada uno y variando la altura en función de parámetros más individuales.



En ocasiones se han obtenido años en los que el NDVI es anormalmente superior o anormalmente inferior a la tendencia. Esto se debe a que ha habido años generalmente mejores o generalmente peores para la vegetación en la región. Se ha podido observar que las zonas con NDVI bajos todos los años presentan una bajada mayor en un año malo para todas las zonas, lo que lleva a pensar que se recupera peor de un año malo una zona con valores de NDVI habitualmente bajos.

6.1.2.2. Maneras de identificar escombreras.

Se ha estudiado la diferencia de NDVI entre el interior y el exterior de las escombreras y se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- **Carbón:** Diferencia clara, al principio de más de 0,3, cada vez menor llegando a diferencias de 0,1 al estabilizarse.
- **Hierro:** Al estabilizarse la diferencia es menor que las anteriores, llegando a solaparse en los últimos años. Diferencias nunca mayores a 0,2.
- **Otros depósitos antrópicos:** al llegar a los años 1990 las líneas se solapan, siendo imposible diferenciar escombrera de entorno.

Utilizando estas diferencias de NDVI podrían identificarse, mediante filtros, escombreras de carbón o hierro no recogidas en los mapas.

6.1.3. RELACIÓN DE OTROS PARÁMETROS CON LA CALIDAD DE LA VEGETACIÓN DE LAS ESCOMBRERAS.

Además de los tipos de escombrera existentes, existen otros factores que afectan a la calidad de la vegetación de las escombreras. Por ejemplo, el Núcleo de Acumulación 01 presenta un índice de vegetación mucho menor que otros núcleos de acumulación del mismo tipo, presumiblemente debido a su área, mucho mayor que el resto, o su altura, también elevada. Del mismo modo sucede para dos escombreras del mismo tipo cuya vegetación es distinta, como ocurre con el Núcleo de Acumulación 16 (castaño) y el 17 (brezales).



6.1.3.1. Características físicas.

- **Área:** Se ha observado que el área es la característica más decisiva a la hora de la recuperación de una escombrera, siendo las escombreras de mayor tamaño mucho más lentas en su recuperación. Se ha observado además que las escombreras más pequeñas presentan problemas a la hora de estudiarse, confundiéndose con el entorno fácilmente por diferencias en las cartografías y tamaños de celda demasiado grandes.
- **Altura:** Siendo menos decisivo, cuanto mayor altura tenga una escombrera, más bajo será su NDVI.
- **Pendiente:** No se ha observado una relación clara con la pendiente.
- **Orientación:** A pesar de lo que se pueda pensar por la incidencia solar, no se ha observado una relación clara con la orientación a la hora de estudiar el NDVI.

6.1.3.2. Características del entorno.

- **Vegetación:** Se ha observado que las escombreras con NDVI medios más bajos corresponden a todas aquellas rodeadas de alisedas y matorrales rastreros de montaña. Por otra parte, se ha observado que las rodeadas por castaño y hayedos presentan un mayor NDVI medio. Las escombreras rodeadas por brezales presentan una variación de NDVI medio muy elevada entre ellas.
- **Litología:** Se ha observado que el suelo que contiene pizarra coincide con las escombreras con mayor NDVI medio. Del mismo modo, los suelos que combinan calizas con otros minerales presentan NDVI más bajos.



7. BIBLIOGRAFÍA



9.1. PUBLICACIONES CONSULTADAS.

Ariza, Alexander. 2013. *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM. Versión 1.*

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Fecha de acceso: febrero de 2015.

<http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>

Bolstad, P. 2005. *GIS Fundamentals: A first text on Geographic Information Systems, Second Edition.* White Bear Lake, MN: Eider Press, 543 pp.

Bukata, R. P., J. E. Bruton, et al. 1983. *Use of chromaticity in remote measurements of water-quality.* Remote Sensing of Environment 13(2), 161-177.

Burrough, P.A. 1998. *Principles of geographical information systems.* et al. Oxford University Press, 327 pp.

Exelis Visual Information Solutions, Inc. 2014. *Calibrating Images Tutorial.* Consultado en febrero de 2015.

<http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/CalibratingImagesTutorial.pdf>

Camacho, F. et al. 2008. *Cadena de procesamiento de imágenes Landsat. Contribución al Plan Nacional de Teledetección.* Universidad de Valencia. Revista de Teledetección 36, 51-61.

Campbell, J.B. 2002. *Introduction to remote sensing* (3.^a edición). The Guilford Press, 621 pp. ISBN 1572306408.

Campo et al. 2005. *Relaciones entre el índice espectral de vegetación NDVI y la cobertura vegetal en pastos de puerto del Pirineo Occidental XLV Reunión Científica de la SEEP, Sesión: Sistemas Agrosilvopastorales,* pp. 304-310.

Chandler, Gyanesh et al. 2003. *Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges.* IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 41 (11),2674-2677.

Chandler, Gyanesh et al. 2009. *Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors.* Remote Sensing of Environment, 113 (5) 893-903.

Chuvieco, E., 1996. *Fundamentos de teledetección espacial. Tercera edición.* Ediciones RIALP S.A., Madrid. 568 pp.



Chuvieco, Emilio et al. 2011. *Plan Nacional de Teledetección de Media Resolución. Procesamiento estándar de imágenes Landsat. Documento técnico de algoritmos a aplicar.* Ministerio de fomento. 21 pp.

Chuvieco, Emilio. 2002. *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio.* Ed. Ariel Ciencia..

Firl, Grant J., 2011. *Calculating Vegetation Indices from Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM+ Data.* Colorado University.

García Alonso, Roberto. 2013. Trabajo Fin de Grado *Localización de escombreras y su impacto paisajístico en el Concejo de Cangas del Narcea.* Dirigido por González Moradas, M^a del Rosario. Universidad de Oviedo, 83 pp.

Gates, David M. 1980. *Biophysical Ecology*, Springer-Verlag, New York, 611 p.

National Aeronautics and Space Administration. *Landsat 7 Science Data Users Handbook.* 186 pp. Consultado en febrero de 2015.

http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf

Moreno Regidor, Pilar, 2007. Apuntes de la asignatura *Sistemas de Información Geográfica*, E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía, Madrid.

Recondo González, Carmen. 2015. Apuntes de la asignatura *Correcciones radiométricas de la imagen* del Máster Universitario en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Oviedo.

Recondo González, Carmen. 2015. Apuntes de la asignatura *Teledetección* del grado en Ingeniería en Geomática y Topografía.

Sanchez Fanjul, Jaime. 2013. Proyecto Fin de Carrera *Cartografía de zonas quemadas en Asturias entre los años 2009-2011 mediante imágenes Landsat.* Dirigido por Recondo González, Carmen. Universidad de Oviedo. 141 pp.

Sanchez Rodríguez, Esperanza. 2014. *Entrada de datos y edición raster. Análisis raster y tratamiento digital de imágenes de satélite.* Universidad Internacional de Andalucía 117 pp.

Saunier, Sebastien et al. 2009. *Landsat frequently asked questions.* Segunda revisión. Earth Observation Quality Control. 20 pp. Referencia: GAEL-P247-DOC-001



Serafini, M^a Cristina. *Sistemas sensores, generalidades sobre los sistemas sensores*. Dpto de Ciencias Básicas, PRODITEL. 24 pp. Consultado en marzo de 2015.

Van Westen, Ceen et al. 2012. *Introducción a los Sistemas de Información geográfica SIG*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. 78 pp.

Recondo, C., Wozniak, E. y Pérez-Morandeira, C.S. 2002. .Cartografía de zonas quemadas en Asturias durante el periodo 1991-2001 a partir de imágenes Landsat-TM.REVISTA DE TELEDETECCIÓN (Revista de la Asociación Española de Teledetección), 18, 47-55.

Recondo González, Carmen, Wozniak, Edyta y Pérez Morandeira, Carlos Santiago. 2007.*Teledetección de incendios*. En el Libro: Impacto de los incendios forestales en Asturias. Análisis de los últimos 30 años, pp. 59-140. Ed.Principado de Asturias, INDUROT (universidad de Oviedo) y KRK ediciones.Oviedo. ISBN: 978-84-8367-043-9

Chuvieco,E. I. Aguado, S. Jurdao, Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., Hantson, S., de la Riva J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverría, M., Azqueta, D., Román, M.V., Bastarrika, A., Martínez, S., Recondo, C., Zapico, E. y Martínez-Vega, F.J. 2014.*Integrating geospatial information into fire risk assessment*. International Journal of Wildland Fire, 23 (5), 606-619.

9.2. PORTALES WEBS VISITADOS.

Portal web *cartomap*, Gutierrez Palacios, Juan E. <http://cartomap.cl/>, Fecha de la visita: febrero de 2015

Portal web del IGN:<http://www.ign.es> , Fecha de la visita: febrero de 2015

Portal web <http://landsat.gsfc.nasa.gov/> 2015. , Fecha de la visita: enero de 2015

Portal web <http://sigte-tallerjornadas2015.readthedocs.org/es/latest/> Sitjar, Josep et al. Universidad de Girona, 2015. , Fecha de la visita: marzo de 2015

Portal web *Laboratorio Unidad Pacífico Sur CIESAS*. Langlé Campos, Rubén. <https://langleruben.wordpress.com>. 2010. , Fecha de la visita: febrero de 2015

Portal web *Sistemas de Información Geográfica, tipos y aplicaciones empresariales*. Confederación de Empresarios de Andalucía. <http://sig.cea.es/SIG>. 2010. , Fecha de la visita: abril de 2015



9.3. SOFTWARE UTILIZADO.

- ER Mapper.
- ENVI 5.0.
- ENVI Classic.
- Microsoft Office, Excel.
- Microsoft Office, Word.
- ArcGIS.



ANEXOS



I. PARÁMETROS DE LAS IMÁGENES

	Fecha	Acimut Sol (°)	Vsol (°)	Bandas	a0 / B	a1 / G	Radiancia = L_{λ} (W/m ² sr)		ND		L_{λ} Bukata (W/m ² sr)	ND _{aguaBukata}
1985	19850429 (USGS-GLOVIS)	134,245914	53,7354	b1	-2,19	0,67134	-1,52	169,00	1	255	12,3	22
	29 de abril de 1985			b2	-4,16	1,32220	-2,84	333,00	1	255	7,2	9
				b3	-2,21	1,04398	-1,17	264,00	1	255	1,2	3
				b4	-2,39	0,87602	-1,51	221,00	1	255	0	3
				b5	-0,49	0,12035	-0,37	30,20	1	255	0	4
	Tamaño pixel 30m			b6	1,1826	0,05536	1,238	15,30	1	255	0	-21
	Convolución cúbica			b7	-0,22	0,06555	-0,15	16,50	1	255	0	3
1986	19860806 (PNT-ESA)	126,4558	53,1409	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	6 de agosto de 1986			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
				b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
	Tamaño pixel 30m			b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
	Vecino más próximo			b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3
1987	19870910 (PNT-ESA)	141,3200	46,0700	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	10 de septiembre de 1987			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
				b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
	Tamaño pixel 30m			b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
	Vecino más próximo			b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3
1989	19890616 (USGS-GLOVIS)	124,0554	60,7488	b1	-2,20	0,67921	-1,52	171,00	1	255	12,3	21
	16 de junio de 1989			b2	-4,17	1,33402	-2,84	336,00	1	255	7,2	9
				b3	-2,17	1,00461	-1,17	254,00	1	255	1,2	3
				b4	-2,39	0,87602	-1,51	221,00	1	255	0	3
				b5	-0,50	0,12508	-0,37	31,40	1	255	0	4
	Tamaño pixel 30m			b6	1,1826	0,05537	1,238	15,30	1	255	0	-21
	Convolución cúbica			b7	-0,22	0,06594	-0,15	16,60	1	255	0	3

1989	19891001 (PNT-ESA)	147,1108	51,7404	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	1 de octubre de 1989			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
	Tamaño pixel 25m			b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
	Vecino más próximo			b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
				b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3
1990	19900801 (PNT-ESA)	124,4132	53,8453	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	1 de agosto de 1990			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
	Tamaño pixel 25m			b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
	Vecino más próximo			b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
				b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3
1990	19900809 (USGS-GLOVIS)	129,7331	36,4608	b1	-2,20	0,67921	-1,52	171,00	1	255	12,3	21
	9 de agosto de 1990			b2	-4,17	1,33402	-2,84	336,00	1	255	7,2	9
				b3	-2,17	1,00461	-1,17	254,00	1	255	1,2	3
	Tamaño pixel 30m			b4	-2,39	0,87602	-1,51	221,00	1	255	0	3
				b5	-0,50	0,12508	-0,37	31,40	1	255	0	4
	Convolución cúbica			b6	1,1826	0,05537	1,238	15,30	1	255	0	-21
				b7	-0,22	0,06594	-0,15	16,60	1	255	0	3
1991	19910525 (USGS-GLOVIS)	124,1759	57,2274	b1	-2,20	0,67921	-1,52	171,00	1	255	12,3	21
	25 de mayo de 1991			b2	-4,17	1,33402	-2,84	336,00	1	255	7,2	9
				b3	-2,17	1,00461	-1,17	254,00	1	255	1,2	3
	Tamaño pixel 30m			b4	-2,39	0,87602	-1,51	221,00	1	255	0	3
				b5	-0,50	0,12508	-0,37	31,40	1	255	0	4
	Convolución cúbica			b6	1,1826	0,05537	1,238	15,30	1	255	0	-21
				b7	-0,22	0,06594	-0,15	16,60	1	255	0	3

1991	19911007 (PNT-ESA)	148,2496	36,3334	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	7 de octubre de 1991			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
				b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
				b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
	Vecino más próximo			b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3
1993	19930708 (PNT-ESA)	120,4535	32,2293	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	8 de julio de 1993			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
				b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
				b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
	Vecino más próximo			b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3
1996	19960614 (PNT-ESA)	117,9558	32,3441	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	14 de junio de 1996			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
				b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
				b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
	Vecino más próximo			b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3
1997	19970614 (PNT-ESA)	136,6189	41,2521	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	14 de abril de 1997			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
				b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
				b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
	Vecino más próximo			b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3

1998	19980807 (PNT-ESA)	132,4220	34,7093	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	7 de agosto de 1998			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
				b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
				b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
	Vecino más próximo			b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3
1999	19990709 (PNT-ESA)	125,6197	29,9668	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	9 de julio de 1999			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
				b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
				b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
	Vecino más próximo			b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3
2000	20000625 (PNT-ESA)	124,7826	29,0154	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	25 de junio de 2000			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
				b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
				b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
	Vecino más próximo			b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3
2000	20001007 (PNT-ESA)	???	???	b1	-6,20	0,77570	-6,2	192	0	255	12,3	24
	7 de octubre de 2000			b2	-6,40	0,79570	-6,4	197	0	255	7,2	17
				b3	-5,00	0,61920	-5	153	0	255	1,2	10
				b4	-5,10	0,63730	-5,1	157	0	255	0	8
				b5	-1,00	0,12570	-1	31	0	255	0	8
				b6	3,2000	0,03710	3,2	13	0	255	0	-86
	Vecino más próximo			b7	-0,35	0,04370	-0,35	11	0	255	0	8

2001	20010620 (PNT-ESA)	129,986	45,8483	b1	-6,20	0,77570	-6,2	192	0	255	12,3	24
	20 de junio de 2001			b2	-6,40	0,79570	-6,4	197	0	255	7,2	17
				b3	-5,00	0,61920	-5	153	0	255	1,2	10
				b4	-5,10	0,63730	-5,1	157	0	255	0	8
				b5	-1,00	0,12570	-1	31	0	255	0	8
				b6	3,2000	0,03710	3,2	13	0	255	0	-86
	Vecino más próximo			b7	-0,35	0,04370	-0,35	11	0	255	0	8
2002	20020701 (USGS-GLOVIS)	124,4761	48,3349	b1	-2,29	0,76583	-1,52	193,00	1	255	12,3	19
	1 de julio de 2002			b2	-4,29	1,44819	-2,84	365,00	1	255	7,2	8
				b3	-2,21	1,04398	-1,17	264,00	1	255	1,2	3
				b4	-2,39	0,87602	-1,51	221,00	1	255	0	3
				b5	-0,49	0,12035	-0,37	30,20	1	255	0	4
				b6	1,1826	0,05537	1,238	15,30	1	255	0	-21
	Convolución cúbica			b7	-0,22	0,06555	-0,15	16,50	1	255	0	3
2003	20030805 (USGS-GLOVIS)	131,0926	34,4869	b1	-2,29	0,76583	-1,52	193,00	1	255	12,3	19
	5 de agosto de 2003			b2	-4,29	1,44819	-2,84	365,00	1	255	7,2	8
				b3	-2,21	1,04398	-1,17	264,00	1	255	1,2	3
				b4	-2,39	0,87602	-1,51	221,00	1	255	0	3
				b5	-0,49	0,12035	-0,37	30,20	1	255	0	4
				b6	1,1826	0,05537	1,238	15,30	1	255	0	-21
	Convolución cúbica			b7	-0,22	0,06555	-0,15	16,50	1	255	0	3
2004	20040602 (PNT-ESA)	129,333	28,3651	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	2 de junio de 2004			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
				b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
				b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
	Vecino más próximo			b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3

2005	20050927 (PNT-ESA)	152,8718	45,847	b1	-1,50	0,60235	-1,5	152	0	255	12,3	23
	27 de septiembre de 2005			b2	-2,80	1,17490	-2,8	297	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,2	204	0	255	1,2	3
	Tamaño pixel 25m			b4	-1,50	0,81451	-1,5	206	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27	0	255	0	3
	Vecino más próximo			b6	1,2378	0,05516	1,2378	15	0	255	0	-22
				b7	-0,15	0,05698	-0,15	14	0	255	0	3
2007	20070731 (USGS-GLOVIS)	135,7768	31,2457	b1	-2,29	0,76583	-1,52	193,00	1	255	12,3	19
	31 de julio de 2007			b2	-4,29	1,44819	-2,84	365,00	1	255	7,2	8
				b3	-2,21	1,04398	-1,17	264,00	1	255	1,2	3
	Tamaño pixel 30m			b4	-2,39	0,87602	-1,51	221,00	1	255	0	3
				b5	-0,49	0,12035	-0,37	30,20	1	255	0	4
	Convolución cúbica			b6	1,1826	0,05537	1,238	15,30	1	255	0	-21
				b7	-0,22	0,06555	-0,15	16,50	1	255	0	3
2008	20080802 (PNT-ESA)	133,7744	32,7746	b1	-1,50	0,60235	-1,50	152,10	0	255	12,3	23
	2 de agosto de 2008			b2	-2,80	1,17490	-2,80	296,80	0	255	7,2	9
				b3	-1,20	0,80588	-1,20	204,30	0	255	1,2	3
	Tamaño pixel 25m			b4	-1,50	0,81451	-1,50	206,20	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,10808	-0,37	27,19	0	255	0	3
	Vecino más próximo			b6	1,2378	0,05516	1,24	15,30	0	255	0	-22
				b7	-0,15	0,05698	-0,15	14,38	0	255	0	3
2009	20090602 (PNT-ESA)	???	???	b1	-1,52	0,76282	-1,52	193,00	0	255	12,3	18
	2 de junio de 2009			b2	-2,84	1,44250	-2,84	365,00	0	255	7,2	7
				b3	-1,17	1,03899	-1,17	263,77	0	255	1,2	2
	Tamaño pixel 25m			b4	-1,51	0,87258	-1,51	221,00	0	255	0	2
				b5	-0,37	0,11988	-0,37	30,20	0	255	0	3
	Vecino más próximo			b6	1,2378	0,05515	1,2378	15,30	0	255	0	-22
				b7	-0,15	0,06529	-0,15	16,50	0	255	0	2

2009	20090906 (USGS-GLOVIS)	146,8154	41,4005	b1	-2,29	0,76583	-1,52	193,00	1	255	12,3	19
	6 de septiembre de 2009			b2	-4,29	1,44819	-2,84	365,00	1	255	7,2	8
				b3	-2,21	1,04398	-1,17	264,00	1	255	1,2	3
				b4	-2,39	0,87602	-1,51	221,00	1	255	0	3
				b5	-0,49	0,12035	-0,37	30,20	1	255	0	4
				b6	1,1826	0,05537	1,238	15,30	1	255	0	-21
	Convolución cúbica			b7	-0,22	0,06555	-0,15	16,50	1	255	0	3
2010	20100621 (USGS-GLOVIS)	130,4014	26,799	b1	-2,29	0,76583	-1,52	193,00	1	255	12,3	19
	21 de junio de 2010			b2	-4,29	1,44819	-2,84	365,00	1	255	7,2	8
				b3	-2,21	1,04398	-1,17	264,00	1	255	1,2	3
				b4	-2,39	0,87602	-1,51	221,00	1	255	0	3
				b5	-0,49	0,12035	-0,37	30,20	1	255	0	4
				b6	1,1826	0,05537	1,238	15,30	1	255	0	-21
	Convolución cúbica			b7	-0,22	0,06555	-0,15	16,50	1	255	0	3
2011	20110624 (USGS-GLOVIS)	129,6599	27,0891	b1	-2,29	0,76583	-1,52	193,00	1	255	12,3	19
	24 de junio de 2011			b2	-4,29	1,44819	-2,84	365,00	1	255	7,2	8
				b3	-2,21	1,04398	-1,17	264,00	1	255	1,2	3
				b4	-2,39	0,87602	-1,51	221,00	1	255	0	3
				b5	-0,49	0,12035	-0,37	30,20	1	255	0	4
				b6	1,1826	0,05537	1,238	15,30	1	255	0	-21
	Convolución cúbica			b7	-0,22	0,06555	-0,15	16,50	1	255	0	3



II. ESTADÍSTICAS DE LAS ZONAS DE AGUA EN LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA



ESTUDIO DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN
DE LAS ESCOMBRERAS DE ASTURIAS



29 abril 1985	Banda1		Banda2		Banda3		Banda4		Banda5		Banda6	Banda7	
	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.		Sin Corr.	Atmo.
Mínimo	61	16	22	8	14	1	11	1	5	1	107	3	1
Máximo	72	27	26	12	18	5	15	5	12	8	112	7	5
Media	66.7	21.7	23.5	9.5	16.0	3.0	13.1	3.1	8.5	4.5	109.0	4.9	2.9
Mediana	67	22	23	9	16	3	13	3	8	4	109	5	3
σ	2.557		0.814		0.962		0.800		1.359		0.912	0.983	
$\sigma(n-1)$	2.564		0.816		0.965		0.803		1.363		0.915	0.986	

16 junio 1989	Banda1		Banda2		Banda3		Banda4		Banda5		Banda6	Banda7	
	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.		Sin Corr.	Atmo.
Mínimo	69	14	24	7	17	1	12	0	6	1	130	2	0
Máximo	86	31	30	13	24	8	22	9	14	9	139	10	8
Media	75.5	20.5	26.5	9.5	18.9	2.9	15.9	3.0	9.4	4.5	135.4	5.3	3.3
Mediana	75	20	26	9	18	2	16	3	9	4	136	5	3
σ	4.113		1.258		1.669		2.072		1.677		2.324	1.283	
$\sigma(n-1)$	4.125		1.262		1.674		2.078		1.682		2.331	1.286	

Mayo de 1991	Banda1		Banda2		Banda3		Banda4		Banda5		Banda6	Banda7	
	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.		Sin Corr.	Atmo.
Mínimo	67	16	22	6	16	0	11	0	7	1	110	3	0
Máximo	77	26	30	14	22	6	17	6	14	8	123	9	6
Media	72.3	21.3	25.5	9.5	18.7	2.7	14.4	3.4	10.3	4.3	117.8	5.8	2.8
Mediana	72	21	25	9	19	3	14	3	10	4	120	6	3
σ	2.157		1.959		1.565		1.212		1.552		4.217	1.158	
$\sigma(n-1)$	2.163		1.964		1.570		1.216		1.556		4.230	1.162	

27 sept. 2005	Banda1		Banda2		Banda3		Banda4		Banda5		Banda6	Banda7	
	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.		Sin Corr.	Atmo.
Mínimo	47	15	18	7	14	0	9	0	6	0	101	3	0
Máximo	63	31	24	13	20	6	17	6	16	8	107	9	6
Media	55.5	23.4	20.1	9.2	16.9	3.0	13.4	2.5	10.9	3.0	204.2	5.7	2.8
Mediana	58	26	20	9	17	3	12	1	11	3	105	5	2
σ	4.865		1.395		1.007		2.380		2.821		2.234	1.616	
$\sigma(n-1)$	4.887		1.401		1.012		2.391		2.833		2.244	1.623	



ESTUDIO DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN
DE LAS ESCOMBRERAS DE ASTURIAS



2007	Banda1		Banda2		Banda3		Banda4		Banda5		Banda6	Banda7	
	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.		Sin Corr.	Atmo.
Mínimo	56	14	20	7	14	1	14	1	7	0	128	3	0
Máximo	65	23	24	11	19	6	19	6	13	6	136	9	7
Media	60.7	18.7	21.6	8.6	15.7	2.7	16.2	3.2	10.8	3.8	132.3	5.7	2.7
Mediana	60	18	21	8	15	2	16	3	11	4	133	6	2
σ	1.841		0.956		1.264		1.130		1.035		2.124	0.930	
$\sigma(n-1)$	1.849		0.960		1.269		1.134		1.039		2.132	0.933	

Sept. de 2009	Banda1		Banda2		Banda3		Banda4		Banda5		Banda6	Banda7	
	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.		Sin Corr.	Atmo.
Mínimo	44	12	16	6	11	1	8	0	4	1	124	3	2
Máximo	56	24	20	10	14	4	13	4	10	7	130	6	5
Media	51.2	19.2	17.8	7.8	12.6	2.6	11.6	2.6	7.0	4.0	126.9	4.2	3.2
Mediana	52	20	18	8	13	3	12	3	7	4	127	4	3
σ	2.635		0.953		0.606		0.719		0.999		1.378	0.852	
$\sigma(n-1)$	2.642		0.956		0.607		0.721		1.002		1.382	0.854	

Junio de 2010	Banda1		Banda2		Banda3		Banda4		Banda5		Banda6	Banda7	
	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.		Sin Corr.	Atmo.
Mínimo	54	15	18	5	13	1	10	0	5	0	113	2	0
Máximo	64	25	26	13	19	7	16	6	12	7	121	9	7
Media	58.3	19.3	21.3	8.3	15.3	3.3	13.4	3.4	8.5	3.5	117.0	5.1	3.1
Mediana	58	19	20	7	14	2	13	3	8	3	117	5	3
σ	2.042		2.172		2.013		1.365		1.556		1.898	1.097	
$\sigma(n-1)$	2.047		2.178		2.019		1.369		1.560		1.904	1.100	

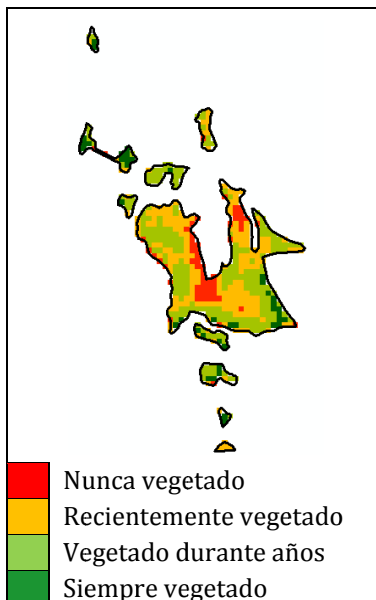
Junio de 2011	Banda1		Banda2		Banda3		Banda4		Banda5		Banda6	Banda7	
	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.	Sin Corr.	Atmo.		Sin Corr.	Atmo.
Mínimo	50	11	18	6	11	0	12	1	5	1	119	3	1
Máximo	63	24	23	11	18	7	18	7	12	8	123	8	6
Media	57.9	18.9	20.1	8.2	14.1	3.1	14.0	3	8.3	4.3	121.5	4.8	2.8
Mediana	59	20	20	8	14	3	14	3	8	4	122	5	3
σ	3.320		1.036		1.218		1.030		1.366		1.027	0.991	
$\sigma(n-1)$	3.329		1.153		1.222		1.033		1.370		1.030	0.994	



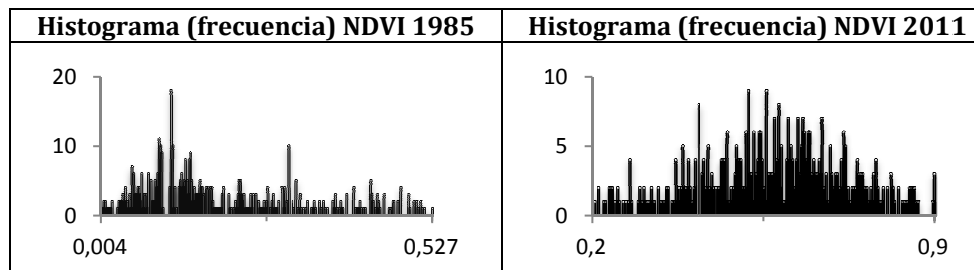
III. ESTUDIO INDIVIDUAL DE LAS ESCOMBRERAS



NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 01

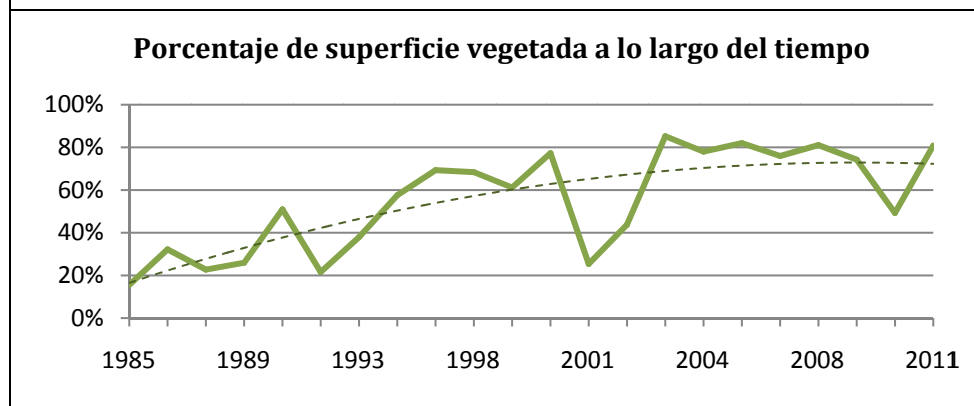
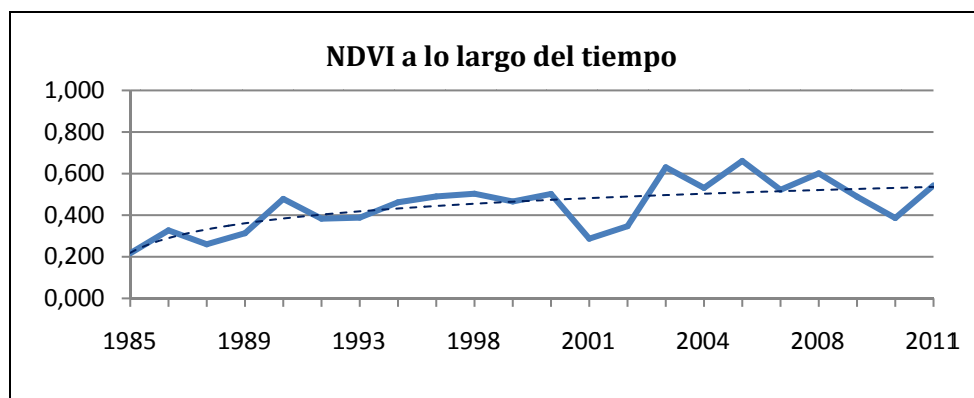


COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	256 127,62 m
Y _{UTM}	4 771 705,59 m
DATOS GENERALES	
Nº de polígonos	10
Área	475 200 m ²
NDVI _{MED}	0,445
%VEG _{MED}	55 %
Concejo	Quirós.
Tipo	Carbón.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	1 663,06 m
Pendiente	38,20 %
Orientación	Oeste.
Geología	Arenisca.
Vegetación	Brezales.



Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,217	15,5 %
1986	0,327	32,2 %
1987	0,260	22,7 %
1989	0,313	25,9 %
1990	0,478	50,9 %
1991	0,383	21,6 %
1993	0,388	37,9 %
1996	0,462	57,6 %
1997	0,490	69,3 %
1998	0,503	68,4 %
1999	0,466	61,2 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,502	77,3 %
2001	0,287	25,4 %
2002	0,347	43,8 %
2003	0,630	85,2 %
2004	0,531	78,0 %
2005	0,661	82,0 %
2007	0,522	75,9 %
2008	0,601	81,1 %
2009	0,489	74,2 %
2010	0,386	49,2 %
2011	0,543	80,9 %



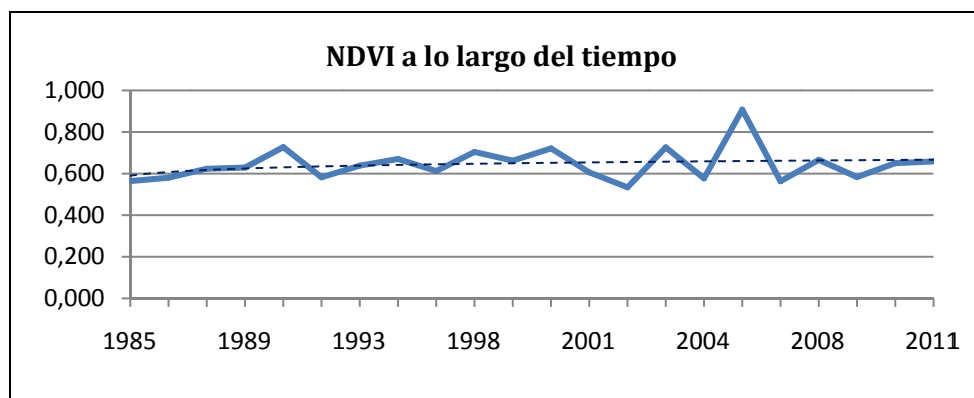
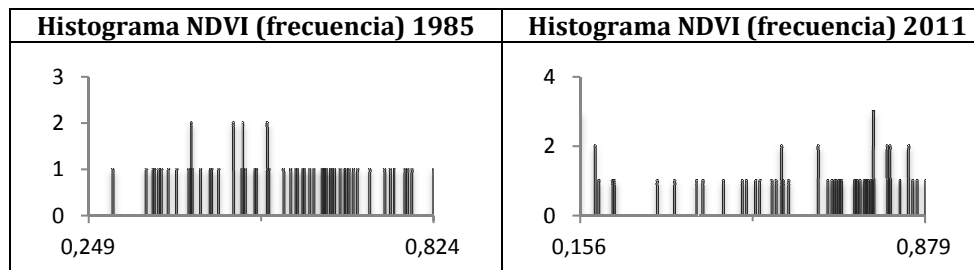


NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 02



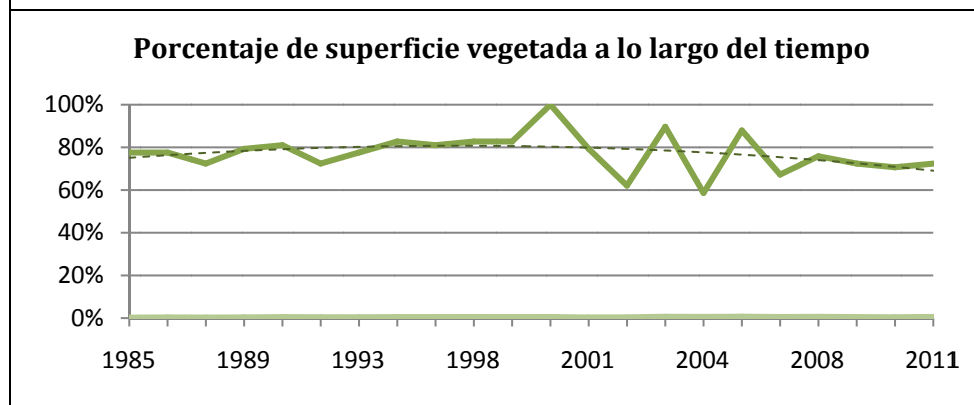
■ Nunca vegetado
■ Recientemente vegetado
■ Vegetado durante años
■ Siempre vegetado

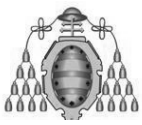
COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	247 815,97 m
Y _{UTM}	4 784 384,83 m
DATOS GENERALES	
Nº de polígonos	1
Área	52 200 m ²
NDVI _{MED}	0,645
%VEG _{MED}	77 %
Concejo	Teverga.
Tipo	Carbón.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	447,15 m
Pendiente	31,75 %
Orientación	Norte.
Geología	Arenita.
Vegetación	Aliseda.



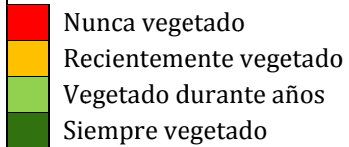
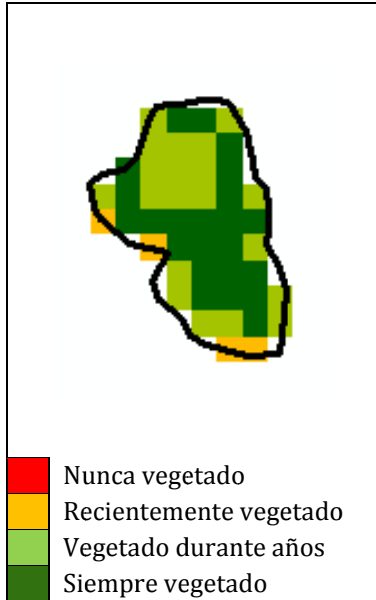
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,564	77,6 %
1986	0,580	77,6 %
1987	0,623	72,4 %
1989	0,629	79,3 %
1990	0,727	81,0 %
1991	0,582	72,4 %
1993	0,638	77,6 %
1996	0,670	82,8 %
1997	0,612	81,0 %
1998	0,704	82,8 %
1999	0,662	82,8 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,721	100,0 %
2001	0,606	79,3 %
2002	0,534	62,1 %
2003	0,726	89,7 %
2004	0,577	58,6 %
2005	0,907	87,9 %
2007	0,563	67,2 %
2008	0,666	75,9 %
2009	0,583	72,4 %
2010	0,650	70,7 %
2011	0,658	72,4 %

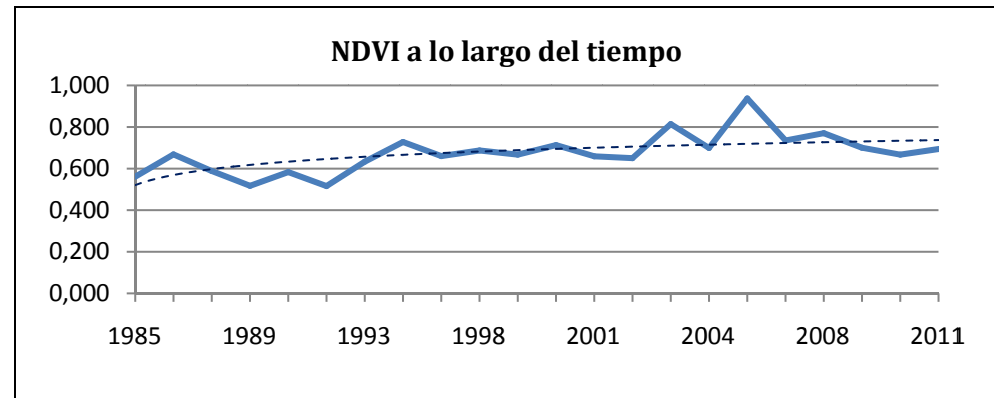
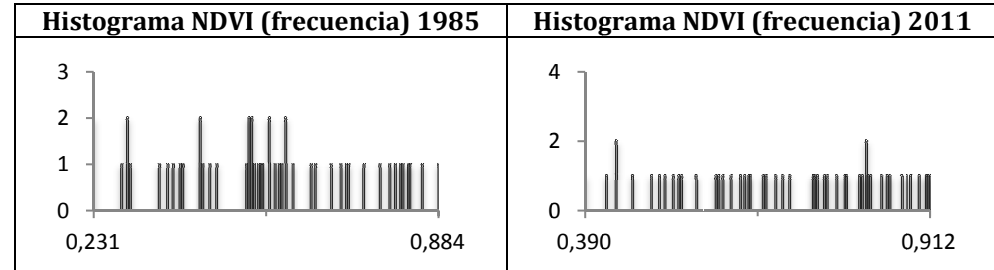




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 03

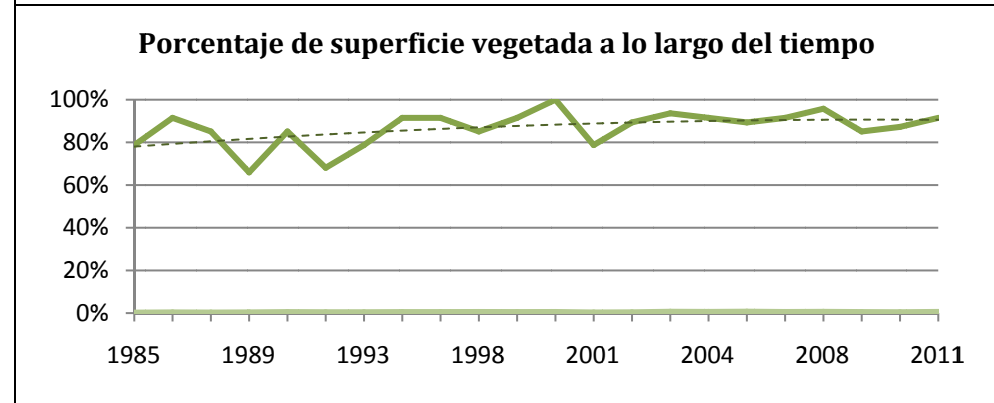


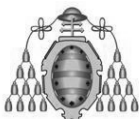
COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	245 751,58 m
Y _{UTM}	4 785 265,47 m
DATOS GENERALES	
Nº de polígonos	1
Área	43 044 m ²
NDVI _{MED}	0,675
%VEG _{MED}	86,7 %
Concejo	Teverga.
Tipo	Carbón.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	541,31 m
Pendiente	27,48 %
Orientación	Sureste.
Geología	Arenita.
Vegetación	Aliseda.



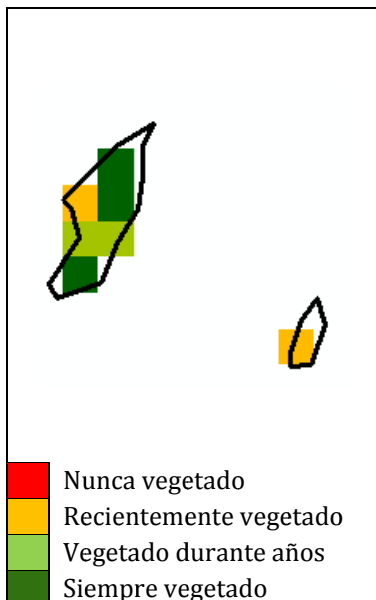
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,561	78,7 %
1986	0,668	91,5 %
1987	0,588	85,1 %
1989	0,517	66,0 %
1990	0,583	85,1 %
1991	0,516	68,1 %
1993	0,633	78,7 %
1996	0,728	91,5 %
1997	0,660	91,5 %
1998	0,687	85,1 %
1999	0,667	91,5 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,713	100,0 %
2001	0,659	78,7 %
2002	0,650	89,4 %
2003	0,814	93,6 %
2004	0,699	91,5 %
2005	0,937	89,4 %
2007	0,735	91,5 %
2008	0,770	95,7 %
2009	0,700	85,1 %
2010	0,667	87,2 %
2011	0,694	91,5 %

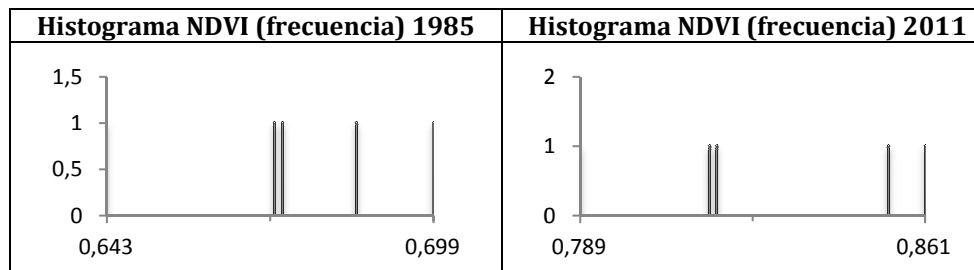




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 04

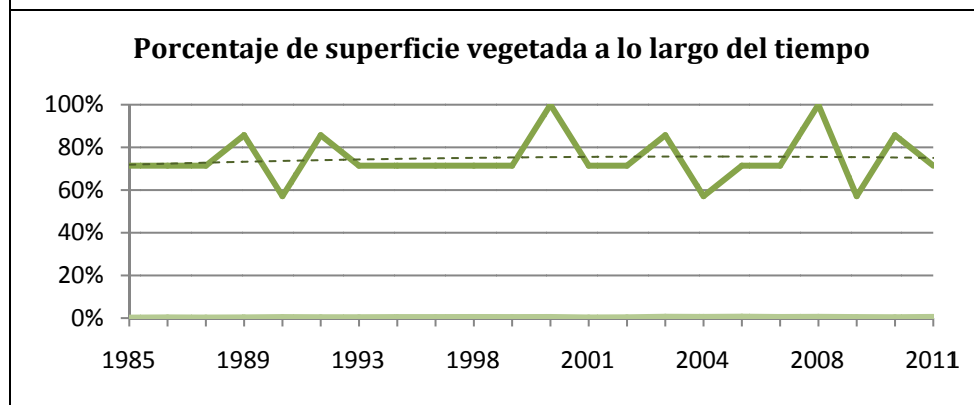
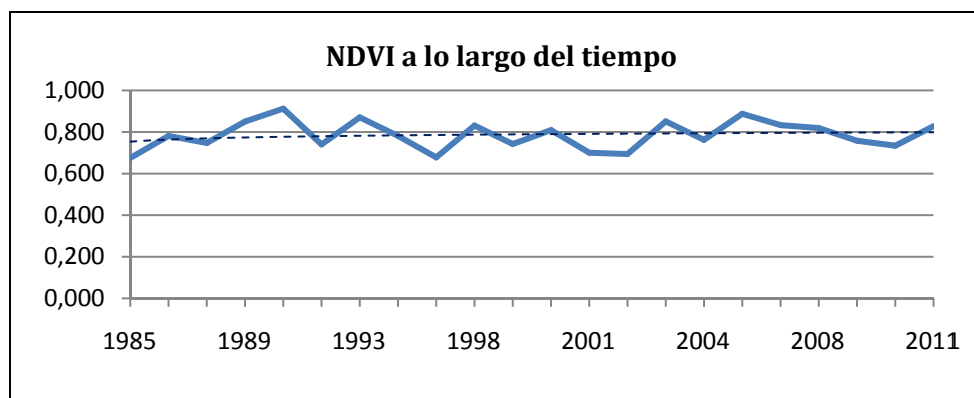


COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	245 646,19 m
Y _{UTM}	4 789 255,30 m
DATOS GENERALES	
Nº de polígonos	2
Área	6 300 m ²
NDVI _{MED}	0,786
%VEG _{MED}	74,7 %
Concejo	Teverga
Tipo	Carbón
DATOS DEL TERRENO	
Altura	1 037,50 m
Pendiente	28,81%
Orientación	Todas
Litología	Pizarras, calizas.
Vegetación	Brezales



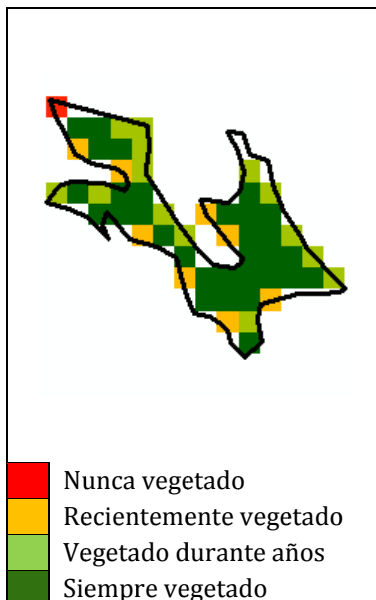
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,675	71,4 %
1986	0,781	71,4 %
1987	0,747	71,4 %
1989	0,850	85,7 %
1990	0,912	57,1 %
1991	0,740	85,7 %
1993	0,870	71,4 %
1996	0,781	71,4 %
1997	0,678	71,4 %
1998	0,831	71,4 %
1999	0,742	71,4 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,809	100,0 %
2001	0,700	71,4 %
2002	0,694	71,4 %
2003	0,851	85,7 %
2004	0,762	57,1 %
2005	0,887	71,4 %
2007	0,833	71,4 %
2008	0,819	100,0 %
2009	0,758	57,1 %
2010	0,734	85,7 %
2011	0,828	71,4 %

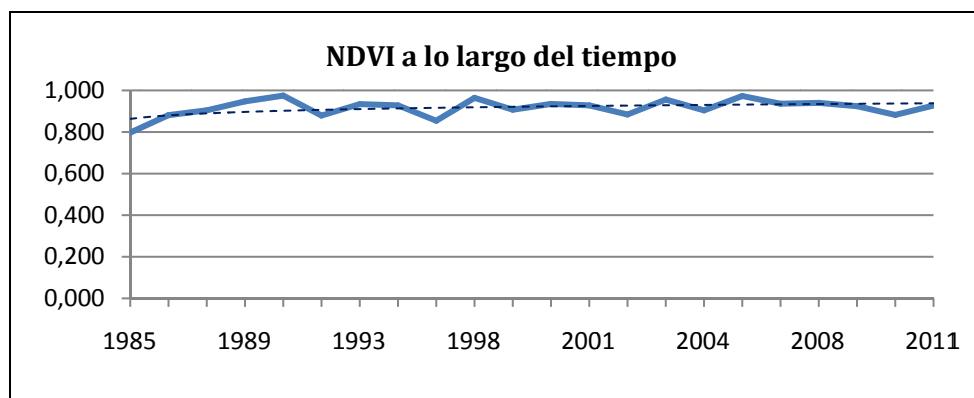
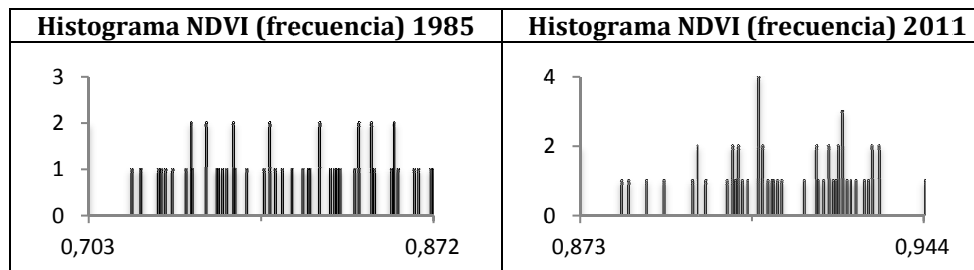




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 05

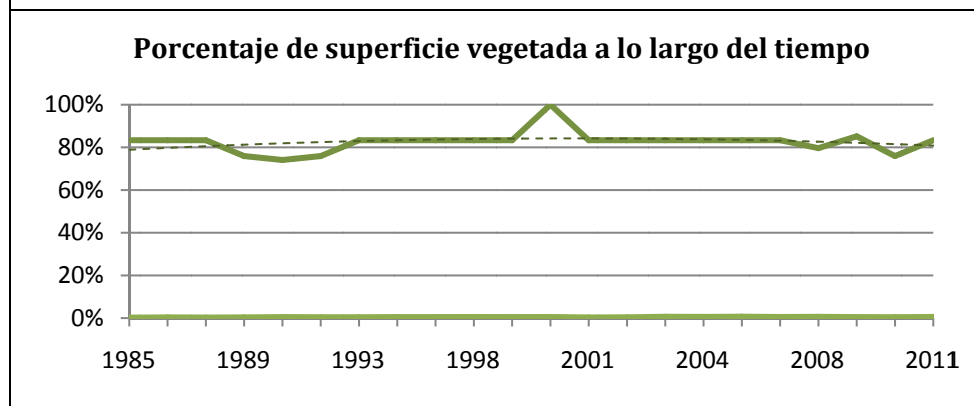


COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	265 915,00 m
Y _{UTM}	4 781 124,53 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	1
Área	47 772 m ²
NDVI _{MED}	0,916
%VEG _{MED}	82,6 %
Concejo	Lena
Tipo	Carbón
DATOS DEL TERRENO	
Altura	639,67 m
Pendiente	57,77 %
Orientación	Norte.
Litología	Pizarras, areniscas.
Vegetación	Castaño.



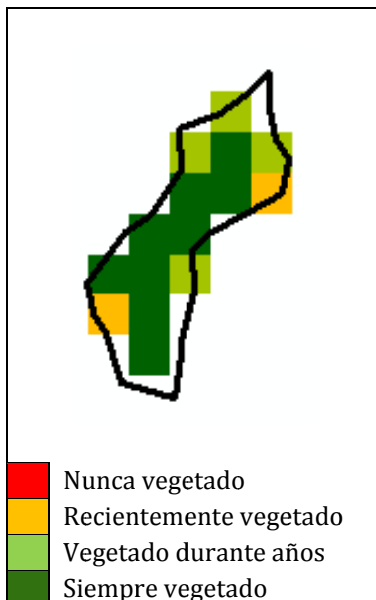
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,797	83,3 %
1986	0,881	83,3 %
1987	0,904	83,3 %
1989	0,947	75,9 %
1990	0,975	74,1 %
1991	0,879	75,9 %
1993	0,934	83,3 %
1996	0,928	83,3 %
1997	0,854	83,3 %
1998	0,964	83,3 %
1999	0,907	83,3 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,935	100,0 %
2001	0,928	83,3 %
2002	0,884	83,3 %
2003	0,956	83,3 %
2004	0,904	83,3 %
2005	0,973	83,3 %
2007	0,936	83,3 %
2008	0,940	79,6 %
2009	0,924	85,2 %
2010	0,882	75,9 %
2011	0,927	83,3 %

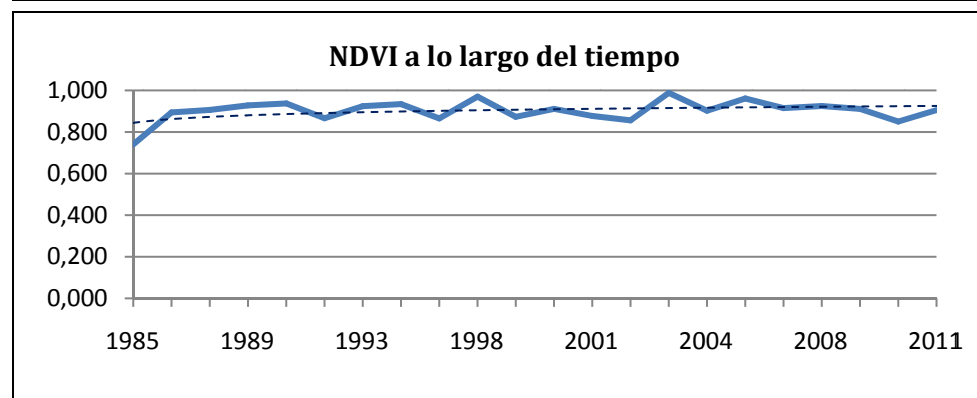
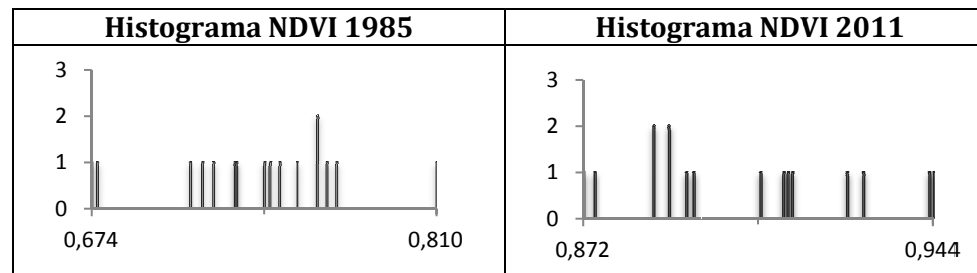




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 06

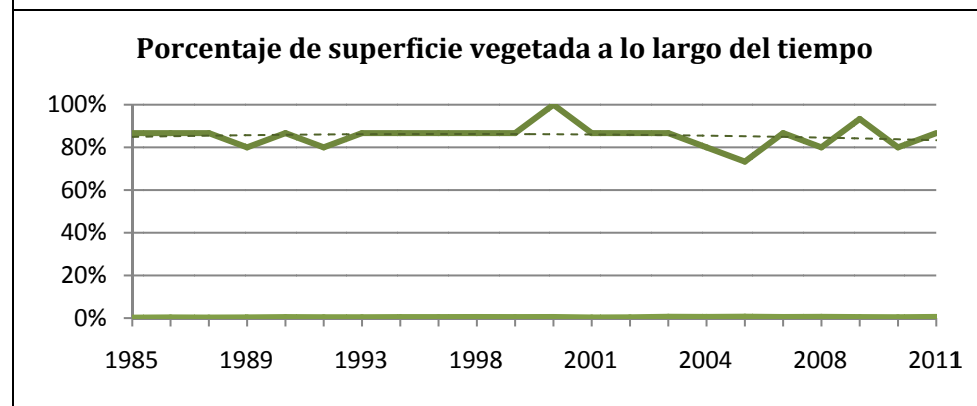


COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	263 169,89 m
Y _{UTM}	4 782 341,09 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	1
Área	13 500 m ²
NDVI _{MED}	0,902
%VEG _{MED}	85,5 %
Concejo	Lena
Tipo	Quirós
DATOS DEL TERRENO	
Altura	1083,70
Pendiente	57,18 %
Orientación	Sur
Litología	Pizarras, areniscas.
Vegetación	Hayedos



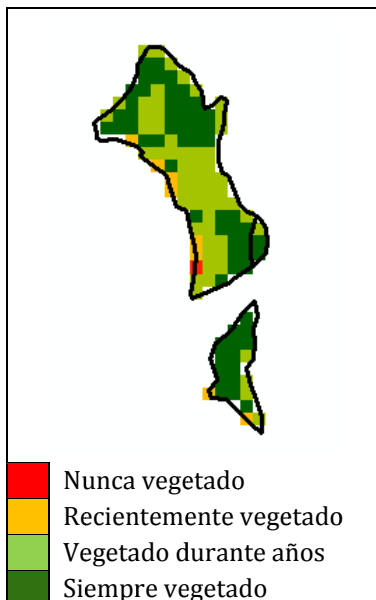
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,740	86,7 %
1986	0,894	86,7 %
1987	0,906	86,7 %
1989	0,928	80,0 %
1990	0,937	86,7 %
1991	0,866	80,0 %
1993	0,924	86,7 %
1996	0,934	86,7 %
1997	0,865	86,7 %
1998	0,970	86,7 %
1999	0,873	86,7 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,911	100,0 %
2001	0,877	86,7 %
2002	0,856	86,7 %
2003	0,988	86,7 %
2004	0,902	80,0 %
2005	0,961	73,3 %
2007	0,915	86,7 %
2008	0,925	80,0 %
2009	0,911	93,3 %
2010	0,850	80,0 %
2011	0,905	86,7 %

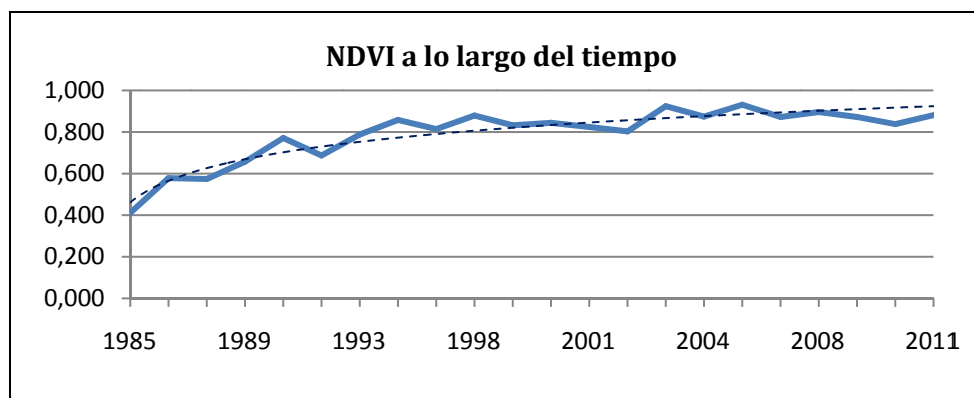
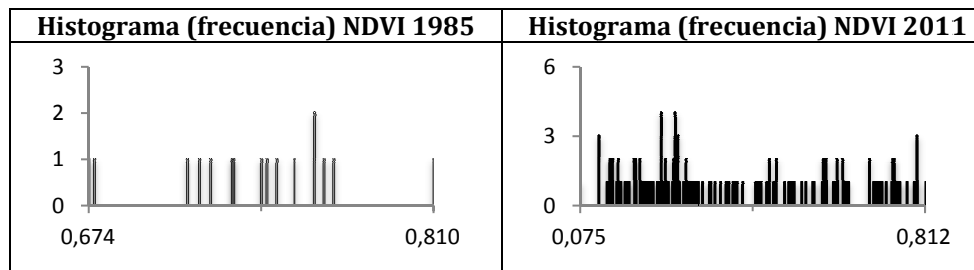




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 07

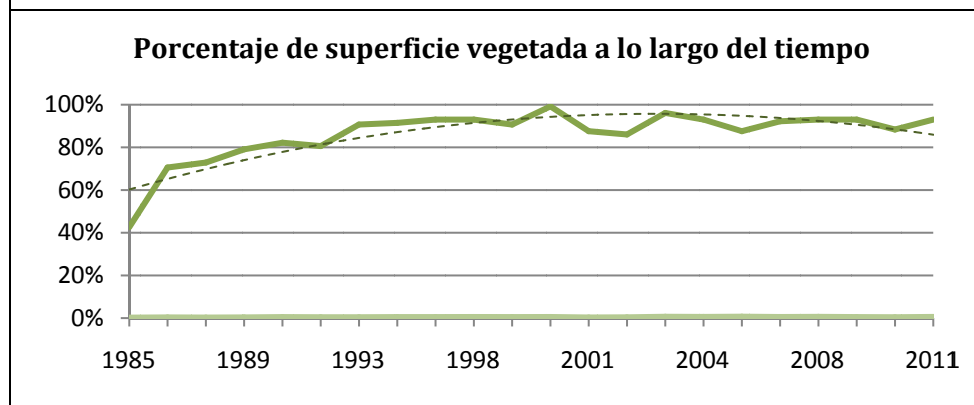


COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	262 253,63 m
Y _{UTM}	4 781 124,47 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	3
Área	116 100 m ²
NDVI _{MED}	0,791
%VEG _{MED}	86,2 %
Concejo	Quirós
Tipo	Carbón
DATOS DEL TERRENO	
Altura	824,28 m
Pendiente	59,36 %
Orientación	Noroeste
Litología	Pizarras, areniscas.
Vegetación	Form. Arbustivas.



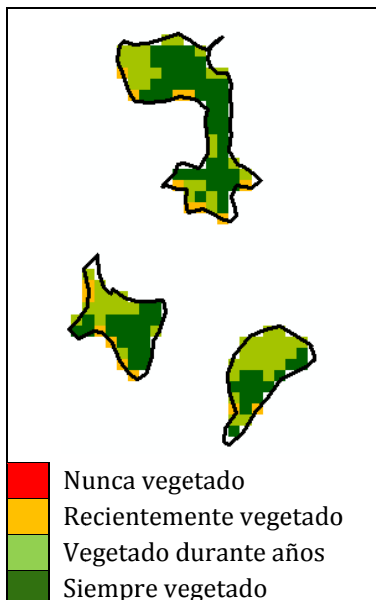
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,411	42,6 %
1986	0,578	70,5 %
1987	0,574	72,9 %
1989	0,657	79,1 %
1990	0,771	82,2 %
1991	0,687	80,6 %
1993	0,788	90,7 %
1996	0,858	91,5 %
1997	0,814	93,0 %
1998	0,879	93,0 %
1999	0,832	90,7 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,844	99,2 %
2001	0,824	87,6 %
2002	0,803	86,0 %
2003	0,924	96,1 %
2004	0,874	93,0 %
2005	0,931	87,6 %
2007	0,872	92,2 %
2008	0,896	93,0 %
2009	0,872	93,0 %
2010	0,838	88,4 %
2011	0,881	93,0 %

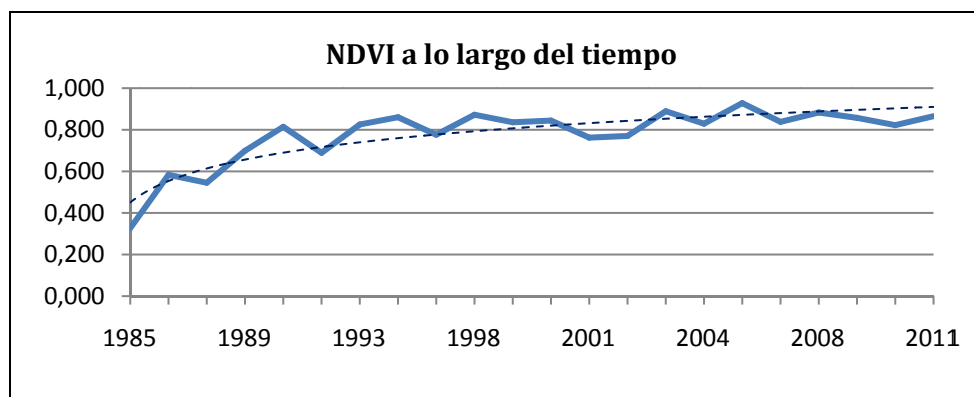
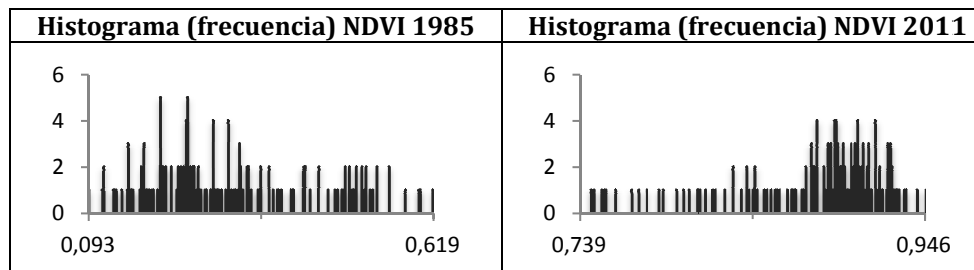




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 08

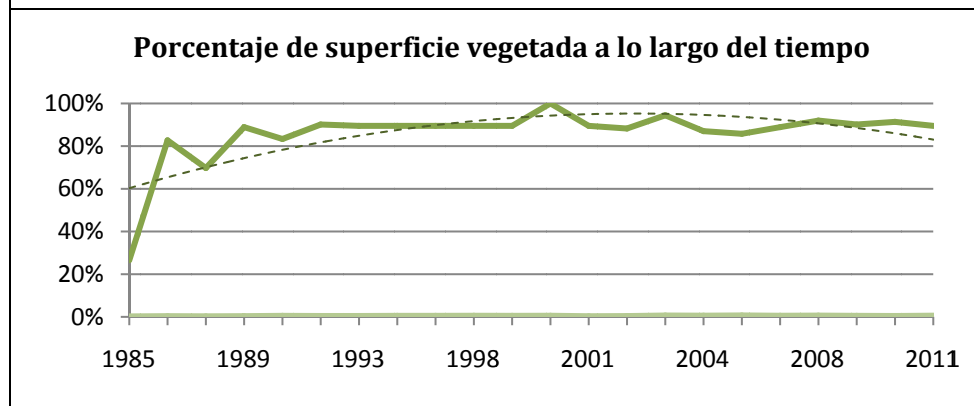


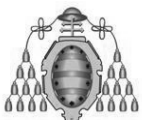
COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	261 028,57 m
Y _{UTM}	4 781 959,44 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	3
Área	145 800 m ²
NDVI _{MED}	0,778
%VEG _{MED}	85,7 %
Concejo	Quirós
Tipo	Carbón
DATOS DEL TERRENO	
Altura	681,51 m
Pendiente	43,75 %
Orientación	Suroeste
Litología	Pizarras, areniscas.
Vegetación	Prados.



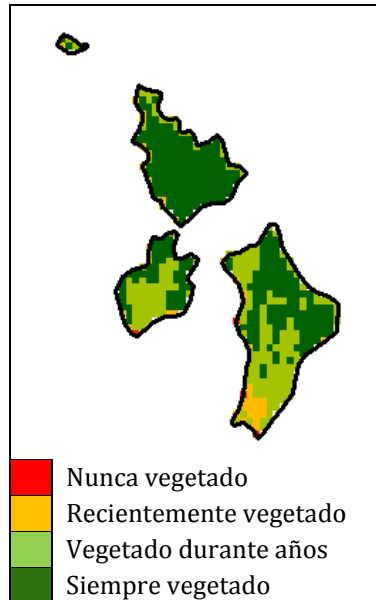
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,327	26,5 %
1986	0,583	82,7 %
1987	0,545	69,8 %
1989	0,699	88,9 %
1990	0,814	83,3 %
1991	0,689	90,1 %
1993	0,825	89,5 %
1996	0,860	89,5 %
1997	0,776	89,5 %
1998	0,872	89,5 %
1999	0,836	89,5 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,844	100,0 %
2001	0,762	89,5 %
2002	0,770	88,3 %
2003	0,889	94,4 %
2004	0,829	87,0 %
2005	0,928	85,8 %
2007	0,838	88,9 %
2008	0,883	92,0 %
2009	0,857	90,1 %
2010	0,822	91,4 %
2011	0,865	89,5 %

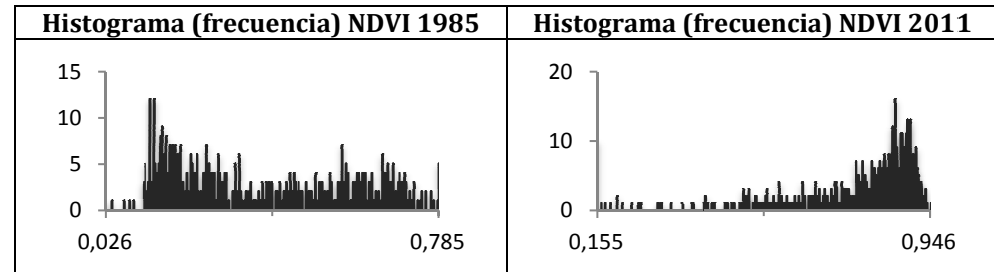




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 09

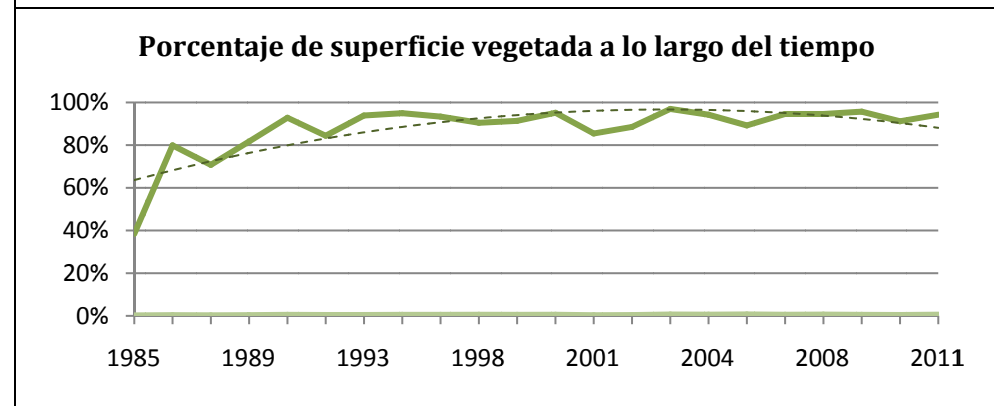
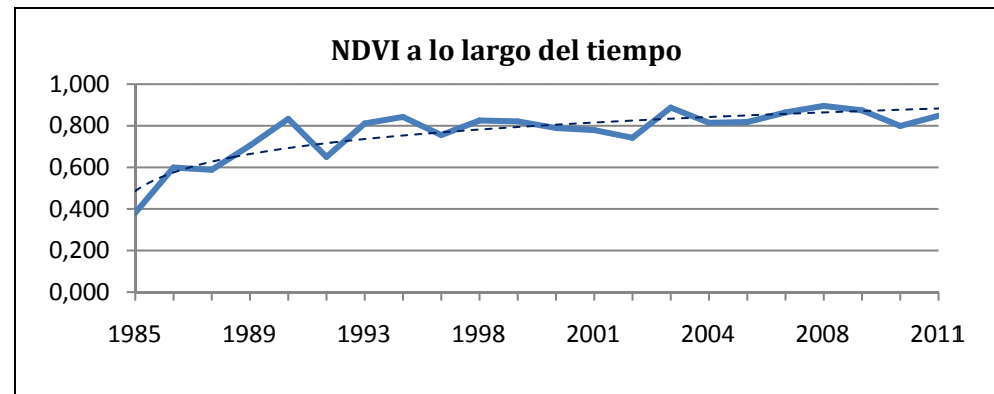


COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	261 135,48 m
Y _{UTM}	4 779 314,82 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	4
Área	501 300 m ²
NDVI _{MED}	0,769
%VEG _{MED}	87,8 %
Concejo	Quirós.
Tipo	Carbón.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	976,35 m
Pendiente	43,88 %
Orientación	Este
Litología	Pizarras, areniscas.
Vegetación	Hayedos.



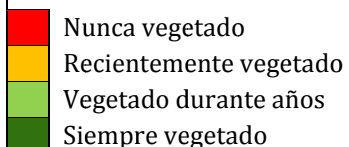
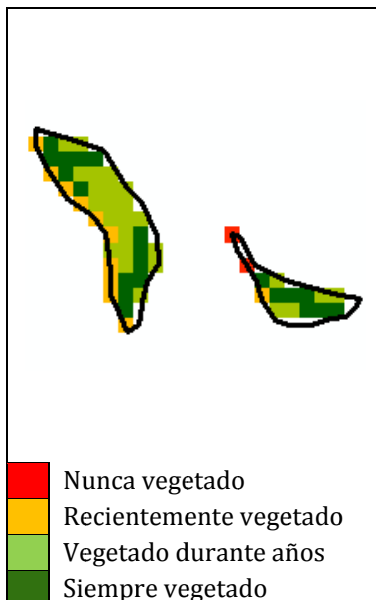
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,381	38,4 %
1986	0,599	79,9 %
1987	0,588	70,7 %
1989	0,705	81,7 %
1990	0,833	92,8 %
1991	0,650	84,4 %
1993	0,811	93,9 %
1996	0,842	95,0 %
1997	0,755	93,4 %
1998	0,825	90,5 %
1999	0,821	91,4 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,789	95,2 %
2001	0,779	85,5 %
2002	0,742	88,5 %
2003	0,887	96,9 %
2004	0,814	94,3 %
2005	0,818	89,2 %
2007	0,864	94,6 %
2008	0,895	94,6 %
2009	0,874	95,7 %
2010	0,799	91,2 %
2011	0,848	94,3 %

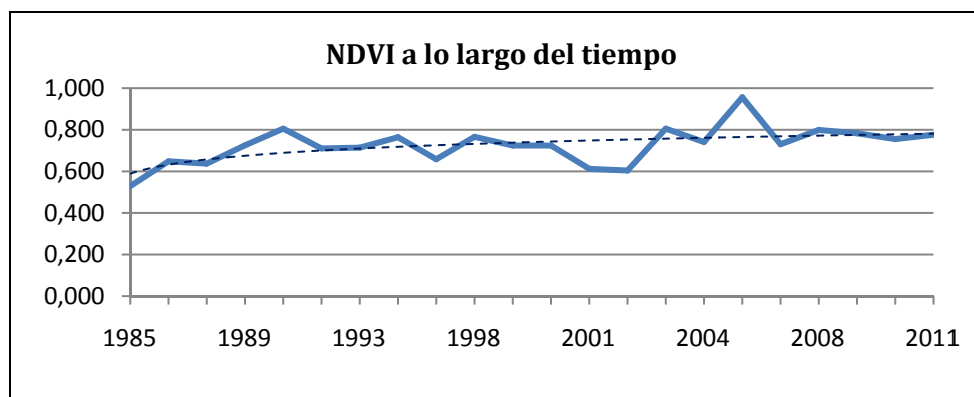
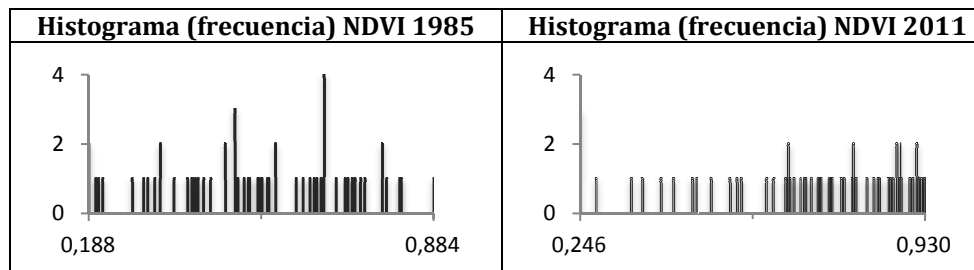




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 10

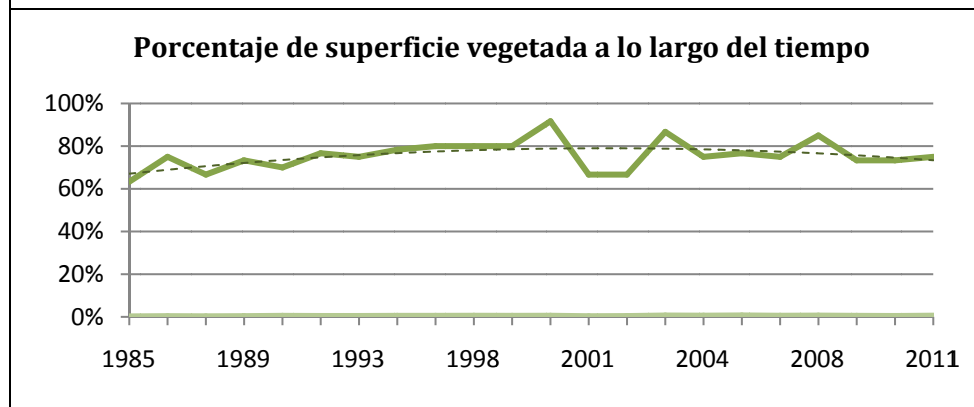


COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	259 237,86 m
Y _{UTM}	4 781 569,60 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	2
Área	54 000 m ²
NDVI _{MED}	0,726
%VEG _{MED}	75,6 %
Concejo	Quirós.
Tipo	Carbón.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	477,01 m
Pendiente	18,70 %
Orientación	Norte
Litología	Pizarras, areniscas.
Vegetación	Castaño.



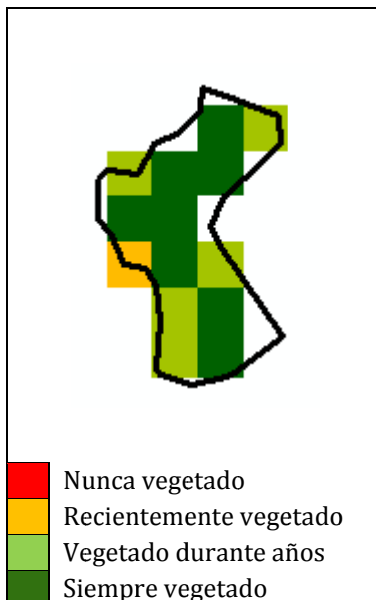
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,529	63,3 %
1986	0,648	75,0 %
1987	0,637	66,7 %
1989	0,725	73,3 %
1990	0,805	70,0 %
1991	0,710	76,7 %
1993	0,714	75,0 %
1996	0,764	78,3 %
1997	0,658	80,0 %
1998	0,766	80,0 %
1999	0,724	80,0 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,724	91,7 %
2001	0,612	66,7 %
2002	0,604	66,7 %
2003	0,805	86,7 %
2004	0,741	75,0 %
2005	0,956	76,7 %
2007	0,730	75,0 %
2008	0,799	85,0 %
2009	0,783	73,3 %
2010	0,755	73,3 %
2011	0,776	75,0 %

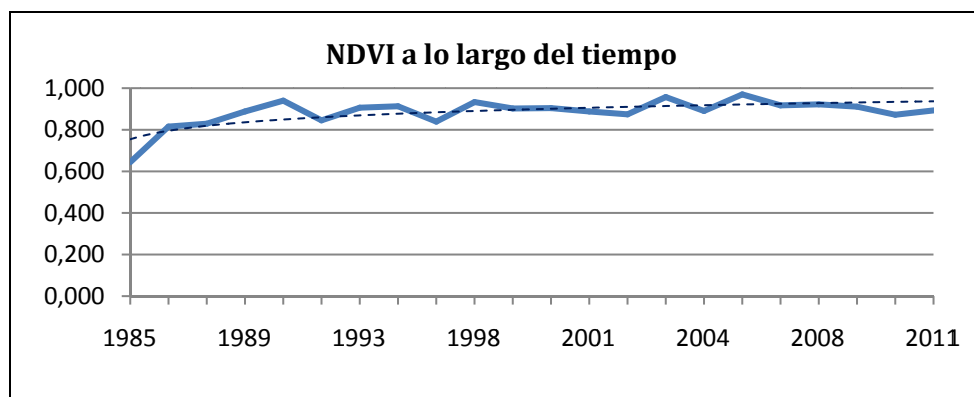
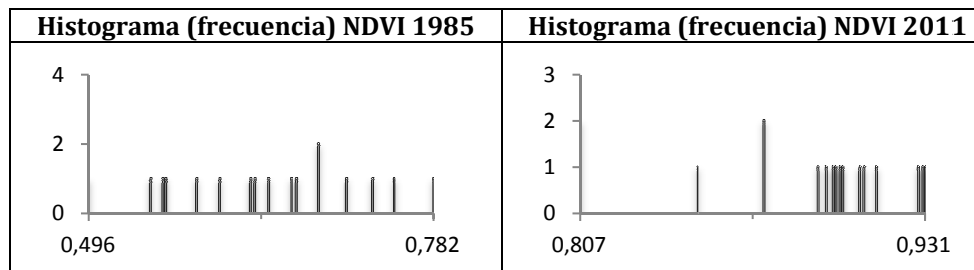




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 11

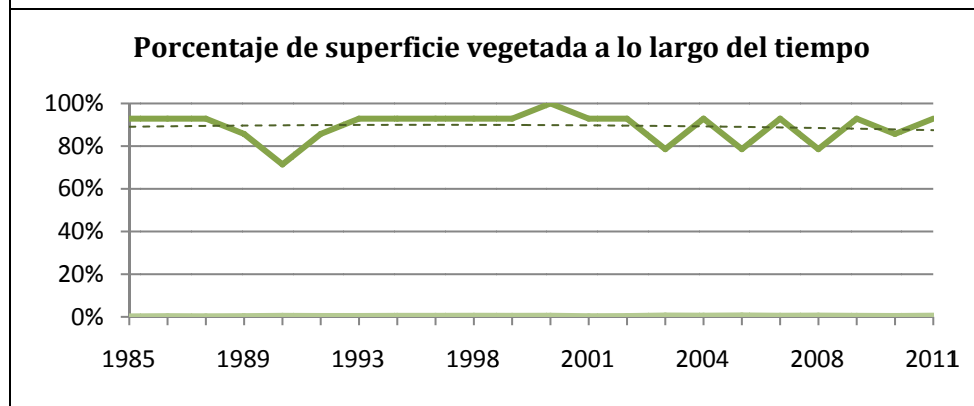


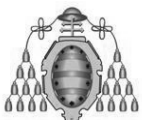
COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	259 819,47 m
Y _{UTM}	4 780 896,58 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	1
Área	12 600 m ²
NDVI _{MED}	0,884
%VEG _{MED}	89,3 %
Concejo	Quirós.
Tipo	Carbón.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	737,74 m
Pendiente	33,30 %
Orientación	Norte
Litología	Pizarras, areniscas.
Vegetación	Castaño.



Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,644	92,9 %
1986	0,815	92,9 %
1987	0,829	92,9 %
1989	0,888	85,7 %
1990	0,940	71,4 %
1991	0,845	85,7 %
1993	0,906	92,9 %
1996	0,913	92,9 %
1997	0,839	92,9 %
1998	0,933	92,9 %
1999	0,902	92,9 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,904	100,0 %
2001	0,888	92,9 %
2002	0,874	92,9 %
2003	0,957	78,6 %
2004	0,890	92,9 %
2005	0,970	78,6 %
2007	0,917	92,9 %
2008	0,922	78,6 %
2009	0,911	92,9 %
2010	0,872	85,7 %
2011	0,893	92,9 %

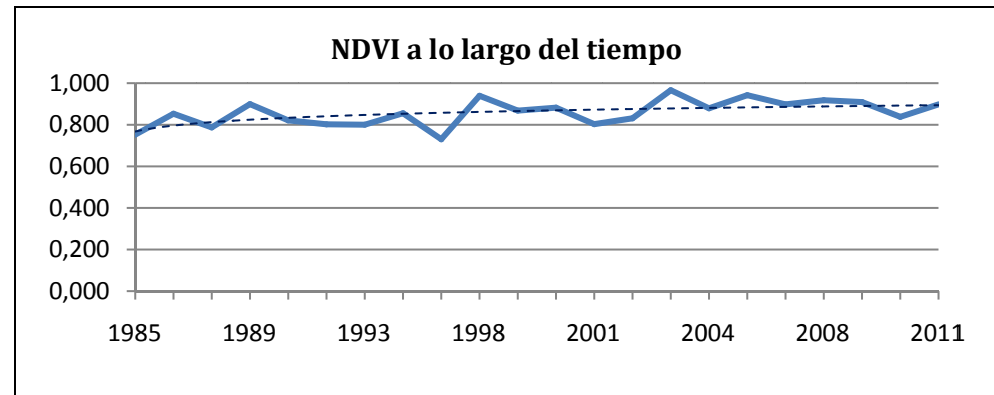
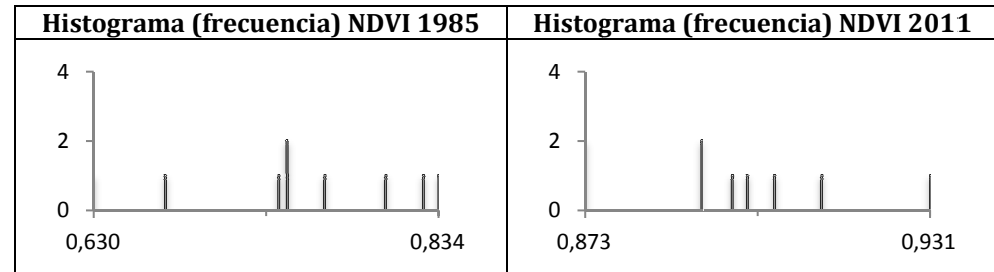




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 12

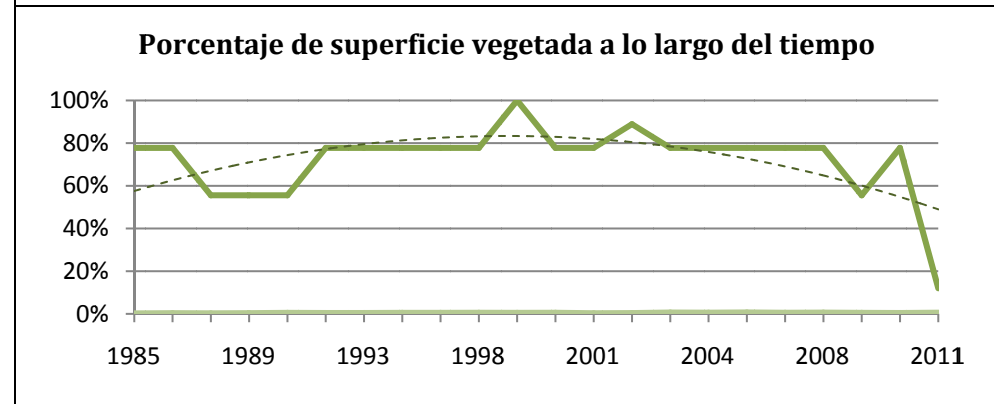


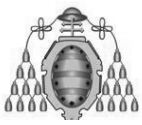
COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	259 113,85 m
Y _{UTM}	4 780 203,06 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	1
Área	8 012 m ²
NDVI _{MED}	0,858
%VEG _{MED}	75,3 %
Concejo	Quirós.
Tipo	Carbón.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	568,97 m
Pendiente	46,99 %
Orientación	Oeste
Litología	Pizarras, calizas.
Vegetación	Castaño.



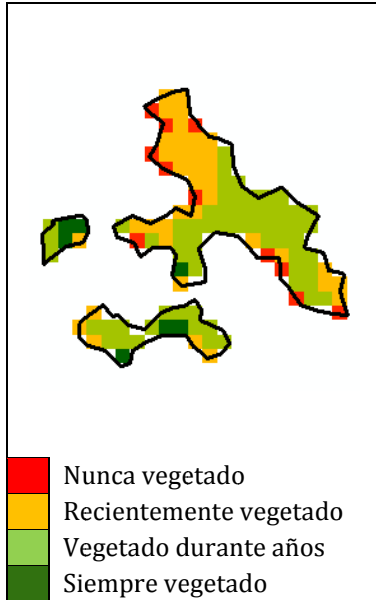
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,752	77,8 %
1986	0,853	77,8 %
1987	0,787	77,8 %
1989	0,899	55,6 %
1990	0,821	55,6 %
1991	0,802	55,6 %
1993	0,800	77,8 %
1996	0,855	77,8 %
1997	0,730	77,8 %
1998	0,939	77,8 %
1999	0,868	77,8 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,882	100,0 %
2001	0,803	77,8 %
2002	0,831	77,8 %
2003	0,966	88,9 %
2004	0,879	77,8 %
2005	0,942	77,8 %
2007	0,898	77,8 %
2008	0,918	77,8 %
2009	0,909	77,8 %
2010	0,838	55,6 %
2011	0,898	77,8 %

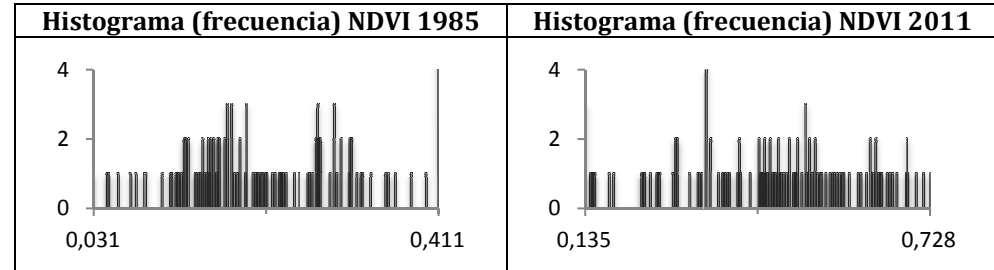




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 13

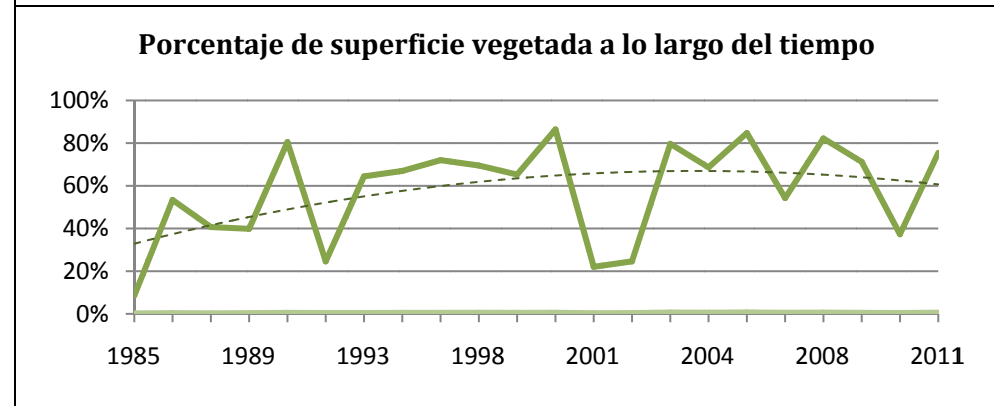
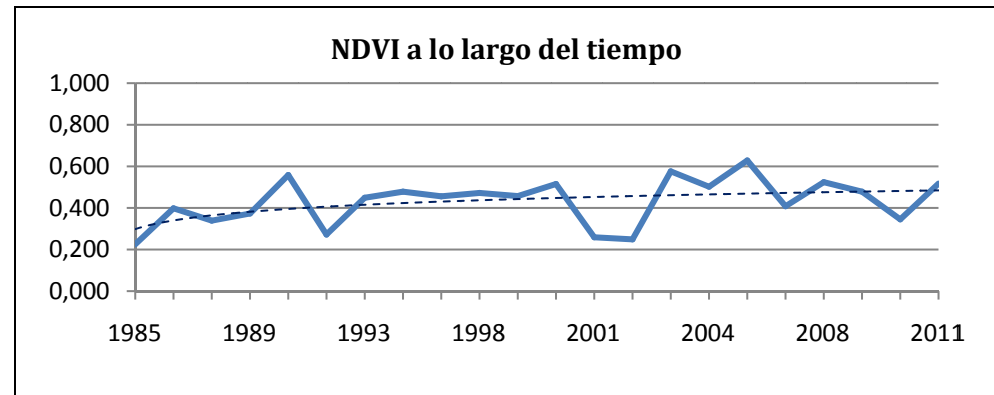


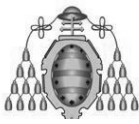
COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	246 829,65 m
Y _{UTM}	4 771 634,81 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	3
Área	106 200 m ²
NDVI _{MED}	0,431
%VEG _{MED}	57,8 %
Concejo	Somiedo.
Tipo	Hierro.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	1 685,00 m
Pendiente	41,57 %
Orientación	Este
Litología	Caliza de montaña.
Vegetación	Matorrales.



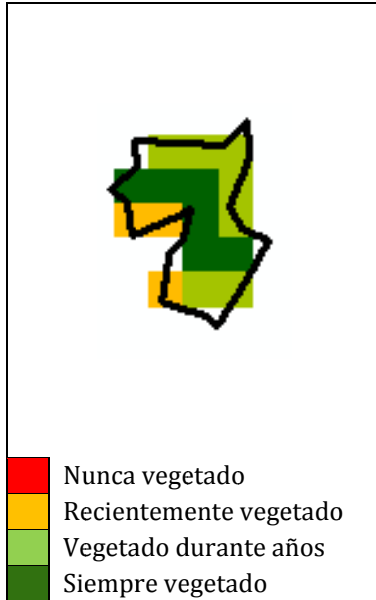
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,225	8,5 %
1986	0,398	53,4 %
1987	0,339	40,7 %
1989	0,373	39,8 %
1990	0,558	80,5 %
1991	0,272	24,6 %
1993	0,449	64,4 %
1996	0,478	66,9 %
1997	0,456	72,0 %
1998	0,472	69,5 %
1999	0,457	65,3 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,515	86,4 %
2001	0,259	22,0 %
2002	0,249	24,6 %
2003	0,576	79,7 %
2004	0,502	68,6 %
2005	0,628	84,7 %
2007	0,408	54,2 %
2008	0,524	82,2 %
2009	0,478	71,2 %
2010	0,345	37,3 %
2011	0,517	75,4 %

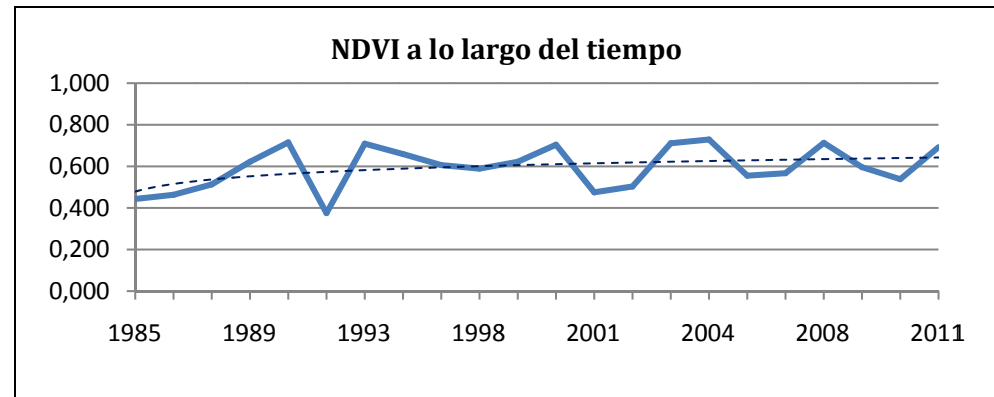
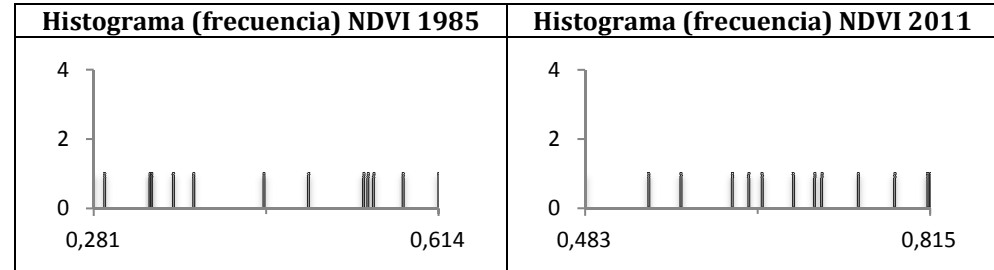




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 14

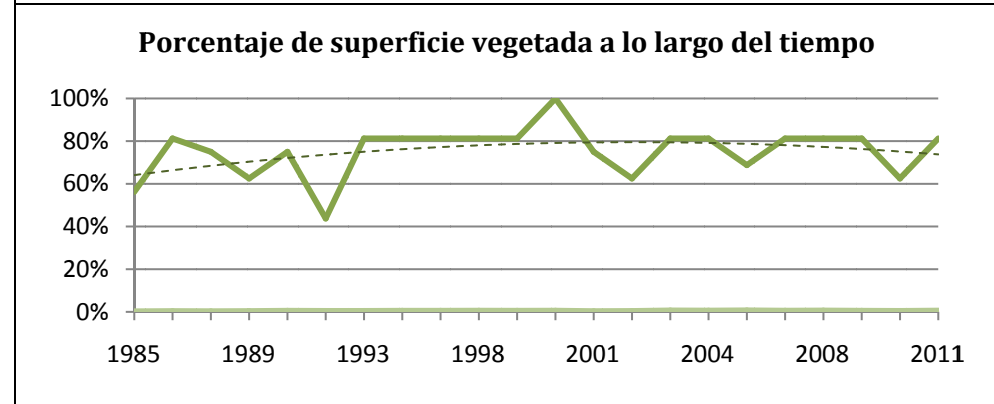


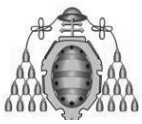
COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	247 355,64 m
Y _{UTM}	4 771 708,89 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	1
Área	14 400 m ²
NDVI _{MED}	0,595
%VEG _{MED}	75,3 %
Concejo	Somiedo.
Tipo	Hierro.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	1 603,00 m
Pendiente	21,75 %
Orientación	Varias
Litología	Caliza de montaña.
Vegetación	Matorrales.



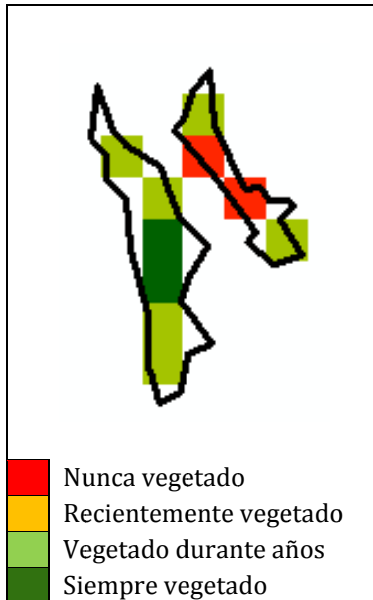
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,443	56,3 %
1986	0,463	81,3 %
1987	0,513	75,0 %
1989	0,622	62,5 %
1990	0,715	75,0 %
1991	0,375	43,8 %
1993	0,709	81,3 %
1996	0,659	81,3 %
1997	0,606	81,3 %
1998	0,589	81,3 %
1999	0,622	81,3 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,704	100,0 %
2001	0,475	75,0 %
2002	0,503	62,5 %
2003	0,711	81,3 %
2004	0,729	81,3 %
2005	0,555	68,8 %
2007	0,567	81,3 %
2008	0,713	81,3 %
2009	0,596	81,3 %
2010	0,538	62,5 %
2011	0,692	81,3 %

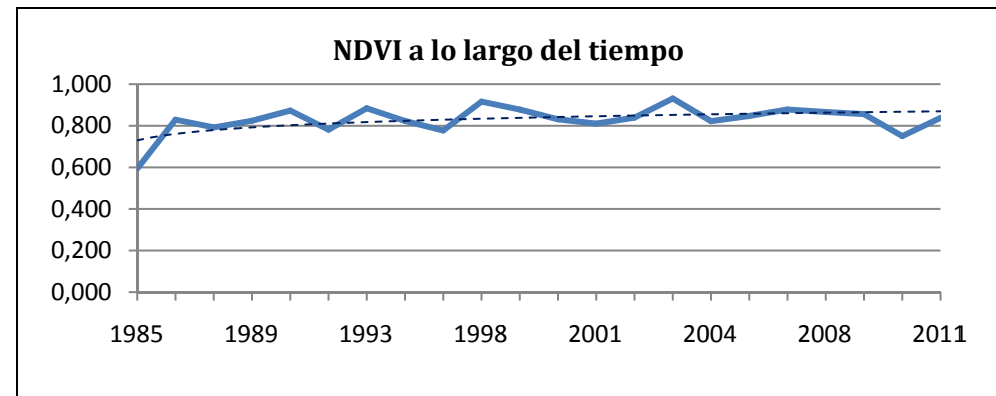
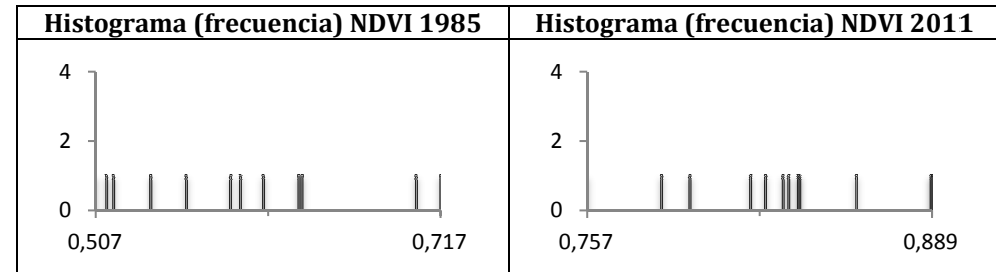




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 15

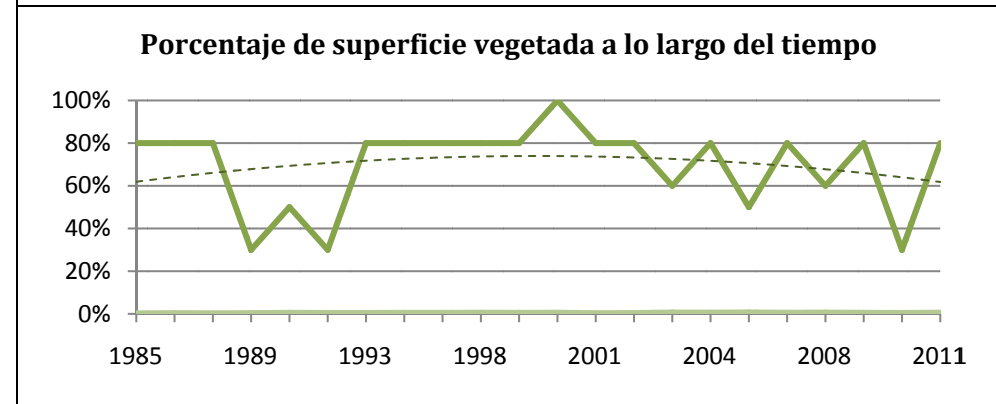


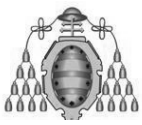
COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	251 195,95 m
Y _{UTM}	4 787 934,43 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	2
Área	9 000 m ²
NDVI _{MED}	0,829
%VEG _{MED}	69,5 %
Concejo	Proaza.
Tipo	Dep. Antrópicos.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	375,88 m
Pendiente	54,02 %
Orientación	Sureste
Litología	Cuarcita
Vegetación	Brezales.



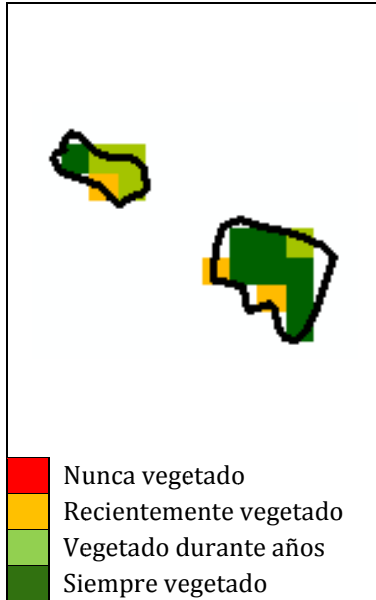
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,594	80,0 %
1986	0,829	80,0 %
1987	0,792	80,0 %
1989	0,824	30,0 %
1990	0,873	50,0 %
1991	0,781	30,0 %
1993	0,884	80,0 %
1996	0,823	80,0 %
1997	0,777	80,0 %
1998	0,916	80,0 %
1999	0,878	80,0 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,831	100,0 %
2001	0,810	80,0 %
2002	0,839	80,0 %
2003	0,931	60,0 %
2004	0,822	80,0 %
2005	0,847	50,0 %
2007	0,878	80,0 %
2008	0,866	60,0 %
2009	0,856	80,0 %
2010	0,750	30,0 %
2011	0,838	80,0 %

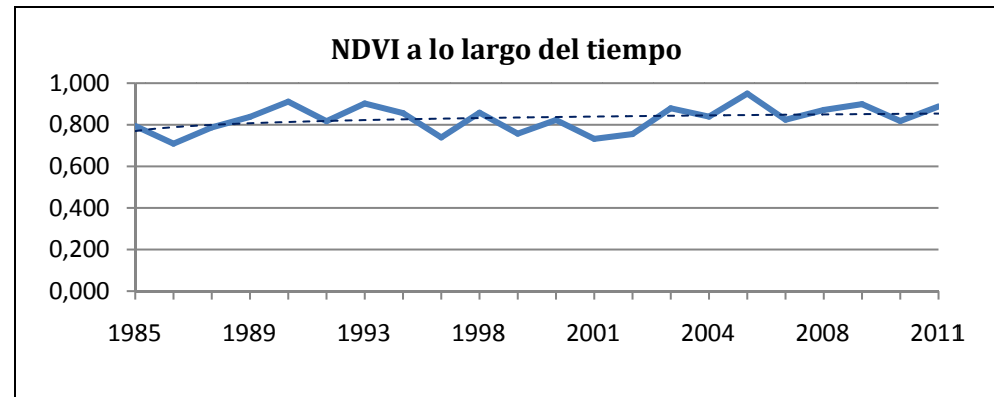
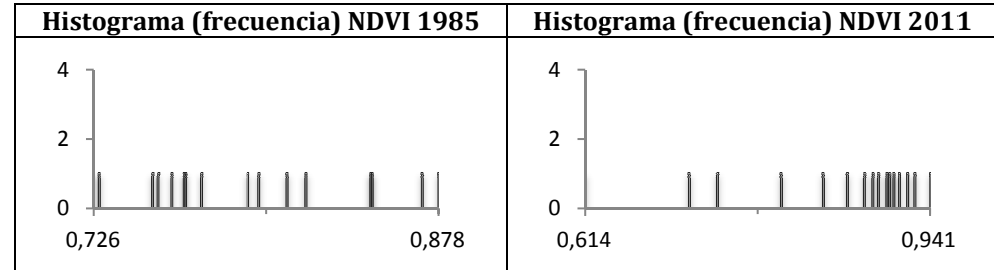




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 16

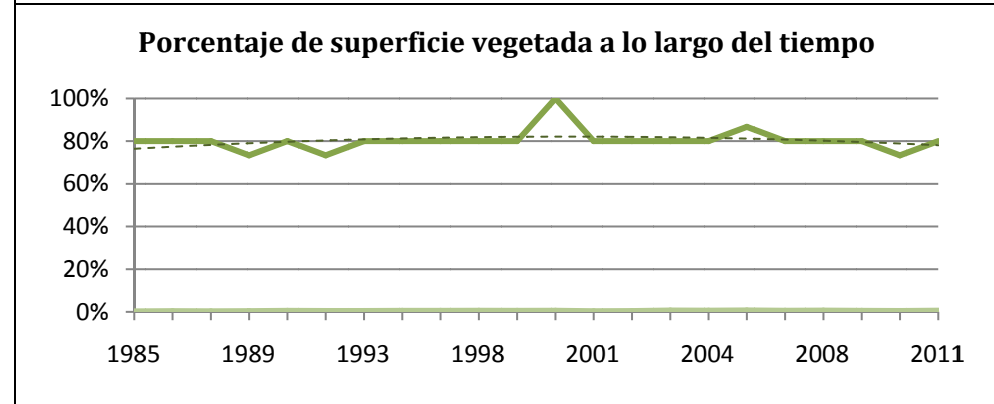


COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	243 966,42 m
Y _{UTM}	4 782 109,24 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	2
Área	13 500 m ²
NDVI _{MED}	0,829
%VEG _{MED}	80,3 %
Concejo	Tevera.
Tipo	Dep. Antrópicos.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	703,31 m
Pendiente	57,44 %
Orientación	Sur
Litología	Caliza.
Vegetación	Castaño.



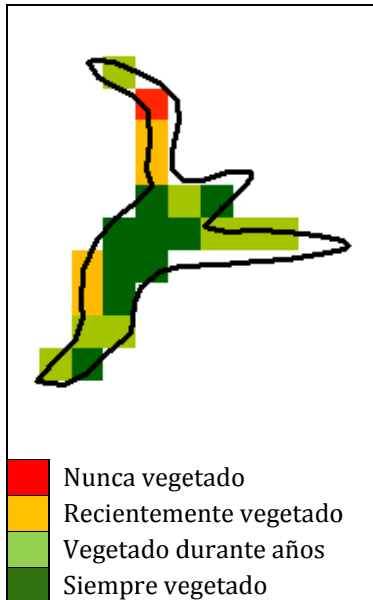
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,794	80,0 %
1986	0,709	80,0 %
1987	0,787	80,0 %
1989	0,838	73,3 %
1990	0,911	80,0 %
1991	0,817	73,3 %
1993	0,902	80,0 %
1996	0,856	80,0 %
1997	0,739	80,0 %
1998	0,858	80,0 %
1999	0,757	80,0 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,823	100,0 %
2001	0,732	80,0 %
2002	0,755	80,0 %
2003	0,879	80,0 %
2004	0,839	80,0 %
2005	0,950	86,7 %
2007	0,824	80,0 %
2008	0,871	80,0 %
2009	0,899	80,0 %
2010	0,818	73,3 %
2011	0,888	80,0 %

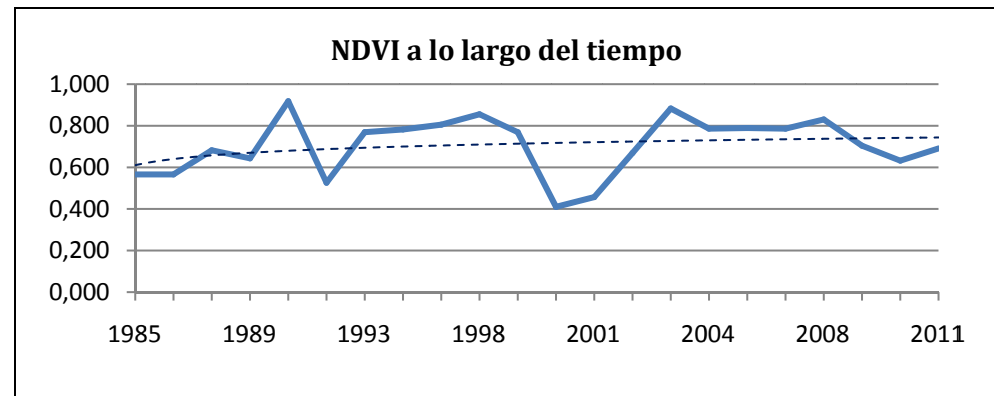
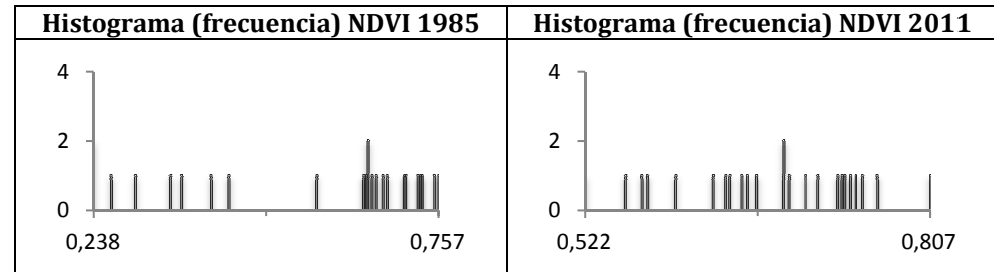




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 17

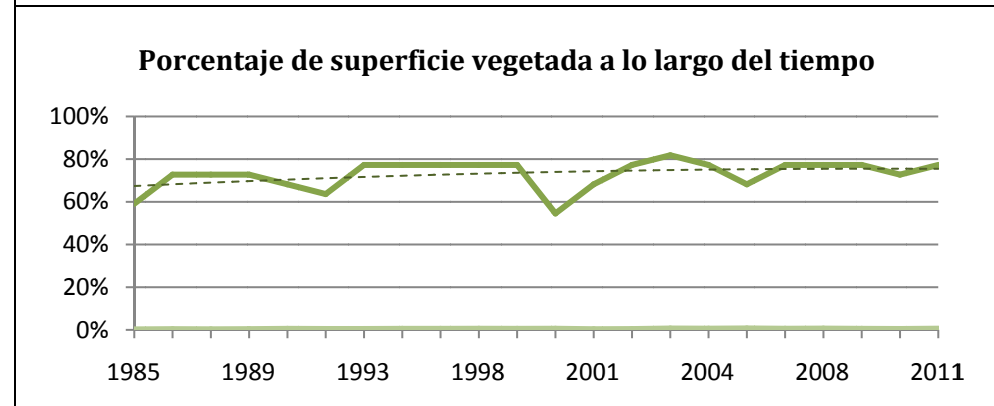


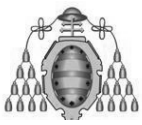
COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	241 776,84 m
Y _{UTM}	4 781 965,95 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	1
Área	224 188 m ²
NDVI _{MED}	0,705
%VEG _{MED}	72,9 %
Concejo	Tevera.
Tipo	Dep. Antrópicos.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	1 020,00 m
Pendiente	61,97 %
Orientación	Este
Litología	Cuarcita.
Vegetación	Brezales.



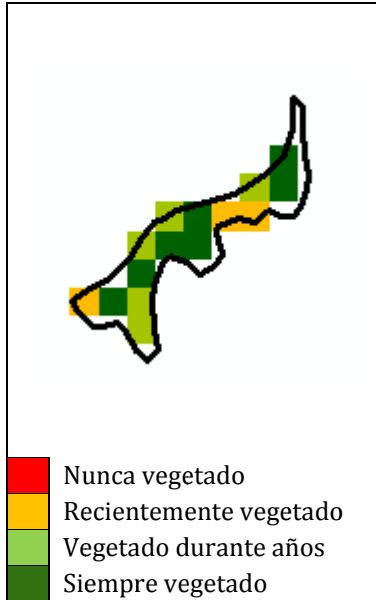
Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,566	59,1 %
1986	0,566	72,7 %
1987	0,682	72,7 %
1989	0,643	72,7 %
1990	0,918	68,2 %
1991	0,526	63,6 %
1993	0,769	77,3 %
1996	0,782	77,3 %
1997	0,805	77,3 %
1998	0,855	77,3 %
1999	0,769	77,3 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,410	54,5 %
2001	0,457	68,2 %
2002	0,669	77,3 %
2003	0,883	81,8 %
2004	0,786	77,3 %
2005	0,789	68,2 %
2007	0,786	77,3 %
2008	0,830	77,3 %
2009	0,704	77,3 %
2010	0,632	72,7 %
2011	0,691	77,3 %

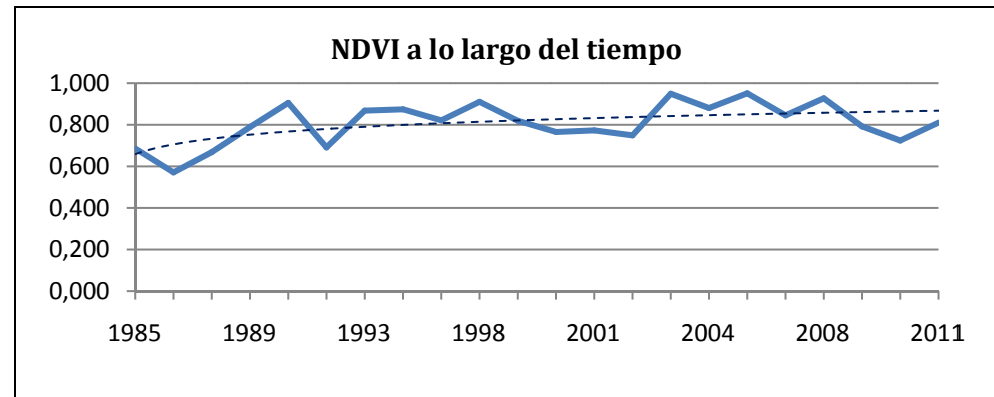
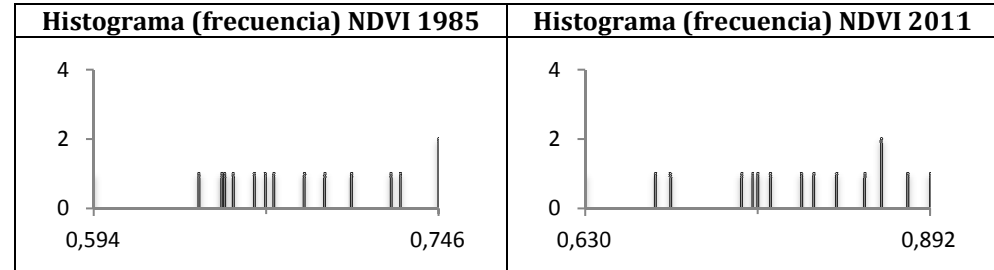




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 18

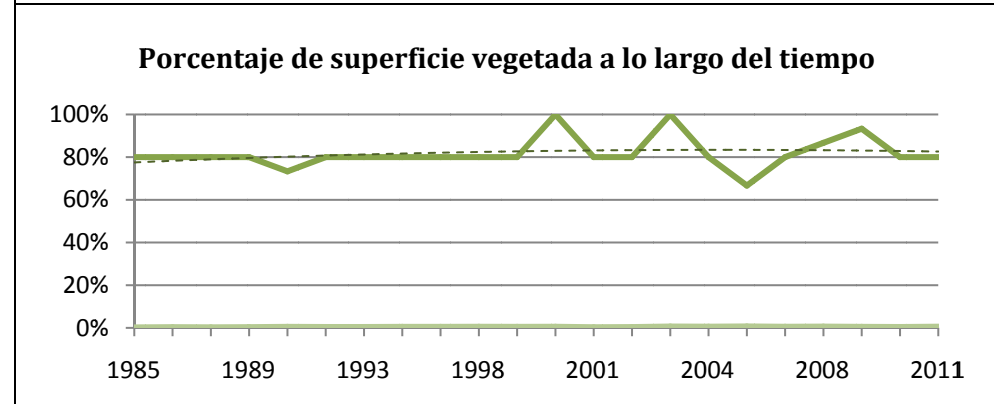


COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	241 040,17 m
Y _{UTM}	4 781 338,48 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	1
Área	13 500 m ²
NDVI _{MED}	0,808
%VEG _{MED}	81,8 %
Concejo	Tevera.
Tipo	Dep. Antrópicos.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	1 241,78 m
Pendiente	70,09 %
Orientación	Sur
Litología	Caliza, dolomía.
Vegetación	Prados.



Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,686	80,0 %
1986	0,571	80,0 %
1987	0,668	80,0 %
1989	0,789	80,0 %
1990	0,905	73,3 %
1991	0,691	80,0 %
1993	0,868	80,0 %
1996	0,874	80,0 %
1997	0,821	80,0 %
1998	0,910	80,0 %
1999	0,819	80,0 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,765	100,0 %
2001	0,773	80,0 %
2002	0,749	80,0 %
2003	0,949	100,0 %
2004	0,880	80,0 %
2005	0,951	66,7 %
2007	0,845	80,0 %
2008	0,927	86,7 %
2009	0,792	93,3 %
2010	0,724	80,0 %
2011	0,810	80,0 %

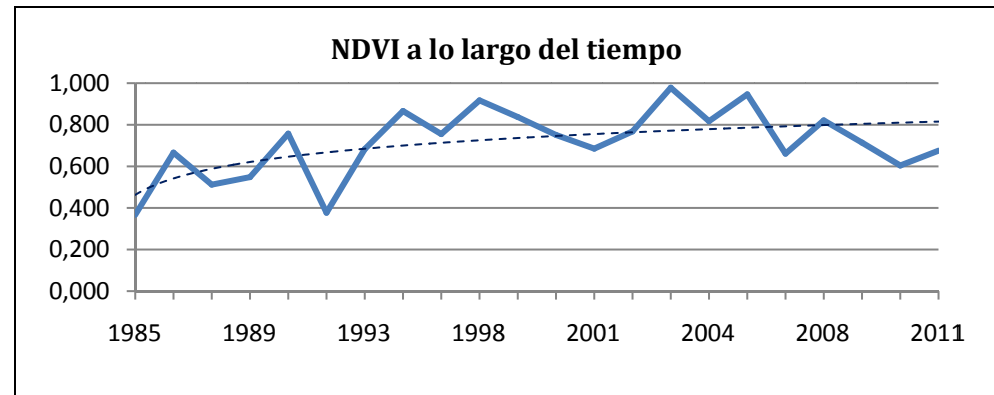
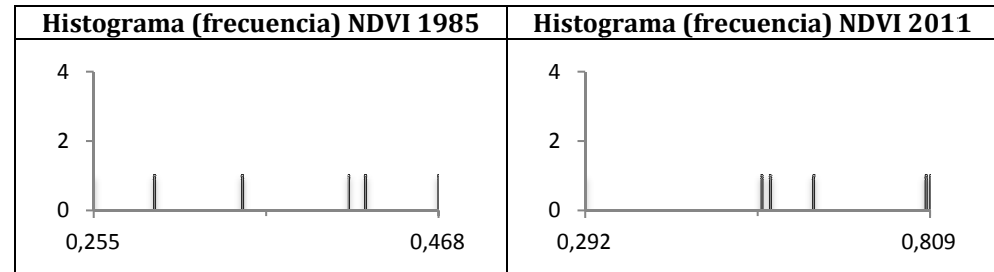




NÚCLEO DE ACUMULACIÓN: 19

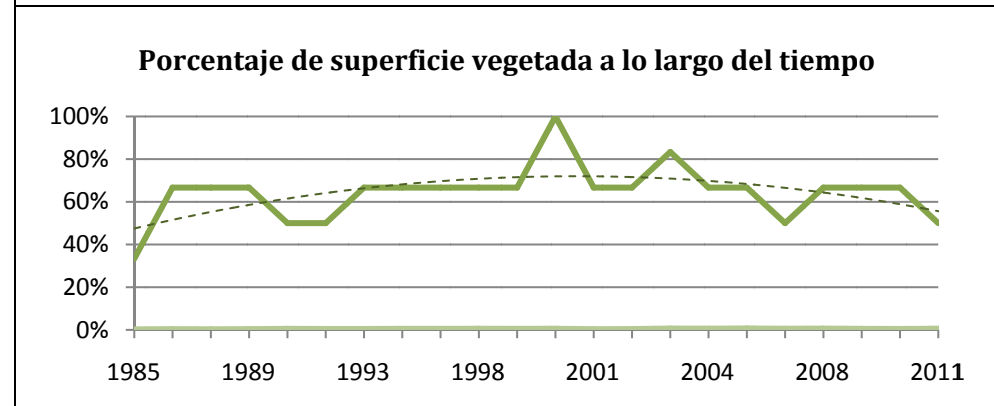


COORDENADAS WGS84 UTM 30N	
X _{UTM}	256 287,15 m
Y _{UTM}	4 782 858,98 m
DATOS GENERALES	
Nº polígonos	1
Área	5 400 m ²
NDVI _{MED}	0,714
%VEG _{MED}	64,4 %
Concejo	Quirós.
Tipo	Dep. Antrópicos.
DATOS DEL TERRENO	
Altura	846,73 m
Pendiente	58,18 %
Orientación	Este
Litología	Cuarcita.
Vegetación	Brezales.



Año	NDVI	% Vegetado
1985	0,367	33,3 %
1986	0,666	66,7 %
1987	0,512	66,7 %
1989	0,548	66,7 %
1990	0,757	50,0 %
1991	0,377	50,0 %
1993	0,683	66,7 %
1996	0,866	66,7 %
1997	0,755	66,7 %
1998	0,917	66,7 %
1999	0,837	66,7 %

Año	NDVI	% Vegetado
2000	0,751	100,0 %
2001	0,685	66,7 %
2002	0,768	66,7 %
2003	0,978	83,3 %
2004	0,817	66,7 %
2005	0,946	66,7 %
2007	0,661	50,0 %
2008	0,821	66,7 %
2009	0,714	66,7 %
2010	0,604	66,7 %
2011	0,675	50,0 %





IV. PLANOS