

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

LICENCIATURA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT EN LA GENERACIÓN DE COMPOSICIONES EN FALSO COLOR

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA

RUBÉN ROSSAINZZ SUÁREZ

ASESOR: DR. MANUEL MARTÍN ORTIZ

SEPTIEMBRE 2007

A Dios, por la vida y bendiciones que recibo.

A ti Madre, por tu invaluable amor, tu apoyo de siempre y tus sacrificios de toda la vida, te dedico este trabajo de tesis sabiendo que no habrá nada con lo que pueda corresponderte. Te quiero, te admiro y te respeto.

A mi Abuelita Luisita; por todo tu amor y por sembrar en mí tus valores, sé que desde el cielo estás conmigo. †

A Norma A. Bedolla, mi esposa, tu eres parte de este logro; juntos seguiremos adelante.

A mis hijos Yaretzi y Ramsés; por ustedes seguiré teniendo fuerza y entusiasmo para continuar.

A mis tías, tíos, primas y primos que siempre me han apoyado y demostrado su cariño.

A mis amigas y amigos que han trascendido a la vida, parte de ustedes se quedó conmigo. †

A mis entrañables amigos y colegas J. Rafael Robledo Meza y Simón A. Aguilar Ramos, por su amistad y apoyo de siempre.

A la Lic. Silvia Sandra Jiménez Peregrina, por el apoyo que recibí en este trabajo de tesis y sobre todo por tu amistad.

A mi asesor de este trabajo de tesis, Dr. Manuel Martín Ortiz, por su invaluable apoyo y calidad humana.

Al M.C. Javier López Caloca, por tus consejos de amigo y todo el impulso y ánimos para realizar esta tesis.

Al Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), especialmente al M.C. Jorge Valdovinos Espinosa, Director Regional Oriente y al M.C. Mario D.I. Gómez Soberón, Director de Geografía, por el apoyo para la realización de este trabajo de tesis.

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se establece un procedimiento para la generación de imágenes de satélite compuestas, bajo el principio aditivo de color (RGB; rojo, verde y azul), teniendo como insumos básicos escenas de imágenes de satélite Landsat TM y ETM+ de los años 1993 y 2000 respectivamente, contando con las imágenes de las bandas de la 1 a la 5 (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio) para ETM+ y las bandas 3, 4 y 5 para TM.

El contexto de aplicación está en la Dirección de Geografía de la Dirección Regional Oriente del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. La cobertura geográfica de trabajo se remite al estado de Puebla, para lo cual se determinan de manera típica las coordenadas geográficas del cubrimiento territorial, considerando también la generación de segmentos de imagen que corresponden a coberturas espaciales de acuerdo a la escala 1:250 000 de la nomenclatura de la cartografía digital e impresa del INEGI.

Previo a la implementación, se hace una revisión de los principales aspectos teóricos en materia de Sistemas de Información Geográfica (SIG), Cartografía y Teledetección, para después pasar a una etapa de análisis y diseño del procedimiento propuesto; finalizando con su desarrollo, aplicaciones y conclusiones.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN xi

CAPÍTULO I. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

I.1. ¿Qué es un SIG? 3
I.2. Bosquejo histórico de los SIG. 11
I.3. Componentes de un SIG. 18
I.4. Dato Geográfico. 21
I.5. Estructuras de datos en un SIG. 22
I.5.1. Datos vectoriales. 22
I.5.1.1. Estructura espacial de los datos vectoriales. 24
I.5.2. Datos raster. 33
I.5.2.1. Formato raster espacial. 35
I.5.2.2. Ventajas e inconvenientes del modelo de datos raster. 36
I.5.2.3. Estructuras de datos raster. 37
I.5.2.3.1. Estructuras raster simples. 37
I.5.2.3.2. Estructuras raster jerárquicas. 38
I.5.2.3.3. Tipos de datos en el modelo raster. 41
I.6. Análisis espacial en un SIG. 42
I.6.1. Tipos de análisis. 45
I.6.1.1. Análisis raster. 46
I.6.1.1.1. Mediciones e identificación de elementos. 46
I.6.1.1.2. Reclasificación. 46
I.6.1.1.3. Sobreposición. 47
I.6.1.1.4. Vecindad. 48
I.6.1.2. Análisis vectorial. 49
I.6.1.2.1. Mediciones e identificación de elementos. 49
I.6.1.2.2. Análisis de proximidad. 50
I.6.1.2.3. Sobreposición. 50
I.6.1.2.4. Análisis de redes. 51
I.6.2. Las nuevas perspectivas del análisis espacial a través de los SIG. 52

CAPÍTULO II. ASPECTOS CARTOGRÁFICOS BÁSICOS

II.1. Sistemas de referencia. 55
II.1.1. Sistema cartesiano. 56
II.1.2. Sistema polar. 59
II.1.3. Superficie topográfica. 61
II.1.4. Geoide. 62
II.1.5. Elipsoide. 63
II.1.6. Elipsoide comparado con el geoide. 63
II.1.7. Datum. 64

II.2. Proyecciones cartográficas. 66
II.2.1. Clasificación por tipo de propiedades. 67
II.2.1.1. Proyecciones equivalentes. 67
II.2.1.2. Proyecciones equidistantes. 67
II.2.1.3. Proyecciones conformes. 68
II.2.1.4. Proyecciones afilácticas. 68
II.2.2. Clasificación por tipo de superficie. 68
II.2.2.1. Proyecciones planas. 69
II.2.2.2. Proyecciones cónicas. 70
II.2.2.3. Proyecciones cilíndricas. 71
II.2.3. Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM). 74
II.3. Escala cartográfica. 77
II.4. Nomenclatura de la cartografía digital e impresa del INEGI. 79
II.4.1. Escala 1: 1 000 000 80
II.4.2. Escala 1: 250 000 80
II.4.3. Escala 1: 50 000 81
II.4.4. Escala 1: 20 000 83
II.4.5. Escalas mayores a 1: 20 000 84

CAPÍTULO III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

III.1. Situación actual. 87
III.2. Planteamiento. 92
III.3. Técnica general. 94
III.4. Consideraciones importantes. 97

CAPÍTULO IV. BASES TEÓRICAS

IV.1. Teledetección. 101
IV.1.1. ¿Qué es la teledetección? 101
IV.1.2. Breve historia de la teledetección. 104
IV.1.3. Fundamentos físicos de la teledetección. 105
IV.1.3.1. La onda. 106
IV.1.3.2. El espectro electromagnético. 108
IV.1.3.3. Términos usados. 110
IV.1.3.4. Principios y leyes de la radiación electromagnética. 112
IV.1.3.5. Radicación energética en el espectro óptico. 115
IV.1.3.6. Caracterización espectral de las principales cubiertas del paisaje en el espectro óptico. 121
IV.1.3.7. Interacciones de la atmósfera con la radiación electromagnética. 125
IV.2. Sistemas espaciales de teledetección. 127
IV.2.1. Tipos de sistemas. 127
IV.2.2. Resolución de un sistema sensor. 128
IV.2.2.1. Resolución espacial. 129
IV.2.2.2. Resolución espectral. 130

IV.2.2.3. Resolución radiométrica. 131
IV.2.2.4. Resolución temporal. 132
IV.2.3. Plataformas para la teledetección espacial. 133
IV.2.3.1. El programa Landsat. 133
IV.2.3.1.1. Landsat 1, 2 y 3 134
IV.2.3.1.2. Landsat 4 y 5 136
IV.2.3.1.3. Landsat 7 137
IV.3. Uso y manejo de las imágenes. 139
IV.3.1. Criterios visuales generales. 140
IV.3.1.1. Tono. 141
IV.3.1.2. Color. 142
IV.3.1.3. Textura. 147
IV.3.1.4. Contexto espacial. 149
IV.3.1.5. Periodo de adquisición. 149
IV.3.1.6. Otros criterios. 150
IV.3.2. Tratamiento digital de las imágenes. 151
IV.3.2.1. La matriz de datos de una imagen. 152
IV.3.2.2. Formatos de almacenamiento. 154
IV.3.2.3. Medios físicos de almacenamiento de una imagen. 156
IV.3.2.4. Servicios fundamentales de visualización. 157
IV.3.2.5. Cálculo de estadísticas básicas e histograma de una imagen. 158
IV.3.2.6. Ajuste al contraste. 162
IV.3.2.6.1. Tablas de referencia de color. 163
IV.3.2.6.2. Compresión del histograma. 164
IV.3.2.6.3. Expansión del histograma. 165
IV.3.2.6.3.1. Expansión lineal. 166
IV.3.2.6.3.2. Ecualización del histograma. 169
IV.3.2.7. El pseudocolor. 172
IV.3.2.8. Composiciones en color. 174

CAPÍTULO V. ANÁLISIS Y DISEÑO.

V.1. Datos disponibles. 179
V.1.1. Principales características de las imágenes disponibles. 179
V.1.2. Cobertura geográfica. 187
V.1.3. Volumen base de los datos. 189
V.1.3.1. Volumen base de los datos para las imágenes ETM+. 190
V.1.3.2. Volumen base de los datos para las imágenes TM. 197
V.2. Software para la implementación. 201
V.2.1. PCI Geomatica ver. 8.2.1 201
V.2.1.1. Principales componentes de Geomatica 202
V.2.1.1.1. Barra de herramientas. 203

V.2.1.1.2. Focus. 203
V.2.1.1.3. PCI Modeler. 203
V.2.1.1.4. EASI (Engineering Analysis and Scientific Interface). 204
V.2.1.1.5. OrthoEngine 204
V.2.1.1.6. Fly! 204
V.2.1.1.7. Programas heredados de versiones anteriores. 205
V.2.1.1.7.1. ImageWorks. 205
V.2.1.1.7.2. Xpace. 205
V.2.1.1.7.3. CGPWorks. 206
V.2.1.2. Principales funciones en Geomatica, útiles al proyecto. 206
V.2.2. Idrisi32 R2. 228
V.2.2.1. Funciones básicas. 229
V.2.2.2. Funciones de análisis espacial. 230
V.2.2.3. Funciones de tratamiento digital de imágenes. 231
V.2.2.4. Funciones de entrada y manejo de datos. 232
V.3. Hardware a utilizar en la implementación. 233
V.3.1. Requerimientos del software a utilizar. 233
V.3.1.1. Requerimientos de PCI Geomatica ver. 8.2.1 233
V.3.1.2. Requerimientos de Idrisi32 R2 234
V.3.2. Características de los equipos disponibles. 234
V.4. Diseño general del proceso de generación de imágenes compuestas RGB. 236
V.4.1. Proceso general para las imágenes ETM+ 236
V.4.2. Diagrama de flujo del proceso para las imágenes ETM+ 240
V.4.3. Proceso general para las imágenes TM 242
V.4.4. Diagrama de flujo del proceso para las imágenes TM 244

CAPÍTULO VI. IMPLEMENTACIÓN.

VI.1. Generación de imágenes compuestas en RGB con imágenes de satélite Landsat ETM+ 249
VI.2. Generación de imágenes compuestas en RGB con imágenes de satélite Landsat TM 311
VI.3. Algunos criterios generales sobre el color para la interpretación de las composiciones RGB de imágenes Landsat. 316
VI.4. Aplicaciones. 317
VI.5. La Teledetección en el entorno de los SIG. 322

CONCLUSIONES 325

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y WEB 333

INTRODUCCIÓN.

El conocimiento de la realidad así como de su entorno, se constituye en una necesidad importante para el desarrollo de las sociedades. En la satisfacción de ésta, se mejoran continuamente los métodos y procedimientos para la obtención de información coadyuvante a la toma de mejores decisiones. Sin embargo, la realidad y su entorno son cada vez más amplios y complejos por lo que las necesidades de información también se hacen más complejas, derivando en información y conocimiento que se convierten en un bien estratégico para el progreso de países, organizaciones y personas.

En México corresponde al Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), coordinar y promover el desarrollo de los Sistemas Nacionales Estadístico y de Información Geográfica[1] (SNEIG), para lo que, entre otros, deben establecerse canales que apoyen esta tarea.

En el INEGI, se tiene como misión "Generar, integrar y proporcionar información estadística y geográfica de interés nacional, así como normar, coordinar y promover el desarrollo de los Sistemas Nacionales Estadístico y de Información Geográfica, con objeto de satisfacer las necesidades de información de los diversos sectores de la sociedad". Para tales fines, su política de calidad establece que "Todo producto o servicio que se genere en el INEGI debe tender a la plena satisfacción de las necesidades de información estadística y geográfica de la sociedad mexicana mediante el desarrollo de su personal y mejora continua, privilegiando la integración de metodologías y tecnologías en sus procesos y proyectos". Es precisamente en el contexto de los aspectos metodológicos y tecnológicos en el que se encuentra enmarcado el presente trabajo de tesis, fundamentalmente en el tratamiento digital de imágenes de satélite LandSat TM y ETM+, lo que lo ubica en materia geográfica, buscando contribuir a la misión institucional en apego a su política de calidad.

[1] La Ley de Información Estadística y Geográfica (LIEG) y su Reglamento, establecen las medidas tendientes a garantizar la integración de los Sistemas Nacionales Estadístico y de Información Geográfica, bajo normas, principios y procedimientos que logren dar unidad, congruencia y uniformidad a los procesos de captación, procesamiento y presentación de la información estadística y geográfica.

Si bien, en el INEGI se han establecido las bases normativas para el tratamiento de datos geográficos digitales, éstas encuentran su mayor desarrollo en los datos vectoriales, para los que se han generado un modelo de datos, diccionarios de datos, metadatos, etc. Para los datos raster geográficos (imágenes) aún no se cuenta con el mismo esquema de los datos vectoriales, aunque sí con documentación técnica para la generación y/o uso de datos raster, como los modelos digitales de elevación, ortofotos y fotomapas, espaciomapas, entre otros. En el caso particular de las imágenes de satélite se complica más la situación considerando que generalmente son obtenidas por el instituto a través de convenios de colaboración con restricciones de uso y distribución[2]. Estas limitantes hacen que al interior de INEGI, y desde luego para la sociedad, se ofrezca poca documentación técnica sobre su tratamiento digital en los aspectos teóricos y prácticos. La mayoría de documentos a los que es posible acceder se enfocan a aplicaciones o descripciones meramente teóricas.

Ante esto, el principal objetivo del presente trabajo es generar un documento con aspectos teórico-prácticos y metodológicos para el tratamiento digital de imágenes de satélite LandSat TM y ETM+ en la generación de imágenes compuestas RGB[3], mediante el aprovechamiento del entorno científico y tecnológico; que sirva como herramienta para la obtención de insumos que permita atender las demandas de información de diversos usuarios, siendo útil también en actividades académicas.

Así mismo, de manera particular se busca evidenciar que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta útil en el aprovechamiento de datos para la toma de decisiones; mostrar que los conceptos fundamentales de la física de la teledetección son la base para el procesamiento, uso y manejo de imágenes de satélite derivadas; ser un factor para ampliar la oferta de servicios con base a las demandas de los usuarios y fomentar la cultura Geomática[4].

[2] Actualmente existen sitios en Internet desde donde se pueden descargar imágenes de satélite de manera gratuita.
[3] R=Rojo, G=Verde, B=Azul, generación de color bajo el proceso aditivo de los tres colores elementales.
[4] "Geomatica es el campo de actividades en la cuales, usando un método sistemático, se integran los medios para adquirir y manejar datos espaciales requeridos como parte de las operaciones científicas, administrativas y legales involucradas en el proceso de producción de manejo de información espacial" [Canadian Institute of Geomatics, Canadá].

Para cumplir los objetivos, la metodología[5] utilizada consistió en plantear la problemática o situación actual, establecer el contenido del trabajo de tesis, determinar las fuentes de información, documentar los temas señalando las bases teóricas fundamentales, llevar a cabo un análisis y diseñar un procedimiento solución, para finalmente implementarlo y establecer conclusiones.

Desde un enfoque más formal y guardando las proporciones del caso, se utilizó el método general (hipotético deductivo) tratando de anticipar los resultados con base a la experiencia directa sobre el tema y corroborando la hipótesis básica establecida con esos resultados (revisar-describir-explicar).

Entre los resultados más relevantes del presente trabajo de tesis, ha sido confirmar que los procedimientos propuestos para la generación de las imágenes compuestas RGB del satélite Landsat, tiende a estandarizar el proceso, lo que permite ofrecer a los usuarios de estos insumos (o de los derivados) certidumbre en la calidad de la información, mejor tiempo de respuesta y un soporte documental de fácil comprensión; es decir, se mejora la prestación del servicio.

Por otra parte, la incorporación de un índice en la determinación de la mejor combinación de tres bandas (imágenes) del satélite para generar una composición RGB (de acuerdo a su riqueza informativa), permitió demostrar que la combinación de las bandas 4, 3 y 2 no es la mejor aún cuando es la más utilizada y documentada no sólo en nuestro país, siendo más bien un paradigma desde el personal punto de vista de quien presenta este trabajo de tesis, reconociendo que para afirmarlo contundentemente hace falta la correlación con datos como el clima y condiciones geográficas generales de la región de estudio sobre la que se generarán las imágenes compuestas, así como la revisión de varios especialistas en interpretación de imágenes de satélite para establecer conclusiones.

---

[5] Aquí se considera como metodología a la referencia de los pasos y procedimientos que se han seguido para el particular modelo de trabajo que se aplicó.

También se ha podido concluir que en el tratamiento digital de las imágenes de satélite son indispensables el análisis estadístico y el análisis visual, mismos que son complementarios, reforzados ambos procesos, por el conocimiento básico de la física de la teledetección. Esto nos permite definir a las imágenes resultantes como una selección de la realidad sensorial con una representación icónica de elementos y estructuras que cuentan con una sintaxis visual.

Todo lo anterior se encuentra enmarcado en el presente trabajo de tesis en seis capítulos. En el primero, Sistemas de Información Geográfica (SIG), se establecen las definiciones de SIG y análisis espacial, resaltando los componentes de un SIG, las estructuras de datos y las principales funciones dentro de un SIG. Los aspectos cartográficos básicos son expuestos en el Capítulo II, que se enfoca a definir los sistemas de referencia geográfica, las proyecciones cartográficas y la nomenclatura de la cartografía digital e impresa del INEGI. En el Capítulo III se plantea el problema a resolver, señalando la situación actual al respecto, la técnica general a utilizar y algunas consideraciones aclaratorias importantes. En este capítulo se puntualiza que esta tesis se desarrolla en la Dirección de Geografía de la Dirección Regional Oriente del INEGI, cuya sede se encuentra en la ciudad de Puebla, Pue.

Uno de los aspectos fundamentales, que motivaron este trabajo, ha sido presentar las bases teóricas en materia de teledetección, útiles en el desarrollo de proyectos como el que nos ocupa, lo cual se hace en el Capítulo IV, cubriendo el concepto de teledetección e incluyendo sus fundamentos físicos. Se abordan los sistemas espaciales de teledetección, exponiendo los tipos, resoluciones y plataformas de dichos sistemas. Como parte esencial, en este capítulo también se revisan los criterios visuales en el uso y manejo de las imágenes satelitales, su tratamiento digital, el cálculo de estadísticas básicas para el análisis, el ajuste al contraste, las tablas de falso color y las composiciones en color.

En el Capítulo V se hace el análisis de los datos disponibles para el presente trabajo, definiendo la cobertura geográfica conveniente a trabajar para el estado

de Puebla y calculando el volumen de los datos involucrados en todos los procesos. También se realiza el análisis del software a utilizar, describiendo sus principales funciones. De la misma manera, se hace una revisión breve del hardware susceptible de uso, considerando los requerimientos del software y la disponibilidad de los equipos de computación.

En este mismo capítulo se presentan los procedimientos propuestos para la generación de imágenes compuestas en RGB de los satélites Landsat TM y ETM+. Su diseño está basado en la experiencia personal sobre el tema.

El Capítulo VI desarrolla paso a paso los procedimientos propuestos para la generación de las imágenes compuestas en RGB de acuerdo a los satélites ya mencionados, enriqueciendo los resultados con el establecimiento de algunos criterios generales sobre el color para la interpretación de esas imágenes. Se mencionan algunos ejemplos de aplicación, para finalmente relacionar la teledetección en el entorno de los SIG, que son la herramienta fundamental para la implementación de proyectos como el presente trabajo de tesis y de sus aplicaciones.

Finalmente, se establecen las conclusiones derivadas de los resultados, así como las referencias bibliográficas y Web.

CAPÍTULO

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).

I.1. ¿Qué es un SIG?

En primer lugar hay que decir que existen tres acepciones en uno para este acrónimo:

SIG como *disciplina*, considerada como una ciencia aplicada que se ocupa de todo lo referente a estos sistemas como proyecto; que es la segunda acepción. En este sentido se habla de experiencia en SIG, cursos sobre SIG, especialistas en SIG, libros en SIG, entre otros.

SIG como *proyecto*, es cada una de las realizaciones prácticas de la disciplina, cada instalación existente. En una primera aproximación es un sistema capaz de proporcionar cierta información, ya procesada, sobre elementos de los que se ocupa la Geografía.

SIG como *software*. Las casas comerciales llaman SIG al programa o conjunto de programas integrados, que se ofrecen para el establecimiento de un SIG proyecto. Se trata de un caso en el que se nombra a la parte por el todo. Un SIG proyecto se compone de hardware, software, datos, personal y organización. El único problema estriba en que hay que ser conciente de esa sinécdoque y no caer en la posición de creer que por el hecho de adquirir un SIG software ya se tiene un SIG.

Antes de pasar a aspectos más detallados, es conveniente decir lo que no es un SIG y así proceder a su deslinde de disciplinas afines.
Un SIG no es una instalación de Cartografía Asistida por Computadora; la esencia de estos sistemas radica en que utiliza la potencia de proceso de información que poseen las computadoras para producir mapas. El resultado final siempre es el

producto clásico, un documento cartográfico en papel o en otro tipo de soporte, digital, microfilm, transparencia, etc. Aún cuando pueda ser tan sofisticado como el "mapa a la carta" en el que el usuario selecciona escala, proyección cartográfica, zona, simbología, información específica; para obtener finalmente un documento trazado a la medida de sus necesidades.
En cambio un SIG aplica posibilidades computacionales a la tarea de consultar y analizar la información que puede contener un mapa o conjunto de mapas, enriquecida en ocasiones con datos de procedencia diversa. El producto final es una respuesta que puede tomar la forma de archivo, listado, dibujo en papel, gráfico en pantalla, etc.

Un SIG tampoco es una base de datos (BD). Una BD es un conjunto de datos compartidos e interrelacionados, diseñado para ser explotado de forma óptima por todas las aplicaciones que utiliza una organización. Aún cuando es cierto que un SIG incluye una BD como núcleo principal, comprende más cosas, tales como programas de dibujo, utilerías gráficas, de cambio de proyección, de huso[6], procedimientos de comprobación, métodos de adquisición y tratamiento de datos, de corrección de errores, entre otros. Mientras que una BD abarca los datos y los programas que los mantienen y gestionan. Los SIG engloban también a las aplicaciones finales de que se disponen, al hardware, al personal y a la organización en sí.
Por otro lado, los datos cargados en un SIG incluyen descripciones geométricas de entidades geográficas, lo que marca una serie de diferencias prácticas que generan una problemática propia y diferenciadora frente a otros sistemas.

La información geográfica es muy voluminosa en comparación con la que gestionan bases de datos tradicionales. Esto origina unos problemas de gestión y organización muy específicos. En general, las transacciones habituales dentro de un SIG son muy pesadas, la operación más sencilla moviliza un gran número de

[6] Representación sobre un plano de la parte de la superficie terrestre comprendida entre dos meridianos. En la proyección UTM cada uno de los 60 husos comprende una longitud de 6 grados entre los paralelos 84 grados de latitud norte y 80 grados de latitud sur.

registros porque afecta a descripciones geométricas que incluyen largas listas de coordenadas. Mostrar o analizar una zona de mediano tamaño, afecta a cientos de miles de datos.

El capturar, depurar, estructurar y actualizar cantidades colosales de datos, exige muchas horas de paciente trabajo, que ha de ser llevado por personal especializado. Esto hace que erigir un SIG sea una empresa difícil, en la que los errores de concepción se suelen pagar a un alto precio.

La información geográfica es también esencialmente fractal, es decir, su complejidad y anfractuosidad dependen de la resolución que consideremos, dando lugar a hechos tan curiosos como que la longitud de una línea de costa crezca con la escala.

Es además, básicamente ambigua; ¿quién puede saber con exactitud en una desembocadura dónde acaba el margen del río y comienza la costa?, ¿cómo se puede saber exactamente dónde acaba un bosque y comienza un terreno abierto con árboles diseminados?, etc.

Se puede añadir que es multiforme, por que en función de los intereses del usuario, puede adquirir múltiples apariencias distintas. Una parroquia puede ser vista como un área de influencia por una autoridad eclesiástica, como un punto por una agencia de turismo, como un objeto tridimensional lleno de detalles por un estudioso del arte, etc.

Entrando en el panorama de las definiciones de SIG existentes, se encuentra una amplia variedad en la literatura especializada no todas equivalentes entre sí. Esto no debe conducir al relativismo de algunos autores, quienes llegan a decir que cada profesional tiene su propio concepto de SIG, en función de sus necesidades particulares y, por tanto, no se puede establecer una definición única.

La definición más práctica y cómoda por ser la más concreta y clara, la más ampliamente utilizada, ha sido formulada, con pequeñas variaciones por Marble, Burroughs, Goodchild, el Departamento del Entorno Británico y otros. Tomado lo mejor de cada uno de ellos, se puede redactar de la siguiente manera:

"Conjunto de herramientas integradas, capaz de capturar, almacenar, recuperar, manipular, analizar y mostrar datos espacialmente referenciados a la Tierra".
A pesar de ser el enunciado más extendido, presenta algunos defectos. Se echa de menos el verbo actualizar y no se consideran como partes integrantes de los SIG elementos tan importantes como los datos o el equipo humano.
Antonio Rodríguez Pascual, del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España, propone la siguiente definición:

"Modelo informatizado del mundo real, descrito en un sistema de referencia geográfica, establecido para satisfacer necesidades de información específicas, respondiendo del mejor modo posible, a un conjunto de preguntas en concreto. Esto implica una capacidad de registro selectiva ante los fenómenos del entorno y la elección de una estructura conceptual para los entes considerados, sus propiedades y los fenómenos en que se ven implicados".

Esta definición aporta algo más, no sólo identifica un SIG en función de lo que puede hacer, sino que trata de buscar su esencia: un modelo construido en función de las preguntas a las que se necesita responder. Implica, en cierta forma una serie de criterios metodológicos generales, aplicables a todo el proceso de construcción de un SIG.
El punto de partida para disponer de un SIG es identificar las necesidades de información a cubrir y hacerlo del modo más concreto posible con una lista de preguntas que deseamos que nuestro sistema responda.
En general las preguntas que un SIG responde se pueden resumir en:

Ubicación: ¿Qué hay en…?
Condición: ¿Dónde hay…?
Patrones: ¿Qué condiciones espaciales existen en…?
Tendencias: ¿Qué ha cambiado desde…?
Modelado: ¿Qué ocurriría si…?

Por otra parte, es fundamental conocer todas las circunstancias que rodean el proceso de consulta:

¿Por qué y para qué se pregunta? Para mejor satisfacción de las necesidades del usuario final, determinar qué rango de tiempos de respuesta son aceptables, decidir cada cuánto tiempo es necesario actualizar la información para que sea útil, saber que resolución o escala es la idónea para cada caso; tener en cuenta hasta qué punto es probable que en el futuro el usuario necesite incluir nuevas preguntas; determinar la importancia de aspectos como la seguridad, la integridad, la fiabilidad, la precisión, entre otros.

¿Dónde se pregunta? No es lo mismo tener la posibilidad de interrogar al sistema desde un automóvil, desde puestos de consulta fijos, vía telefónica o desde Internet. Cada opción presenta unos problemas de comunicación distintos, conduce a diseños globales diferentes.

¿Cuándo se pregunta? Aspectos como el número medio de preguntas por unidad de tiempo, el número máximo de preguntas simultáneas, o la aparición de picos a horas determinadas, condicionan las características técnicas que ha de tener el sistema para mantener el tiempo de respuesta dentro de los límites deseados.

¿Cómo se pregunta? O lo que es lo mismo, qué tipo de respuesta se espera: una visualización gráfica en pantalla, la aparición de números y letras en una terminal, un listado, un dibujo en papel, un disquete, un archivo, etc.

¿Quién pregunta? Dependiendo del nivel de conocimientos informáticos, geográficos y de todo tipo del usuario final, se debe diseñar una interfaz que, siendo cómoda presente la información con el grado de elaboración adecuado a quien va a leerla.

En todo SIG como proyecto existe una optimización obligatoria y capital, que debe guiar todos y cada uno de los pasos a dar por el equipo humano del SIG:

diseño, pruebas piloto, selección de hardware y software, desarrollo, implementación, establecimiento de procedimientos de toma y edición de los datos, comprobaciones, carga explotación definitiva y actualización.

Un SIG como modelo, puede verse como una prótesis que nos auxilia en el proceso de conocer una parte de nuestro entorno, el aspecto geográfico de la realidad, que por su rango de variación espacio-temporal y por el volumen de datos que contiene, se escapa de los rangos de información que son capaces de captar nuestros sentidos y procesar nuestro cerebro.

Según lo que se sabe sobre la percepción humana, vemos en parte lo que nuestro cerebro cree que debe ver. Nuestra mente elabora continuamente previsiones basadas en la experiencia acerca de lo que vamos a percibir y esas previsiones condicionan nuestras percepciones posteriores. La visión es un proceso activo. El ojo es embriológicamente una parte más del cerebro y como tal, no es un mero receptor pasivo de datos, sino un filtro selectivo y organizador de imágenes. El ojo toma continuamente decisiones, de las que una de las más importantes y complejas es decidir qué es fondo y qué es figura dentro del campo visual.

Puesto que todo el proceso de creación y explotación de un SIG no puede ser universal si quiere ser eficaz, está condicionado por el punto de vista y lo primero que hay que hacer es “elegir un ojo”, asumir conscientemente una perspectiva. Decidir cuál será nuestra visión para ver al mundo desde esa posición.

Establecer un SIG una vez “elegido un ojo”, es entonces un gran proceso de abstracción, una labor de codificación del mundo, que entraña las dificultades de traducir la realidad a un cierto sistema de signos que la representen adecuadamente.

Desde los años setenta ha ido formándose un cuerpo de métodos y reglas que constituyen lo que se llama análisis y diseño de Sistemas de Información, de los que un SIG es un caso particular. Si bien esta disciplina es todavía inmadura, ya que presenta falta de unanimidad en los criterios, regular experiencia y

formulaciones a veces poco rigurosas, sí proporciona suficientes herramientas para luchar contra la subjetividad y por lo menos acotarla.

Si bien, no podemos decir siempre con seguridad que el problema de construir un SIG óptimo para un fin determinado sea de solución única, sí sepamos al menos que existe una familia (al menos dos) de soluciones semejantes entre sí, que son las más eficaces.

Existe, por otro lado, un criterio general obvio, muy usado en la práctica, a la hora de diseñar una estructura conceptual para describir un fenómeno de nuestro entorno, o un programa de cálculo. Siempre resulta muy adecuado hacerlo imitando las categorías conceptuales que maneja nuestra mente o los procesos mentales por los que nosotros efectuaríamos dicho cálculo, respectivamente. Es lo que podríamos llamar un principio antropomórfico.

En la tecnología SIG, confluye generalmente un conjunto de disciplinas, cuya esencia y principios fundamentales debería de conocer en profundidad el técnico ideal que se dedicase profesionalmente a la materia. Una lista muy razonable, en la que seguramente habrá alguna omisión, incluiría al menos:

- *En cuanto a ciencias geográficas*: geodesia, fotogrametría, geografía, topografía, teledetección.
- *En lo referente a informática*: bases de datos, diseño gráfico, comunicaciones, diseño de sistemas de información, ingeniería de software, método de programación estructurada, administración de tecnologías; y en función del SIG de que se trate: inteligencia artificial, simulación, métodos de análisis espacial.
- *Respecto a la información en sí*: matemáticas, física, estadística y documentación.
- *Por añadidura*, el campo concreto al que se va aplicar el SIG, por ejemplo, biología, arqueología, ecología, catastro, hidrología, planificación urbana, entre otras.

Disciplinas todas ellas nada triviales, cada una con su problemática, filosofía y metodología propias y bien diferenciadas. Adquirir experiencia auténticamente profunda en cualquiera de ellas puede llevar del orden de cinco años[7], ya que se tarda por término medio ese tiempo en entender interiormente cualquier cuerpo teórico. Puesto que no se pueden invertir 15 años en formar a una persona, el problema de la formación de técnicos en SIG, capaces y polivalentes es de muy difícil solución.

La situación se agrava por el hecho que ningún plan de estudios, hasta hace pocos años, incluía la tecnología SIG. Al parecer en nuestro país, no ha transcurrido aún el tiempo necesario de rodaje para adquirir la experiencia necesaria en la didáctica de este tema. Es un hecho el que la mayoría de los profesionales de la informática han sido autodidactas en gran medida, a pesar de la existencia de escuelas en informática desde hace muchos años.

Por lo tanto, es aconsejable organizar grupos mixtos de trabajo, en los que colaboren informáticos, topógrafos, ingenieros y otros especialistas, trabajando y aprendiendo juntos.

No hay que olvidar que es necesario disponer de distintos niveles de formación, en los que el mensaje varíe en función del tipo de individuo al que va dirigido. Una primera división puede ser la que distingue la formación del gestor de recursos con capacidad de decisión, que debe entender la esencia de la tecnología sin entrar en detalles técnicos, de la del técnico que sí ha de estudiar esos detalles en profundidad y la del usuario final, que necesita una idea clara de la utilidad y prestaciones que puede proporcionarle un SIG.

En este sentido, sería muy deseable una mayor conciencia del mercado acerca de las ventajas que puede proporcionar el disponer de un SIG adecuado. La falta de implantación de la tecnología SIG en las empresas, universidades y centros de trabajo en general donde podría ser útil, es otro factor más que hace que no sea esta disciplina suficientemente conocida. Esto genera la aparición de un círculo vicioso. A su vez, debido a la falta de difusión de los SIG, la mayoría de sus

[7] Antonio Rodríguez Pascual. Instituto Geográfico Nacional de España.

usuarios potenciales no se aprovechan de sus beneficios. Por ello los SIG no resultan tan rentables como pudieran, ya que sus principales vías de amortización es el aprovechamiento de la información por clientes subsidiarios.
De ahí la importancia de la divulgación que se pueda hacer de la utilidad de los SIG, tales como, buscar petróleo, organizar viajes turísticos, realizar estudios de mercado, estudiar emplazamientos óptimos para nuevos polígonos industriales, prevenir incendios forestales, descubrir yacimientos arqueológicos, prever los efectos de un agente contaminante, etc. Cualquier actividad humana puede ser planificada, organizada, coordinada, estudiada, explorada o prevista globalmente con la ayuda de un SIG.

I.2. Bosquejo histórico de los SIG.

Los antecedentes de los Sistemas de Información Geográfica están estrechamente ligados a los orígenes de la cartografía[8].
La cartografía se ha ocupado desde la antigüedad, de colectar y seleccionar datos, manipularlos y generalizarlos para así diseñar y construir mapas, mismos que son leídos e interpretados para dar respuesta a distintos eventos del medio geográfico.

La primera representación cartográfica de que se tiene noticia como una forma de documento impreso, es una tabla de arcilla con caracteres grabados que data del año 2800 a.C., encontrada en la mesopotamia asiática, la cual constituye en esencia una carta catastral elaborada con fines impositivos. Se sabe también de documentos muy antiguos en Egipto, India y China.

[8] "El conjunto de procedimientos que permite reunir, analizar, generalizar y sintetizar datos de la superficie terrestre, para representarla a una escala reducida".
"Ciencia, arte y técnica de preparar toda clase de mapas y cartas, incluidas todas las operaciones desde su planeación, hasta la impresión final".

La cartografía empezó a tener un carácter científico en la Grecia Clásica. Como parte de los estudios filosóficos se llegó a descubrir la forma aproximadamente esférica de la Tierra, cuyas dimensiones se establecieron con exactitud sorprendente. Así mismo, surgen los conceptos de polos, el ecuador y los trópicos, que dieron lugar al desarrollo del sistema coordenado curvilíneo, constituido por el conjunto de meridianos y paralelos, que ha subsistido hasta nuestros días.

En la época del Imperio Romano, se adoptaron los criterios desarrollados por el humanismo griego, sin embargo, la cartografía romana se caracterizó por tener orientación a la expansión del Imperio. Por otra parte, los agrimensores se constituyeron como figuras importantes de ese gobierno, delimitando predios para establecer los impuestos que se debían de cobrar a sus poseedores, así mismo en los aspectos estratégicos militares. Con el decline del citado Imperio, también hubo un decline en la elaboración de mapas. Hasta el siglo XVIII resurge un interés en Europa, de los gobiernos de esa época, por la elaboración sistemática de mapas como una manera de organizar sus tierras.

Durante los siglos II al XIII se desarrollaron mapas y atlas ptolomaicos, los cuales tratan de mostrar el mundo conocido en representaciones cartográficas que ya incluyen un sistema de proyección, con un canevá en el que los meridianos son convergentes.

La Edad Media se caracterizó por un decidido oscurantismo determinado por la influencia religiosa.

En la segunda mitad del siglo XIII y como consecuencia de la invención de la brújula, se incrementó la navegación con propósitos comerciales, principalmente por los genoveses. Se sintió entonces la necesidad de contar con cartas de navegación que mostraran las rutas comerciales. Se desarrollaron las llamadas Cartas Portulanas (cartas de puertos o cartas de marear) en las que aparecían la delineación de las costas y ubicación de puertos.

Durante el Renacimiento se nota un fuerte incremento en las cartas portulanas como consecuencia del aumento en las actividades comerciales, los viajes de exploración y los grandes descubrimientos. Fue la época de la invención del grabado y la impresión, lo que permitió la edición y publicación de cientos de cartas. Se nota un retorno en lo que respecta a cartografía en las culturas griegas y romanas.

A finales del siglo XVII, surge la Reforma de la Cartografía, dándole un carácter más científico con los trabajos desarrollados por la Academia Francesa. Durante el siglo XVIII se empiezan a hacer trabajos geodésicos formales, con fines de investigación y se impulsa la cartografía topográfica, estableciendo las bases para el desarrollo cartográfico del siglo XIX en donde la disciplina es más científica.

Por otra parte, con el advenimiento de la Revolución Industrial tras el desarrollo del transporte, sobrevino la necesidad de establecer rutas de traslado mediante la utilización de mapas. Paralelamente a estas actividades, se empezaban a gestar mapas con características específicas como registro de población, flujo de tráfico, geología y topografía.

Con estos documentos cartográficos se tuvo la herramienta para llevar a cabo el análisis de la situación que prevalecía en cuanto a esos temas, así como la de tomar decisiones ante alguna problemática que se presentase.

Con el desarrollo científico de la época, la demanda de información geográfica dejó de estar limitada a los mapas de información general y éstos empezaron a diversificarse, dando lugar a la aparición de cartas geológicas, económicas, educacionales, de transporte, etc.

La invención de la fotografía en el siglo XIX y el desarrollo de la fotografía aérea, representan uno de los avances más espectaculares de la cartografía. En la época más reciente y con pocas excepciones, la fotogrametría ha sido de fundamental

importancia para la cartografía, al permitir esquemas de producción muy precisos, rápidos y económicos.

Durante los últimos 200 años muchos estilos de mapas han surgido, no obstante, existen estándares cartográficos que hasta la actualidad han prevalecido.

Los primeros desarrollos matemáticos para el análisis en problemas espaciales los ubicamos, ya en el siglo pasado, en las décadas de los 30's y 40's, paralelamente a los avances en métodos estadísticos y análisis en series de tiempos. Estos avances se tornaron lentos ante la inexistencia de herramientas de cómputo adecuadas, a tal grado de ser prácticamente bloqueados dichos avances.

En los años 60's del siglo XX con la aparición de las computadoras digitales, se pudieron integrar eficientemente los métodos para el análisis espacial y la cuantificación de los datos registrados en los mapas temáticos.

Las expectativas en ese tiempo tendían a que en un futuro cercano, la cartografía tradicional podría ser sustituida y que el mundo en su totalidad podría ser manejado en una base de datos compleja que permitiría la producción de todo tipo de mapas. Debido a que no existían expertos en el área, el desarrollo de paquetes se realizaba fundamentalmente en centros universitarios de investigación.

El SYMAP (Synagraphic Maps) fue diseñado por H.T. Fisher en 1963 y permitía la obtención de mapas coropléticos[9], mapas isopléticos[10] de superficies estadísticas interpoladas, mapas tridimensionales de información estadísticas y mapas de áreas proximales (áreas teóricas obtenidas a partir de valores puntuales). En el SYMAP se introduce el concepto de unidad integrada del territorio con lo que se posibilita el análisis espacial.

[9] Los mapas de coropletas son una forma de cartografiado cuantitativo utilizada para la representación de fenómenos discretos asociados a unidades de enumeración (estados, países...), a las que se aplican símbolos superficiales de acuerdo con su valor.

[10] Los mapas isopléticos representan fenómenos mediante líneas que unen puntos de igual valor. Por ejemplo curvas de nivel.

El primer sistema en la era moderna, que puede considerarse como un verdadero SIG, es el "Canada Geographic Information System (CGIS)" que precisamente data de los años 60's del pasado siglo. Diseñado para la rehabilitación agrícola por parte del gobierno canadiense.
El propósito del CGIS fue el Inventario de Tierras para detectar aquellas en marginación.
En 1967 se implementa el "Natural Information Systems", y en 1969 el "Minesota Land Management Information System", esto en los Estados Unidos de Norteamérica.

A principios de los setentas el desarrollo de la cartografía automatizada se vio frenado por serios problemas: El hardware utilizado era complicado y poco fiable. La captura de datos se hacía en forma ciega dado que no existían equipos y paquetes interactivos. El software existente era muy escaso e inapropiado para el dibujo y edición cartográfica. Todo en su conjunto implicó una serie de problemas técnicos que desalentaban la inversión en este campo.
A mediados de los 70's aparece el paquete ODISSEY, que fue desarrollado a partir del trabajo publicado por Tom Parker y Nicholas Chrisman titulado "Cartographic Data Structures". El paquete retoma la tecnología DIME (Dual Independing Map Encoding) que introduce algunos conceptos relacionados con la topología. El ODISSEY se ve fuertemente enriquecido por el desarrollo de la geometría computacional y el diseño de una gran cantidad de algoritmos gráficos.
En la segunda mitad de la década de los setentas se da un fuerte impulso al desarrollo de paquetes interactivos CAD (Computer Aided Design). Sobresalen compañías como *Computer Vision* e *Intergraph* que a partir de la tecnología CAD/CAM desarrollan aplicaciones para fotogrametría, geodesia, topografía y catastro.

En 1977 el Departamento de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos de Norteamérica reportó la existencia de 54 SIG, esto nos da la idea de la rápida

difusión y generación de los SIG en organismos de gobierno, universidades y empresas privadas.

Así mismo, en esa década el desarrollo de los SIG se ve enriquecido con el procesamiento de imágenes a partir de sensores remotos, modificando así el concepto tradicional de manipulación de información en un SIG.

A principios de los ochentas, aparecen nuevos problemas relacionados con la producción definitiva de mapas, referentes principalmente a la generalización cartográfica y al manejo de tipografía para grandes formatos. Esta década con una cultura ambientalista, propicia la aplicación de los SIG en múltiples áreas, aunque éstas tienen limitaciones en términos del área geográfica, número y tipos de datos, capacidad analítica y modelado.

Hacia 1986 el ambiente de Mainframes empezó a ser desplazado por la tecnología PC. La década de los 80's fue una época de transición en que el software se desarrolló y maduró marcando la aparición del mercado de los paquetes SIG que permitían el establecimiento de relaciones de contexto espacial. Esto se debió fundamentalmente al diseño de software con los algoritmos adecuados para la organización y el ordenamiento espacial; la representación de la geometría de los datos espaciales y la realización de procesos de análisis que involucran elementos geométricos. A partir de este momento se establece una división entre los SIG y los paquetes de cartografía automatizada.

En 1993 se reportaban más de 120 software SIG en uso en los Estados Unidos; 57 de los cuales contaban con herramientas para la producción automatizada de mapas. Así mismo, se reportaron 19 software exclusivos de cartografía automatizada. Actualmente el desarrollo de la cartografía automatizada ha continuado su evolución integrándose con los paquetes de Sistemas de Información Geográfica.

Los primeros intentos por incursionar en las modernas tecnologías para el manejo de información geográfica en nuestro país, se dieron hacia 1981, cuando el Consejo Nacional de Estudios del Espacio Exterior fue integrado a la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). A partir de entonces se trabajó en el desarrollo de metodologías para el procesamiento digital de imágenes con la finalidad de buscar nuevas y más eficientes alternativas para la producción semiautomatizada de cartografía, principalmente temática.

Uno de los proyectos de mayor relevancia de esa época, consistió en el desarrollo de la metodología para la elaboración de las cartas de uso del suelo y vegetación mediante el análisis de imágenes en minicomputadoras y la obtención de originales separados en graficador electrostático blanco y negro.

La Dirección General de Geografía (DGG) del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) trabajó activamente en el desarrollo de metodologías para la edición cartográfica automatizada mediante el uso de tabletas digitalizadotas y graficadores SCITEX de gran resolución.

A raíz del terremoto de 1985 y como resultado de la importante crisis económica nacional, la actividad de la DGG se vio seriamente afectada. A pesar de las condiciones difíciles, fue posible suscribir un convenio de colaboración con el Centro Científico IBM de México, dirigido a la promoción del uso de imágenes de satélite en computadoras personales. Como resultado de estos esfuerzos se desarrolló el software SPIPR (Sistema Personal Interactivo de Percepción Remota) cuya versión 1.0 fue liberada en 1989.

Una vez superados los problemas derivados de la descentralización y partiendo de los nuevos avances en el desarrollo de la cartografía automatizada a nivel mundial, el INEGI emprendió importantes intentos de modernización que condujeron a la utilización de paquetes como AU2 para la obtención de cartografía censal.

La DGG, emprendió diversos proyectos de desarrollo de modernas metodologías para la actualización cartográfica y para la implementación de un SIG a partir de

la información cartográfica escala 1: 1’000,000. Esto permitió el planteamiento ambicioso “Programa de Modernización de la Actividad Geográfica del INEGI” con miras a la actualización de la infraestructura tecnológica y al desarrollo de nuevas metodologías para el manejo de la información geográfica y cuyo objetivo terminal fue el desarrollo y consolidación del Sistema Nacional de Información geográfica (SNIG), actualmente integrado los SNEIG (Sistemas Nacionales Estadístico y de Información Geográfica).

En los últimos años, nuestro país ha presenciado un creciente interés por las modernas tecnologías para el manejo de información geográfica y para la generación de cartografía automatizada. El abatimiento de los costos en equipos y paqueterías y la cada vez mayor capacitación de especialistas, ha permitido que diversas instituciones incursionen en este campo.

I.3. Componentes de un SIG.

Los puntos de vista sobre los SIG incluyen cada vez más una consideración del contexto más amplio de información espacial. La tecnología, aunque fascine o asuste, discretamente se queda en el fondo. En primer plano, actualmente está el negocio real, la consideración más madura de las razones y propósitos del SIG, el contexto comercial o científico y la cuestión de juzgar su efectividad en el apoyo a objetivos científicos o comerciales (Figura I.1.).



Figura I.1. Componentes globales de un SIG.

Estas componentes no son meras ramificaciones de un campo de estudio, en realidad cualquier uso de un SIG debe necesariamente incluir cada una de estas componentes. No son componentes de un campo de aprendizaje, sino componentes de las actividades de diseñar, crear y manejar un SIG.
En la Figura I.2. se consideran los principales componentes; por un lado está la tecnología de los SIG, que es el software y el hardware. Incluye el grupo de procesos software en el corazón del cual hay un conjunto de algoritmos para acceder, presentar, analizar y sintetizar datos con referencia a sus atributos espaciales y no espaciales. Enlazados con estos programas, hay otros para la gestión de datos, para la extracción desde la base de datos, para la visualización de los datos y para realizar otras tareas como la importación y exportación. Éstos están ubicados en sistemas operativos específicos y se usan con otros programas en las herramientas de software habituales en la administración del sistema.

La parte del *hardware* está centrada en la plataforma informática y tiene dispositivos periféricos de entrada y salida. Éstos incluyen dispositivos de lectura convencionales que permiten la transferencia de archivos, dispositivos de red y también dispositivos de salida como impresoras. Además existen dispositivos específicos ampliamente usados en aplicaciones SIG de entrada y salida de mapas a formatos analógicos y desde formatos analógicos.

El segundo componente principal son los *datos*. Todos los sistemas de información están basados en los datos y en normas para usar esos datos. Sus principales elementos son entradas, bases de datos espaciales y no espaciales, sistemas de mantenimiento a la base de datos y de control de calidad.

El tercer componente de los SIG es el conjunto de *métodos*. No son ni hardware, ni software, ni específicos de las personas. Son procedimientos independientes o normas para emprender las distintas tareas implicadas en el diseño, creación y operación de un SIG. Un método contiene la lógica de un procedimiento y las especificaciones para las acciones. Hay métodos para el análisis espacial, para la

manipulación de datos, para el diseño de las bases de datos, para el análisis de necesidades de los usuarios, para la interpretación de mapas y muchos más. El método es lo que determina el significado o calidad de los resultados. El método es la clave de todo en las operaciones de un SIG.

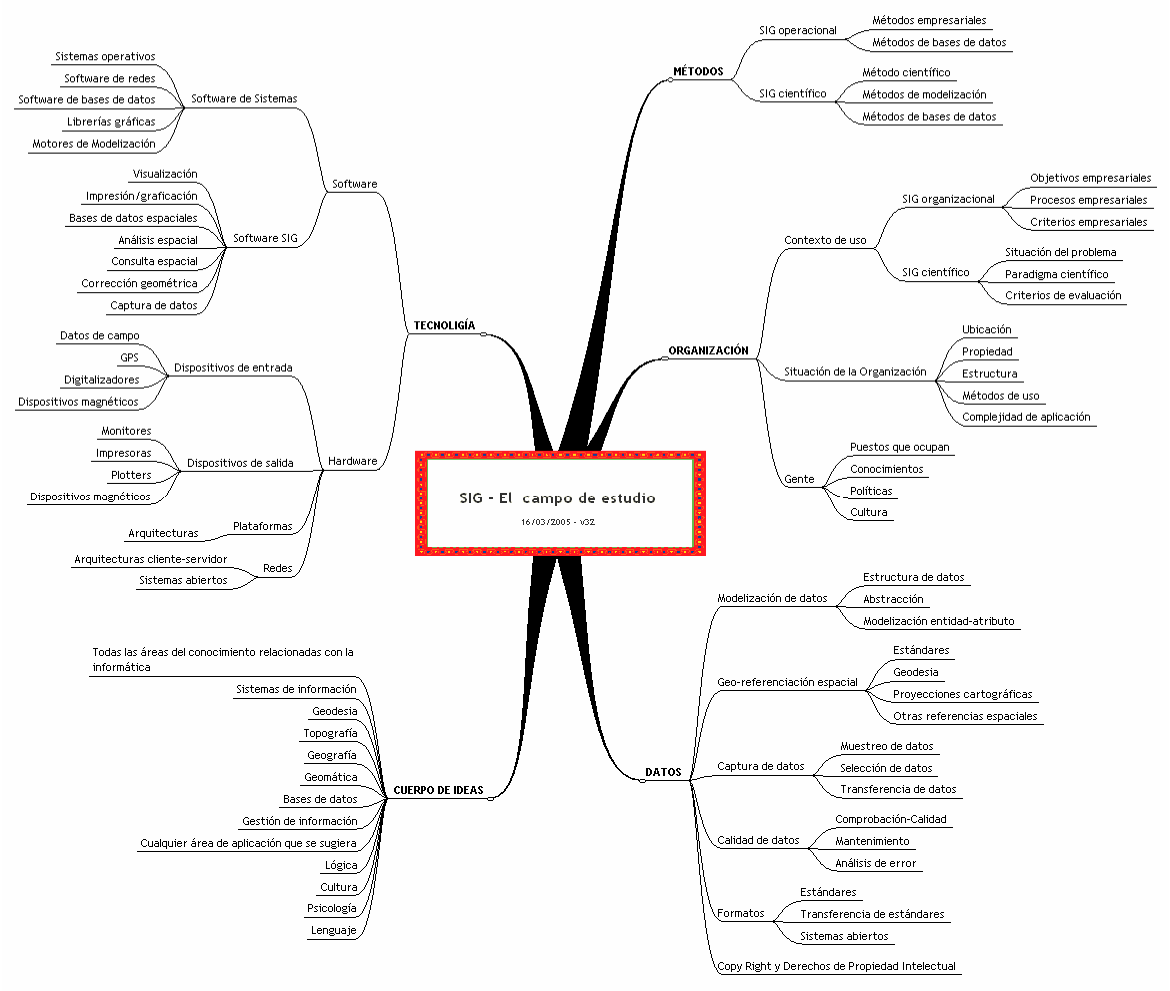


Figura I.2. Principales componentes de un SIG.

El siguiente componente de un SIG es la *organización*. Cualquier sistema de información sólo tiene sentido en el contexto de una organización, la cual consta de muchas partes sutiles y complejas que podemos considerar formada por un conjunto de objetivos y procesos de gestión, operadores y el componente que afecta a todos los demás: la gente. Los subcomponentes particulares de la gestión, los operadores y la gente son aquellos que afectan al diseño del sistema,

a la implementación y el control, ya que tienen un papel particularmente importante en la definición de qué es un SIG.

Finalmente, está el cuerpo de las *ideas* que existen detrás del uso de los SIG. Incluyen áreas de la ingeniería implicadas en el desarrollo de la informática, incluyendo matemáticas y físicas, que están detrás del hardware de las computadoras. Detrás de los sistemas de software hay cuerpos del conocimiento implicados en la geomática[11], el procesamiento de datos, las bases de datos el análisis espacial y cualquier área de aplicación. Detrás de los temas organizacionales están las teorías de gestión, el diseño de sistemas, el comercio, la sociología, la psicología, etc. Los métodos se apoyan en cuerpos teóricos de cualquier rama concebible de la ciencia, la sociología, la gestión y el comercio.

I.4. Dato geográfico.

Un dato geográfico es cualquier elemento del espacio que se puede descomponer (conceptualmente) en dos elementos: por una parte, *la observación o soporte*, es decir, una entidad de la realidad sobre la cual se observa un fenómeno; y por otra, la *variable o atributo temático*, que puede ser cualquier hecho que adopte diferentes modalidades en cada observación.

Componente espacial de los datos geográficos. Las observaciones son objetos situados en el espacio. Estas observaciones tienen a su vez dos aspectos: *la localización geométrica* o absoluta en relación a algún sistema de referencia exterior y *las relaciones topológicas* cualitativas que mantiene con otros objetos espaciales. Esta información topológica, incluida en la base de datos marca la

[11] *Geomática:* Término científico moderno que hace referencia al campo de actividades o área del conocimiento en las cuales se integran los medios para el acopio, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de la información geográfica. Estos datos provienen de múltiples fuentes tales como: la cartografía, la teledetección, los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Fuente: Enciclopedia Wikipedia: http://es.wikipedia.org/wiki/Geom%C3%A1tica".

diferencia de un SIG con uno de Diseño Asistido por Computadora (CAD) pues facilita el análisis y las operaciones complejas con los datos espaciales.

Componente temática de los datos geográficos. Con el uso de la estadística y del análisis de los datos se miden las variables de los objetos espaciales apoyándose de una gran variedad de procedimientos disponibles que muchas veces han sido desarrollados para otro tipo de datos pero que se incorporan a la Geografía sin variación alguna.

Estas dos componentes, es posible considerarlas de manera aislada pero sólo se tendrían análisis puros de geometría o estadística de los datos, en el caso específico de las características geométricas la Geografía ha desarrollado procedimientos de interés que constituyen, en parte, el denominado *análisis espacial*.

I.5. Estructuras de datos en un SIG.

Las dos principales estructuras de datos espaciales en un SIG, son:

- Vectoriales.
- Ráster.

I.5.1. Datos vectoriales.

Para propósitos del modelo vectorial, los objetos reales se suponen inscritos en un sistema coordenado, el cual permite determinar con precisión, su posición, sus dimensiones y el número de éstas. Así, en el modelo vectorial, los objetos se representan mediante la especificación de los valores de estas magnitudes.

El *conjunto de datos vectoriales* consiste en toda la información existente en una hoja para cualquiera de las escalas de las cartas. Como ejemplo, el sistema

puede tomar como referencia el ITRF92[12] (Marco de Referencia Terrestre Internacional de 1992).

Los *datos auxiliares* de un conjunto de datos ofrecen una información relacionada con aspectos tales como método de compilación, proyección, etc.

Para representar un rasgo (o fenómeno) geográfico particular en la base de datos geográficos[13] (BDG), se usarán dos componentes:

- Entidad (componente descriptivo no gráfico)
- Representación geométrica (componente gráfico)

En general, una *entidad* es una forma (objeto, persona, concepto, etc.) distinguible de lo que le rodea, acerca de la cual se requiere información. Para propósitos de la BDG es la representación digital del componente descriptivo de un dato geográfico. Se le asocia un nombre con el fin de distinguirla de otras entidades (ejemplos: carretera, presa, línea de transmisión, eje estructural, área agrícola, etc.)

Un *atributo* es una característica que califica y describe un aspecto de una entidad. El número de atributos asociados con cada entidad es variable por ejemplo, los atributos para la entidad geográfica carretera serían: revestimiento, número de carriles, derecho de tránsito, jurisdicción y condición.

Para representar un dato geográfico se especifica un valor para cada atributo de la entidad, es decir, una cantidad o cualidad específica, por ejemplo, para carretera, los valores de los atributos son: pavimentada, dos carriles, libre, federal y en operación.

La representación geométrica constituye la forma digital del componente espacial del dato geográfico. La BDG sustenta tres tipos diferentes de representación geométrica: punto, línea y área. Cada entidad puede estar asociada con distintos tipos de representación geométrica. Por ejemplo, una

[12] Ver Capítulo II.

[13] Una Base de Datos Geográficos es una colección de datos espacialmente referenciados que actúan como un modelo de la realidad. Es decir, creamos modelos de la realidad que intentan tener algo de similitud con los aspectos seleccionados del mundo real.

subestación eléctrica puede estar representada ya sea como punto o como área, dependiendo de sus dimensiones y de la escala de representación.

Un *punto* es la representación geométrica constituida por un solo par de coordenadas (x,y) y se usa para describir geométricamente un rasgo geográfico considerado como puntual para propósitos de la BDG.
Una *línea* es la representación geométrica constituida por una serie de dos o más pares distintos de coordenadas (vértices) ligados secuencialmente y se usa para describir total o parcialmente la geometría de un rasgo geográfico, considerado como línea para propósitos de una base de datos geográfica (BDG).
Un *Área* o polígono es la representación geométrica delimitada por una línea cerrada o serie de líneas que cierran y se usa para describir geométricamente un rasgo geográfico considerado como una extensión o superficie. Un área puede ser simple o compleja, esta última constituida por líneas inclusivas y exclusivas. Un área puede ser adyacente o estar sobrepuesta a otras (Figura I.3.).

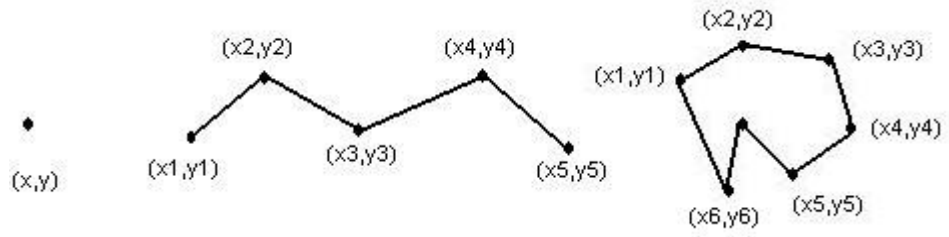


Figura I.3. Representación geométrica de un dato vectorial: punto, línea y polígono.

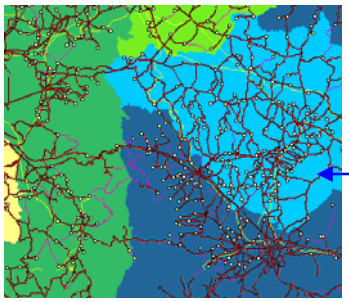
En la Figura I.4 se ejemplifican casos de datos vectoriales en su representación Geométrica y atributos.

I.5.1.1. Estructura espacial de los datos vectoriales.

Sobre el modelo vectorial general se pueden formular varias estructuras de datos, que son diferentes representaciones del mismo modelo de datos, expresadas en términos de diagramas o listas de valores, entre otros. Cada una de las estructuras de datos tiene sus ventajas y sus inconvenientes. Las más

importantes en el contexto de los Sistemas de Información Geográfica son: Lista de coordenadas, Diccionario de vértices, Organización DIME y Estructura arc/nodo.

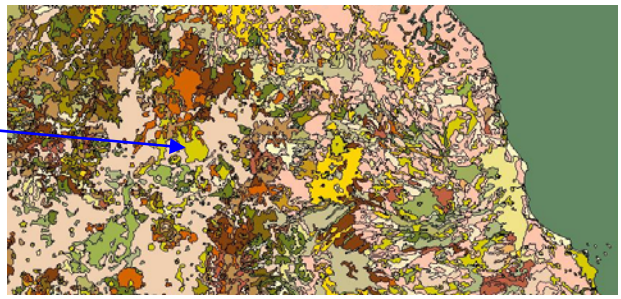
a)



3171 CAMINO, brecha
3172 CAMINO, vereda
3191 CARRETERA, pavimentada, 1 carril, libre, federal, en Operación.
3192 CARRETERA, pavimentada, 2 carriles, libre, federal, en Operación.
3193 CARRETERA, pavimentada, 2 carriles, libre, desconocido, en Operación.
3195 CARRETERA, pavimentada, 4 carriles, libre, federal, en Operación.
3197 CARRETERA, pavimentada, 6 carriles, libre, federal, en Operación.
3198 CARRETERA, pavimentada, 1 carril, libre, estatal, en Operación.
3199 CARRETERA, pavimentada, 2 carriles, libre, estatal, en Operación.

b)

6329	Bosque de pino, con erosion
6330	Bosque de pino, sin erosion
6331	Bosque de pino, vegetacion secundari
6332	Bosque de pino, vegetacion secundari
6333	Bosque de pino, vegetacion secundari
6334	Bosque de pino, vegetacion secundari
6335	Bosque de pino, vegetacion secundari
6336	Bosque de pino, vegetacion secundari
6337	Bosque de pino-encino, con erosion
6338	Bosque de pino-encino, sin erosion



c)

Location: (528831.899060 2094760.347978)

Property	Value
ESTADO	15
CLVMPIO	034
CLVLOC	0035
CLVAGEB	007-7
NOMLOC	CUYEHUALCO
LONGITUD	984334
LATITUD	185652
ALTITUD	2720
CLV-CARTA	E14-B51

Location: (584446.677737 2105821.850919)

Property	Value
ESTADO	21
CLVMPIO	114
CLVLOC	0001
CLVAGEB	012-6
NOMLOC	HEROICA PUEBLA DE ZARAGOZA
LONGITUD	981150
LATITUD	190236
ALTITUD	2135
CLV-CARTA	E14-B43

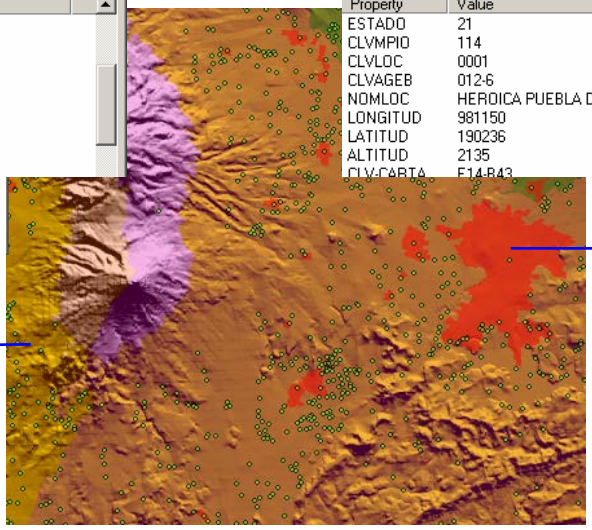


Figura I.4. Ejemplos de datos vectoriales. **a)** Entidades lineales; **b)** Entidades de área; **c)**Entidades puntuales.

Las *listas de coordenadas* almacenan únicamente los dos pares de coordenadas que definen un segmento recto (Figura I.5 y Tabla I.1.).

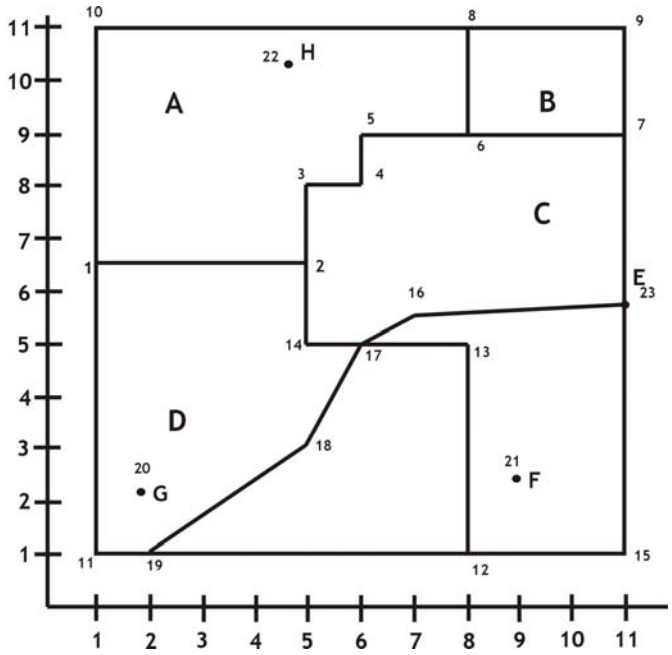


Figura I.5. Vértices para la representación en "lista de coordenadas" o en "diccionario de vértices"

A,9	Nombre del polígono y número de vértices
1,6.5	Coordenadas del primer vértice
5,6.5	
…	
8,11	
1,11	Coordenadas del último vértice
1,6.5	Coordenadas del primer vértice (repetidas)
B,5	Nombre de otro polígono y número de vértices
8,9	
…	

Tabla I.1. Estructura tabuar de la "lista de coordenadas"

Para cada objeto geográfico existente se registra su nombre, el número de vértices que definen su frontera y las coordenadas X, Y de cada vértice. En el caso de los polígonos se repite el primer vértice para indicar que es una figura cerrada. El inconveniente es que no se representa de modo explícito la topología de los datos espaciales, solamente se registra la geometría o localización

espacial. Muchos vértices pueden estar duplicados o triplicados y no necesariamente con la misma precisión, lo que ocasiona errores en el trazado de los polígonos.

En el caso de *diccionario de vértices* se registran una sola vez las coordenadas de cada vértice que existe en el mapa fuente, cada uno de los cuales han sido previamente identificados con un nombre o etiqueta (ver Figura I.5 y Tablas I.2.a y Tabla I.2.b.).

Coordenadas de los vértices		
Vértice	**X**	**Y**
1	1	6.5
2	5	6.5
3	5	8
…		
23	11	5.7

Tabla I.2. a) Listado de vértices para el diccionario de vértices.

Diccionario de vértices
Polígono A (Vértices que lo forman): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 1
Polígono B: 6, 7, 8, 9, 6
Polígono C: 12, 15, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 14, 13, 12
Polígono D: 1, 2, 14, 13, 12, 11, 1
Línea E (Vértices que la forman): 23, 16, 17, 18, 19
Punto F: 21
Punto G: 20
Punto H: 22

Tabla I.2. b) Estructura tabular del diccionario de vértices.

De esta manera, la información de las coordenadas no está duplicada y no existe el problema de registrar de modo diferente las coordenadas de un mismo vértice. No obstante, la topología de los objetos geográficos no se conoce de modo suficiente.

Los Archivos DIME, elaborados por la Oficina del Censo de los Estados Unidos, son uno de los primeros ejemplos de representación vectorial (Figura I.6.) en que se recoge la topología de manera completa. Su utilidad principal es la de

representar polígonos. Se crea una lista de vértices con nombres y coordenadas X, Y de cada uno (Tabla I.3.a, b y c). Por otra parte, los objetos lineales se codifican indicando en qué vértice empieza y en qué vértice termina cada uno de ellos. Los segmentos rectos que delimitan polígonos se codifican indicando su nombre, el vértice en el que se inicia, el vértice en el que termina (es decir, se conoce el sentido de cada segmento lineal del límite), el polígono que tiene a la izquierda y el polígono que tiene a la derecha.

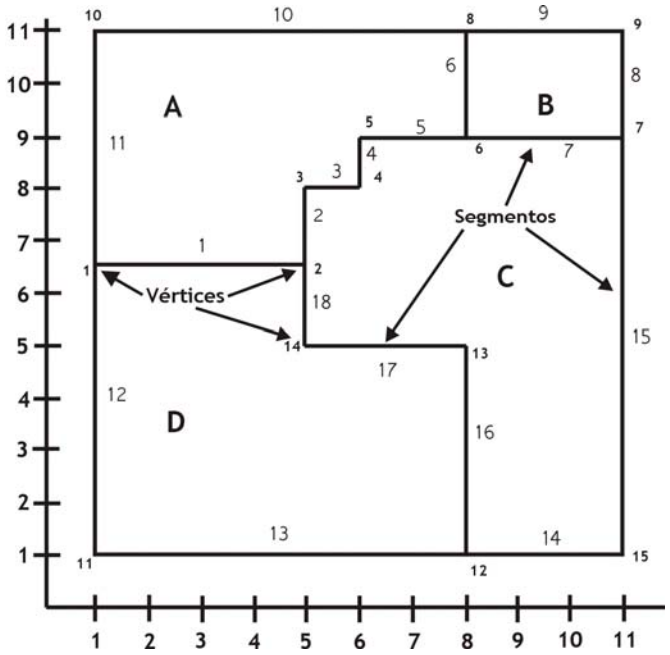


Figura I.6 .Segmentos lineales y vértices.

Coordenadas de los vértices		
Vértice	**X**	**Y**
1	1	6.5
2	5	6.5
3	5	8
…		
13	8	5
14	5	5
15	11	1

Tabla I.3 a).Ejemplo de lista de vértices y coordenadas.

Descripción de los segmentos rectos				
Segmento	**Polígono a derecha**	**Polígono a izquierda**	**Vértice origen**	**Vértice final**
1	D	A	1	2
2	C	A	2	3
3	C	A	3	4
4	C	A	4	5
5	C	A	5	6
6	B	A	6	8
7	C	B	6	7
8	Exterior	B	7	9
9	Exterior	B	9	8
10	Exterior	A	8	10
11	Exterior	A	10	1
12	Exterior	D	1	11
13	Exterior	D	11	12
14	Exterior	C	12	15
15	Exterior	C	15	7
16	C	D	12	13
17	C	D	13	14
18	C	D	14	2

Tabla I.3 b).Estructura tabular para los segmentos rectos en archivos DIME.

Descripción de los polígonos	
Polígono	**Segmentos rectos**
A	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11
B	6, 7, 8, 9
C	4, 5, 7, 15, 14, 16, 17, 18, 2, 3
D	1, 18, 17, 16, 13, 12

Tabla I.3 c).Descripción tabular de polígonos en archivos DIME.

Con este procedimiento todos los elementos topológicos importantes se han incluido y ahora es posible averiguar con facilidad qué líneas están conectadas, qué segmentos delimitan un polígono, qué polígonos son contiguos, etc. Por supuesto, se ha evitado la duplicación de la información de las coordenadas e incluso la de los elementos que forman un polígono.

Los archivos DIME están muy adaptados a registrar la información espacial de los hechos geográficos artificiales: límites administrativos, parcelas de propiedad, etc. En éstos no existe un grado excesivo de complejidad de la frontera, de modo

que el segmento recto resulta adecuado como base de la codificación. En la *estructura arco/nodo* (Figura I.7.), el elemento base ya no es el segmento recto, sino la *cadena o arco* formado por una sucesión de segmentos rectos, todos aquellos que tienen la misma topología. Un segundo elemento fundamental es el *nodo*: cada uno de los vértices en que cruzan tres o más arcos o que es el punto terminal de una línea o arco. Por lo tanto, los polígonos se codifican indicando los arcos que les rodean, a su vez los arcos se registran indicando el nodo de salida, el nodo de llegada, el polígono a la izquierda y el polígono a la derecha. Finalmente se recogen las coordenadas de los puntos, tanto nodos como vértices normales.

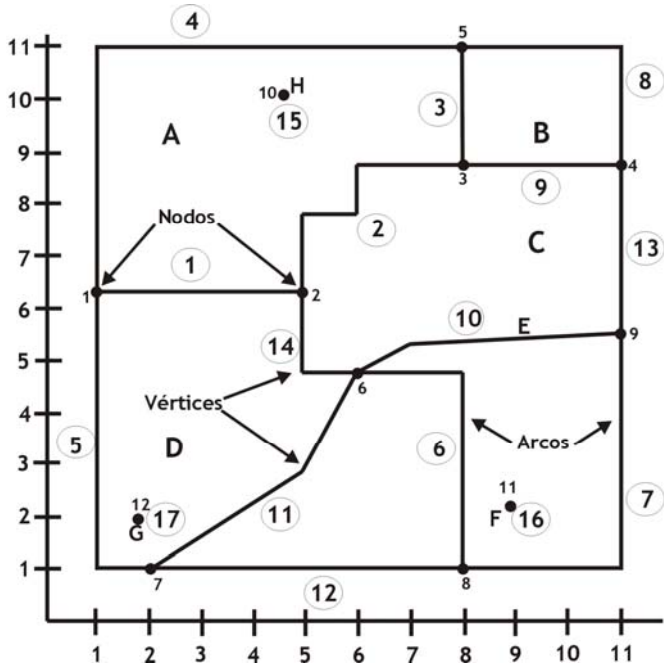


Figura I.7. Arcos, nodos y vértices.

Un objeto puntual se codifica como un nodo y un arco. En caso de existir "islas" dentro de un polígono, se debe indicar de alguna manera esta circunstancia, para ello tanto los componentes de este polígono, como los de los puntos se registran en la definición de sus polígonos envolventes acompañados de un signo menos para indicar esta situación espacial Tablas I.4. a, b, c y d).

Coordenadas de los nodos y vértices de cada arco			
Arco	**Nodo origen**	**Vértices intermedios**	**Nodo final**
1	1,6.5		5,6.5
2	5,6.5	5,8; 6,8; 6,9	8,9
3	8,9		8,11
4	8,11	1,11	1,6.5
5	1,6.5	1,1	2,1
6	8,1	8,5	6,5
7	8,1	11,1	11,5.7
8	11,9	11,11	8,11
9	8,9		11,9
10	11,5.7	7,5.5	6,5
11	6,5	5,3	2,1
12	2,1		8,1
13	11,5.7		11,9
14	6,5	5,5	5,6.5
15	4.8,10.2		4.8,10.2
16	9,2.4		9,2.4
17	1.8,2.2		1.8,2.2

Tabla I.4 a) Representación tabular en la estructura arco/nodo.

Topología de arcos				
Arco	**Nodo origen**	**Nodo final**	**Polígono a derecha**	**Polígono a izquierda**
1	1	2	D	A
2	2	3	C	A
3	3	5	B	A
4	5	1	Exterior	A
5	1	7	Exterior	D
6	8	6	C	D
7	8	9	Exterior	C
8	4	5	Exterior	B
9	3	4	C	B
10	9	6	C	C
11	6	7	D	D
12	7	8	Exterior	D
13	9	4	Exterior	C
14	6	2	C	D
15	10	10	A	A
16	11	11	C	C
17	12	12	D	D

Tabla I.4 b) Representación tabular de la topología de arcos

Topología de polígonos	
Polígono	**Arcos**
A	1, 2, 3, 4, -15
B	3, 8, 9
C	2, 9, 13, 7, 6, 14, -16
D	5, 12, 6, 14, 1, -17

Tabla I.4 c) Representación tabular de la topología de polígonos.

Topología de nodos	
Nodo	**Arcos**
1	1, 4, 5
2	1, 2, 14
3	2, 3, 9
4	8, 9, 13
5	3, 4, 8
6	6, 10, 14
7	5, 11, 12
8	6, 7, 12
9	7, 10, 13
10	15
11	16
12	17

Tabla I.4 d) Representación tabular de la topología de nodos.

Para facilitar la búsqueda de los polígonos, la información de los arcos se organiza de modo que todos los que forman un polígono estén contiguos en el archivo.

Las tablas de topología de los distintos elementos permiten realizar con facilidad algunos tipos de análisis espacial. Por ejemplo, determinar qué polígonos son contiguos es fácil usando la tabla de topología de arcos, aquellos que se encuentren en la misma fila son continuos, ya que poseen un lado en común. Igualmente es posible determinar con facilidad los polígonos que están colocados en el interior de otros (buscar arcos con el signo menos y después de averiguar a qué polígonos pertenecen) algunas cuestiones semejantes.

Esta organización arco/nodo se ha convertido en la más característica del mercado para los sistemas vectoriales, y es utilizada en diversos SIG.

I.5.2. Datos raster.

Es una estructura donde se almacenan los datos espaciales como celdas de una matriz bidimensional o malla, que se ve como una imagen. Cada celda en los datos raster tiene información descriptiva dada por el valor numérico almacenado en ella.
El ejemplo más común es la información de satélites, ortofotos y también cualquier otro tipo de imagen (Figura I.8.a) usada en diseño gráfico (tif, bmp, gif, jpg, entre otros).

Cuando las entidades del mundo real son continuas, se adopta el modelo de datos raster para su representación digital.

No se definen los objetos, sino que se subdivide el área de estudio en una malla de celdas, en las que se registra el atributo temático o característica de la superficie terrestre en ese punto, como se muestra en la Figura I.8.b). Cada celda posee un valor numérico que puede representar el identificador del objeto, el código de un atributo cualitativo o el valor de un atributo cuantitativo. Por ejemplo, una celda con un valor "6" podría indicar que pertenece al Municipio 6 (identificador de objeto) o que está cubierto por el tipo de suelo 6 (atributo cualitativo). Aunque los datos almacenados en las celdas de esta malla no se refieran necesariamente a fenómenos que pueden observarse en el medio ambiente, las mallas de datos en sí mismas pueden considerarse como imágenes –de algún aspecto del medio ambiente- o como capas –cada una de las cuales almacena un tipo de información sobre la región cartografiada-, que pueden visualizarse en modo raster. En la visualización raster, como por ejemplo en la pantalla de la computadora, también hay una malla de pequeñas celdas denominadas píxeles. Píxel es la contracción del término "*Picture Element*".

Los píxeles pueden variar en color, forma o tono de gris. Los valores en las celdas de la malla de datos se utilizan para regular directamente la apariencia gráfica de sus píxeles correspondientes. Por tanto, en un sistema raster los datos controlan directamente la representación visual.

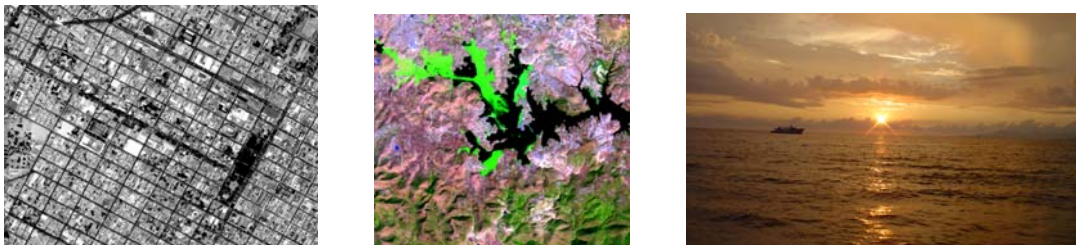


Figura I.8 a) .Ejemplos de datos raster.

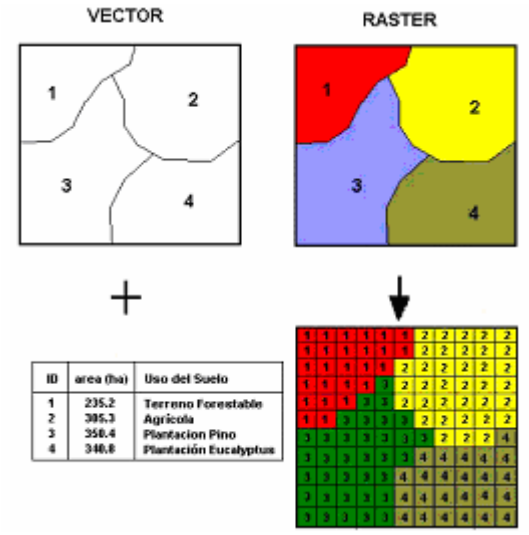


Figura I.8. b) .Representación de los datos raster.

I.5.2.1. Formato raster espacial.

Es una representación en forma de malla donde cada elemento adopta un valor único por cada atributo (Figura I.9.).
En este tipo de formato, los objetos se construyen a partir de un conjunto de puntos sobre una red equidistante y a los cuales se les asigna un valor.
En lugar de codificar las fronteras de los objetos, se registra el interior y sus límites quedan implícitamente representados.
Sus características más importantes son:

- El espacio geográfico es tratado como un plano cartesiano.
- La unidad mínima es el píxel o celda, observando ésta una relación de escala con los objetos del terreno.
- Un punto es representado por una celda, una línea por un número de celdas vecinas alineadas en una misma dirección y un polígono por una aglomeración de celdas vecinas.
- Dado que una celda sólo puede contener un valor, los diferentes atributos geográficos deben representarse por conjuntos de arreglos cartesianos (capas).

La propiedad principal del modelo de datos raster es la resolución espacial, definida por el tamaño de la celda. La localización espacial de cada celda está implícita en la estructura de datos ya que depende directamente de la fila/columna que le corresponda con respecto a un origen de coordenadas.

Los modelos de datos se plasman de forma digital en estructuras de datos, que representan formas diversas de codificar y almacenar la información dentro del mismo esquema conceptual.

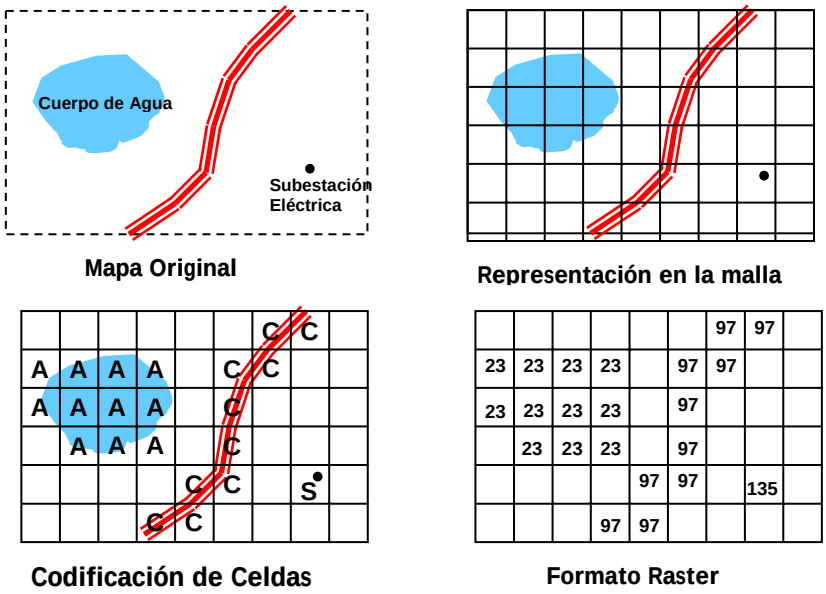


Figura I.9. Codificación de datos raster.

Las matrices regulares son el caso más simple de estructura en el modelo de datos raster: el terreno se "recubre" con un mosaico de celdas cuadradas que representan la unidad de información elemental donde cada celda posee el valor medio de la zona cubierta para la variable correspondiente. Como se muestra en la figura anterior.

I.5.2.2. Ventajas e inconvenientes del modelo de datos raster.

El modelo raster tiene, una organización muy simple de los datos, que permite realizar con gran facilidad procesos de análisis. Por ejemplo, la sobreposición de mapas es muy sencilla y fácil de programar mediante operaciones de matrices. Sus gráficos, se pueden realizar con dispositivos baratos, como por ejemplo una impresora matricial. Su principal inconveniente es el gran volumen de almacenamiento que requiere, en especial si es necesario disponer de una representación muy precisa, lo que exige disminuir el tamaño de píxel y, en consecuencia, aumentar el número de filas y columnas del mapa. Por este tipo de

cuestiones resulta muy importante el desarrollo de procedimientos como el "run-length" que disminuye el volumen de almacenamiento. El modelo raster no reconoce explícitamente la existencia de objetos geográficos, y por tanto, en las aplicaciones en que sea esencial su empleo, este modelo tiene pocas posibilidades de ser utilizado.

I.5.2.3. Estructuras de datos raster.

La conveniencia de solucionar los problemas de exhaustividad de la representación, llevó al diseño de estructuras de datos alternativas a la matriz regular.

I.5.2.3.1. Estructuras raster simples.

Enumeración Exhaustiva.

El valor de cada una de las celdas de la matriz se registra individualmente, lo que supone una gran abundancia de información que es, en muchos casos reiterativa, porque el mismo valor numérico aparece en muchos píxeles, en especial en trozos contiguos del mapa (principio de autocorrelación espacial de los fenómenos geográficos).

Codificación "Run-Lenght" (enumeración exhaustiva).

En un mapa raster lo usual es que muchos píxeles de una misma fila o de una misma columna tengan el mismo valor, por ello se ha ideado un sistema de codificación que compacta la información del mapa raster. El procedimiento consiste en recoger para cada fila el valor temático que existe y las columnas entre las cuales se produce (Figura I.10.). Si existen varios valores en una fila, primero se indica el que aparece en primer lugar, desde qué columna empieza y hasta qué columna llega, después el segundo valor y las columnas donde empieza y donde termina, etc (Tabla I.5.). Otras versiones sólo registran el valor numérico y la columna hasta la que llega, el inicio esta sobreentendido. Una

tercera posibilidad del mismo planteamiento es registrar el número de columnas que ocupa y el valor numérico es representado. El resultado suele ser, en todas las variedades, una economía importante.

Si consideramos, como ejemplo, valores de una porción de los datos raster:

	2262	2263	2264	2265	2266	2267	2268	2269	2270	2271	2272
1925	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4
1926	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4
1927	5	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4
1928	5	5	3	3	3	3	3	6	6	4	4
1929	5	5	2	2	2	2	6	6	6	6	4
1930	5	5	2	2	2	2	6	6	6	6	6
1931	5	5	2	2	2	2	6	6	6	6	6

Figura I.10. Valores numéricos de una porción de un mapa raster.

Estructura Run-Lenght:

8	3	3	5	1	4
3	4	5	3	2	5
8	3	2	6	4	2
3	4	2	4	5	6
1	5	2	5	5	2
7	3	4	2	4	2
3	4	4	6	5	6

Tabla I.5. Codificación Run-Lenght

I.5.2.3.2. Estructuras raster jerárquicas.

Árboles Cuaternarios (Quadtree).

Un quadtree es una estructura de datos que se basa en dividir el espacio mediante una estructura jerárquica de cuadrantes (matrices regulares de $2^n x 2^n$), se subdivide primero en cuatro cuadrados, luego cada nuevo cuadrado es subdividido otra vez en cuatro cuadrados hasta que, con creciente perfeccionamiento, ya no se originan cuadros conteniendo elementos gráficos. Sólo datos de cuadros no vacíos son almacenados digitalmente, con lo que da como resultado una considerable compresión de almacenaje (Figuras I.11, I.12, I.13).

El número de niveles del árbol jerárquico es arbitrario, adaptándose a las propiedades de la realidad que debe representar. Los quadtree presentan la ventaja de superar el problema de una resolución espacial única: las celdas pueden tener el tamaño adecuado a las características de la zona. Su mayor problema es el aumento de complejidad de la estructura, que hace que las operaciones de transformación (por ejemplo, cambios de proyección) y de superposición o combinación sean más complejas de realizar.

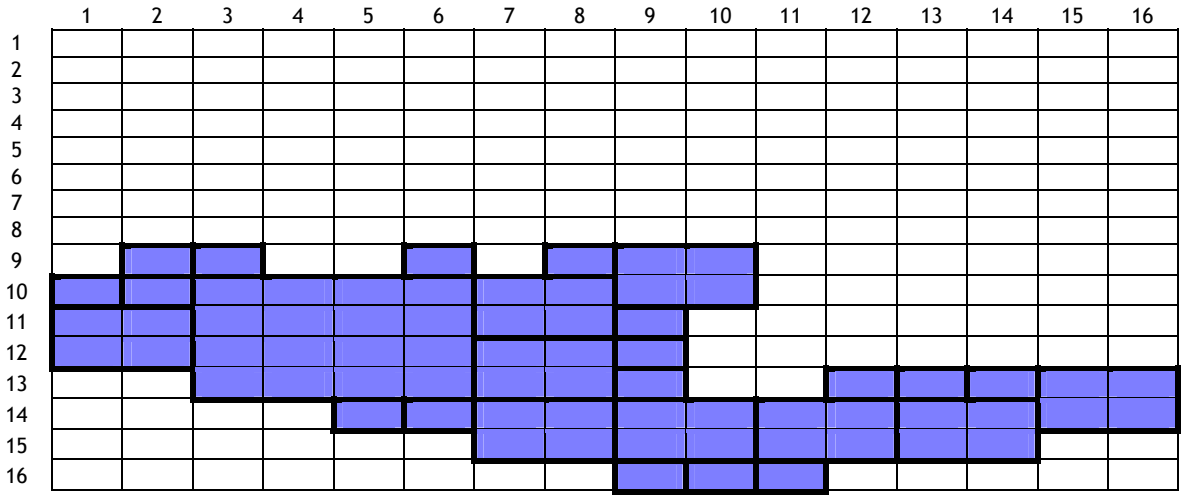


Figura I.11. Región de un mapa raster cualquiera.

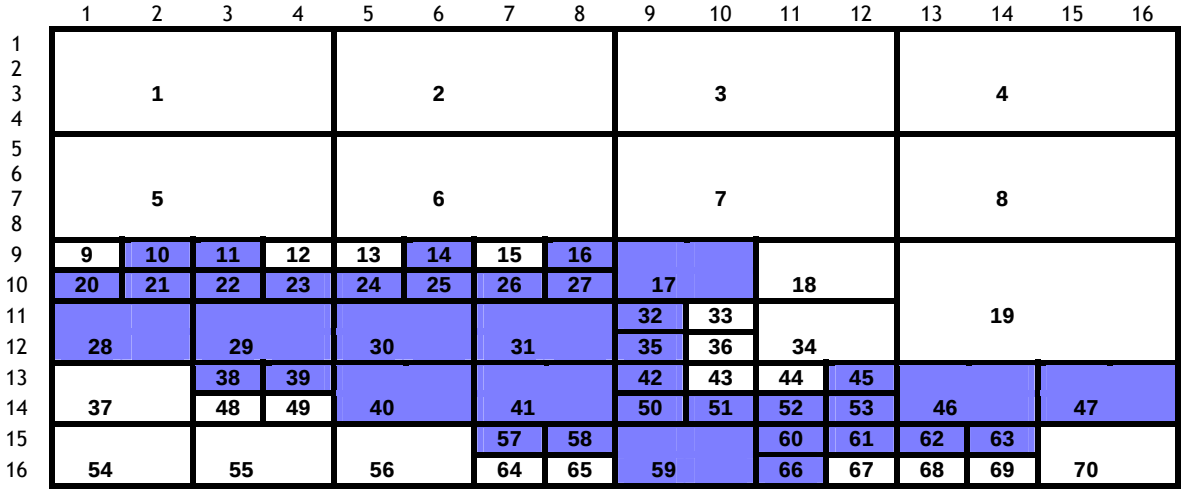


Figura I.12. Representación como un quadtree de la Figura I.11

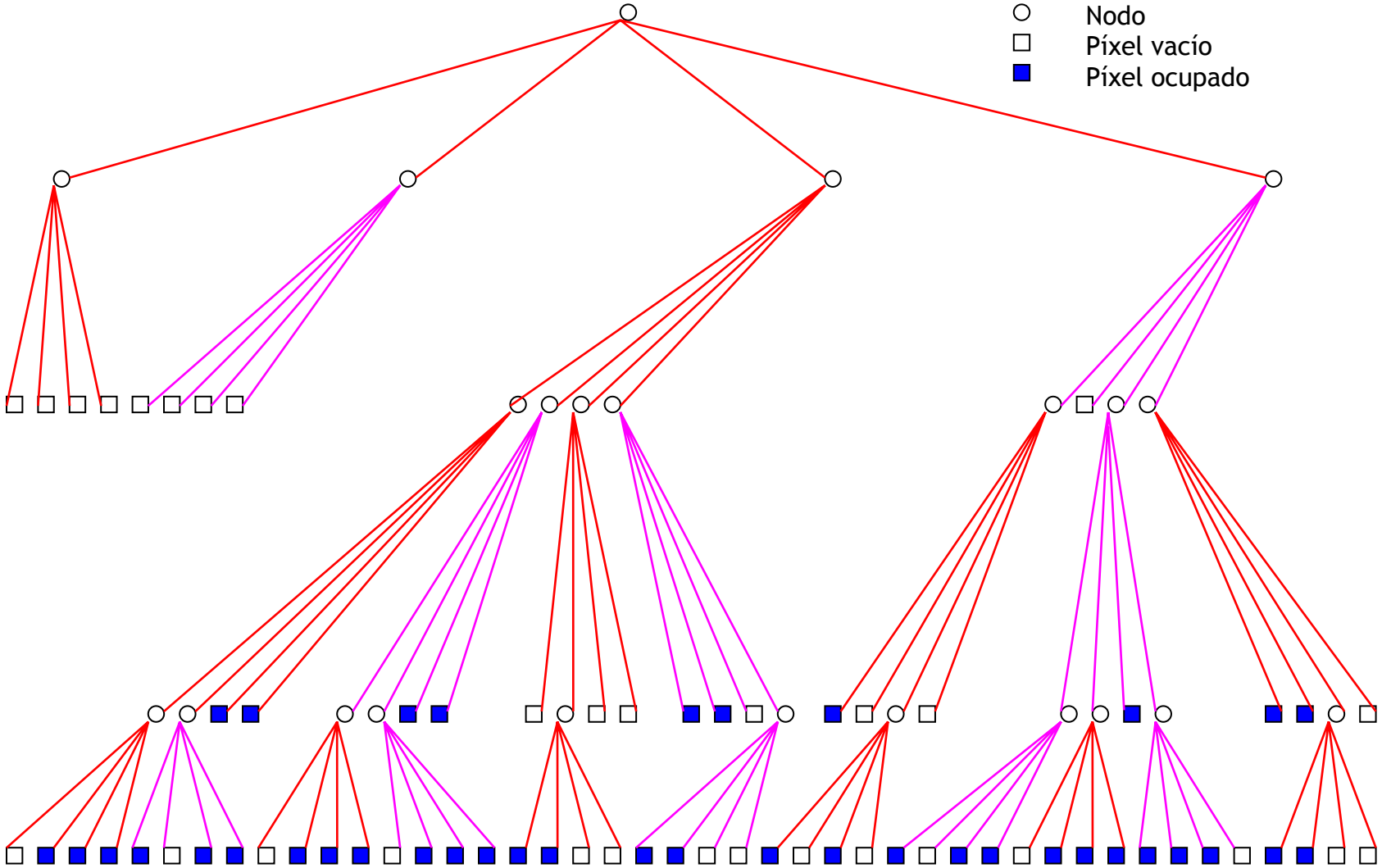


Figura I.13. Representación como un quadtree de la Figura I.11

I.5.2.3.3. Tipos de datos en el modelo raster.

En el caso de los archivos de imágenes, lo que vemos en el monitor corresponde a la gama de colores equivalente al valor numérico del archivo en cada punto (celda o píxel).

La unidad de almacenamiento de información en medios magnéticos es el byte (Figura I.14.) que a su vez está constituido por subunidades denominadas bits.
A cada uno de los bits se le asocia de manera virtual un valor dentro de un sistema numérico binario, comenzando al lado derecho con el valor 2^0=1 y duplicando cada uno conforme se avanza hacia la izquierda (2^1, 2^2, 2^3,…)

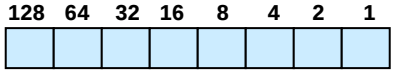


Figura I.14. Unidad de almacenamiento Byte.

Si sumamos los valores el resultado es 255; esto implica que en un byte de 8 Bits el rango de valores numéricos que puede almacenarse es de 0 a 255 (2^8). Por lo tanto, cualquier dato numérico dentro de este rango se considera como de "tipo byte", por el hecho de que ocupa sólo una unidad de almacenamiento.

Sin embargo, no todos los datos se encuentran dentro de este rango. Si deseamos guardar número mayores a 255, entonces se tendrán que utilizar 2 bytes contiguos.
A los datos numéricos que están en un rango de -32767 a 32767 se les denomina datos de "tipo entero".
Cabe señalar, que con uno o dos Bytes, solo es posible almacenar valores numéricos enteros dentro de los rangos especificados, pero si queremos almacenar valores mayores o menores de los del rango o, valores fraccionarios, entonces será necesario utilizar 4 Bytes contiguos para poder hacerlo. A estos datos se les conoce como datos de Tipo Real.

Se observa que, si deseamos almacenar por ejemplo el número 16 como de tipo entero, usaremos el doble de espacio en el medio magnético y cuatro veces el espacio si lo almacenamos como de tipo real.

La importancia del manejo adecuado de los datos reside principalmente en la economía del espacio en los medios de almacenamiento, principalmente cuando las bases de datos digitales contienen una gran cantidad de información. Por ejemplo los modelos de elevación de la República Mexicana producidos por el INEGI y obtenidos a partir de la cartografía básica a escala 1: 250 000, en los que cada valor de altura sobre el nivel del mar ocupa 2 bytes (datos de tipo entero) y cada grado de latitud y longitud ocupa 2 megabytes de espacio, o las imágenes multiespectrales de satélite en las que cada valor, por lo general, ocupa un byte y están constituidas por series de matrices de datos espectrales de la superficie del terreno, que ocupan grandes cantidades de espacio en los medios magnéticos.

I.6. Análisis espacial en un SIG.

Además de la naturaleza de los datos espaciales, podemos examinar los efectos que el procesamiento SIG (característica más distintiva de éstos) puede tener sobre los datos, con la finalidad de que el sistema no tenga solamente un carácter de inventario.

El análisis espacial, como disciplina por derecho propio, ha desarrollado diversos métodos, muchos de los cuales incluso no han sido incorporados a los SIG actuales.
Sin esta capacidad los SIG perderían gran parte de su importancia como herramienta para el tratamiento de la información geográfica. Se puede definir el análisis espacial como el *proceso de búsqueda de modelos geográficos y las*

relaciones entre elementos espaciales[14]. Quizás sea la investigación en este concepto la que ha tenido un menor desarrollo en comparación con el resto de capacidades de los SIG. Pero es evidente que el futuro de los sistemas de información geográfica está unido al progreso de las técnicas de análisis espacial.

No será posible cubrir, en el presente trabajo, todas las operaciones espaciales ni al mismo nivel de detalle, toda vez que se requeriría una tesis por sí sola; razón por lo cual se describe lo más importante.

Un SIG realiza funciones elementales en la búsqueda de soluciones a problemas del mundo real. En general estas funciones se agrupan de la siguiente manera:

- *Captura o Ingreso de datos.* Métodos para la captura de datos geográficos y tabulares.
- *Almacenamiento.* De acuerdo a los tipos de datos raster y vectorial.
- *Consulta.* Utilerías que permiten encontrar elementos geográficos con base en su ubicación o de sus valores de atributo.
- *Análisis.* Capacidad de responder a preguntas derivadas de la interacción de las relaciones espaciales entre varios grupos de datos.
- *Despliegue.* Herramientas para la visualización de elementos geográficos usando una gran variedad de simbología.
- *Salidas.* Los resultados de las consultas y análisis deben ser entregados en una diversidad de formatos, entre los que se destacan mapas, reportes, gráficas e imágenes o vistas.

De estas funciones la que nos ocupa por su relevancia en la obtención de información dentro de un SIG, son las de análisis. Tradicionalmente estas operaciones se agrupan por su contexto de operación; la agrupación más simple establece:

[14] MitChell, 1999.

Proximidad. Operaciones que permiten la obtención de información con base a la vecindad de los elementos geográficos (distancia, buffer, costos de recorrido, etc.)

Superposición. Es la integración de diferentes capas de datos geográficos. Su forma más simple puede ser una operación visual, pero una operación analítica puede requerir más de una capa de datos para ser unidos espacialmente (unión, intersección, multiplicación, diferencia, complemento, enmascaramiento, etc.)

Redes. Análisis de las conexiones entre elementos lineales y el flujo de recursos a través de éstos (rutas óptimas, zonas de influencia, tiempos de recorrido, etc.).

Existen formas más complejas de agrupar las operaciones de análisis espacial, en las que una operación puede pertenecer a uno o más de estos grupos; por ejemplo:

- *Consulta a la base de datos*. Reclasificación de datos, área, perímetro, histograma, superposición, etc.
- *Operadores matemáticos*. Principalmente *álgebra de mapas*[15] y transformaciones geométricas.
- *Operadores de distancia*. Vecino más cercano, distancia euclidiana, buffer, costos de recorrido, etc.
- Operadores de contexto. Filtros, patrones, texturas, pendientes del terreno, iluminación del terreno, orientación del terreno, etc.
- *Estadísticas*. Histogramas, tendencias, regresiones, correlaciones, etc.
- *Soporte a la toma de decisiones*. Evaluación multicriterio y multiobjetivo, conjuntos difusos, etc.
- *Análisis de superficies*. Interpolación espacial, geoestadística espacial, variables topográficas (pendiente, orientación, iluminación), cuencas hidrológicas, etc.

[15] Conjunto de operaciones matemáticas y lógica definidas sobre conjuntos de datos espaciales para el análisis y síntesis de la información espacial.

Entonces, dependiendo del autor que elijamos los objetivos del análisis espacial varían. Intentando recoger lo más ampliamente posible las opiniones de los principales investigadores del tema, parece interesante esquematizar cual serían los objetivos básicos que tendrían que cumplir el análisis espacial:

- Recuperar la información espacial individualizada.
- Sistematizar la información geográfica.
- Buscar patrones espaciales.
- Predecir y modelizar.

Resulta pues de gran importancia la capacidad de respuesta analítica del sistema, mayor trascendencia tiene la capacidad de valoración del usuario. El análisis espacial nos dará una respuesta, o varias, a las preguntas que hayamos formulado, pero el usuario a partir de ellas, debe realizar un juicio de valor que será lo que dé validez a los posibles resultados.
Dependiendo del tipo de pregunta podríamos distinguir diferentes tipologías de análisis. Este aspecto lo trataré analizando los posibles criterios de clasificación del análisis espacial.

I.6.1.Tipos de análisis.

Generalmente se usan dos criterios a la hora de clasificar el análisis espacial. El primero de ellos, que podríamos denominar *funcional*, sería aquel que distingue al análisis espacial por las funciones que realiza y por su nivel de complejidad[16]. El segundo, que denominaremos *estructural*, se basa en el tipo de estructura de datos desde la que se hace el análisis, es decir, si es un análisis vectorial o raster[17].

Los resultados no son sustancialmente distintos. Aquí se va a optar por una vía

[16] Comas y Ruiz, 1993. Buzai y Durán, 1997. Moldes, 1995. Fisher, 1999.
[17] Bosque, 1992. Gutiérrez Puebla y Gould, 1994. Navarro, Mataix, Guerrero y Gómez 2000.

intermedia aunque mucho más próxima a la estructural. La razón de esta opción se basa en la existencia de fuertes diferencias entre análisis similares según sea el tipo de estructura. Por ejemplo la superposición, que se trata de un tipo de análisis espacial, se realiza tanto en vectorial como en raster pero sus características difieren en gran medida según el modelo de datos que utilicemos. Por ello he considerado conveniente usar el segundo criterio, el criterio estructural, en vez del primero.

I.6.1.1. Análisis raster.

El análisis de los SIG que trabajan con estructura raster se basa en las operaciones que se realizan en cada una de las celdas que forman las coberturas de datos espaciales. Las principales funciones que se pueden realizar son: medición e identificación de elementos, reclasificación, superposición y vecindad.

I.6.1.1.1. Mediciones e identificación de elementos.

En el caso de los sistemas *raster* se ataca directamente a los datos constituidos por las celdas. Estas consultas pueden ser de dos tipos: la localización exacta de una celda determinada o la entidad existente en una localización concreta. De igual forma el sistema nos puede ofrecer la información sobre superficie o perímetro de celdas de un mismo atributo.

I.6.1.1.2. Reclasificación.

En la mayor parte de los programas *raster* la reclasificación supone la creación de un nuevo mapa con nuevos valores resultado de determinadas operaciones matemáticas basadas en los valores iniciales. Es un tipo de operación en donde exclusivamente se utiliza un único mapa. Los tipos de reclasificación pueden ser varios[18].

[18] Bosque, 1992.

- Reetiquetado; supone cambiar el valor de celdas con el mismo atributo por otro valor.
- Agregación; supone unir dos valores distintos en un único valor.
- Intervalos; es el paso de variable continua a discreta.
- Operacional; se trata de crear un nueva tabla a partir de la realización de una operación matemática (suma, resta, multiplicación, etc.) a cada uno de los *píxeles*.

I.6.1.1.3. Superposición (sobreposición).

La primera diferencia con el anterior tipo de análisis es que en este caso se utiliza más de un mapa. En principio la mayor parte de los programas de SIG *raster* sólo permiten el análisis de dos en dos capas. Por tanto cuando se necesita superponer más de dos capas el proceso debe ser continuado, es decir primero dos y luego el resultado de esa superposición con una tercera y así sucesivamente.
En principio existen dos grandes grupos de superposiciones, las que podríamos denominar lógicas y aquellas que denominaríamos aritméticas[19].

Las lógicas serán aquellas que buscan áreas donde coincidan unas determinadas condiciones lógicas. Dichas posibilidades se encuentran a partir de la utilización operaciones de lógica booleana. Las dos formas más usuales son Y (*and*) y O (*or*). Es decir, en el primer caso la búsqueda se ciñe a las celdas donde se cumpla las dos condiciones. Por ejemplo si estamos analizando una capa donde se localiza el suelo urbanizable y otro mapa que representa la localización de pinos, el mapa resultante sería aquellas celdas donde coinciden pinos y suelo urbanizable. En el segundo caso se busca áreas donde se cumplan alguna de las dos condiciones.
En la superposición aritmética se combinan dos capas, celda a celda, utilizando una operación aritmética (suma, resta, división, etc.).

[19] Gutiérrez Puebla y Gould, 1994.

ADD	Primera imagen más la segunda
SUBTRACT	Primera imagen menos la segunda
MULTIPLY	Primera imagen por la segunda
RATIO	Primera imagen dividida por la segunda
NORMALIZED RATIO	Primera menos segunda dividida de la suma de primera y segunda
EXPONENTIATE	Primera imagen elevada a la segunda
COVER	La primera cubre la segunda excepto cuando el valor sea cero
MINIMUM	El valor mínimo de la primera o segunda imagen
MAXIMUN	El valor máximo de la primera o segunda imagen

Tabla I.6. Operaciones comunes de sobreposición

I.6.1.1.4. Vecindad.

Es aquel análisis por el cual el resultado está en función del valor de celdas relacionadas, ya sea por cercanía inmediata o por otro tipo de relaciones. Así podemos hablar de análisis de *vecindad inmediata y operaciones de vecindad extendida*[20].

El *análisis de vecindad inmediata* se realiza a partir de los valores de las celdas contiguas a la celda analizada. Por tanto el resultado de cada celda del nuevo mapa vendrá en función de sus celdas contiguas en el mapa base. Existen varias formas de análisis de vecindad inmediata, dos de los más importantes son el filtrado de mapas y las pendientes.

El filtrado de mapas consiste en tomar un grupo de celdas, usualmente 3 por 3, y se establece el valor de la celda central. Normalmente el valor suele ser la media ponderada de los valores de todas las celdas analizadas. Dependiendo la ponderación que utilicemos dará dos efectos distintos: suavizado o realce.

Cuando el atributo de las celdas es la altitud es posible, de forma automática, conseguir los valores de pendientes y orientación. De nuevo se utiliza también

[20] Gutiérrez Puebla y Gould, 1994.

grupo de celdas de tres por tres.

El *análisis de vecindad extendida* consiste en operaciones que relacionan a una celda con celdas que no tienen porque estar contigua. Su base está en el cálculo de distancia, sea euclidiana o de superficie de fricción. Existen diversos tipos de análisis según sea utilizando uno u otro cálculo de distancia. Aquí sólo nos vamos a referir al análisis de proximidad o más conocido como *Buffer*. Es un sencillo cálculo por el cual se hallan las celdas que se localizan a una determinada distancia de otra celda o un conjunto de ellas.

I.6.1.2. Análisis vectorial.

De igual forma que en el modelo *raster* los SIG vectoriales ofrecen diferentes posibilidades para realizar análisis espacial. Su potencialidad y características están en función del tipo de elementos geográficos que vayamos a analizar. La configuración de este modelo lo hace más compatible con cierto tipo de análisis, y además nos hace identificar claramente elementos geográficos con determinada tipología analítica. Así, si hablamos de superposición pensamos en polígonos y si nos referimos a análisis de redes es seguro que lo asociamos a líneas.

I.6.1.2.1. Mediciones e identificación de elementos.

El sistema vectorial al localizar a los objetos espaciales por sus límites utilizando coordenadas geográficas le resulta muy sencillo medir distancias euclidianas tanto entre distintos objetos como dentro de un mismo elemento. De esta forma se puede medir, en algunos casos el programa nos lo da de forma automática mediante la construcción de topología, en las líneas su longitud y en los polígonos el área y el perímetro. Por otro lado es también muy fácil acceder a la información de distancias entre objetos sean del tipo que sean.
Otras de las posibilidades es atacar a la base de dato de atributos relacionada con la gráfica para obtener información sobre un elemento concreto. Esto en la

mayor parte de los programas se puede hacer de forma interactiva a través de pantalla o accediendo a la base de datos tabular o de atributos.

I.6.1.2.2. Análisis de proximidad.

Como ya vimos en el modelo *raster*, el análisis de proximidad es quizás uno de los más típicos de los sistemas de información geográfica[21]. La acción que refleja este análisis es lo que denominamos *buffer* (Figura I.15.).

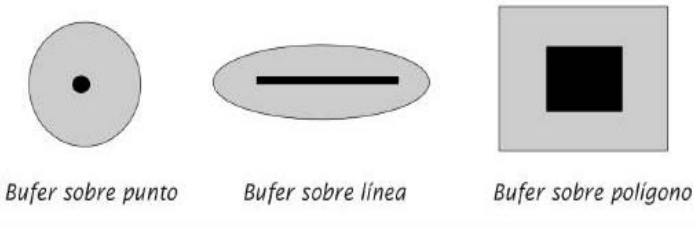


Figura I.15. Buffer en el modelo vectorial

Con este análisis se consigue delimitar un área próxima al objeto seleccionado que esté a menos de una distancia determinada. Dicha operación se puede realizar sobre punto, línea o polígonos. El resultado es siempre una nueva capa de información poligonal que incluye el nuevo *buffer*. La diferencia principal con el modelo *raster* es que en el caso vectorial estas áreas sólo pueden ser halladas a partir de la distancia euclidiana, aunque en el cálculo podemos incluir factores relativos a los atributos de los objetos geográficos.

I.6.1.2.3. Sobreposición.

En el modelo vectorial la sobreposición es una operación de mayor complejidad que requiere cálculos geométricos y topológicos para construir la capa de información resultante del análisis. De igual manera que en el *raster* la mayor parte de los programas SIG sólo son capaces de realizar superposiciones de dos en dos capas de información. Además es importante el orden de las capas según

[21] Gutiérrez Puebla y Gould, 1994.

cual sean los resultados que deseamos obtener. Uno de los factores que implican mayor dificultad en el modelo vectorial es la necesidad de trabajar con elementos geográficos distintos. Esto último añadido a lo anterior provoca que los resultados deban ser depurados con posterioridad al análisis pues se suele generar falsos objetos e incorrecciones provocadas por procesos anteriores.

Las principales y más utilizadas posibilidades de superposición entre elementos geográficos son: puntos con polígonos, líneas con polígonos y polígonos con polígonos. La capa resultante es siempre de la misma tipología de la primera introducida, donde las posibles modificaciones afectan tanto a los elementos gráficos como a los atributos temáticos. Las nuevas capas resultantes deben ser editadas y corregidas por ejemplo con la generalización de polígonos con similares atributos.

En la mayoría de los SIG vectoriales se presentan tres opciones: la unión de ambas capas, la intersección de los dos mapas y el corte de uno de los mapas basándonos en el otro. El proceso de generalización a través de atributos comunes se realiza a partir de la disolución de polígonos contiguos.

I.6.1.2.4. Análisis de redes

Es quizás en este tipo de análisis donde los programas vectoriales han desarrollado mayores capacidades. La estructura vectorial facilita y potencia este tipo de operaciones. Los objetos lineales pueden agruparse de diferentes formas: líneas aisladas, árboles y circuitos o redes (Bosque Sendra, 1992). Este último tipo de agrupación es la que permite un mayor nivel de análisis dentro los elementos geográficos lineales. Una red sería, según Bosque Sendra, “un sistema interconectado de elementos lineales que forman una estructura espacial por la que pueden pasar flujos de algún tipo (personas, mercancías, energía, información etc.)”. El análisis de redes se basa en la búsqueda de estos flujos y la posible predicción de los mismos.

Las dos operaciones más usadas son la búsqueda del camino mínimo y la red de influencia de lugares centrales. Con el primero de ellos conseguimos calcular el camino más corto para llegar de un punto a otro. Esta ruta más cercana puede

estar medida en distancia euclidiana o la suma de ésta a otro factor que se tome como impedancia[22]. Esta impedancia puede estar asociada a dos de los elementos de una línea: los arcos y los nodos. En el segundo caso, la red de influencia, nuestro objetivo es encontrar todos los elementos de la red que se encuentra situados a una distancia máxima de un punto seleccionado. De nuevo es posible utilizar otras impedancias que no sean exclusivamente la euclidiana.

I.6.2. Las nuevas perspectivas del análisis espacial a través de los SIG

Las nuevas líneas de investigación nos hacen pensar que en los próximos años la capacidad de los SIG para el análisis espacial va a crecer exponencialmente. Posiblemente se mejorarán y perfeccionarán las actuales, y es seguro que aparecerán otras nuevas.

Una de estas nuevas técnicas es el uso de Redes Neuronales[23]. Apartándonos de los aspectos matemáticos y telemáticos que sobrepasan la temática de este trabajo, lo interesante de esta nueva técnica es su capacidad de aprendizaje y por tanto de generar información que no se ha introducido de forma explícita. Las redes neuronales deben reforzar las técnicas que ayudan a resolver los problemas de optimización, predicción, aproximación de funcionamiento, clasificación, reconocimiento de patrones, identificación de objetos en imágenes satélites, etc.

[22] La impedancia sería una medida de resistencia al desplazamiento que se expresa de diversas maneras.

[23] Las redes neuronales artificiales "son un sistema de computación compuesto por un gran número de elementos de procesos simples, denominados nodos o neuronas, que procesan información por medio de su estado dinámico como respuesta a entradas externas" (Hilera González, J. R. 2000)

CAPÍTULO II

ASPECTOS CARTOGRÁFICOS BÁSICOS

II.1. Sistemas de referencia.

Para su estudio, la Tierra o sus diferentes regiones pueden ser representadas por medio de esferas terrestres, cartas geográficas o mapas y maquetas. Tomando en cuenta que la Tierra es sensiblemente esférica, los cuerpos que la representan deben ser sensiblemente esféricos.

Las esferas son cuerpos en cuya superficie se dibujan los paralelos, los meridianos, los contornos de los continentes, islas, mares u otros accidentes geográficos de importancia. Una representación esférica es, en suma, una muestra de cómo podríamos ver la Tierra si pudiéramos alejarnos lo suficiente de ella en un viaje por el espacio.

A pesar de las ventajas fundamentales que como representación geográfica ofrece la esfera, posee también algunas desventajas que dificultan su empleo:

- En la esfera no pueden verse los dos hemisferios al mismo tiempo.
- A menos que la esfera sea muy grande, contiene relativamente poca información, pues las áreas aparecen en tamaños muy reducidos.
- Aunque las esferas no sean muy grandes, su manejo resulta difícil. Los automovilistas, exploradores, turistas o aviadores, por ejemplo, no pueden utilizarlas mientras viajan.

Los adelantos cartográficos actuales están basados en investigaciones científicas; en el empleo de los últimos adelantos en la tecnología y el uso de aparatos de alta precisión; las fotografías aéreas, la fotogrametría, la fotointerpretación, el uso de imágenes de satélite y las nuevas metodologías en la elaboración de las cartas o mapas geográficos, dan al hombre un conocimiento más real del mundo en que vive.

Un mapa o carta es una representación total o parcial de la superficie curva de la Tierra sobre una superficie plana, casi siempre en una hoja de papel. Las cartas

geográficas representan, con la necesaria minuciosidad, los diversos accidentes geográficos; además su sencillo manejo y fácil transporte las hacen muy útiles.
La mayor desventaja que representan los mapas se debe a su naturaleza plana: una carta siempre contiene deformaciones, las cuales solamente en los mapas de áreas muy pequeñas carecen de importancia.

Las localizaciones geográficas las empleamos habitualmente para la ejecución de proyectos indispensables en la planeación y seguimiento de prácticamente cualquier área del conocimiento, entre las que podemos mencionar: Ingeniería Civil (municipal, vía de comunicación, hidráulica, etc.), Investigación y Preservación de Recursos Naturales, Ciencias de la Tierra (Geología, Geofísica, Minería, Agricultura, etc.), Oceanografía e Hidrografía, Estudios Socieconómicos, Planeación Urbana y Regional, entre otros.
A continuación se presenta de manera general aspectos básicos sobre los sistemas de referencia para el manejo de los datos geográficos.

II.1.1. Sistema cartesiano.

La identificación de este sistema de coordenadas, en su variante de dos dimensiones, puede ejemplificarse con el "juego del submarino" en donde para localizar el barco enemigo se dictan lecturas como C5 ó D6, donde la letra identifica la columna y el dígito el renglón. Este es el sistema cartesiano[24] bidimensional, en donde a la columna (letra) se le conoce como abscisa (x) y al renglón (dígito) como la ordenada (y). En matemáticas y cartografía ambos valores son numéricos, no obstante, la denominación en ésta última se modifica, designándose a la abscisa como Este (E) y a la ordenada como Norte (N). El orden en que se indican es generalmente E, N por lo que la identificación de un punto suele darse como *(x, y)*. Este sistema puede ser ampliado para incluir valores negativos (Figura II.1.).

[24] Nombrado así en honor de René Descartes (Renato Cartesium).

La ventaja de este sistema es que permite conocer mediante fórmulas sencillas valores de acimut[25], distancia y superficie.

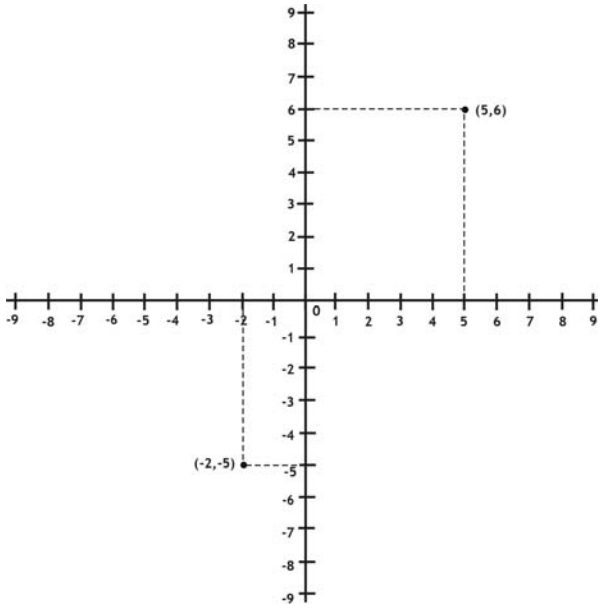


Figura II.1. Sistema cartesiano.

En el cálculo de distancias (Figura II.2.), se determina mediante la conocida expresión:

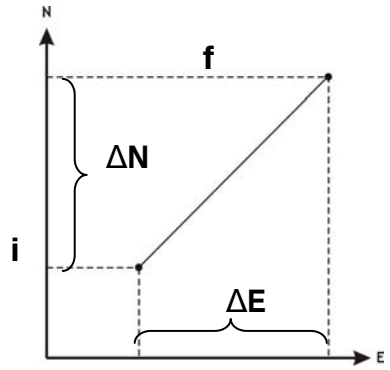
$$d = \sqrt{\left[\left(E_f - E_i\right)^2 + \left(N_f - N_i\right)^2\right]}$$

En donde:

$(E, N)_i$ = Coordenadas Este y Norte del punto inicial.

$(E, N)_f$ = Coordenadas Este y Norte del punto final.

[25] Acimut es el ángulo que forma una estrella u objeto, medida en grados desde una dirección que se toma como origen, medida sobre el horizonte del observador y en el sentido de las agujas del reloj u horario.



$\Delta N = N_f - N_i$

$\Delta E = E_f - E_i$

Figura II.2. Distancia en el Plano.

En lo referente al acimut, la fórmula para calcularlo es:

$$Az = \arctan\left(\frac{E_f - E_i}{N_f - N_i}\right) \qquad \text{Ec. II.2}$$

Finalmente, la superficie puede calcularse con las fórmulas:

$$Sup = \left|\frac{1}{2}\sum\left[N_{i+1} - N_i\right]\left[E_{i+1} - E_i\right]\right|$$

$$Sup = \left|\frac{1}{2}\sum Ni\left[E_{i+1} - E_{i-1}\right]\right| \qquad \text{Ec. II.3}$$

De todo lo anterior –y más- se han establecido metodologías y formatos para su cálculo manual, así como programas para su evaluación automatizada.

Los alcances de este sistema bidimensional se restringen a cálculos en el plano y por lo tanto no es factible la determinación de volúmenes. Para ello se agrega un tercer eje que en la Figura II.3 denotamos como *u*. Entonces, las coordenadas para este sistema de algún punto *A* son (*E, N, u*). Debe recordarse que la definición del sistema requiere como mínimo establecer el origen y la orientación de los ejes.

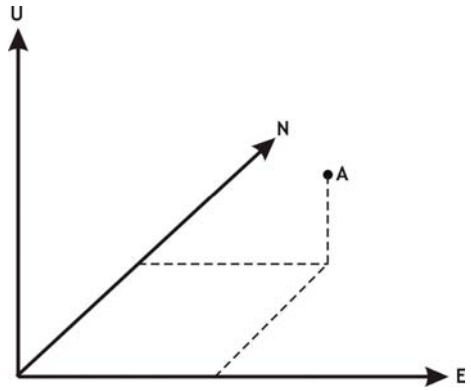


Figura II.3. Sistema cartesiano tridimensional.

Dependiendo de la ubicación, origen y orientación de los ejes se pueden definir una infinidad de sistemas, teniendo relevancia para este trabajo los relacionados con la referencia terrestre.

II.1.2. Sistema polar.

Este sistema fue concebido para ubicar un punto en forma diferencial a partir de coordenadas curvilíneas (Figura II.4.). Iniciemos con un sistema de referencia plano, tal como el sistema cartesiano bidimensional.

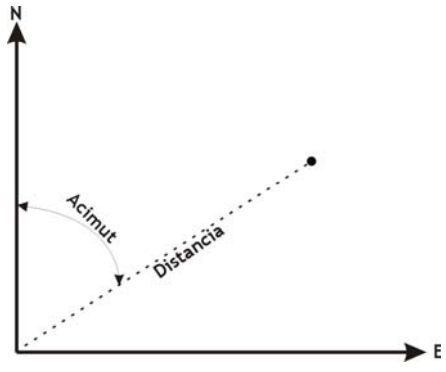


Figura II.4. Sistema polar bidimensional.

En el sistema polar la ubicación de un punto está dada en función de un ángulo y una distancia que en Topografía se conocen como *acimut y distancia* respectivamente. Análogamente al sistema cartesiano, se requiere modificar la definición original para manejar la ubicación de un punto en un espacio tridimensional, que en este caso se realiza mediante la inclusión de un segundo ángulo. En Geodesia[26] a los ángulos se les denomina *Latitud y Longitud* (Figura II.5).

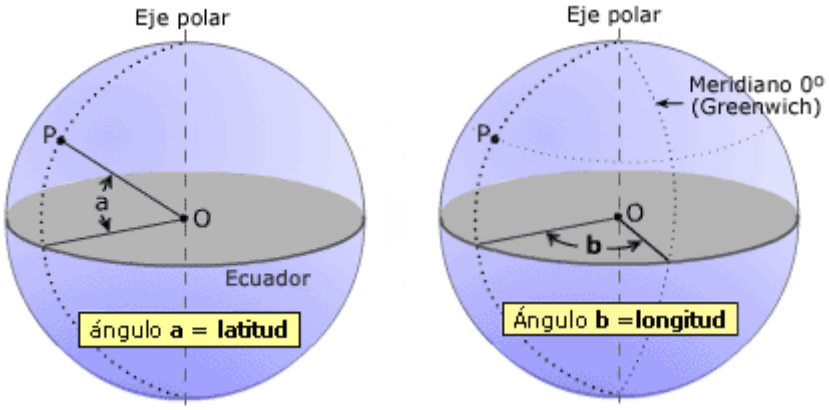


Figura II.5. Sistema polar tridimensional (Latitud y Longitud)

Como en el caso de los sistemas cartesianos, el sistema polar tridimensional queda completamente definido cuando se indica el origen y la orientación de los ejes. Internacionalmente se ha adoptado como planos de referencia el meridiano de Greenwich (como origen de las longitudes) y el Ecuador (como origen de las latitudes).

Convencionalmente la latitud se mide a partir del Ecuador hacia los polos, agregándose el sufijo N o S dependiendo del hemisferio. Se consideran como positivas las latitudes Norte y negativas las latitudes Sur.

Para las longitudes, la convención es medirlas de 0° a 360° hacia el Este, sin embargo, en el continente americano generalmente se usa la medición de 0° a 180° al Este y de 0° a 180° al Oeste, convención que seguiremos en este texto.

[26] Geodesia es la ciencia que estudia la forma, las dimensiones y el campo de gravedad externo de la Tierra.

Para este caso, se consideran como negativas las longitudes medidas hacia el Oeste del meridiano de Greenwich, aspecto que tienen implementado la mayoría de software cartográfico. Notar que para México las longitudes son negativas y las latitudes positivas.[27]

Ejemplo: Longitud 98° 24' 52'' W
Latitud 21° 45' 06'' N

II.1.3. Superficie topográfica.

Es la superficie natural del terreno, con todas sus ondulaciones que identificamos de manera física. Es el suelo que pisamos a diario (Figura II.6). Es evidente que la representación matemática de dicha superficie es altamente compleja, y de hecho, prácticamente imposible de utilizar.

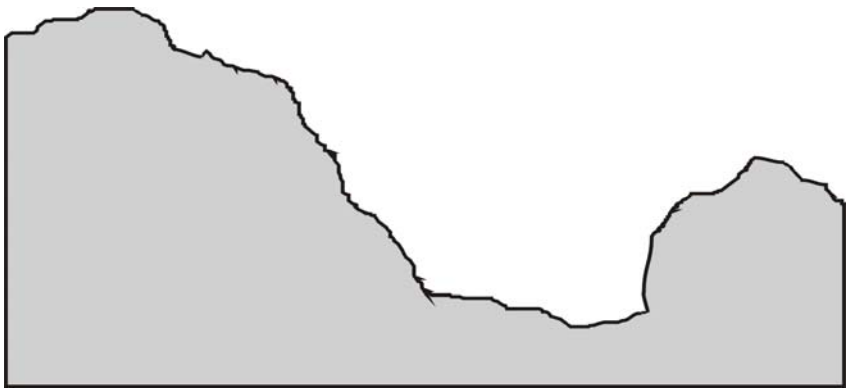


Figura II.6. Superficie Topográfica.

Para resolver esta situación, se ha creado otra figura más simple, que se conoce como *geoide*.

[27] En muchos programas de computación las notaciones para la longitud pueden omitir el signo negativo siempre y cuando se haga la referencia a longitud oeste (W).

II.1.4. Geoide.

Es la superficie teórica de la Tierra que une todos los puntos que tienen igual gravedad (Figura II.7.). La forma así creada supone la continuación por debajo de la superficie de los continentes, de la superficie de los océanos y mares, suponiendo la ausencia de mareas; con la superficie de los océanos en calma y sin ninguna perturbación exterior como la atracción de la Luna o la interacciones de todo el sistema solar.

Lejos de lo que se podría imaginar, esta superficie no es uniforme, sino que presenta una serie de irregularidades, causadas por la distinta composición mineral del interior de la Tierra y de sus distintas densidades, lo que implica que para cada punto de la superficie terrestre, exista una distancia distinta desde el centro de la Tierra a la superficie del geoide.

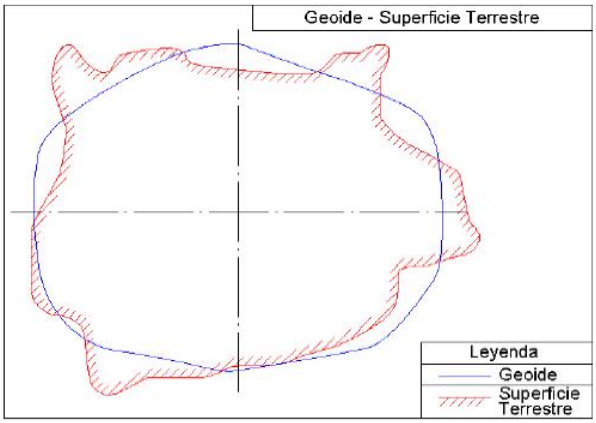
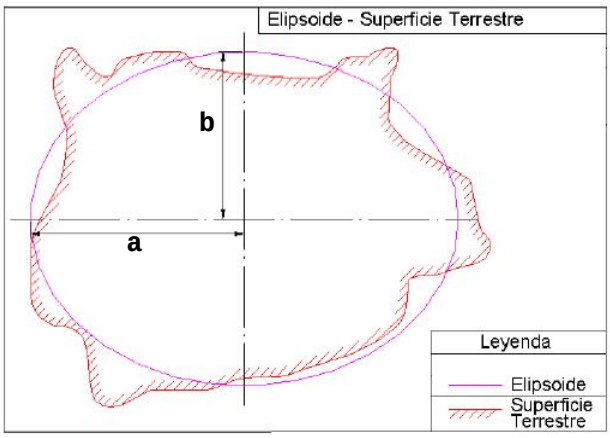


Figura II.7. Geoide-Superficie Terrestre

II.1.5. Elipsoide.

Como sabemos la Tierra no es exactamente redonda, su figura se asemeja a una naranja o a una esfera achatada por los polos y no existe una figura geométrica que la represente, debido fundamentalmente a las regularidades existentes.
Estas irregularidades de la Tierra son detectables y no extrapolables a todos los puntos, ya que no existe ningún modelo matemático que represente toda la superficie terrestre, por lo que cada continente, nación, etc., emplean un modelo matemático distinto de modo que se adapte mejor a la forma de la Tierra en la zona a cartografiar.

Este elemento de representación de la Tierra se le denomina elipsoide y es el resultado de revolucionar una elipse sobre su eje (Figura II.8.).



a – Semieje mayor
b – Semieje menor

Aplastamiento $\frac{1}{f} = 1 - \frac{b}{a}$

Figura II.8. Elipsoide-Superficie Terrestre.

II.1.6. Elipsoide comparado con el geoide.

La desigual distribución de la gravedad superficial y lo local de las perturbaciones, causan que existan zonas de la Tierra por encima de geoide y por debajo de éste (Figura II.9.).

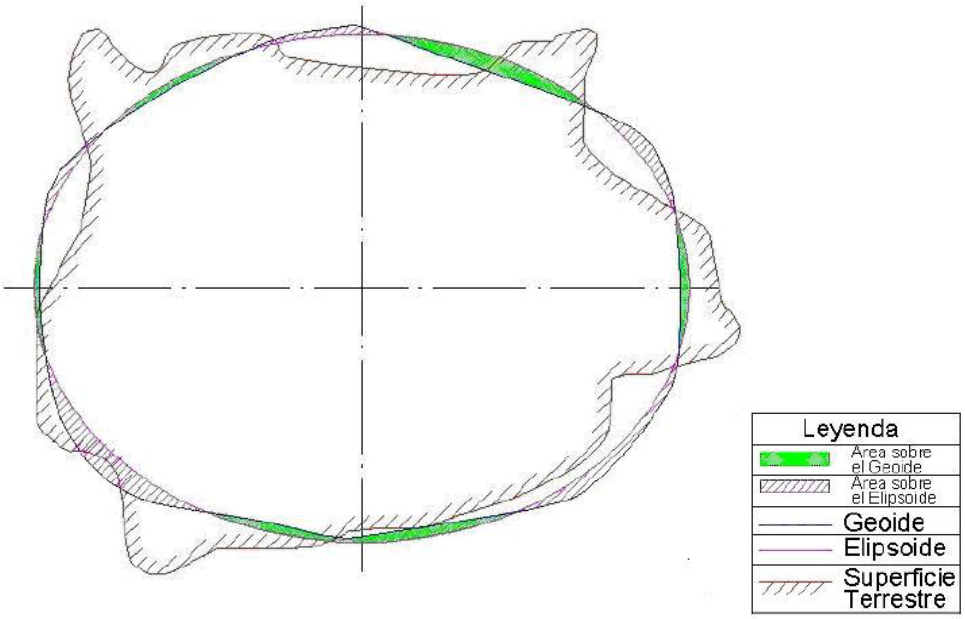


Figura II.9. Elipsoide-Geoide.

Estas diferencias gravitatorias son causadas por la composición terrestre y la presencia de una gran masa de agua en los océanos, que causa una menor atracción y hace que por lo general, el geoide quede por encima del elipsoide en la zona continental y por debajo en la zona oceánica.

II.1.7. Datum.

Se define como el punto tangente al elipsoide y al geoide donde ambos son coincidentes (Figura II.10.).

Cada Datum está compuesto por:

- Un elipsoide definido por a, b, aplastamiento.
- Un punto llamado “fundamental” en el que el elipsoide y la Tierra son tangentes.

Este punto “fundamental” se define por su longitud y latitud, además del acimut de una dirección con origen en el punto fundamental. Esta desviación tiene su

denominación como *desviación en la vertical*[28] *(Eta)* y *desviación en el meridiano*[29] *(Xi)*.

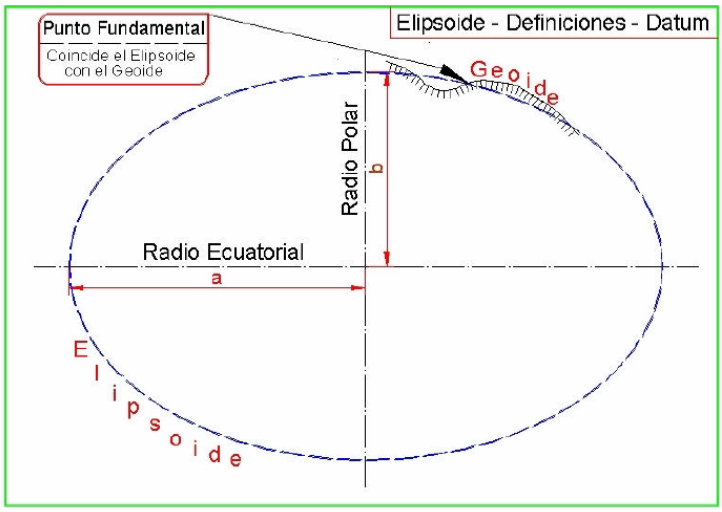


Figura II.10. Datum de referencia.

Elipsoide	Datum	Época
GRS-80 (Geodetic Reference System)	ITRF-92 (International Terrestrial Reference Frame)	1992
WGS-84 (World Geodetic System)	WGS-84	1984
Clarke-66	NAD-27 (North American Datum)	1866

Tabla II.1. Los tres diferentes sistemas más usados en México.

[28] Se da al no coincidir la vertical en el geoide y la vertical en el elipsoide, no pasando la perpendicular al elipsoide por el centro de la elipse de revolución que genera al elipsoide. Se da en grados.
[29] La desviación sobre la vertical hace que la latitud, al realizar su medición angular, no pase por el centro del elipsoide, originando un punto ficticio que puede no estar situado en el eje Polo Norte – Polo Sur. Igualmente se da en grados.

II.2. Proyecciones cartográficas.

Llama la atención el que se requiera todo un estudio científico para algo tan simple como la representación de la superficie elipsoidal. Esto tiene parte de su explicación si se intenta desarrollar la superficie de una esfera a un plano o viceversa (construir una esfera con una hoja de papel). El ejemplo clásico de esto es tratar de convertir la cáscara de una naranja en una superficie plana sin romper ésta (sabemos que no es posible). Lo mismo ocurre con la representación de la superficie terrestre (en nuestro caso el elipsoide de revolución) en un plano (Figura II.11.), ya que por cuidadoso que sea el tratamiento de la información, siempre se introducirá un tipo de distorsión. Para poder realizar la transformación de la superficie terrestre a un plano, los cartógrafos se auxilian de las proyecciones cartográficas, esto es, de los métodos para transferir la Tierra a un plano.

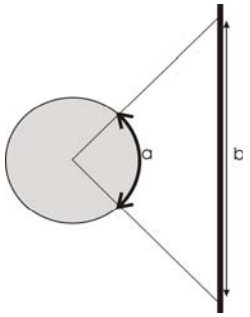


Figura II.11. Efectos de una proyección

Si revisamos la Figura II.11 notaremos que la información contenida en el arco *a* se proyecta en el plano como el segmento *b*, en cuanto a la longitud tenemos que $a < b$, es decir, la información de *b* es una representación exagerada de *a*. Podemos expresar esto de la manera $a = vb$, donde *v* es el factor de variación. Sin embrago, el problema es reducir al máximo esta distorsión. Del análisis de la misma figura podemos decir que la distorsión se reduce si el plano cartográfico es tangente a la esfera. En los puntos de tangencia la distorsión no existe y la

unión de dichos puntos define las líneas de escala verdadera. Otra alternativa es que el plano sea secante con el efecto de que el factor de variación sea menor. La distorsión que caracteriza a las proyecciones es uno de los diferentes métodos para su clasificación.

II.2.1. Clasificación por tipo de propiedades.

Como hemos mencionado existen distorsiones que se generan al proyectar el elipsoide de revolución –o la esfera en su caso- en un plano, y una forma de clasificar las proyecciones es por la propiedad que conservan.

II.2.1.1. Proyecciones equivalentes.

Se conservan las superficies del área representada, lo que obliga a la deformación tanto de las distancias como de los ángulos. Para conseguir la equivalencia el factor de escala debe ser inversamente proporcional al factor de escala de los paralelos:

$$K = \frac{1}{h} \qquad \text{Ec. II.4}$$

Al afectar de esta manera las coordenadas el valor de la superficie se conserva, no así el de distancias que se deforman dependiendo de su orientación.

II.2.1.2. Proyecciones equidistantes.

Las distancias entre los puntos se conservan sin deformación, es decir, el factor de escala es igual a la unidad:
k = 1, para la conservación de las distancias en los paralelos.
h = 1, para la conservación de las distancias en los meridianos.
Sin embargo, a diferencia de otras proyecciones, la conservación de esta propiedad no se presenta para todos los puntos de todo el plano ($k \neq h$),

generalmente se cumple el principio de equidistancia para ciertas líneas base de la proyección.

II.2.1.3. Proyecciones conformes.

La característica principal es la conservación diferencial de los ángulos, característica que puede identificarse al observar que las líneas de la gradícula[30] se intersectan a 90° aún a costa de distorsionar las líneas que unen dos puntos. Esta distorsión hace que la superficie de cualquier polígono se distorsione.
No existe ninguna proyección conforme que mantenga la característica de conservación diferencial de ángulos en todo el globo terráqueo. Esta propiedad no implica la conservación de acimut o rumbo[31].
En cuanto a los factores, la condición de conformalidad se cumple cuando $h = k$.

II.2.1.4. Proyecciones afilácticas.

No se conserva ninguna de las propiedades anteriores, es decir, se deforman ángulos, áreas y distancias. Son ampliamente utilizadas para representar el globo terráqueo, continentes completos o para propósitos especiales.

II.2.2. Clasificación por tipo de superficie.

Otra manera de clasificar las proyecciones es por tipo de superficie utilizada. Se puede decir que por lo general se utilizan como superficie de representación, el plano, el cono, el cilindro, entre otras.

[30] Gradícula es la red de meridianos y paralelos.
[31] Rumbo es la dirección en la que nos movemos o navegamos, o en la cual nos dirigimos o miramos y suele expresarse en forma del ángulo que forma esta dirección con otra tomada como referencia. Según que esta dirección de referencia sea el meridiano terrestre que pasa por la posición en la que nos encontramos o la dirección en que señala la brújula magnética hablaremos de *rumbo magnético* o de *rumbo geográfico*.

II.2.2.1. Proyecciones planas.

Son aquellas donde la superficie de referencia es un plano. En este caso existe una subclasificación de acuerdo al punto de vista de la proyección. Los factores de escala del paralelo y del meridiano no son fáciles de determinar.

Gnomónicas. Tienen como punto de vista el centro de la Tierra (Figura II.12.). Los meridianos forman líneas rectas, en tanto que los paralelos aparecen como curvas.

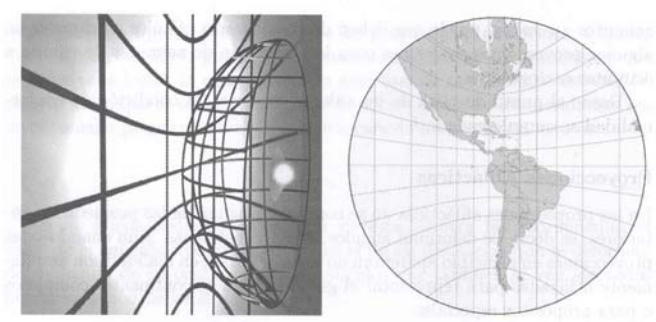


Figura II.12. Punto de vista de la proyección gnomónica

Estereográficas. Tienen como puntos de vista el punto diametral opuesto al punto de tangencia o antípoda (Figura II.13.). Los meridianos y los paralelos forman curvas.

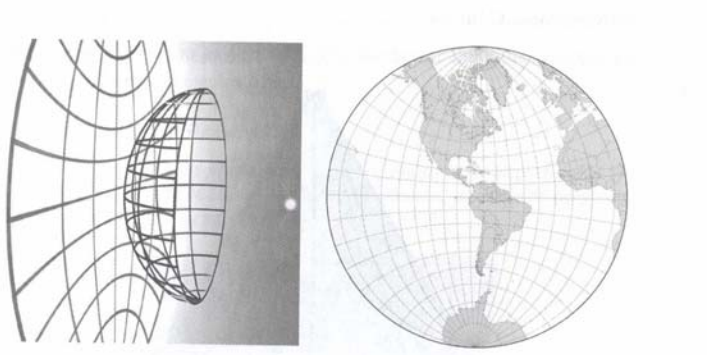


Figura II.13. Punto de vista de la proyección estereográfica.

Ortográficas. Son proyecciones acimutales que tiene como punto de vista el infinito (Figura II.14.). Los meridianos forman curvas, en tanto que los paralelos forman líneas rectas.

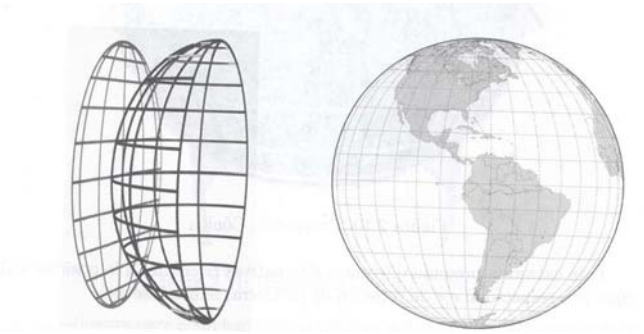


Figura II.14. Punto de vista de la proyección ortográfica

II.2.2.2. Proyecciones cónicas.

Son aquellas en donde la superficie de referencia es un cono (figuras II.15. y II.16). Esta categoría presenta diferentes alternativas referentes a la posición del cono con respecto al eje de rotación de la Tierra.

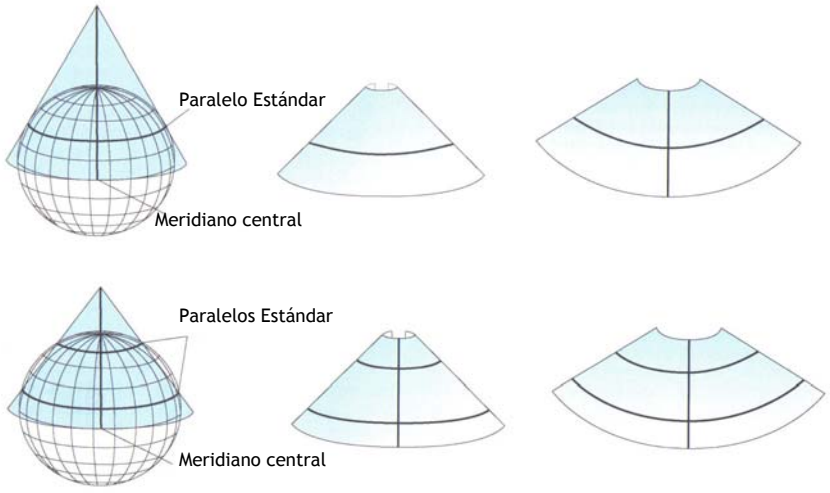


Figura II.15. Representación de la proyección cónica.

Normales. Cuando el eje de simetría del cuerpo de referencia es coincidente con el eje de rotación de la Tierra.

Transversas. Cuando el eje de simetría del cuerpo de referencia forma un ángulo recto con respecto al eje de rotación de la Tierra.

Oblicuas. Cuando no se cumple ninguno de los dos casos anteriores.

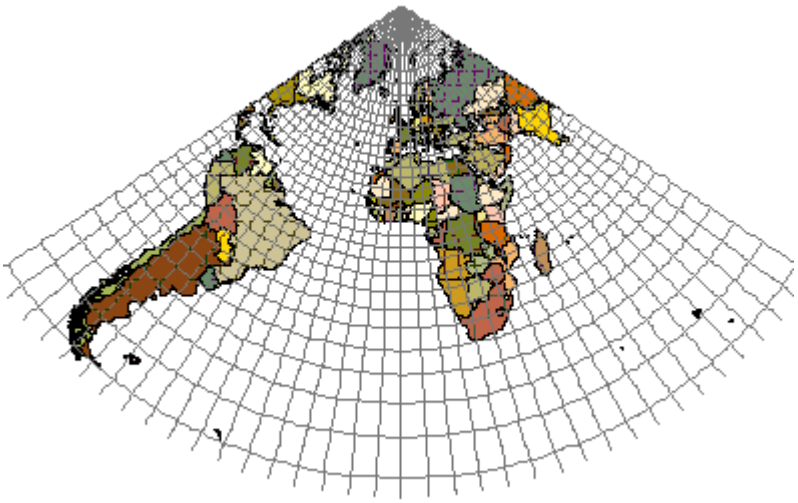


Figura II.16. Proyección cónica.

II.2.2.3. Proyecciones cilíndricas.

Son las que utilizan al cilindro como superficie de proyección. Similarmente a las cónicas, este tipo de proyección puede ser secante o tangente (Figura II.17.).
Para su definición se debe considerar la posición de la superficie de referencia con respecto al eje de rotación de la Tierra, por lo que su clasificación es exactamente igual que el caso de las cónicas: *normales, transversas y oblicuas*

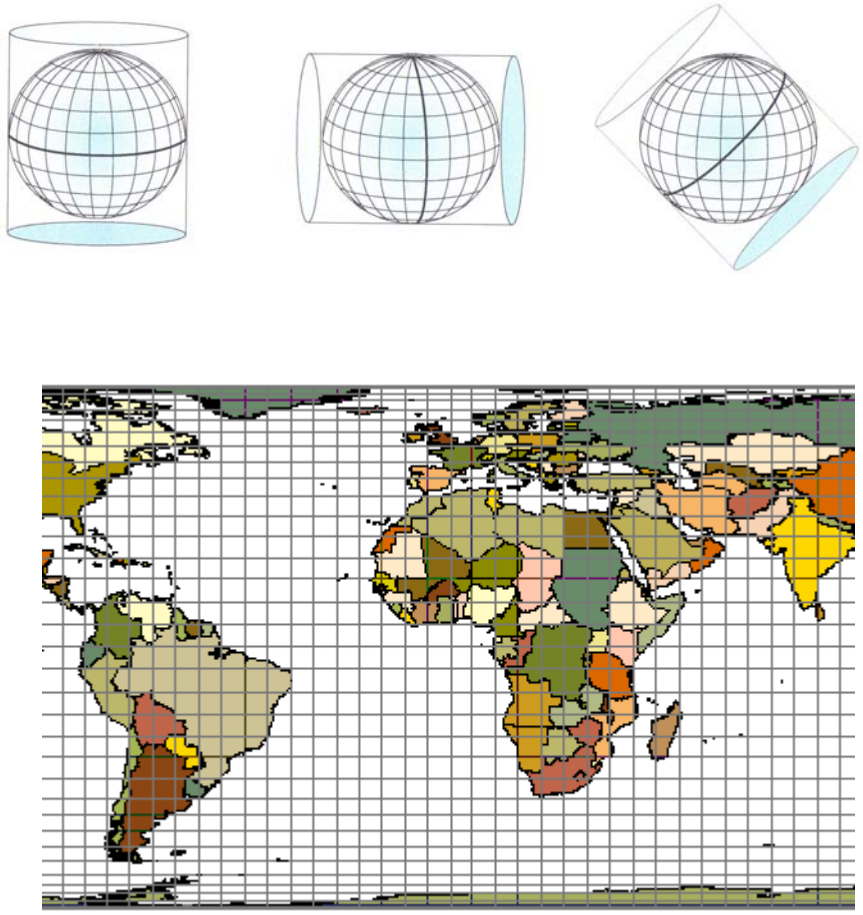


Figura II.17. Proyecciones cilíndricas.

La Tabla II.2. muestra algunos ejemplos de proyecciones con algunas aplicaciones y características.

Por su relevancia en el presente trabajo, se describirá la proyección Universal Transversa de Mercator, la cual es utilizada en la mayoría de la cartografía presentada en el desarrollo del tema central.

Proyección	Clasificación	Aplicaciones	Características
Albers	Cónica Equivalente	Mapas generales y geográficos	Preserva área
			Garantiza la precisión de la escala
			Sustituye con ventajas todas las otras cónicas equivalentes
Bipolar	Cónica Conforme	Indicada para base cartográfica confiable del continente americano	Preserva ángulos
			Es una adaptación de la Cónica de Lambert
Cilíndrica Equidistante	Cilíndrica Equidistante	Mapa Mundi	Altera área
		Mapa en escala pequeña	Altera ángulos
		Trabajos computacionales	
Gauss	Cilíndrica Conforme	Cartas topográficas	Altera área (no obstante las distorsiones no pasan 0.5%)
		Cartografía básica en escalas media y grande	Preserva los ángulos
			Similar a la UTM con desfase de 3° de longitud entre los meridianos centrales
Estereográfica Polar	Plana Conforme	Cartografía de las regiones polares	Preserva ángulos
		Cartografía de la Luna, Marte y Mercurio	Provoca distorsiones de escala
Lambert	Cónica Conforme	Mapas generales y geográficos	Preserva ángulos
		Mapas militares	
		Cartas aeronáuticas del mundo	
Mercartor	Cilíndrica Conforme	Cartas náuticas	Preserva ángulos
		Mapas geológicos/magnéticos	Conserva la forma de pequeñas áreas.
		Mapas Mundi	
UTM	Cilíndrica Conforme	Cartografía básica en escalas medias y grandes	Preserva ángulos
		Cartas topográficas	Altera áreas (No obstante las distorsiones no sobrepasan el 0.5%)

Tabla II.2. Ejemplo de algunas proyecciones cartográficas.

II.2.3. Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM).

El sistema UTM está compuesto por sesenta zonas numeradas hacia el Este a partir del meridiano 180°, extendiéndose aproximadamente de la latitud 84° Norte a 80° Sur, estableciendo como permisible una sobreposición de 30' con la zona adyacente (Figura II.18.). El factor de escala en el meridiano central es de 0.9996; en la actualidad el 80% de las áreas continentales está cubierto con cartografía basada en modelos elipsoidales de la UTM.

Esta proyección se encuentra definida de la siguiente manera (figuras II.19. y II.20.):

- El mundo está cubierto por franjas (huso cartográfico) de 6° en longitud, con meridiano central a cada 3° del extremo de cada huso.

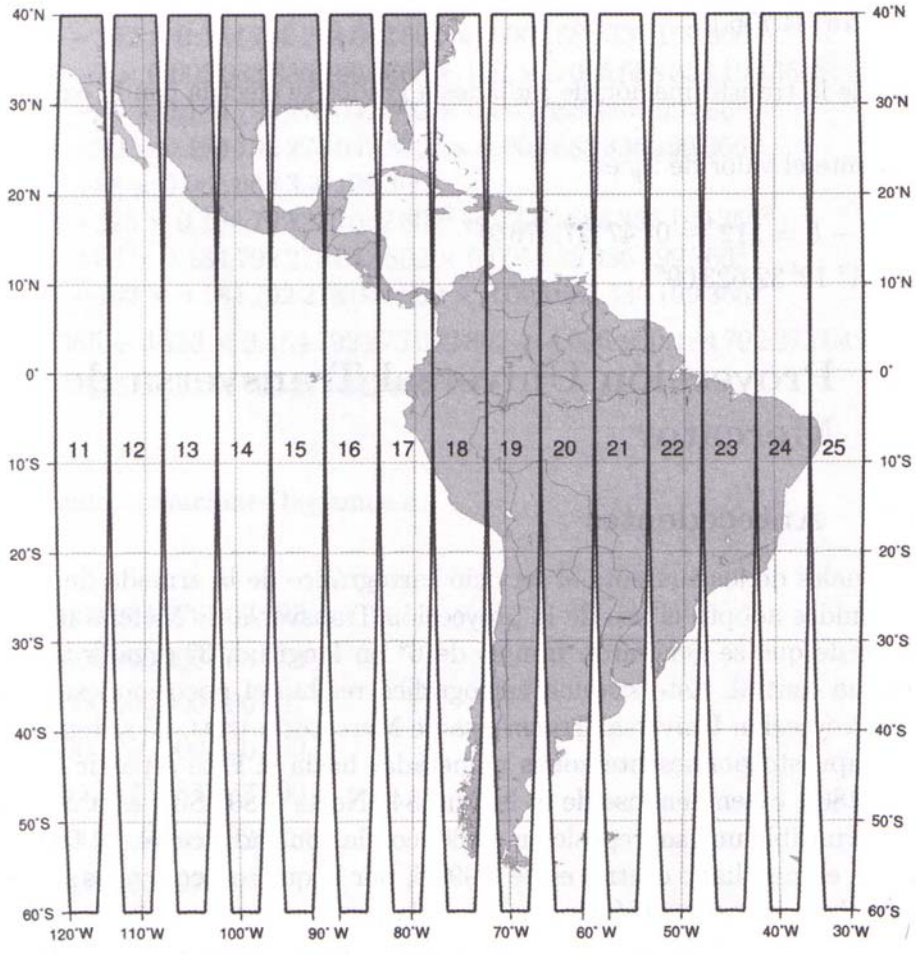


Figura II.18. Apariencia de la proyección UTM.

- Cada meridiano central tiene como Falso Este 500 000 metros.
- En el meridiano central el factor de escala es constante e igual a 0.9996
- El origen de las ordenadas es el Ecuador con valor 0 metros para latitudes Norte y de 10’000 000 metros para latitudes Sur[32].
- En el meridiano central la convergencia es constante.

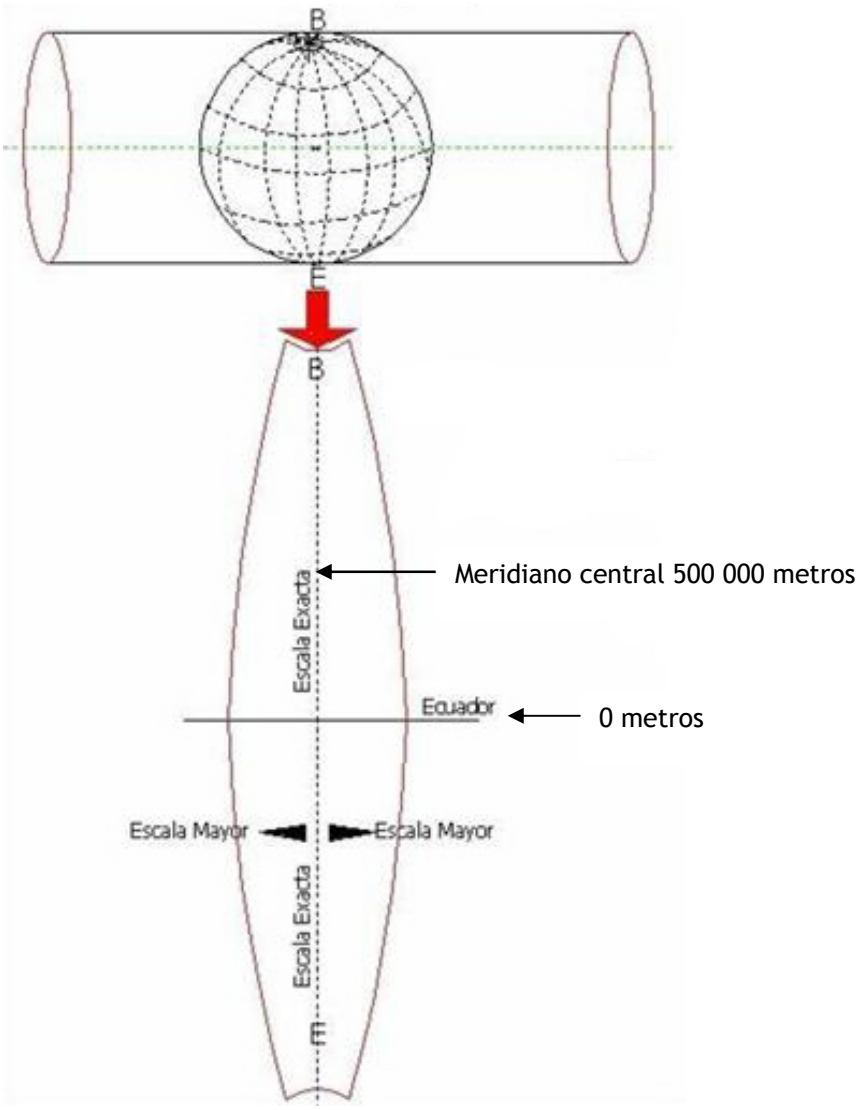


Figura II.19. Huso UTM.

[32] Toda vez que los valores de las ordenadas decrecen del Ecuador hacia el Sur, el valor de 10’000 000 es con la finalidad de no obtener valores negativos.

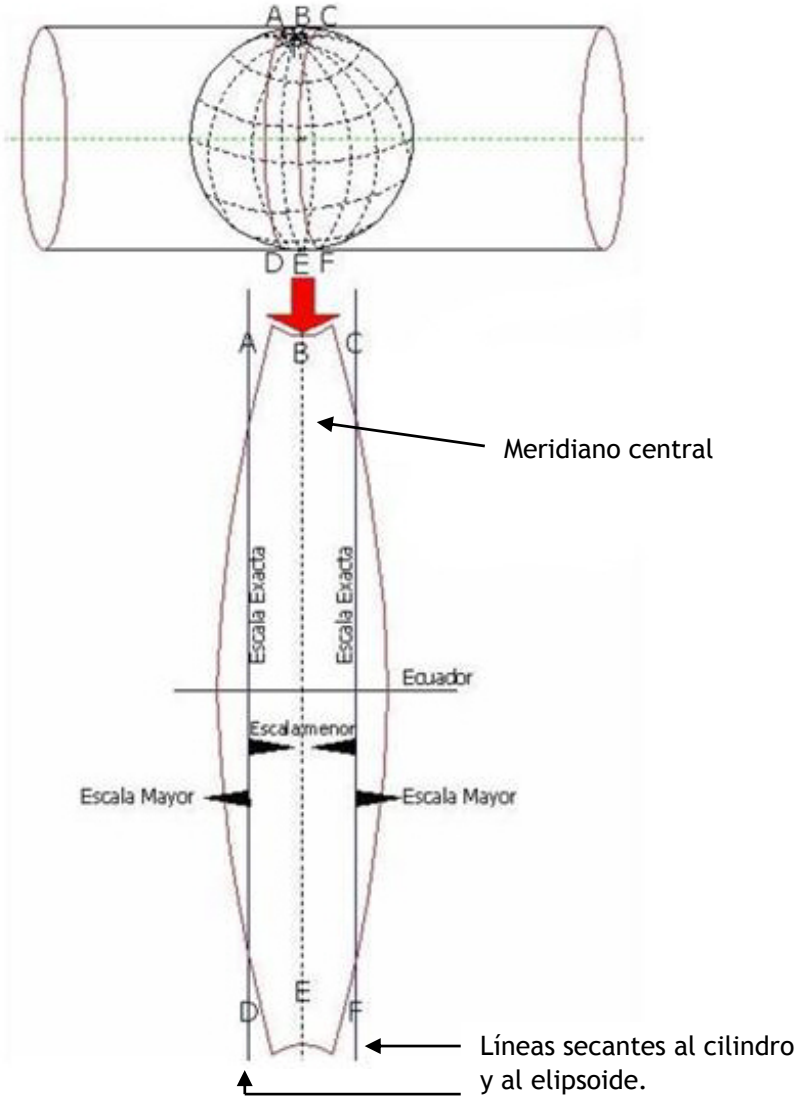


Figura II.20. Deformaciones mayores al alejarse del meridiano central y del Ecuador.

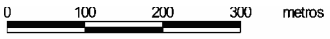
Las coordenadas UTM de un punto se determinan, mediante relaciones matemáticas, a partir de las coordenadas geográficas determinadas por el elipsoide. Por tanto, las coordenadas UTM son coordenadas cartesianas (x, y) correspondientes al plano que resulta al hacer la transformación de los puntos del elipsoide sobre una superficie desarrollable elegida que es el cilindro.

II.3. Escala cartográfica.

Podemos considerar el mapa como una imagen reducida del área que representa y, por ello, todas las medidas deben aparecer reducidas en la misma proporción. En los diferentes tipos de representación geográfica aparecen cifras que señalan el valor de la escala utilizada en su composición, por ejemplo: si al pie de un mapa se lee escala 1: 100 000, quiere decir que tiene una reducción a la cienmilésima parte de la superficie reproducida, o lo que es lo mismo, que una unidad de longitud en el mapa representa 100 000 unidades de longitud verdadera (por ejemplo metros).

La escala de los mapas puede ser representada de tres maneras (Figura II.21.):

- Mediante palabras y cifras: En el caso de que el mapa represente una reducción de 100 000 veces, hablando en unidades métricas, cada centímetro que aparezca en el mapa debe corresponder a un kilómetro en la realidad. En este caso la escala sería: 1 centímetro = 1 kilómetro.
- Mediante una representación gráfica: 0 1 2 3 4 5 kilómetros donde se está indicando gráficamente que cada centímetro en el mapa representa un número determinado de metros o kilómetros en el terreno.



Escala 1: 10, 000



Escala 1: 50, 000

Figura II.21. Representación gráfica de la escala.

- Mediante una fracción representativa: Fracción representada = 1 / 100 000 o también fracción representada = F.R. = 100 000 lo cual estaría significando que las distancias en el mapa multiplicadas por el denominador de la escala, constituyen las distancias reales sobre el terreno, expresadas en la misma unidad de medida empleada en el mapa. El numerador de la fracción representativa es siempre la unidad. Mientras mayor es el denominador, menor será la escala del mapa.

En un mapa construido a gran escala es posible incluir numerosos detalles, pero según disminuye la escala, menor es el número de datos que puede contener (Figura II.22.). Al entender el uso de la escala, se facilita conocer la distancia que separa un punto del otro representado en el mapa y a la vez calcular el tiempo de su recorrido.



$$\frac{\text{Distancia en mapa}}{\text{Distancia sobre terreno}} = \frac{2cm}{1Km} = \frac{2cm}{100000cm} = \frac{1}{50000}$$

Figura II.22. Obtención de escala cartográfica.

II.4. Nomenclatura de la cartografía digital e impresa del INEGI.

El sistema de claves y el formato de los mapas impresos y digitales están relacionados con el sistema de representación cartográfica llamado "proyección" empleado en el **INEGI** para los mapas en las escalas de 1:50 000 y 1:250 000, y en una serie de convenciones adoptadas para tal fin.

Como ha quedado establecido la UTM es una proyección cilíndrica, que en su desarrollo, genera 60 "zonas" (o husos) sucesivas para cubrir la totalidad del globo terrestre. Cada "zona" es de 6° de longitud por 80° de latitud al norte y al sur.

La numeración de las "zonas" es del 1 al 60 a partir del meridiano 180° hacia el Este. En particular, a México le corresponden las zonas 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16, que incluyen la Zona Económica Exclusiva.

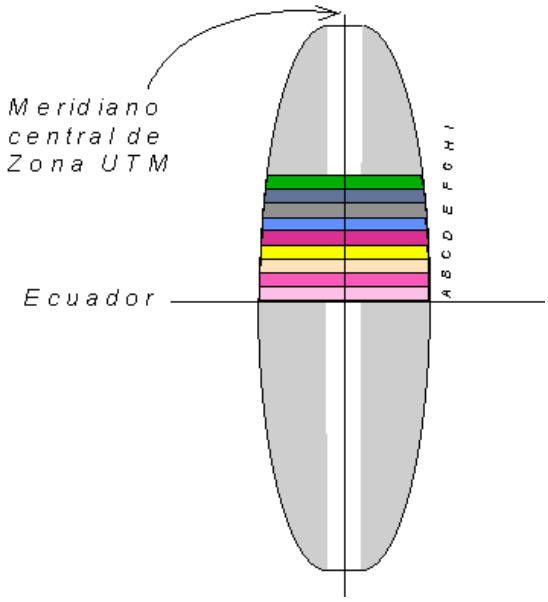


Figura II.23. Fajas cartográficas

Por convención, cada una de las zonas así definidas se divide en "fajas" transversales de 4° de latitud (de acuerdo con el Mapa Mundial escala

1:1’000,000), las cuales fueron identificadas con las letras del alfabeto, iniciando con la letra A para la primera "faja" a partir del Ecuador (Figura II.23.).
A México le corresponden las "fajas" D, E, F, G, H, e I.
Por lo tanto, se forman áreas de 4° de latitud por 6° de longitud, las cuales se identifican con la letra de la "faja" y los dígitos de la "zona" correspondientes.

II.4.1. Nomenclatura para la cartografía digital escala 1:1 000 000

Para los conjuntos de datos escala 1:1 000 000 con formato de 4° de latitud por 6° de longitud, la nomenclatura es la correspondiente a la letra de la "faja" y los dígitos de la "zona", ejemplo: **"G13"** (Figura II.24.).

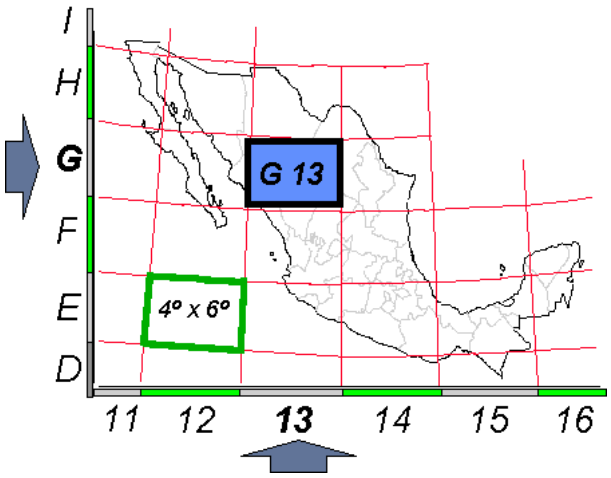


Figura II.24. Nomenclatura para la escala 1: 1 000 000

II.4.2. Nomenclatura para la cartografía digital escala 1: 250 000

Para obtener cada uno de los conjuntos de datos en escala 1:250 000 con formato de 1° de latitud por 2° de longitud, las áreas de 4° x 6° se dividen en 12 partes, cada una identificada con la clave de la "faja" y de la "zona", más el dígito

correspondiente del uno al doce, para así ubicar de manera única a cada conjunto, por ejemplo G1312 (Figura II.25.).

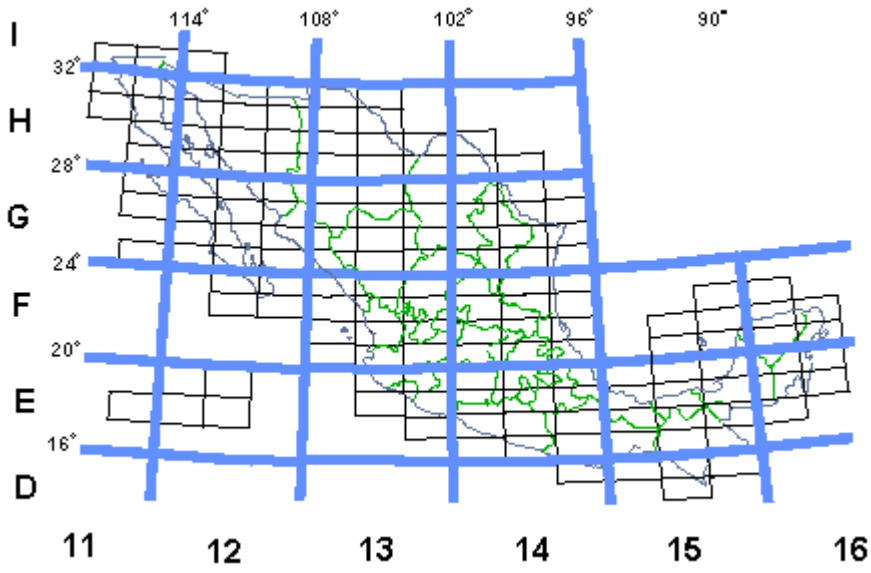


Figura II.25. Nomenclatura para la escala 1: 250 000

II.4.3. Nomenclatura para la cartografía digital escala 1:50 000

Para obtener los conjuntos de datos de la escala 1:50 000 debemos considerar los cuadrantes de la división para la escala 1:1 000 000 obtenidos a partir de las "fajas" de 4° de latitud y de las "zonas" UTM de 6° de longitud.
Cada cuadrante de 4° x 6° es subdividido en cuatro "sectores" iguales, por medio del meridiano central de cada "zona UTM" y del paralelo medio de cada "faja".

Los "sectores" obtenidos tienen un formato de 2° de latitud por 3° de longitud y se nombran **A, B, C, D,** con lo que cada "sector" se identifica de modo único, por ejemplo, **G13A, G13B, G13C, G13D** (Figura II.26.).

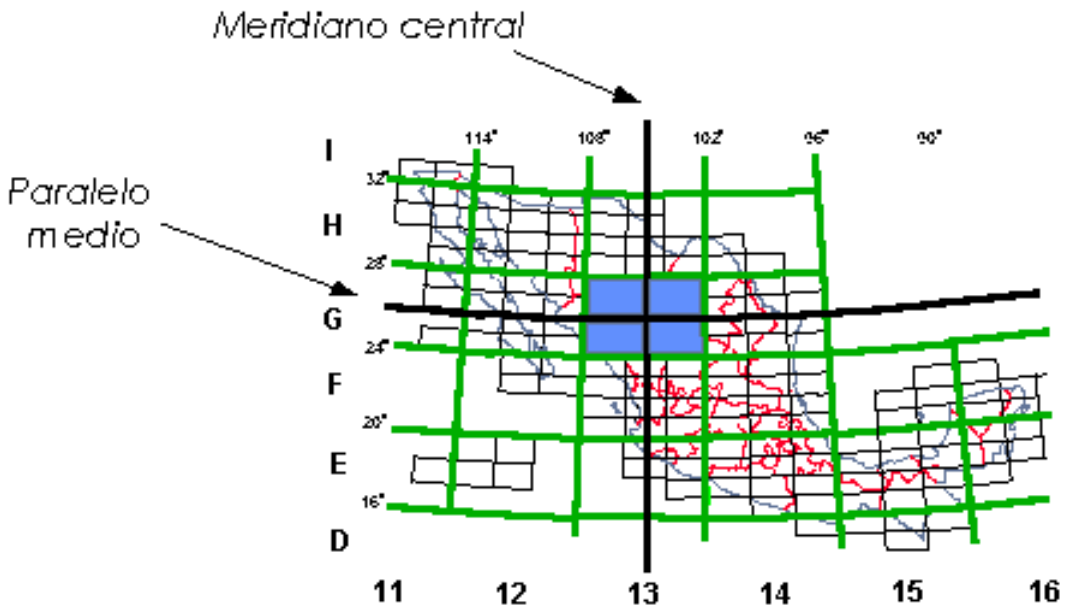


Figura II.26. Sectores de 2° X 3°

Cada uno de los "sectores" (como el G13D), se divide en 8 renglones de 15' de latitud y en 9 columnas de 20' de longitud. Por lo que los conjuntos de datos y los mapas impresos de escala 1:50 000 se presentan en formato de 15' de latitud por 20' de longitud (Figura II.27.).

Como parte de la nomenclatura, cada conjunto de datos y mapa impreso de la serie escala 1:50 000, lleva un par de números que los caracterizan. Estos pares se forman de la combinación de un dígito de renglón y de un dígito de columna (en ese orden).

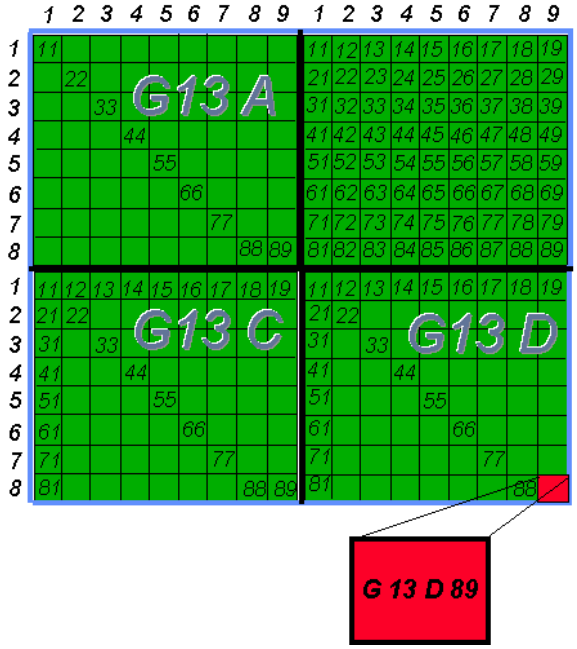


Figura II.27. Identificación de la cartografía escala 1:50 000

II.4.4. Nomenclatura para la cartografía digital escala 1:20 000

Los conjuntos de datos de escala 1:20 000 del INEGI presentan un formato de **7´30´´** de latitud por **6´ 40´´** de longitud, por lo que cada uno de los conjuntos de datos de escala 1:50 000 (como el G13D89), se subdivide en 6 cuadrángulos iguales denominados a, b, c, d, e, f. Por ejemplo, **G13D89f** (Figura II.28.)**.**

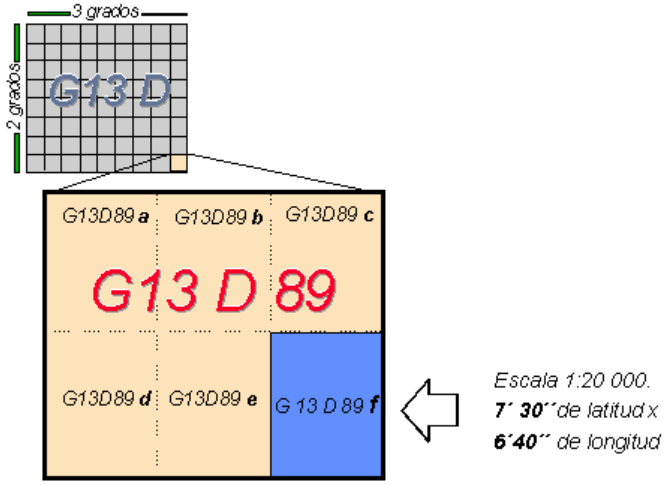


Figura II.28. Nomenclatura de la cartografía escala 1:20 000

II.4.5. Nomenclatura para la cartografía digital escalas mayores a 1:20 000

Se muestra gráficamente a través de la Figura II.29.

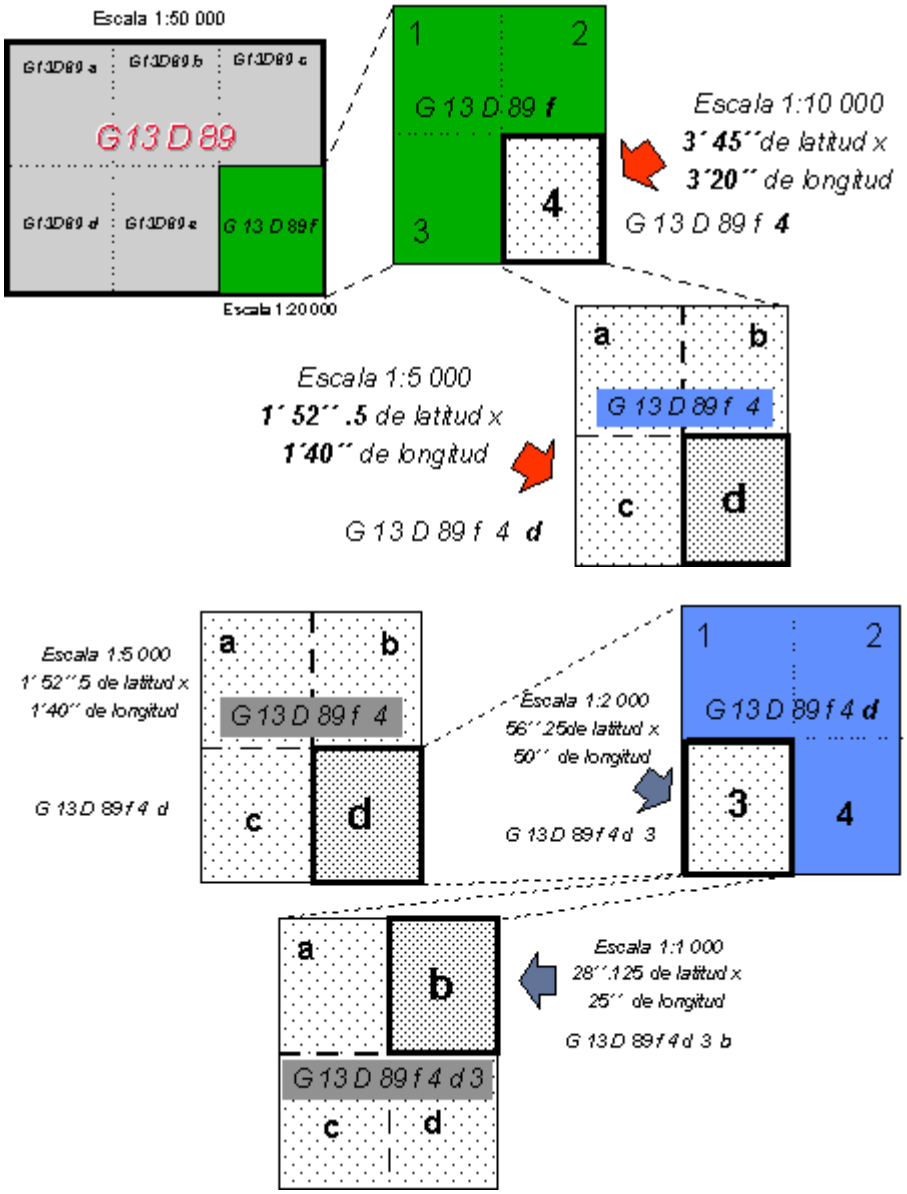


Figura II.29. Nomenclatura de la cartografía escalas mayores a 1:20 000

CAPÍTULO III

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

III.1. Situación actual.

Con base en el comportamiento de la sociedad en su conjunto, el INEGI a través del tiempo ha ido modificado sus procesos, así como su estructura organizacional con la finalidad de responder de mejor manera a una sociedad más demandante de información para la toma de decisiones.

De esta manera, el INEGI como dependencia de la Administración Pública Federal y en congruencia con las políticas de desarrollo del Ejecutivo Federal, donde se considera a la información como una herramienta indispensable para que los ciudadanos puedan expresar sus demandas, el INEGI entró en el año 2003 en un proceso de reconversión interna que le permita dar respuesta a lo anterior de una manera eficiente y sobre todo retomar su atribución y responsabilidad principal que se refiere a la coordinación de los Sistemas Nacionales Estadístico y de Información Geográfica, así como la Red Nacional de Información.

Lo anterior, implicó reestructurar sus áreas, con sustento jurídico en el Decreto de reforma al Reglamento Interior de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, situación que redunda en sus tres ámbitos operativos: *central, regional y estatal* (Figura III.1.).

Las Oficinas Centrales del INEGI se encuentran ubicadas en la ciudad de Aguascalientes, Ags., y es en donde se llevan a cabo principalmente las funciones de normar, generar metodologías y establecer las políticas de los procesos de trabajo.

Existen diez Direcciones Regionales a lo largo del país cuyas principales atribuciones son las de ejecutar, coordinar y supervisar los programas ajustándose a las disposiciones aplicables y a las normas, sistemas y procedimientos establecidos por las Direcciones Generales de Oficinas Centrales y de acuerdo con los lineamientos que al efecto dicte el presidente del INEGI.

Cada una de estas Direcciones Regionales está conformada por Coordinaciones Estatales teniendo éstas como atribuciones coordinar la operación de los procesos institucionales para la generación de información estadística y geográfica, de acuerdo a las normas establecidas por las Direcciones Generales y a las estrategias definidas por la Dirección Regional (Figura III.2.).

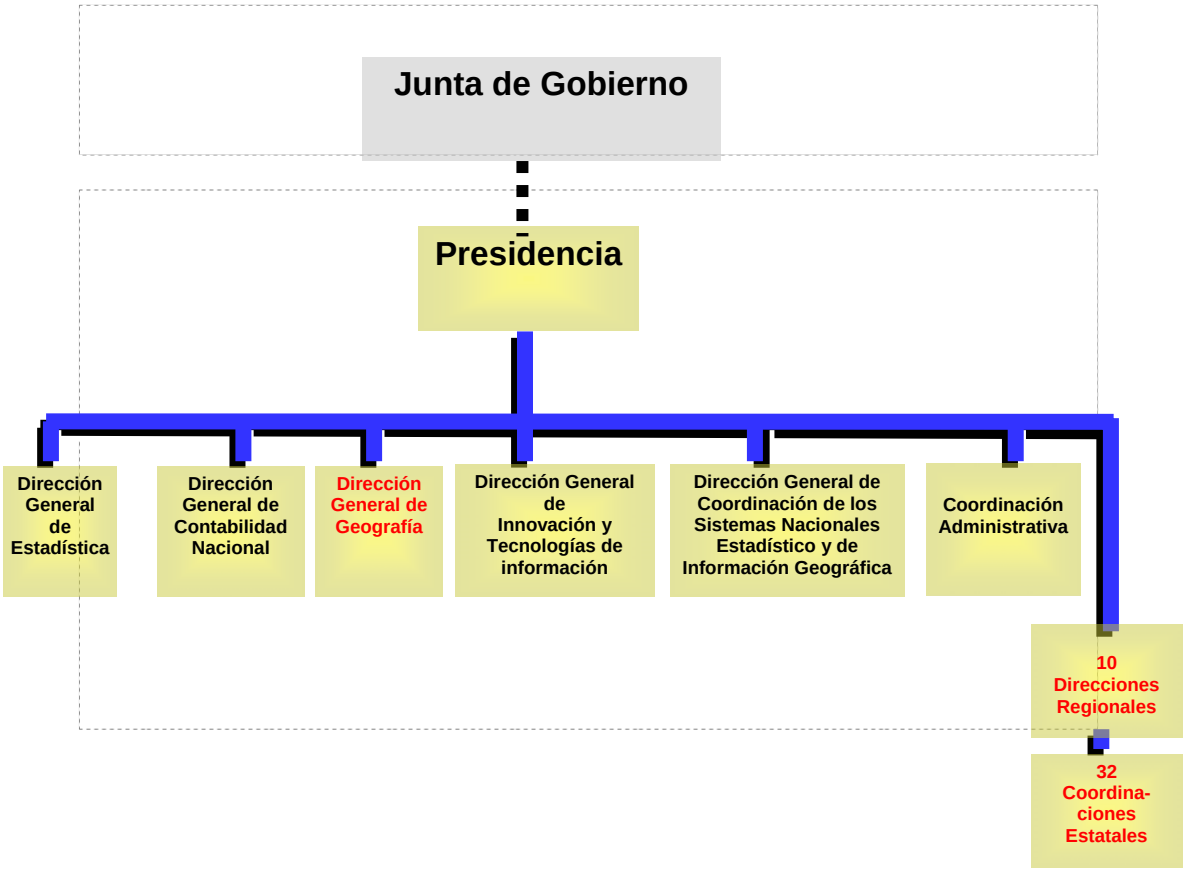


Figura III.1. Estructura organizacional del INEGI.

En el ámbito de la **Dirección de Geografía** de la **Dirección Regional Oriente,** se encuadra este trabajo, buscando permear a nivel nacional y también externamente al Instituto.



Figura III.2. Direcciones Regionales del INEGI.

La actividad geográfica en el ámbito nacional, es responsabilidad de la **Dirección General de Geografía** que forma parte de la estructura organizacional de las Oficinas Centrales y desde donde las Direcciones Regionales reciben las líneas de acción, procedimientos, normas, metodologías y presupuesto, en materia de proyectos del contexto geográfico.

La Dirección General de Geografía ha realizado diversos grados de cubrimiento cartográfico del país, cuya utilización en todos lo ámbitos ha sido muy demandada. A principios de los años noventa se migró la cartografía analógica que existía desde 1978. Este esfuerzo de digitalización consumió muchos años. Ante esto, se sientan las bases de carácter normativo conforme a las cuales se establecen acciones de integración de la información, como es el caso, entre otros, del modelo de datos vectoriales en donde los objetos reales se suponen inscritos en un sistema de coordenado, el cual permite determinar con precisión, su posición, dimensiones y el número de éstas, siendo entonces representados los

objetos mediante la especificación de los valores de las magnitudes de éstas; considerando las escalas cartográficas:

1:50 000, 1:250 000, 1:1 000 000 y 1:4 000 000.

Aún cuando el Instituto produce información raster, a la fecha no se cuenta con el mismo concepto del modelo vectorial para los datos raster, entre los que se encuentran las imágenes de satélite, los modelos digitales de elevación (MDE), ortofotos digitales, entre otros. Cabe aclarar que sí se cuenta con la documentación técnica de generación y/o uso en mayoría de los casos, sin embargo para las imágenes de satélite está orientada concretamente a los espaciomapas (ver apartado III.3).

En general, las imágenes de satélite disponibles internamente en el INEGI no son propiedad del Instituto, siendo adquiridas mediante convenios de cooperación para uso principalmente de carácter interno, lo cual no es privativo sólo del INEGI. Para el caso de las imágenes LandSat TM de principios de la década de los 90, fueron adquiridas directamente por el INEGI. Las imágenes LandSat ETM+ de principios de la década de los 2000, son propiedad del Inventario Forestal 2000, adquiridas por lo que era la SEMARNAP (hoy SEMARNAT) y fueron utilizadas por el Instituto de Geografía de la UNAM para la cartografía y evaluación de cambios. Éste último a indicaciones de la entonces SEMARNAP y como parte de los acuerdos de cooperación las proporcionó al INEGI.

Las restricciones legales de distribución de imágenes de satélite contribuyeron a que el uso y manejo de estos insumos, aún no sea del dominio general en nuestro país, muchas veces ni para fines académicos. Esto conlleva a que existan pocos documentos que de manera práctica expresen un método de integración, tratamiento y uso de tan importante producto; encontrando más en el campo de la aplicación en proyectos.

No obstante, en la actualidad ambos grupos de imágenes están disponibles de manera gratuita a través de Internet. Tal es el caso del sitio

http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml, "Global Land Cover Facility". La Universidad de Maryland en los Estados Unidos alberga este servidor de imágenes denominado ESDI (Earth Science Data Interface), que pertenece al programa GLCF (Global Land Cover Facility). Dicho programa, a su vez, forma parte de la ESIP de la NASA (Earth Science Information Partnership Federation), pensada para facilitar la difusión y desarrollo de imágenes de satélite de manera gratuita entre el personal especializado y el público general.

Así mismo, en el sitio http://www.landsat.org/ortho/index.htm, "Landsat.org (Global Orthorectified Landsat Data) Free Global Orthorectified Landsat", Landsat.org que es una filial de "The Tropical Rain Forest Information Center (TRFIC)", habilita un servidor con imágenes, poniéndolas a disposición de manera gratuita de acuerdo a tres épocas: 1970's MSS, 1990's TM, y 2000's ETM+.

En el presente trabajo se harán uso de las imágenes disponibles en INEGI, cuyas fuentes originales se citaron anteriormente.

A través de diversas experiencias de colaboración en proyectos tanto internos como externos al Instituto, ha quedado establecida la necesidad de contar de manera rápida con imágenes de satélite, cuya estructura ofrezca una fácil manipulación y se cuente con la documentación necesaria para su tratamiento digital.

Entre los proyectos más relevantes que en la Dirección Regional Oriente del INEGI (con sede en la ciudad de Puebla) se han realizado, se encuentran el Plan Puebla-Panamá (Meso-Región Sur-sureste de México); Ordenamiento Ecológico Izta-Popo en coordinación con el CUPREDER (BUAP); Pobreza y Medio Ambiente en colaboración con la Universidad Iberoamericana Campus Golfo Centro; Programa Estatal de Ordenación del Territorio Puebla, entre otros. En todos los casos se ha requerido de uso imágenes de satélite y principalmente de la generación de continuos de imágenes compuestas en RGB.

Resultado de lo antes expuesto se considera factible establecer como hipótesis básica que "*Contar con información geográfica estandarizada, así como con*

procedimientos y metodologías disponibles para su tratamiento digital, mejora la prestación de servicios, la formulación de planes, la ejecución de proyectos de desarrollo y la calidad de las decisiones para la observación y entendimiento de los fenómenos naturales y sociales".

Alcanzar estos supuestos implica, entre otros aspectos, contar con elementos que permitan el manejo de los datos centrales de este trabajo — imágenes de satélite —, bajo una base teórica fundamental y mediante el establecimiento de un procedimiento claro, que pueda ser evaluado y utilizado por los diferentes usuarios de la información.

Entonces, el objetivo principal de esta tesis es *"Generar un documento con aspectos teóricos y metodológicos para el tratamiento digital de imágenes de satélite LandSat TM y ETM+ en la generación de imágenes compuestas RGB, mediante el aprovechamiento del entorno científico y tecnológico; que sirva como herramienta para la obtención de insumos que permita atender las demandas de información de diversos usuarios, así como para coadyuvar en actividades académicas".*

III.2. Planteamiento.

Si bien, en diversas instituciones académicas, dependencias públicas y privadas, se utilizan Sistemas de Información Geográfica, haciendo uso de imágenes de satélite, cartografía analógica y digital, fotografías aéreas, entre otros; situación que con el desarrollo tecnológico actual, en el que los procesos son prácticamente transparentes para los usuarios, se ha dejado como aspecto secundario en la mayoría de los casos, los fundamentos teóricos; mismos que explican los resultados por inesperados que parezcan. Así las cosas, es importante considerar también las experiencias que dentro del INEGI se tienen en el uso y manejo de este tipo de insumos.

Este trabajo se centra en el tratamiento digital requerido para generar imágenes satelitales compuestas bajo el criterio RGB, partiendo de bandas de imágenes en tonos de gris de los satélites LandSat 5 TM 1993 y LandSat 7 ETM+ 2000. El proceso consiste en formar una nueva imagen sumando tres de las bandas, seleccionadas de acuerdo a un criterio deseado (resaltar ó diferenciar la vegetación, destacar bordes, realzar información sobre regiones de agua, entre otros), considerando el rango espectral de cada banda, el cual corresponde a segmentos del espectro electromagnético reflejado por la superficie (cubierta) terrestre y que es captado por el sensor instalado en el satélite. El resultado es una serie de imágenes (bandas) con valores digitales de un byte para un mismo cubrimiento territorial (escena), mismo que está determinado por un índice de cobertura territorial conocido como Path/Row (Figura III.3)

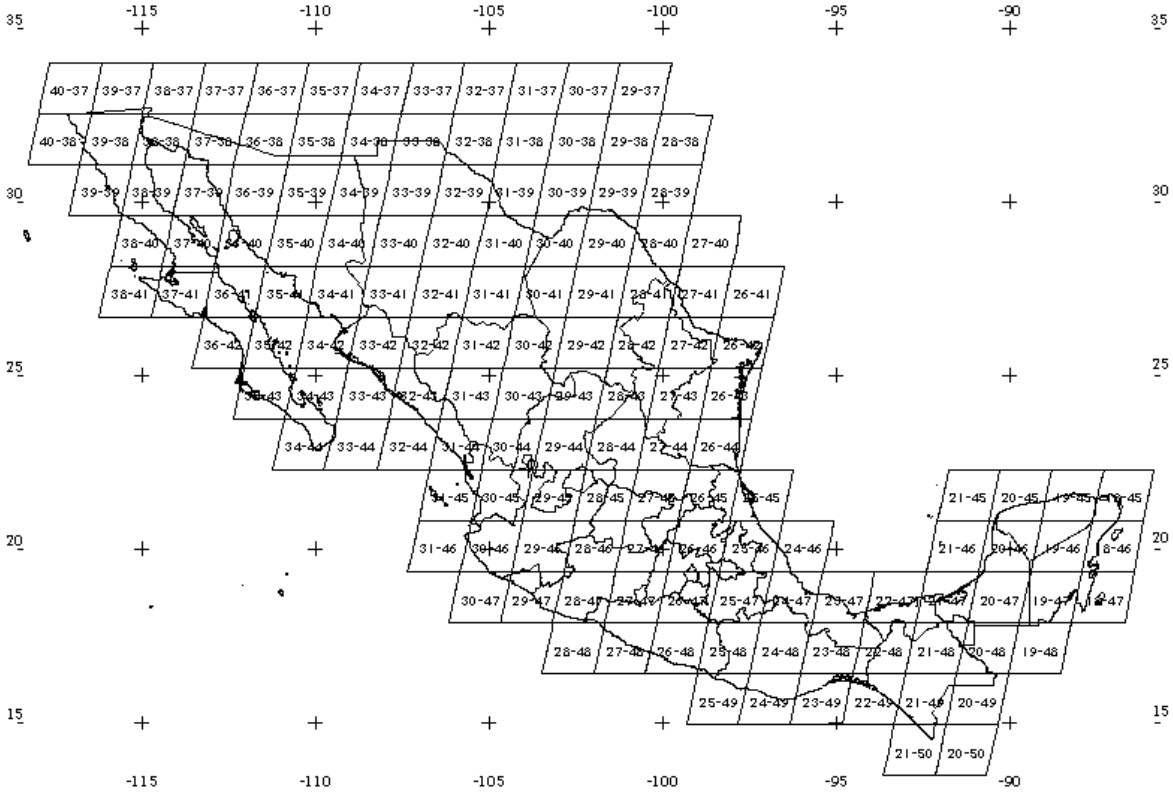


Figura III.3. Índice de escenas para el satélite LandSat.

Para este caso de estudio, la región territorial comprende una zona del centro del país cubriendo la totalidad del Estado de Puebla, lo que corresponde a 8 conjuntos de datos (2° X 1°) de imágenes de satélite (LandSat TM y ETM+) compuestas en RGB para la conformación de un continuo estatal de Puebla.
Una escena no necesariamente envuelve la zona de interés para los diferentes estudios, razón por la cual se realiza un proceso para contar con un continuo de imagen que abarque la región de un proyecto. Este proceso también es documentado en capítulos subsecuentes, junto con las implicaciones cartográficas que conlleva.
Finalmente es necesario establecer algunos ejemplos de la utilidad de estos insumos digitales y aprovechamiento dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

III.3. Técnica general.

Los espaciomapas son documentos hechos con base en imágenes de la Tierra obtenidas por percepción remota a una mayor de 705 kilómetros por un satélite, a los cuales se les agrega información cartográfica básica. El nombre del satélite es Landsat con un instrumento de registro de información a bordo llamado Mapeador Temático (TM por sus siglas en inglés derivadas de “Thematic Mapper”) o ETM+ “Enhanced Thematic Mapper”).

Se presentan con dos grados de longitud geográfica por un grado de latitud, para áreas correspondientes a aproximadamente 24000 Km^2 de territorio. Este formato es para las series de cartografía topográfica y temática, con los nombres y claves según la nomenclatura establecida en el INEGI.

Las imágenes de satélite son adquiridas en formato digital para ser procesadas en equipos de cómputo y hacer los ajustes necesarios de posición geográfica en una

etapa conocida como georreferencia[33]. Después, éstas se unen para formar un mosaico y obtener un área continua que permita *recortar* la parte de interés de cada espaciomapa (Figura III.4.). Lo anterior se debe a que una sola imagen no es suficiente para cubrir el formato cartográfico de 2° X 1°. Al mosaico obtenido se le somete a realce e igualación de tonos para destacar detalles de interés y obtener una imagen visualmente homogénea en la cual desaparecen las líneas de las uniones. Los espaciomapas se presentan en color ya que la información disponible de las imágenes digitales de los espaciomapas corresponde a reflectancia en diferentes longitudes de onda electromagnética de los objetos de la superficie de la Tierra.

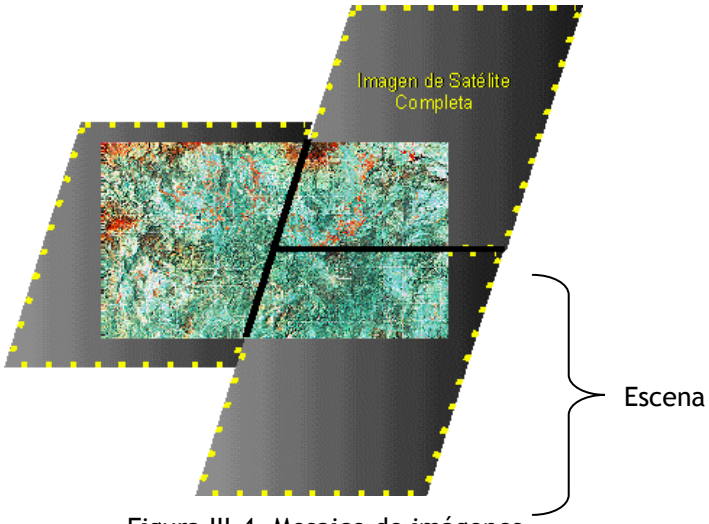


Figura III.4. Mosaico de imágenes.

Para los espaciomapas (impresos) del INEGI, se han seleccionado tres bandas espectrales conocidas como 4, 3 y 2 para asignarles a éstas uno de los colores primarios, rojo (R), verde (G) y azul (B) respectivamente (Figura III.5.), y obtener lo que se conoce como *falso color* (RGB-432 ó simplemente 432). Esta es la razón de que por ejemplo, la vegetación se aprecie en diversos tonos de rojo, pues la combinación de bandas espectrales con la asignación de colores mencionada destaca la respuesta de la vegetación a la radiación infrarroja.

[33] Ver capítulo IV.

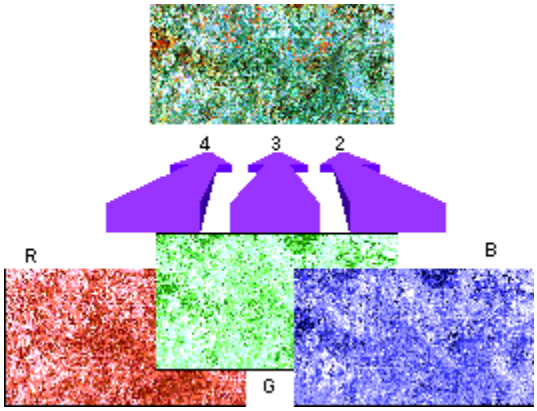


Figura III.5. Generación del falso color (RGB)

El cuerpo de un espaciomapa contiene la vista en falso color del territorio representado a partir del mosaico de imágenes de satélite, además de los nombres de las principales poblaciones y de algunos rasgos geográficos sobresalientes. Cuenta con marco, coordenadas geográficas y cuadrícula Universal Transversa de Mercator (UTM).

La información adicional o tira marginal, contiene los siguientes elementos:

- Nombre y clave
- Croquis de localización
- Escala gráfica
- Muestras de ayuda para interpretación
- Datos generales de las imágenes de satélite
- Especificaciones de elipsoide de referencia, tipo de proyección, *datum* horizontal y fechas de edición e impresión.

Los Espaciomapas representan uno de los insumos más importantes para los programas de actualización cartográfica en las escalas 1:250 000 y 1:1 000 000 del INEGI.

III.4. Consideraciones importantes.

Si bien la técnica general descrita en el apartado anterior, ejemplifica el proceso de generación de espaciomapas, existen algunas reflexiones que hacer:

- Existen otras combinaciones de imágenes de bandas satelitales que también son muy útiles para el estudio del territorio.
- Estrictamente un espaciomapa además de la combinación de las bandas, contiene información cartográfica básica sobrepuesta que le da el carácter de mapa. En el presente trabajo no se pretende generar imágenes de este tipo, sino presentar el proceso digital de generación de imágenes RGB satelitales para su utilización por diversos usuarios (entre los que puede estar la generación de espaciomapas).
- El conocer una técnica general no garantiza que se comprenda la física de la teledetección que permite generar las imágenes del tipo que nos ocupa; razón por la cual se considera relevante difundir los fundamentos teóricos.
- Tratar de abarcar todos los aspectos de la teledetección, así como su uso y relaciones dentro de un SIG, es evidentemente un aspecto que rebasa las intenciones del presente trabajo y las propias de quien lo presenta; siendo desde un punto de vista muy pragmático, la ejemplificación la mejor manera de ilustrar las aplicaciones de la información que motiva este proyecto.
- No sólo se busca generar las imágenes de acuerdo al cubrimiento de 2ºX1º, sin obtener imágenes con cubrimiento para el estado de Puebla, útiles en diversos proyectos tanto del medio natural como social.

CAPÍTULO IV

BASES

TEÓRICAS

IV.1. Teledetección.

IV.1.1. ¿Qué es la teledetección?

Volar ha sido desde épocas muy remotas, uno de los sueños más intensamente anhelados por la humanidad. Una de las principales iniciativas ha sido una nueva visión de los paisajes terrestres, es decir, rebasar los límites de la visión humana, lo que se manifiesta desde los inicios de la aeronáutica. Esa observación remota de la superficie terrestre es el marco de estudio de la teledetección. Este vocablo es una traducción latina del término inglés *"remote sensing"*, ideado a principios de la década de los 60's del siglo pasado, para designar cualquier medio de observación remota, aplicado fundamentalmente a la fotografía aérea, principal sensor de aquella época. La teledetección no sólo engloba los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento en el contexto de una determinada aplicación.

Entonces, entendemos a la teledetección como *aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre*, pero vale la pena detenernos en reflexionar que para que esta observación remota sea posible, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que éste les envía. Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Sin embargo, esa señal no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que lo ilumina, de ahí que en la oscuridad no somos capaces de percibir ese árbol.
En este sencillo ejemplo identificamos como elementos de interacción el sensor (el ojo), el objeto (árbol) y cierto flujo energético que permite poner a ambos en relación. Estos tres elementos son los principales en cualquier sistema de

teledetección. En el caso del ojo, ese flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar; podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Estas son precisamente las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión. La primera es la más importante forma de teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro planeta. El Sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo trasmite posteriormente a las estaciones receptoras en tierra. Entre la superficie y el sensor se interpone la atmósfera que dispersa y absorbe parte de la señal original.

En cualquiera de los casos, el flujo energético entre la superficie terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética. Históricamente las propiedades de esta radiación se han explicado por dos teorías: aquella que la concibe como un haz ondulatorio (Huygens, Maxwell) y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos (Planck-Einstein). Se ha demostrado que el comportamiento corresponde a ambos planteamientos.

Es también conocido que podemos definir cualquier tipo de energía radiante en función de la longitud de onda. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, se pueden establecer una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. Esta organización de bandas se denomina espectro electromagnético y comprende desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X) hasta las kilométricas (telecomunicaciones).

Como se observa, los principios y leyes de la radiación electromagnética, así como el dominio óptico del espectro constituyen parte fundamental de la teledetección, aspectos que en la actualidad tienen un soporte teórico robusto. Por ejemplo, a partir de medidas de laboratorio se han obtenido curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas de la superficie; algunas

tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras tienen un comportamiento más selectivo. La nieve presenta una reflectividad alta y constante pues refleja la mayor parte de la energía incidente a distintas longitudes de onda. Por el contrario, el agua absorbe la mayor parte de la energía que recibe, tanto más nos situemos en longitudes de onda mayores. Por su parte la vegetación presenta un comportamiento más cromático, con bajos valores de reflectividad en el espectro visible, siendo más elevados en el infrarrojo cercano y menores en el medio. En cuanto al espectro visible sabemos que si un objeto es de cierto color, es porque refleja intensamente la energía en esa banda y poco en el resto.

Un sistema de teledetección espacial (Figura IV.1.), incluye los siguientes elementos[34]:

- Fuente de energía, que supone el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Puede tratarse de un foco externo a éste (teledetección pasiva) o de un haz energético emitido por el sensor (tele detección activa). La fuente de energía más importante obviamente es el Sol.
- Cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
- Sistema sensor, compuesto por el sensor propiamente dicho y la plataforma que lo alberga. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- Sistema de recepción-comercialización, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en formato apropiado y tras ciertas correcciones se distribuye a los interesados.

[34] Emilio Chuvieco *Fundamentos de Teledetección Espacial*, 2000.

- Usuario, que convierte esos datos en información útil para su particular caso de estudio.

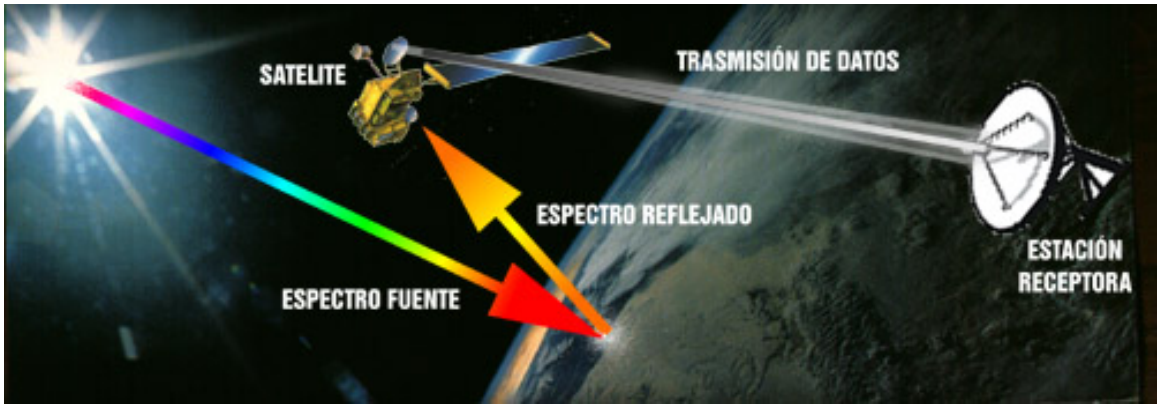


Figura IV.1. Sistema de Teledetección.

IV.1.2. Breve historia de la teledetección.

La teledetección es una técnica aplicada, y como tal, muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento.

Las primeras experiencias de teledetección como ciencia, se remontan a 1859, cuando Gaspar Félix de Tournachon obtuvo las primeras fotografías aéreas desde un globo cautivo. En los años posteriores, se produjo un desarrollo importante en la observación fotográfica desde avión. En 1909 Wilbur Wrigth adquirió la primera fotografía aérea abriendo el camino a una larga lista de historia de observación desde plataformas remotas.

La primera cámara aérea propiamente dicha se desarrollo durante la Primera Guerra Mundial, en 1915 por J. T. C. Moore-Brabazon. Durante la II Guerra Mundial el progreso se orientó a mejorar la óptica de las cámaras, así como las emulsiones utilizadas, de hecho, de esa época provienen las películas en infrarrojo, desarrolladas por *Kodak Research Laboratorios*. En este periodo se introdujeron nuevos sensores, como el radar y se mejoran los sistemas de comunicación. También la aeronáutica prosperó notablemente, lo que aseguró mayor estabilidad a las plataformas de observación.

Al lanzamiento del satélite soviético Sputnik, en 1957, se inicia la "carrera espacial" y en 1960 la NASA lanzó el primer satélite de las serie TIROS, pionero de las misiones de observación metereológica. Junto a estos avances, durante esta década también se impulsaron las misiones tripuladas dedicadas principalmente a la conquista de la Luna. Quienes realizaron estos viajes, captaron imágenes de la superficie terrestre, el primero en hacerlo fue Alan B. Shepard en 1961 durante una misión del Mercury. Fue la misión Gémini-Titán en 1965 la que incluyó los primeros experimentos formales de fotografía espacial. Durante los vuelos Apollo 6 y Apollo 7 se adquirieron diversas series fotográficas verticales; ya en el Apollo 9 (1969) se abordó el primer experimento multiespectral.

Todas esas experiencias hicieron concebir a la NASA proyectos dedicados exclusivamente a la cartografía y evaluación de los recursos naturales. El 23 de julio de 1972 se lanzó el primer satélite de la serie ERTS (Earth Resourses Technollogy Satellite). Este proyecto bautizado LandSat con la puesta en órbita del segundo satélite en 1975, ha resultado ser el más fructífero hasta el momento para aplicaciones civiles de teledetección.

A la serie LandSat siguieron otros proyectos específicamente diseñados para la observación medio ambiental. Los más conocidos son el Laboratorio Espacial Tripulado Skylab (1973), el satélite oceanográfico Seasat (1978), el de investigación térmica HCMM (1978); todos propiedad de la NASA. El satélite francés SPOT (1986) el japonés MOS-I (1987), en indio IRS-I (1988) y los rusos Soyuz y Salut.

La Agencia Espacial Europea y la canadiense ya han lanzado sus propios satélites al espacio, incluso existen esfuerzos brasileños en colaboración con China y varios consorcios privados.

IV.1.3. Fundamentos físicos de la teledetección.

Como se citó con anterioridad, históricamente las propiedades de la radiación electromagnética se han explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas:

aquella que la concibe como un haz ondulatorio (Huygens, Maxwell) y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos (Planck, Einstein). Actualmente, parece que las dos teorías se pueden compaginar, pues se ha demostrado que la luz puede comportarse de acuerdo a ambos planteamientos.

IV.1.3.1. La onda.

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético (Figura IV.2).

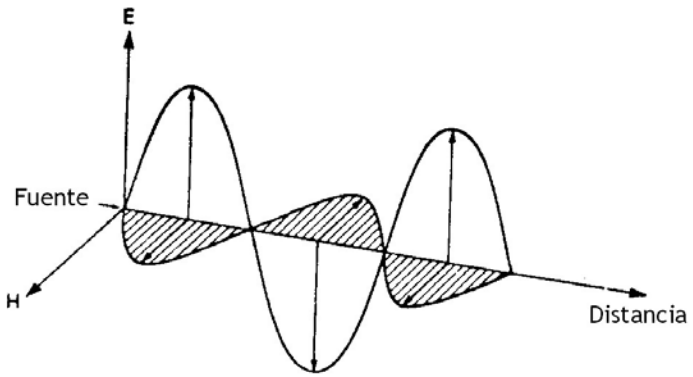


Figura IV.2. Onda electromagnética. Componente eléctrico (E) y magnético (H)

Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda (λ) y frecuencia (F). La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda, mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un mismo punto fijo en una unidad de tiempo. Ambos elementos están inversamente relacionados:

$$c = \lambda F \qquad \text{Ec. IV.1}$$

Donde *c* indica la velocidad de la luz (3 x 10^8 m/s), λ expresa la longitud de onda (habitualmente en micrómetros, 1 μm = 10^{-6} m) y F la frecuencia (Hertzios, ciclos por segundo). A mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa, por lo que basta indicar un solo término para identificar propiamente el tipo de energía mencionado (Figura IV.3).

Gracias a la teoría cuántica, podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia:

$$Q = hF \qquad \text{Ec. IV.2}$$

Donde *Q* es la energía radiante de un fotón (en julios), *F* la frecuencia y *h* la constante de Planck (6.6 x 10^{-34} J s). Sustituyendo en la Ec IV.2., podemos expresar:

$$Q = h(c/\lambda) \qquad \text{Ec. IV.3}$$

Lo que definitivamente significa que a mayor longitud de onda (o menor frecuencia) el contenido energético será menor y viceversa. Esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella proveniente de longitudes cortas, de ahí que las primeras requieran medios de detección más refinados.

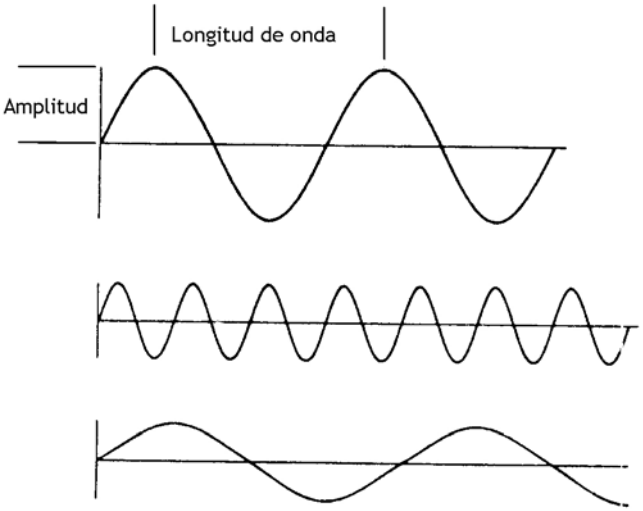


Figura IV.3. Al centro una onda de alta frecuencia y corta longitud de onda. La gráfica final representa una onda de baja frecuencia y extensa longitud de onda.

IV.1.3.2. El espectro electromagnético.

De las ecuaciones anteriores, se deduce que podemos definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia.

Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda (o frecuencias) se denomina espectro electromagnético (Figura IV.4). Comprende desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X) hasta las kilométricas de telecomunicaciones. Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda. Para las más cortas se utilizan micrómetros, mientras que las más largas se miden en centímetros o metros. Normalmente a estas últimas (denominadas micro-ondas) se las designa también por valores de frecuencia (en Gigahertz, 1 GHz = 10^9 Hz).

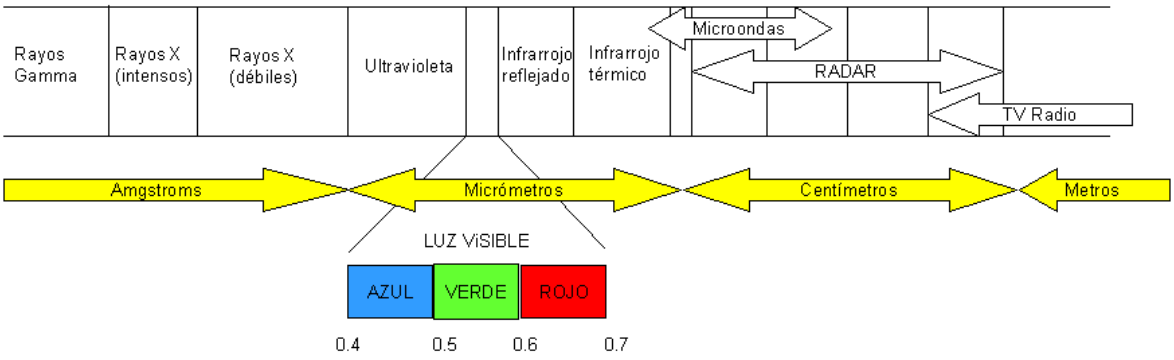


Figura IV.4. Espectro electromagnético.

Bajo el enfoque de la teledetección, se destacan una serie de bandas espectrales, que conforme a la tecnología actual son las más frecuentemente usadas. Su denominación varía de acuerdo a distintos autores, no obstante la terminología más comúnmente utilizada es:

- Espectro visible (0.4 a 0.7 µm). Única radiación electromagnética que perciben nuestros ojos. Se distinguen tres bandas elementales: azul (0.4 a 0.5 µm), verde (0.5 a 0.6 µm) y rojo (0.6 a 0.7 µm), en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.
- Infrarrojo próximo (0.7 a 1.3 µm). Conocido también como infrarrojo cercano, reflejado o fotográfico ya que parte de éste puede detectarse a partir de filmes dotados de emulsiones especiales. Es de importancia en la discriminación de masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1.3 a 8 µm). Es en esta zona donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Es idóneo para estimar contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.

- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm). Incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- Microondas (a partir de 1 mm). Es un tipo de energía muy transparente a la cubierta nubosa.

IV.1.3.3. Términos usados.

Como hemos citado, para que se produzca una observación remota de la superficie terrestre es preciso que el sensor detecte un flujo energético proveniente de ésta, tal flujo tiene una intensidad determinada, proveniente de o dirigida a una unidad de superficie y con una dirección concreta. La formulación clara de este proceso da origen a una terminología y a unidades de medida, entre los cuales los más utilizados se describen a continuación:

- Energía radiante (Q). Indica el total de energía radiada en todas las direcciones. Se mide en julios (J).
- Densidad radiante (W). Es el total de energía radiada en todas direcciones por unidad de volumen. Se mide en julios por metro cúbico (J/m^3).
- Flujo radiante (Φ). Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo. Se mide en vatios (W).
- Emitancia o excitancia radiante (M). Es el total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo. Se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2).
- Irradiancia radiante (E). El total de energía radiada sobre una unidad de área y por un tiempo. Equivale a la emitancia, ésta indica la energía emitida; la irradiancia refiere a la incidente (W/m^2).
- Intensidad radiante (I). Total de energía radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido (Ω). Éste es un ángulo tridimensional que hace referencia a la sección completa de la energía transmitida y se mide en

estéreo-radianes[35] (Figura IV.5 a); entonces la intensidad radiante se mide en vatios por estéreo-radián (W/sr).

- Radiancia (L). Total de energía radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida (Figura IV.5 b). Este término es fundamental toda vez que describe lo que mide el sensor. Se cuantifica en vatios por metro cuadrado estéreo-radián (W/m^2sr).
- Radiancia espectral (L_λ). Total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Toda vez que el sensor detecta una banda particular de espectro, ésta es la medida más cercana a la observación remota. De igual forma que la radiancia, la emitancia e irrandiancia pueden completarse con el calificativo de espectral (añadiendo el subíndice λ) cuando se refieren a una longitud de onda determinada.

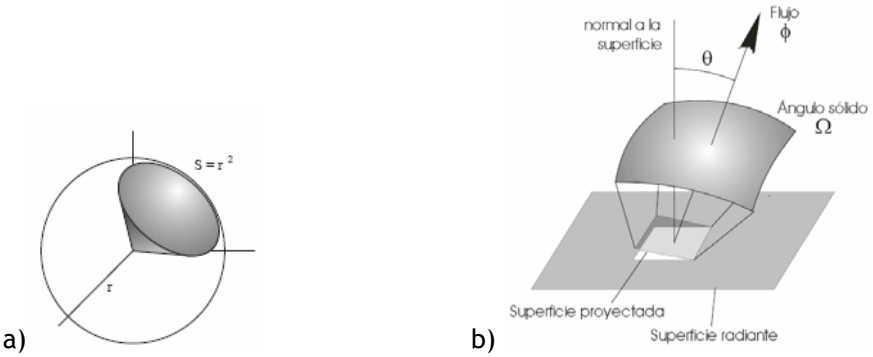


Figura IV.5. a) Ángulo sólido. b) Radiancia espectral.

Los términos anteriores muestran cantidades absolutas. Los siguientes son adimensionales y suelen expresarse en tantos por ciento o por uno. Ante esto, se introducen términos ingleses añadiendo el sufijo "ividad" para indicar que son cantidades relativas. Estas magnitudes también son dependientes de la longitud de onda por lo que cada término se completa con el calificativo espectral, con la finalidad de señalar su comportamiento en una banda específica del espectro:

[35] Estéro-radián: Unidad de medida del ángulo sólido. Es el sustendido por un sector esférico de 1 m^2 sobre una esfera de un metro de radio.

- Emisividad (ε). Relación entre la emitancia de una superficie (M) y la que ofrecería un emisor perfecto, denominado cuerpo negro[36], a la misma temperatura (M_n).
- Reflectividad (ρ). Relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie.
- Absortividad (α). Relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie.
- Transmisividad (τ). Relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.

IV.1.3.4. Principios y leyes de la radiación electromagnética.

Conforme a la Ec. IV.3, la cantidad de energía que contiene un flujo radiante es inversamente proporcional a su longitud de onda, pudiéndose establecer esta relación de manera más formal mediante la ley de Planck[37]:

$$M_{n,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT} \right) - 1 \right\}} \qquad \text{Ec. IV.4}$$

donde $M_{n,\lambda}$ indica la emitancia espectral de un cuerpo negro a una determinada longitud de onda (λ); h es la constante de planck (6.626 x 10^{-34} W·s^2); k la constante de Boltzmann (1.38 x 10^{-23} W·s^2·K^{-1}); c la velocidad de la luz; λ la longitud de onda y T la temperatura absoluta de un cuerpo negro (en grados Kelvin). Lo anterior puede simplificarse como:

---

[36] Un cuerpo negro es un objeto que absorbe toda la luz y toda la energía que incide sobre él. Ninguna parte de la radiación es reflejada o pasa a través del cuerpo negro. A pesar de su nombre, el cuerpo negro emite energía y constituye un modelo ideal físico para el estudio de la emisión de radiación electromagnética.

[37] La intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro con una temperatura T es: $I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$ $I(\nu)\delta\nu$ es la cantidad de energía por unidad de área, unidad de tiempo y unidad de ángulo sólido emitida en el rango de frecuencias entre ν y $\nu+\delta\nu$; h es la constante de Planck; c es la velocidad de la luz y k es la constante de Boltzmann.

Así mismo, la potencia emisiva espectral del cuerpo negro es: $E_{\lambda,b}(\lambda,T) = \pi \cdot I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}$ con $C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3{,}742 \cdot 10^8 \frac{W \cdot \mu m^4}{m^2}$ y $C_2 = \frac{hc_0}{k} = 1{,}439 \cdot 10^4 \mu m \cdot K$

$$M_{n,\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T} \right) - 1 \right\}} \qquad \text{Ec. IV.5}$$

donde c_1 puede sustituirse por 3.742 x 10^8 W·m^{-2} μm^4 y c_2 por 1.439 x 10^4 µm K.

Lo que la ecuación de Planck señala es que cualquier objeto por encima del cero absoluto (-273 ºC) radia energía y que ésta se incrementa con la temperatura. Así mismo, a mayor temperatura ese cuerpo radiará con más intensidad en longitudes de onda más cortas (Figura IV.6.).

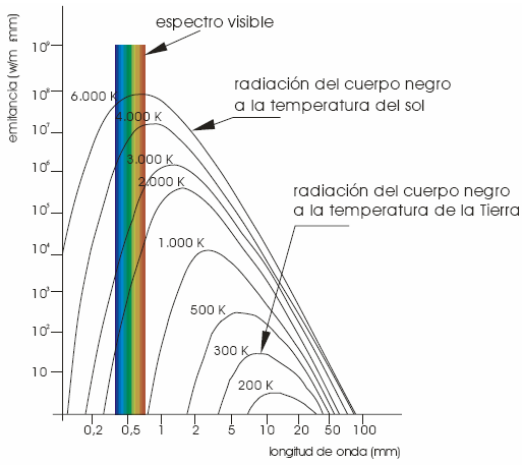


Figura IV.6. Curva de emitancia radiante de un cuerpo negro a distintas temperturas. (1 µm = 10^3 nm).

A partir de la ecuación de Planck puede calcularse la longitud de onda en la que se produce la máxima emitancia de un cuerpo negro conociendo su temperatura (T). Esta es la llamada ley del desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \mu m K}{T} \qquad \text{Ec. IV.6}$$

Esta ley es de gran importancia para la selección de la banda más conveniente para detectar una determinada cubierta, siempre que se conozca su

temperatura. Para dar un ejemplo, teniendo en cuenta que la temperatura de combustión se estima entre 540 y 700 K, para el caso de incendios forestales la ley de Wien sitúa entre 5.3 y 4.1 μm (infrarrojo medio) la banda más adecuada para su detección.

Así mismo, en la Figura IV.6. se observa que el Sol con una temperatura radiante cercana a los 6000 K, presenta su máxima emitancia en la región del espectro visible. Nuevamente se concluye que cuanto más caliente esté el objeto emisor radiará a longitudes de onda más cortas.

Si integramos la emitancia espectral de un cuerpo negro para todas las longitudes de onda, se puede calcular el total de energía que radia por unidad de superficie. A esto se le conoce como la ley de Stefan-Boltzmann:

$$M = \sigma T^4 \qquad \text{Ec. IV.7}$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann (5.67 x 10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}) y T la temperatura en Kelvin.

De lo anterior se ve que la emitancia global de un objeto es una función de su temperatura, pequeños cambios en ésta generan notables modificaciones en su emitancia radiante.

No se puede dejar pasar por alto que hasta ahora se ha considerado que las superficies naturales se comportan como cuerpos negros, lo cual implica una notable simplificación. Ante esto las fórmulas deben modificarse añadiendo un nuevo parámetro: la emisividad (ε).

$$M = \varepsilon M_n \qquad \text{Ec. IV.8}$$

Hemos definido la emisividad como el grado de similitud entre la emitancia radiante de un objeto que presentaría un cuerpo negro a la misma temperatura. También se ha dicho que un cuerpo negro es un “emisor perfecto”, es decir, un objeto que absorbe y emite toda la energía que recibe. Entonces, los cuerpos blancos o reflectores perfectos no absorben nada de la energía incidente sino

que la reflejan por completo (ε = 0); considerando entonces como cuerpos grises a aquellos objetos que absorben y emiten de forma constante en diferentes longitudes de onda, estableciendo el término de radiadores selectivos cuando la emisividad varía con la longitud de onda.

Tres son las regiones del espectro en donde se realizan los procesos de teledetección: longitudes de onda cortas (del visible al infrarrojo medio), medias (térmico) y largas (microondas). Sin embargo, derivado del objetivo del presente trabajo, no se revisarán los aspectos referentes a las longitudes de correspondientes al microondas ni al térmico.

IV.1.3.5. Radiación energética en el espectro óptico.

Un concepto importante es lo que se conoce como *dominio óptico del espectro*, que es el grupo de longitudes de onda que dependen directamente de la energía solar.

El Sol tiene una temperatura radiante cercana a los 6000 K. Según la ley de Wien, su máxima emitancia espectral se da en torno a 0.48 μm (color verde captado por nuestros ojos). Su curva espectral se asemeja a la de un cuerpo negro a esa temperatura (Figura IV.7.)

Como el Sol presenta una banda de elevada emitancia entre 0.3 y 2 μm, a esa banda se le denomina *dominio óptico del espectro*, y es la región de mayor interés para la observación remota de la superficie terrestre.

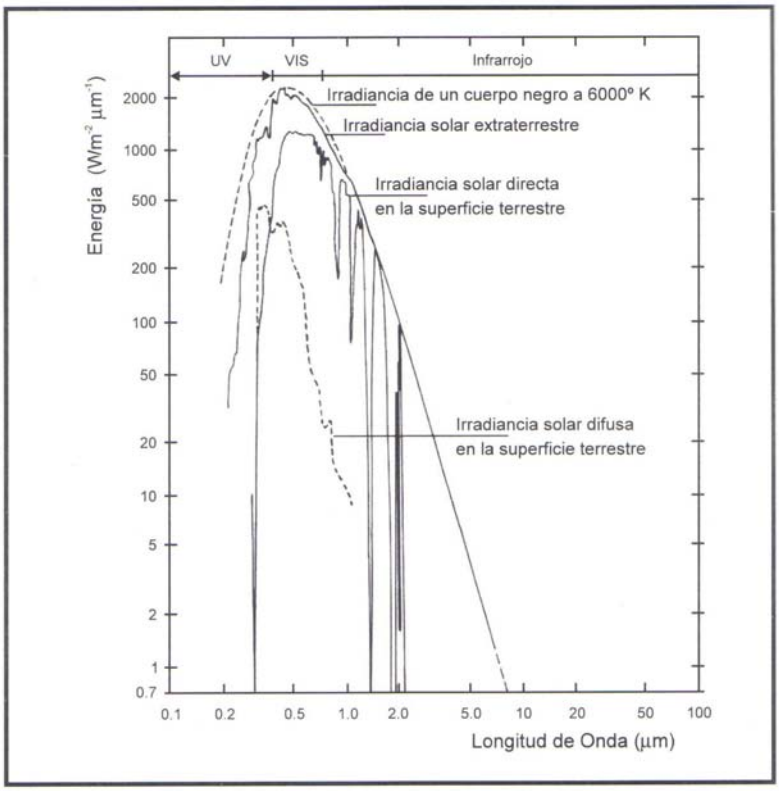


Figura IV.7. Emitancia radiativa del Sol.

Es importante entender cómo la radiación interacciona con la superficie terrestre. Este flujo radiante puede descomponerse en tres términos básicos (Figura IV.8):

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \qquad \text{Ec. IV.9}$$

ϕ_i *Energía incidente*
ϕ_r *Energía reflejada*
ϕ_a *Energía absorvida*
ϕ_t *Energía transmitida*

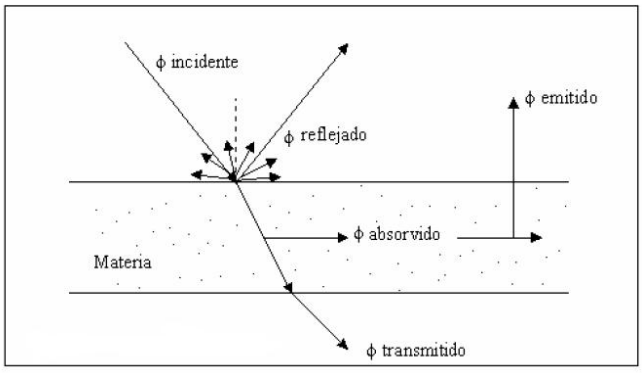


Figura IV.8. Relación entre el flujo incidente y reflejado.

El flujo incidente sobre una superficie es reflejado, transmitido o absorbido, pudiendo expresar esta relación en unidades relativas dividiendo cada término de la fórmula por ϕ_i :

$$\frac{\phi_i}{\phi_i} = \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_a}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i} \qquad \text{Ec. IV.10}$$

La ecuación anterior puede expresarse como:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \qquad \text{Ec. IV.11}$$

La suma de la reflectividad, absortividad y transmisividad es igual a uno. Se debe considerar que la relación expresada en la Ec. IV.11 no es constante, sino que varía de acuerdo a la longitud de onda, entonces:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \qquad \text{Ec. IV.12}$$

El flujo incidente que se refleja, absorbe y transmite depende de las características de la superficie y de la longitud de onda a la que es observado. Para caracterizar una superficie se debe conocer su comportamiento en diferentes longitudes de onda, pudiendo con esto determinar diferencias entre superficies espectralmente similares.

Si hablamos del espectro visible, esa disimilitud se manifiesta en lo que llamamos color, un objeto es rojo si refleja intensamente la energía en esa banda del espectro y poco en el resto, que es lo mismo decir que se absorbe o transmite poca energía incidente sólo en el rojo y mayor en el resto.

En pruebas de laboratorio se han obtenido curvas de reflectividad espectral para cubiertas de la superficie terrestre (Figura IV.9.).

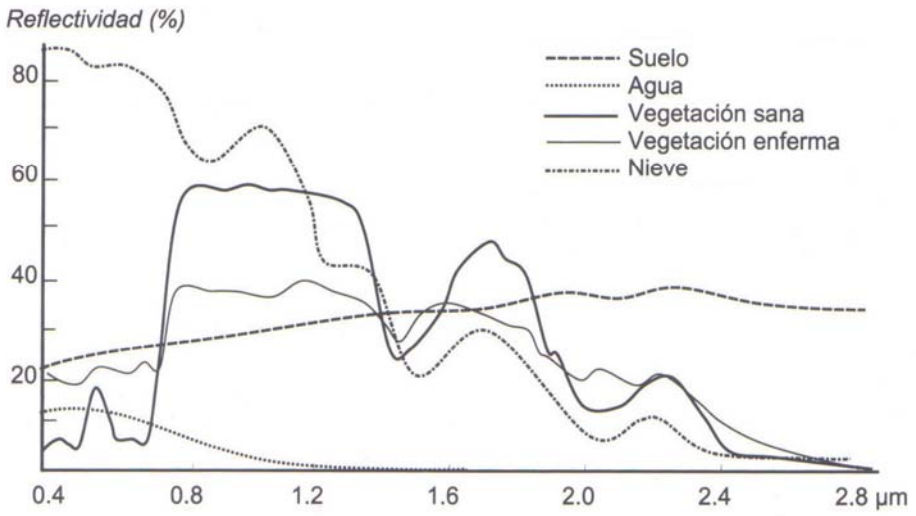


Figura IV.9. Firmas espectrales de algunas cubiertas.

Se observa que algunas superficies tienen una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda y otras presentan un comportamiento más selectivo. El agua absorbe la mayor parte de la energía que recibe, conforme nos situamos en longitudes de onda mayores. Contrariamente, la nieve con una reflectividad alta y constante, refleja la mayor parte de la energía incidente a diferentes longitudes de onda. La vegetación presenta bajos niveles de reflectividad en el espectro visible, más altos en el infrarrojo cercano y menores en el infrarrojo medio.

Cabe mencionar que el flujo de energía recibido por el sensor también depende de factores externos como la geometría de la observación, la situación ambiental y las condiciones ambientales.

El de mayor aplicación en el presente trabajo es el que corresponde a la geometría de observación. La cantidad de energía que recibe el sensor depende del ángulo con que la superficie refleje la energía incidente y del ángulo que formen el haz incidente con la posición del sensor. Esta geometría está estrechamente ligada a la rugosidad de la superficie. Existen dos tipos de cubiertas (Figura IV.10.): las que reflejan la energía con el mismo ángulo del

flujo incidente (superficie especular), y aquellas que la reflejan uniformemente en todas las direcciones (superficie lambertiana).

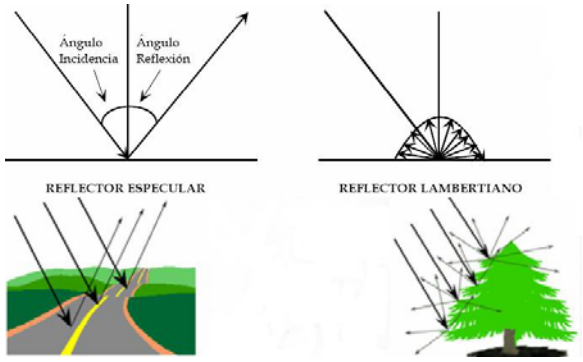


Figura IV.10. Tipos de superficies.

Para las superficies especulares el sensor recibe sólo la energía reflejada del suelo si está situado en la dirección del ángulo de reflexión, siendo nula en cualquier otro caso. Para las superficies lambertianas, la radiancia es constante en cualquier ángulo de reflexión.

La mayoría de las superficies tienden a comportarse de manera intermedia entre ambas características en función de sus características y de la longitud de onda; si ésta es pequeña, las rugosidades del terreno difunden mucho más la energía incidente comparado con longitudes de onda mayores.

El ángulo de elevación solar y el ángulo de observación son determinantes en la respuesta final obtenida por el sensor. Es decir, el sensor puede registrar valores diferentes de radiancia espectral para un mismo tipo de superficie, con la misma o similar reflectividad, si varían las condiciones de observación o de iluminación. Entonces existen condiciones que modifican el comportamiento espectral teórico de una superficie (Figura IV.11.):

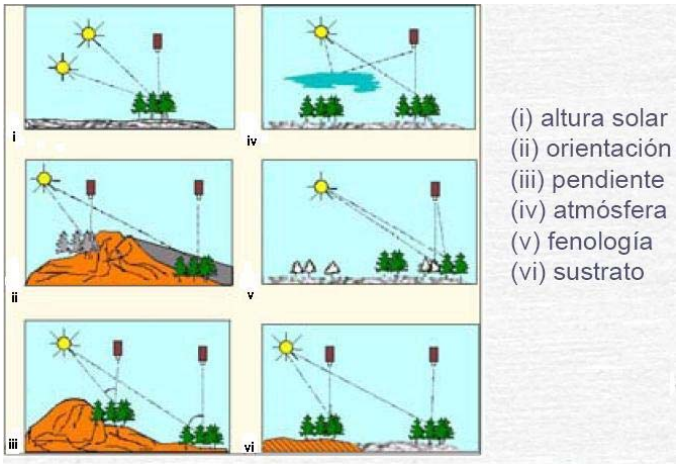


Figura IV.11. Factores que alteran la firma espectral.

- El ángulo de iluminación solar (i) que depende de la fecha y del momento del paso del satélite.
- Relieve del terreno modificando el ángulo de iluminación, orientación de laderas (ii) o la pendiente (iii).
- Influencia de la atmósfera, particularmente absorción por nubes (iv) y dispersión en distintas longitudes de onda (ver apartado IV.1.3.7.).
- Variaciones del medio ambiente de la superficie como asociación con otras superficies, estado fenológico[38] (v), etc.
- Sustrato edafológico[39] o litológico[40] (vi) sobretodo cuando la cubierta observada presenta una densidad media.

La forma específica con la que determinada cubierta refleja o emite energía en distintas longitudes de onda se denomina comúnmente *firma espectral (o signatura espectral)*.

[38] Etapas de desarrollo de los fenómenos periódicos como la foliación, la floración y su relación con los cambios climáticos.
[39] Naturaleza y condiciones del suelo.
[40] Naturaleza y condiciones de las rocas.

IV.1.3.6. Caracterización espectral de las principales cubiertas del paisaje en el espectro óptico.

Considerando que la vegetación resulta ser una de las cubiertas más analizadas mediante imágenes de satélite y que éste análisis se basa en gran medida en composición de imágenes en falso color, es relevante hacer una breve descripción de su comportamiento espectral dentro de los márgenes del espectro óptico. Así mismo, el suelo y el agua se constituyen también como elementos fundamentales para su análisis mediante teledetección, por lo que también nos detendremos a hacer un rápido análisis de su comportamiento espectral teórico en el espectro óptico. Estos datos serán de ayuda en la comprensión de las imágenes compuestas en falso color resultantes del presente trabajo.

Respecto a la vegetación, diremos en primera instancia que sólo consideraremos lo que se refiere a vegetación vigorosa[41], encontrando varios estudios al respecto —Gates 1965; Lusch 1989; Curran 1980; Kniplin 1970, Jensen 1983, entre otros— a través de los cuáles se ha determinado que el comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles con un máximo relativo en la porción del verde del espectro (≈0.55 μm). Por el contrario, en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, la cual se va reduciendo paulatinamente hacia el infrarrojo medio (Figura IV.12.)
Con base en los estudios ya citados, estas características espectrales se deben principalmente a la acción de los pigmentos foto-sintéticos y del agua que almacenan las hojas. Esos pigmentos absorben en la banda del espectro entorno a los 0.445 μm y particularmente la clorofila presenta una segunda banda de absorción a los 0.645 μm. Entre ambas porciones hay una banda intermedia (≈0.55 μm) en donde la absorción es menor (mayor reflectividad) razón por la cual aparece un pico de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, causa del color verde con el que nuestros ojos perciben la

[41] Vegetación sana con su dinámica equilibrada. Actividad fotosintética intensa.

vegetación vigorosa. En cuanto a la alta reflectividad en el infrarrojo cercano se debe fundamentalmente a la estructura celular interna de la hoja.

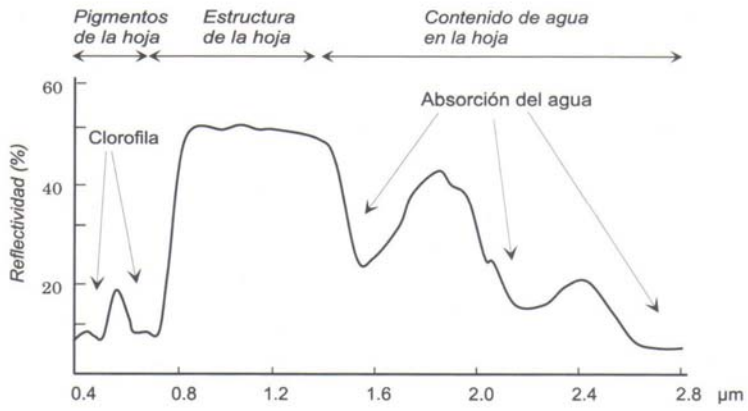


Figura IV.12. Reflectividad de la vegetación sana en el espectro óptico.

En lo relacionado con el suelo, mencionaremos principalmente lo referente a suelos desnudos, ya que el efecto pantalla provocado por la cubierta vegetal dificulta obtener información del sustrato geológico a partir de teledetección, teniendo en estos casos que inferir indirectamente los datos mediante el análisis de anomalías que pueden detectarse en la cubierta vegetal.

El comportamiento espectral de los suelos desnudos es más uniforme que la vegetación, presentando una curva espectral bastante plana y de carácter ascendente (Figura IV.9), interviniendo como principales factores la composición química del suelo, su textura[42], estructura[43] y contenido de humedad. La composición química es la causa del color dominante con el que percibimos el suelo (Figura IV.13). Los de origen calcáreo[44] tienden al color blanco indicando una alta reflectividad en todas las bandas visibles. Por otra parte, los suelos

[42] Grado de granulidades en la superficie del suelo. Es la proporción de los tamaños de los grupos de partículas que lo constituyen y está relacionada con el tamaño de las partículas de los minerales que lo forman.
[43] Morfológicamente es la disposición de las partículas elementales que forman agregados de partículas compuestas (minerales u orgánicas) y que tienen propiedades diferentes de las de una masa igual de partículas elementales.
[44] Suelos o rocas con abundancia de cal.

arcillosos[45] ofrecen una mayor reflectividad en el rojo como consecuencia de su alto contenido en óxido de hierro.

El contenido de humedad influye inversamente en la reflectividad del visible e infrarrojo, en torno a 1.45 μm y 1.92 μm con mayor intensidad en las bandas de absorción del agua.

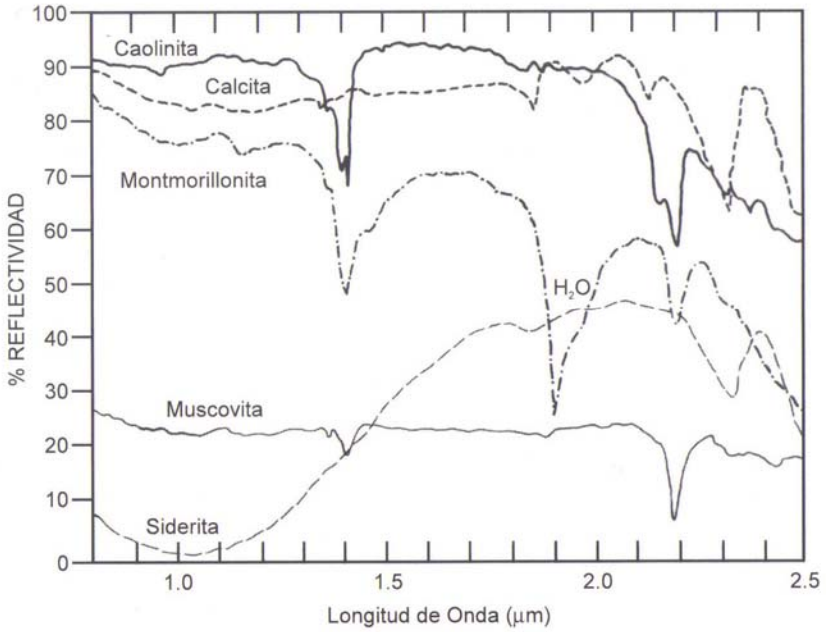


Figura IV.13. Espectros de laboratorio para distintos minerales.

En cuanto a las superficies acuáticas, éstas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo su absortividad cuanto mayor sea la longitud de onda. Derivado de esto, la curva espectral es similar a la del suelo, aunque en sentido contrario. La mayor reflectividad del agua clara se produce en el azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano y medio donde es prácticamente nula, razón por la cual la frontera tierra-agua es muy nítida en esta banda. La variabilidad del agua es más fácilmente detectable en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), y se relaciona con su profundidad, contenido de materiales en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes). La

[45] Roca sedimentaria, formada a partir de depósitos de grano muy fino, compuesta esencialmente por silicatos de aluminio hidratados.

turbidez del agua, relacionada con su contenido de sedimentos[46], implica aumento en la reflectividad en todas las bandas del visible.

La profundidad del agua influye directamente en el aporte de reflectividad derivado de los materiales de los fondos. En aguas poco profundas la reflectividad aumenta ya que se mezcla en el flujo recibido de la reflectividad de los fondos. Entonces, la absortividad será mayor cuanto más profunda sea la capa de agua.

Cabe mencionar el caso de la nieve, que ofrece un comportamiento diferente del agua. Presenta una reflectividad elevada en las bandas visibles, reduciéndose en el infrarrojo cercano y más claramente en el medio. Los factores más relevantes en la reflectividad de la nieve son el tamaño del grano, la profundidad y densidad de la capa, así como la cantidad de impurezas que contenga. La reflectividad es mayor para la nieve fresca que para la helada, mostrando los valores más bajos la nieve sucia (Figura IV.14).

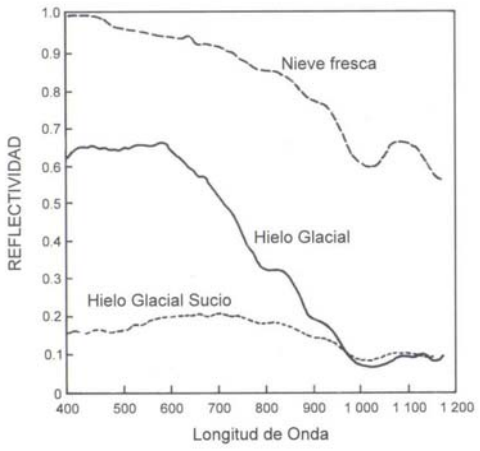


Figura IV.14. Reflectividad de la nieve.

Con frecuencia no resulta sencillo distinguir la nieve de las nubes en el espectro visible, para lo que resulta útil la banda del infrarrojo medio ya que las gotas o cristales de hielo de las nubes son más pequeñas que los granos de nieve por lo

[46]Material sólido transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, cuerpo de agua, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin.

que absorben menos la radiación en esta banda del espectro, teniendo además la nieve mayor reflectividad que las nubes en el visible.

IV.1.3.7. Interacciones de la atmósfera con la radiación electromagnética.

La atmósfera se comporta como un filtro selectivo a distintas longitudes de onda, de tal forma que en algunas bandas del espectro elimina casi cualquier posibilidad de observación remota. Las principales causas de esta *absorción* son:

- O_2 (oxígeno atómico), que filtra las radiaciones ultravioleta por debajo de 0.1 μm, así como pequeños sectores en el infrarrojo térmico y las microondas.
- O_3 (ozono), responsable de la eliminación de la energía ultravioleta inferior a 0.3 μm, así como un sector de las microondas (≈0.27 mm).
- Vapor de agua, con una fuerte absorción en torno a 6 mm y otras menores entre 0.6 y 2 μm.
- CO_2 (Anhídrido carbónico), que absorbe en el infrarrojo térmico (15 μm) con importantes efectos en el infrarrojo medio, entre 2.5 y 4.5 μm.

Derivado de esta absorción, la observación espacial se reduce a determinadas bandas del espectro, conocidas como *ventanas atmosféricas*, en donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta (Figura IV.15). Las principales ventanas atmosféricas son las siguientes:

- Espectro visible e infrarrojo cercano (entre 0.3 y 1.35 μm).
- Varias en el infrarrojo medio (1.5 a 1.8 μm, 2.0 a 2.4 μm, 2.9 a 4.2 μm y 4.5 a 5.5 μm).
- Infrarrojo térmico (entre 8 y 14 μm).
- Microondas (por encima de 20 mm en donde la atmósfera es prácticamente transparente).

Estas ventanas atmosféricas son idóneas para realizar los procesos de teledetección, por lo que el diseño de los sensores espaciales tiende a ajustarse a estas bandas, evitando interferencias extrañas al fenómeno que pretende observarse, salvo la presencia de nubes que absorben en todo el espectro óptico.

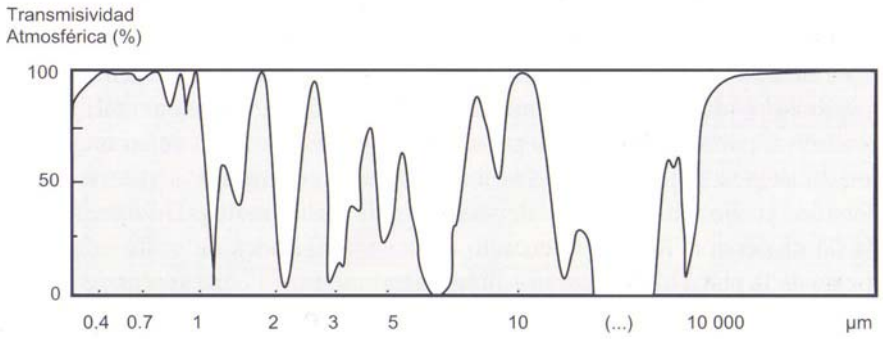


Figura IV.15. Ventanas atmosféricas.

Mucho más complejo que el efecto de absorción, lo es la *dispersión* de la radiación electromagnética que es causada por la interacción de ésta con los gases y partículas atmosféricas en suspensión. La reflexión consiguiente a ese choque supone un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre. Ya que las partículas atmosféricas son muy variables en el tiempo y en el espacio, es muy complejo cuantificar su influencia final en la imagen adquirida por un sensor. No obstante conviene tener en cuenta este factor cuando se pretenda convertir los valores digitales de la imagen a parámetros físicos —lo cual rebasa los objetivos de este trabajo—.

Los principales causantes de la dispersión atmosférica son los aerosoles[47] y el vapor de agua. En función de su origen y características, los aerosoles poseen variados tamaños, lo que implica distintos tipos de dispersión, ya que ésta es muy dependiente de su diámetro. Así, hablamos de la *dispersión Rayleigh* cuando afecta a longitudes de onda inferiores al diámetro de la partícula, afectando por consiguiente a las longitudes de onda más cortas (Figura IV.16.). Es la más

[47] Partículas en suspensión de origen muy diverso: oceánico (debido a la pulverización del agua marina) o continental como polvo en suspensión o partículas emitidas por combustión.

conocida y la de mayor influencia en teledetección, causante, por ejemplo, del color azul del cielo.

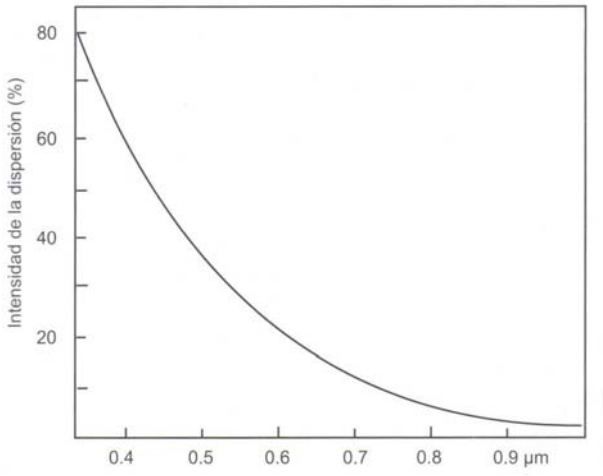


Figura IV.16. Dispersión atmosférica a distintas longitudes de onda.

Por otro lado, cuando se trata de partículas de diámetro similar a la longitud de onda hablamos de *dispersión Mie*. Aerosoles y polvo atmosférico son los principales responsables de este tipo de dispersión; también está presente en incendios forestales o en brumas costeras.

Finalmente comentaremos que también existe la denominada *dispersión no selectiva*, que ocurre con la presencia de partículas de mayor tamaño y que afecta por igual a diversas longitudes de onda. Por esta razón las nubes o nieblas tienden a parecer blancas, ya que dispersan por igual toda la luz visible.

IV.2. Sistemas espaciales de teledetección.

IV.2.1. Tipos de sistemas.

Como se mencionó en la sección IV.1. un sistema de teledetección requiere al menos de tres componentes: fuente energética, superficie terrestre y sensor. Los aspectos relativos a los dos primeros factores fueron revisados en la sección de

Teledetección del presente capítulo. Corresponde ahora detenernos un poco en aspectos generales del sensor y de la plataforma que lo sustenta.

Una de las formas de clasificar los sensores remotos considera el procedimiento de recibir la energía procedente de las distintas cubiertas. En este sentido se habla de *sensores pasivos* cuando se limitan a recibir la energía proveniente de una fuente exterior a ellos, y *sensores activos* cuando son capaces de emitir su propio haz de energía.

Una posterior clasificación entre los sensores pasivos, considera el procedimiento para grabar la energía recibida, en este sentido hablamos de sensores fotográficos, óptico-electrónicos y de antena. Los primeros resultan muy familiares ya que se aplican en las técnicas de la fotografía convencional. Para los segundos podemos señalar cámaras de video y equipos de barrido o scanners. Entre los últimos se encuentran los radiómetros de microondas en radio difusión.

Los sensores activos más conocidos son los equipos de radar, muy utilizados en aplicaciones militares y tráfico aéreo. El radar trabaja en la región del microondas. Cabe mencionar la tecnología LIDAR, que utiliza luz polarizada o láser, opera en el espectro óptico.

IV.2.2. Resolución de un sistema sensor.

Es la habilidad para discriminar información de detalle, la cual depende del efecto combinado de sus componentes.
El concepto de resolución implica cuatro manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

IV.2.2.1. Resolución espacial.

Designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. En los sensores óptico-electrónicos, se utiliza el concepto de campo de visión intantáneo (*instantaneous field of view*, IFOV). El IFOV (Figura IV.17) se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento determinado por el sensor. Por comodidad, en lugar de esta definición, suele utilizarse la distancia sobre el terreno que corresponde a ese ángulo y que puede calcularse a partir de él, conociendo la distancia del suelo al sensor[48]. Esa distancia corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen (píxel, *picture element*).

La resolución espacial de los sensores de observación terrestre recoge un rango bastante amplio. Los satélites de recursos naturales[49] –como el considerado para este trabajo– diseñados para adquirir información sobre áreas muy heterogéneas, suelen contar con resoluciones de cierto detalle, desde 10 x 10 m del sensor SPOT-HVR hasta los 120 x 120 m del canal térmico del Landsat TM y 60 x 60 m en el ETM+).

Otro grupo de satélites orientados a aplicaciones más globales[50] –HCMM-HCMR, MOS-VTIR, Nimbus-CZCS, NOAA-AVHRR– ofrecen píxeles de tamaño entre 500 y 1100 m por lado. Así mismo, están los satélites metereológicos de órbita geoestacionaria (ver apartado IV.2.3.) –Meteosat, GOES, GMS– que al ofrecer una visión global de la superficie terrestre, proporcionan escaso detalle espacial con píxeles de hasta 5 km por lado. Actualmente el lanzamiento de varios satélites comerciales ofrecen imágenes de muy alta resolución espacial, entre 1 y 4 m, ampliando el rango de aplicaciones, las cuales eran sólo del dominio de los medios aéreos de observación.

---

[48] $d = 2H\tan\left(\frac{IFOV}{2}\right)$, siendo *d* el tamaño en el terreno de cada unidad de información (píxel) y H la altura de observación.

[49] Diseñados para la observación de la Tierra y la evaluación de sus recursos natuarles.

[50] Seguimiento de nubes, nieve, hielo; discriminación de las superficies de agua y vegetación; temperatura superficial del mar, volcanes, e incendios; humedad del suelo; entre otros.

La resolución espacial es de suma importancia en la interpretación de la imagen, toda vez que marca, de cierta forma, el nivel de detalle que ésta ofrece. Entonces, sólo serán discriminables sobre la imagen elementos de tamaño superior al del píxel[51]. Cuanto menor sea el tamaño de píxel, menor es la probabilidad de que éste sea un compuesto de una o más cubiertas fronterizas. Un píxel mixto estará definido por una señal "intermedia" a las distintas cubiertas que lo componen, en consecuencia puede no asemejarse a ninguna de ellas, lo que dificultará su correcta identificación[52].

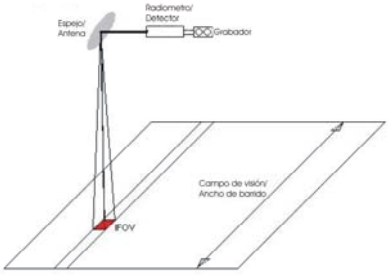


Figura IV.17. IFOV.

IV.2.2.2. Resolución espectral.

Indica el número y amplitud de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor, es decir, registrar simultáneamente el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro. Un sensor será idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas.

Entre los sensores espaciales la menor resolución espectral corresponde al radar y a los sistemas fotográficos. Los sensores óptico-electrónicos ofrecen mayor rango de bandas, desde 3 del SPOT-HRV (verde, rojo e infrarrojo cercano) hasta las 8 bandas del Landsat ETM+ (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, medio y térmico, una banda termal y una banda pancromática).

[51] Diversos autores han demostrado que este umbral puede elevarse a cuatro veces ese tamaño mínimo.
[52] Para algunas cubiertas como las urbanas, incrementar la resolución puede afectar negativamente a la interpretación al incrementar excesivamente la heterogeneidad interna en algunas categorías. (Toll, 1984; Cushine, 1987).

Con el sensor HIRIS (High Resolution Imaging Spectrometer) a bordo de aviones se han obtenido datos en 192 canales, distribuidos entre el visible y el infrarrojo cercano. Estos sensores permiten recoger información en bandas muy estrechas, discriminando parámetros críticos de la vegetación como contenido de clorofila, nitrógeno, o de agua. Por otra parte, para un sensor dedicado a fines metereológicos basta situar una sola banda en el visible, puesto que no existen diferencias cromáticas en las nubes. Contrariamente, será conveniente que incluya una o dos bandas en el térmico que le permitan conocer la temperatura de dichas nubes y otra en el infrarrojo medio en donde pueda observar el contenido de humedad en la atmósfera.

IV.2.2.3. Resolución radiométrica.

Es la sensibilidad del sensor o capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Para los sistemas fotográficos la resolución radiométrica del sensor se indica por el número de niveles de gris recogidos por la película. En el caso de los sensores óptico-electrónicos la resolución radiométrica se identifica con el rango de valores que codifica digitalmente el sensor, expresada en el número de bits que precisa cada elemento de la imagen para ser almacenado. En el pasado, los Landsat-MSS —*Multispectral Scanner Subsystem*— ofrecían un rango de 128 niveles de codificación: 7 bits, 2^7=128 por píxel, con 64 niveles (6 bits) para el infrarrojo cercano. Actualmente la mayoría de los sistemas ofrecen 256 niveles por píxel (8 bits)[53].

Cuanto mayor sea la resolución radiométrica tanto mejor se podrá interpretar una imagen. Si la interpretación es visual, es importante señalar que el ojo humano difícilmente percibe más de 64 niveles de gris y no más de ≈200,000 tonalidades, razón por la que varios especialistas estiman que basta con 16 niveles por color (4,096 tonalidades[54]) para garantizar un análisis visual adecuado, por lo que en primera instancia parecería superfluo contar con 256

[53] El sistema NOAA-AVHRR trabaja con 1,024 niveles (10 bits).
[54] 16 niveles implican 4 bits, mismos que para formar color (por ejemplo en tres bandas RGB) requieren de esos cuatro bits por cada banda, es decir, 12 bits y 2^{12} = 4096.

valores digitales por banda (8 bits por banda, entonces 16.8 millones de tonalidades en una composición coloreada de 3 bandas).

Evidentemente en una clasificación digital, la resolución radiométrica es mejor aprovechada toda vez que una computadora sí es capaz de distinguir una escala numérica amplia.

IV.2.2.4. Resolución temporal.

Alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, es decir, la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre (Figura IV.18). Este ciclo está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como el diseño del sensor principalmente en cuanto al ángulo de apertura.

Los satélites metereológicos deben ofrecer información en periodos cortos de tiempo ya que observan un fenómeno muy dinámico; por ejemplo, la red de satélites geoestacionarios (ver apartado IV.2.3.) GOES, Meteosat y GMS, proporcionan una imagen cada 30 minutos. Los satélites también metereológicos pero de órbita polar (ver apartado IV.2.3.) como el NOAA facilita imágenes cada 12 horas. En el caso de los satélites de recursos naturales ofrecen un ritmo mucho menor: entre los 16 días del Landsat y 31 días del ERS.

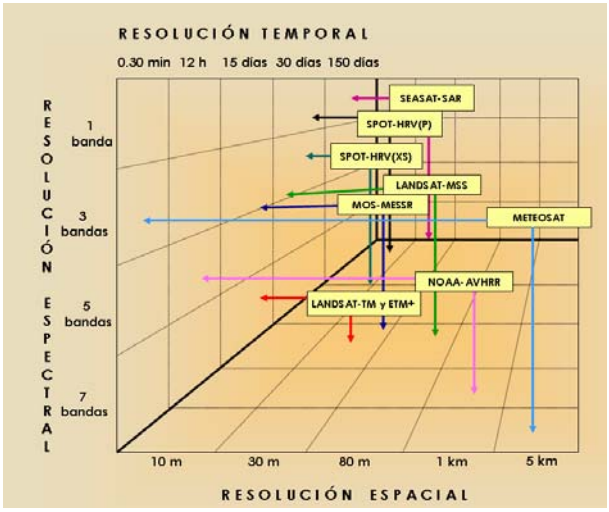


Figura IV.18. Relaciones entre resolución espacial, espectral y temporal para distintos sensores.

IV.2.3. Plataformas para la teledetección espacial.

Existe una clasificación elemental de los tipos de plataforma disponibles en función de su órbita, los geosincrónicos o geoestacionarios y los heliosincrónicos. Los primeros están colocados en órbitas muy altas, lo que les permite sincronizarse al movimiento de rotación de la Tierra y observar siempre la misma zona. Por ejemplo, los satélites Meteosat y GOES están situados a 36,000 km sobre el Ecuador, a la longitud más apropiada para el área que pretenden observar[55].

Por el contrario, se habla de plataformas "móviles" cuando observan sistemáticamente distintas zonas del planeta. Aunque la órbita puede ser elíptica, lo normal es que sea circular con la finalidad de mantener en lo posible la misma altura para que las imágenes obtenidas sean comparables. Estas órbitas suelen ser polares[56] con el propósito de aprovechar el movimiento de rotación del planeta a fin de que la plataforma se sitúe sobre un mismo punto cada cierto tiempo. Si la Tierra gira de Oeste a Este y la plataforma orbita de Norte a Sur de manera constante, ésta podrá observar el mismo punto de la Tierra transcurrido un tiempo que dependerá de la velocidad y la altura de la órbita. Regularmente tanto la altura como la velocidad de la plataforma se calculan para que ésta observe cada porción de la Tierra a una hora solar fija, denominados por esta razón heliosincrónicas.

IV.2.3.1. El programa Landsat.

El programa **LANDSAT**, desarrollado por la *National Aeronautics and Space Administration* –**NASA**–, fue originalmente denominado *Earth Resources Technology Satellite* –**ERTS**–. Fue el primer programa de satélites de percepción remota para observación de los recursos terrestres puesto en órbita terrestre. El primer satélite, de carácter experimental, fue construido para demostrar la

[55] Para Meteosat sobre el meridiano 0° para adquirir imágenes de Europa y para el GOES sobre los meridianos 70° y 140°, enfocados hacia la costa Este y Oeste de EEUU.
[56] El plano de la órbita del satélite es aproximadamente perpendicular al plano del ecuador terrestre.

viabilidad de mapear y monitorear rasgos de la superficie de la Tierra a partir de imágenes orbitales. Este programa fue desarrollado con el objetivo de posibilitar la adquisición de imágenes de la superficie de la Tierra de manera global y repetitiva.

El primer satélite de esta serie fue lanzado el 23 de julio de 1972 con la denominación de ERTS-1. El 14 de enero de 1975 el nombre fue cambiado para LANDSAT –**LANDSAT**ellite–, y el 22 de enero fue lanzado el segundo satélite, entonces denominado LANDSAT-2.

De esta serie de satélites se tiene la Tabla IV.1. con el siguiente historial:

Satélite	Lanzamiento	Fin de operación	Sistemas sensores
ERTS-1	23 / julio/ 1972	05 / enero /1978	MSS y RBV
Landsat-2	22 / enero / 1975	27 / julio / 1983	MSS y RBV
Landsat -3	05 / marzo / 1978	07 / septiembre / 1983	MSS y RBV
Landsat -4	16 / julio / 1982	fin de 1983	MSS y TM
Landsat -5	01 / marzo / 1984	en operación	MSS y TM
[57]Landsat -6	03 / octubre / 1993	03 / octubre / 1993	ETM
Landsat -7	15 / abril / 1999	A la fecha	ETM +

Tabla IV.1. Historial de satélites Landsat.

IV.2.3.1.1. Landsat 1, 2 y 3.

Los tres primeros satélites de la serie LANDSAT (Tabla IV.2.) fueron construidos a partir de una modificación del satélite meteorológico NIMBUS. Tenían una órbita circular, casi polar, sincrónica con el sol, a una altura aproximada de 920 Km. Durante su período de operación, los satélites realizaban una órbita completa alrededor de la Tierra cada 103 minutos y 27 segundos, recubriendo 14 fajas de la superficie terrestre por día. La configuración de estos tres satélites fue concebida de modo que cada 18 días ellos pasaban sobre la misma región de la

[57] Nunca funcionó por fallas en el sistema.

superficie de la Tierra. El horario medio de pasada de los satélites por el Ecuador era a las 09:30, horario local.

Estos tres satélites llevaban a bordo dos sistemas sensores: RBV y MSS.

El **Sistema Return Beam Vidicon –RBV–** fue el primer sistema sensor a ser proyectado para obtener imágenes a bordo del LANDSAT. Era un sistema que observaba toda la escena registrada en forma instantánea, constituido por cámaras de televisión (tres en los LANDSAT 1 y 2 y dos en el LANDSAT 3), operaba en una faja comprendida entre el visible y el infrarrojo próximo del espectro electromagnético. La escena terrestre registrada por la cámara representaba un área de 185 Km. La resolución espacial de este sistema en los LANDSAT 1 y 2 era de 80 x 80 m, con tres bandas espectrales (verde, rojo e infrarrojo próximo) y en el LANDSAT 3 era de 40 x 40 m, con una banda espectral (pancromático).

Satélite	Cámaras (bandas)	Rango espectral (µm)	Aplicaciones
Landsat 1 y 2	1	0.475-0.575 (**verde**)	Diferenciación entre suelo y vegetación
	2	0.580-0.680 (**rojo**)	Mapeo de vegetación
	3	0.690-0.830 (**rojo**)	Delineamiento de cuerpos de agua.
Landsat 3	1	0.505-0.750 (pancromático)	Mapeo de áreas urbanas, vegetación, agricultura.

Tabla IV.2. Sistema RBV

Por su parte, el **Sistema Generador de Imágenes Multiespectral (Multispectral Scanner Subsystem) –MSS–** fue colocado a bordo del LANDSAT por insistencia de los investigadores del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, que querían ofrecer un sistema multiespectral para estudios agrícolas (Tabla IV.3.). Este sensor es un equipo de barrido óptico electrónico, que opera en cuatro bandas del espectro electromagnético, dos en el visible (bandas 4 y 5) y dos en el infrarrojo próximo (bandas 6 y 7). La escena terrestre observada por este sensor representaba un área de 185 Km. y la resolución espacial era de 80 x 80 m. En el LANDSAT 3 fue agregado un canal en la faja del infrarrojo termal (banda 8), cuya

resolución era de 240 m, que captaba la radiación emitida por los objetos terrestres.

Satélites	Bandas	Rangos espectrales (µm)	Aplicaciones
Landsat 1, 2, 3	4	0.5-0.6 (**verde**)	Uso del suelo, vegetación áreas urbanas, calidad del agua.
	5	0.6-0.7 (**rojo**)	Diferenciación de especies vegetales. Agricultura, calidad de agua áreas urbanas.
	6	0.7-0.8 (**infrarrojo** próximo)	Delineamiento de cuerpos de agua. Mapeo geológico. Mapeo geomorfológico. Áreas húmedas.
	7	0.8-1.1 (**infrarrojo** próximo)	Delineamiento de cuerpos de agua. Mapeo geológico. Mapeo geomorfológico. Áreas húmedas. Fuegos
Landsat 3	8	10.4-12.6 (**infrarrojo** térmico)	Corrientes marinas. Diferencias de temperatura de los objetos de la superficie terrestre.

Tabla IV.3. Sistema MSS

IV.2.3.1.2. Landsat 4 y 5.

Estos dos últimos satélites de la serie LANDSAT sufrieron algunas modificaciones tanto en la forma de la plataforma como en sus características orbitales. La altitud fue modificada de 920 Km. a 705 Km., la resolución temporal pasó de 18 días a 16 días, y el período orbital pasó de 103 minutos para 98.9 minutos. El horario medio de pasada por el Ecuador continuó siendo 09:30, horario local.

El Sistema **Thematic Mapper** –**TM**– tal como su antecesor, el MSS, es un sensor de barrido multiespectral avanzado, concebido para proporcionar una resolución espacial más fina, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación al sensor MSS. Opera simultáneamente en siete bandas espectrales (Tabla IV.4.), siendo tres en el visible, una en el infrarrojo próximo, dos en el

infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal. Tiene una resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo reflejado y 120 metros en la banda del infrarrojo termal. La escena terrestre registrada por este sensor es también de 185 km.

Bandas	Rango espectral (μm)	Aplicaciones
1	0.45-0.52(**azul**)	Mapeo de aguas costeras. Diferenciación entre suelo y vegetación. Diferenciación entre vegetación conífera y decidua.
2	0.52-0.60(**verde**)	Mapeo de vegetación. Calidad de agua
3	0.63-0.69 (**rojo**)	Absorción de la clorofila. Diferenciación de especies vegetales. Áreas urbanas, uso del suelo. Agricultura. Calidad de agua.
4	0.76-0.90(**infrarrojo** próximo)	Delineamiento de cuerpos de agua. Mapeo geomorfológico. Mapeo geológico. Áreas de incendios. Áreas húmedas. Agricultura. Vegetación.
5	1.55-1.75(**infrarrojo** medio)	Uso del suelo. Medidas de humedad de la vegetación. Diferenciación entre nubes y nieve. Agricultura. Vegetación.
6	10.40-12.50(**infrarrojo** térmico)	Mapeo de stress térmico en plantas. Corrientes marinas. Propiedades termales del suelo. Otros mapeos térmicos.
7	2.08-2.35(**infrarrojo** medio)	Identificación de minerales. Mapeo hidrotermal.

Tabla IV.4. Sistema TM

IV.2.3.1.3. Landsat 7.

El Landsat7 es el satélite operacional más reciente del programa Landsat, financiado por el gobierno de los Estados Unidos.

Opera desde el año 1999 con un nuevo sensor denominado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Su operación es administrada por la NASA; la producción y comercialización de imágenes depende de la USGS (United Sates Geological Survey).

El sensor **ETM+**, respecto a su precursor, el sensor TM, tiene algunas mejoras, tanto espaciales como radiométricas (tablas IV.5, IV.6. y IV.7.). El sensor ETM+ tiene una mayor resolución espacial en los canales térmicos, ya que pasa de los 120 metros en el TM a los 60 metros; además este sensor aunque mantiene los 30 metros de resolución en las bandas del visible e infrarrojo próximo y medio, incluye una banda pancromática con 15 metros de resolución.

Bandas	Rango espectral (µm)	Zona del espectro	Resolución del terreno (m)
1	0.45-0.515	Visible - Azul	30
2	0.525-0.605	Visible - Verde	30
3	0.63-0.690	Visible – Rojo	30
4	0.75-0.90	Infrarrojo próximo (Visible)	30
5	1.55-1.75	Infrarrojo medio	30
6	10.40-12.5	Infrarrojo Térmico	60
7	2.09-2.35	Infrarrojo medio	30
Pancromático	0.52-0.90	Prácticamente todo el visible	15

Tabla IV.5. Sistema ETM+

Haciendo un comparativo entre TM y ETM+, tenemos:

TM y ETM+ Bandas Espectrales								
Anchura de banda (µm) Mín-Max								
Sensor	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**	**B8**
TM	0.45-0.52	0.52-0.60	0.63-0.69	0.76-0.90	1.55-1.75	10.4-12.5	2.08-2.35	No existe
ETM+	0.45-0.52	0.53-0.61	0.63-0.69	0.78-0.90	1.55-1.75	10.4-12.5	2.09-2.35	0.52-0.90
Región	Azul	Verde	Rojo	IR próximo	IR medio	IR Térmico	IR medio	Visible

Tabla IV.6. Comparativo TM vs. ETM+

Y comparando sus características con los anteriores satélites de la serie, tenemos:

	LandSat 1-3	LandSat 4-6	LandSat 7
Altitud	907-915 Km.	705 Km.	705 Km.
Inclinación	99.2°	98.2°	98.2°
Órbita	Polar, heliosincrónica	Polar, heliosincrónica	Polar, heliosincrónica
Paso por el Ecuador	09h30 AM	09h30 AM	10h00 AM
Periodo de Revolución.	103 minutos	99 minutos	99 minutos

Tabla IV.7. Comparativo entre la serie Landsat.

Resulta conveniente recordar en este momento que para los fines de este trabajo se hará uso de imágenes correspondientes a las plataformas Landsat 5 (año 1993) y Landsat 7 (año 2000) de acuerdo a sus respectivos sensores.

IV.3. Uso y manejo de las imágenes.

Como parte central del presente trabajo está el tratamiento digital de las imágenes satelitales para la generación de las correspondientes en falso color (composición RGB de tres bandas) de acuerdo a usos convencionales existentes. Antes de abordar esta parte, conviene mencionar que para el análisis de las imágenes existen algunas ventajas al hacerlo visualmente que digitalmente, toda vez que de manera visual se pueden incorporar criterios complejos. Esto es, el tratamiento digital se basa fundamentalmente en la intensidad radiométrica de cada píxel, sin embargo, en el análisis visual se pueden utilizar elementos como textura, estructura, ubicación, etc., muy difíciles de definir en términos digitales. Por ejemplo, algunos cultivos de riego ofrecen una respuesta espectral muy parecida a los parques urbanos, ya que ambas cubiertas son muy similares, bastando incorporar un sencillo criterio visual como lo es el contexto geográfico para hacer la separación[58].

[58] En este contexto la inteligencia artificial pretende incorporar este tipo de criterios más complejos al tratamiento numérico de los datos, sin tener a la fecha un resultado absoluto.

Como se ha establecido, los sensores captan la respuesta espectral de los objetos para diferentes longitudes de onda. Esta respuesta espectral es convertida en señales eléctricas según su intensidad, las cuales serán almacenadas o transmitidas de forma digital para construir las imágenes. El proceso de manipulación computacional convierte los datos en una imagen, donde la restitución se realiza punto a punto y en líneas sucesivas que corresponden con el barrido del sensor sobre la superficie terrestre. De esta manera es posible conseguir imágenes de bandas cuya respuesta espectral escapa a nuestra capacidad visual o a las emulsiones actuales para fotografías en papel. El despliegue de cada una de las bandas, ofrece la oportunidad de visualización digital en niveles de gris (256 niveles), toda vez que cada dato numérico es almacenado en 8 bits. No obstante, estos valores numéricos también pueden combinarse para generar imágenes en color, utilizando tres bandas registradas por el sensor, a las que se les asignan las tablas de color creadas en una computadora para los colores primarios: azul, verde y rojo. Como resultado visual es una imagen en color, donde éste no necesariamente debe corresponderse con la realidad, denominando a estas imágenes como "falso color", aunque cabe señalar que la manipulación computacional y la elección apropiada de las bandas permiten obtener visualizaciones muy semejantes a las apreciadas por nuestros ojos. Para estas combinaciones tenemos entonces más de 16, 000,000 de niveles de color (2^{24}).

IV.3.1. Criterios visuales generales.

Entre las pautas visuales manejadas en teledetección espacial, algunas son comunes con la fotografía aérea, otras son propias de las imágenes espaciales, principalmente en lo que se refiere a la dimensión multiespectral y multitemporal de las observaciones, de las cuales existen severas limitaciones en la fotografía aérea.

Los criterios visuales deben manejarse con cuidado en imágenes de satélite, toda vez que las escalas de trabajo y la geometría de adquisición son diferentes a las utilizadas en fotografía aérea.

IV.3.1.1 Tono.

El tono hace referencia a la intensidad de energía recibida por el sensor para una determinada banda del espectro. Los píxeles con tonos oscuros indican aquellas áreas sobre las que el sensor detectó una débil radiancia, mientras las zonas claras son producto de una mayor intensidad. Es decir, el tono se relaciona estrechamente con el comportamiento espectral de las distintas cubiertas, para la banda en particular del espectro sobre la que se trabaje. Entonces, el tono característico de una cubierta varía con la banda del espectro considerada. Por ejemplo, una superficie ocupada por vegetación vigorosa ofrece tonos oscuros en las bandas visibles del espectro, particularmente en el azul y rojo como consecuencia de la alta absortividad de los pigmentos de la hoja en esas longitudes de onda. Contrariamente aparece en tonos claros si la imagen corresponde al infrarrojo cercano, por cuanto en esa región del espectro, la hoja sana ofrece una elevada reflectividad (Figura IV.19).
Con mayor experiencia se pueden ubicar las bandas más adecuadas para reconocer ciertos rasgos de interés como: traza urbana (verde-rojo), turbidez del agua (azul), delimitación tierra/agua (infrarrojo cercano), etc.

Como ya hemos revisado, la mayoría de los satélites de recursos naturales cuentan con sensores de alta resolución radiométrica. En la imagen original se distinguen hasta 256 niveles de intensidad –tonos de gris– cada una de las bandas del espectro sobre las que se adquiere la información. Es importante comentar que el ojo humano no es capaz de distinguir tantos niveles de gris lo que implica una menor sensibilidad visual para reconocer cubiertas, por lo que el análisis visual siempre es menos preciso que el digital para diferenciar contrastes de intensidad presentes en la imagen.

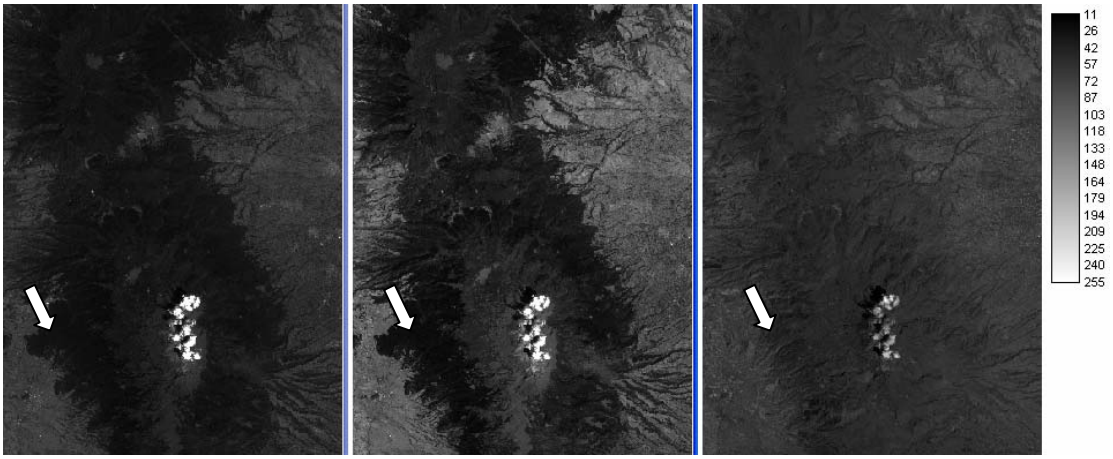


Figura IV.19. Tonos que ofrecen las bandas azul, rojo e infrarrojo cercano respectivamente. Las flechas indican superficies con vegetación. (Sensor ETM+ .Landsat 7, 21 de marzo de 2000. Fuente:INEGI).

IV.3.1.2 Color.

Para avanzar en el estudio del color, afortunadamente, no necesitamos una comprensión total de los aspectos biológicos integrados en nuestro sistema ojo-cerebro. Es suficiente con desarrollar un modelo reducido que dé cuenta, con sentido práctico, de las operaciones básicas necesarias para la visión cromática.
Como ya es bien sabido, el color que aprecian nuestros ojos es resultado de la reflectividad selectiva de los objetos a distintas longitudes de onda. Aquellas superficies con alta reflectividad en longitudes de onda corta y baja en el resto, aparecen en color azul, mientras que se presentan en rojo si absorben longitudes de onda cortas y reflejan las largas. Nuestro ojo sólo percibe longitudes de onda comprendidas entre 0.4 y 0.7 μm, separando la energía recibida en tres componentes de acuerdo a la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras, estos tres componentes son los denominados colores primarios: azul, verde y rojo; a partir de los cuales puede construirse cualquier color del arco iris[59].

[59] Gracias a Newton (1642-1727) sabemos que la luz blanca al descomponerse origina los siete colores del espectro visible: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul cian, azul y violeta. La suma de todos los colores del espectro luminoso recompone la luz blanca

Una impresión similar al color se obtiene con cualquier instrumento que permita separar esas tres bandas del espectro, aplicando a cada una alguno de los tres colores elementales. Éste es el criterio que se sigue para generar composiciones en color, en donde se aplican los colores primarios a tres bandas captadas por el sensor, en el orden y criterio que se estime más oportuno. Si el sensor capta información sobre las bandas del espectro azul, verde y rojo, puede obtenerse una composición en color natural (Figura IV.20), cualquier otra será denominada falso color, es decir, la composición coloreada no se ajusta a los colores que aprecian nuestros sentidos, aunque suele suceder que sean más interesantes desde el punto de vista interpretativo.

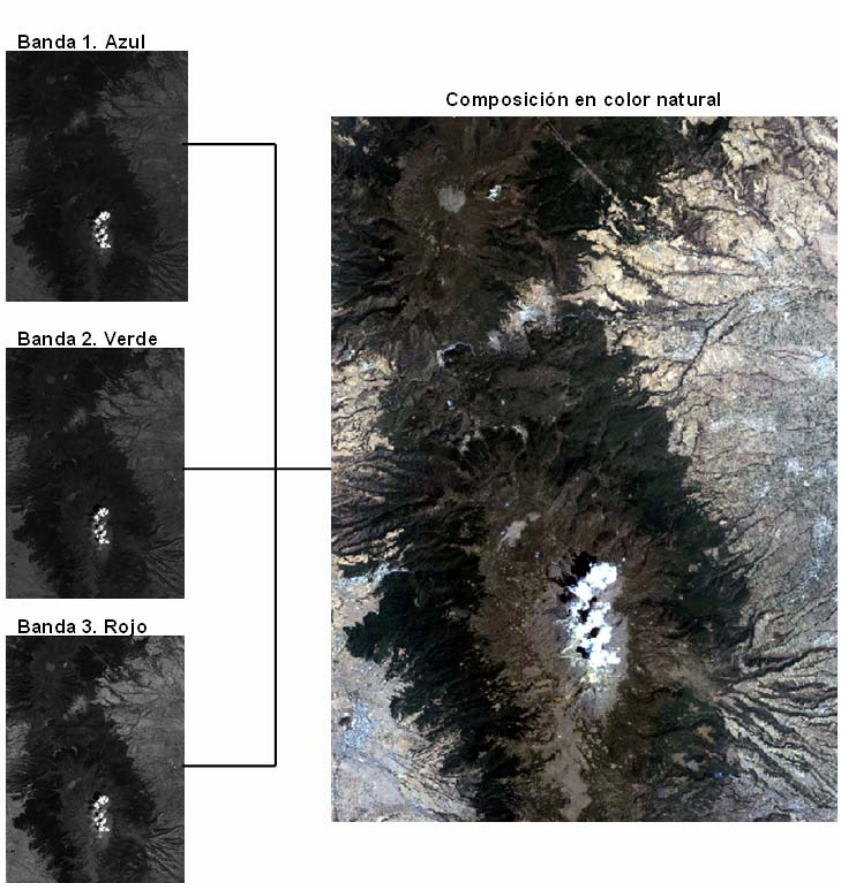
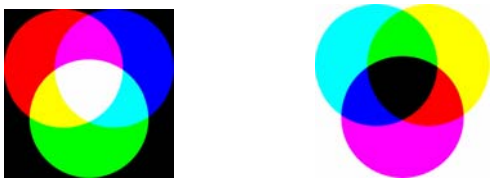


Figura IV.20. Composición en color natural (Landsat 7 ETM+, 21 de marzo de 2000. Fuente: INEGI).

La mezcla de tres bandas espectrales en una composición en color puede conseguirse de acuerdo a dos procesos denominados aditivo y sustractivo. En el

primero, cualquier color se obtiene por la suma de los tres colores elementales: azul, verde y rojo. La suma de dos colores primarios permite lograr un color complementario: azul + verde = cian; azul + rojo = magenta y verde + rojo = amarillo, mientras que los tres suman el blanco (Figura IV.21.a). Contrariamente el proceso sustractivo se basa en la absorción de la luz que ejercen los colores complementarios: el cian absorbe la luz roja, el magenta absorbe el verde y el amarillo el azul. Los tres en combinación generan por lógica el negro (Figura IV.21.b).

El proceso aditivo es el utilizado en los sistemas electrónicos de visualización cuando la imagen se presenta en un monitor de rayos catódicos. Este es el proceso habitual en un equipo de tratamiento digital de imágenes. Por otra parte, el proceso sustractivo se emplea en la reproducción mecánica del color, típica de las artes gráficas.



a) b)

Figura IV.21. Proceso de formación de color: a) aditivo; b) Sustractivo

Entre las múltiples combinaciones de color que se han utilizado en el análisis visual, la más destacada es la denominada falso color o infrarrojo color. Se obtiene desplazando hacia longitudes de onda más largas las bandas del espectro visible. En lugar de aplicar los colores azul, verde y rojo a sus respectivas bandas del espectro, se aplican las bandas verde (V), rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) respectivamente. Con esto, se origina una clave de color nueva —extraña a nuestra forma habitual con la que apreciamos el color— de gran valor temático (Figura IV.22). Su pródiga utilización se relaciona con la resolución espectral de la mayor parte de los sensores espaciales, sobre todo si consideramos que desde el inicio de la serie Landsat, para el sensor MSS sólo era posible esta

composición, al no captar información en otras bandas del espectro. Este es el caso también de los sensores instalados en los satélites SPOT, MOS o IRS, por lo que sigue siendo la composición multibanda más frecuente.

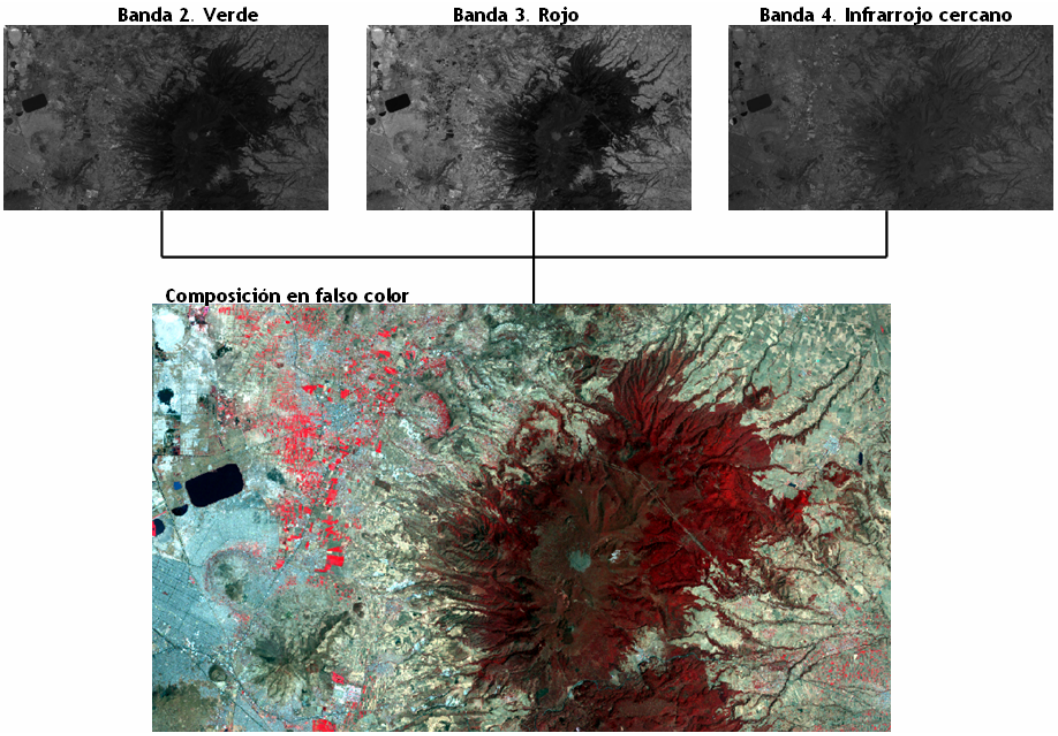


Figura IV.22. Composición en falso color. (Landsat 7 ETM+, 21 de marzo de 2000. Fuente: INEGI).

Resulta entonces conveniente hacer una descripción general del significado de los colores en esta composición de falso color, siendo las tonalidades más habituales como sigue:

- Rojo-magenta: Vegetación vigorosa, como cultivos de riego, prados de montaña o bosques caducifolios[60] en imágenes en verano. El estudio

[60] Se refiere a los árboles o arbustos que pierden su follaje durante una parte del año, la cual coincide en la mayoría de los casos con la llegada de la época desfavorable, la estación más fría en los climas templados o polares. Sin embargo, algunos pierden el follaje durante la época seca del año en los climas áridos.

detallado de la intensidad y saturación[61] del rojo permite identificar diversas cubiertas vegetales, así como su ciclo de crecimiento y vigor.

- Rosa: Muestra áreas vegetales menos densas y/o vegetación en temprano estado de crecimiento. Las áreas suburbanas en torno a las grandes ciudades, con pequeños jardines y árboles dispersos, suelen aparecer en este color.
- Blanco: Área de escasa o nula vegetación y de máxima reflectividad como nubes, arenas, depósitos salinos, canteras, suelos desnudos.
- Azul oscuro a negro: Superficies cubiertas total o parcialmente por agua como ríos, canales, lagos, embalses. En zonas volcánicas los tonos negros pueden identificar flujos de lava.
- Gris a azul metálico: Ciudades o áreas pobladas. Puede tratarse de roca desnuda.
- Marrón: Vegetación arbustiva[62], muy variable en función de la densidad y del tono del sustrato[63]. Los tonos más oscuros indican presencia de material paleozoico como las pizarras[64], y por otro lado, los matorrales calcícolas[65], menos densos normalmente, ofrecen una coloración más clara.
- Beige-dorado: Zonas de transición como prados secos.

Una vez que se empezaron a adquirir imágenes del sensor TM (actualmente ETM+), se abrió la posibilidad de diseñar nuevas composiciones. Esto por la inclusión de la banda azul (A) que como hemos visto, permite generar imágenes compuestas en color natural. Por otro lado, sus nuevas bandas en el infrarrojo amplían notablemente la posibilidad de combinar información entre bandas. Ante esto, varios investigadores se han dado a la tarea de establecer algún indicador –más o menos objetivo– que ayude a seleccionar las bandas más idóneas para

[61] Se dice que un color está saturado cuando, al agregarle negro o blanco, llega a su límite tonal máximo, pero sin traspasar la frontera que lo transformaría en otro color o simplemente en negro o blanco.
[62] Planta leñosa de cierto porte cuando, a diferencia de lo que es propio de un árbol, no se yergue sobre un solo tronco, sino que se ramifica desde la misma base. Los arbustos pueden medir varios metros.
[63] Cubierta base sobre la que se desarrolla la vegetación.
[64] Roca homogénea formada por la compactación de arcillas.
[65] Comunidad de arbustos sobre suelos con gran cantidad de roca calcárea.

una composición en color. Los criterios más estudiados son del tipo estadístico: análisis de componentes principales, índice óptimo de máxima variación y obtención de los ejes del elipsoide de variación; de los cuales se hará mención más adelante.

En el campo del análisis visual, también se han realizado ensayos para identificar la composición de color que ofrece una mejor discriminación de superficies o cubiertas. Estos ensayos consisten en elegir algunos intérpretes con distintos grados de experiencia para cuantificar el número de cubiertas que discriminan en distintas composiciones en color. Para el caso de Landsat TM (y en consecuencia del ETM+) las combinaciones más establecidas incluyen una banda del espectro visible, otra del infrarrojo cercano y otra del medio. El orden habitual es aplicar el color rojo al infrarrojo cercano (banda 4), el verde al infrarrojo medio (banda 5) o al rojo (banda 3), y el azul al rojo (banda 3) o verde (banda 2). Estos resultados son muy similares a los obtenidos por técnicas estadísticas[66]. Pese al interés de las nuevas composiciones, sigue vigente el protagonismo de la composición en falso color tradicional (IRC, R, V), ya que es la única disponible en la mayor parte de los sensores de interés medio ambiental, además de que discrimina adecuadamente las cubiertas vegetales.

IV.3.1.3 Textura.

La textura se refiere a la aparente rugosidad o suavidad de una región de la imagen, es decir, al contraste espacial entre los elementos que la componen (Figura IV.23). Procede de la relación entre el tamaño de los objetos y la resolución del sensor, es decir, la variación de contraste entre los píxeles vecinos de una imagen. Se puede imaginar cuantitativamente que aquellos píxeles que tiene un valor alto forman una cresta y que los que tienen un valor bajo forman un valle, de tal manera que puede establecerse una analogía clara entre la rugosidad de una tela y esta "rugosidad" imaginaria de la imagen digital.

[66] Hord, 1986.

Entonces, se puede decir que existen tres elementos objetivos en el concepto de textura, y es que ésta depende de:

- La frecuencia de cambio de los tonos en los píxeles.
- De la dirección o direcciones de cambio.
- Del contraste entre un píxel y sus vecinos.

Además del tamaño de los objetos que forman una cubierta determinada, la textura con la que aparecen en una imagen generalmente varía en función de diversos factores, que entre los más importantes están el ángulo de observación del sensor (observaciones más agudas incrementan la rugosidad), las condiciones de iluminación (a ángulos solares más bajos el efecto de sombras es más evidente) y la longitud de onda (una superficie lisa a longitudes de onda largas puede aparecer como rugosa en cortas). Definitivamente en el espectro visible e infrarrojo cercano la rugosidad se modifica principalmente en función de las condiciones de iluminación solar.

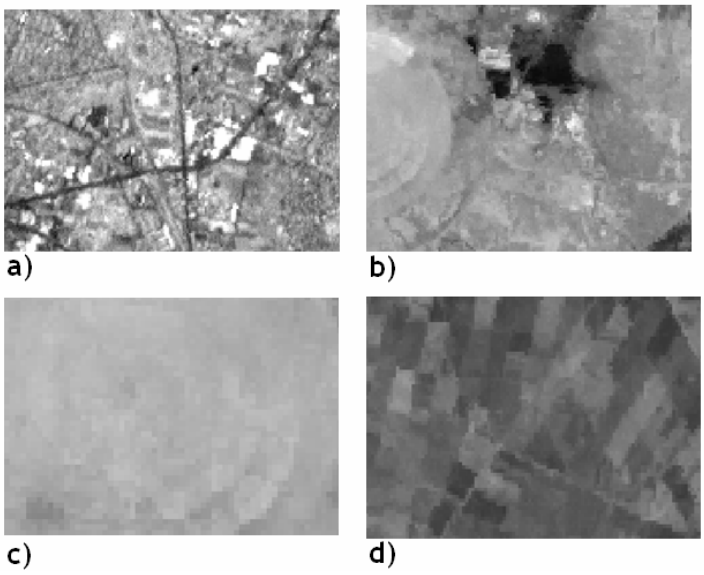


Figura IV.23. Fragmentos de imagen mostrando distintas texturas: a) Muy rugosa correspondiente a una zona urbana; b) Medianamente rugosa, se alternan espacios construidos, cuerpos de agua, suelo descubierto, entre otros.; c) Muy lisas, suelo homogéneo; d) Medianamente lisa, zona de cultivo de temporal. (Landsat 7 ETM+, 21 de marzo de 2000. Fuente: INEGI).

IV.3.1.4 Contexto espacial.

Indica la localización de las cubiertas de interés en relación con los elementos vecinos en la imagen.

Un ejemplo de este criterio lo es un parque urbano con áreas verdes que en la composición en falso color (infrarrojo color) tiende a presentar un tono, un color y una textura similar a los que ofrece el cultivo de riego (Figura IV.24). Es fácil separarlas aplicando visualmente el entorno geográfico: aquellas que aparezcan en el interior de una zona urbana corresponden a un parque (jardín), mientras que las que se sitúen en un contexto agrícola corresponden a cultivo de riego.



Figura IV.24. El criterio de contexto espacial. Composición en falso color. (Landsat 7 ETM+, 21 de marzo de 2000. Fuente: INEGI).

IV.3.1.5 Periodo de adquisición.

Las características orbitales de un satélite permiten que las imágenes sean adquiridas periódicamente y en condiciones similares de observación, facilitando

los estudios que requieran una dimensión temporal. Este análisis temporal se ha abordado con una doble orientación:

- Con el objeto de detectar cambios entre dos fechas de referencia, deduciendo así la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre ese medio, así como la búsqueda de soluciones (Figura IV.25).
- Para perfeccionar la interpretación de la imagen gracias a incorporar información sobre el ciclo estacional de las cubiertas vegetales.

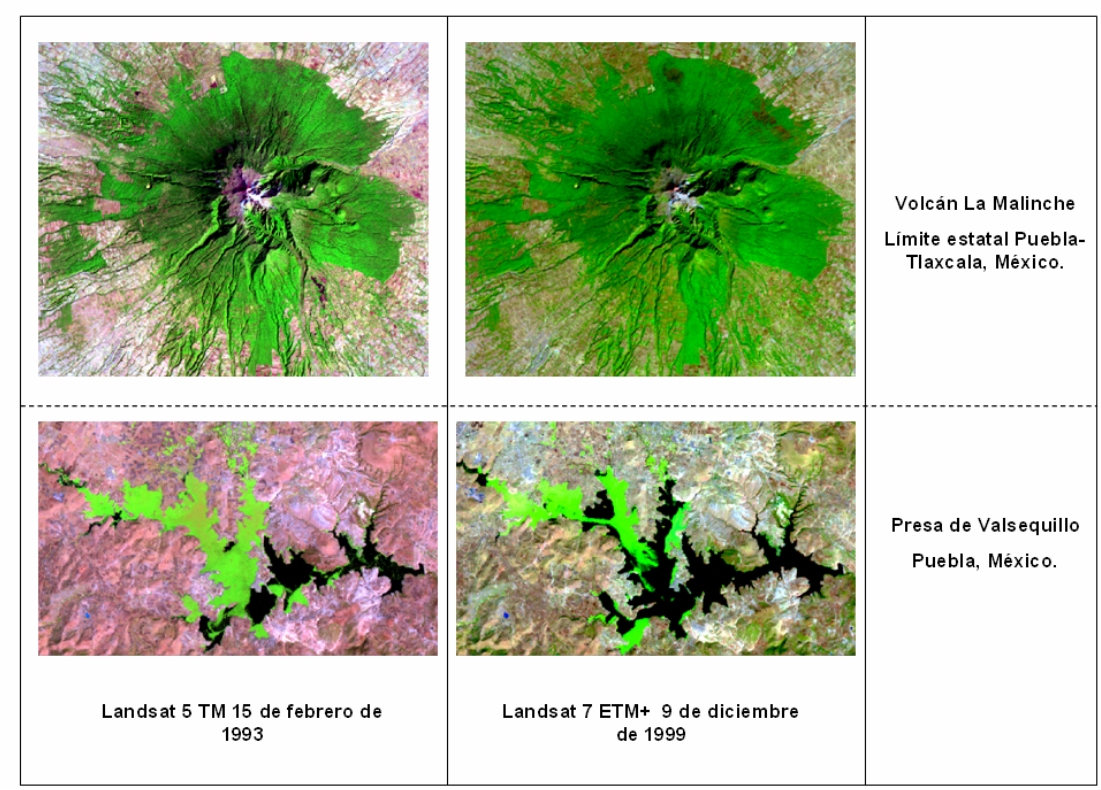


Figura IV.25. Comparación multitemporal. Imagen compuesta en falso color (RGB) bandas 5, 4 y 3 respectivamente. Llama la atención la abundancia de lirio sobre el cuerpo de agua de la presa de Valsequillo. Fuente:INEGI

IV.3.1.6 Otros criterios.

Se considera que los criterios antes descritos son los más relevantes para el análisis visual de la imagen, sin embargo, es conveniente mencionar algunos otros que enriquecen la interpretación:

- Sombras. Muy dependientes de la fecha de adquisición de la imagen y del relieve local. Permite realzar los rasgos geomorfológicos y de la textura de la imagen, especialmente en las zonas forestales.
- Patrón espacial. Indica una organización peculiar de los objetos que forman una determinada cubierta. Puede permitirnos identificar algunas cubiertas artificiales como plantaciones forestales que presentan una alternancia de caminos/generación bastante particular.
- Contorno (forma). Facilita el reconocimiento de algunos rasgos como vías de comunicación carretara vs. vía férrea, o de canales artificiales frente a ríos (los primeros ofrecen rasgos más geométricos).
- Tamaño. Está marcado por la resolución espacial de la imagen. En las de mayor resolución se pueden distinguir objetos particulares, mientras que en las de menor detalle esta distinción es menos útil.

Los criterios de identificación visual hasta acá revisados, suelen agruparse jerárquicamente en función de su grado de complejidad y de las variables que consideran, como se muestra en la Figura IV.26.

El tono y color son los criterios más elementales –ya que caracterizan espectralmente a una cubierta–. La forma, tamaño y textura tienen que ver con las propiedades espaciales de los objetos. La sombra y el patrón espacial con los objetos circundantes. Finalmente, la dimensión temporal hace referencia a la evolución estacional de las cubiertas.

IV.3.2. Tratamiento digital de las imágenes.

Antes de seguir avanzando, es pertinente comentar que en cuanto al tratamiento digital de las imágenes de satélite se tiene un amplio abanico de posibilidades de acuerdo a múltiples aplicaciones; no obstante, tratar de abarcar todas en el presente trabajo sería inapropiado para alcanzar los objetivos planteados, razón por la cual este apartado está remitido principalmente a los realces más usados

sin dejar de mencionar aquellos procesos que por su relevancia no deban pasarse por alto.

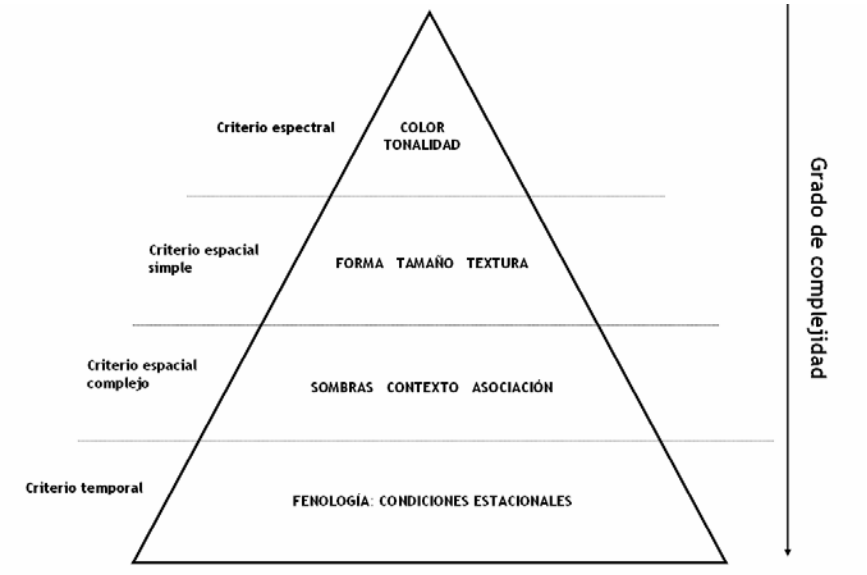


Figura IV.26. Jerarquías de los criterios de interpretación visual.

IV.3.2.1. La matriz de datos en una imagen.

Como se sabe, en los sistemas fotográficos la energía procedente de los objetos se registra sobre una superficie sensible a la luz, la cual puede componerse de una o varias capas, formando respectivamente una película pancromática o en color. Para los equipos óptico-electrónicos no existe esa superficie sólida de grabación. El sensor explora secuencialmente la superficie de la Tierra adquiriendo a intervalos regulares la radiación proveniente de los objetos situados sobre ella. La radiancia recibida está en función de las características de la fracción de terreno que observa el sensor en cada instante y el tamaño de esa superficie estará en función de la resolución espacial del sensor. Cada una de estas porciones territoriales —que constituyen la unidad mínima de información en la imagen— se denomina píxel (del inglés *picture element*, elemento pictórico). De manera coloquial podemos decir que un píxel es cada uno de los pequeños cuadros que forman una imagen (Figura IV.27). El color con el que

aparece cada píxel en el monitor, se define por un valor numérico, que codifica digitalmente la radiancia detectada por el sensor para esa unidad de observación y esa banda espectral. Este valor numérico es denominado **Nivel Digital**[67] (**ND**).

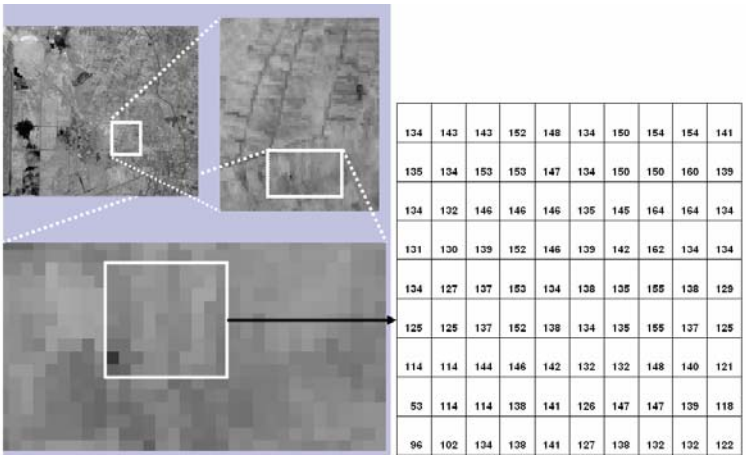


Figura IV.27. Matriz de datos y píxel. (Landsat 7 ETM+ fracción de banda 5; 21 de marzo de 2000. Fuente:INEGI)

Cuando se visualiza un píxel, generalmente la intensidad de color con la que aparece en el monitor depende de su ND almacenado, aunque como veremos más adelante, no tienen por qué ser iguales. En este sentido es conveniente distinguir entre el ND de cada píxel y su nivel visual (NV) que corresponde a la intensidad de color con que se visualiza ese píxel en el monitor. Regularmente, los NV son temporales ya que solo se utilizan para fines de realce e interpretación visual de la imagen, mientras que los ND son la base para la interpretación digital, principalmente cuando se intenta relacionar la información adquirida por el sensor con algún parámetro físico como la temperatura.

La organización de los datos en una imagen digital se ilustra en la Figura IV.28. Se trata de una matriz numérica de tres dimensiones. Las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen y la tercera indica la dimensión espectral. La orientación Norte-Sur se obtiene variando los renglones

[67] El nombre se justifica por tratarse de un valor numérico, no visual, pero que se traduce fácilmente a una intensidad visual (o nivel de gris) mediante cualquier convertidor digital-analógico como un monitor de visualización. El ND se conoce con distintos nombres en la bibliografía anglosajona: Digital Number, Pixel Value, Brightness Value, Grey Level o Digital Count.

(filas) que normalmente se les denomina líneas, mientras que el recorrido en el sentido de las columnas indica la disposición Oeste-Este de la imagen.

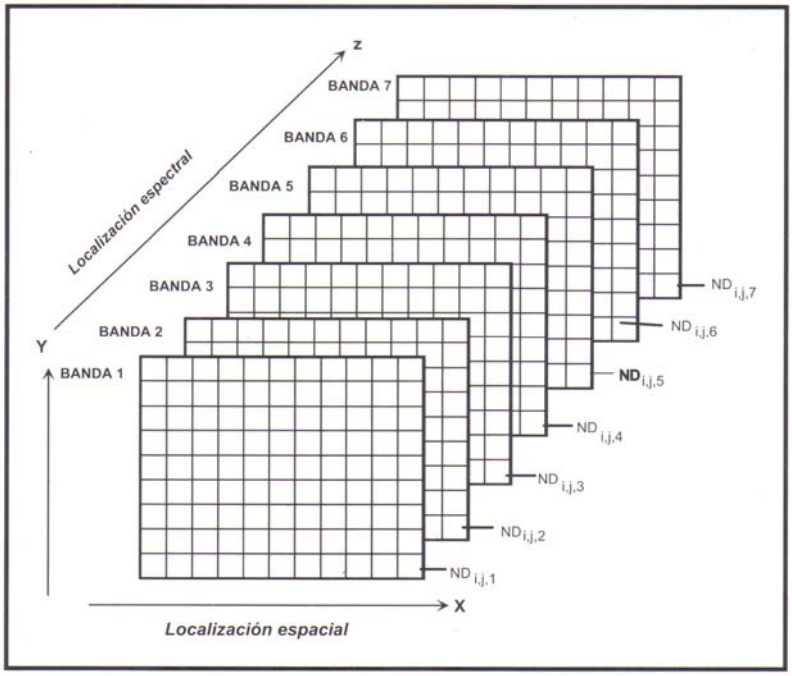


Figura IV.28. Organización de los datos en una imagen.

En esta matriz, el origen de las coordenadas se encuentra en la esquina superior izquierda, en vez de encontrarse en la esquina inferior izquierda como en cualquier eje cartesiano. Esto se debe a la secuencia de adquisición de imágenes de Norte a Sur, de acuerdo a la traza del satélite. Como se dijo, la tercera dimensión se refiere a la resolución espectral del sensor. Habrá tantos planos en la imagen como bandas originalmente detectadas: 8 para el ETM+, 7 para el TM, 36 para el MODIS, 5 para AVHRR, entre otros.

IV.3.2.2. Formatos de almacenamiento.

Los ND de una imagen –independientemente del soporte físico– se graban como es de esperarse en código binario. La mayor parte de los sensores utilizan grupos de 8 bits para almacenar el ND correspondiente a cada píxel, esto es, cada píxel se define por un byte, lo que equivale a un rango de 256 niveles (2^8). El acceso a las imágenes se simplifica notablemente ya que el rango mencionado es

también el admitido prácticamente por la totalidad de equipos de tratamiento digital. En casos como el del sensor NOAA-AVHRR, la información se codifica en 1024 niveles (10 bits) por lo que se requiere una labor previa de compresión de datos para su visualización en pantalla.

Generalmente cada imagen incluye un archivo de *cabecera* (*header file*), en donde se almacena el formato con el que están grabados los ND que la componen, así como otras características entre las que se encuentran: tipo de sensor, localización de la escena, día, elevación y acimut solar. Los registros son de tamaño variable dependiendo del tipo de archivo y a su correspondiente organización de los datos. Los tres formatos más extendidos son (Figura IV.29):

- Bandas secuenciales (BSQ, *Band Sequential*). Los ND de cada banda se disponen uno a uno a continuación del otro hasta completar todos los píxeles que la forman. Tras ellos, se encuentran los ND de la siguiente banda y así sucesivamente hasta completar todas las bandas espectrales de la imagen. Entre banda y banda se inserta un archivo de cola y otro de cabecera para identificar la región del espectro que corresponde.
- Bandas intercaladas por línea (BIL, *Band Interleaved by Line*). En este formato los ND se organizan por líneas en lugar de por bandas, colocándose consecutivamente los correspondientes a todas las bandas, para cada línea antes de comenzar la siguiente. Después de los ND de la línea 1 banda 1, se colocan los de la línea 1 banda 2, continuando con las línea 1 de la banda 3, etc., hasta completar el total de líneas y el total de bandas
- Bandas intercaladas por píxel (BIP, *Band Interleaved by píxel)*. En vez de alternar los ND en cada línea, se alternan en cada píxel. Tras el ND correspondiente al píxel de la línea 1 columna 1 banda 1, aparece el correspondiente a la línea 1 columna 1 banda 2, seguido del correspondiente a la línea 1 columna 1 banda 3, hasta concluir con toda la imagen. Actualmente este formato es poco frecuente.

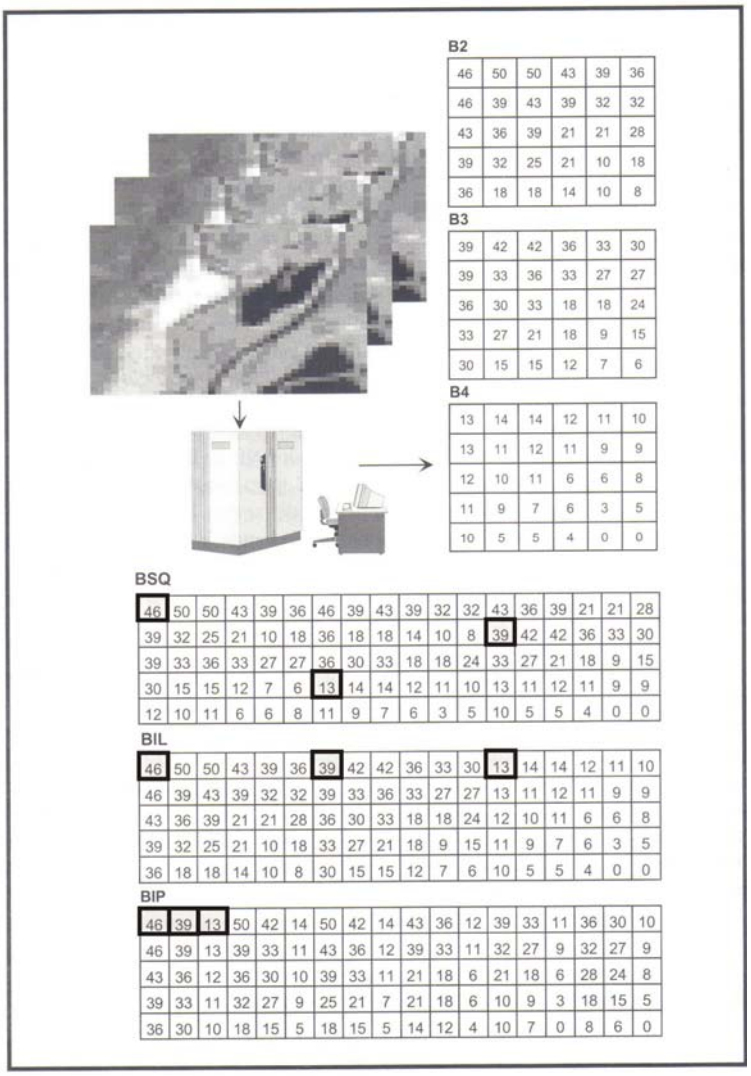


Figura IV.29. Formatos de almacenamiento de una imagen. Los píxeles remarcados indican el inicio de una nueva banda.

IV.3.2.3. Medios físicos de almacenamiento de una imagen.

Uno de los medios más utilizado hasta hace poco, para almacenamiento de imágenes de satélite, es la cinta magnética; el cual es un soporte más o menos barato, estándar y muy apropiado para almacenar un volumen considerable de información. Las imágenes solían distribuirse en cintas de 9 pistas (*tracks*) con una longitud variable entre 2400 y 3600 pies, teniendo una capacidad máxima de 100 Mb. Los principales problemas de este medio son su acceso secuencial –que ralentiza el acceso a los datos sobre todo si consideramos los formatos de

almacenamiento de las imágenes–, el alto costo de los equipos lectores y su escasa densidad de almacenamiento frente a los actuales tecnologías disponibles. Esta dificultad es común a otros sistemas magnéticos más novedosos como las cintas Exabyte de 8 ó 4 mm que son muy comunes para estaciones de trabajo, pudiendo almacenar varios Gigabytes (Gb): una cinta de 8 mm y 112m/367feet tiene una capacidad de almacenamiento en alta densidad de 5.0 Gb, mientras que una cinta de 4 mm 150m/492feet tiene una capacidad de 20 Gb en modo nativo (sin compresión) y de 40 Gb en modo comprimido.

El desarrollo de los sistemas de grabación óptico-electrónicos ha facilitado la distribución de imágenes. Es muy común el uso de CD-ROM que es un sistema muy compacto y estándar de grabación, como sabemos actualmente su capacidad se encuentra en los 700 Mb. De cada vez mayor uso está el DVD cuyas capacidades de almacenamiento varían dependiendo de sus características, aun que podemos decir que el más extendido es de 4.7 Gb.

IV.3.2.4. Servicios fundamentales de visualización.

Una de las principales características de un equipo de tratamiento digital es la capacidad para la visualización de las imágenes y de las herramientas que ofrece el sistema para interactuar con el monitor gráfico.

Entre los más usuales servicios de visualización están:

- Conversión digital-analógica de los ND almacenados en la imagen, lo que permite su representación en el monitor gráfico. Baste decir que en general este proceso convierte un valor numérico (el ND) de cada píxel en una señal analógica que se transmite a un tubo de rayos catódicos (CRT) para su representación visual. Con el objeto de que la imagen permanezca en el monitor, existe un dispositivo intermedio denominado memoria gráfica o de refresco que almacena temporalmente los ND visualizados hasta que se envíe una nueva imagen al monitor. Entonces se produce un barrido del tubo de la imagen a un ritmo suficientemente alto para que no se aprecie por el ojo humano. Sin embargo, actualmente el mercado de

monitores consta principalmente de otra tecnología: monitores LCD[68] (Pantalla de cristal líquido). Una pantalla LCD está formada por dos filtros polarizantes con filas de cristales líquidos alineadas perpendicularmente entre sí, de modo que al aplicar o dejar de aplicar una corriente eléctrica a los filtros, se consigue que la luz pase o no pase a través de ellos, según el segundo filtro bloquee o no el paso de la luz que ha atravesado el primero. El COLOR se consigue añadiendo 3 filtros adicionales de color (uno rojo, uno verde, uno azul). Sin embargo, para la reproducción de varias tonalidades de color, se deben aplicar diferentes niveles de brillo intermedios entre luz y no-luz, lo cual se consigue con variaciones en el voltaje que se aplica a los filtros. Las variaciones de voltaje de las pantallas LCD, que es lo que genera los tonos de color, regularmente permiten 64 niveles por cada color (6 bits) frente a los 256 niveles (8 bits) de los monitores CRT, por lo que con tres colores se consiguen un máximo de 262,144 colores diferentes (18 bits) frente a los 16,777,216 colores (24 bits) de los monitores CRT.

- Obtención de coordenadas. De manera muy sencilla con la ayuda del ratón electrónico se pueden conocer las coordenadas de distintos sitios de interés mediante un cursor gráfico, normalmente en forma de cruz o de flecha.
- Cambios de escala. Consiste en ampliar o reducir la imagen visualizada para verla con mayor o menor detalle. Para los monitores CRT la memoria de refresco juega un papel importante, ya que la imagen se obtiene de manera casi instantánea, lo que facilita la interacción con el usuario. Al aumentar el tamaño de la imagen, es posible el desplazamiento sobre la imagen a esa nueva "escala" facilitando la localización de zonas de interés.

IV.3.2.5. Cálculo de estadísticas básicas e histograma de una imagen.

[68] Existen variantes como las pantallas de plasma, las pantallas de emisión de campo (FED), Thin CRT, pantallas LEP, pantallas DLP, etc.

De manera similar a cualquier variable estadística la operación más elemental que se realiza sobre una imagen es describir su tendencia central y dispersión. Es decir, conocer la tendencia general de la radiancia en cada banda y qué nivel de homogeneidad existe entre los píxeles que la componen. Actualmente, cualquier programa de tratamiento digital de imágenes facilita el cálculo de estadísticas elementales. De acuerdo a la estadística descriptiva, la media podemos calcularla mediante la ecuación IV.13.:

$$\overline{ND_k} = \frac{\sum_{i=1}^{n} ND_{i,k}}{n_k} \qquad \text{Ec. IV.13}$$

Para las *k* bandas que conforman la imagen y los *n* píxeles que la componen.
La desviación típica (estándar) la calculamos como se indica en la ecuación IV.14.:

$$S_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(ND_{i,k} - \overline{ND_k}\right)^2}{n_k}} \qquad \text{Ec. IV.14}$$

Estas medidas son una primera valoración sobre el carácter y grado de homogeneidad de cada una de las bandas[69].
Las correspondientes a la imagen path[70] 25 row 47 en donde se encuentra la mayor parte de la ciudad de Puebla se muestran en la Tabla IV.8.

# de banda	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica
1	36	255	66.3924	12.8929
2	21	255	53.4173	14.8666
3	13	255	57.9438	23.7244
4	11	255	80.2331	19.6743
5	7	255	83.4223	27.0995
7	1	255	57.9014	23.7490

Tabla IV.8. Estadísticas elementales de la imagen Landsat 7 ETM+ Path-Row 25-47 09-dic-99. Fuente:INEGI.

[69] Jensen, 1996; Richards,1993.
[70] Recordar del capítulo III que el path-row es el índice de cobertura territorial del satélite.

De dicha tabla podemos afirmar que la banda 1 ofrece –entre las ópticas– el mayor desplazamiento de sus ND mínimos, lo que puede deberse al efecto de la dispersión atmosférica[71]. Se percibe en todas las bandas una saturación importante a juzgar por sus valores mínimos y máximos muy próximos a 0 y 255 respectivamente. La banda 5 presenta la mayor heterogeneidad con una desviación típica de 27.0995; por su parte la banda 1 ofrece la menor dispersión con una desviación típica de 12.8929 y un rango de 219 ND. Estos valores se relacionan con los parámetros del sensor. Como se ve, la banda 5 es la más sensible a las alteraciones de la radiancia y la banda 1 ofrece el peor contraste para esta escena toda vez que el rango de sus ND es el menor y también con la menor desviación estándar (menor heterogeneidad).

También resulta de gran interés contar con el histograma de frecuencias de cada banda, que nos muestra la distribución de los ND en una imagen. En algunos programas de tratamiento digital de imágenes, las frecuencias absolutas suelen convertirse a relativas, de acuerdo a la ecuación IV.15. Es decir, la frecuencia de un valor ND se calcula como el cociente entre el número de píxeles que presentan ese valor y el total de píxeles de la imagen. Esa proporción sirve para escalar el histograma a partir de la frecuencia relativa mayor.

$$FR(ND_i) = \frac{F(ND_i)}{\sum[F(ND_i)]} = 100 \qquad \text{Ec. IV.15}$$

Es común entre varios autores el resaltar la importancia del histograma para una primera valoración de la imagen. Nos permite deducir los tonos dominantes de cada banda; su anchura está relacionada con el contraste, la presencia de picos puede ser síntoma de ciertas clases de superficie.

[71] Del apartado 4.2.3.7. sabemos que la dispersión Rayleigh, -la más común- afecta principalmente a las longitudes de onda más cortas.

Para el caso de la imagen Landsat 7 ETM+ Path-Row 25-47 del 9 de diciembre de 1999 (Figura IV.30.), los histogramas de las bandas 1, 2, 4, y 5 (Figura IV.31) nos permiten comentar algunos datos interesantes.

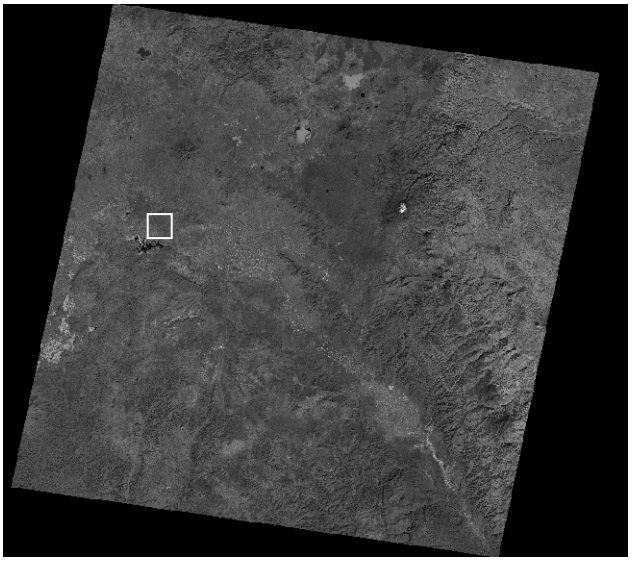
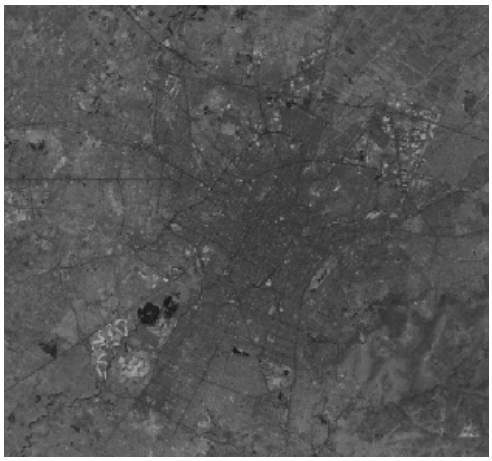


Figura IV.30. Banda 4 de la imagen Landsat 7 ETM+ Path-Row 25-47. Fuente: INEGI.

Las bandas de las escenas se presentan con un área útil de la imagen (tonos de gris) y un área con píxeles en color negro derivado de las transformaciones geométricas que se realizan a la imagen después de su toma para su georreferenciación.



Acercamiento de la ciudad de Puebla.

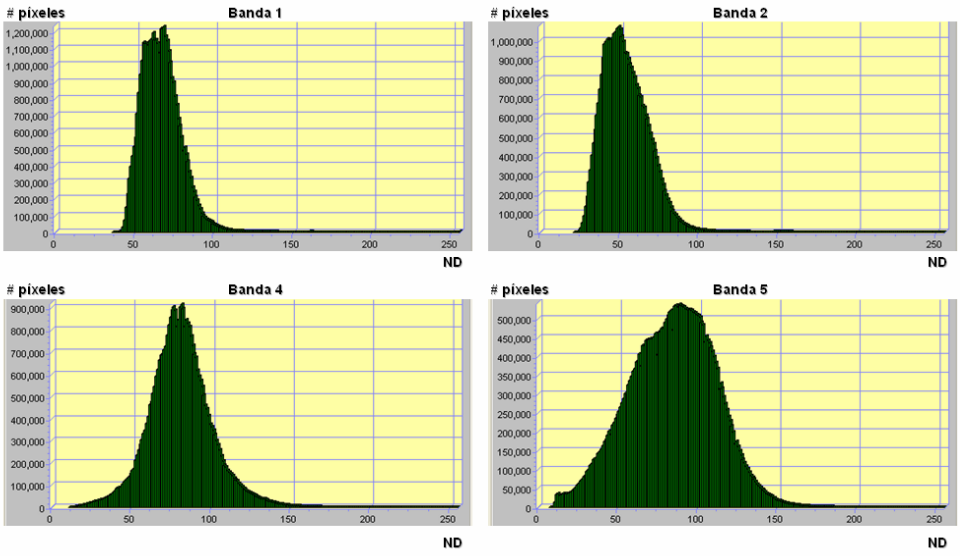


Figura IV.31. Histogramas de las bandas 1, 2, 4 y 5 de la escena 25-47 Landsat ETM+ Fecha: 9 de diciembre de 1999.

Se observa que todos los histogramas ocupan un margen reducido del rango de variación del sensor (0 a 255). Es decir, para mejorar el contraste se deberá ajustar dicho rango al máximo permitido. La banda 5 ofrece la mayor dispersión de valores (desviación estándar más alta; ver Tabla IV.8), en tanto que la banda 1 presenta un histograma más estrecho.

IV.3.2.6. Ajuste del contraste.

Los procesos de ajuste del contraste adaptan la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad del monitor de visualización. Ya que, como se ha mencionado, cada sensor codifica la radiancia recibida en un número determinado de ND de acuerdo a sus características tecnológicas, el cual puede o no coincidir con NV (niveles de visualización) que facilita el dispositivo de visualización. Es conveniente entonces ajustar ambos parámetros, para lo que se presentan dos casos: el rango de ND es menor al de NV y que la imagen presente un mayor número de ND mayor que los de NV. En el primer caso, se deberá expandir el contraste original y en el segundo una reducción del contraste.
Así como en una fotografía tradicional decimos que tiene poco contraste cuando no hay una gran diferencia entre sus tonos más claros y más oscuros, también podemos definir digitalmente el contraste por relación de los ND máximo y mínimo de una imagen, con apoyo de las medidas de dispersión utilizadas en estadística:

$$C_1 = ND_{\max} / ND_{\min} \quad \text{(cociente entre máximo y mínimo)} \qquad \text{Ec. IV.16}$$

$$C_2 = ND_{\max} - ND_{\min} \quad \text{(rango)} \qquad \text{Ec. IV.17}$$

$$C_3 = S_{ND} \quad \text{(desviación típica o estándar)} \qquad \text{Ec. IV.18}$$

Con estas medidas se juzga la necesidad de expandir o comprimir el contraste, en función de las capacidades de visualización ofrecidas por el sistema.

IV.3.2.6.1. Tablas de referencia de color.

Una tabla de referencia de color (*CLUT, Color Look Up Table*) es una matriz numérica que indica el nivel visual (NV) con el que se representa en pantalla cada uno de los ND de la imagen. Generalmente, la CLUT es una matriz numérica de 3 columnas por 256 reglones o filas. El orden del renglón indica el ND de entrada, mientras que el almacenado en la tabla expresa el NV con el que ese ND deberá ser representado en pantalla.

Conviene recordar que los equipos de tratamiento digital de imágenes utilizan procesos aditivos de formación de color (ver apartado IV.3.1.2.), por lo que tanto mayor sean los NV en cada columna, mayor será el componente de rojo, verde y azul (RGB) que tendrá el píxel visualizado. Si sólo se está manipulando una banda, la imagen aparece en la pantalla en tonos de gris, esto es, cada ND tiene el mismo componente RGB. Un NV 0,0,0 indica que el ND al que se aplique será visualizado como negro, mientras que 128,128,128 representa un gris medio y 255,255,255 blanco. Si los valores varían se está representando una imagen en color, ya sea en una o con tres bandas (Figura IV.32).

a)

ND	NV Rojo	NV Verde	NV Azul
0	0	0	0
1	0	0	12
2	0	0	25
3	0	0	37
4	0	0	50
5	0	0	62
6	0	12	0
7	0	12	12
8	0	12	25
9	0	12	37
10	0	12	50
11	0	12	62
12	0	25	0
13	0	25	12
14	0	25	25
15	0	25	37
...			
255	255	255	255

b)

ND	NV Rojo	NV Verde	NV Azul
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1
7	1	1	1
8	2	2	2
9	2	2	2
10	2	2	2
11	2	2	2
12	3	3	3
13	3	3	3
14	3	3	3
15	3	3	3
16	4	4	4
...			
255	63	63	63

Figura IV.32. Estructura tabular de una tabla CLUT.

a) Color b) Tonos de gris.

Toda vez que una CLUT implica una relación numérica entre ND y NV, podemos también hacer una representación gráfica en un diagrama bivariado. Si se visualiza la imagen original, sin ningún realce, la CLUT puede describirse como una línea recta que pasa por el origen (0,0) y por el máximo (255,255), lo que indica que el NV es igual al ND (Figura IV.33). Con los procesos de compresión y expansión del contraste se puede modificar esa relación, buscando que los NV se distribuyan adecuadamente en el rango de la imagen mejorando su visualización.

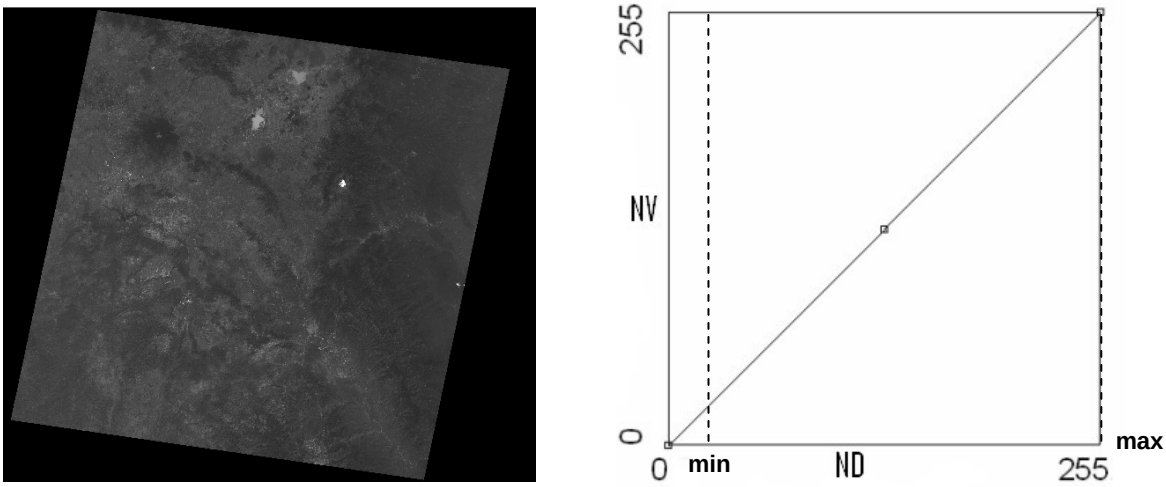


Figura IV.33. Representación gráfica de la CLUT para la imagen original (banda 1) de la escena 25-47 Landsat ETM+ Fecha: 9 de diciembre de 1999. Fuente:INEGI.

En la figura anterior se representaron los valores mínimos y máximos tomados de la Tabla IV.8. para la banda 1 de la imagen ya citada. El poco contraste de esta imagen se explica por su histograma mostrado en la Figura IV.31 que es muy estrecho en un rango de valores relativamente bajos, a los cuales les corresponden tonos oscuros de gris en la CLUT.

IV.3.2.6.2. Compresión del histograma.

Cuando el rango del sensor rebasa el número de niveles de gris que se pueden visualizar en pantalla, se deben comprimir los ND originales, ajustando el rango

de la imagen al permitido por el monitor gráfico. Esto ocurre en dos casos: cuando se cuenta con un sistema de visualización de reducidas capacidades y cuando se trabaja con sensores de gran sensibilidad radiométrica.

Aun cuando las imágenes motivo de este trabajo no presentan problemas de visualización, es importante mencionar que como se ha citado en el apartado IV.3.2.4., la mayor parte de los equipos de tratamiento digital presentan una resolución en pantalla de 8 bits para cada cañón de color (RGB en monitores CRT). Esto permite visualizar una banda de 256 niveles de gris o tres bandas en aproximadamente 16.8 millones de tonos (2^{24}) no habiendo problemas de visualización con las imágenes Landsat cuyo sensor tiene una resolución de 8 bits. Sin embargo, para los equipos que disponen de un número menor de colores es necesario comprimir el contraste original de la imagen al número de NV disponibles, así mismo esto se hace necesario cuando se pretende visualizar imágenes AVHRR que como ya hemos citado, codifica en 10 bits o cualquier otra imagen cuyos valores numéricos superen los 8 bits disponibles. El problema se resuelve de dos formas posibles: eliminando una parte de la escala que no se considere relevante o estableciendo una función de compresión de datos. Lo más común es reducir el rango original de ND a un número convencional de intervalos, de tal forma que la visualización en color resultante se asemeje lo más posible al color real. Los intervalos se generan en función de las características de la distribución de los ND. Regularmente se indican de igual anchura conteniendo el mismo número de elementos o que tengan márgenes delimitados por el usuario; en ambos casos se le asigna un solo NV a cada uno de los intervalos eliminando su variación interna. Evidentemente la calidad de visualización generalmente se reduce.

IV.3.2.6.3. Expansión del histograma.

Estos procesos son mucho más comunes que los de compresión; son técnicas de realce del contraste ya que generalmente las imágenes ofrecen un rango de ND inferior a las capacidades de despliegue de los equipos de visualización.

El rango máximo de ND (256) está disponible para codificar la gran variedad de paisajes que puede detectar el sensor sobre la superficie de la Tierra, desde los de muy baja reflectividad como las zonas marinas, a los de alta reflectividad del desierto o las áreas nevadas. En una escena casi nunca se da esa variedad de paisajes por lo que el rango de una imagen no coincide con el número de ND disponibles. Es decir, la imagen aparece tenue y poco contrastada, ya que gran parte de los 256 niveles de gris disponibles quedan inactivos.

IV.3.2.6.3.1. Expansión lineal.

Esta forma elemental de ajuste del contraste consiste en crear una CLUT en la que el ND mínimo y máximo de la imagen tengan asociados un NV entre 0 y 255 respectivamente, distribuyendo linealmente el resto de valores entre ambos extremos. Por ejemplo, en la Figura IV.33. vemos la imagen con un pobre contraste, de cuyo histograma (Figura IV.31.) se observa que la gran mayoría de los ND se encuentran aproximadamente en un rango entre 50 y 85 lo que limita una buena visualización al no utilizar todo el rango disponible, esto ocasiona que varios rasgos de interés se difuminen.
Es posible realzar este contraste a través de una CLUT que haga corresponder el rango de ND de la imagen con el total de NV disponibles (Figura IV.34.). La representación gráfica de la CLUT muestra una línea de mayor pendiente que la anterior.
Como se observa, la imagen después del realce aparece más nítida y mejor contrastada. Su histograma (Figura IV.35 b) aparece con una distribución más equilibrada.

Para realizar esta transformación se debe encontrar una función lineal que ajuste la relación ND-NV, de acuerdo a la relación ya señalada. Esa función nos permite construir una CLUT apropiada, en ésta se sustituye la correspondencia ND=NV, por una en la que los NV ocupen el rango completo de visualización.

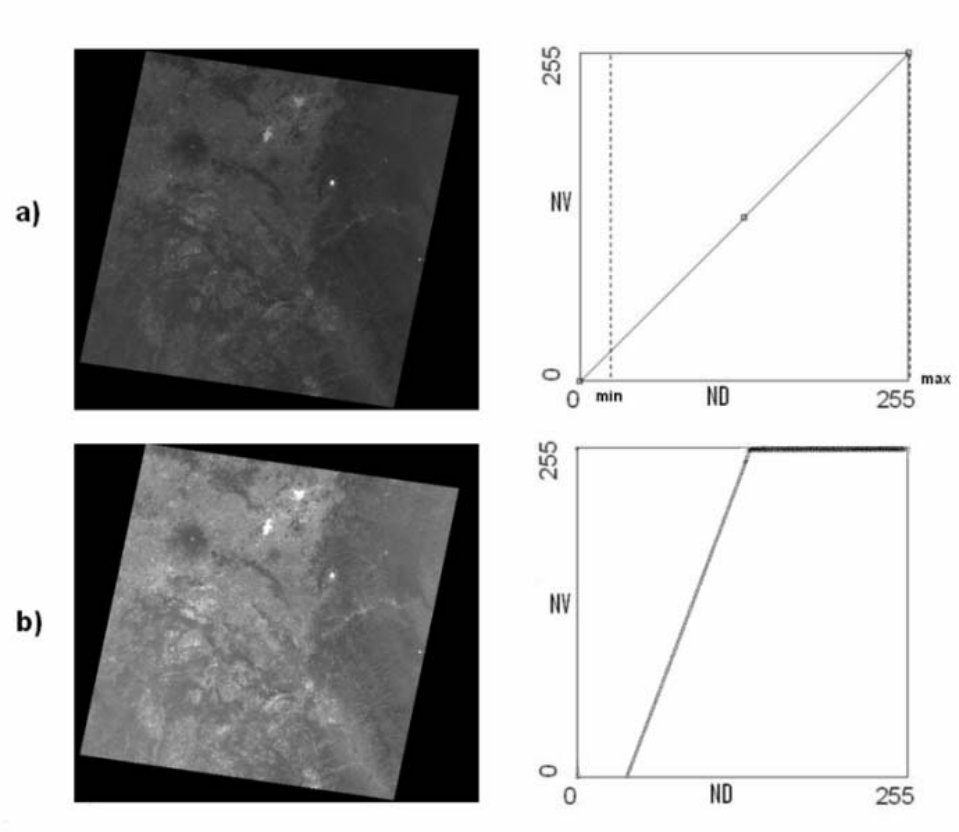


Figura IV.34. Visualización y CLUT gráfica para la imagen realzada linealmente.
a) Condiciones originales. b) Realce lineal (expansión lineal). Fuente:INEGI.

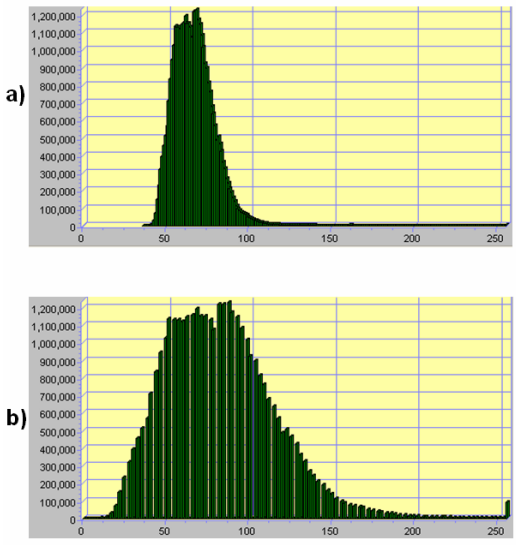


Figura IV.35. Histogramas para la banda 1. a) Imagen original
b) Imagen con realce de acuerdo a CLUT gráfica de la Figura IV.34 b).

En el proceso de expansión lineal se busca establecer una ecuación lineal del tipo:

$$NV = s + g\ ND \qquad \text{Ec. IV.19}$$

Cada NV está en función de los ND originales aplicándoles dos constantes: sesgo (bias) y ganancia (gain), respectivamente. Estas constantes (**s** y **g**) son conocidas al aplicar un sencillo sistema de ecuaciones. El origen y fin de los NV debe igualarse a 0 y 255 respectivamente, entonces:

$$0 = s + g\ ND_{\min} \qquad \text{Ec. IV.20}$$

$$255 = s + g\ ND_{\max} \qquad \text{Ec. IV.21}$$

Sustituyendo en ambas ecuaciones tenemos:

$$g = \frac{255}{ND_{\max} - ND_{\min}} \qquad \text{Ec. IV.22}$$

$$s = \frac{-255 * ND_{\min}}{ND_{\max} - ND_{\min}} \qquad \text{Ec. IV.23}$$

Como es natural, la transformación se puede expresar:

$$NV = \frac{ND - ND_{\min}}{ND_{\max} - ND_{\min}} * 255 \qquad \text{Ec. IV.24}$$

Aunque es más apropiado el uso de la Ec. IV. 19 por tratarse de una fórmula convencional en transformaciones lineales de datos.

Es importante señalar que en este tipo de transformaciones NV=0 cuando NV<0 y que NV=255 cuando NV>255, toda vez que la tabla de color se forma por números de un byte.

Como ejemplo se presenta un realce lineal (expansión lineal del histograma) para la banda 1 de la imagen que hemos venido manejando, cuyos efectos se muestran en las figuras IV.34 y IV.35, en donde la expansión se realizó para el rango comprendido entre 36 y 130 (de la imagen original); esto considerando la información proporcionada por el histograma original, es decir, un histograma estrecho y cargado a valores bajos (oscuros) lo que explica que la imagen original se muestre muy oscura. El valor mínimo de la imagen es 36 (Tabla IV.8) y el máximo 255, sin embargo, del histograma vemos que los valores aproximadamente arriba de 130 representan un número muy bajo de píxeles, por lo que de realizar un relace lineal considerado los valores mínimo y máximo originales no obtendríamos una mejora importante en la imagen.
Entonces:

$$s = \frac{-255 * 36}{130 - 36} = -97.65$$

$$g = \frac{255}{130 - 36} = 2.71$$

$$NV = -97.65 + 2.71(ND)$$

$$NV = entero\left[-97.65 + 2.71(ND)\right]$$

Esta última es la ecuación de la recta representada gráficamente en las figuras IV.34 y IV.35, con la que se ofrece una mejora para la imagen. Es necesario obtener un resultado entero para los valores de NV toda vez que como hemos señalado, el rango debe encontrarse entre 0 y 255.

IV.3.2.6.3.2. Ecualización del histograma.

Resulta notorio que en la expansión lineal del contraste no se tienen en cuenta las características del histograma de la imagen original, sólo sus extremos. Existe una técnica que considera la forma de la distribución de frecuencias de los ND originales. Para esto, se debe generar una CLUT en la que cada NV tenga de manera aproximada el mismo número de ND de la imagen original. Es decir, el NV

asignado a cada ND estará en proporción a este valor y a su frecuencia. Entonces, los ND con mayor número de píxeles serán los que ocupen, proporcionalmente, un mayor rango de visualización en el monitor.

Teóricamente, este método supone un realce más equilibrado, presentando menos contraste entre las zonas de alta reflectividad y las de baja. En consecuencia, el histograma presenta una mejor distribución de los datos (figuras IV.36 y IV.37).

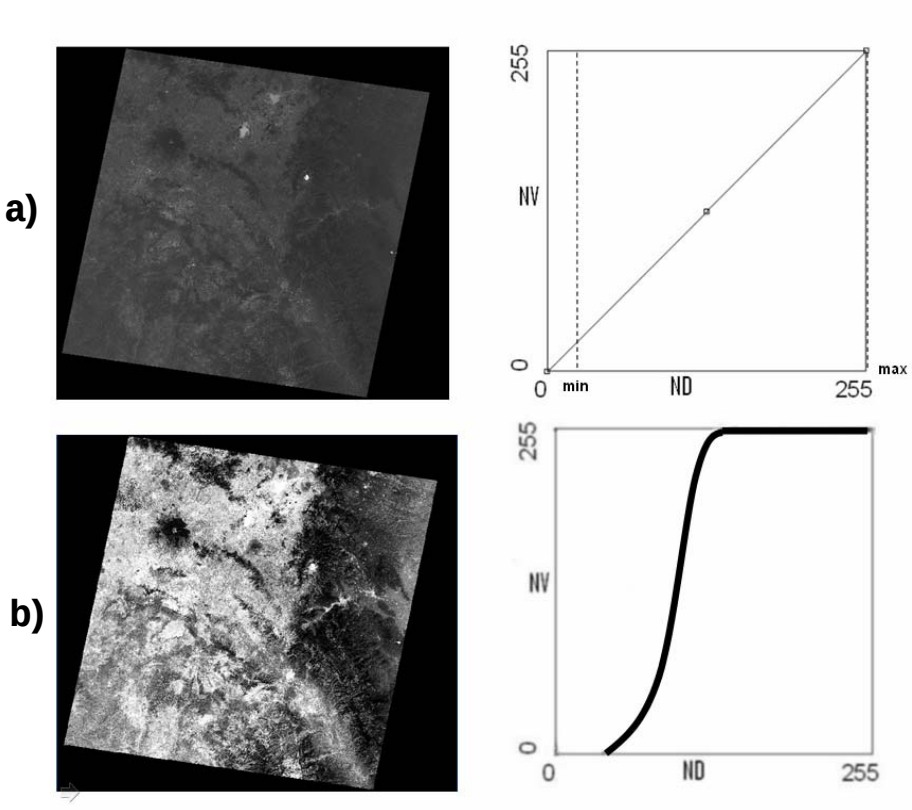


Figura IV.36. Visualización y CLUT gráfica para la imagen ecualizada.
b) Condiciones originales. b) Ecualización del contraste. Fuente:INEGI.

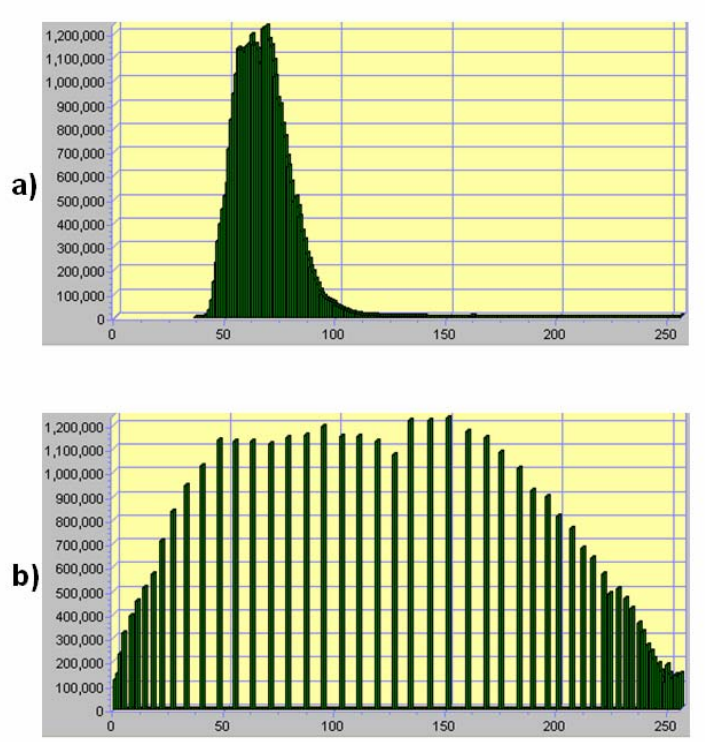


Figura IV.37. Histogramas para la banda 1. a) Imagen original
b) Imagen ecualizada.

En el cálculo, se iguala el histograma de los NV con el de los ND. Resulta relevante para el mejor entendimiento, describir de manera general el proceso de este método:

- Calcular la frecuencia absoluta y relativa de los ND de la imagen original.
- Esta frecuencia se compara con una frecuenta objeto, que corresponde a aquella que se obtendría si todos los NV de la imagen tuvieran la misma frecuencia (el total de píxeles de la imagen entre el número de NV posibles), determinando así el número de píxeles por cada NV. Con estas frecuencias relativas, cada NV debe de albergar un cierto porcentaje de píxeles de la imagen, cuyos valores también se acumulan para ser comparados con la frecuencia acumulada de los ND de la imagen.
- Derivado de la comparación, se selecciona para cada ND el NV que presente el valor más próximo en la frecuencia objeto acumulada.

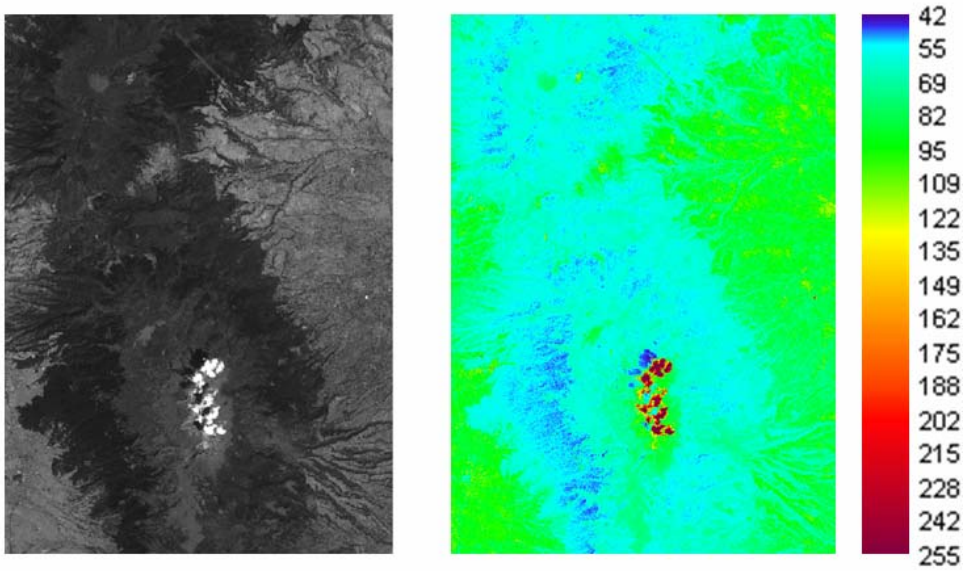
IV.3.2.7. El pseudo-color.

Como hemos venido revisando, el uso del color facilita el análisis visual, así como la preparación de otros tratamientos digitales. El término pseudo-color utilizado aquí, se refiere a los procesos en los que se diseña artificiosamente una tabla de color. Sabemos que una composición coloreada requiere de la combinación de tres bandas espectrales, aplicadas a cada uno de los colores primarios (rojo, verde y azul. RGB). Entonces una CLUT contiene una columna para cada uno de estos colores. Cuando se visualiza una imagen en blanco y negro (gama de grises), esas columnas presentan el mismo valor, ya que cada tono de gris supone una mezcla en partes iguales de los tres colores primarios.

Se da el caso en que una sola banda puede representarse en distintos tonos de color, debiendo diseñar una CLUT en la que las tres columnas presenten distintos valores, es decir, una CLUT que asocia el ND de una sola banda de la imagen a diferentes componentes RGB. Esto tiene sentido si se pretende obtener una clave de color en una imagen clasificada[72] o cuando se intente realzar el análisis de una imagen sustituyendo los niveles de gris por tonos de color. Entonces, cuando se visualiza una imagen monocromática en distintas tonalidades de color se emplea el término pseudo-color. Esto ofrece al usuario una primera impresión sobre su interés para discriminar el fenómeno objeto de estudio. El pseudo-color puede aplicarse al conjunto de ND de la imagen, creando una CLUT formada, por ejemplo, por números aleatorios entre 0 y 255 para cada uno de los tres colores (RGB).

De uso más formal, es aplicar una transformación del color progresiva, en donde la CLUT tiene una dirección determinada de progresión, por ejemplo, desde los tonos azules para los ND bajos hasta los rojos para los más altos (Figura IV.38). Esta transformación está incorporada en la mayor parte de los sistemas para el tratamiento digital de imágenes, sin embargo existen pocas referencias de su aplicación práctica.

[72] Categorización relativa de una imagen, válida para un territorio concreto que da origen a un mapa temático y a una tabulación de resultados (Chuvieco, 1996).



ND	NV Rojo	NV Verde	NV Azul	ND	NV Rojo	NV Verde	NV Azul	ND	NV Rojo	NV Verde	NV Azul
0	0	0	0	**102**	5	255	0	**231**	255	0	140
1	0	0	255	**103**	10	255	0	**232**	255	0	145
2	0	8	255	**104**	15	255	0	**233**	255	0	150
3	0	16	255	**105**	20	255	0	**234**	255	0	155
4	0	24	255	**106**	25	255	0	**235**	255	0	160
5	0	30	255	**107**	30	255	0	**236**	255	0	165
6	0	35	255	**108**	35	255	0	**237**	255	0	170
7	0	40	255	**109**	40	255	0	**238**	255	0	175
8	0	45	255	**110**	45	255	0	**239**	255	0	180
9	0	50	255	**111**	50	255	0	**240**	255	0	185
10	0	55	255	**112**	55	255	0	**241**	255	0	190
11	0	60	255	**113**	60	255	0	**242**	255	0	195
12	0	65	255	**114**	65	255	0	**243**	255	0	200
13	0	70	255	**115**	70	255	0	**244**	255	0	205
14	0	75	255	**116**	75	255	0	**245**	255	0	210
15	0	80	255	**117**	80	255	0	**246**	255	0	215
16	0	85	255	**118**	85	255	0	**247**	255	0	220
17	0	90	255	**119**	90	255	0	**248**	255	0	225
18	0	95	255	**120**	95	255	0	**249**	255	0	231
19	0	100	255	**121**	100	255	0	**250**	255	0	237
20	0	105	255	**122**	105	255	0	**251**	255	0	243
21	0	110	255	**123**	110	255	0	**252**	255	0	249
22	0	115	255	**124**	115	255	0	**253**	255	0	255
23	0	120	255	**125**	120	255	0	**254**	255	160	255
24	0	125	255	**126**	125	255	0	**255**	255	255	255

Figura IV.38. Visualización en pseudo-color de una fracción de imagen y un segmento de la tabla de color correspondiente. Fuente:INEGI.

En la Figura IV.39. se muestra el uso de una CLUT para visualizar una fracción de imagen en pseudo-color resaltando en cian la vegetación de la zona, cuya respuesta espectral se encuentra en los ND con valores entre 32 y 40, en donde sus respectivos valores de NV se pusieron en rojo 128, verde 255 y azul 255.

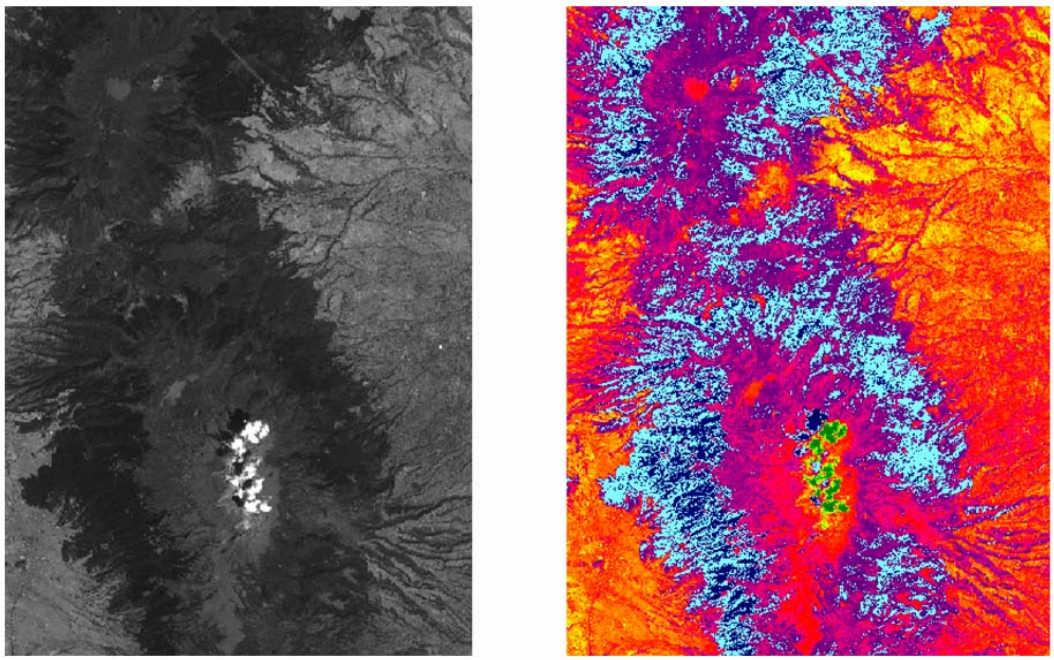


Figura IV.39. Visualización en pseudo-color de una fracción de imagen destacando en cian la vegetación. Fuente:INEGI.

IV.3.2.8. Composiciones en color.

Como se expuso en la sección IV.3.1.2., a partir de la información multiespectral que generan la mayoría de los sensores espaciales, se pueden obtener distintas composiciones en color, aplicando cada uno de los tres colores primarios (rojo, verde y azul) a una banda distinta de la imagen, seleccionada (la combinación) con el criterio y orden más oportuno para los fines de cada interpretación. Con esto, se pueden visualizar simultáneamente imágenes de distintas regiones del espectro, facilitando la delimitación visual de algunas cubiertas. Debido a que se

trabaja con bandas distintas, la tabla de color aplicada a una composición en color se presenta con tres columnas de distintos valores.

La elección de las bandas para la generación de una composición y el orden de los colores destinados a cada una, dependen del sensor sobre el que se esté trabajando y de la aplicación del proyecto. En la misma sección IV.3.1.2. se señaló que una de las composiciones más usadas es la denominada falso color aplicando los cañones de color rojo, verde y azul a las bandas del infrarrojo cercano, rojo y verde, respectivamente (Figura IV.22). Esta composición se ha usado más comúnmente en análisis visuales debido a que facilita la cartografía de masas vegetales, cuerpos de agua, ciudades, etc.

Los sensores TM y ETM+, con 7 bandas espectrales –ETM+ ofrece una octava banda pancromática con un rango espectral de prácticamente todo el visible– ofrecen la posibilidad de realizar un amplio número de composiciones.

En este sentido, se busca identificar la composición multibanda que entre las posibles recoja mejor la estructura del conjunto de la imagen. Una de las formas para llevar a cabo esta selección, es retener las tres bandas con un mayor contenido de la varianza original, así se define el llamado "Índice Óptimo" (Optimum Index Factor, OIF):

$$OIF = \frac{\sum_{k=1,3} S_k}{\sum_{j=1,3} |r_j|} \qquad \text{Ec. IV.25}$$

donde S_k indica la desviación estándar de cada una de las tres bandas que intervienen en la composición y r_j el coeficiente de correlación entre cada par de esas mismas bandas[73].

Con base en su aprovechamiento, las composiciones más utilizadas sobre imágenes Landsat TM y ETM+ son tratadas en el Capítulo VI (Implementación).

[73] Jensen, 1996.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISEÑO

V.1. Datos disponibles.

En el INEGI, particularmente en la Dirección Regional Oriente (DRO), cuya sede está en la ciudad de Puebla, se cuenta con imágenes de satélite Landsat TM y ETM+, para los años 1993 y 2000 respectivamente, del cubrimiento de las entidades federativas que conforman dicha Dirección Regional (Hidalgo, Puebla, Tlaxcala y Veracruz). El medio de almacenamiento es CD para ambos casos. En este trabajo nos ocuparemos del espacio geográfico correspondiente al estado de Puebla, tomando en cuenta que este mismo proceso es útil para cualquier cubrimiento territorial con imágenes de similares características. Las escenas ETM+ fueron recibidas en formato IMG de Erdas[74] y las TM en formato PIX.

V.1.1. Principales características de las Imágenes disponibles.

Considerando la notación cartográfica señalada en el capítulo II, resulta conveniente el manejo de conjuntos de datos para formatos escala 1:250 000 (escala regional), es decir 2º x 1º (longitud x latitud), toda vez que con ocho de éstos se cubre en su totalidad el estado de Puebla (Figura V.1). Al respecto se debe aclarar que las resoluciones de las imágenes por utilizar ofrecen posibilidades de escalas mayores (escalas locales) como 1:50 000, sin embargo, esto implicaría trabajar —bajo el mismo convencionalismo cartográfico— con 192 conjuntos de datos bajo esa escala (20' x 15'). Es importante señalar que cada conjunto de datos de 2º x 1º incluye 24 formatos de 20' x 15'.

[74] Erdas es un sistema robusto para procesamiento de imágenes adquiridas a partir de sensores remotos, análisis de datos geográficos y modelamiento gráfico de información espacial.

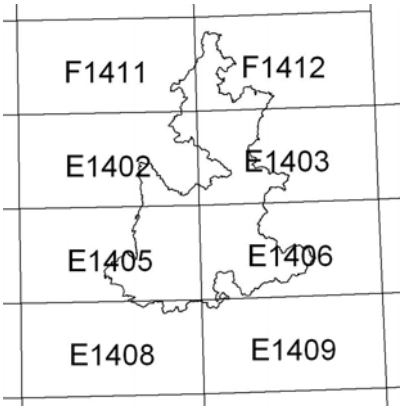


Figura V.1. Cubrimiento de conjuntos de datos de 2º x 1º para el Estado de Puebla.

La mayor cobertura disponible en la DRO corresponde a las imágenes Landsat ETM+ de entre los años 1999 y 2000, mismas que se encuentran en escenas completas de acuerdo al índice correspondiente (Figura V.2) a la resolución espacial típica de estas imágenes de 30 m. Se hará uso de las imágenes correspondientes a las bandas de la 1 a la 5 por ser las de mayor interés espectral en la generación de imágenes compuestas (RGB), por lo que sobre éstas se generarán dichas composiciones. Como se observa en la Figura V.2, el estado de Puebla queda cubierto con las escenas con path-row 2646, 2647, 2648, 2546, 2547, 2548, 2447 y 2448; aunque resulta evidente que para conformar los conjuntos de datos de 2º x 1º será necesario hacer los recortes correctos de cada escena y dar el tratamiento digital pertinente, principalmente en el contraste, para contar con imágenes lo más homogéneas posibles antes de generar el mosaico global de la región y de crear las composiciones. Esto si el contraste entre las imágenes de cada conjunto de datos es el adecuado para generar un mosaico homogéneo; de lo contrario habrá que trabajar por escena para hacer los recortes apropiados y generar el mosaico estatal.

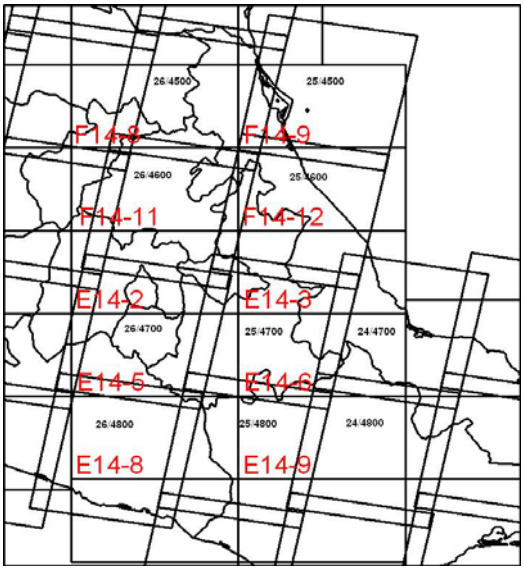


Figura V.2. Escenas LandSat para el cubrimiento del estado de Puebla junto con los cubrimientos de 2° x 1° de acuerdo a la escala 1:250 000.

La referencia geográfica de cada una de las escenas ETM+ se presenta a continuación y corresponde a reportes generados desde uno de los dos software utilizados para la implementación, los cuales serán descritos más adelante.

Escena Path 24 Row 47

PROREP Georeference Segment Report V8.1 EASI/PACE 10:42 26Apr2002

C:\A-ETM-IMG\etm2447z14.img [6BIC 7751P 6929L]

Georeference Units	:	UTM 14 D-01
Projection	:	Universal Transverse Mercator
Datum - Ellipsoid	:	NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866
Upper Left Corner	:	697201.875 E 2183065.750 N
Upper Right Corner	:	929731.875 E 2183065.750 N
Image Centre	:	813466.875 E 2079130.813 N
Lower Left Corner	:	697201.875 E 1975195.875 N
Lower Right Corner	:	929731.875 E 1975195.875 N
Pixel Size	:	30.000 E 30.000 N
Upper Left Corner	:	97d07'05.61" W Lon 19d44'04.22" N Lat
Upper Right Corner	:	94d54'08.74" W Lon 19d41'51.09" N Lat
Image Centre	:	96d01'35.98" W Lon 18d46'52.87" N Lat
Lower Left Corner	:	97d08'20.34" W Lon 17d51'24.16" N Lat
Lower Right Corner	:	94d56'51.02" W Lon 17d49'24.57" N Lat

Fecha de toma 24-ABRIL-2000

Escena Path 24 Row 48

PROREP Georeference Segment Report V8.1 EASI/PACE 12:39 26Apr2002

C:\A-ETM-IMG\etm2448z14.img [6BIC 7813P 6940L]

Georeference Units	:	UTM 14 D-01
Projection	:	Universal Transverse Mercator
Datum - Ellipsoid	:	NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866
Upper Left Corner	:	664540.938 E 2023150.125 N
Upper Right Corner	:	898930.938 E 2023150.125 N
Image Centre	:	781735.938 E 1919050.125 N
Lower Left Corner	:	664540.938 E 1814950.125 N
Lower Right Corner	:	898930.938 E 1814950.125 N
Pixel Size	:	30.000 E 30.000 N
Upper Left Corner	:	97d26'35.88" W Lon 18d17'33.75" N Lat
Upper Right Corner	:	95d13'41.77" W Lon 18d15'42.56" N Lat
Image Centre	:	96d20'57.00" W Lon 17d20'25.78" N Lat
Lower Left Corner	:	97d27'32.76" W Lon 16d24'40.79" N Lat
Lower Right Corner	:	95d15'59.24" W Lon 16d23'01.70" N Lat

Fecha de toma 24-ABRIL-2000

Escena Path 25 Row 46

PROREP Georeference Segment Report V8.1 EASI/PACE 09:05 29Apr2002

C:\A-ETM-IMG\etm2546.img [6BIC 7843P 6960L]

Georeference Units	:	UTM 14 D-01
Projection	:	Universal Transverse Mercator
Datum - Ellipsoid	:	NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866
Upper Left Corner	:	566968.875 E 2340910.500 N
Upper Right Corner	:	802258.875 E 2340910.500 N
Image Centre	:	684613.875 E 2236510.500 N
Lower Left Corner	:	566968.875 E 2132110.500 N
Lower Right Corner	:	802258.875 E 2132110.500 N
Pixel Size	:	30.000 E 30.000 N
Upper Left Corner	:	98d21'17.70" W Lon 21d10'10.38" N Lat
Upper Right Corner	:	96d05'23.34" W Lon 21d08'44.68" N Lat
Image Centre	:	97d13'58.54" W Lon 20d13'06.55" N Lat
Lower Left Corner	:	98d21'45.54" W Lon 19d16'57.94" N Lat
Lower Right Corner	:	96d07'28.76" W Lon 19d15'40.50" N Lat

Fecha de toma 30-marzo-2000

Escena Path 25 Row 47

```
PROREP  Georeference Segment Report          V8.1 EASI/PACE  10:35 29Apr2002

C:\A-ETM-IMG\etm2547.pix            [S   6FIC   7843P   6968L] 29Apr2002

  1:GEOref   Type:150 [Georeferencing      ]  Last Update: 10:10 29Apr2002

 Georeference Units              :  UTM   14   E000
 Projection                      :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid               :  NAD 27 - Clarke 1866

 Upper Left  Corner              :       532911.688 E       2182258.750 N
 Upper Right Corner              :       768201.688 E       2182258.750 N
 Image Centre                    :       650556.688 E       2077738.750 N
 Lower Left  Corner              :       532911.688 E       1973218.750 N
 Lower Right Corner              :       768201.688 E       1973218.750 N

 Pixel Size                      :          30.000 E          30.000 N

 Upper Left  Corner              :   98d41'09.23" W  Lon   19d44'12.56" N  Lat
 Upper Right Corner              :   96d26'28.58" W  Lon   19d43'07.78" N  Lat
 Image Centre                    :   97d34'17.32" W  Lon   18d47'13.17" N  Lat
 Lower Left  Corner              :   98d41'21.77" W  Lon   17d50'50.90" N  Lat
 Lower Right Corner              :   96d28'10.62" W  Lon   17d49'52.75" N  Lat

                  Fecha de toma 9-DIC-99
```

Escena Path 25 Row 48

```
PROREP  Georeference Segment Report          V8.1 EASI/PACE  11:52 29Apr2002

C:\A-ETM-IMG\etm2548.img            [   6BIC   7851P   6974L]

 Georeference Units              :  UTM   14   D-01
 Projection                      :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid               :  NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866

 Upper Left  Corner              :       498601.250 E       2022169.125 N
 Upper Right Corner              :       734131.250 E       2022169.125 N
 Image Centre                    :       616366.250 E       1917559.125 N
 Lower Left  Corner              :       498601.250 E       1812949.125 N
 Lower Right Corner              :       734131.250 E       1812949.125 N

 Pixel Size                      :          30.000 E          30.000 N

 Upper Left  Corner              :   99d00'47.64" W  Lon   18d17'24.66" N  Lat
 Upper Right Corner              :   96d47'07.22" W  Lon   18d16'38.47" N  Lat
 Image Centre                    :   97d54'17.44" W  Lon   17d20'29.71" N  Lat
 Lower Left  Corner              :   99d00'47.16" W  Lon   16d23'56.01" N  Lat
 Lower Right Corner              :   96d48'28.41" W  Lon   16d23'14.88" N  Lat

                  Fecha de toma 9-DIC-99
```

Escena Path 26 Row 46

```
PROREP  Georeference Segment Report          V8.1 EASI/PACE  19:19 29Apr2002

C:\A-ETM-IMG\etm2646.pix            [S   6FIC   7870P   7006L] 29Apr2002

  1:GEOref   Type:150 [Georeferencing      ]  Last Update: 19:18 29Apr2002


 Georeference Units             :  UTM   14   E000
 Projection                     :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid              :  NAD 27 - Clarke 1866

 Upper Left  Corner             :       404846.938 E       2341570.250 N
 Upper Right Corner             :       640947.000 E       2341570.250 N
 Image Centre                   :       522896.969 E       2236480.250 N
 Lower Left  Corner             :       404846.938 E       2131390.250 N
 Lower Right Corner             :       640947.000 E       2131390.250 N

 Pixel Size                     :          30.000 E          30.000 N

 Upper Left  Corner             :   99d54'59.70" W  Lon   21d10'27.33" N  Lat
 Upper Right Corner             :   97d38'32.54" W  Lon   21d10'16.65" N  Lat
 Image Centre                   :   98d46'50.87" W  Lon   20d13'37.09" N  Lat
 Lower Left  Corner             :   99d54'19.88" W  Lon   19d16'30.44" N  Lat
 Lower Right Corner             :   97d39'31.51" W  Lon   19d16'20.79" N  Lat


                          Fecha de toma 21-MARZO-2000
```

Escena Path 26 Row 47

```
PROREP  Georeference Segment Report          V8.1 EASI/PACE  19:57 29Apr2002

C:\A-ETM-IMG\etm2647.pix            [S   6FIC   7877P   7009L] 29Apr2002

  1:GEOref   Type:150 [Georeferencing      ]  Last Update: 19:57 29Apr2002

 Georeference Units             :  UTM   14   E000
 Projection                     :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid              :  NAD 27 - Clarke 1866

 Upper Left  Corner             :       369740.000 E       2182151.500 N
 Upper Right Corner             :       606049.563 E       2182151.500 N
 Image Centre                   :       487894.781 E       2077016.438 N
 Lower Left  Corner             :       369740.000 E       1971881.375 N
 Lower Right Corner             :       606049.563 E       1971881.375 N

 Pixel Size                     :          30.000 E          30.000 N

 Upper Left  Corner             :  100d14'35.04" W  Lon   19d43'54.53" N  Lat
 Upper Right Corner             :   97d59'16.59" W  Lon   19d43'59.77" N  Lat
 Image Centre                   :   99d06'53.52" W  Lon   18d47'09.21" N  Lat
 Lower Left  Corner             :  100d13'45.15" W  Lon   17d49'54.34" N  Lat
 Lower Right Corner             :   97d59'57.22" W  Lon   17d49'59.04" N  Lat


                        Fecha de toma 21-MARZO-2000
```

Escena Path 26 Row 48

```
PROREP  Georeference Segment Report          V8.1 EASI/PACE  20:29 29Apr2002

C:\A-ETM-IMG\etm2648.pix            [S   6FIC   7906P   7045L] 29Apr2002

  1:GEOref   Type:150 [Georeferencing      ]  Last Update: 20:28 29Apr2002

 Georeference Units            :  UTM   14   E000
 Projection                    :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid             :  NAD 27 - Clarke 1866

 Upper Left  Corner            :       334535.000 E       2022961.125 N
 Upper Right Corner            :       571715.250 E       2022961.125 N
 Image Centre                  :       453125.125 E       1917286.125 N
 Lower Left  Corner            :       334535.000 E       1811611.125 N
 Lower Right Corner            :       571715.250 E       1811611.125 N

 Pixel Size                    :          30.000 E          30.000 N

 Upper Left  Corner            :  100d33'55.52" W  Lon   18d17'27.35" N  Lat
 Upper Right Corner            :   98d19'17.20" W  Lon   18d17'46.10" N  Lat
 Image Centre                  :   99d26'28.22" W  Lon   17d20'29.87" N  Lat
 Lower Left  Corner            :  100d32'57.53" W  Lon   16d22'51.93" N  Lat
 Lower Right Corner            :   98d19'42.35" W  Lon   16d23'08.61" N  Lat


                        Fecha de toma 21-MARZO-2000
```

Como se ha observado en el capítulo anterior, derivado de las características en que los sensores captan la información y por la estructura de un archivo raster que siempre representa la información en forma matricial de tamaño *n x m* píxeles, las imágenes de una escena presentan un "área útil" con píxeles cuyos valores digitales expresan la respuesta espectral captada por el sensor, y un "área no útil" con píxeles cuyo valor es cero –generalmente en color negro–, que completan el archivo raster (Figura V.3). Esta área no útil no estará presente en el mosaico final.

Para cada escena existen algunos parámetros que no son relevantes para el presente trabajo, tales como parámetros ópticos del sensor (azimut y elevación del Sol) o procesos previos –principalmente de corrección– a la imagen que se comercializa.

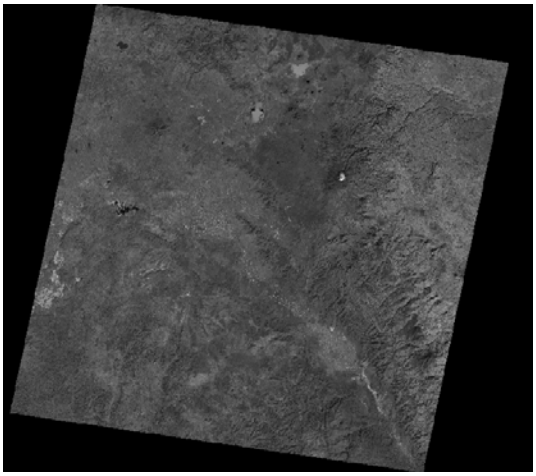


Figura V.3. Escena LandSat ETM+ 2547. Fuente: INEGI.

Para el caso de las imágenes Landsat TM, están disponibles, en su mayoría, para el año 1993 y corresponden a las utilizadas como base en la extracción digital para la actualización de la cartografía topográfica escala 1:250 000 de esos años. Por ser un insumo creado específicamente para esos fines, las imágenes fueron procesadas en las Oficinas Centrales del INEGI y dispuestas en formatos de 2° x 1°, que corresponden a la escala 1:250 000 (ver Figura V.1); en estas imágenes se observa una resolución espacial de 25 metros, a diferencia de las ETM+ en las que se conservó la resolución espacial de 30 metros. Esta situación no afecta los procesos por realizar toda vez que no se combinarán imágenes TM y ETM+, sino que cada grupo de imágenes será tratado por separado para generar los respectivos mosaicos de cada sensor y en todo caso, tener el mismo cubrimiento en dos momentos diferentes y posibilitar un análisis multitemporal. Es de importancia mencionar que considerando las imágenes del año 1993, las escenas 2447 y 2448 corresponden al sensor MSS por lo que los conjuntos de datos E1406 y E1409 presentan marcadas diferencias en la imagen, aún cuando se trata de una zona muy pequeña en el estado de Puebla. Esto impide que se genere un mosaico homogéneo debido a las diferencias espectrales entre los sensores TM y MSS.

La referencia geográfica para el grupo de imágenes TM es la misma que para las imágenes ETM+, sin embargo, toda vez que están disponibles en formatos de 2º x 1º (generados en Oficinas Centrales del INEGI), pueden variar ligeramente en las coordenadas extremas de cada conjunto de datos, respecto a los conjuntos que se generarán a partir de las imágenes de las escenas ETM+, y en consecuencia, del mosaico global; debido principalmente a la diferencia de resolución espacial. Para las imágenes TM sólo se dispone de cobertura geográfica completa en las bandas 3, 4 y 5, por lo que las composiciones sólo se realizarán respecto a estas tres bandas.

V.1.2. Cobertura geográfica.

De acuerdo al "Anuario Estadístico del Estado de Puebla 2005"[75], el estado se encuentra en las coordenadas extremas al norte 20º50', al sur 17º52', al este 96º43' y al oeste 99º04' de longitud oeste (Figura V.4). Representa el 1.7% de la superficie total del país. Puebla colinda al norte con los estados de Hidalgo y Veracruz de Ignacio de la Llave; al este con Veracruz de Ignacio de la Llave y Oaxaca; al sur con Oaxaca y Guerrero; al oeste con Guerrero, Morelos, Estado de México, Tlaxcala e Hidalgo.

La cobertura mostrada en la Figura V.4. incluye en su totalidad al estado de Puebla, sin embargo, en el presente trabajo se hará uso de una cobertura un poco más amplia, de acuerdo a las tablas V.1. y V.2., con la finalidad de que las representaciones cartográficas resultantes permitan distinguir sin problemas el límite estatal, esto debido a que no solo se trabajarán datos al interior del estado, sino de la cobertura geográfica completa, sin perder de vista que ampliar demasiado la cobertura aumentaría considerablemente el volumen de datos, a razón de un byte por cada píxel de la imagen.

[75] Publicación del INEGI conjuntamente con el Gobierno del Estado.

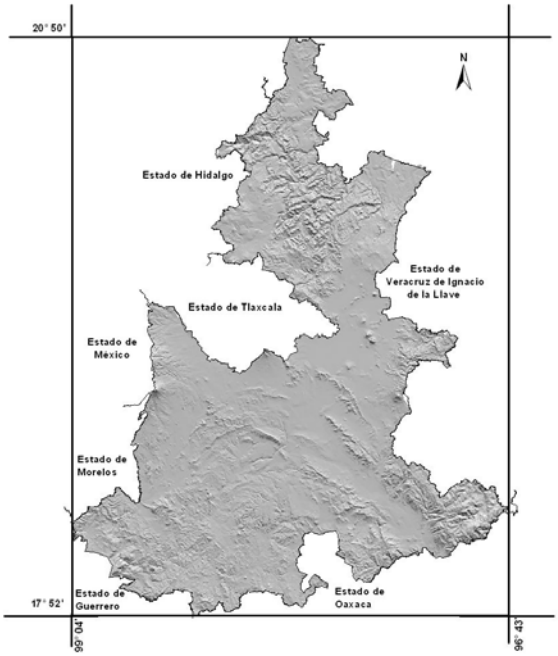


Figura V.4. Coordenadas extremas del estado de Puebla. Fuente: INEGI.

	Coordenadas extremas (Anuario Estadístico de Puebla 2005)		Cubrimiento seleccionado para trabajar	
	Geográficas	**UTM NAD 27**	**Geográficas[76]**	**UTM NAD 27**
Xmin	99º04' W	493063.64104	99º07'57.69315''	486200.00
Xmax	96º43' W	741956.48688	96º37'11.30689''	747620.00
Ymin	17º52' N	1976794.64710	17º49'47.18948''	1972800.00
Ymax	20º50' N	2303567.61878	20º53'58.71430''	2310910.00

Tabla V.1. Coordenadas extremas del estado de Puebla y cubrimiento geográfico seleccionado.

El cubrimiento final ha sido seleccionado de manera visual sobre mapas digitales de otras temáticas del mismo estado de Puebla y generados en la DRO también con insumos raster, tomando la lectura directa de las coordenadas. Éstas tendrán algunas ligeras variaciones en el momento de la implementación debido a la

[76] Coordenadas geográficas calculadas a partir de las coordenadas UTM con el software TRANINV 2.1 ® INEGI.

resolución espacial, es decir, toda vez que la unidad mínima e indivisible de una imagen es el píxel que representa una superficie geográfica, y para el caso de los píxeles en las esquinas de la imagen deberán contener las coordenadas extremas finales seleccionadas, sin embargo, éstas podrán estar en cualquier parte de la superficie representada en el píxel y no necesariamente en la posición más extrema de dicho píxel.

Otro factor que hará variar las coordenadas extremas son los simples ajustes visuales que en la marcha sean convenientes. En este momento, las coordenadas extremas seleccionadas corresponden entonces a las mostradas en la Tabla V.2.

	Cubrimiento seleccionado para trabajar			
	Coordenadas Geográficas[77]		**Coordenadas UTM NAD 27**	
	Longitud W	**Latitud N**	**x**	**y**
Esq. Sup. Izq.	99º07'57.69315''	20º53'58.71430''	486200.00	2310910.00
Esq. Sup. Der.	96º37'11.30689''	20º52'59.23440''	747620.00	2310910.00
Esq. Inf. Der.	96º 39'49.41356''	17º49'47.18948''	747620.00	1972780.00
Esq. Inf. Izq.	99º 07'48.86907''	17º50'37.35482''	486200.00	1972780.00

Tabla V.2. Coordenadas extremas seleccionadas.

V.1.3. Volumen base de los datos.

Como se ha dicho, cada píxel de la imagen representa un valor numérico de 8 bits (un byte). Para las imágenes ETM+ se cuenta con escenas completas en las bandas de la 1 a la 5. Para las imágenes TM se comentó ya sobre su disponibilidad en 8 conjuntos de datos de 2º x 1º para las bandas 3, 4 y 5.

En ambos casos, esto constituye sólo el volumen base de los datos, aunque resulta evidente señalar que basta contar con espacio en disco duro para procesar un tipo de imágenes a la vez y que los procesos intermedios al resultado final pueden ser respaldados conforme se avanza, es conveniente mantener esos resultados intermedios en disco duro para consultas y comparaciones entre las imágenes ya que esto es necesario para ir generando imágenes homogéneas por

[77] Coordenadas geográficas calculadas a partir de las coordenadas UTM con el software TRANINV 2.1® INEGI.

igualación del histograma de todos los componentes de cada mosaico a partir de una imagen base, esto para todas las bandas ETM+. Para las imágenes TM, ya que se encuentran en conjuntos de datos de 2º x 1º sólo es necesario considerar el volumen de cada uno y calcular el volumen total que generará el mosaico final para cada una de las tres bandas y el de las posibles combinaciones entre esas tres bandas.

V.1.3.1. Volumen base de los datos para las imágenes ETM+.

Con los datos señalados en el apartado V.1.1., es posible calcular el tamaño de cada imagen partiendo del total de columnas y renglones que conforman cada escena, sin perder de vista que este dato debe multiplicarse por cinco, número que constituye el total de bandas disponibles para ETM+ (Tabla V.3).

Escena	Dimensiones		Volumen (en MB) de una banda	Volumen (en MB) de las cinco bandas
	Columnas	Renglones		
2447	7751	6929	51.219	256.093
2448	7813	6940	51.710	258.552
2546	7843	6960	52.058	260.292
2547	7843	6968	52.118	260.592
2548	7851	6974	52.216	261.082
2646	7870	7006	52.583	262.915
2647	7877	7009	52.652	263.261
2648	7906	7045	53.118	265.588

Tabla V.3. Volumen de datos de cada escena ETM+

De la tabla anterior se observa que tan solo para almacenar las 8 escenas de las imágenes desde las que se parte para realizar los recortes, se requieren aproximadamente 2.04 GB.

A partir de estas escenas se generaran recortes para conformar los mosaicos de cada conjunto de datos de 2º x 1º. Esto implica calcular el tamaño de cada corte y el tamaño final de cada uno de los 8 conjuntos de datos resultantes. Para estos

últimos podemos tener un cálculo muy cercano a la realidad considerando el cubrimiento geográfico de cada conjunto de datos de acuerdo a la nomenclatura de la cartografía escala 1:250 000 (ver Capítulo II) y conociendo la resolución espacial de las imágenes que es de 30 metros o de manera equivalente y más simplificada hacer el cálculo sobre el cubrimiento total de los 8 conjuntos de datos involucrados –coordenadas extremas– (Tabla V.4).

Conjunto de Datos	Límite sur (latitud)	Límite norte (latitud)	Límite este (longitud)	Límite oeste (longitud)
F14-11	20°00'	**21°00'**	98°00'	**100°00'**
F14-12	20°00'	21°00'	**96°00'**	98°00'
E14-2	19°00'	20°00'	98°00'	100°00'
E14-3	19°00'	20°00'	96°00'	98°00'
E14-5	18°00'	19°00'	98°00'	100°00'
E14-6	18°00'	19°00'	96°00'	98°00'
E14-8	**17°00'**	18°00'	98°00'	100°00’
E14-9	17°00'	18°00'	96°00'	98°00'

Tabla V.4. Límites geográficos de cada conjunto de datos esc. 1:250 000, marcados los límites más extremos.

En los datos mostrados en esta tabla, se puede observar que los límites extremos globales de la región se encuentran en latitud entre los 17º y 21º, para longitud entre 96º y 100º, por lo que las coordenadas extremas de los 8 conjuntos de datos pueden expresarse de acuerdo a la Tabla V.5 en la que también se muestra su equivalente en proyección UTM y las distancias en metros, datos que son de utilidad para calcular el volumen de datos esperados mediante la obtención de las dimensiones globales del archivo resultante.

Estas dimensiones globales son fácilmente calculadas conociendo Δx y Δy. Ambos valores deben ser divididos por la resolución espacial (30 m), lo que permite obtener el número de columnas y de renglones respectivamente (Ec. V.1)

$$N_{\mathrm{Re}n} = \mathrm{Re}\,dondear\left(\frac{\Delta x}{30}\right) \qquad \text{Ec. V.1}$$

$$N_{Col} = \mathrm{Re}\,dondear\left(\frac{\Delta y}{30}\right)$$

	Cubrimiento global de los 8 conjuntos de datos de 2º x 1º			
	Geográficas		[78]UTM NAD 27	
	Longitud	Latitud	x	y
Esq. Sup. Izq.	100°00'	21°00'	396065.611	2322335.606
Esq. Sup. Der.	96°00'	21°00'	811897.966	2324938.642
Esq. Inf. Der.	96°00'	17°00'	819456.053	1881887.784
Esq. Inf. Izq.	100°00'	17°00'	393550.756	1879712.592
			Δx	Δy
			425905.2971	445226.05
			Δx/30	Δy/30
			14197	14841
			210697677	Bytes
			201	MB
			0.2 (Una banda)	GB
			1 (Cinco bandas)	GB

Tabla V.5. Cubrimiento global de los 8 conjuntos de datos de 2º x 1º con el volumen de datos calculado. Las cantidades marcadas son las más extremas y fueron utilizadas para calcular Δx y Δy.

Entonces, N_{Ren} x N_{Col} es la expresión que proporciona las dimensiones globales y ya que cada valor de píxel es de un byte se tiene directamente el total de bytes de la imagen (Tabla V.5).

Se observa que debemos considerar 1 GB para este cubrimiento. Pero éste corresponde al mosaico global de los 8 conjuntos de datos, faltando por considerar el espacio de:

[78] Las coordenadas UTM fueron obtenidas a partir de las coordenadas geográficas con el software TRANINV 2.1 ® INEGI.

- Cortes para conformar los conjuntos de datos de 2° x 1° (5 bandas) arriba analizados.

  Determinar el espacio necesario para cada corte de las escenas que se utilizará para generar el mosaico de cada conjunto de datos, implica saber cuántas escenas están involucradas en cada conjunto de datos (Tabla V.6), así como considerar que cada corte debe tener un traslape con sus vecinos para hacer un mosaico –del conjunto de datos– adecuado.

Conjunto de Datos	Escenas Landsat involucradas
E14-2	2646, 2647, 2546, 2547, 2747, 2746
E14-3	2446, 2447, 2546, 2547
E14-5	2647, 2547, 2648, 2548, 2747
E14-6	2547, 2447, 2548, 2448
E14-8	2648, 2548
E14-9	2548, 2448
F14-11	2645, 2646, 2546, 2746
F14-12	2545, 2546

Tabla V.6. Escenas Landsat involucradas en cada conjunto de datos de 2° x 1°

De la Tabla V.6. se observa que el promedio de escenas por conjunto de datos es 3.6; si se considera entonces algún conjunto de datos con 4 escenas involucradas para calcular el volumen de los recortes de dichas escenas para conformar el conjunto de datos, podremos tomar el resultado como promedio y multiplicarlo por los ocho conjuntos de datos y obtener un volumen de datos aproximado para este rubro.

En el apartado V.1.1. se señalaron las referencias geográficas de las escenas involucradas en todo el espacio geográfico para el Estado de Puebla. Considerando las coordenadas ahí establecidas, así como los límites de cada conjunto de datos (Tabla V.4) se parte para calcular los segmentos de imagen de cada escena que se deberán recortar para generar el mosaico del conjunto de datos. El conjunto de datos por analizar es el E14-06 con cuatro escenas involucradas (Figura V.2). Por

razones prácticas se utilizarán coordenadas métricas para los cálculos (proyección UTM datum NAD27).

La Tabla V.7. muestra el volumen de datos esperado para los cortes de las escenas involucradas con el conjunto de datos seleccionado. Como se ve, se requieren 0.043 GB, que con los 8 conjuntos de datos suman 0.344 GB, por las cinco bandas entonces se requiere en total 1.72 GB.

- Corte para el cubrimiento geográfico final (5 bandas), mismo que será menor al mosaico completo de los 8 conjuntos de datos buscando una cobertura geográfica apropiada (apartado V.1.2.).

  De acuerdo al cubrimiento final seleccionado (Tabla V.2.) se calcula el volumen de datos esperado, de la misma forma que se hizo para el cubrimiento global de los 8 conjuntos de datos (ver Tabla V.5). Teniendo como resultado lo mostrado en la Tabla V.8.

- Composición RGB para el cubrimiento final al menos para tres diferentes composiciones.

  Una composición RGB ocupa el triple de espacio que una sola banda, es decir, cada píxel de la imagen compuesta ocupa 3 bytes de información (8 bits para cada componente RGB), por lo que una imagen de este tipo para el cubrimiento geográfico seleccionado hará uso de 0.3 GB y como se están considerando al menos tres composiciones, entonces serán 0.9 GB para este fin.

- Composiciones ejemplo de aproximadamente una quinta parte de un conjunto de datos de 2º x 1º, sin perder de vista que cada dato (píxel) utiliza 3 bytes. Por experiencia, este tamaño resulta muy conveniente para mostrar visualmente imágenes compuestas de satélite Landsat. Se considera ilustrativo 10 imágenes de este tipo para diferentes composiciones (Tabla V.9).

Escena	Referencia geográfica							
	Coordenadas extremas del conjunto de datos							
	Esq. Sup. Izq.		Esq. Sup. Der.		Esq. Inf. Der.		Esq. Inf. Izq.	
	605255.692	2101000.676	817710.707	2101000.676	817710.707	1992637.497	605255.692	1992637.497
2447	Coordenadas extremas de la escena							
	Esq. Sup. Izq.		Esq. Sup. Der.		Esq. Inf. Der.		Esq. Inf. Izq.	
	697201.875	2183065.750	929731.875	2183065.750	929731.875	1975195.875	697201.875	1975195.875
	Coordenadas para el corte de la escena							
	Esq. Sup. Izq.		Esq. Sup. Der.		Esq. Inf. Der.		Esq. Inf. Izq.	
	697201.875	2104105.797	818101.875	2104105.797	818101.875	1989835.125	697201.875	1989835.125
	Δx	Δy	Δx/30	Δy/30	Bytes	MB		
	120900.000	114270.672	4030	3810	15354300	14.643		
2448	Coordenadas extremas de la escena							
	Esq. Sup. Izq.		Esq. Sup. Der.		Esq. Inf. Der.		Esq. Inf. Izq.	
	664540.938	2023150.125	898930.938	2023150.125	898930.938	1814950.125	664540.938	1814950.125
	Coordenadas para el corte de la escena							
	Esq. Sup. Izq.		Esq. Sup. Der.		Esq. Inf. Der.		Esq. Inf. Izq.	
	664660.938	2023150.125	818140.938	2023150.125	818140.938	1989880.125	664660.938	1989880.125
	Δx	Δy	Δx/30	Δy/30	Bytes	MB		
	153480.000	33270.000	5116	1110	5678760	5.416		
2547	Coordenadas extremas de la escena							
	Esq. Sup. Izq.		Esq. Sup. Der.		Esq. Inf. Der.		Esq. Inf. Izq.	
	532911.688	2182258.750	768201.688	2182258.750	768201.688	1973218.750	532911.688	1973218.750
	Coordenadas para el corte de la escena							
	Esq. Sup. Izq.		Esq. Sup. Der.		Esq. Inf. Der.		Esq. Inf. Izq.	
	604911.688	2104108.750	768201.688	2104108.750	768201.688	1989898.750	604911.688	1989898.750
	Δx	Δy	Δx/30	Δy/30	Bytes	MB		
	163290.000	114210.000	5444	3808	20730752	19.770		
2548	Coordenadas extremas de la escena							
	Esq. Sup. Izq.		Esq. Sup. Der.		Esq. Inf. Der.		Esq. Inf. Izq.	
	498601.250	2022169.125	734131.250	2022169.125	734131.250	1812949.125	498601.250	1812949.125
	Coordenadas para el corte de la escena							
	Esq. Sup. Izq.		Esq. Sup. Der.		Esq. Inf. Der.		Esq. Inf. Izq.	
	604891.250	2022169.125	734131.250	2022169.125	734131.250	1989889.125	604891.250	1989889.125
	Δx	Δy	Δx/30	Δy/30	Bytes	MB		
	129240.000	32280.000	4308	1076	4635408	4.421		
				Totales	**Bytes**	**MB**	**GB**	
					46399220	**44.250**	**0.043**	

Tabla V.7. Volumen de datos esperado para los cortes de las escenas Landsat involucradas en el conjunto de datos E14-06

	Cubrimiento seleccionado para trabajar			
	Geográficas		UTM NAD 27	
	Longitud	Latitud	x	y
Esq. Sup. Izq.	99°07'57.69315''	20°53'58.71430''	486200	2310910
Esq. Sup. Der.	96°37'11.30689''	20°52'59.23440''	747620	2310910
Esq. Inf. Der.	96° 39'49.41356''	17°49'47.18948''	747620	1972780
Esq. Inf. Izq.	99° 07'48.86907''	17°50'37.35482''	486200	1972780
			Δx	Δy
			261420	338130
			Δx/30	Δy/30
			8715	11271

98226765	Bytes
95	MB
0.1 (Una banda)	GB
0.5 (Cinco bandas)	GB

Tabla V.8. Cubrimiento seleccionado para trabajar y el volumen de datos calculado.

	Cubrimiento de un conjunto de datos de 2° X 1° Ej. E14-02			
	Geográficas		UTM NAD 27	
	Longitud	Latitud	x	y
Esq. Sup. Izq.	100°00'51.19"	20°00'13.65"	393903.869	2212090.5
Esq. Sup. Der.	97°59'05.79"	20°00'13.63"	606183.869	2212090.5
Esq. Inf. Der.	97°59'28.37"	18°59'41.28"	606183.869	2100430.5
Esq. Inf. Izq.	100°00'28.63"	18°59'41.29"	393903.869	2100430.5
			Δx	Δy
			212280	111660
			Δx/30	Δy/30
			7076	3722

26336872	Bytes
27	MB
5.4 (Quinta parte)	MB
0.005	GB
0.015 (Por tres componentes)	GB
0.15 (diez imágenes RGB)	GB

Tabla V.9. Cubrimiento de un conjunto de datos de 2° X 1° (E14-02) y volumen de datos calculado.

Ya que todos los conjuntos de datos tienen el mismo cubrimiento, el cálculo anterior es válido para cualquiera de éstos –bajo este formato– que se utilice.
En resumen, para los procesos con las imágenes ETM+ el requerimiento de espacio en disco es el mostrado en la Tabla V.10.

Proceso	Tamaño en GB
Almacenamiento de escenas.	2.040
Mosaico de los 8 conjuntos de datos.	1.000
Cortes de las escenas para generar los conjuntos de datos de 2º x 1º	1.720
Cortes de las cinco bandas para el cubrimiento geográfico final seleccionado.	0.500
Tres composiciones RGB del cubrimiento geográfico seleccionado.	0.900
Diez composiciones RGB ejemplo de una quinta parte de un conjunto de datos de 2º x 1º	0.150
Total en GB	**6.310**

Tabla V.10. Requerimiento de espacio en disco duro para los procesos con las imágenes ETM+

V.1.3.2. Volumen base de los datos para las imágenes TM.

Como se ha mencionado, estas imágenes están disponibles en conjuntos de datos de 2º x 1º, es decir, en el formato apropiado para este trabajo. En primera instancia, basta con observar el tamaño de cada archivo, ya que como también se ha comentado, las imágenes están a 25 metros de resolución, lo que naturalmente ocasiona que cada conjunto de estos datos tenga mayor volumen que los que se generarán con imágenes ETM+. Tomar en cuenta también que para

estas imágenes se trabajarán las bandas 3, 4 y 5 de los ocho conjuntos de datos que cubre el estado de Puebla (Tabla V.11).

Conjunto de Datos	Dimensiones		Tamaño en bytes	Tamaño en MB una banda	Tamaño en GB una banda	Tamaño en GB de tres bandas
	X (columnas)	Y (renglones)				
F14-11	8400	4480	37632000	35.889	0.035	0.105
F14-12	8440	4580	38655200	36.864	0.036	0.108
E14-2	8480	4461	37829280	36.077	0.035	0.106
E14-3	8500	4560	38760000	36.964	0.036	0.108
E14-5	8523	4462	38029626	36.268	0.035	0.106
E14-6	8520	4560	38851200	37.051	0.036	0.109
E14-8	8560	4480	38348800	36.572	0.036	0.107
E14-9	8581	4561	39137941	37.325	0.036	0.109

Total de GB	**0.858**

Tabla V.11. Volumen de datos para los conjuntos de imágenes TM

Considerando que los cubrimientos geográficos son los mismos y que lo único que varía es la resolución espacial, tenemos que para estas imágenes se calcula también:

- Cubrimiento global de los 8 conjuntos de datos (tres bandas).
  Respecto a este mismo cubrimiento en ETM+ solo se tiene variación en la resolución espacial, por lo que a partir de los datos de la Tabla V.5. se tiene que el volumen de datos se expresa de acuerdo a la Tabla V.12:

Δx	Δy	
425905.2971	445226.05	
Δx/25	Δy/25	
17037	17811	
303446007		Bytes
291		MB
0.284 (Una banda)		GB
0.852 (Tres bandas)		GB

Tabla V.12. Volumen de datos para el cubrimiento total de los ocho conjuntos de 2° x 1° en imágenes TM.

- Corte para el cubrimiento geográfico final (3 bandas), mismo que es menor al mosaico completo de los 8 conjuntos de datos de acuerdo al apartado V.1.2.

  La cobertura geográfica definitiva es la misma que para el cubrimiento final en ETM+, por lo que de la Tabla V.8 se tienen los datos para calcular ahora este volumen de datos respecto a un resolución de 25 metros, como se muestra en la Tabla V.13.

Δx	Δy	
261420	338130	
Δx/25	Δy/25	
10457	13527	
141451839		Bytes
135		MB
0.13 (Una banda)		GB
0.39 (Tres bandas)		GB

Tabla V.13. Volumen de datos para el cubrimiento seleccionado para trabajar.

- Composición RGB para el cubrimiento final para las tres bandas disponibles (dos composiciones).

  De la Tabla V.13. se observa que una banda del cubrimiento final utiliza 0.13 GB de espacio en disco, y toda vez que cada píxel en una composición utiliza 3 bytes (un byte para cada componente RGB), entonces una imagen compuesta TM del cubrimiento final requerirá 0.39 GB y si pensamos que con las tres bandas será posible generar al menos dos composiciones útiles, entonces el requerimiento será de 0.78 GB.

- Composiciones ejemplo de aproximadamente una quinta parte de un conjunto de datos de 2° x 1°, buscando crear las mismas ventanas que en

ETM+ para comparativos multitemporales, considerando cinco imágenes ilustrativas.

Siguiendo el ejemplo con el conjunto de datos E14-02, de la Tabla V.9. se obtienen los datos para calcular los respectivos a TM de acuerdo a la Tabla V.14.

Δx	Δy	
212280	111660	
Δx/25	Δy/25	
8492	4468	
37942256		Bytes
37		MB
7.4 (Quinta parte)		MB
0.007		GB
0.021 (Por tres componentes)		GB
0.105 (cinco imágenes RGB)		GB

Tabla V.14. Volumen de datos calculado de un conjunto de datos de 2° X 1° (E14-02) para TM

En resumen, para los procesos con las imágenes TM el requerimiento de espacio en disco es el mostrado en la Tabla V.15.

Proceso	Tamaño en GB
Almacenamiento de los 8 conjuntos de datos de 2º x 1º	0.858
Mosaico de los 8 conjuntos de datos.	0.852
Cortes de las cinco bandas para el cubrimiento geográfico final seleccionado.	0.390
Dos composiciones RGB del cubrimiento geográfico seleccionado.	0.780
Cinco composiciones RGB ejemplo de una quinta parte de un conjunto de datos de 2º x 1º	0.105
Total en GB	**2.985**

Tabla V.15. Requerimiento de espacio en disco duro para los procesos con las imágenes TM.

V.2. Software para la implementación.

En el INEGI existe una reglamentación en el uso y manejo del software –y del hardware–, mismo que se constituye en una plataforma institucional, establecida con base a los procesos que se realizan y que se define en las Oficinas Centrales.
Entre la plataforma institucional de software geográfico se encuentran dos que serán los fundamentales para la implementación del presente trabajo: *Geomatica*[79] *V8.2.1.* de *PCI Geomatics* e *Idrisi32 R2* de *Clark Labs*. Éstos ofrecen las herramientas apropiadas para el procesamiento digital de las imágenes que nos ocupan.

V.2.1. PCI Geomatica ver. 8.2.1.

De los dos por utilizar, *Geomatica* es el software de mayor robustez, por lo que será el que soportará la mayoría de los procesos del presente trabajo. De origen canadiense, se constituye como uno de los líderes mundiales entre los sistemas de manejo y procesamiento digital de imágenes de percepción remota y en general de imágenes con carácter cartográfico.
Por la importancia de este software en la implementación, se harán los señalamientos que se consideran más relevantes, detallando varios programas de utilidad, con la finalidad también de mostrar su manejo.
Actualmente *Geomatica* se encuentra disponible para diferentes sistemas operativos –UNIX, VMS, Windows y en consecuencia para diferentes plataformas de hardware. En la implementación se utilizará una licencia para Windows XP.
Todos los programas de *Geomatica* reconocen un único formato de almacenamiento de datos, el formato *PCIDSK*. En este formato, todos los datos raster y datos estadísticos (firmas espectrales, tablas de color, etc.) están almacenados en un solo archivo bajo un mismo nombre.

[79] Corresponde a un término inglés que denomina al software.

En el manejo de información en *Geomatica*, comúnmente se hace referencia a un archivo *PCIDSK* con el término base de datos. El término base de datos que aquí se maneja no es en el sentido de un Sistema Manejador de Base de Batos, como lo es en ORACLE, Microsoft Access, DBase, etc. En *Geomatica*, una base de datos es un grupo de capas de datos e información auxiliar asociada, usualmente contenidas en un solo archivo.

Una base de datos puede contener capas de información raster (canales), capas de información vectorial (segmentos), tablas de pseudocolor (segmentos *PCT*), puntos de control del terreno (segmentos *GCP*), Metadatos[80], tablas "lookup" (segmentos *LUT*) y otro tipo de información auxiliar.

Cada canal de datos raster y cada segmento son considerados una capa en la base de datos *PCIDSK*.

Geomatica responde a la necesidad de integrar productos que provienen de sensores remotos, fotogrametría, SIG en formatos vectorial y raster, así como ofrece funcionalidades cartográficas. Se incluye:

- Edición de imágenes como clasificación, realces, filtros y perfiles.
- Edición de tablas de color.
- Creación de modelos digitales de elevación.
- Completa topología vectorial con edición de los vectores.
- Conversiones raster-vector.
- Rápida generación de cartografía.

V.2.1.1. Principales componentes de *Geomatica*.

Normalmente describir un software con orientación a SIG, parte de la idea de hacerlo agrupando sus funciones, no obstante, para el caso de *Geomatica* resulta más ilustrativo hacerlo por sus componentes, esto por el potencial que ofrece;

[80] Los metadatos son datos altamente estructurados que describen información, el contenido, la calidad, la condición y otras características de los datos. Es "información sobre información" o "datos sobre los datos". Algunos ejemplos de información que se puede describir usando metadatos son: impresa, audiovisual, geoespacial, etc.

teniendo presente que cumple con las características de un SIG; y posteriormente hacer una descripción de los principales programas por utilizar en la implementación.

V.2.1.1.1. Barra de herramientas.

Como es de esperarse, esta componente es el medio para acceder a las aplicaciones individuales de *Geomatica*: Focus, PCI Modeler, EASI, Ortho, Fly!, Image Chip Manager, PCI Autor, Licence Manager, Image Works, Xpace y GCPWorks.



V.2.1.1.2. Focus.

 Es una sencilla interfaz que permite utilizar las principales herramientas de visualización, mediante un ambiente gráfico de manipulación de datos para:

- Edición de imágenes –clasificación, realces, filtros y perfiles–.
- Generación y manipulación de tablas de color –y falso color–.
- Edición de Modelos Digitales de Elevación.
- Manejo vectorial –topología, conversiones raster-vector–.
- Generación de cartografía.
- Acceso a más de 300 algoritmos de procesamiento y análisis espacial.
- Árbol jerárquico para facilitar la navegación y manejo de archivos.
- Manejo de datos con capacidad de archivos mayores a 2 GB.

V.2.1.1.3. PCI Modeler.

 Conecta y controla gráficamente una serie de componentes –módulos– de proceso de datos, bajo un cierto orden para realizar una tarea. Es decir, se

obtiene un modelo solución a través de "tuberías" que conectan diferentes programas que se ejecutan en un cierto orden y bajo ciertos parámetros.

V.2.1.1.4. EASI (Engineering Analysis and Scientific Interface).



Es una interfaz de línea de comandos que ejecuta más de 300 programas de procesamiento y análisis espacial. Seleccionándolos y ejecutándolos en una secuencia particular se pueden procesar los datos de diferentes maneras, mediante la asignación de valores a variables globales que sirven de parámetros de entrada para los programas que se ejecutan.
Resulta muy tedioso en casos como la asignación de nombres de archivos, ya que la variable global debe ser asignada con la cadena de la ruta completa ingresando el texto de la misma.

V.2.1.1.5. OrthoEngine.



Realiza la orto-rectificación[81] y mosaico de imágenes. Esto para procesar imágenes con distorsiones geométricas que las hacen inútiles geográficamente. Estas distorsiones pueden ser ocasionadas por la curvatura de la Tierra, la refracción atmosférica y distorsión panorámica. Entonces los datos primero deben ser corregidos geométricamente y transformados a una proyección cartográfica estándar, meta fundamental de este módulo.

V.2.1.1.6. FLY!



Es una herramienta de visualización que reconstruye escenas en perspectiva desde un modelo digital de elevación. Genera escenas sucesivas que dan la apariencia de un vuelo virtual a través del conjunto de datos.

[81] Producir una imagen con integridad geométrica.

Es posible sobreponer al modelo digital de elevación imágenes de satélite –compuestas o una sola banda– para tener un modelo de la realidad y sobre éste simular un vuelo.
Cuenta con un panel de control que permite modificar algunos parámetros como velocidad y altura, así como predefinir rutas de vuelo.

V.2.1.1.7. Programas heredados de versiones anteriores.

La funcionalidad de estos programas no fue integrada en su totalidad en el conjunto de módulos de PCI Geomatica V 8.2.1., razón por la cual mantienen las características heredadas de versiones anteriores, siendo éstas de muy buena calidad.

V.2.1.1.7.1. ImageWorks.

 Trabaja con imágenes y vectores. Ha sido uno de los más importantes programas implementados en PCI, con el que es posible realizar principalmente:

- Realces
- Edición de imágenes
- Edición vectorial
- Clasificación de imágenes
- Composiciones visuales de imágenes

Como todo visualizador permite realizar acercamientos y desplazamientos en una imagen, así como consultas directas de los valores de una imagen.
La mayoría de sus funcionalidades actualmente están integradas en Focus.

V.2.1.1.7.2. Xpace.

 Es una interfaz gráfica para todos los programas implementados en Geomatica. Ofrece una lista de todos los programas, misma que puede ser

consultada de manera global, por el nombre del programa o por algún prefijo que aluda a las primeras letras del nombre del programa, en cuyo caso mostrará todas las coincidencias con el prefijo, pudiendo ejecutarlo con la consecuente aparición de una interfaz gráfica para ingresar los parámetros requeridos. Es decir, es una interfaz gráfica "intuitiva" para el usuario de EASI.
Xpace ha sido integrado en PCI Modeler y en el Módulo de Librerías en Focus.

V.2.1.1.7.3. GCPWorks.

 En general es un colector de puntos de control terrestre para la corrección geométrica de imágenes, misma que también se realiza con este programa. Permite también realizar mosaicos de imágenes.
Las funcionalidades de este programa han sido migradas a OrthoEngine.

V.2.1.2. Principales funciones en Geomatica útiles al proyecto.

Crear una Base de Datos.

Se utiliza el programa **CIM** y requiere de los siguientes parámetros:

FILE: Ruta y nombre del archivo a crear. La extensión del archivo por defecto es **.PIX**.

TEX1:
TEX2: } Textos descriptivos (Parámetros opcionales).

DBSZ: Dimensiones de la base de datos. Este campo consta de 2 campos separados por comas. En el primer campo se especifica el número de columnas y en el segundo el número de renglones de la imagen.

PXSZ: Tamaño horizontal (x) y vertical (y) del píxel. Sin embargo, como la base de datos no está geo-referenciada, *Geomatica* considera unidades píxel,

por defecto es 1,1. Estos valores cambiarán al geo-referenciarse la base de datos.

DBNC: Cantidad y tipo de canales que formarán la base de datos.

Este parámetro consta de cuatro campos separados por comas, cada uno es para indicar la cantidad de canales de un tipo determinado, respetando el siguiente formato:

DBNC: *n1,n2,n3,n4*

n1 para indicar canales de tipo byte, 8 bits.

n2 para indicar canales de tipo entero con signo, 16 bits.

n3 para indicar canales de tipo entero sin signo, 16 bits.

n4 para indicar canales de tipo real, 32 bits.

El número total de canales no debe exceder 4096.

Ejemplos:

DBNC: *0,5* Se crearán sólo 5 canales de tipo entero con signo.

DBNC: *1,0,0,3* Se creará un canal de 8 bits y 3 canales de 32 bits.

DBLAYOUT: Organización de los datos de la imagen, que se especifica con una de las siguientes palabras:

PÍXEL o *BAND*, los datos de la imagen estarán organizados todos en un solo archivo.

FILE, cada canal de la imagen estará en un archivo separado del encabezado. El encabezado tendrá la extensión *.PIX* y el archivo para cada canal tendrá la extensión *.00n*, donde *n* es el número correspondiente al canal.

Agregar canales a una Base de Datos existente.

Se utiliza el programa **PCIMOD**, requiere de los siguientes parámetros:

FILE: Ruta y nombre del archivo al cual se le van a agregar canales.

PCIOP: Acción que se va a realizar, en este caso la palabra ADD, para agregar canales.

PCIVAL: Cantidad y tipo de canales que se van a agregar. Este parámetro consta de cuatro campos separados por comas, cada uno es para indicar la cantidad de canales de un tipo determinado, respetando el siguiente formato:

DBNC: *n1,n2,n3,n4*

n1 para indicar canales de tipo byte, 8 bits.

n2 para indicar canales de tipo entero con signo, 16 bits.

n3 para indicar canales de tipo entero sin signo, 16 bits.

n4 para indicar canales de tipo real, 32 bits.

Eliminar canales de una Base de Datos.

Se utiliza el programa **PCIMOD**, requiere de los siguientes parámetros:

FILE: Ruta y nombre del archivo al cual se le van a eliminar canales.

PCIOP: Acción que se va a realizar, en este caso la palabra *DEL*, para eliminar canales.

PCIVAL: Lista con los números de los canales que se van a eliminar.

Ejemplo:

PCIVAL: *4,9,22* Se eliminarán los canales *4, 9 y 22*.

Marcar segmentos para eliminar.

Se utiliza el programa **DAS**, requiere de los siguientes parámetros:

FILE: Ruta y nombre del archivo al cual se le van a eliminar segmentos.

DBSL: Lista con los números de los segmentos que se van a eliminar.

Ejemplo:

DBSL: *5,10,21* Se eliminarán los segmentos 5*, 10* y *21*.

Al realizar esta operación, los segmentos indicados sólo quedan marcados con la palabra *DELETED*, para eliminarlos definitivamente, se debe utilizar el programa *PCIMOD*.

Eliminar definitivamente segmentos marcados.

Se utiliza el programa **PCIMOD**, requiere de los siguientes parámetros:

FILE: Ruta y nombre del archivo al cual se le van a eliminar segmentos marcados.

PCIOP: Acción que se va a realizar, en este caso la palabra *COM*, para eliminar segmentos que están marcados con *DELETED* (segmentos que fueron marcados con el programa *DAS*).

Geo-referenciar una Base de Datos existente.

La forma más simple de geo-referenciar una base de datos es utilizar el programa **GEOSET**, requiere de los siguientes parámetros:

FILE: Nombre y ruta del archivo al cual se le va a especificar un límite rectangular en el segmento de geo-referencia.

UPLEFT: Coordenadas *x, y* de la esquina superior izquierda.

LORIGHT: Coordenadas *x,y* de la esquina inferior derecha.

MAPUNITS: Unidades de geo-referencia con las cuales se especificarán los valores para los parámetros *UPLEFT* y *LORIGHT*.

Puede ser una de las siguientes:

PIXEL Unidades por defecto, maneja las coordenadas renglón, columna de acuerdo a las dimensiones de la base de datos.

METRE	Metros.
UTM	Universal Transversa de Mercator en metros.
LONG/LAT	Coordenadas geográficas Longitud/Latitud (grados decimales)
UPS	Universal Estereográfica Polar en metros.

En el parámetro *MAPUNITS* se puede especificar también número de zona y renglón *UTM*, así como el elipsoide.

Ejemplo:

MAPUNITS: *UTM 14 Q E000* Zona UTM 14, renglón Q y elipsoide Clarke 1866.

Los límites de geo-referencia indicados con el programa *GEOSET* quedarán almacenados en el segmento *1* que es el segmento maestro de geo-referencia.

Otra alternativa para dar referencia geográfica a una imagen existente es a través del programa **SETPRO** que se utiliza para especificar la información referente a la proyección cartográfica de un archivo PCIDSK; los parámetros para definirla y las coordenadas de los límites se almacenan en el segmento 1 (Segmento de Georreferencia Maestro).

Requiere de los siguientes parámetros:

FILE: Ruta y nombre del archivo al que se le va a asignar la proyección cartográfica.

PROJECT: Indica la proyección cartográfica para el archivo especificado en FILE.

ZONE: Especifica la zona, en caso de que la proyección cartográfica sea UTM o SPAF, SPCS o SPIF, en otro caso no se usa este parámetro.

ROW: Especifica el renglón en caso de que la proyección sea UTM o UPS, en otro caso no se usa este parámetro.

ELLIPS: Especifica el modelo a usar para definir la forma terrestre (ver programa IMERGE).

LLBOUND: Especifica con una "Y" si los límites de la imagen, se darán en coordenadas geográficas, en caso contrario indicarlo con la letra "N".

ULX: Especifica el límite en X de la esquina superior izquierda, puede ser en coordenadas geográficas o en las correspondientes a la proyección indicada.

ULY: Especifica el límite en Y de la esquina superior izquierda, puede ser en coordenadas geográficas o en las correspondientes a la proyección indicada.

LRX: Especifica el límite en X de la esquina inferior derecha, puede ser en coordenadas geográficas o en las correspondientes a la proyección indicada.

LRY: Especifica el límite en Y de la esquina inferior derecha, puede ser en coordenadas geográficas o en las correspondientes a la proyección indicada.

EXTRAINF: Especifica si información característica de la proyección se ingresará o no interactivamente al iniciar la ejecución del programa, puede tomar uno de los siguientes valores:

EXTRAINF="DEFAULT"	Para indicar que los parámetros de la proyección se limitan a las coordenadas extremas.
EXTRAINF="ASK"	Para indicar que el usuario proporcionará interactivamente valores específicos de la proyección indicada.
EXTRAINF="EXPLICIT"	Para indicar que son suficientes los datos proporcionados en los parámetros anteriores.

Crear una Base de Datos con geo-referencia.

Para especificar límites de geo-referencia a una base de datos a la vez que se crea, se utiliza la opción **FILE UTILITY** del menú **FILE** de **XPACE**.
El cuadro de diálogo de esta herramienta permite indicar fácilmente el tipo y número de canales para la base de datos, así como la geo-referencia permitiendo especificar Datum o Elipsoide y límites en coordenadas reales.

Consultar Bases de Datos.

Para consultar los distintos tipos de datos contenidos en un archivo *PCIDSK* se utilizan los siguientes programas:

- *Programa CDL*.

Genera un reporte con la descripción de los canales de la base de datos, los parámetros requeridos son los siguientes:

FILE: Ruta y nombre del archivo que se desea consultar.
DBCL: Lista de los números de los canales a consultar separados por comas (parámetro opcional).
DTYP: Tipo de descripción indicado por una de las siguientes palabras:
SHORT Reporte corto.
FULL Reporte completo incluyendo su historial.
REPORT: Dispositivo que se utilizará para el reporte, puede ser uno de los siguientes términos:
TERM El reporte se desplegará en pantalla, o
*Ruta y nombre del archiv*o que almacenará el reporte en formato ASCII, en este caso no se desplegará en pantalla.

- *Programa ASL.*

Genera un reporte con la descripción de los segmentos contenidos en una base de datos, los parámetros requeridos son los siguientes:

FILE: Ruta y nombre del archivo que se desea consultar.

LTYP: Tipo de reporte, indicado por una de las siguientes palabras:

BRIEF Reporte Breve.

SHORT Reporte Corto.

FULL Reporte Completo incluyendo su historial.

ASLT: Lista de los códigos del tipo de segmento que se desea consultar (parámetro opcional).

Si no se le da valor a este parámetro, el reporte listará segmentos de todo tipo contenidos en la base de datos.

ASSN: Nombre del segmento que se desea consultar (parámetro opcional).

Si no se le da valor a este parámetro, el reporte listará todos los segmentos contenidos en la base de datos.

REPORT: Dispositivo que se utilizará para el reporte, puede ser uno de los siguientes términos:

TERM El reporte se desplegará en pantalla, o

Ruta y nombre del archivo que almacenará el reporte en formato ASCII, en este caso no se desplegará en pantalla.

- *Programa VecRep.*

Genera un reporte con el contenido de segmentos vector contenidos en una base de datos, los parámetros requeridos son los siguientes:

FILE: Ruta y nombre del archivo que se desea consultar.

DBVS: Número del segmento vector que se desea consultar, los segmentos deben ser vectoriales, es decir, de tipo *116* (vector).

VRTYPE: Tipo de reporte. Puede ser alguna de las siguientes palabras:

VERT: El reporte contendrá solamente los vértices de las identidades y la proyección.

TABLE: El reporte contendrá solamente la tabla de atributos.

RST: El reporte contendrá solamente la tabla de estilo.

ALL: El reporte contendrá los vértices, atributos y tabla de estilo.

SUMMARY: El reporte contendrá la proyección, número de estructuras, y otra información resumida, pero no la tabla de atributos, la tabla de representación y los vértices.

OLD: El reporte generado será similar al formato de la versión anterior del software.

REPORT: Dispositivo que se utilizará para el reporte, puede ser uno de los siguientes términos:

TERM El reporte se desplegará en pantalla, o

Ruta y nombre del archivo que almacenará el reporte en formato ASCII, en este caso no se desplegará en pantalla.

- *Programa NUM.*

Genera un tabulado con los valores numéricos del contenido de uno o varios canales de la base de datos, los parámetros requeridos son los siguientes:

FILE: Ruta y nombre del archivo que se desea consultar.

DBIC: Lista de los números de los canales que serán examinados.

DBIW: Límites rectangulares de la información que se desea tabular. Este parámetro está formado de 4 campos separados por comas, los dos primeros son las coordenadas columna, renglón a partir de las cuales se desea tabular, los otros dos datos son el tamaño en columnas y renglones que tendrá el tabulado. Debe tenerse en cuenta que el desplazamiento

dentro de la imagen es hacia la derecha y hacia abajo, ya que el origen de los datos de una imagen en *Geomática* es columna *1*, renglón *1* y está situado en la esquina superior izquierda.

Ejemplo:

DBIW: *321,277,10,50* Los valores numéricos que se desplegarán en el tabulado serán aquellos a partir de la columna *321* y renglón *277*, desplazándose *10* columnas a la derecha y *50* renglones hacia abajo.

REPORT: Dispositivo que se utilizará para el reporte, puede ser uno de los siguientes términos:

TERM El reporte se desplegará en pantalla, o

Ruta y nombre del archivo que almacenará el reporte en formato ASCII, en este caso no se desplegará en pantalla.

Importar archivos.

Es posible utilizar el programa **FIMPORT**. Importa todos los datos contenidos en un archivo en formato GDB[82] y crea un archivo nuevo PCIDSK. Automáticamente detecta el tipo de archivo y copia imágenes e información auxiliar al archivo PCIDSK, tales como geo-referencia o vectores. Solamente formatos de archivos soportados por la librería GDB se podrán importar.

Dado que automáticamente crea el archivo **.PIX**, no se tiene control ni en el tamaño del píxel ni en las dimensiones de la base de datos. Dependiendo de la información que se importe, ésta quedará almacenada en canales o segmentos.

El programa **FIMPORT** requiere de los siguientes parámetros:

[82] GDB (también conocido como GeoGateway) es una tecnología para conseguir acceso a los datos en muchos formatos de archivo, de una manera uniforme. GeoGateway incluye el acceso a imágenes, vectores, atributos, proyecciones y otra información auxiliar del interés. Cada formato de archivo soportado por GeoGateway está incluido dentro de la biblioteca GDB.

FILI: Nombre y ruta del archivo que contiene la información a importar, debe estar en un formato que soporte *Geomatica*.

FILO: Nombre y ruta del archivo PCIDSK que va a almacenar la información.

DBIW: Se utiliza si se va a importar datos raster, e indica que solo una ventana es la requerida. Este parámetro está formado de 4 campos separados por comas, los dos primeros son las coordenadas columna, renglón a partir de las cuales se desea obtener la información, los otros dos datos son las dimensiones en columnas y renglones de los datos que se tomarán como entrada. Debe tenerse en cuenta que el desplazamiento dentro de la imagen es hacia la derecha y hacia abajo, ya que el origen de los datos de una imagen en *Geomática* es columna *1*, renglón *1* y está situado en la esquina superior izquierda.

POPTION: Tipo de remuestreo de la imagen, que se especifica con una de las siguientes palabras:

NEAR, utiliza el algoritmo de "el vecino más cercano".

AVER, hace un promedio de todos los píxeles.

MODE, toma la moda de los píxeles.

OFF, no se hace remuestreo.

DBLAYOUT: Organización de los datos de la imagen, que se especifica con una de las siguientes palabras:

PIXEL o *BAND*, los datos de la imagen estarán organizados todos en un solo archivo.

FILE, cada canal de la imagen estará en un archivo separado del encabezado. El encabezado tendrá la extensión *.PIX* y el archivo para cada canal tendrá la extensión *.00n*, donde *n* es el número correspondiente al canal.

Una variante en la importación la encontramos en la opción FILE UTILITY del menú FILE (Import to…) de cualquiera de los componentes de Geomatica, que "traduce" archivos de cualquier formato compatible (GDB) a formato PCIDSK.

Su uso es simple, cuenta con una interfaz gráfica en la que el botón SELECT que aparece junto al texto SOURCE FILE invoca el cuadro de diálogo para seleccionar el archivo a importar.

Para seleccionar el archivo de salida (PCIDSK) especificar con el botón SELECT que aparece junto al texto DESTINATION FILE la ruta y nombre del nuevo archivo que será creado. El archivo de salida no debe existir antes de la importación.

En el campo FORMAT OPTIONS, se indica la organización o tipo de almacenamiento que tendrán los datos en el nuevo archivo PCIDSK.

En el campo PYRAMIDING OPTIONS, se indica el tipo de "piramidación" requerido para controlar el método de "bajo muestreo" o deshabilitar su construcción completamente. Refiriéndose al método de remuestreo que será utilizado sólo en las vistas requeridas para el despliegue de la imagen, buscando que sea más rápido.

Exportar archivos.

El programa FEXPORT se utiliza para exportar datos almacenados en las capas de un archivo PCIDSK a un formato compatible (GDB).

Para formatos que lo soporten, la información de la geo-referencia será transferida al archivo de salida.

Requiere de los siguientes parámetros:

FILI: Nombre y ruta del archivo PCIDSK que contiene la información a exportarse.

FILO: Nombre y ruta del archivo que será creado en el formato de exportación deseado.

DBIW: Se utiliza si se va a exportar información raster, e indica que sólo una ventana es la requerida. Este parámetro está formado de 4 campos separados por comas, los dos primeros son las coordenadas columna, renglón a partir de las cuales se desea obtener la información, los otros dos datos son las dimensiones en columnas y renglones de los datos que se

tomarán como entrada. Debe tenerse en cuenta que el desplazamiento dentro de la imagen es hacia la derecha y hacia abajo, ya que el origen de los datos de una imagen en *formato PCIDSK* es columna *1*, renglón *1* y está situado en la esquina superior izquierda.

DBIC: Lista de los números de canales que contienen los datos que serán exportados.

DBIB: Lista de los números de segmentos que contienen bitmaps que serán exportados.

DBVS: Lista de los números de segmentos que contienen vectores que serán exportados.

DBLUT: Lista de los segmentos que contienen tablas "look-up" que serán exportados.

DBPCT: Lista de los segmentos que contienen tablas de pseudocolor que serán exportados.

FTYPE: Especifica el tipo o formato de exportación deseado.

FOPTIONS: Especifica información adicional para controlar la naturaleza del archivo de salida a crearse.

Cabe señalara que la mayoría de los formatos compatibles (GDB) tienen limitaciones en sus tipos de datos y número de capas que pueden almacenar. El usuario es responsable de indicar combinaciones válidas de datos en los parámetros DBIC, DBIB, DBVS, DBLUT y DBPCT.
Una combinación inválida provocará la cancelación del proceso de exportación o la generación de archivos de salida incorrectos.

Una variante en la importación la encontramos en la opción FILE UTILITY del menú FILE (Export to…) de cualquiera de los componentes de Geomatica. El panel EXPORT FILE se encuentra en el menú FILE UTILITY y se activa con la opción "Export to…". Se utiliza para "traducir" archivos de algún formato compatible (GDB) a otro.

El archivo por defecto a exportar es el que se encuentre abierto en FILE UTILITY y se muestra en el campo de texto SOURCE FILE.
Para seleccionar el archivo de salida especificar con el botón SELECT que aparece junto al campo de texto DESTINATION FILE la ruta y nombre del nuevo archivo que será creado.
El tipo o formato del archivo para la exportación actual se muestra en el menú "Output Format", puede cambiarse abriendo la persiana del menú y ahí seleccionar el formato deseado. Dependiendo del tipo de archivo seleccionado, se pueden especificar opciones adicionales en el campo de texto "Options".

En la caja "Source Layers" se seleccionan los elementos exportables (canales, bitmaps, vectores, tablas, etc.) de la lista de capas correspondiente al archivo de entrada. Esto se lleva a cabo marcando el elemento deseado y presionando el botón "Add".
Los elementos seleccionados aparecerán en la caja de la derecha etiquetada como "Destination Layers". Con los botones de flecha arriba y abajo se puede reposicionar el elemento seleccionado en la lista. Con el botón "Remove" se pueden eliminar elementos de la lista que por error aparezcan en la caja "Destination Layers". Con el botón "Select all" en ambas cajas ("Source Layers" y "Destination Layers") puede ser útil cuando sea necesario seleccionar todos los elementos de la lista y se desee exportarlos o eliminarlos según corresponda.

Al abrir la persiana "View" de la caja "Source Layers" permite desplegar solamente un tipo particular de capa para su exportación, restringido siempre al tipo de formato de salida deseado.

Una vez seleccionadas las capas a exportar, así como el tipo de formato deseado, se presiona el botón "Export" para iniciar el proceso, aparecerá un monitor de progreso indicando el nivel relativo de avance de la operación de exportación.

Operaciones aritmético-lógicas.

Se utiliza el programa **ARI**. Este programa aplica operaciones aritméticas o lógicas sobre datos almacenados en los canales de la base de datos.
Los parámetros requeridos son los siguientes:

FILE: Ruta y nombre del archivo *.PIX* que contiene el canal con los datos a los cuales se les aplicará la operación aritmética.

OPER: Operación a realizar sobre los datos, puede ser una de las siguientes palabras:

ADD, SUB, MUL, DIV, AND, OR

CNST: Valor de la constante que se utilizará para realizar la operación.

MASK: Área de los datos de entrada en la cual se aplicará la operación especificada en el parámetro *OPER*. Si este parámetro se deja en blanco, se procesarán todos los datos del canal de entrada.

DBIC: Lista de los números de canales que contienen los datos a los cuales se les aplicará la operación especificada.

DBOC: Número del canal que va a almacenar el resultado de la operación especificada.

ZERODIV: Valor que se utiliza para el resultado si se presenta una división por cero.

AUTO: Método de escalamiento, sólo para operaciones aritméticas, puede ser una de las siguientes palabras:

ON, OFF, USER

Si *AUTO* = "*ON*" se realiza un escalamiento automático.
Si *AUTO* = "*OFF*" no se realiza escalamiento.
Si *AUTO* = "*USER*" el escalamiento lo especifica el usuario en el parámetro *RVAL*.

El valor por defecto para este parámetro es *OFF*.

RVAL: Rangos de entrada y salida para escalar el resultado de operaciones aritméticas.

Aplicar una tabla CLUT a una imagen.

Se utiliza el programa **LUT.** Este programa aplica un segmento "lookup table" a los datos almacenados en un canal de la base de datos, para ayudar al usuario a hacer interpretaciones visuales.
Los parámetros requeridos son los siguientes:

FILE: Ruta y nombre del archivo *.PIX* que contiene los datos a los cuales se aplicará la tabla.

DBIC: Lista de los números de canales que contienen los datos que se van a modificar.

DBLUT: Lista de los números de segmento que contienen los valores establecidos a aplicar.

DBOC: Lista de los números de canales que van a almacenar el resultado de la aplicación de la tabla LUT.

MASK: Área de los datos de entrada en la cual se aplicará la tabla LUT. Si este parámetro se deja en blanco, se procesarán todos los datos del canal de entrada especificado en el parámetro *DBIC*.

Transferencia de canales.

Para transferir canales entre archivos PCDISK que conforman un conjunto de datos se utiliza el programa **III**, que requiere de los siguientes parámetros:

FILI: Nombre y ruta del archivo que contiene el canal a transferir.

FILO: Nombre y ruta del archivo que recibe el canal, creado previamente con el programa *CIM,* (parámetro opcional, sino es especificado, por defecto se tomará el valor del parámetro *FILI*).

DBIC: Número del canal que contiene los datos raster que se van a transferir.

DBOC: Número del canal que almacenará los datos transferidos, debe ser del mismo tipo que el canal especificado en el parámetro *DBIC*.

DBIW: Se utiliza para indicar que sólo una parte del contenido en el canal especificado por el parámetro *DBIC* se integrará al conjunto de datos. Este parámetro está formado de 4 campos separados por comas, los dos primeros son las coordenadas columna, renglón a partir de las cuales se desea integrar los datos raster, los otros dos datos son las dimensiones en columnas y renglones de los datos que se tomarán como entrada. Debe tenerse en cuenta que el desplazamiento dentro de la imagen es hacia la derecha y hacia abajo, ya que el origen de los datos de una imagen en *PCI* es columna *1*, renglón *1* y está situado en la esquina superior izquierda.

Este parámetro deberá permanecer en blanco para que sea incorporado al conjunto de datos el canal completo**.**

DBOW: Se utiliza para indicar las coordenadas a partir de las cuales se integrará el contenido en el canal especificado por el parámetro *DBIC*. Este parámetro está formado de 4 campos separados por comas, los dos primeros son las coordenadas columna, renglón a partir de las cuales se desean colocar los datos raster, los otros dos valores son las dimensiones en columnas y renglones de los datos raster que se están integrando. Debe tenerse en cuenta que el desplazamiento dentro de la imagen es hacia la derecha y hacia abajo, ya que el origen de los datos de una imagen en *PCI* es columna *1*, renglón *1* y está situado en la esquina superior izquierda.

Creación de subconjuntos de datos.

En todos los módulos de Geomatica se ofrece una utilería con varias herramientas, entre las cuales se encuentra *Subset*, con la que se crean

subconjuntos de la información contenida en un archivo PCIDSK, raster o vectorial.

La forma de interacción es a través de un cuadro de diálogo en el que se debe indicar lo siguiente:

- Archivo Fuente: Ruta y Nombre del archivo al que se va a extraer un subconjunto de su cubrimiento.
- Archivo Destino: Ruta y nombre del archivo que va a almacenar la información.
- Coordenadas de las esquinas superior izquierda e inferior derecha del subconjunto de interés, las cuales pueden ser dadas en alguna de las siguientes unidades:
    - Unidades de imagen (Database Corners)
    - Unidades del sistema de referencia (Geocoded Corners)
    - Unidades geográficas (Long/Lat Corners)
- Capas que se desean incluir en el subconjunto.

Mejorar el histograma de una imagen respecto de otra.

Se utiliza el programa **MATCH**. Este programa genera un segmento "lookup table" que hace corresponder (desarrolla un histograma de correspondencia) los datos de la imagen de entrada con los datos de una imagen maestra. Es decir, una vez establecida una imagen maestra, ésta se utiliza para hacer un "balance[83]" de tonos a la imagen de entrada, con el fin de que ambas se asemejen en lo posible. Requiere de los siguientes parámetros:

FILE: Ruta y nombre del archivo *.PIX* que contiene tanto la imagen a "balancear" como la imagen maestra.

[83] Se aplica una corrección global de los valores radiométricos durante la generación de un mosaico de imágenes. Se genera un consistente nivel de tonos y contraste en todo el mosaico. El término *balance* se emplea para el proceso de igualación del tono y contraste de una imagen que se agrega a un mosaico, esto reduce la visibilidad de las líneas de unión y produce una imagen visualmente homogénea. En el presente trabajo se maneja indistintamente "igualación del histograma" y "balance de tonos".

DBIC: Número de canal que contiene los datos que se van a modificar.

MASK: Área de los datos de entrada que serán considerados para la generación del segmento "LUT". Si este parámetro se deja en blanco, se procesarán todos los datos del canal de entrada especificado en el parámetro *DBIC*.

FILM: Ruta y nombre del archivo *.PIX* que contiene la imagen maestra.

DBMC: Número de canal de la imagen maestra con los datos de referencia.

MCMASK: Área de los datos de la imagen maestra que serán considerados para la generación del segmento "LUT". Si este parámetro se deja en blanco, se tomarán en cuenta todos los datos del canal especificado en el parámetro *DBMC*.

DBLUT: Este parámetro se deja en blanco, ya que el programa creará un segmento nuevo para esta tabla LUT.

DBSN: Nombre del segmento LUT que se creará, máximo 8 caracteres (parámetro opcional).

DBSD: Descriptor del segmento LUT que se creará, máximo 64 caracteres (parámetro opcional).

TRIM: Indica en porcentaje, la asignación a cero de los valores mínimos y máximos del histograma tanto de la imagen de entrada como la imagen maestra (parámetro opcional).

Generar un mosaico de imágenes.

Se puede utilizar el programa **MOSAIC**. Este programa transfiere los datos de la imagen de entrada a un archivo de salida considerando los límites de los segmentos de geo-referencia para determinar su traslape. Se utiliza generalmente para unir imágenes geométricamente corregidas, adicionalmente los datos de la imagen de entrada pueden modificarse aplicando una tabla LUT antes de ser movidos a la imagen de salida. Para cada parte de un mosaico en proceso, se debe ejecutar este programa variando el valor del parámetro FILI. Requiere de los siguientes parámetros:

FILI: Ruta y nombre del archivo que contiene los datos a transferir o a unir.

DBIC: Lista de los números de canales que contienen los datos a unir.

DBVS: Segmento vector contenido en el archivo de entrada (FILI) que define la línea a usar para la unión. Si se deja en blanco, los datos de entrada se moverán sobrescribiendo los datos correspondientes en el archivo de salida.

DBLUT: Número del segmento que contiene la tabla LUT para modificar los datos de la imagen de entrada, si no se especifica, los datos de la imagen de entrada se transfieren sin cambios.

FILO: Nombre y ruta del archivo PCIDSK de salida.

DBOC: Lista de los números de canales que reciben los datos que se unen.

BLEND: Distancia en píxeles de la línea de unión para mezclar los valores de la imagen de entrada con los valores de la imagen de salida, si no se especifica, no se hará mezcla de valores.

BACKVAL: Valor del nivel de gris en la imagen de salida para el fondo, ausencia de datos, el valor por defecto es cero.

Así mismo, es posible utilizar el programa **IMERGE** que une o fusiona en un canal una o más imágenes provenientes de diferentes archivos en un único archivo de salida.

Requiere de los siguientes parámetros:

FILI: Ruta del directorio en el que se encuentran los archivos de las imágenes que se van a unir. Todos los archivos presentes en el directorio indicado así como los que se encuentren en subdirectorios de éste y que sean compatibles (GDB) serán considerados para la unión.

FILO: Ruta y nombre del archivo que va a almacenar la unión de las imágenes especificadas en FILI

PROJECT: Indica la proyección cartográfica para el archivo de salida especificado en FILO.

ZONE: Especifica la zona, en caso de que la proyección cartográfica sea UTM o SPAF, SPCS o SPIF, en otro caso no se usa este parámetro.

ROW: Especifica el renglón en caso de que la proyección sea UTM o UPS, en otro caso no se usa este parámetro.

ELLIPS: Especifica el modelo a usar para definir la forma terrestre. Uno de los siguientes códigos son válidos:

ELLIPS = | Default, Clarke 1866
ELLIPS = "0" | Clarke 1866, default
| [used for NAD27 (North American Datum 1927)]
ELLIPS = "1" | Clarke 1880
ELLIPS = "2" | Bessel
ELLIPS = "3" | New International 1967
ELLIPS = "4" | International 1909
ELLIPS = "5" | WGS 72 (World Geodetic Survey 1972)
ELLIPS = "6" | Everest
ELLIPS = "7" | WGS 66 (World Geodetic Survey 1966)
ELLIPS = "8" | GRS 1980 (Geodetic Reference System 1980)
| [used for NAD83 (North American Datum 1983)]
ELLIPS = "9" | Airy
ELLIPS = "10" | Modified Everest
ELLIPS = "11" | Modified Airy
ELLIPS = "12" | WGS 84 (World Geodetic Survey 1984)
ELLIPS = "13" | Southeast Asia
ELLIPS = "14" | Australian National
ELLIPS = "15" | Krassovsky
ELLIPS = "16" | Hough
ELLIPS = "17" | Mercury 1960
ELLIPS = "18" | Modified Mercury 1968
ELLIPS = "19" | Sphere of Radius (6370997 metres) Ellipsoid for the Earth

LLBOUND LONG/LAT for ULX,ULY,LRX,LRY:

Especifica con una "Y" si los límites de la imagen –en caso de especificarse– se darán en coordenadas geográficas; en caso contrario indicarlo con la letra "N"

ULX: Especifica el límite en X de la esquina superior izquierda, puede ser en coordenadas geográficas o en las de la proyección utilizada. Si no es

especificada, el valor de la X mínima de los archivos de entrada es el que se usa.

ULY: Especifica el límite en Y de la esquina superior izquierda, puede ser en coordenadas geográficas o en las de la proyección utilizada. Si no es especificada, el valor de la Y máxima de los archivos de entrada es el que se usa.

LRX: Especifica el límite en X de la esquina inferior derecha, puede ser en coordenadas geográficas o en las de la proyección utilizada. Si no es especificada, el valor de la X máxima de los archivos de entrada es el que se usa.

LRY: Especifica el límite en Y de la esquina inferior derecha, puede ser en coordenadas geográficas o en las de la proyección utilizada. Si no es especificada, el valor de la Y mínima de los archivos de entrada es el que se usa.

BXPXSZ: Especifica el tamaño horizontal del píxel de salida. Si no se especifica, será definido por el tamaño horizontal del píxel mínimo de los archivos de entrada.

BYPXSZ: Especifica el tamaño vertical del píxel de salida. Si no se especifica, será definido por el tamaño vertical del píxel mínimo de los archivos de entrada.

BACKVAL: Especifica el valor del nivel de gris para las celdas de fondo que no representan información de interés en las imágenes de entrada y salida. Al ser creado el archivo de salida, éste es inicializado con este valor antes de agregar en él cualquiera de las imágenes de entrada, asegurando el correcto traslape, en caso de existir, entre las imágenes de entrada. El valor por defecto es cero.

RESAMPLE: Especifica el tipo requerido para el remuestreo[84] de los datos, puede ser uno de los siguientes valores:

"NEAR" Nearest Neighbour (default)

[84] El remuestreo implica principalmente el cambio de resolución de la imagen (a una menor) y en consecuencia el cambio en sus dimensiones. Existen varias posibilidades como promediar píxeles, asignar la moda de los píxeles, asignar directamente el valor de píxel más cercano, entre otros.

"BILIN" Bilinear Interpolation

"CUBIC" Cubic Convolution

TFILE : Ruta y nombre del archivo ASCII que actúa como historial del proceso de unión de las imágenes de entrada.

V.2.2. Idrisi32 R2.

Este software SIG tiene sus orígenes en la Universidad de Clark en versiones para MS-DOS y con fines académicos. En la actualidad existen versiones comerciales como Idrisi32 *R2* (Figura V.5) para Windows, que también se utilizará en la implementación y las versiones *Kilimanjaro y Andes* que son las más recientes al momento de realizar el presente trabajo –no disponibles en la DRO–.

Sólo será utilizado en pocos procesos como la generación de histogramas por tener mejor calidad que los de PCI o el análisis de regresión para obtener el OIF (*Optimum Index Factor*). No obstante, por tratarse de un software mucho más accesible para fines académicos –ya que en este sentido la relación costo-beneficio es mayor–, se hará una descripción general del sistema, realizando la agrupación por funciones y de éstas las más relevantes.

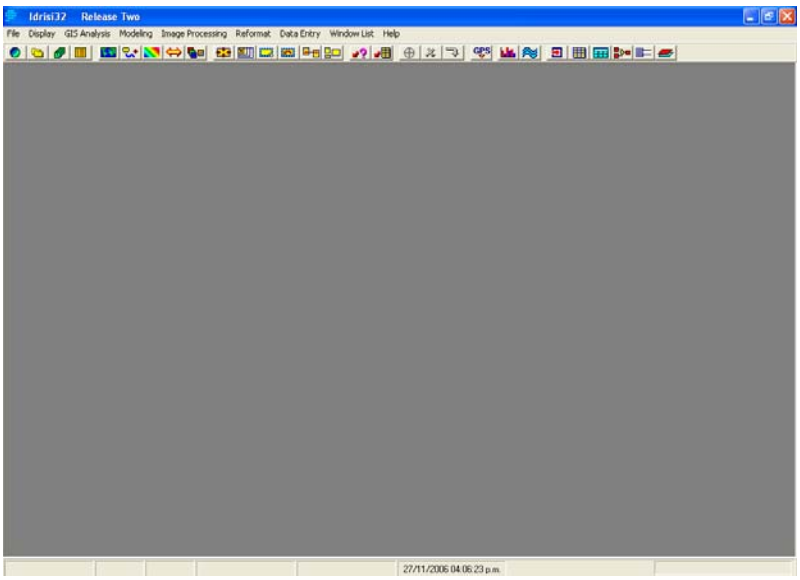


Figura V.5. Interfaz principal de Idrisi32 R2.

V.2.2.1. Funciones básicas.

Data Paths. Es la función que permite definir el entorno de trabajo del proyecto, es decir, se debe indicar aquí cuál será la carpeta que contiene los archivos con los que se va a trabajar, y qué carpeta va a albergar los archivos resultantes de las operaciones. El programa guarda las rutas a las que debe acudir para encontrar los archivos requeridos en cada proceso.

Tratamiento de archivos. Desde algunas opciones del menú *File* como el *Idrisi File Explorer, Collection Editor o Metadata*, se puede visualizar o editar la información relacionada con el contenido de los archivos, así como manipular algunas de sus características estructurales.

Configuración general. Se puede personalizar el aspecto de la interfaz a partir de opciones como *Turn Shortcut On* o *User Preferences* que permite definir las características de visualización de los datos. Existe también un constructor de paletas que permite personalizar el tipo de paleta con el que podemos visualizar las imágenes.

Opciones de importación/exportación o intercambio de archivos. Existen muchas posibilidades para usar datos en formatos distintos al de Idrisi, ya sea en formatos de intercambio como el ASCII, o los formatos habituales de tratamiento de imagen como *.bmp o *.jpg. También hay formatos de otros software comerciales SIG como ESRI, Erdas, ErMapper, GRASS, entre otros. Es posible adaptar los archivos de versiones anteriores que funcionaban con una estructura de datos de 16 bits a la nueva estructura de 32 bits.

Funciones de visualización de información geográfica. Incluye algunas de las herramientas más usadas, desde el menú *Display* que es donde se ejecuta la visualización de los datos, ya sea en formato bidimensional raster o vectorial mediante la opción *Display Launcher*, o tridimensional mediante la orden *Ortho*.

Destacar también la posibilidad de efectuar –en las versiones más recientes– un vuelo virtual en tres dimensiones con *Fly Through* o visualizar archivos multimedia aunque ésta no sea la principal utilidad de este software.

Funciones de visualización de imágenes satélite. Permiten efectuar composiciones de color RGB a partir de la combinación de imágenes captadas desde sensores de teledetección o el paso inverso que es la separación de composiciones de 24 bits en imágenes de 8 bits. También se pueden efectuar acciones de mejora de la imagen en relación a la iluminación o el contraste de la composición para resaltar unos u otros elementos captados por los sensores. Igualmente importante es la creación de histogramas para conocer las características espectrales de las imágenes tratadas.

V.2.2.2. Funciones de análisis espacial.

Consultas a la base de datos[85]. Una de las principales potencialidades del software es la de efectuar análisis de un territorio en función de los atributos que caracterizan dicha superficie, mismos que son fácilmente recuperados desde el conjunto de archivos que conforman el proyecto.

Operadores matemáticos. Idrisi permite efectuar operaciones aritméticas y lógicas con los valores de las imágenes a fin de aislar o combinar determinadas características del territorio y hacer una lectura espacial de los resultados. La calculadora de imágenes permite de una forma sencilla llevar a cabo dichas operaciones.

Operadores de distancia. Efectúan cálculos vinculados a la distancia. Cuenta con funciones como *Buffer* que dibuja corredores de distancia o *Pathway* que

[85] Formalmente no se trata de una base de datos sino de un conjunto de archivos que conforman un proyecto, aunque su funcionalidad incluye lectura de archivos de Acces y XBase, creación de archivos Microsoft Acces, calculo de expresiones basado en SQL, entre otros.

calcula la ruta óptima teniendo en cuenta factores adicionales a la mera distancia en línea recta.

Operadores de contexto. Con un funcionamiento basado en los valores de píxeles vecinos, es posible realizar operaciones en los que los vecinos juegan un papel fundamental, se pueden efectuar interpolaciones que permiten llevar a cabo análisis espaciales muy útiles, cálculos de pendientes y de orientación del terreno. También se pueden detectar cambios bruscos en el tipo de cobertura vegetal de un espacio, o generar grupos de píxeles contiguos con el mismo valor.

Funciones estadísticas. El módulo estadístico permite efectuar operaciones de este tipo con los valores de las imágenes. Desde cálculos sencillos de frecuencias de cada valor, pasando por la generación de gráficos o tablas resumen de los valores representados en nuestra imagen, se pueden llegar a obtener resultados de operaciones complejas de regresión múltiple que indican el grado de dependencia de dos variables entre sí.

V.2.2.3. Funciones de tratamiento digital de imágenes.

Funciones de restauración de la imagen. Con las herramientas que contiene este módulo se pueden generar composiciones a partir de la unión de distintas imágenes de satélite con solapamiento creando mosaicos y series temporales.

Opciones de mejora de la imagen. A partir de estas opciones es posible acceder a funciones de mejora en base a distintos cambios en el contraste de nuestra imagen, realizando composiciones RGB o mediante la aplicación de filtros.

Métodos de clasificación. Como su nombre indica contiene los distintos métodos de clasificación supervisada o no, ya sea fuerte o débil, de las diferentes firmas espectrales y sus rangos de acción detectadas en la imagen que a la postre van a

generar cada uno de los temas o categorías en los que se clasificará la información.

Módulos de trabajo de las firmas espectrales. Muy usado en teledetección ya que sus funciones permiten extraer la huella espectral del objeto de estudio y de los puntos de entrenamiento que se han reconocido en el trabajo de campo. Es un módulo que permite trabajar con los parámetros de radiación y su rango de amplitudes, captados por los sensores de los elementos representados en el territorio.

V.2.2.4. Funciones de entrada y manejo de datos.

Opciones de conversión. Idrisi permite llevar a cabo distintas formas de conversión de sus archivos tanto raster como vectorial a distintos formatos de salida de archivos estándar como ASCII, binario o binario comprimido, o bien convertir el tipo de datos que ellos contienen ya sean reales, byte o enteros.

Capacidad de proyección. Función que posibilita aplicar una determinada proyección cartográfica a las imágenes. También podemos generar archivos de referencia geográfica a partir de coordenadas UTM con la opción *UTMref* del menú *Data Entry*.

Opciones de modificación de las propiedades de imagen. Incluida aquí desde la función *Window* que permite realizar un recorte de la imagen por coordenadas o por renglones y columnas, pasando por funciones para mejorar o reducir la resolución de la imagen a partir del duplicado de píxeles, o la agregación de imágenes por concatenación para lograr una imagen más extensa, para finalizar con la opción de rotación, muy habitual en cualquier software de tratamiento de imágenes.

V.3. Hardware a utilizar en la implementación.

Partiendo de que en la DRO se cuenta con licencias tanto de PCI Geomatica como de Idrisi32 R2 para el sistema operativo Windows XP, entonces la plataforma de hardware a utilizar serán equipos PC disponibles en la Dirección de Geografía, buscando utilizar aquellos que ofrezcan mejores condiciones de procesamiento de acuerdo a requerimientos del software, sin dejar pasar el hecho de que se procesarán volúmenes importantes de datos y que generalmente las especificaciones que el software señalan son los requerimientos mínimos.

V.3.1.Requerimientos del software a utilizar.

Al conocer en primera instancia el hardware necesario de acuerdo a los propios requerimientos del software, así como del conocimiento de los volúmenes de datos a procesar, permitirá gestionar —entre los disponibles en la Dirección de Geografía— el equipo óptimo para la implementación.

V.3.1.1. Requerimientos de PCI Geomatica 8.2.1.

- Microsoft Windows.
- Windows NT 4.0, Windows 2000, Windows XP.
- CD-ROM Drive.
- 400 MB de espacio libre en disco duro, más espacio para datos.
- 512 MB de RAM, o superior.
- Tarjeta gráfica de 24 bits con resolución de 1280 x 1024 píxeles (el mínimo es una tarjeta para gráficos de 16 bits con resolución de 1024 x 768 píxeles).
- SentinelPro hardware key (incluida).

V.3.1.2. Requerimientos de Idrisi32 R2.

- Windows NT 4.0, Windows 95, 98, ME, NT y 2000.
- Procesador Pentium II (o superior recomendado).
- 32 MB de RAM (64 MB o superior recomendado).
- CD-ROM Drive.
- 220 MB de espacio libre en disco duro, más espacio para datos.
- Despliegue gráfico con resolución SVGA, recomendado 1024 x 768 píxeles o superior con 64 000 de colores.

V.3.2.Características de los equipos disponibles.

En la Dirección de Geografía de la DRO, se cuenta con equipos PC de escritorio con diferentes características, mismos que están dedicados a las actividades de un programa de trabajo anual, de ahí la relevancia de contar con elementos para gestionar el uso de uno de éstos para la implementación de este trabajo, optimizando tiempos y recursos en general, sin interferir en las metas comprometidas; considerando también que los resultados del presente trabajo tendrán un beneficio institucional.

La Tabla V.16 muestra la relación de los equipos PC con sus principales características. Como se observa, la diferencia más importante se presenta en la memoria RAM y en la Caché de los equipos DELL Optiplex GX620, características que resultan relevantes por el volumen de datos a procesar y por la cantidad de procesos a realizar. Por lo de más, todos los equipos presentan características adecuadas para su uso en la implementación.

Considerando que esas diferencias son factor para optimizar los procesos, y que desde luego cubren los requisitos del software a utilizar, la gestión se hará sobre uno de los equipos DELL Optiplex GX620.

Es importante comentar que en la Dirección de Geografía también se cuenta con equipos portátiles, mismos que por su dinámica de uso fueron descartados entre el grupo de posibles a gestionar. Así mismo, se cuenta con una red LAN con un servidor SUNFIRE V880 con sistema operativo Solaris 9, doce estaciones de trabajo SUNBlade 1000 y dos estaciones de trabajo SUNBlade 100; sin embargo, no se cuenta con licencias del software a utilizar, ni de algún otro que sea útil en la implementación.

Marca y modelo del equipo	Procesador P4		RAM	Capacidad DD	Sistema Operativo	Caché	Monitor			Cantidad total de equipos
	Marca	Velocidad					Tipo	Máxima resolución	Máxima calidad de color	
DELL OPTIPLEX GX620	Intel(R) Pentium(R) 4	3.192 MHz	0.99 GB	74.4 GB	Windows XP Profesional Versión 2002	(2048 KB) 2MB L2	LCD 17”	1280x1024 Píxeles	32 Bits	27
DELL OPTIPLEX GX270	Intel(R) Pentium(R) 4	2.999 MHZ	512 MB	74.4 GB	Windows XP Profesional Versión 2002	512 KB L2 ATC	CRT 15”	1280x1024 Píxeles	32 Bits	11
HP Compaq dc7100	Intel(R) Pentium(R) 4	3.192 MHZ	504 MB	74.5 GB	Windows XP Profesional Versión 2002	(1024 KB) 1MB L2	CRT 15”	1280x1024 Píxeles	32 Bits	6
IBM Net Vista 6332-4HE	Intel(R) Pentium(R) 4	2.392 MHZ	512 MB	73.1 GB	Windows XP Profesional Versión 2002	512 KB L2	CRT 15”	1280x1024 Píxeles	32 Bits	1

Tabla V.16. Equipo PC de escritorio de la Dirección de Geografía de la DRO.

V.4. Diseño general del proceso de generación de imágenes compuestas RGB.

De acuerdo al apartado V.1., las imágenes ETM+ tienen características diferentes a las TM, por lo que es necesario diseñar un modelo a seguir para cada caso.

V.4.1. Proceso general para las imágenes ETM+.

En el apartado V.1.1. se estableció que para construir el mosaico del estado de Puebla pueden ocurrir dos situaciones, mismas en las que se profundiza algo más a continuación:

- Construirlo a partir de los ocho conjuntos de datos de 2° x 1° de cada banda, mismos que se generan de cortes de las imágenes de las escenas. Estos cortes al unirse se van analizando para cada conjunto de datos con la finalidad de realizar una igualación del histograma entre los pedazos de imagen que conformarán el conjunto de datos; esto para las cinco bandas, lo que implica que existan diferencias de contraste entre algunos conjuntos de datos –ya que se construyen uno a uno y por separado– y que en el mosaico general se noten las uniones de cada conjunto –la experiencia dice que esto ocurrirá–. Su corrección resultaría realmente impráctica, ya que para notarlo hay que tener construidos los ocho conjuntos de datos de las cinco bandas e ir repitiendo el proceso para los conjuntos de datos con notables diferencias e ir haciendo la igualación del histograma también entre los conjuntos de datos.

  No obstante, contar con los ocho conjuntos de datos para las cinco bandas resulta altamente recomendable ya que este formato de 2° x 1° forma parte de la nomenclatura oficial de la cartografía digital y será útil para incorporarse a la Base de Datos Geográfica del INEGI, así como que es muy práctico su manejo para coberturas regionales, sin tener que utilizar todo el mosaico estatal. Por esta razón, aún cuando los conjuntos de datos

presenten notables diferencias de contraste entre sí, éstos serán generados en su totalidad para las cinco bandas y no se utilizarán para el mosaico global del estado de Puebla, en este supuesto, se seguirá la otra situación prevista:

- Construir el mosaico del estado de Puebla a partir de cortes directos de las imágenes de las escenas, considerando el máximo cubrimiento de cada escena para cortar los segmentos de imagen que conformarán el mosaico estatal de las cinco bandas. Esto implica que en cada corte y unión se revise la necesidad de igualar el histograma para mejorar la imagen global. Esto reduce enormemente el trabajo respecto a la situación antes descrita para conformar el mosaico, ya que la cantidad de cortes es mucho menor y conforme se genera el mosaico global se pueden modificar las imágenes en cuanto a su contraste. Esto para las cinco bandas.

Con estas consideraciones, el procedimiento a seguir con las imágenes ETM+ se describe a continuación:

1. Recuperación de la información.

    1.1. Restaurar en disco duro los archivos de las imágenes ETM+ de las escenas involucradas (ver Tabla V.6) de las cinco bandas.

    1.2. Importar las imágenes en Geomatica y generar los archivos en formato PIX.

2. Generación de los conjuntos de datos de 2° x 1°.

    2.1. Generar los cortes de las escenas involucradas de acuerdo a las coordenadas extremas de cada conjunto (ver Tabla V.4).

    2.2. Unir los cortes correspondientes cubriendo el conjunto de datos en cuestión.

    2.3. Si un conjunto de datos tiene un cubrimiento en el mar, crear un archivo con valores igual a cero para cubrir totalmente el formato de 2°x1°.

    2.4. Revisar el conjunto de datos generado con la finalidad de determinar la necesidad de un balance de tonos.

De ser necesario el balance de tonos:

2.4.1. Elegir de entre los cortes que conforman el conjunto de datos, aquel que ofrezca mejor contraste, imagen que llamaremos *maestra*.

2.4.2. Generar las tablas de realce de acuerdo a la imagen maestra para igualar el histograma de los cortes de las escenas al momento de realizar la unión de dichos cortes para conformar el conjunto de datos de 2º x 1º.

2.4.3. Realizar la unión de los cortes, controlando el orden de pegado y aplicando a cada corte la tabla de realce generada en 2.4.2. para su balance de acuerdo a la imagen maestra.

3. Generación de las composiciones RGB con los conjuntos de datos de 2º x 1º.

3.1. Calcular el Índice Óptimo (ver capítulo IV, apartado IV.3.2.8.) de las posibles combinaciones RGB de tres bandas entre las cinco, para determinar aquellas que albergan un mayor contenido informativo.

3.2. Generar las composiciones RGB con los conjuntos de datos generados, de acuerdo al OIF partiendo de las de mayor contenido informativo.

4. Realizar el mosaico de los ocho conjuntos de datos para las cinco bandas observando las diferencias de contraste entre cada conjunto de datos.

5. Si las diferencias de contraste son poco perceptibles entonces:

5.1. Generar el corte de los mosaicos de acuerdo a las coordenadas extremas de la cobertura geográfica seleccionada para el estado de Puebla (ver Tabla V.2).

En otro caso,

5.2. Generar el mosaico del estado de Puebla a partir de cortes directos de las escenas, para todas las bandas.

5.2.1. Realizar los cortes de las escenas involucradas para las cinco bandas, de acuerdo a las coordenadas extremas de la cobertura geográfica seleccionada para el estado de Puebla (ver Tabla V.2).

5.2.2. Revisar para cada banda, la uniformidad de tonos entre los cortes de las imágenes de las escenas, uniendo aquellas que no requieran balance de tonos. Estas uniones (mosaicos previos) constituirán "piezas" para el mosaico final.

5.2.3. Generar para cada banda el mosaico del estado de Puebla, de acuerdo a la cobertura geográfica seleccionada observando diferencias de tonos para posible balance de los mismos.

De ser necesario el balance de tonos:

5.2.4. Elegir de entre los segmentos de imagen que conforman el mosaico del estado de Puebla, aquel que ofrezca mejor contraste, imagen que llamaremos *maestra*.

5.2.5. Generar las tablas de realce de acuerdo a la imagen maestra, para igualar el histograma del resto de los segmentos de imagen del estado de Puebla al momento de realizar la unión de los segmentos de imagen.

5.2.6. Realizar la unión de los segmentos de imagen, controlando el orden de pegado y aplicando a cada uno la tabla de realce generada en 5.2.6. para su balance de acuerdo a la imagen maestra.

6. Realizar las operaciones de edición pertinentes para mejorar las imágenes.

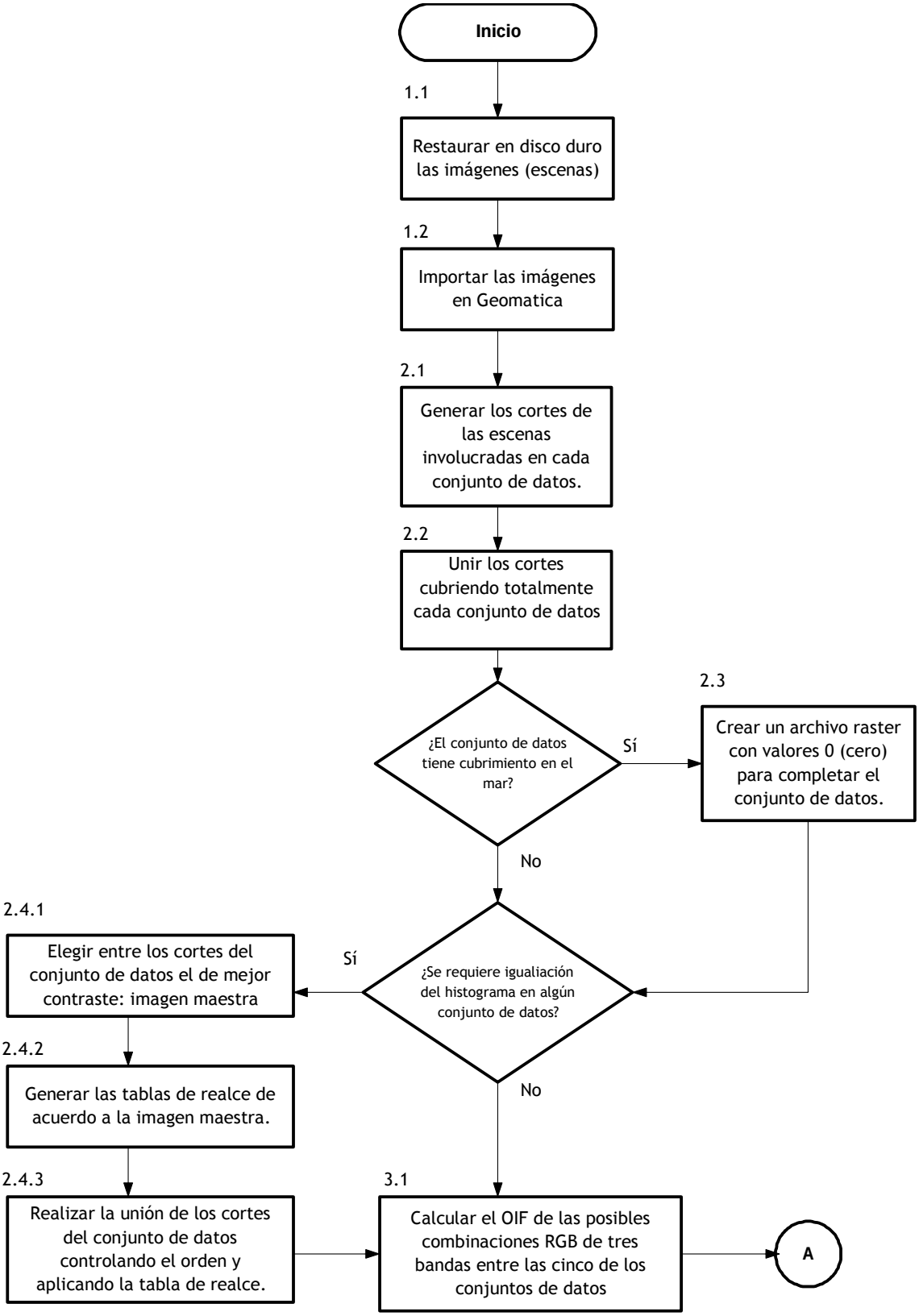
7. Realizar el ajuste final al mosaico del estado de Puebla, de acuerdo a la cobertura geográfica seleccionada. Esto debido a posibles inexactitudes en los procesos anteriores, derivadas de las características de las imágenes y por posibles ausencias de información en los extremos del mosaico resultante.

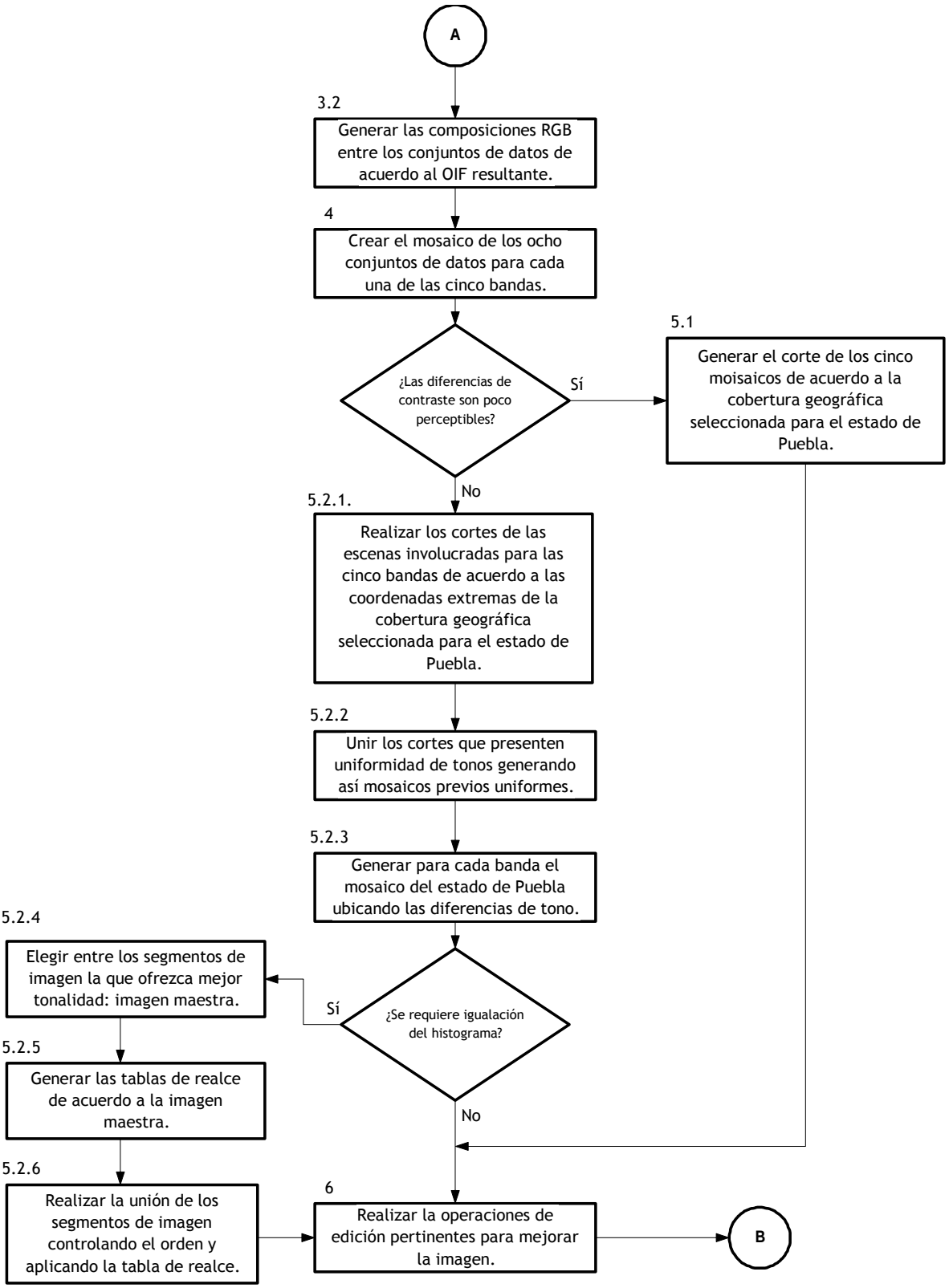
8. Generación de las composiciones RGB con los mosaicos del estado de Puebla.

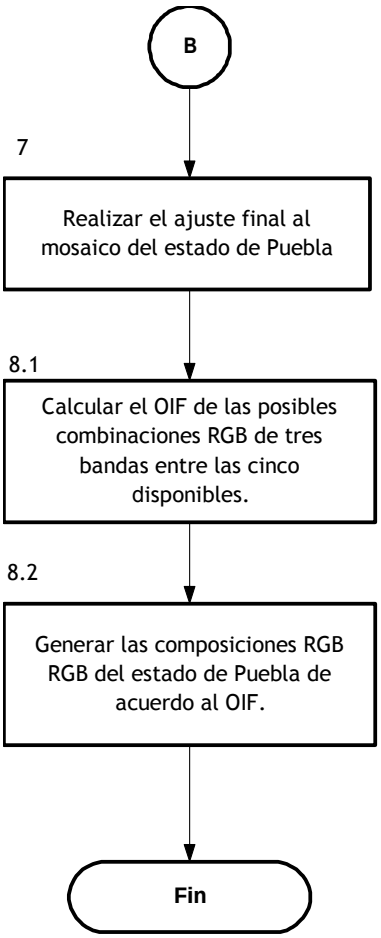
8.1. Calcular el Índice Óptimo (ver capítulo IV, apartado IV.3.2.8.) de las posibles combinaciones RGB de tres bandas entre las cinco, para determinar aquellas que albergan un mayor contenido informativo.

8.2.- Generar las composiciones RGB con los mosaicos del estado de Puebla generados, de acuerdo al OIF partiendo de las de mayor contenido informativo.

V.4.2. Diagrama de flujo del proceso para las imágenes ETM+.




A
3.2
Generar las composiciones RGB entre los conjuntos de datos de acuerdo al OIF resultante.
4
Crear el mosaico de los ocho conjuntos de datos para cada una de las cinco bandas.
¿Las diferencias de contraste son poco perceptibles?
Sí
5.1
Generar el corte de los cinco moisaicos de acuerdo a la cobertura geográfica seleccionada para el estado de Puebla.
No
5.2.1.
Realizar los cortes de las escenas involucradas para las cinco bandas de acuerdo a las coordenadas extremas de la cobertura geográfica seleccionada para el estado de Puebla.
5.2.2
Unir los cortes que presenten uniformidad de tonos generando así mosaicos previos uniformes.
5.2.3
Generar para cada banda el mosaico del estado de Puebla ubicando las diferencias de tono.
5.2.4
Elegir entre los segmentos de imagen la que ofrezca mejor tonalidad: imagen maestra.
Sí
¿Se requiere igualación del histograma?
5.2.5
Generar las tablas de realce de acuerdo a la imagen maestra.
No
5.2.6
Realizar la unión de los segmentos de imagen controlando el orden y aplicando la tabla de realce.
6
Realizar la operaciones de edición pertinentes para mejorar la imagen.
B



V.4.3. Proceso general para las imágenes TM.

En el apartado V.1.1. se señaló que estas imágenes se encuentran ya en conjuntos de datos de 2º x 1º y que en cobertura completa se cuenta con las bandas 3, 4 y 5. Partiendo de estas condicionantes el proceso general a seguir con las imágenes Landsat TM es:

1. Recuperación de la información.

    1.1. Restaurar en disco duro los archivos de las imágenes TM de los ocho conjuntos de datos de 2º x 1º, para las tres bandas.

    1.2. Importar las imágenes en Geomatica y generar los archivos en formato PIX.

2. Generar las composiciones RGB con los conjuntos de datos de 2º x 1º.

Cabe mencionar que el OIF no será calculado debido a que sólo se dispone de tres bandas.

3. Realizar el mosaico de los ocho conjuntos de datos para las tres bandas observando las diferencias de contraste entre cada conjunto de datos.

4. Si las diferencias de contraste son poco perceptibles entonces:

4.1. Generar los cortes para las tres bandas de acuerdo a las coordenadas extremas de la cobertura geográfica seleccionada para el estado de Puebla (ver Tabla V.2).

En otro caso,

4.2. Elegir de entre los conjunto de datos de la banda correspondiente, aquel que ofrezca mejor contraste, imagen que llamaremos *maestra*.

4.3. Generar las tablas de realce de acuerdo a la imagen maestra para igualar el histograma del resto de los conjuntos de datos al momento de realizar la unión de conjunto de datos de 2º x 1º.

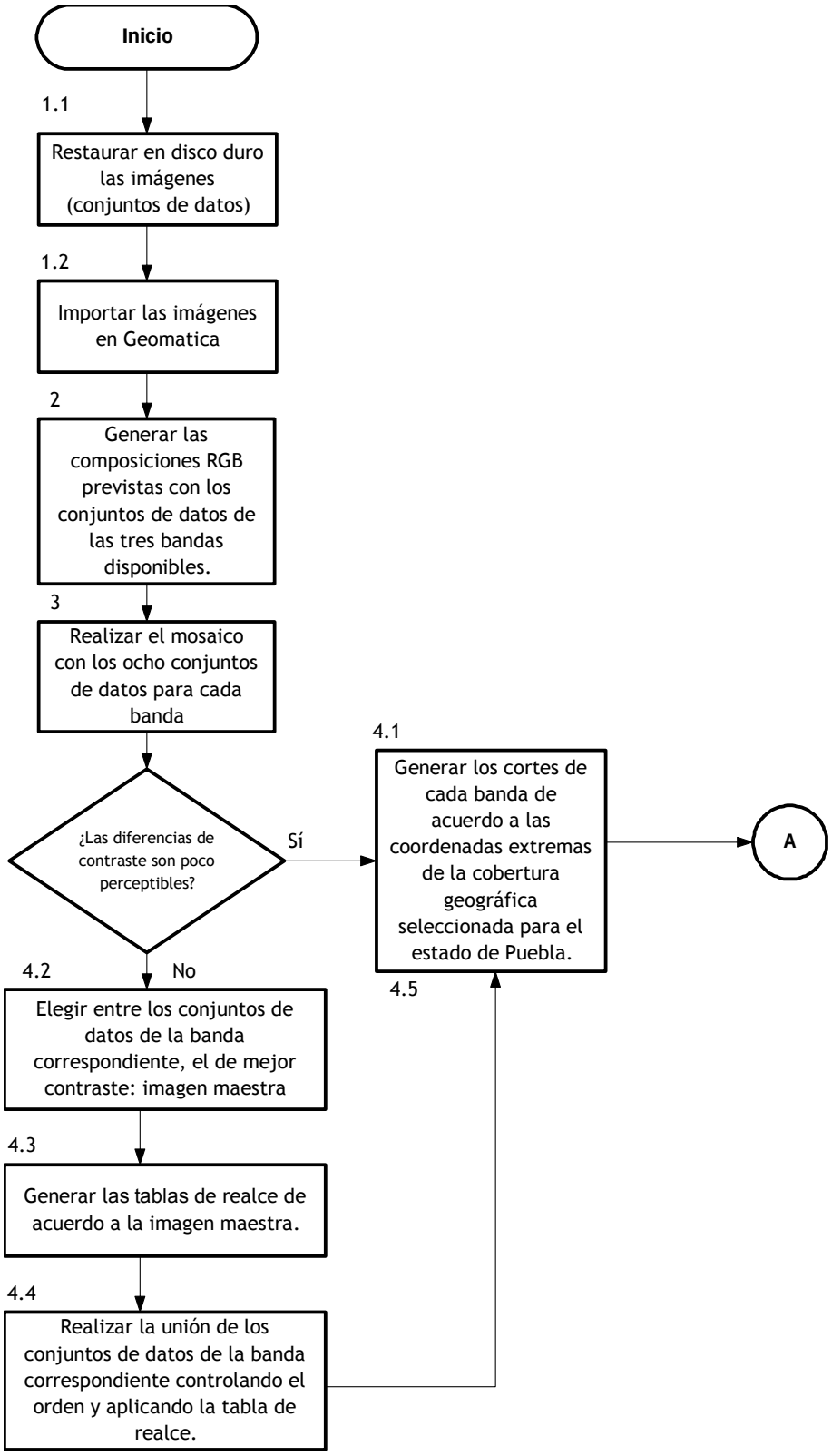
4.4. Realizar la unión de los conjuntos de datos de la banda en cuestión, controlando el orden de pegado y aplicando a cada uno la tabla de realce generada en 4.3. para su balance de acuerdo a la imagen maestra.

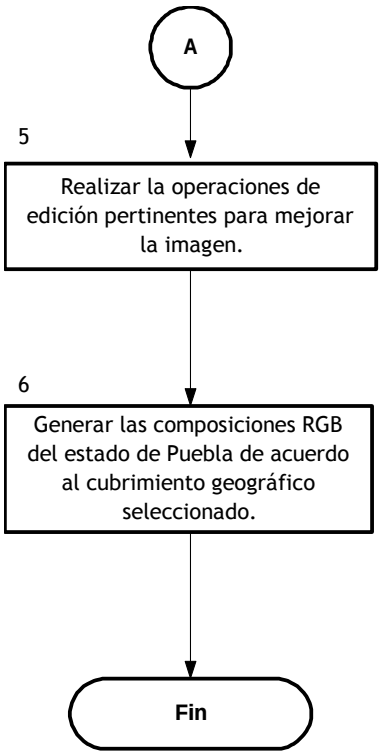
4.5. Generar los cortes para las tres bandas de acuerdo a las coordenadas extremas de la cobertura geográfica seleccionada para el estado de Puebla (ver Tabla V.2).

5. Realizar las operaciones de edición pertinentes para mejorar las imágenes.

6. Generar las composiciones RGB del estado de Puebla de acuerdo al cubrimiento geográfico seleccionado. De igual manera el OIF no será calculado debido a que sólo se dispone de tres bandas.

V.4.4. Diagrama de flujo del proceso para las imágenes TM.




A
5
Realizar la operaciones de edición pertinentes para mejorar la imagen.
6
Generar las composiciones RGB del estado de Puebla de acuerdo al cubrimiento geográfico seleccionado.
Fin

CAPÍTULO VI

IMPLEMENTACIÓN

VI.1. Generación de imágenes compuestas en RGB con imágenes de satélite Landsat ETM+.

La implementación de los procedimientos descritos en el capítulo anterior, tendrán una carga importante en el volumen de datos, así como una riqueza en imágenes. Ante esto, en el presente capítulo se incorporarán aquellas imágenes más representativas e ilustrativas de los procedimientos y desde luego aquellas que expresen un resultado final. Por otra parte, acompañado al presente trabajo está un DVD con imágenes que se consideran demostrativas y/o complementarias, haciendo siempre la referencia correspondiente. Estas imágenes se generarán en formato JPEG[86], buscando siempre respetar los derechos sobre las imágenes, mismos que no siempre pertenecen al INEGI como se comentó en otros capítulos.

VI.1.1. Recuperación de la información.

VI.1.1.1. Restaurar en disco duro los archivos de las imágenes ETM+ de las escenas involucradas de las cinco bandas.

Derivado del análisis del hardware disponible para la implementación (ver Capítulo V apartado V.3.2.) el equipo DELL Optiplex GX620 es en donde se

[86] JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) es el formato que se utiliza comúnmente para almacenar fotografías y otras imágenes de tono continuo, y también se utiliza en documentos HTML para Internet. Guarda toda la información referente al color en RGB. JPEG también utiliza un sistema de compresión, que de forma eficiente reduce el tamaño de los archivos mediante la identificación y el descarte de los datos redundantes no esenciales para mostrar la imagen.

restauraron las escenas sin tener problemas de almacenamiento, de acuerdo a lo calculado (Capítulo V, apartado V.1.3.1.).

VI.1.1.2. Importar las imágenes en Geomatica y generar los archivos en formato PIX.

En este software, mediante el uso de alguno de sus componentes con interfaz gráfica –OrthoEngine, Fly!, Focus, etc.– es posible ejecutar el programa *IMPORT*, a través del menú principal seleccionando "File" y en éste la herramienta "File Utility" con la que se presenta una ventana en cuyo menú principal la opción "File" ofrece la importación (Figuras VI.1. y VI.2.) . Es importante aclarar que la importación se realiza para la imagen completa y sin remuestreo con la finalidad de que la imagen importada permanezca con las mismas características de resolución espacial y dimensiones. Así mismo, se hace el señalamiento de que para cada escena se genera un archivo PIX que contiene las cinco bandas en canales diferentes.

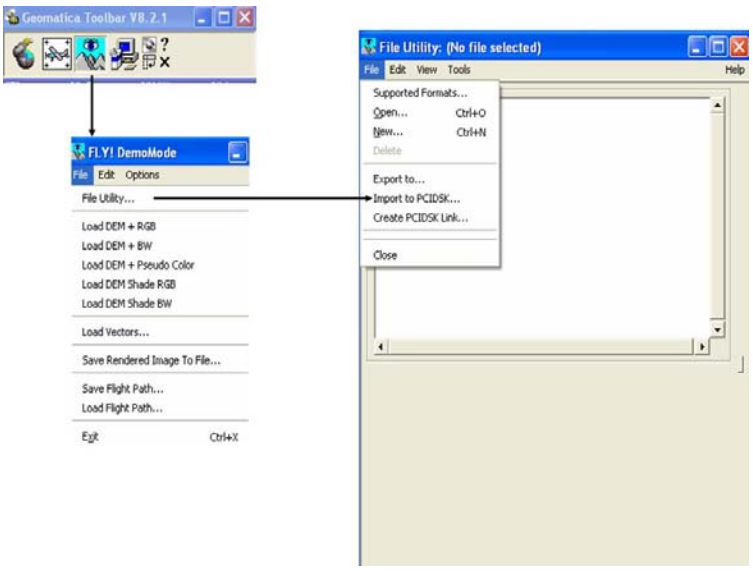


Figura VI.1. Ilustración del "File Utility" de Geomática para ejecutar el programa Import.

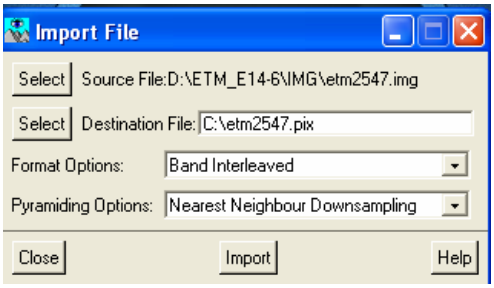


Figura VI.2. Ejemplo para la ejecución del programa Import.

De origen, las imágenes se encuentran en formato IMG del software ERDAS y después de la importación quedan en formato PIX (Figura VI.3). En el DVD adjunto al presente trabajo, se presentan todas las imágenes de las escenas ETM+ importadas (carpeta *JPGs_Escenas ETM+*).

El parámetro "Format Option" con valor "Band Interleaved" obliga a la importación a generar en el archivo PIX los mismos canales del archivo fuente. Para el caso de "Pyramiding Options" se indica el tipo de remuestreo que se aplicará en la importación al archivo resultante; el valor "Nearest Neighbour Downsampling" indica usar este método –vecino más cercano– que se aplica en caso de encontrar diferencias entre las dimensiones de la imagen origen y la destino. En este caso, como el archivo destino no existe, sino que será creado en la importación, el remuestreo se hace uno a uno, lo que garantiza que la imagen resultante de la importación sea exactamente igual a la de origen, es decir, realmente no se realiza el remuestreo. Los valores de este parámetro están descritos en el Capítulo V para el programa FIMPORT.

VI.1.2. Generación de los conjuntos de datos de 2º x 1º en Geomatica.

VI.1.2.1. Generar los cortes de las escenas involucradas de acuerdo a las coordenadas extremas de cada conjunto (ver Capítulo V, Tabla V.4).

Mediante el uso del programa *Subset* se realizan los cortes de las escenas involucradas para conformar el conjunto de datos que corresponda. Es posible

ejecutarse mediante la herramienta “File Utility” en el menú “Tools” como se observa en la Figuras VI.4. y VI.5.

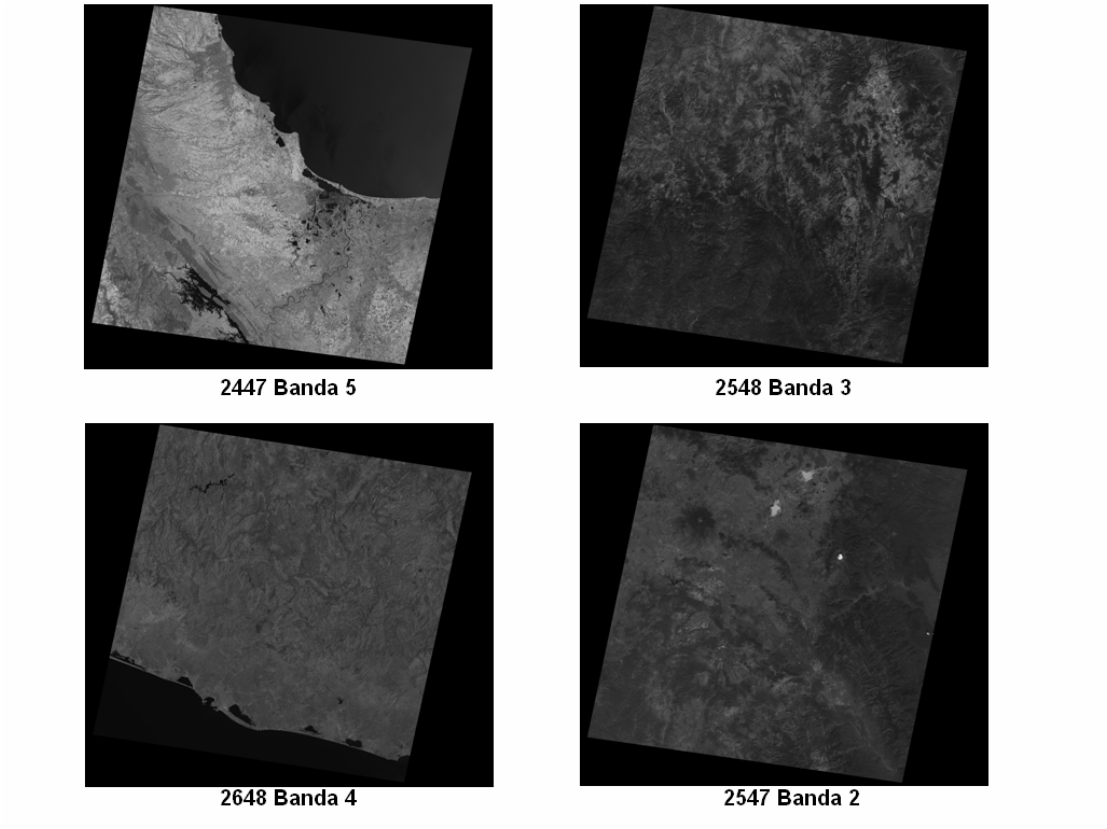


Figura VI.3. Ejemplo de escenas ETM+ importadas para el cubrimiento del estado de Puebla. Fuente: INEGI.

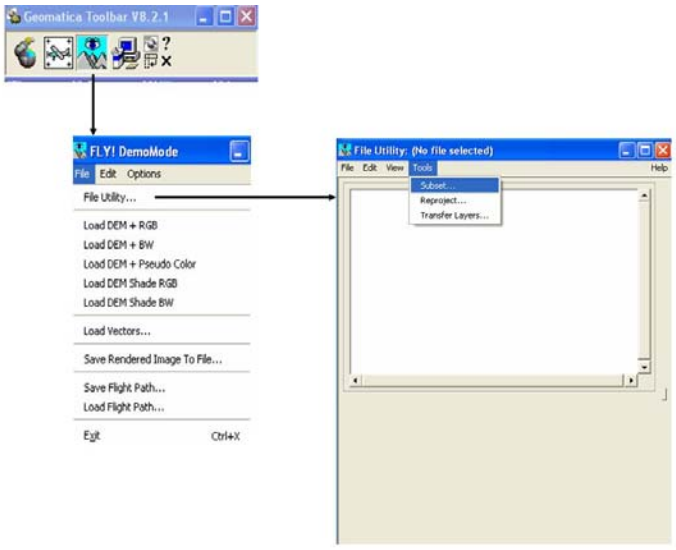


Figura VI.4. Programa Subset.

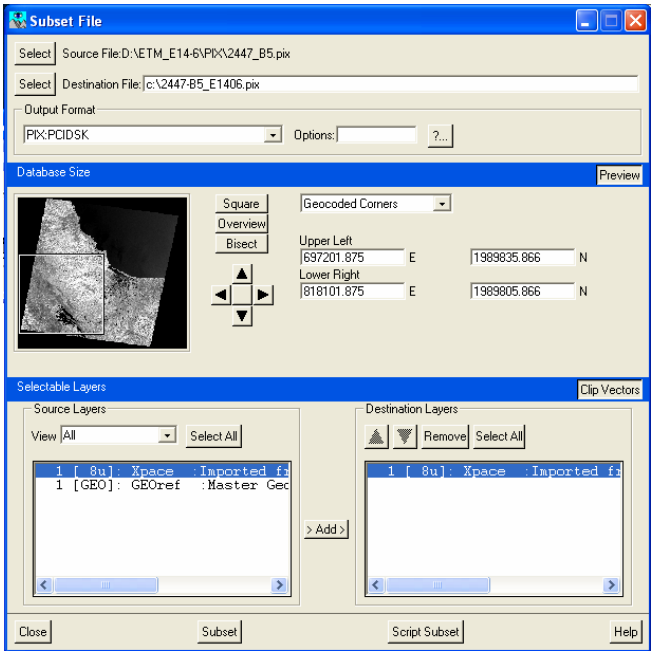


Figura VI.5. Ejemplo de ejecución del programa Subset. De la escena 2447 banda 5 se realiza el corte correspondiente al conjunto de datos E1406. Fuente: INEGI.

En la Figura VI.6 se muestran esquemáticamente los cortes de escenas para el conjunto de datos E14-06 (banda 5) de acuerdo a la tabla V.7. la cual presenta las coordenadas extremas del conjunto de datos, las coordenadas extremas de las escenas (2447, 2448, 2547 y 2548), las coordenadas para el corte de las escenas de tal forma que se generen las partes que conformarán el conjunto de datos, así como el número de columnas y renglones de cada corte. Se puede observar que las coordenadas requeridas para el corte son las correspondientes a la esquina superior izquierda y a la inferior derecha, con las cuales queda definido el rectángulo de corte. De la misma manera se realizó este proceso para los ocho conjuntos de datos que cubren al estado de Puebla.

VI.1.2.2. Unir los cortes correspondientes cubriendo el conjunto de datos.

Esto se consigue mediante el uso del programa *IMERGE* que simplemente une las imágenes presentes en una carpeta de acuerdo a su referencia geográfica (Figuras VI.7. y VI.8).

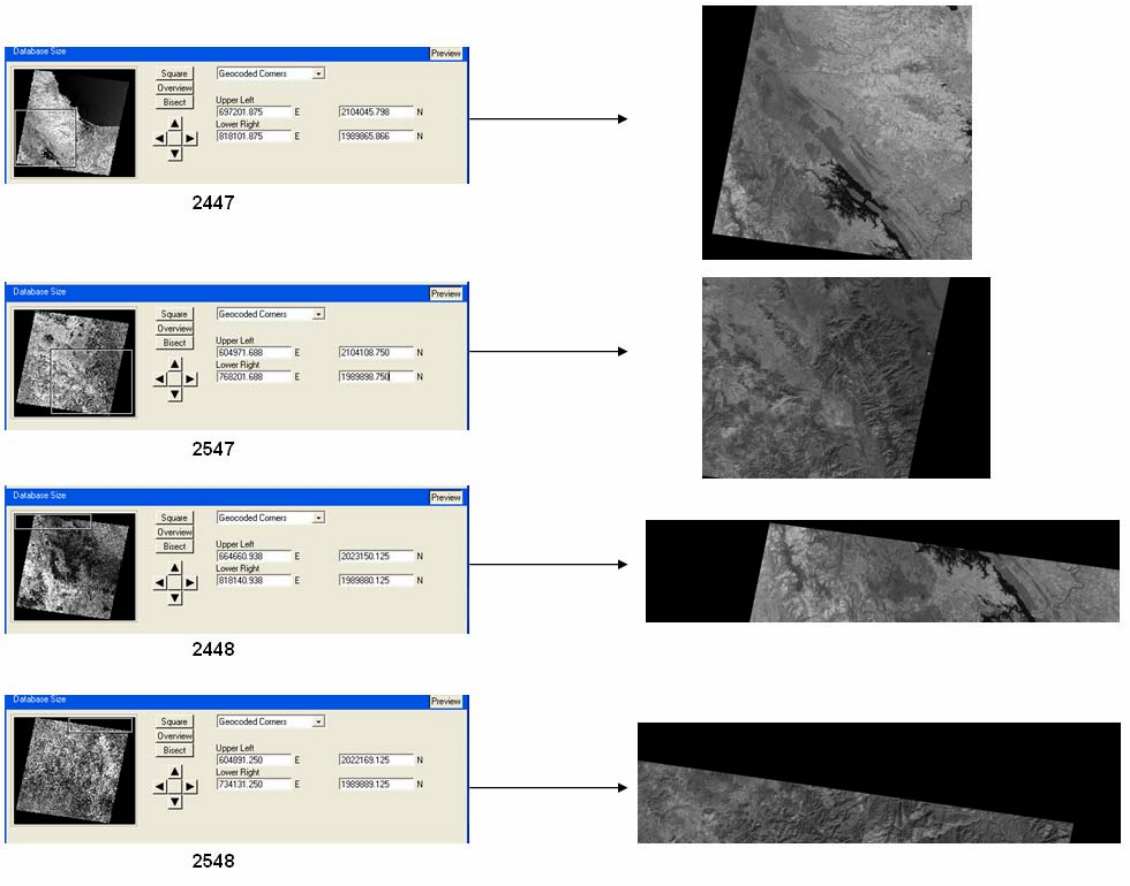


Figura VI.6. Cortes generados a partir de escenas ETM+ banda 5 para el conjunto de datos E14-06. Fuente: INEGI.

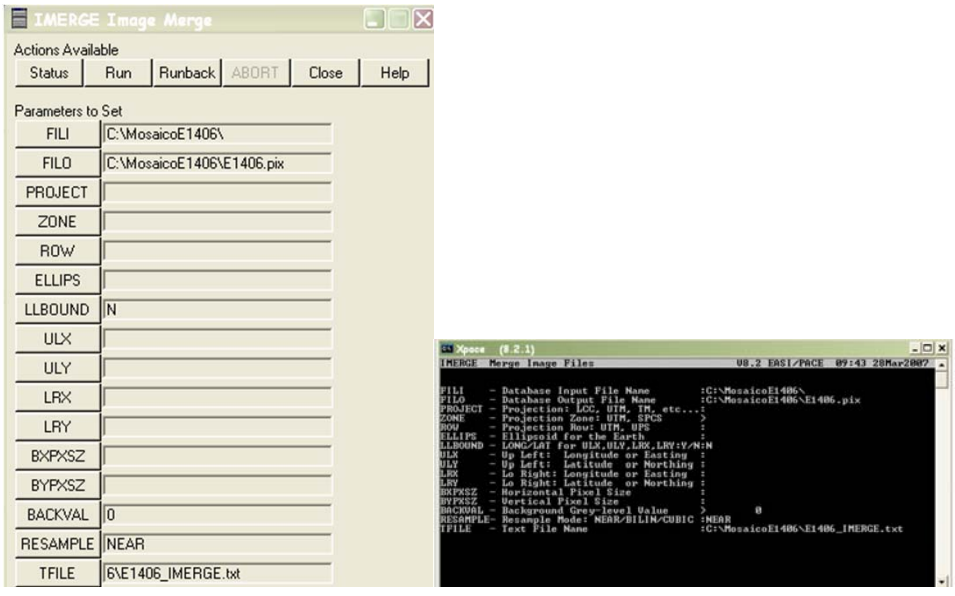


Figura VI.7. Ejecución del programa IMERGE.

Para la ejecución de IMERGE, se observa que en el caso de las imágenes que nos ocupan, desde el paso de la importación se obtienen los datos de referencia geográfica (proyección, datum, coordenadas extremas, etc.), mismos que se conservan al realizar los cortes, por lo que al generar el mosaico a través de IMERGE sólo basta con establecer los archivos de entrada y salida, así como señalar que no serán especificados los límites de la imagen (LLBOUND = "N"), establecer el valor de fondo como cero (BACKVAL = 0), dejar el default del método de remuestreo (RESAMPLE = NEAR) e indicar el archivo para el historial del proceso (TFILE = "E1406.txt" para nuestro ejemplo).

En esta parte del proceso se deben tener dos consideraciones:

- Para cada uno de los cortes resultantes de las escenas, las coordenadas extremas no son exactamente las indicadas para cada corte, debido a que generalmente éstas caen en el interior de un píxel y como sabemos éste es la unidad indivisible de una imagen, por lo que el software realiza un ajuste –mínimo– en las coordenadas para que coincidan con los extremos de los píxeles de cada esquina de la imagen resultante del corte.

- Derivado del punto anterior, las coordenadas calculadas para cada corte consideran una región ligeramente más amplia que las del conjunto de datos correspondiente, por lo que una vez creado el mosaico se debe realizar el corte a las coordenadas extremas del conjunto de datos, diferencia que a la vista es imperceptible.

Siguiendo con nuestro ejemplo del conjunto de datos E1406 banda 5, el mosaico generado a partir de los cortes ya mostrados en la Figura VI.6, arroja la siguiente referencia geográfica:

PROREP Georeference Segment Report V8.2 EASI/PACE 15:54 27Mar2007

\\Ror-64031700\sandra\Ruben\ETM_E14-6\PIX\E1406.pix[S 1PIC 7111P 3808L] 27Mar2007

1:GEOref Type:150 [Georeferencing] Last Update: 15:48 27Mar2007
Contents: Master Georeferencing Segment for File

Georeference Units:	UTM 14 D-01	
Projection:	Universal Transverse Mercator	
Datum - Ellipsoid:	NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866	
Upper Left Corner:	604891.250 E	2104108.750 N
Upper Right Corner:	818221.250 E	2104108.750 N
Image Centre:	711556.250 E	2046988.750 N
Lower Left Corner:	604891.250 E	1989868.750 N
Lower Right Corner:	818221.250 E	1989868.750 N
Pixel Size:	30.000 E	30.000 N
Upper Left Corner:	98d00'11.86" W Lon	19d01'41.18" N Lat
Upper Right Corner:	95d58'39.23" W Lon	19d00'21.86" N Lat
Image Centre:	96d59'46.26" W Lon	18d30'14.06" N Lat
Lower Left Corner:	98d00'33.32" W Lon	17d59'44.48" N Lat
Lower Right Corner:	95d59'44.19" W Lon	17d58'29.76" N Lat

Si bien las coordenadas extremas se aproximan a las correspondientes al conjunto de datos E1406 (ver Capítulo V, Tablas V.4 y V.7), deben ser ajustadas lo mejor posible realizando un corte –usando *subset*– de acuerdo a las coordenadas extremas del conjunto de datos (Figura VI.8).

Otro aspecto importante a considerar es la fecha de obtención de cada escena. En el ejemplo del conjunto de datos E1406, la fecha para 2447 y 2448 es 24 de abril de 2000 y para las escenas 2547 y 2548 es 9 de diciembre de 1999; por lo que al momento de generar el mosaico para el conjunto de datos se perciben diferencias muy marcadas (Figura VI.8.) derivado de las características de la superficie terrestre en las diferentes épocas del año –invierno y primavera– cuya respuesta espectral es de esperarse diferente.

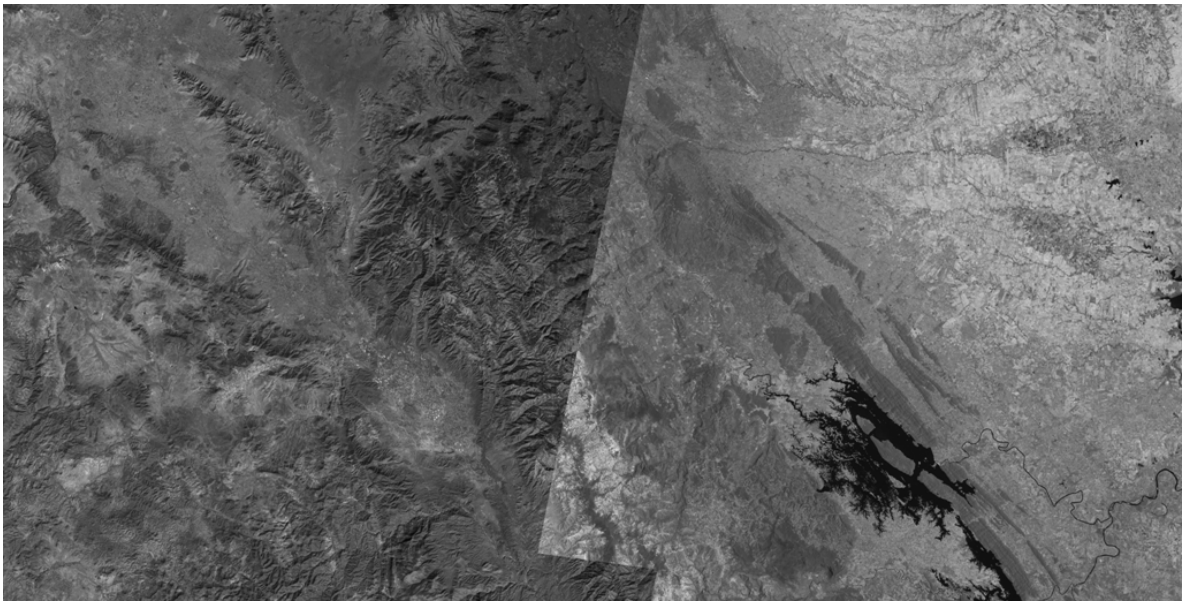


Figura VI.8. Mosaico para el conjunto de datos E1406 ETM+ banda 5. Fuente: INEGI.

La referencia geográfica arrojada para esta imagen (Figura VI.8) es:

PROREP Georeference Segment Report V8.2 EASI/PACE 09:53 28Mar2007

\\Ror-64031700\sandra\Ruben\ETM_E14-6\PIX\E1406_final.pix[S 1BIC 7082P 3615L] 28Mar2007

1:GEOref Type:150 [Georeferencing] Last Update: 09:52 28Mar2007
Contents: Master Georeferencing Segment for File

Georeference Units:	UTM 14 D-01	
Projection:	Universal Transverse Mercator	
Datum - Ellipsoid:	NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866	
Upper Left Corner:	605251.250 E	2101078.750 N
Upper Right Corner:	817711.250 E	2101078.750 N
Image Centre:	711481.250 E	2046853.750 N
Lower Left Corner:	605251.250 E	1992628.750 N
Lower Right Corner:	817711.250 E	1992628.750 N
Pixel Size:	30.000 E	30.000 N
Upper Left Corner:	98d00'00.14" W Lon	19d00'02.54" N Lat
Upper Right Corner:	95d58'58.43" W Lon	18d58'43.70" N Lat
Image Centre:	96d59'48.87" W Lon	18d30'09.70" N Lat
Lower Left Corner:	98d00'20.57" W Lon	18d01'14.22" N Lat
Lower Right Corner:	95d59'59.99" W Lon	17d59'59.72" N Lat

Este mismo procedimiento se siguió para los ocho conjuntos que cubren al estado de Puebla y las cinco bandas.

VI.1.2.3. Si el conjunto de datos tiene cubrimiento en el mar, crear un archivo con valores igual a cero para cubrir totalmente el formato de 2º X 1º.

Para el conjunto de datos E1406 que ha servido para ejemplificar el procedimiento, no se presenta el caso de tener cubrimiento en el mar. Sin embargo, con la finalidad de no dejar pasar por alto esta parte, se ejemplifica con el conjunto de datos F1412 (ver Capítulo V, Figura V.2), único para el estado de Puebla que presenta esta característica.

La situación es que la escena 2546 no alcanza a cubrir los 2º X 1º del conjunto de datos (parte oriental), como se alcanza a observar en la Figura VI.9. y en el índice de la Figura V.2. Por otra parte, el área útil de la imagen de la escena, presenta información del Golfo de México que será completada para el conjunto de datos con la escena 2545.

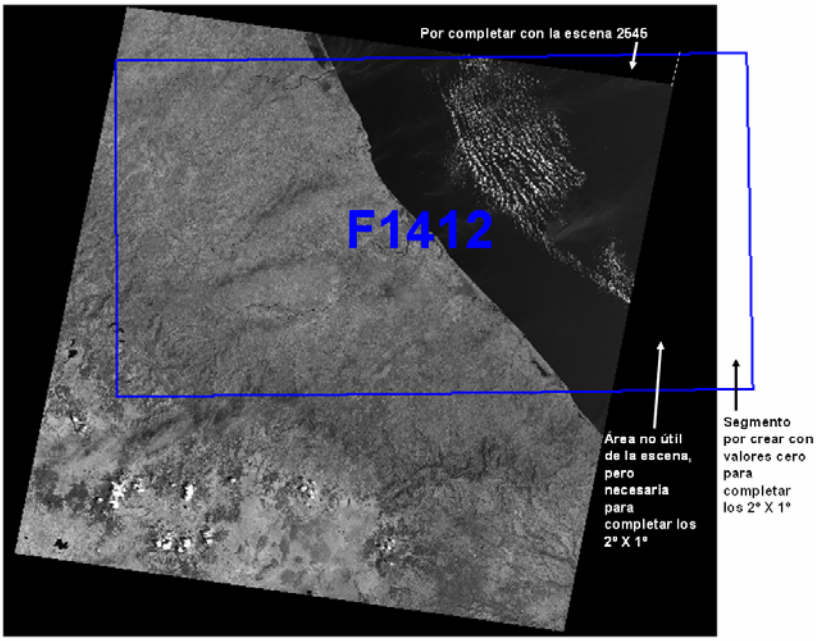


Figura VI.9. Escena 2546 ETM+ banda 5 para el conjunto de datos F1412. Fuente: INEGI.

El área no útil de la escena que "cae" dentro del conjunto de datos es necesaria para completar los 2º X 1º por lo que hasta este límite se considerará el corte de la escena.

Hasta aquí el procedimiento es exactamente el mismo que se siguió para la generación de los cortes y su unión para el conjunto de datos E1406 (apartados VI.1.2.1. y VI.1.2.2.) obteniendo el resultado mostrado en la imagen VI.10.

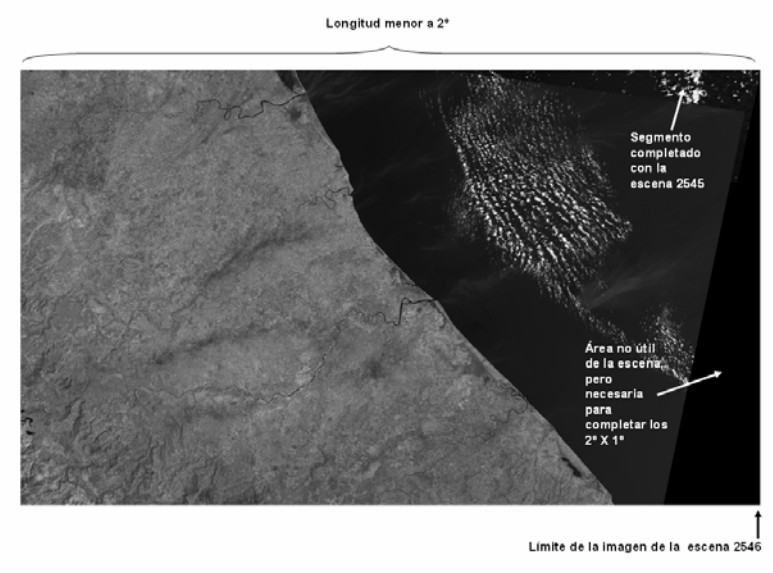


Figura VI.10. Corte y mosaico para el conjunto de datos F1412 aún incompleto. Fuente: INEGI.

Para completar los 2º de longitud del conjunto de datos, es necesario construir el segmento de imagen faltante con valores cero y después hacer la unión con la imagen de la Figura VI.10.

Para crear la imagen se utiliza el programa CIM, especificando para la imagen a crear el nombre del archivo, las dimensiones de la imagen (#columnas, #renglones), la resolución espacial (30 m), el tipo de datos (byte) y que éstos están organizados en una sola imagen (BAND). Dado que el archivo creado con CIM tiene asignadas solamente las coordenadas de imagen (columna, renglón) y no cuenta con una proyección cartográfica permitida, careciendo también de coordenadas geográficas extremas, se utiliza el programa SETPRO para asignar a la imagen creada los datos de referencia espacial requeridos (Figura VI.11).

Los datos de las dimensiones de la imagen, ingresados al programa CIM fueron calculados considerando las coordenadas extremas del conjunto de datos F1412 y un traslape que puede variar en tamaño siempre y cuando se garantice que al unir las imágenes no haya ausencia de datos y que los píxeles de la zona de traslape de ambas imágenes tengan valor cero. El conjunto de datos tiene como límites extremos:

$$X_{min} = 603460.065 \qquad X_{max} = 814510.065$$

La imagen de la Figura VI.10. tiene como X_{max}= 791710.065, por lo que para completar el conjunto de datos se requieren 22800 metros, que considerando una resolución espacial de 30 metros para cada píxel, equivale a 760 píxeles en el eje *X* (columnas). Como zona de traslape se considerarán otros 24 píxeles (720 metros) por lo que el número de columnas para la imagen a crear es de 784.

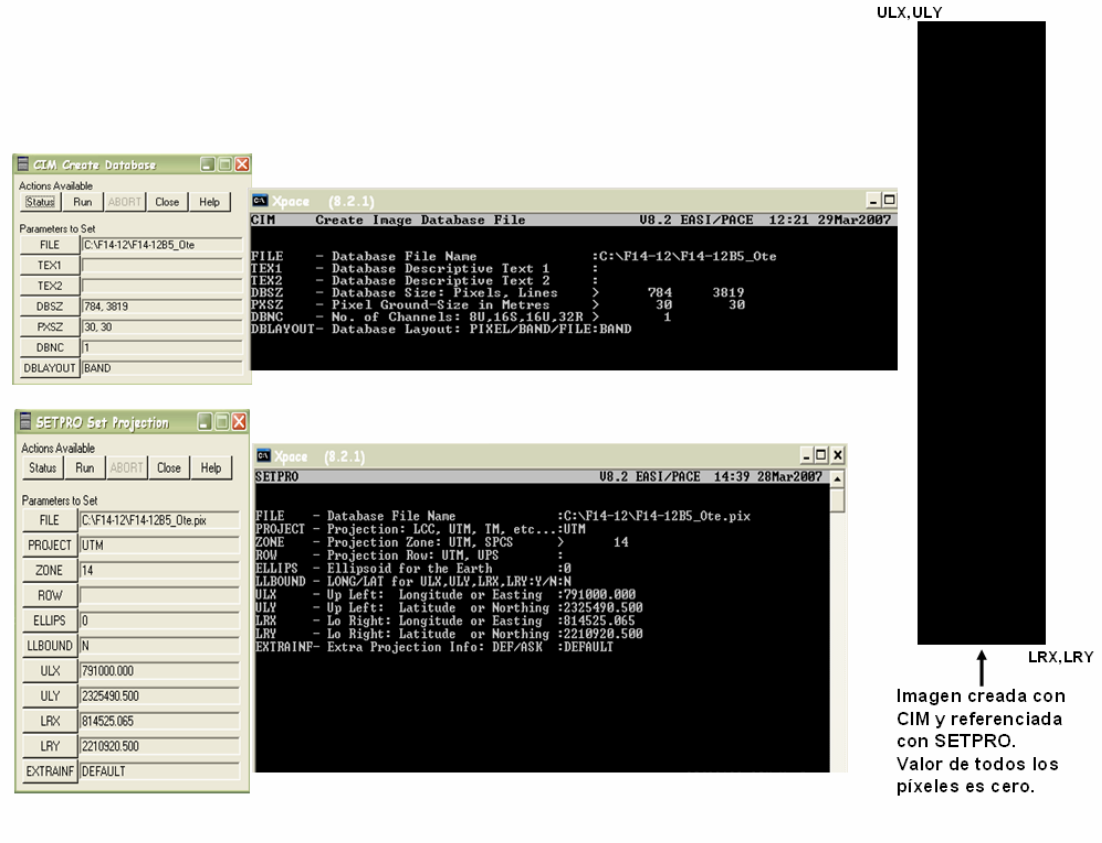


Figura VI.11. Creación y asignación de referencia de la imagen que completará los 2° X 1° del conjunto de datos F1412

El número de renglones (eje *Y*) es lógicamente el mismo que el correspondiente a la imagen mostrada en la Figura VI.10. con la que se realiza el mosaico, que es de 3819 renglones. También es importante mencionar que los datos de la proyección cartográfica asignada con SETPRO son iguales a los de la imagen con la que se realiza el mosaico (Figura VI.10.)

Hecho lo anterior, se procede a unir las dos imágenes a través del programa IMERGE obteniendo la imagen mostrada en la Figura VI.12.

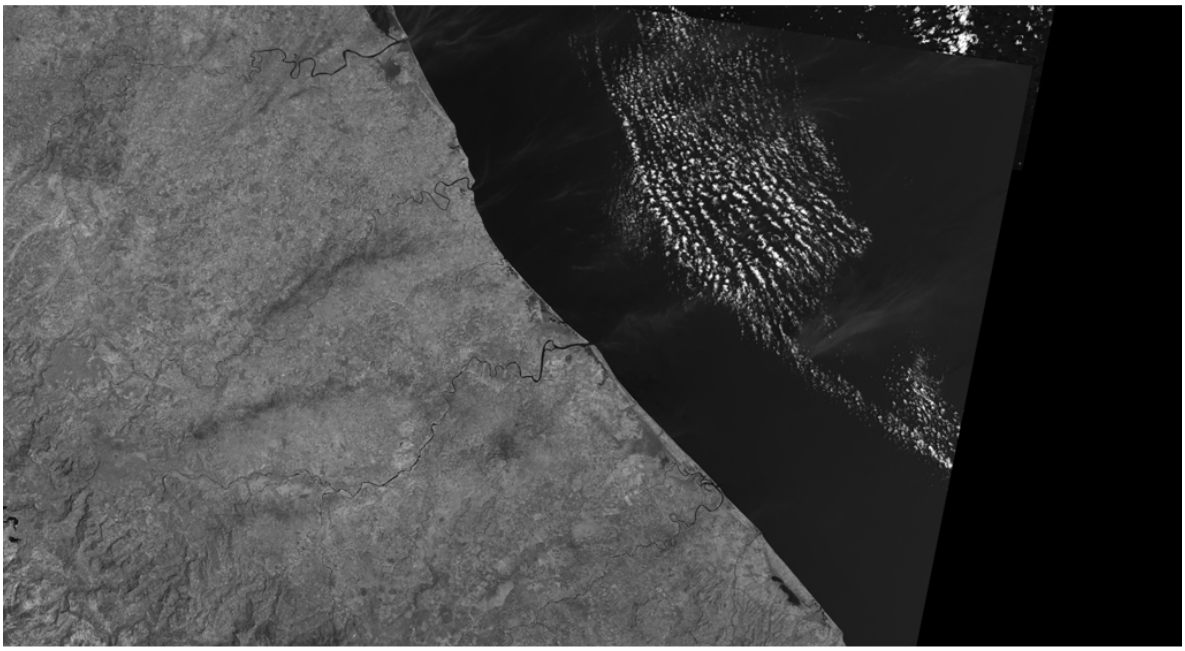


Figura VI.12. Mosaico final para el conjunto de datos F1412 ETM+ banda 5. Fuente: INEGI.

VI.1.2.4. Revisar el conjunto de datos generado con la finalidad de determinar la necesidad de un balance de tonos.

Para el mismo ejemplo del conjunto de datos E1406 banda 5, en la Figura VI.8. se observa claramente la necesidad del balance de tonos a la imagen debido principalmente a la diferencia en las fechas de captación de los datos por parte del sensor remoto.

Situaciones similares se presentan en el resto de los conjuntos de datos.

VI.1.2.4.1. Elegir entre los cortes que conforman el conjunto de datos, aquel que ofrezca mejor contraste, imagen que llamaremos maestra.

Es posible visualmente seleccionar aquel corte de imagen que ofrezca mejor apariencia visual, sin embargo, se estaría agregando subjetividad al proceso. Por esta razón, es conveniente hacer un breve análisis de las estadísticas básicas y del histograma de cada corte que conforma el conjunto de datos y establecer de manera concluyente cual será la imagen maestra.
En esta parte del proceso es necesario el uso del software *IDRISI*, considerando que para los fines que ahora buscamos, ofrece mejores herramientas que *Geomatica*.

En la Figura VI.6. se muestran las imágenes de los cortes para el conjunto de datos E1406, de entre los cuales debemos seleccionar la imagen maestra.
En primera instancia, mediante el uso del programa HISTO de IDRISI (Figura VI.13.) se construye el histograma de una imagen.

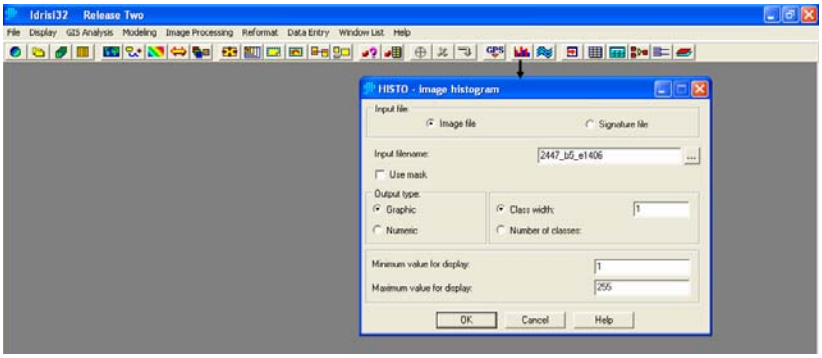


Figura VI.13. Programa HISTO de IDRISI.

Como se observa en la figura VI.13. se solicita que el mínimo valor para desplegar en el histograma sea uno, evitando así los valores cero del área no útil de la imagen, lo cuales por existir en gran cantidad causarían un histograma deficiente para el análisis (Figura VI.14).

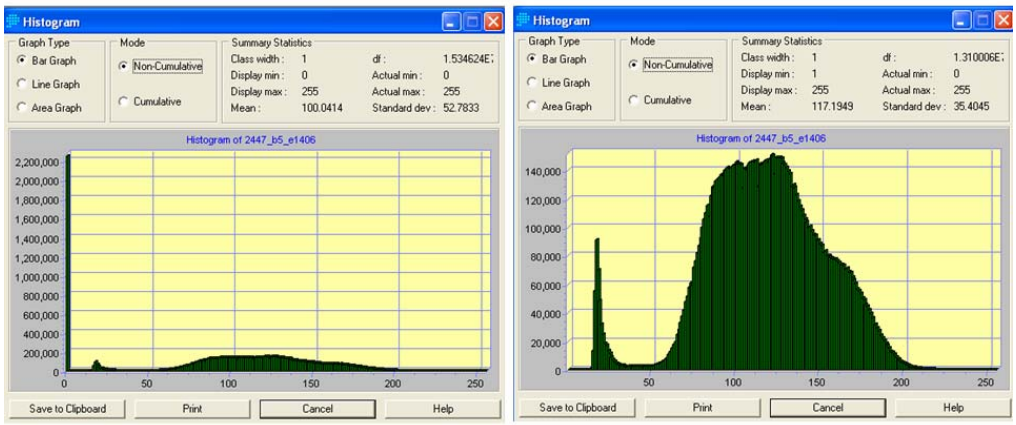


Figura VI.14. Histograma para el corte de la escena 2447 banda 5 para el conjunto de datos E1406. **a)** Mínimo valor de despliegue = 0 **b)** Mínimo valor de despliegue = 1

El histograma de la Figura VI.14.a). no es válido para el análisis, en primera instancia por que los valores cero del área no útil de la imagen son determinantes en los datos estadísticos resultantes y en segundo lugar debido a que esos mismos valores cero impiden mostrar un buen histograma para los datos útiles de la imagen.

Teniendo presente lo anterior se muestran en la Figura VI.15. los histogramas de los cuatro cortes que conforman el conjunto de datos E1406, generados de las escenas ETM+ 2447, 2448, 2547 y 2548.

De estos histogramas determinamos que el corte de la escena 2447 ofrece la mayor dispersión de valores presentando la más alta desviación estándar (mayor heterogeneidad). Así mismo, la media de los valores de esta imagen se encuentra cercana al valor medio del intervalo de 0 a 255, por lo que en general los tonos de la imagen no se inclinan a ser oscuros –tendientes a valores bajos–, ni claros –tendientes a valores altos–.

Por otra parte, la anchura del histograma de esa imagen, que está relacionada con el contraste, nos indica una mejor distribución de valores de píxeles, lo que implica una menor saturación hacia un rango específico de valores. Se hace notar que para los cortes de las escenas 2447 y 2448 se observa en la parte izquierda de los respectivos histogramas una distribución en forma de “U”, misma que se

presenta a causa del grupo de píxeles con valores bajos y que corresponden a cuerpos de agua, principalmente a la presa Miguel Alemán fácilmente identificable en la imagen.

Por lo tanto, el corte de la escena 2447 es seleccionada como imagen maestra para el balance de tonos en la conformación del conjunto de datos E1406. Este mismo procedimiento y criterios se aplicaron para el resto de los conjuntos de datos del estado de Puebla.

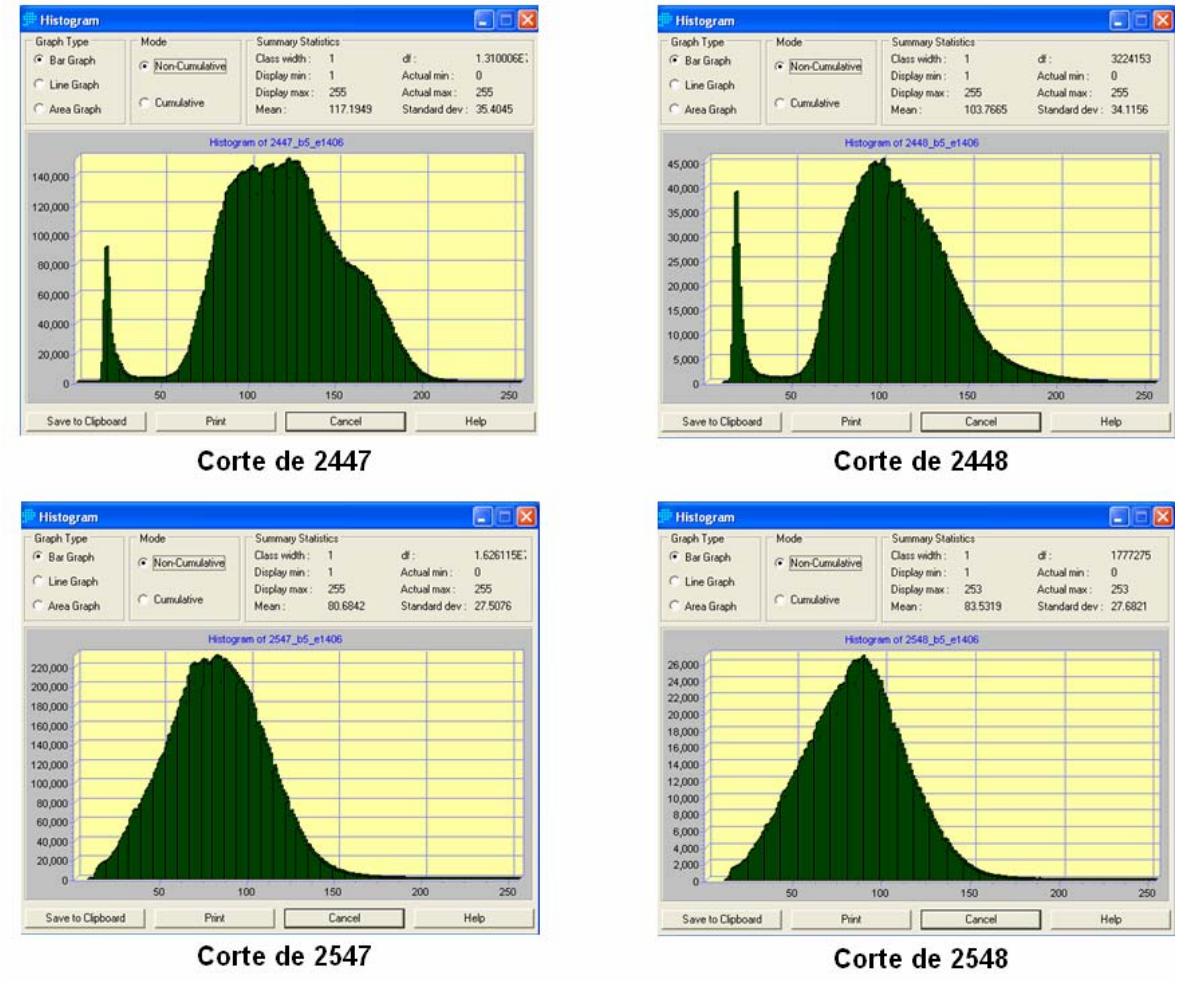


Figura VI.15. Histogramas de los cortes de las escenas (banda 5) involucradas en la conformación del conjunto de datos E1406.

VI.1.2.4.2. Generación de las tablas de balance de tonos de acuerdo a la imagen maestra para igualación del histograma de los cortes de las escenas para la conformación del conjunto de datos correspondiente.

Una vez determinada la imagen maestra se continúa el procedimiento con el software Geomatica. Mediante el programa MATCH se generan los segmentos "lookup table (LUT)" para desarrollar los histogramas de correspondencia de acuerdo a la imagen maestra, lo cual se lleva a cabo para cada imagen que formará parte del mosaico, es decir, para cada corte de las escenas que conformará el conjunto de datos. Continuando con el conjunto de datos E1406 como ejemplo, se toma la decisión de no hacer el balance de tonos para la imagen del corte correspondiente a la escena 2448 por presentar un histograma similar al de la imagen maestra (ver Figura VI.15.); por lo tanto la creación de las tablas de balance de tonos se hará sólo para las imágenes de los cortes resultantes de las escenas 2547 y 2548.

La Figura VI.16. muestra el programa MATCH con los parámetros requeridos. En este caso se ejemplifica para el corte de la escena 2547, reiterando que se realiza para todas las imágenes (cortes) involucradas en el mosaico a generar, que en nuestro ejemplo son los cortes de las escenas 2547 y 2548.

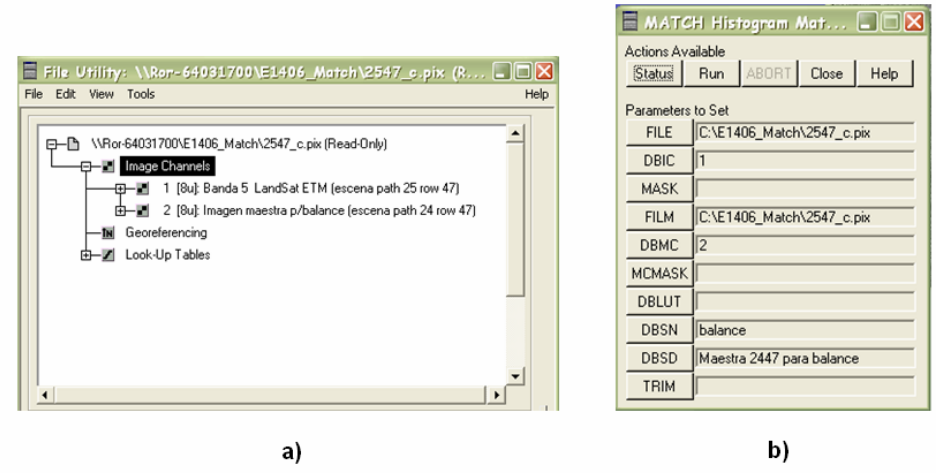


Figura VI.16. a) Estructura del archivo. b) Programa MATCH.

De esta figura lo más relevante es señalar que el parámetro DBIC = 1 indica el canal de la imagen PIX donde se encuentra la imagen a balancear que en este ejemplo es el corte de la escena 2547 y el parámetro DBMC = 2 establece el canal de la imagen maestra (Figura VI.16.a).

El resultado del programa MATCH es un segmento en el archivo PIX que contiene la tabla de niveles digitales calculados para balancear la imagen al utilizar el programa MOSAIC cuando se genere el mosaico del conjunto de datos.

La Figura VI.17. ilustra la estructura de los archivos PIX correspondientes a los cortes de las escenas 2547 y 2548, destacando el segmento LUT generado con MATCH que contiene los niveles digitales para el balanceo.

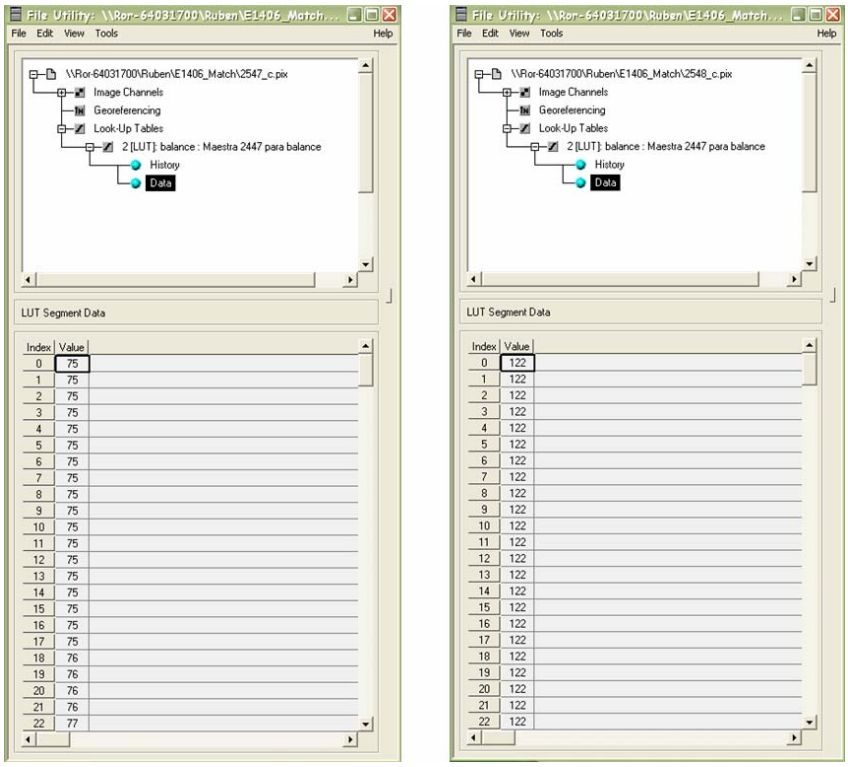


Figura VI.17. Tablas para balance de tonos generadas a través de MATCH para los cortes de las escenas 2547 y 2548 que conformarán el conjunto de datos E1406.

Una manera más descriptiva para presentar las tablas es generar un reporte de la tabla LUT en un archivo de texto mediante el uso del programa *LUTREP*.

Las tablas LUT generadas con este reporte para los cortes de las escenas 2547 y 2548 son respectivamente:

```
1
LUTREP  Lookup Table Segment Report             V8.2 EASI/PACE  10:28 29Mar2007
    2:balance   Type:170 [Lookup Table          ]   Last Update: 09:44 29Mar2007
      Contents: Maestra 2447 para balance

           0   1   2   3   4   5   6   7   8   9  10  11  12  13  14  15
     +-----------------------------------------------------------------
   0 |    75  75  75  75  75  75  75  75  75  75  75  75  75  75  75  75
  16 |    75  75  76  76  76  76  77  77  77  77  78  78  78  79  79  80
  32 |    80  81  81  82  82  83  83  84  84  85  85  86  87  87  88  88
  48 |    89  90  90  91  92  93  93  94  95  96  97  98  99 100 100 101
  64 |   102 103 105 106 107 108 109 110 112 113 114 115 116 117 118 120
  80 |   121 122 123 124 125 126 127 129 130 131 132 133 134 136 137 138
  96 |   140 141 142 144 145 147 148 149 151 152 154 155 156 158 159 160
 112 |   162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177
 128 |   178 179 180 180 181 182 183 184 184 185 186 186 187 188 188 189
 144 |   190 190 191 191 192 192 193 193 194 195 195 196 196 197 197 198
 160 |   198 199 199 200 200 200 201 202 202 203 203 204 204 205 205 206
 176 |   207 207 207 208 208 209 209 210 210 211 212 212 213 214 214 215
 192 |   215 216 216 217 217 218 218 220 220 221 222 222 223 223 224 224
 208 |   225 226 227 227 228 228 228 229 230 230 230 231 232 232 233 234
 224 |   235 235 235 237 238 239 239 239 239 241 241 245 245 245 245 245
 240 |   246 247 247 247 252 252 252 252 253 253 253 253 253 254 255 255


1
LUTREP  Lookup Table Segment Report             V8.2 EASI/PACE  11:35 29Mar2007
    2:balance   Type:170 [Lookup Table          ]   Last Update: 09:44 29Mar2007
      Contents: Maestra 2447 para balance

           0   1   2   3   4   5   6   7   8   9  10  11  12  13  14  15
     +-----------------------------------------------------------------
   0 |   122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122
  16 |   122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 123 123 123 123
  32 |   123 123 123 123 124 124 124 124 124 124 125 125 125 125 126 126
  48 |   126 126 127 127 127 128 128 128 129 129 129 130 130 131 131 132
  64 |   132 132 133 133 134 135 135 136 136 137 137 138 139 139 140 141
  80 |   142 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156
  96 |   157 158 159 160 160 161 162 163 164 165 166 167 168 168 169 170
 112 |   171 172 172 173 174 175 175 176 177 177 178 179 180 180 181 182
 128 |   182 183 184 184 185 186 186 187 188 189 189 190 190 191 192 193
 144 |   193 194 194 195 196 196 197 197 198 198 199 199 200 200 201 202
 160 |   202 203 203 204 205 205 206 207 208 209 209 210 212 213 214 214
 176 |   215 216 216 218 218 221 221 222 223 224 225 225 226 227 228 229
 192 |   234 234 234 234 235 236 236 236 236 249 249 249 249 249 253 253
 208 |   253 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255
 224 |   255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255
 240 |   255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255
```

Este procedimiento fue realizado para los ocho conjuntos de datos del estado de Puebla y para las 5 bandas.

VI.1.2.4.3. Realizar la unión de los cortes, controlando el orden de pegado y aplicando a cada corte su tabla de realce, generada en VI.1.2.4.2. para su balance de acuerdo a la imagen maestra.

Esta unión –generación del mosaico– se realiza con el programa MOSAIC (Figura VI.18.) que además de unir las imágenes, modifica sus valores digitales de acuerdo a la tabla de balance que se le indica.

El primer paso es crear una imagen con valores cero y con las dimensiones correspondientes al conjunto de datos en turno, E1406 en el mismo ejemplo. Así mismo, asignarle los datos de referencia geográfica que ya se han comentado. Como se ha visto con anterioridad, la creación de la imagen nueva y la asignación de su referencia geográfica se consiguen con los programas CIM y SETPRO respectivamente. Esta "imagen esqueleto" es la depositaria del mosaico, mismo que se realiza imagen por imagen, es decir, el programa MOSAIC se ejecuta un número de veces igual al número de imágenes que completan el mosaico. Si bien, se han creado las tablas de balance para cada corte que conformará el mosaico, generalmente se presentan, en las zonas de unión de cada corte, una pequeña diferencia visual que pone en evidencia el "pegado" de imágenes. Como cada corte tiene una zona de traslape con sus vecinos, en la ejecución de MOSAIC es común tener que repetir el proceso buscando el mejor orden de combinación, en el que la imagen maestra suele ser la última en incorporarse al mosaico.

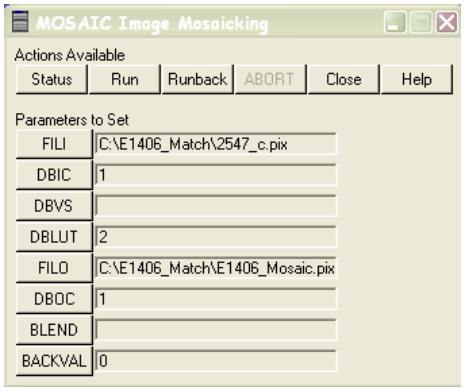


Figura VI.18. Programa MOSAIC.

En la Figura VI.18. se muestra la forma de ejecución de MOSAIC para el que el archivo de entrada debe contener el canal con la imagen del corte a incorporar en el mosaico (parámetro DBIC), así como el segmento que contiene la tabla LUT para aplicarle el balance de tonos al corte (parámetro DBLUT), señalando cual es el archivo de salida, "imagen esqueleto", que contendrá el resultado del mosaico (parámetro FILO), especificando el canal en el que se encuentra. Se ejemplifica la incorporación del corte correspondiente a la escena 2547 para conformar el conjunto de datos E1406. En el ejemplo, del mismo modo se realiza para el corte de la escena 2548 que también forma parte del mismo conjunto de datos.
El mosaico resultante se presenta en la Figura VI.19. Se percibe una notable diferencia con el mismo mosaico pero sin balance de tonos de la Figura VI.8.

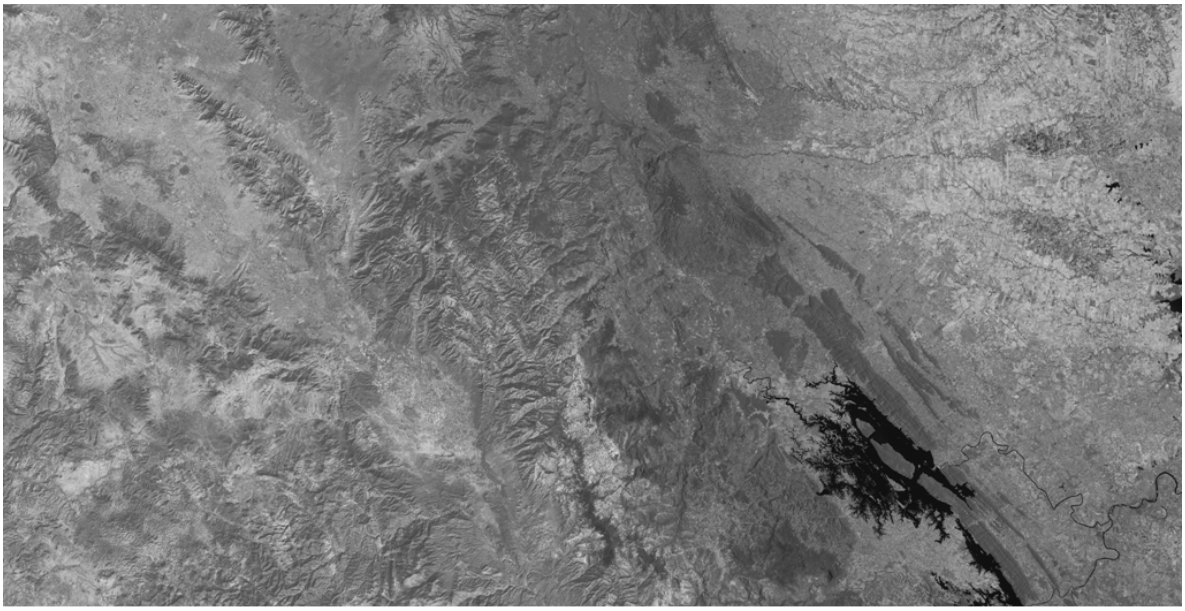


Figura VI.19. Mosaico del conjunto de datos E1406 con balance de tonos. Fuente: INEGI

Este mismo procedimiento se siguió para los ocho conjuntos que cubren al estado de Puebla y las cinco bandas. En el DVD adjunto al presente trabajo, se encuentran, a manera de ejemplo, las imágenes del conjunto de datos E14-2 bandas de la uno a la cinco, con y sin balance de tonos (carpeta *JPGs_E1402 ETM*+).

VI.1.3. Generación de las composiciones RGB con conjuntos de datos de 2º X 1º, en Geomática.

Para fines prácticos se continúa con el procedimiento a través de la ejemplificación con un conjunto de datos. Para esta parte, resulta conveniente el uso de las imágenes del conjunto de dato E1402, toda vez que presenta una respuesta espectral de una cubierta muy variada (vegetación, nubes, suelo descubierto, localidades urbanas, cuerpos de agua, carreteras, cultivo, malpaís, entre otros).

VI.1.3.1. Calcular el Índice Óptimo de las posibles combinaciones RGB de tres bandas entre las cinco, para determinar aquellas que albergan un mayor contenido informativo.

Del capítulo IV apartado IV.3.2.8., sabemos que éste índice se calcula mediante:

$$OIF = \frac{\sum_{k=1,3} S_k}{\sum_{j=1,3} |r_j|}$$

donde S_k indica la desviación estándar de cada una de las tres bandas que intervienen en la composición y r_j el coeficiente de correlación entre cada par de esas mismas bandas.

Esta parte del procedimiento es trabajada en el software IDRISI, toda vez que presenta mejores herramientas, concretamente se hace uso del programa REGRESS (Figura VI.20).que realiza una regresión lineal entre pares de imágenes, de donde se obtiene el coeficiente de correlación; así mismo, presenta la desviación estándar para cada una de las imágenes involucradas.

El contar con cinco bandas y determinar las posibles combinaciones de tres –sin repetición– es sencillo y a saber son 10. De cada una de éstas es necesario obtener el OIF y determinar las mejores combinaciones.

Para la regresión de cada par de imágenes no es relevante cual es la variable independiente y cual la dependiente, toda vez que el coeficiente de correlación resulta ser el mismo (Figura VI.21).

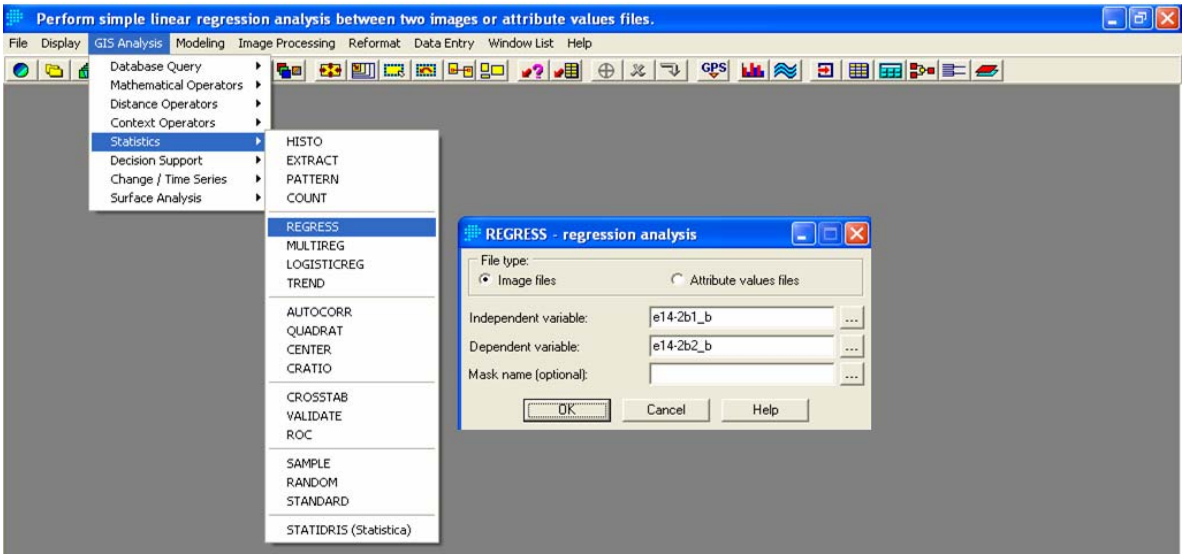


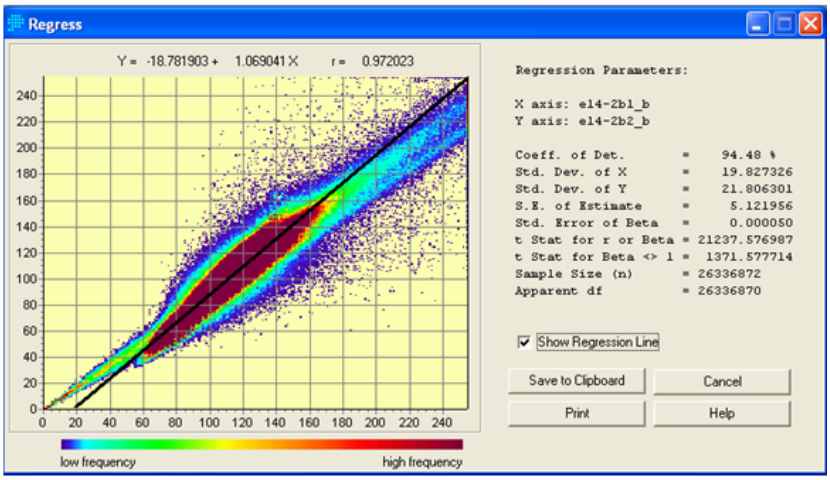
Figura VI.20. Programa REGRESS de IDRISI.

Para esta imagen se observa que el parámetro “Mask name” es opcional, debido a que se utiliza cuando se tiene un área no útil de imagen con valores digitales 0 (cero), como en una escena completa, y se crea un archivo raster “máscara” que indica con valores 1 (uno) la zona útil de la imagen, la cual en el programa REGRESS indica las zonas a procesar en la regresión. Así mismo, es útil cuando se desea hacer la regresión sólo para una zona específica de las imágenes. En el caso de los conjuntos de datos generados en pasos anteriores no se presenta alguna de esas situaciones.

El otro dato de relevancia para calcular el OIF es la desviación estándar la cual, como se dijo, se observa como parte de los datos estadísticos que presenta el comando REGRESS. A manera de ejemplo para el cálculo del OIF se muestra en la Tabla VI.1. el resultado correspondiente a la combinación de las bandas 1,2 y 3 del conjunto de datos E1402.

Esto mismo se lleva a cabo para cada una de las diez posibles combinaciones de tres bandas de las cinco disponibles.

a)



b)

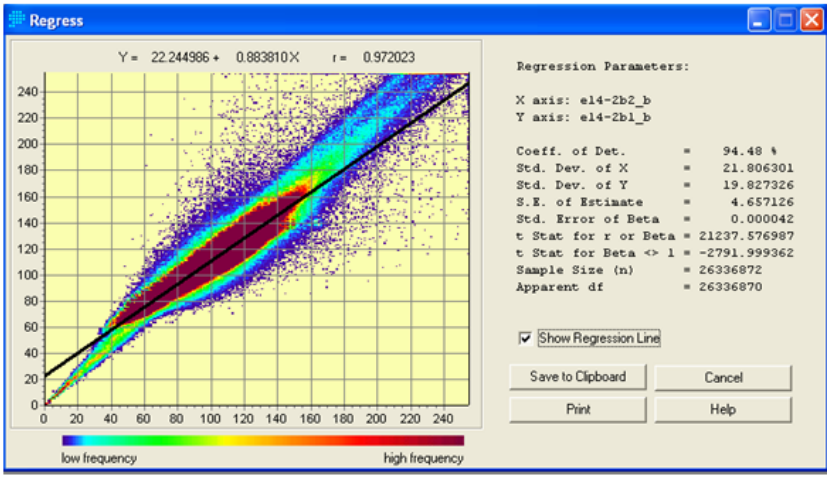


Figura VI.21. Regresión lineal para el conjunto de datos E1402 bandas 1 y 2 de imágenes Landsat ETM+. a) Banda 1 variable independiente, b) Banda 2 variable independiente.

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 2**	**Banda 3**
19.827326	21.806301	32.736248

Par de bandas		r
Banda 1	Banda 2	0.972023
Banda 1	Banda 3	0.925343
Banda 2	Banda 3	0.973046
	OIF	**25.9091291**

Tabla VI.1. Datos estadísticos para el cálculo del OIF de la combinación de las bandas 1, 2 y 3 Landsat ETM+ del conjunto de datos E1402.

En general lo que nos ofrece este índice es una riqueza de colores en la combinación de bandas, teniendo en consideración la mayor dispersión o variabilidad interna de cada banda como la menor correlación –menor redundancia informativa– entre las banda a combinar. Entonces, la composición resultante será más rica en colores cuanto mayor sea el OIF.

Por la relevancia de este concepto se presentan los datos estadísticos y el OIF calculado para cada combinación de tres bandas.

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 2**	**Banda 3**
19.827326	21.806301	32.736248
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 2	0.972023
Banda 1	Banda 3	0.925343
Banda 2	Banda 3	0.973046
	OIF	**25.9091291**

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 2**	**Banda 4**
19.827326	21.806301	14.622855
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 2	0.972023
Banda 1	Banda 4	0.577889
Banda 2	Banda 4	0.639895
	OIF	**25.6901553**

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 2**	**Banda 5**
19.827326	21.806301	38.411521
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 2	0.972023
Banda 1	Banda 5	0.723543
Banda 2	Banda 5	0.780706
	OIF	**32.3248609**

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 3**	**Banda 4**
19.827326	32.736248	14.622855
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 3	0.925343
Banda 1	Banda 4	0.577889
Banda 3	Banda 4	0.630476
	OIF	**31.4881085**

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 3**	**Banda 5**
19.827326	32.736248	38.411521
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 3	0.925343
Banda 1	Banda 5	0.723543
Banda 3	Banda 5	0.846601
	OIF	**36.4558481**

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 4**	**Banda 5**
19.827326	14.622855	38.411521
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 4	0.577889
Banda 1	Banda 5	0.723543
Banda 4	Banda 5	0.647416
	OIF	**37.3870625**

Desviación estándar		
Banda 2	**Banda 3**	**Banda 4**
21.806301	32.736248	14.622855
Par de bandas		**r**
Banda 2	Banda 3	0.973046
Banda 2	Banda 4	0.639895
Banda 3	Banda 4	0.630476
	OIF	**30.8303824**

Desviación estándar		
Banda 2	**Banda 3**	**Banda 5**
21.806301	32.736248	38.411521
Par de bandas		**r**
Banda 2	Banda 3	0.973046
Banda 2	Banda 5	0.780706
Banda 3	Banda 5	0.846601
	OIF	**35.7467121**

Desviación estándar		
Banda 2	**Banda 4**	**Banda 5**
21.806301	14.622855	38.411521
Par de bandas		**r**
Banda 2	Banda 4	0.639895
Banda 2	Banda 5	0.780706
Banda 4	Banda 5	0.647416
	OIF	**36.189585**

Desviación estándar		
Banda 3	**Banda 4**	**Banda 5**
32.736248	14.622855	38.411521
Par de bandas		**r**
Banda 3	Banda 4	0.630476
Banda 3	Banda 5	0.846601
Banda 4	Banda 5	0.647416
	OIF	**40.3722789**

La mejor combinación resulta ser la correspondiente a las bandas 3, 4 y 5; así como la peor es la combinación de las bandas 1, 2 y 4.

Un hecho que no se debe pasar por alto es que los datos obtenidos corresponden a las imágenes con balance de tonos del conjunto de datos E1402, es decir, los valores radiométricos no son los originales de las escenas involucradas en la generación del mosaico del conjunto de datos —excepto los de la imagen maestra—. Resulta entonces útil calcular el OIF para las imágenes del mismo conjunto de datos pero sin el balance de tonos, o sea, con los valores radiométricos originales de las escenas que originaron al conjunto de datos y hacer un comparativo entre ambos resultados (ver Tabla VI.2.). Se observa que la mejor combinación para ambos casos resulta ser la conformada por las bandas 3, 4 y 5; sin embargo, la peor combinación es diferente entre uno y otro caso. Si buscamos ordenar en forma ascendente a partir de la mejor combinación para cada caso, observamos que las variaciones que se dan no son muy grandes, a lo

más de una posición; por ejemplo, la combinación de las bandas 2, 4 y 5 resulta ser la cuarta mejor combinación para las imágenes con balance de tonos, pero la tercera mejor para las imágenes sin el balance. También vemos que la segunda mejor combinación resulta ser la misma para ambos casos (bandas 1, 4 y 5).

Combinación			OIF	
			Imágenes con balance de tonos	Imágenes sin balance de tonos
Banda 1	Banda 2	Banda 3	25.9091291	26.25584066
Banda 1	Banda 2	Banda 4	25.6901553	26.29502228
Banda 1	Banda 2	Banda 5	32.3248609	32.26732747
Banda 1	Banda 3	Banda 4	31.4881085	32.72180218
Banda 1	Banda 3	Banda 5	36.4558481	36.65064537
Banda 1	Banda 4	Banda 5	37.3870625	38.27401932
Banda 2	Banda 3	Banda 4	30.8303824	31.7466762
Banda 2	Banda 3	Banda 5	35.7467121	35.54771558
Banda 2	Banda 4	Banda 5	36.1895850	36.69532321
Banda 3	Banda 4	Banda 5	**40.3722789**	**41.15529811**

Tabla VI.2. OIF calculado para las imágenes Landsat ETM+ del conjunto de datos E1402.

No obstante, lo anterior resulta de poca relevancia ya que el OIF aplica a un mismo grupo de imágenes, es decir, en ningún momento pensaremos en combinar imágenes de uno y otro para hacer las composiciones; lo que sí resulta interesante y hasta trascendente, es observar que la composición de las bandas 2, 3 y 4 es de las peores de acuerdo a este índice, sin embargo, es de las más utilizadas, sino la que más, en nuestro país.

VI.1.3.2. Generar las composiciones RGB con los conjuntos de datos generados (imágenes con balance de tonos) de acuerdo al OIF partiendo de las de mayor contenido informativo.

En esta parte del procedimiento se utiliza ImageWorks (ver Figura VI.22) que es uno de los componentes de Geomatica, que permite la visualización rápida de imágenes de manera individual y de manera compuesta, toda vez que es posible

tener cargados varios canales de un archivo PIX y realizar de manera interactiva la combinación deseada analizando su calidad visual, ya que generalmente al realizar una composición se hace necesario aplicar un realce lineal (ver Capítulo IV, apartado “IV.3.2.6.3.1. Expansión lineal.”) a cada una de las imágenes involucradas en la composición.

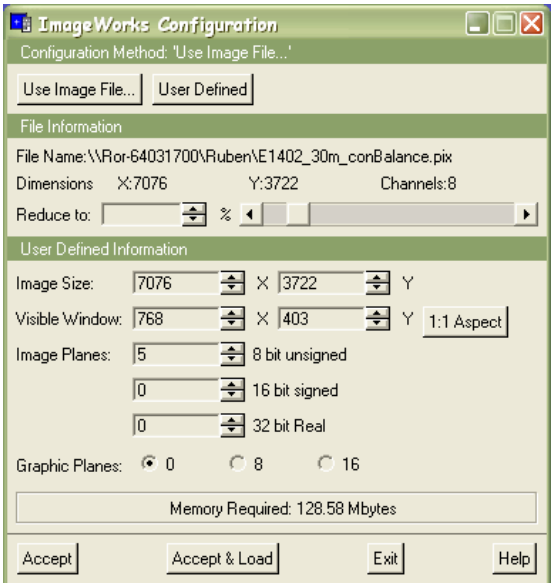


Figura VI.22. Panel de configuración de ImageWorks.

En el panel de configuración de ImageWorks se indica el archivo PIX a trabajar, también se establecen las dimensiones de las imágenes a cargar, así como el tamaño de la ventana de visualización, sin que aún se cargue propiamente el archivo. Otro dato fundamental es indicar el número de imágenes a cargar, en nuestro caso las cinco bandas, y el tipo de datos de las imágenes. Una vez aceptados los datos, desde el menú principal –File– o con la barra de herramientas de ImageWorks se cargan las imágenes almacenadas como canales en el archivo PIX (Figura VI.23). Al mostrarse la información contenida en el archivo PIX es posible cargar las imágenes mediante el número secuencial que tienen dentro de la estructura del archivo como se observa en la figura antes citada.

A partir de esto, se despliegan las imágenes de acuerdo a la combinación RGB que se establezca en el panel de control de ImageWorks, desde el cual también se pueden aplicar realces –sólo para fines de despliegue– generando las tablas LUT que se podrán aplicar a cada banda para realzarlas y generar la composición RGB en un archivo o en un canal adicional al PIX que se esté trabajando. Desde este panel de control también es posible el manejo de brillo y contraste, mismos que regularmente no son necesarios después de un realce.

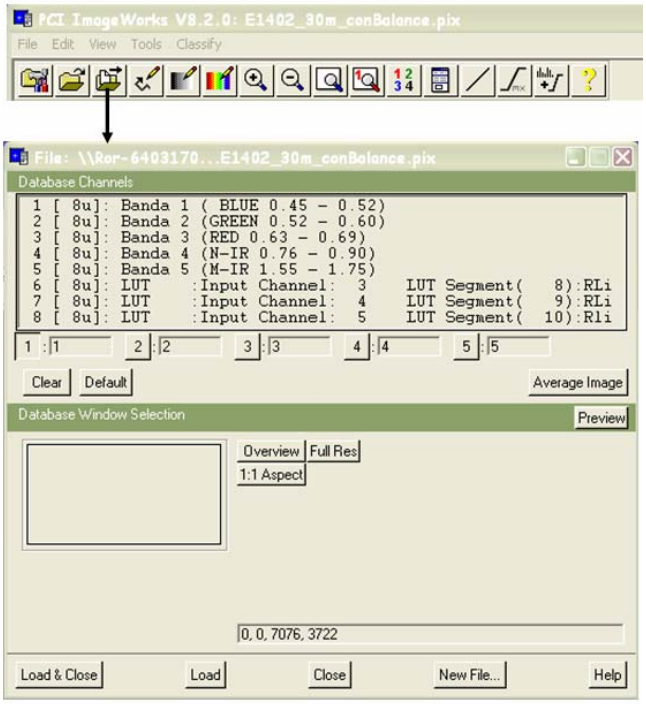


Figura VI.23. Opción para cargar las imágenes (“Load Image”) desde ImageWorks de Geomatica.

La Figura VI.24. muestra el despliegue de la composición RGB para las bandas 5,4 y 3 respectivamente del Landsat ETM+, para el conjunto de datos E1402. La composición se realiza mediante el panel de control de ImageWorks, simplemente activando las casillas de las bandas involucradas en la composición, asociándoles el color primario que se les aplicará.

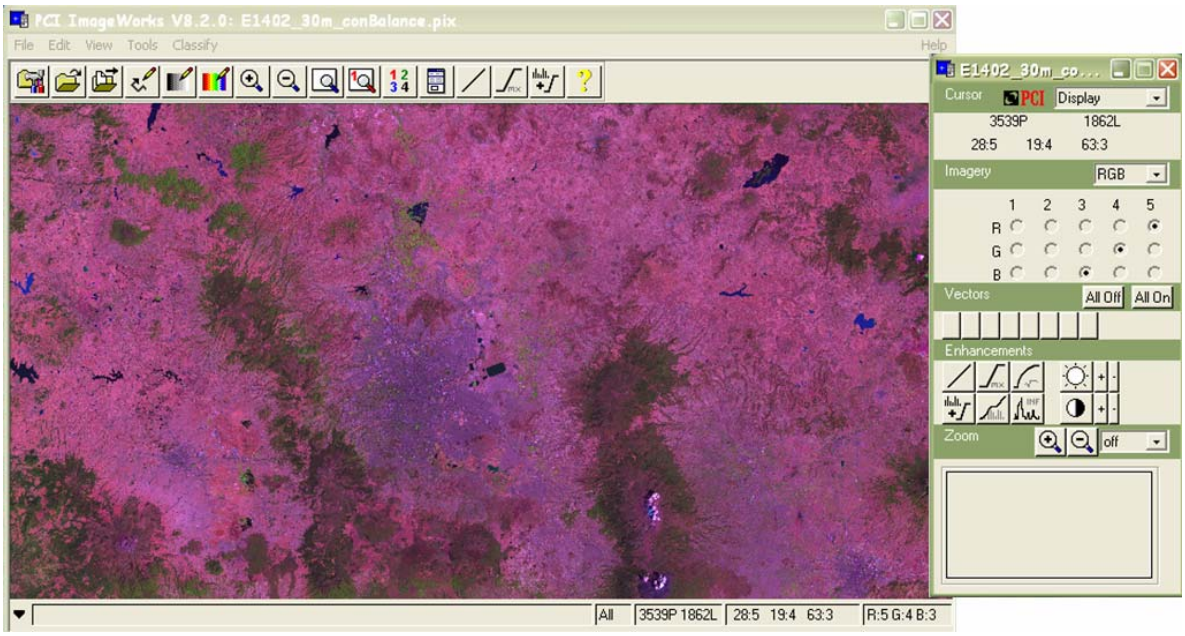


Figura VI.24. Composición RGB Imágenes Landsat ETM+ bandas 5,4 y 3 para el conjunto de datos E1402. Fuente: INEGI.

Como se observa, visualmente la composición no es buena, esto debido a las características de cada banda cuyos histogramas (Figura VI.29) evidentemente no ofrecen una variabilidad interna que permita aprovechar el rango completo de niveles digitales (0 a 255) y que al realizar la composición genere el máximo de colores posibles para cada píxel (256^3). Por lo tanto, es conveniente aplicar a cada banda un realce –lineal– y posteriormente generar la combinación. En ImageWorks, en la sección de realces –"Enhancements"– del panel de control (ver Figura VI.24.) se aplica el realce –se realiza simultáneamente a las tres imágenes– sin que éste quede de manera permanente en la composición, de hecho la propia composición sólo está en pantalla. Sin embargo, al aplicar el realce las tablas LUT generadas para cada banda quedan almacenadas en memoria, las cuales pueden ser salvadas –menú "File"– como segmentos LUT en el archivo PIX (Figura VI.25). Entonces, el archivo PIX contiene en canales las imágenes Landsat ETM+ correspondientes a las bandas útiles en la composición, en nuestro ejemplo para el conjunto de datos E1402; y en segmentos se encuentran las tablas LUT generadas en el realce (Figura VI.26 segmentos 14, 15

y 16). Con esto, es posible aplicar el realce a cada una de las imágenes mediante el programa LUT de Geomatica. Las imágenes resultantes deben almacenarse en canales previamente creados en el archivo PIX, es decir, imágenes con las mismas características que las imágenes de origen pero con valores cero que serán depositarias de los resultados de los realces.



Figura VI.25. Generación de un segmento LUT desde ImageWorks.
Tabla LUT para realce de la banda 3 Landsat ETM+ conjunto de datos E1402.

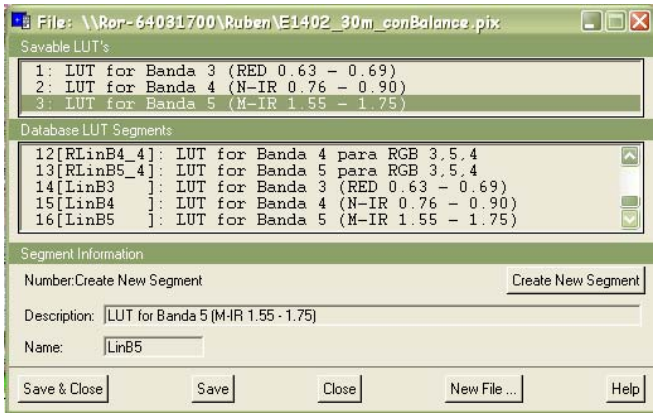


Figura VI.26. Tablas LUT para el realce de las bandas
5,4 y 3 del Landsat ETM+ para el conjunto de datos E1402.

La creación de las imágenes en tres canales del archivo PIX que recibirán los realces de cada banda se realiza en Geomatica con el programa PCIMOD como se

ejemplifica en la Figura VI.27. en la que se señalan el archivo PIX destino, la opción ADD indicando que la operación a realizar es agregar canales y el número 3 en la primera posición del campo PCIVAL diciendo que son tres canales de tipo byte los que se crearán y agregarán en el archivo PIX.

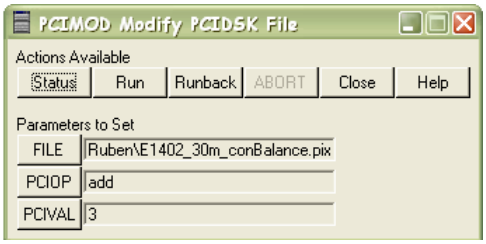


Figura VI.27. Ventana de ejecución del programa PCIMOD para el conjunto de datos E1402.

Hecho todo lo anterior, mediante el programa LUT se aplica la tabla de realce correspondiente a cada banda, en el ejemplo, para el conjunto de datos E1402 y de la combinación de bandas 5,4 y 3. En la Figura VI.28. se muestra la ventana de ejecución del programa LUT, estableciendo el archivo PIX que contiene los canales involucrados, los números de los canales que contienen las imágenes a las que se les aplica el realce, los números de los segmentos que contienen las tablas LUT para aplicar el realce de acuerdo al orden de las imágenes del campo DBIC y finalmente los números de los canales que almacenan las tres imágenes resultantes. Así, el canal número 8 recibe la imagen realzada del canal número 5 (banda 5) a la que se aplica la tabla LUT almacenada en el segmento número 16 y de igual manera para las otras dos imágenes.

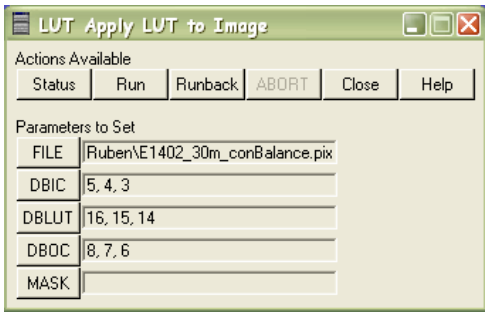


Figura VI.28. Ventana de ejecución del programa LUT para el conjunto de datos E1402.

Hasta este momento no se ha generado la composición RGB, sólo se encuentran preparadas las bandas 5,4, y 3 del Landsat ETM+ del conjunto de datos E1402 con un mejoramiento en el histograma (Figura VI.29).

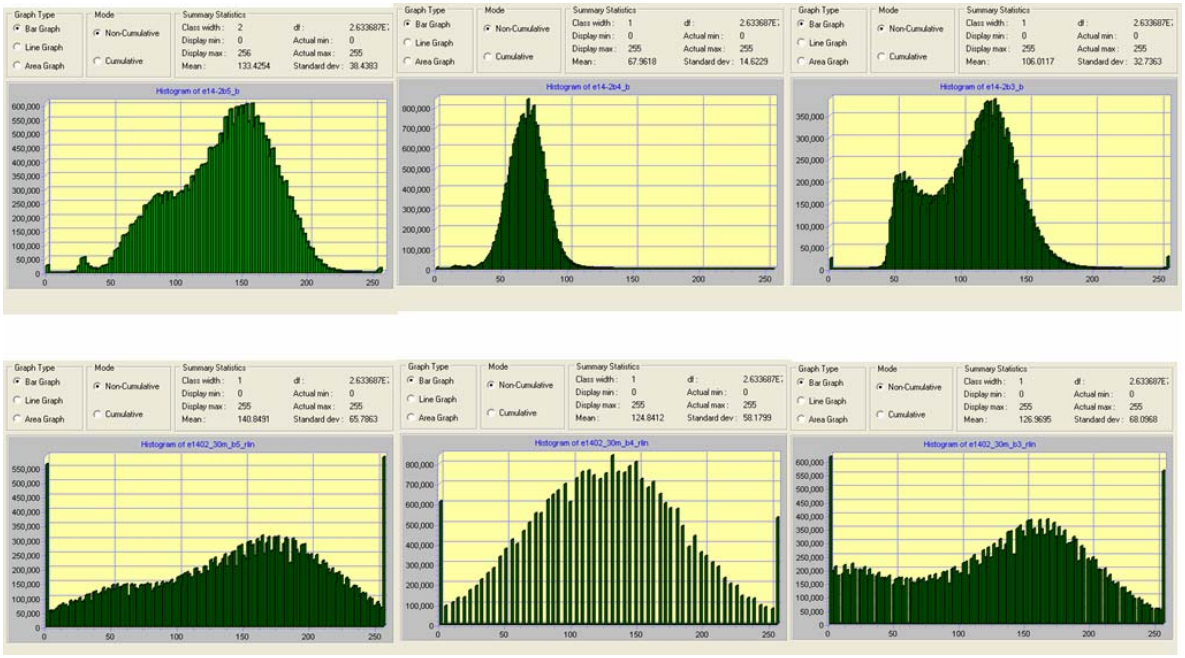


Figura VI.29. Histogramas de las bandas 5,4 y 3 respectivamente, del Lansat ETM+ para el conjunto de datos E1402. Arriba para las tres imágenes sin realce, abajo para las mismas imágenes con realce lineal (expansión lineal del histograma).

Es posible mediante ImageWorks visualizar temporalmente la imagen compuesta con la finalidad de observar la mejora (Figura VI.30) resultante de las

modificación de los histogramas, para la posterior generación en archivo de la composición.

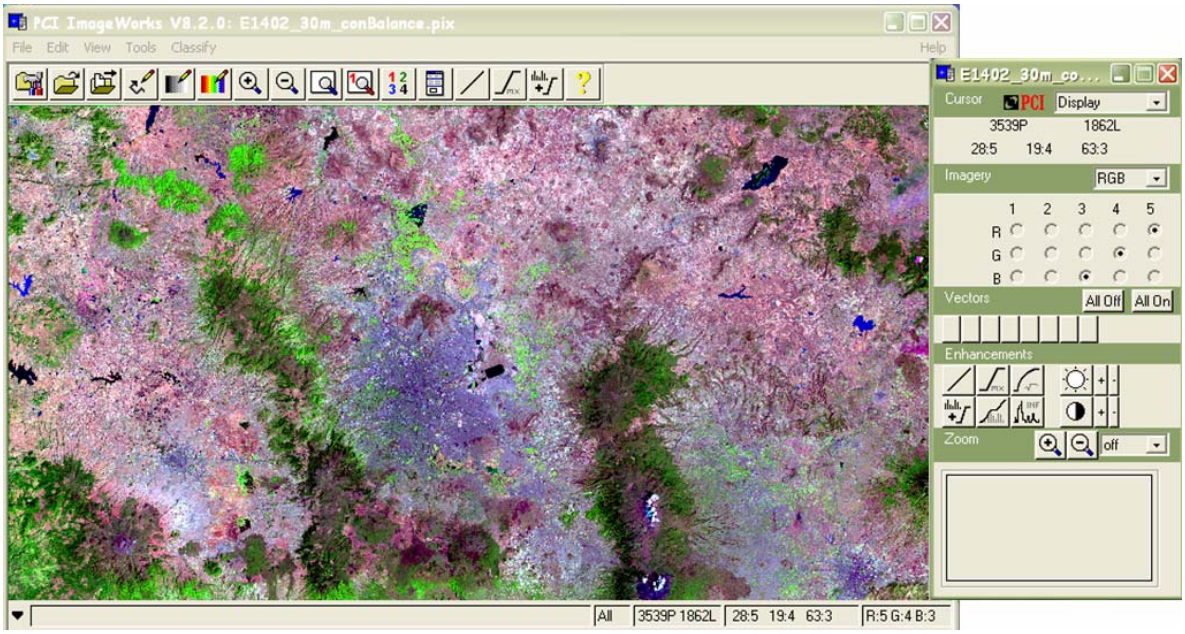


Figura VI.30. Composición RGB Imágenes Landsat ETM+ bandas 5,4 y 3 para el conjunto de datos E1402, con realce lineal. Fuente: INEGI.

Al comparar esta imagen con la composición generada sin realces (Figura VI.2.4.) se nota claramente la diferencia en color y contraste.

Desde ImageWorks –menú "File"– es posible acceder a la multicitada opción "File Utility" desde donde se puede exportar una imagen –compuesta o no– a un archivo en formato permitido por la biblioteca GDB, mediante la aplicación de "Export to…". La Figura VI.31. muestra la ventana de ejecución para la exportación de esta manera, ejemplificando la generación de la imagen compuesta de la Figura VI.30. Se indica el archivo PIX que contiene los canales a exportar, así mismo, se especifica el archivo de salida de acuerdo al formato seleccionado –Output Format–, en el ejemplo se eligió el formato TIF World, que es el TIF comúnmente conocido asociado a un archivo TFW que contiene la

referencia geográfica. Este formato es reconocido por prácticamente todos los sistemas de cartografía digital actuales.

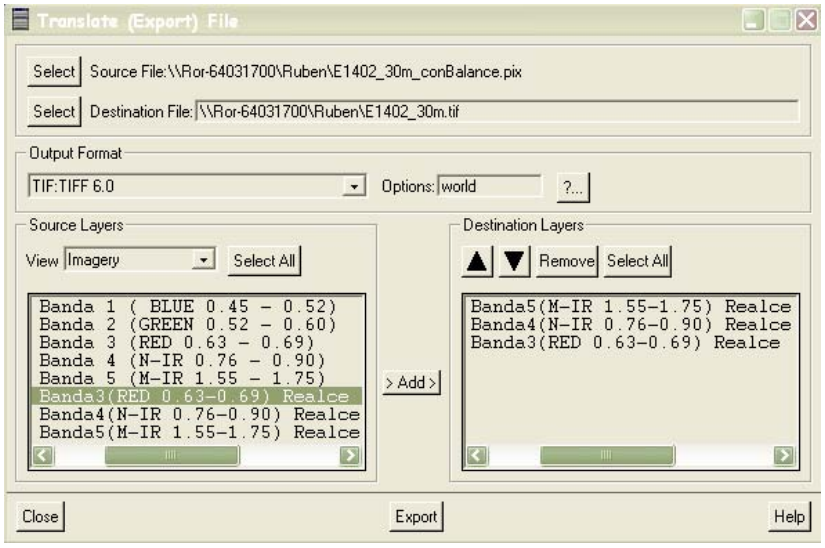


Figura VI.31. Ventana de ejecución de la exportación para la imagen compuesta del conjunto de datos E1402.

Al seleccionar el archivo PIX, se muestra del lado izquierdo de la ventana de ejecución –Source Layers–, el listado de canales y segmentos contenidos en el archivo; basta con agregar al listado del lado derecho –Destination Layers– los canales a exportar en el orden de la combinación deseada, en el ejemplo las bandas 5,4, y 3 que fueron objeto de realce lineal.

Continuando con el ejemplo, se generaron más combinaciones RGB para el conjunto de datos E1402, de acuerdo a la Tabla VI.2. –OIF calculado– presentando algunas imágenes en la Figura VI.32.

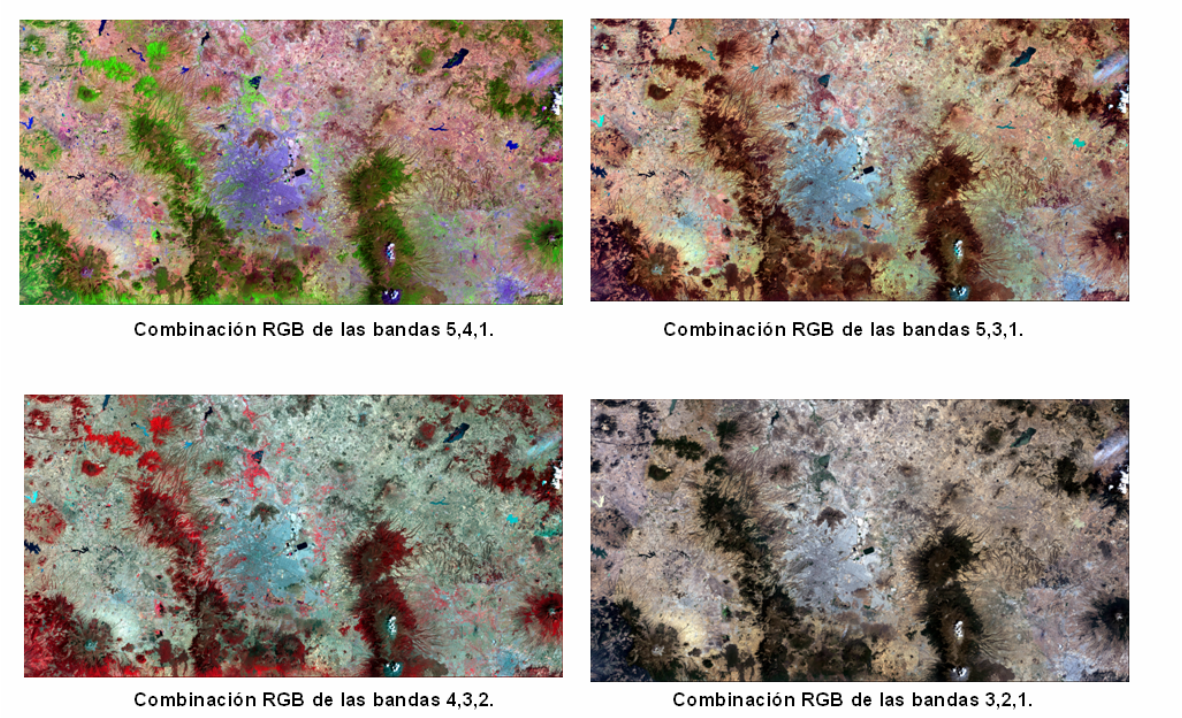


Figura VI.32. Composiciones RGB Landsat ETM+ para el conjunto de datos E1402. Fuente: INEGI.

Es conveniente mencionar que para una composición de tres bandas se tiene las disyuntiva de decidir cual irá a qué color de los primarios, toda vez que el OIF no establece este criterio; es decir, no es lo mismo combinar en el orden R=5, G=4, B=3 que en el orden R=4, G=5, B=3. Alcanzar una definición de la combinación más útil una vez seleccionada la mejor de acuerdo al OIF o a algún otro índice, implica un estudio que abarque desde el conocimiento robusto de la reflectividad de cada cubierta hasta la distribución climática general, aspectos que no forman parte de los objetivos del presente trabajo. Aquí se sigue el simple criterio de combinar las bandas en el orden más manejado en la bibliografía consultada.

Aclarado este punto, es útil presentar algunos cortes del conjunto de datos E1402 que ofrezcan un mayor acercamiento de visualización (Figura VI.33).

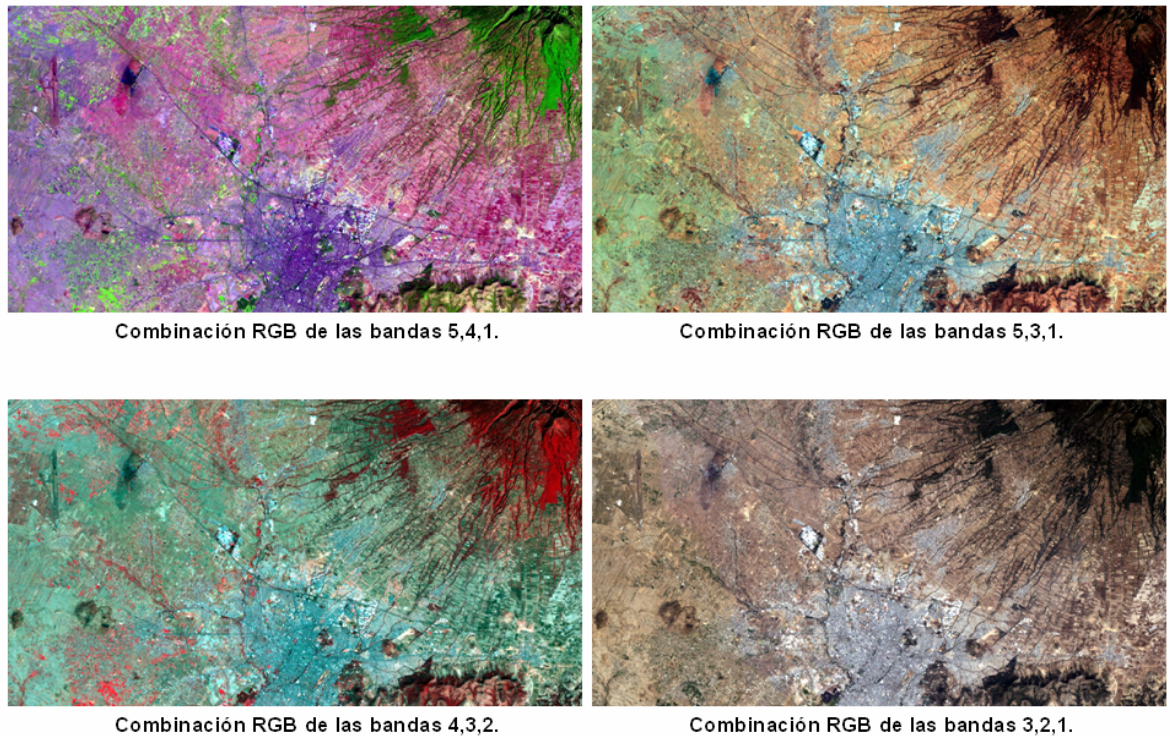


Figura VI.33. Composiciones RGB Landsat ETM+ para un corte del conjunto de datos E1402. Ciudad de Puebla y parte del volcán Malinche. Fuente: INEGI.

Una manera de interpretar estas imágenes es basándonos en la descripción de colores para la composición de las bandas 4,3,2 hecha en el capítulo IV apartado *IV.3.1.2 Color,* y asociarlo en las demás composiciones. Por ejemplo, en la composición 4,3,2 el rojo representa vegetación vigorosa; siendo su equivalente el color verde en la composición de las bandas 5,4,3. En general el análisis visual de estas imágenes debe considerar los aspectos tratados en el Capítulo IV apartado *IV.3.1. Criterios visuales generales*.

La parte del procedimiento descrita en este apartado **VI.1.3.** se realizó para los ocho conjuntos de datos. En el DVD adjunto al presente trabajo, se encuentran, a manera de ejemplo, imágenes compuestas RGB del conjunto de datos E1402 de acuerdo a la Tabla VI.2 (carpeta *JPGs_E1402 ETM+_Composiciones*).

VI.1.4. Realizar el mosaico de los ocho conjuntos de datos para las cinco bandas observando las diferencias de contraste entre cada conjunto de datos.

Hasta ahora, se han generado de manera independiente las imágenes de los ocho conjuntos de datos que conforman al estado de Puebla, por cada una de las cinco bandas del Landsat ETM+ de los años 1999 y 2000. Para hacer la unión o mosaico se utiliza el programa IMERGE –ilustrado en el apartado **VI.1.2.2.** de este mismo capítulo– con los archivos de cada conjunto de datos por cada banda.

La Figura VI.34. muestra la unión de las imágenes correspondientes a la banda 5 de los ocho conjuntos de datos. Como se esperaba, la imagen resultante presenta de manera muy marcada las uniones de cada conjunto de datos, así como una diferencia en los tonos de gris entre cada uno.

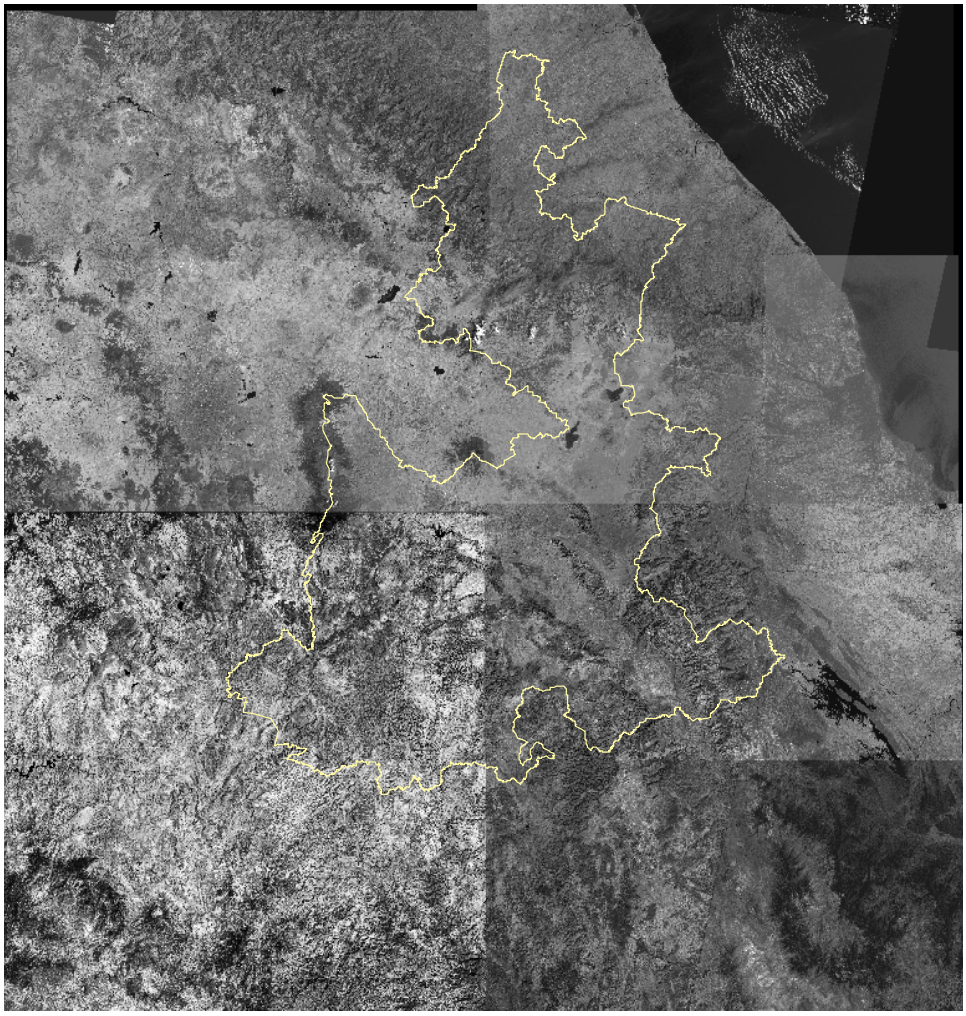


Figura VI.33. Mosaico de los ocho conjuntos de datos. Banda 5 Landsat ETM+. Fuente: INEGI.

VI.1.5. Si las diferencias de contraste son poco perceptibles:

VI.1.5.1. Generar el corte de los mosaicos de acuerdo a las coordenadas extremas de la cobertura geográfica seleccionada para el estado de Puebla (ver Capítulo V, Tabla V.2.).

Como ya se observó las diferencias de contraste son suficientemente perceptibles como para considerar aceptable las imágenes, por lo que se procede a:

VI.1.5.2. Generar el mosaico del estado de Puebla a partir de cortes directos de las escenas para todas las bandas.

En el Capítulo V apartado **V.1.1.** se presenta a detalle la referencia geográfica de cada una de las escenas Landsat ETM+. A partir de estas imágenes y con base a la cobertura geográfica seleccionada para el estado de Puebla (ver Capítulo V, Tabla V.2.) es necesario definir las coordenadas para los cortes de cada escena, buscando una zona de traslape entre cada corte para asegurar la correcta unión, así mismo, los cortes que corresponden a los extremos de la región, deberán estar sobrados para garantizar la cobertura completa estimada.

Bajo los criterios anteriores, la Tabla VI.2. muestra las coordenadas que se definieron para los cortes de cada escena:

Escena	Esq. Sup. Izq.		Esq. Sup. Der.		Esq. Inf. Izq.		Esq. Inf. Der.	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
2646	485247	2311870	640947	2311870	485247	2131390	640947	2131390
2647	485210	2182152	606050	2182152	485210	1971881	606050	1971881
2648	485255	2022961	571715	2022961	485255	1971781	571715	1971781
2546	566969	2311871	748619	2311871	566969	2132111	748619	2132111
2547	532942	2182259	748612	2182259	532942	1973219	748612	1973219
2548	498601	2022169	734131	2022169	498601	1971799	734131	1971799
2447	697202	2183066	748622	2183066	697202	1975196	748622	1975196
2448	664601	2023150	748631	2023150	664601	1971790	748631	1971790

Tabla VI.2. Coordenadas para los cortes de cada escena en proyección UTM y datum NAD27.

VI.1.5.2.1. Realizar los cortes de las escenas involucradas para las cinco bandas, de acuerdo a las coordenadas extremas de la cobertura geográfica seleccionada para el estado de Puebla.

En la Figura V.2. del Capítulo V, se presentan las coberturas de las escenas Landsat para el estado de Puebla –cuyas referencias geográficas se conocen–, que en relación con la Tabla V.2. de ese mismo capítulo, ofrecen todos los datos para realizar los cortes.

Por otra parte, en el apartado **VI.1.2.1.** del presente capítulo, se ilustró el uso del programa SUBSET, el cual es utilizado para la generación de cortes de una imagen, y que en esta ocasión es utilizado precisamente para realizar los cortes de cada escena de acuerdo a la Tabla VI.2.
Como resultado, se ha generado un corte por escena para cada una de las cinco bandas –cinco imágenes por banda–, cuyas referencias geográficas resultantes se presentan a continuación:

De la escena 2646, se obtuvo el subconjunto con las siguientes coordenadas:

D:\Proyectos\EdoPueETM\2646.pix [S 5BIC 5190P 6016L] 09Nov2004

1:GEOref Type:150 [Georeferencing] Last Update: 14:12 09Nov2004
Contents: Master Georeferencing Segment for File

Georeference Units	:	UTM 14 D-01
Projection	:	Universal Transverse Mercator
Datum - Ellipsoid	:	NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866
Upper Left Corner	:	485246.959 E 2311870.250 N
Upper Right Corner	:	640947.000 E 2311870.250 N
Image Centre	:	563096.979 E 2221630.250 N
Lower Left Corner	:	485246.959 E 2131390.250 N
Lower Right Corner	:	640947.000 E 2131390.250 N
Pixel Size	:	30.000 E 30.000 N
Upper Left Corner	:	99d08'30.71" W Lon 20d54'29.92" N Lat
Upper Right Corner	:	97d38'41.29" W Lon 20d54'10.79" N Lat
Image Centre	:	98d23'47.31" W Lon 20d05'30.75" N Lat
Lower Left Corner	:	99d08'25.45" W Lon 19d16'38.32" N Lat
Lower Right Corner	:	97d39'31.51" W Lon 19d16'20.79" N Lat

De la escena 2647, se obtuvo el subconjunto con las siguientes coordenadas:

```
D:\Proyectos\EdoPueETM\2647.pix        [S    5BIC    4028P    7009L] 09Nov2004

  1:GEOref    Type:150 [Georeferencing        ]   Last Update: 14:26 09Nov2004
    Contents: Master Georeferencing Segment for File

 Georeference Units              :  UTM    14   D-01
 Projection                      :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid               :  NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866

 Upper Left  Corner              :       485209.786 E        2182151.500 N
 Upper Right Corner              :       606049.563 E        2182151.500 N
 Image Centre                    :       545629.674 E        2077016.438 N
 Lower Left  Corner              :       485209.786 E        1971881.375 N
 Lower Right Corner              :       606049.563 E        1971881.375 N

 Pixel Size                      :          30.000 E           30.000 N

 Upper Left  Corner              :    99d08'28.16" W  Lon   19d44'09.86" N  Lat
 Upper Right Corner              :    97d59'16.59" W  Lon   19d43'59.77" N  Lat
 Image Centre                    :    98d34'01.29" W  Lon   18d47'07.53" N  Lat
 Lower Left  Corner              :    99d08'22.49" W  Lon   17d50'08.09" N  Lat
 Lower Right Corner              :    97d59'57.22" W  Lon   17d49'59.04" N  Lat
```

De la escena 2648, se obtuvo el subconjunto con las siguientes coordenadas:

```
D:\Proyectos\EdoPueETM\2648.pix        [S    5BIC    2882P    1706L] 09Nov2004

  1:GEOref    Type:150 [Georeferencing        ]   Last Update: 14:28 09Nov2004
    Contents: Master Georeferencing Segment for File

 Georeference Units              :  UTM    14   D-01
 Projection                      :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid               :  NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866

 Upper Left  Corner              :       485255.159 E        2022961.125 N
 Upper Right Corner              :       571715.250 E        2022961.125 N
 Image Centre                    :       528485.204 E        1997371.125 N
 Lower Left  Corner              :       485255.159 E        1971781.125 N
 Lower Right Corner              :       571715.250 E        1971781.125 N

 Pixel Size                      :          30.000 E           30.000 N

 Upper Left  Corner              :    99d08'22.26" W  Lon   18d17'50.25" N  Lat
 Upper Right Corner              :    98d19'17.20" W  Lon   18d17'46.10" N  Lat
 Image Centre                    :    98d43'50.98" W  Lon   18d03'57.05" N  Lat
 Lower Left  Corner              :    99d08'20.95" W  Lon   17d50'04.83" N  Lat
 Lower Right Corner              :    98d19'23.58" W  Lon   17d50'00.78" N  Lat
```

De la escena 2546, se obtuvo el subconjunto con las siguientes coordenadas:

```
D:\Proyectos\EdoPueETM\2546.pix       [S    5BIC    6055P    5992L] 09Nov2004

  1:GEOref    Type:150 [Georeferencing       ]   Last Update: 14:29 09Nov2004
    Contents: Master Georeferencing Segment for File

 Georeference Units              :  UTM    14   D-01
 Projection                      :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid               :  NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866

 Upper Left  Corner              :       566968.875 E        2311870.500 N
 Upper Right Corner              :       748618.875 E        2311870.500 N
 Image Centre                    :       657793.875 E        2221990.500 N
 Lower Left  Corner              :       566968.875 E        2132110.500 N
 Lower Right Corner              :       748618.875 E        2132110.500 N

 Pixel Size                      :           30.000 E            30.000 N

 Upper Left  Corner              :   98d21'21.76" W  Lon   20d54'25.77" N  Lat
 Upper Right Corner              :   96d36'36.27" W  Lon   20d53'29.97" N  Lat
 Image Centre                    :   97d29'26.99" W  Lon   20d05'22.95" N  Lat
 Lower Left  Corner              :   98d21'45.54" W  Lon   19d16'57.94" N  Lat
 Lower Right Corner              :   96d38'04.44" W  Lon   19d16'06.82" N  Lat
```

De la escena 2547, se obtuvo el subconjunto con las siguientes coordenadas:

```
D:\Proyectos\EdoPueETM\une\2547.pix     [S    5BIC    7189P    6968L] 09Nov2004

  1:GEOref    Type:150 [Georeferencing       ]   Last Update: 14:32 09Nov2004
    Contents: Master Georeferencing Segment for File

 Georeference Units              :  UTM    14   D-01
 Projection                      :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid               :  NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866

 Upper Left  Corner              :       532941.688 E        2182258.750 N
 Upper Right Corner              :       748611.688 E        2182258.750 N
 Image Centre                    :       640776.688 E        2077738.750 N
 Lower Left  Corner              :       532941.688 E        1973218.750 N
 Lower Right Corner              :       748611.688 E        1973218.750 N

 Pixel Size                      :           30.000 E            30.000 N

 Upper Left  Corner              :   98d41'08.20" W  Lon   19d44'12.55" N  Lat
 Upper Right Corner              :   96d37'40.95" W  Lon   19d43'17.03" N  Lat
 Image Centre                    :   97d39'51.32" W  Lon   18d47'15.64" N  Lat
 Lower Left  Corner              :   98d41'20.75" W  Lon   17d50'50.90" N  Lat
 Lower Right Corner              :   96d39'15.56" W  Lon   17d50'01.05" N  Lat
```

De la escena 2548, se obtuvo el subconjunto con las siguientes coordenadas:

```
D:\Proyectos\EdoPueETM\une\2548.pix     [S    5BIC    7851P    1679L] 09Nov2004

  1:GEOref    Type:150 [Georeferencing       ]  Last Update: 14:33 09Nov2004
    Contents: Master Georeferencing Segment for File

 Georeference Units              :  UTM    14   D-01
 Projection                      :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid               :  NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866

 Upper Left  Corner              :       498601.250 E        2022169.125 N
 Upper Right Corner              :       734131.250 E        2022169.125 N
 Image Centre                    :       616366.250 E        1996984.125 N
 Lower Left  Corner              :       498601.250 E        1971799.125 N
 Lower Right Corner              :       734131.250 E        1971799.125 N

 Pixel Size                      :          30.000 E           30.000 N

 Upper Left  Corner              :    99d00'47.64" W  Lon   18d17'24.66" N  Lat
 Upper Right Corner              :    96d47'07.22" W  Lon   18d16'38.47" N  Lat
 Image Centre                    :    97d54'01.74" W  Lon   18d03'33.87" N  Lat
 Lower Left  Corner              :    99d00'47.52" W  Lon   17d50'05.59" N  Lat
 Lower Right Corner              :    96d47'27.70" W  Lon   17d49'20.62" N  Lat
```

De la escena 2447, se obtuvo el subconjunto con las siguientes coordenadas:

```
D:\Proyectos\EdoPueETM\2447.pix       [S    5BIC    1714P    6929L] 09Nov2004

  1:GEOref    Type:150 [Georeferencing       ]  Last Update: 15:37 09Nov2004
    Contents: Master Georeferencing Segment for File

 Georeference Units              :  UTM    14   D-01
 Projection                      :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid               :  NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866

 Upper Left  Corner              :       697201.875 E        2183065.750 N
 Upper Right Corner              :       748621.875 E        2183065.750 N
 Image Centre                    :       722911.875 E        2079130.813 N
 Lower Left  Corner              :       697201.875 E        1975195.875 N
 Lower Right Corner              :       748621.875 E        1975195.875 N

 Pixel Size                      :          30.000 E           30.000 N

 Upper Left  Corner              :    97d07'05.61" W  Lon   19d44'04.22" N  Lat
 Upper Right Corner              :    96d37'40.22" W  Lon   19d43'43.25" N  Lat
 Image Centre                    :    96d53'06.31" W  Lon   18d47'35.00" N  Lat
 Lower Left  Corner              :    97d08'20.34" W  Lon   17d51'24.16" N  Lat
 Lower Right Corner              :    96d39'14.38" W  Lon   17d51'05.33" N  Lat
```

De la escena 2448, se obtuvo el subconjunto con las siguientes coordenadas:

```
D:\Proyectos\EdoPueETM\2448.pix       [S   5BIC   2801P   1712L] 09Nov2004

  1:GEOref   Type:150 [Georeferencing       ]  Last Update: 14:35 09Nov2004
    Contents: Master Georeferencing Segment for File

 Georeference Units              :  UTM   14   D-01
 Projection                      :  Universal Transverse Mercator
 Datum - Ellipsoid               :  NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866

 Upper Left  Corner              :       664600.938 E       2023150.125 N
 Upper Right Corner              :       748630.938 E       2023150.125 N
 Image Centre                    :       706615.938 E       1997470.125 N
 Lower Left  Corner              :       664600.938 E       1971790.125 N
 Lower Right Corner              :       748630.938 E       1971790.125 N

 Pixel Size                      :          30.000 E          30.000 N

 Upper Left  Corner              :   97d26'33.84" W  Lon   18d17'33.73" N  Lat
 Upper Right Corner              :   96d38'53.33" W  Lon   18d17'04.47" N  Lat
 Image Centre                    :   97d02'52.69" W  Lon   18d03'25.44" N  Lat
 Lower Left  Corner              :   97d26'48.54" W  Lon   17d49'43.07" N  Lat
 Lower Right Corner              :   96d39'15.52" W  Lon   17d49'14.59" N  Lat
```

VI.1.5.2.2. Revisar para cada banda, la uniformidad de tonos entre los cortes de las imágenes de las escenas, uniendo aquellas que no requieran balance de tonos. Estas uniones (mosaicos previos) constituirán "piezas" para el mosaico final.

De la revisión de los histogramas de cada corte y de su despliegue visual, se considera útil la generación de mosaicos directos –sin balance de tonos– debido a la uniformidad de tonos, de acuerdo a la Tabla VI.3.:

Orden para el mosaico	Corte de la Escena	Archivo de salida
1	2648	26_46_47_48.pix
2	2647	
3	2646	
1	2547	25_47_48.pix
2	2548	
1	2447	24_47_48.pix
2	2448	

Tabla VI.3. Cortes de escenas para generar mosaicos previos.

La Figura VI.34. muestra los mosaicos previos generados de acuerdo a la Tabla VI.3, para la banda 5, mediante el programa MOSAIC –ya ilustrado en el apartado **VI.1.2.4.3.**– que servirán para construir el mosaico para el estado de Puebla. Como se observa, se incluye el corte a la escena 2546 que como resultado del análisis, no se incorporó a ninguno de los mosaicos previos por considerarse heterogéneo para formar parte de alguno de éstos.

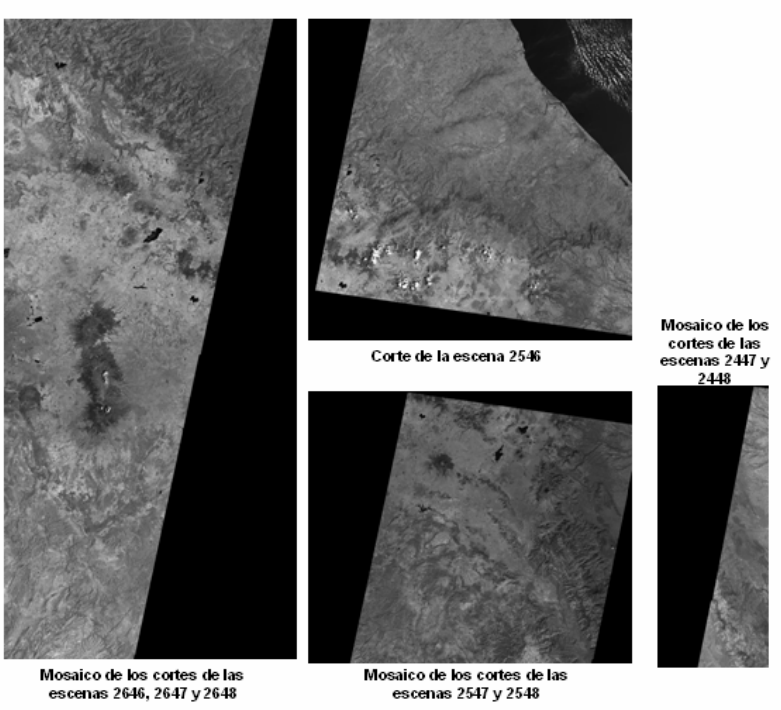


Figura VI.34. Mosaicos previos al mosaico para el estado de Puebla.
Landsat ETM+ banda 5. Fuente: INEGI.

Como se observa en las imágenes de la Figura VI.34., al interior de cada una existe homogeneidad en los tonos y aunque visualmente parecen ser homogéneas entre sí, es conveniente generar un mosaico previo –sin balance de tonos– para verificar su calidad visual.

VI.1.5.2.3. Generar para cada banda el mosaico del estado de Puebla, de acuerdo a la cobertura geográfica seleccionada observando diferencias de tonos para el posible balance de tonos de los mismos.

De manera ilustrativa, se toma la banda 5, con lo que la Figura VI.35 muestra la unión de las imágenes ilustradas en la Figura VI.34. –generada con IMERGE–, notando la necesidad del balance de tonos.

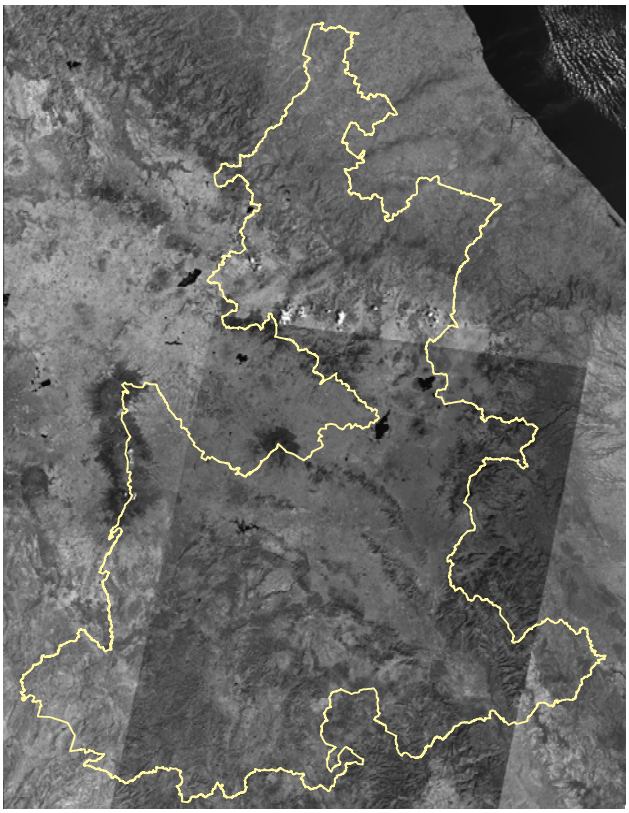


Figura VI.35. Mosaico con los cortes de la Figura VI.34 sin balance de tonos. Fuente:INEGI.

VI.1.5.2.4. Elegir de entre los segmentos de imagen que conforman el mosaico del estado de Puebla, aquel que ofrezca mejor contraste, imagen que llamaremos maestra.

Para el balance de tonos, se hace indispensable revisar los histogramas de las cuatro imágenes que intervienen, determinando la imagen maestra. Estos

histogramas se presentan en la Figura VI.36. Nótese que la imagen de mayor variabilidad interna –mayor desviación estándar (38.1691)– corresponde al corte de la escena 2546, sin embargo, la media presenta un valor de 98.0784, es decir, el promedio de los niveles digitales de esta imagen están ligeramente cargados a valores bajos –oscuros–; además se presenta en la parte izquierda del histograma un comportamiento peculiar hasta antes del nivel digital 50 derivado de los niveles digitales bajos correspondientes al Golfo de México. Al comparar este histograma con el del mosaico de los cortes de las escenas con Path 26, se observa en este último una mejor distribución de los niveles digitales, con una media de 114.4658, lo que significa que el promedio de los niveles digitales no está cargado a valores bajos o altos –recordar que el rango de niveles digitales está entre 0 y 255–; además de que presenta una mayor desviación estándar que el otro par de histogramas, o sea que también ofrece una buena variabilidad interna; razones éstas para considerar a la imagen de este histograma como la maestra.

Se ha ilustrado con la banda 5, sin embargo, como en todos los casos, esto mismo se llevó a cabo para las cinco bandas del cubrimiento estatal.

VI.1.5.2.5. Generar las tablas de realce de acuerdo a la imagen maestra, para igualar el histograma del resto de los segmentos de imagen del estado de Puebla al momento de realizar la unión.

En el apartado **VI.1.2.4.2.** de este mismo capítulo se ilustró ampliamente la generación de la tablas LUT mediante el programa MATCH, necesarias para el balance de tonos; baste ahora decir que las imágenes a unir aplicándoles estas tablas son las mostradas en la Figura VI.34., así como que la imagen maestra es la correspondiente al mosaico de los cortes de las escenas 2646, 2647 y 2648 también presentado en la Figura VI.34. y en la Tabla VI.3.

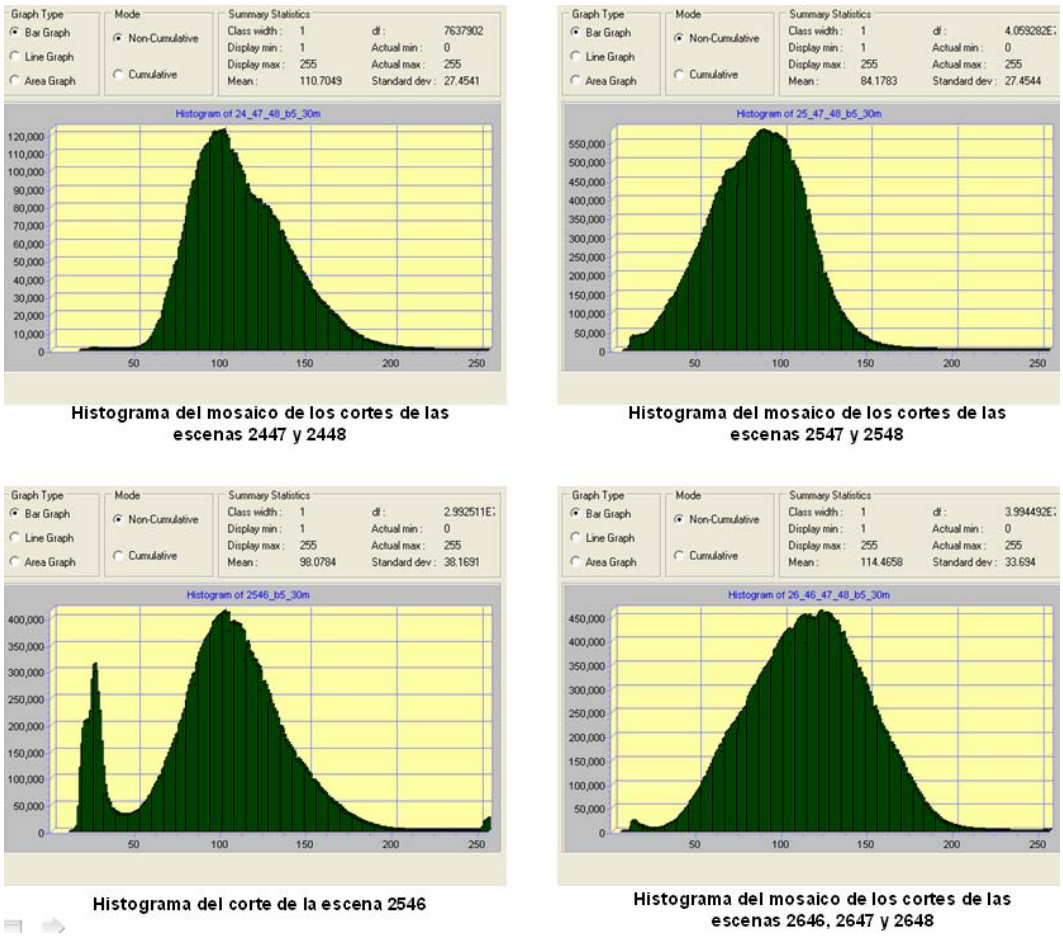


Figura VI.36. Histogramas de las imágenes de la Figura VI.34.

El resultado de aplicar el programa MATCH al caso de la banda 5, que ha sido utilizada para ejemplificar el procedimiento, son las tres tablas LUT —una por cada imagen a unir, exceptuando la maestra— mostradas a continuación como reporte generado desde el software Geomatica:

Para el mosaico de la imagen con path 24:

```
LUTREP  Lookup Table Segment Report            V8.2 EASI/PACE  11:00 23Apr2007
   2:Pbalance  Type:170 [Lookup Table         ]  Last Update: 10:56 23Apr2007
    Contents: Maestra 26_46_47_48
          0   1   2   3   4   5   6   7   8   9  10  11  12  13  14  15
   +----------------------------------------------------------------
 0 |  109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109
16 |  109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109
32 |  109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109
48 |  109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 109 110 110
64 |  110 110 110 110 110 111 111 111 112 112 112 113 113 114 114 115
80 |  115 116 116 117 117 118 119 120 120 121 122 122 123 124 125 126
96 |  126 127 128 129 130 130 131 132 133 134 134 135 136 137 137 138
112 |  139 140 140 141 142 143 143 144 145 146 146 147 148 149 149 150
128 |  151 152 153 154 154 155 156 157 158 159 159 160 161 162 163 163
144 |  164 165 166 166 167 168 169 169 170 171 172 172 173 174 175 175
160 |  176 177 177 178 179 180 180 181 182 183 184 184 185 186 187 188
176 |  188 189 190 191 192 193 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202
192 |  203 204 205 206 207 209 210 211 212 214 215 217 218 219 221 222
208 |  225 226 228 229 231 232 235 237 239 241 243 245 248 250 252 252
224 |  253 253 253 253 253 254 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255
240 |  255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255
```

Para el corte de la escena 2546:

```
LUTREP  Lookup Table Segment Report            V8.2 EASI/PACE  11:01 23Apr2007
   2:Pbalance  Type:170 [Lookup Table         ]  Last Update: 10:59 23Apr2007
    Contents: Maestra 26_46_47_48
        0   1   2   3   4   5   6   7   8   9  10  11  12  13  14  15
   +----------------------------------------------------------------
 0 |   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
16 |   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
32 |   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
48 |   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
64 |   0   0   0   0  17  38  44  49  52  55  57  59  61  63  65  67
80 |  69  71  73  75  77  79  81  83  85  86  88  90  92  93  95  97
96 |  98 100 101 103 105 106 108 109 111 112 114 115 116 118 119 121
112 |  122 123 124 126 127 128 129 130 132 133 134 135 136 137 138 139
128 |  140 142 143 144 145 146 147 148 149 149 150 151 152 153 154 155
144 |  156 157 158 159 160 161 161 162 163 164 165 166 167 167 168 169
160 |  170 171 171 172 173 174 175 175 176 177 177 178 179 180 180 181
176 |  182 182 183 184 184 185 186 186 187 187 188 189 189 190 190 191
192 |  191 192 192 193 193 193 194 194 194 195 195 195 196 196 196 196
208 |  197 197 197 197 197 198 198 198 198 198 199 199 199 199 199 199
224 |  200 200 200 200 200 201 201 201 201 201 202 202 202 202 203 203
240 |  203 203 203 204 204 204 204 204 205 205 205 205 207 215 219 255
```

Para el mosaico del mosaico de las escenas 2547 y 2548:

LUTREP Lookup Table Segment Report V8.2 EASI/PACE 11:01 23Apr2007
2:Pbalance Type:170 [Lookup Table] Last Update: 10:57 23Apr2007
Contents: Maestra 26_46_47_48

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	21	34	39
32	42	44	47	48	50	52	53	55	56	58	59	60	62	63	64	66
48	67	68	69	71	72	73	75	76	77	79	80	81	83	84	86	87
64	88	89	91	92	93	95	96	97	98	100	101	102	103	104	106	107
80	108	109	111	112	113	114	116	117	118	120	121	122	123	125	126	127
96	128	130	131	132	134	135	136	138	139	140	142	143	145	146	147	149
112	150	151	153	154	156	157	158	159	161	162	163	164	166	167	168	169
128	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185
144	186	187	188	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	197	198	199
160	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	213	214	215	216
176	217	219	220	221	222	224	225	226	228	229	230	231	233	234	236	237
192	239	240	241	243	244	245	247	248	249	251	252	252	252	253	253	253
208	253	253	253	253	253	254	254	254	254	254	255	255	255	255	255	255
224	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
240	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255

VI.1.5.2.6. Realizar la unión de los segmentos de imagen, controlando el orden de pegado y aplicando a cada uno las tablas de realce generadas en el apartado VI.1.5.2.5. para su balance de acuerdo a la imagen maestra.

En el apartado **VI.1.2.4.3** se establecieron con detalle los criterios, procedimiento y programas para realizar este tipo de unión, mismos que se siguen de igual manera para el caso que nos ocupa ahora, con las imágenes de la Figura VI.34.

La Figura VI.37. presenta la unión o “mosaiqueo” destacando en ésta que al compararse con la Figura VI.35 se percibe la notable mejora resultante del balance de tonos.

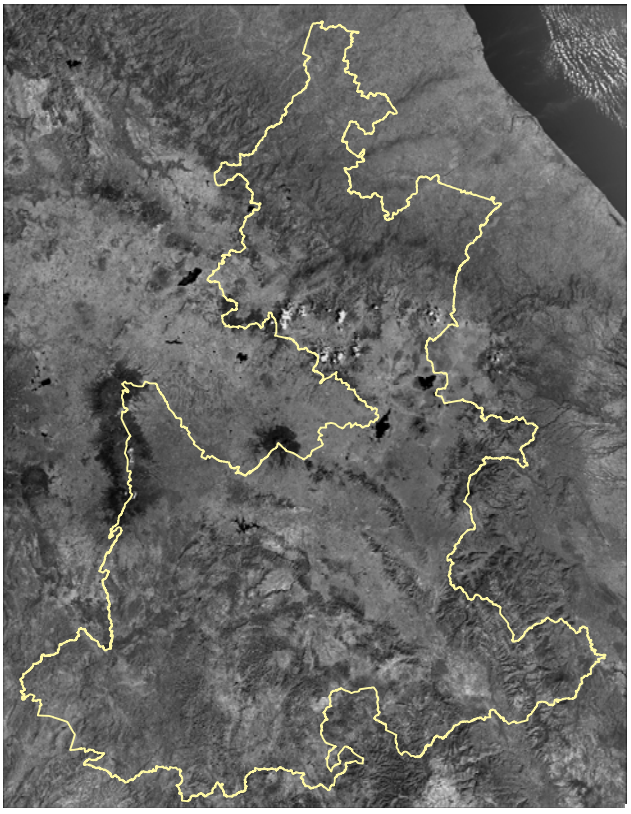


Figura VI.37. Mosaico con los cortes de la Figura VI.34 con balance de tonos. Fuente:INEGI.

Los datos de referencia geográfica resultantes de la imagen en la Figura VI.37. son:

PROREP Georeference Segment Report V8.2 EASI/PACE 12:20 08Dec2004

D:\Proyectos\EdoPueETM\ETM_5Bandas_Pue_Ortho.pix[S 6PIC 8781P 11336L] 09Nov2004
1:GEOref Type:150 [Georeferencing] Last Update: 14:37 09Nov2004
Contents: Master Georeferencing Segment for File

Georeference Units	:	UTM 14 D-01	
Projection	:	Universal Transverse Mercator	
Datum – Ellipsoid	:	NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866	
Upper Left Corner	:	485209.786 E	2311870.500 N
Upper Right Corner	:	748639.786 E	2311870.500 N
Image Centre	:	616924.786 E	2141830.500 N
Lower Left Corner	:	485209.786 E	1971790.500 N
Lower Right Corner	:	748639.786 E	1971790.500 N
Pixel Size	:	30.000 E	30.000 N
Upper Left Corner	:	99d08'32.00" W Lon	20d54'29.93" N Lat
Upper Right Corner	:	96d36'35.55" W Lon	20d53'29.96" N Lat
Image Centre	:	97d53'12.03" W Lon	19d22'05.94" N Lat
Lower Left Corner	:	99d08'22.49" W Lon	17d50'05.13" N Lat
Lower Right Corner	:	96d39'15.22" W Lon	17d49'14.60" N Lat

La parte del procedimiento descrita en este apartado **VI.1.5.** se realizó para las cinco bandas satelitales. En el DVD adjunto al presente trabajo, se encuentran, a manera de ejemplo, imágenes ilustrativas de este apartado (carpeta *JPGs_MosaicoEscenas ETM+*).

VI.1.6. Realizar las operaciones de edición pertinentes para mejorar las imágenes.

Se ha considerado no conveniente realizar en este momento ajustes manuales al brillo o contraste resultantes toda vez que:

- Los ajustes manuales suelen tener poco control, es decir, generalmente sólo es visual, sin analizar datos estadísticos.
- Aún con los balance de tonos, las imágenes se derivaron de la aplicación de tablas LUT generadas a partir de niveles digitales de una imagen maestra con valores no alterados, buscando que éstos se conserven de acuerdo a las características esperadas de cada banda.
- Cada una de las bandas queda disponible para aplicaciones específicas en las que los ajustes se podrán hacer con base a los requerimientos particulares necesarios.
- Las imágenes serán utilizadas para realizar composiciones RGB en donde se hará necesaria la aplicación de realces lineales (ver apartado VI.1.3.2.).

VI.1.7. Realizar el ajuste final al mosaico del estado de Puebla de acuerdo a la cobertura geográfica seleccionada (ver Tabla V.2. Capítulo 5).

Como se puede observar, existe una ligera variación entre la referencia geográfica de la imagen de la Figura VI.37. y los esperados en la Tabla V.2. del Capítulo V que es la cobertura geográfica seleccionada para el estado de Puebla; las razones ya han sido comentadas en el Capítulo V y en el apartado **VI.1.5.2.** del presente capítulo.

Como es de esperarse, la cobertura geográfica de la Figura VI.37. es más amplia que la definida, para poder hacer el ajuste requerido. Para esto, se hace uso en el software Geomatica del programa SUBSET el cual ha sido ilustrado en el apartado **VI.1.2.1.;** considerando ahora que el corte se hace sobre la imagen de la Figura VI.37. y con las coordenadas de la Tabla V.2. del Capítulo V.

El resultado del corte se presenta en la Figura VI.38., ejemplificando con la banda 5.

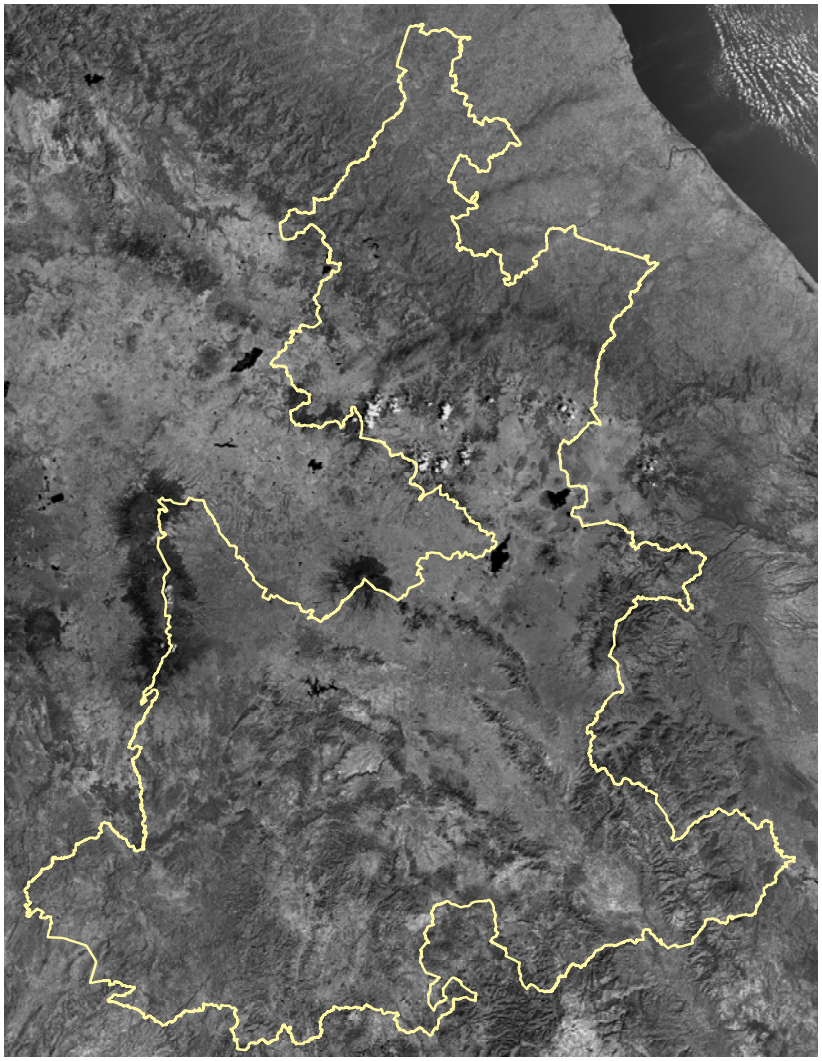


Figura VI.38. Imagen final para el estado de Puebla.
Landsat ETM+ Banda 5. Fuente: INEGI

Los datos de la referencia geográfica para la imagen mostrada en la Figura VI.38. son:

D:\Proyectos\EdoPueETM\ETM_Pue_30m.pix [S 13BIC 8714P 11271L] 15Nov2004

1:GEOref Type:150 [Georeferencing] Last Update: 11:01 15Nov2004
Contents: Master Georeferencing Segment for File

Georeference Units	:	UTM 14 D-01	
Projection	:	Universal Transverse Mercator	
Datum – Ellipsoid	:	NAD27 (USA, NADCON) (Continental U.S.) - Clarke 1866	
Upper Left Corner	:	486199.786 E	2310910.500 N
Upper Right Corner	:	747619.786 E	2310910.500 N
Image Centre	:	616909.786 E	2141845.500 N
Lower Left Corner	:	486199.786 E	1972780.500 N
Lower Right Corner	:	747619.786 E	1972780.500 N
Pixel Size	:	30.000 E	30.000 N
Upper Left Corner	:	99d07'57.70" W Lon	20d53'58.73" N Lat
Upper Right Corner	:	96d37'11.31" W Lon	20d52'59.25" N Lat
Image Centre	:	97d53'12.54" W Lon	19d22'06.43" N Lat
Lower Left Corner	:	99d07'48.88" W Lon	17d50'37.37" N Lat
Lower Right Corner	:	96d39'49.42" W Lon	17d49'47.20" N Lat

La parte del procedimiento descrita en este apartado **VI.1.7.** se realizó para las cinco bandas satelitales. En el DVD adjunto al presente trabajo, se encuentran, a manera de ejemplo, imágenes ilustrativas de este apartado (carpeta *JPGs_BandasFinales ETM+s*).

VI.1.8. Generar las composiciones RGB con los mosaicos del estado de Puebla.

Tal como se procedió con los conjuntos de datos de 2° X 1° para generar las composiciones RGB, corresponde ahora seguir el mismo procedimiento pero con una cobertura mayor, el estado de Puebla.

VI.1.8.1. Calcular el OIF de las posibles combinaciones RGB de tres bandas entre cinco, para determinar aquellas que albergan un mayor contenido informativo.

En el apartado VI.1.3.1. se estableció que son 10 las combinaciones posibles de acuerdo al número de bandas disponibles y que para fines estadísticos –cálculo del OIF– no importa el orden en la combinación de tres bandas. Con estos criterios, los resultados se han dado de la siguiente manera:

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 2**	**Banda 3**
14.717997	17.19079	25.280735
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 2	0.893662
Banda 1	Banda 3	0.854943
Banda 2	Banda 3	0.95938
	OIF	**21.1188474**

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 2**	**Banda 4**
14.717997	17.19079	17.697817
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 2	0.893662
Banda 1	Banda 4	0.377941
Banda 2	Banda 4	0.493033
	OIF	**28.1115221**

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 2**	**Banda 5**
14.717997	17.19079	33.082176
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 2	0.893662
Banda 1	Banda 5	0.671069
Banda 2	Banda 5	0.724204
	OIF	**28.393538**

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 3**	**Banda 4**
14.717997	25.280735	17.697817
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 3	0.854943
Banda 1	Banda 4	0.377941
Banda 3	Banda 4	0.435771
	OIF	**34.5766794**

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 3**	**Banda 5**
14.717997	25.280735	33.082176
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 3	0.854943
Banda 1	Banda 5	0.671069
Banda 3	Banda 5	0.778723
	OIF	**31.7090286**

Desviación estándar		
Banda 1	**Banda 4**	**Banda 5**
14.717997	17.697817	33.082176
Par de bandas		**r**
Banda 1	Banda 4	0.377941
Banda 1	Banda 5	0.671069
Banda 4	Banda 5	0.533841
	OIF	**41.3797572**

Desviación estándar		
Banda 2	**Banda 3**	**Banda 4**
17.19079	25.280735	17.697817
Par de bandas		**r**
Banda 2	Banda 3	0.95938
Banda 2	Banda 4	0.493033
Banda 3	Banda 4	0.435771
	OIF	**31.8662493**

Desviación estándar		
Banda 2	**Banda 3**	**Banda 5**
17.19079	25.280735	33.082176
Par de bandas		**r**
Banda 2	Banda 3	0.95938
Banda 2	Banda 5	0.724204
Banda 3	Banda 5	0.778723
	OIF	**30.6841109**

Desviación estándar		
Banda 2	**Banda 4**	**Banda 5**
17.19079	17.697817	33.082176
Par de bandas		**r**
Banda 2	Banda 4	0.493033
Banda 2	Banda 5	0.724204
Banda 4	Banda 5	0.533841
	OIF	**38.8165364**

Desviación estándar		
Banda 3	**Banda 4**	**Banda 5**
25.280735	17.697817	33.082176
Par de bandas		**r**
Banda 3	Banda 4	0.435771
Banda 3	Banda 5	0.778723
Banda 4	Banda 5	0.533841
	OIF	**43.5046647**

La mejor combinación RGB resulta ser la formada por las bandas 5, 4 y 3; seguida de la combinación 1, 4 y 5; cuyo contenido informativo es muy parecido entre ambas combinaciones. La combinación de las bandas 2, 3 y 4 está en la posición cinco si buscamos ordenar los OIF resultantes iniciando de la mejor. La combinación de colores reales (bandas 3, 2 y 1) resulta ser la peor de las diez combinaciones.

Antes de proceder a la generación de las imágenes compuestas, es oportuno reflexionar que, como se vio en el apartado VI.1.3.2., es conveniente aplicar un realce a las imágenes previamente a crear la composición. Se puede pensar que la aplicación de este realce modifica los niveles digitales con los que se calculó el OIF de cada combinación y que entonces no existirá garantía de que con los nuevos niveles digitales se obtengan los mismos índices.

Efectivamente, debe existir variación entre los valores de los índices para cada caso, sin embargo, se debe considerar que una imagen con aplicación de realce, evidentemente tendrá un histograma mejor distribuido y en consecuencia una

mayor desviación estándar. Para corroborar esta afirmación, se ha procedido a calcular el OIF para las mismas combinaciones pero con las imágenes a las que se les aplicó el realce. En la Tabla VI.4. se presenta el comparativo de los índices calculados para imágenes con y sin realce.

			Desviación estándar	
			Sin realce lineal	Con realce lineal
		Banda 1	14.717997	55.3362
		Banda 2	17.19079	54.474839
		Banda 3	25.280735	56.080697
		Banda 4	17.697817	54.28207
		Banda 5	33.082176	60.093094
Combinación			OIF	
			Imágenes sin realce lineal	Imágenes con realce lineal
Banda 1	Banda 2	Banda 3	21.1188474	61.8455328
Banda 1	Banda 2	Banda 4	28.1115221	97.8921048
Banda 1	Banda 2	Banda 5	28.3935380	73.3531382
Banda 1	Banda 3	Banda 4	34.5766794	69.7186565
Banda 1	Banda 3	Banda 5	31.7090286	73.4122334
Banda 1	Banda 4	Banda 5	41.3797572	108.7011904
Banda 2	Banda 3	Banda 4	31.8662493	89.2834504
Banda 2	Banda 3	Banda 5	30.6841109	68.5573198
Banda 2	Banda 4	Banda 5	38.8165364	97.3819078
Banda 3	Banda 4	Banda 5	43.5046647	99.4708072

Tabla VI.4. Comparativo del cálculo del OIF para las imágenes Landsat ETM+ del mosaico del estado de Puebla con y sin realce lineal.

El caso más relevante en los datos de desviación estándar es para la banda 1, para la que, en el caso de las imágenes sin realce, es la que presenta la menor variabilidad interna –menor valor de desviación estándar–, sin embargo para las imágenes con realce es la segunda mejor en cuanto a variabilidad interna, toda vez que en la aplicación del realce su histograma pasa de ser el más "estrecho" a uno de los mejor distribuidos. Esta situación se ve reflejada en la generación del OIF, en donde la combinación de las banda 5, 4 y 1 –con realce lineal– resulta

ser la mejor, seguida de la combinación 5,4,3; sin embargo, ambas composiciones son muy parecidas. En general el OIF mejora de manera importante para combinaciones en donde participa la banda 1; sin embargo, la combinación de las bandas 3, 2 y 1 sigue siendo la de menor contenido informativo y la correspondiente a las bandas 4, 3 y 2 permanece en la quinta posición respecto a los valores del OIF y si consideramos que muchas combinaciones son prácticamente redundantes, entonces el OIF calculado con imágenes sin aplicación de realce lineal parece ser el más adecuado.

VI.1.8.2. Generar las composiciones RGB con los mosaicos del estado de Puebla generados, de acuerdo al OIF partiendo de las de mayor contenido informativo.

En el apartado VI.1.3.2. se detalló para los conjuntos de datos de 2° X 1° el procedimiento, componentes y programas del software Geomatica para la generación de las composiciones RGB, que son exactamente los mismos que ahora se aplican pero para una cobertura geográfica mayor.

Cabe aclarar que en el presente trabajo se toma como norma el aplicar un realce lineal a las imágenes involucradas en una composición RGB. La comparación de los índices presentada en el apartado inmediato anterior, tuvo la finalidad de ratificar la validez de calcular el OIF con imágenes sin realce, determinando así las de mayor contenido informativo, y el mejoramiento visual de la composición a través de la aplicación de realces.

Ante esto, a continuación, en las figuras VI.39., VI.40. y VI.41., se presentan las principales imágenes resultantes:

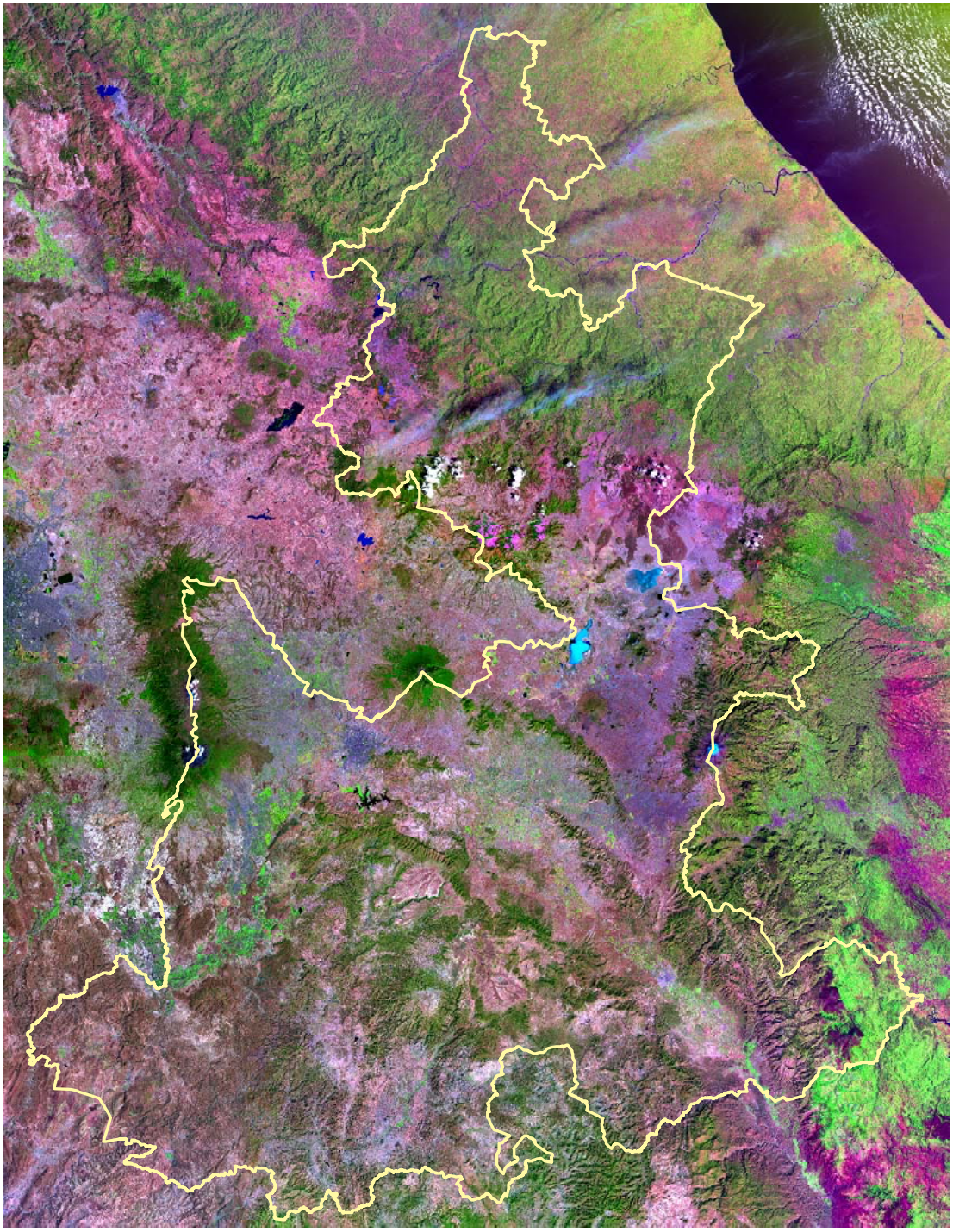


Figura VI.39. Composición RGB de las bandas 5, 4 y 3 del satélite Landsat ETM+. Fuente: INEGI.

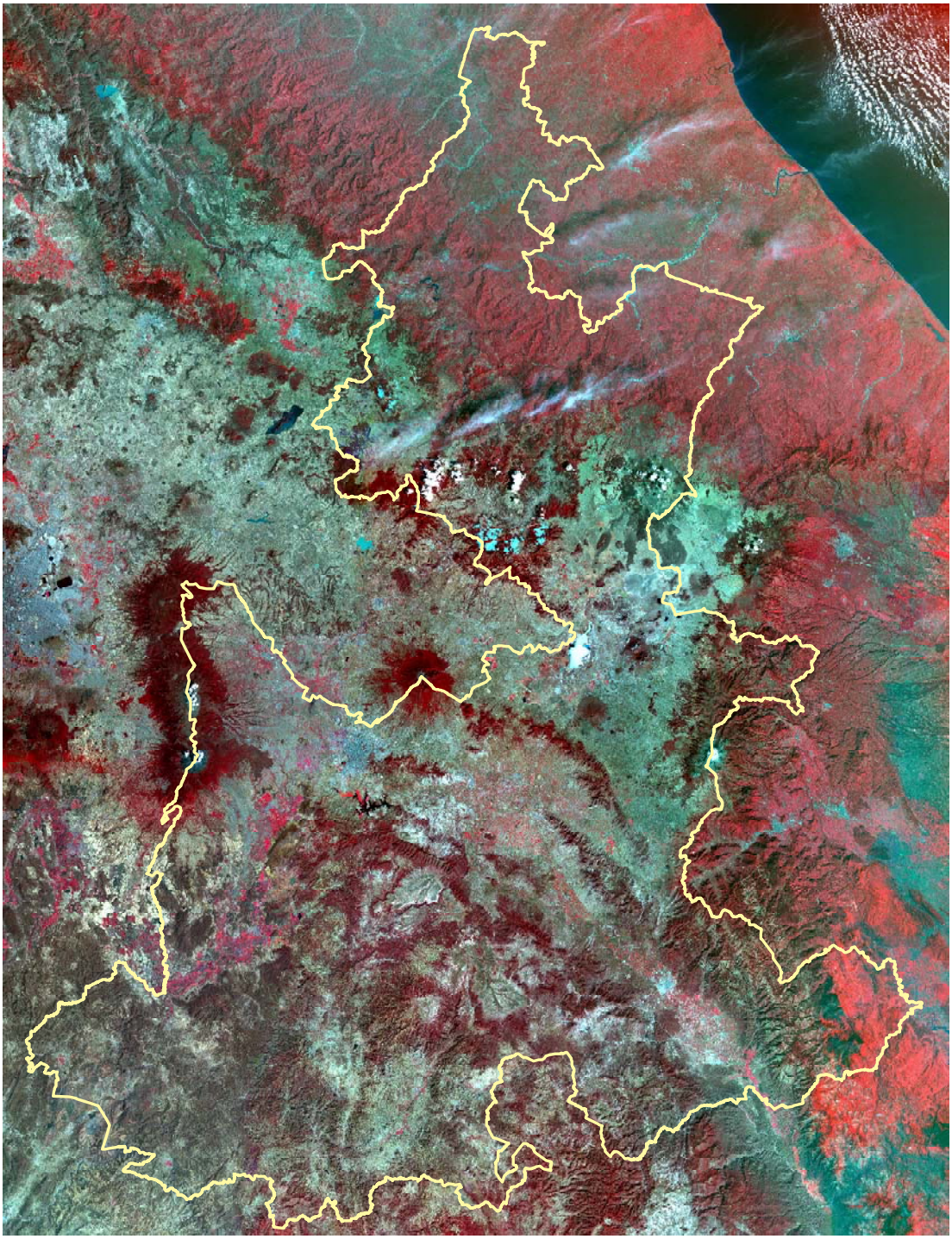


Figura VI.40. Composición RGB de las bandas 4, 3 y 2 del satélite Landsat ETM+. Fuente: INEGI.

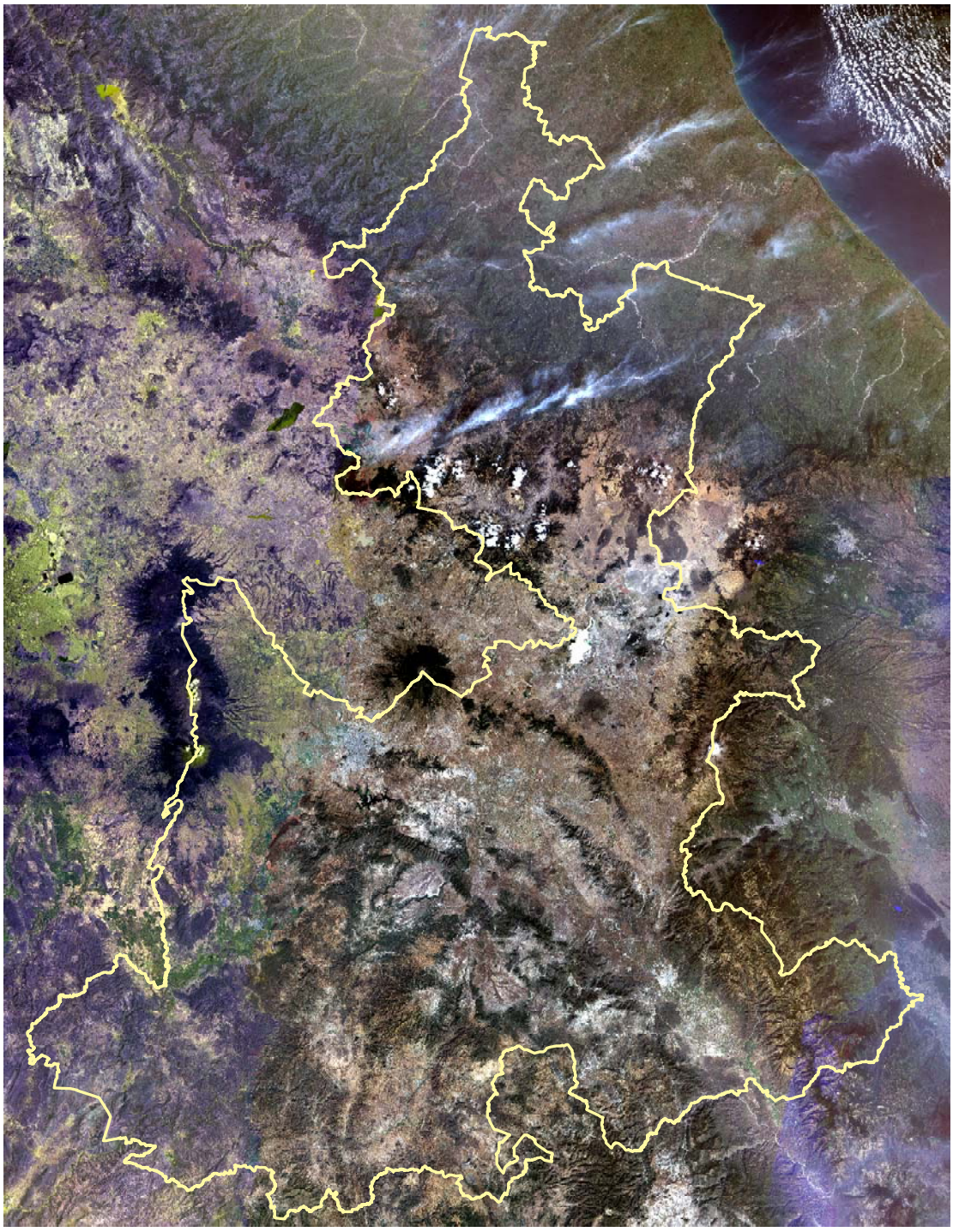


Figura VI.41. Composición RGB de las bandas 3, 2 y 1 (colores reales o naturales) del satélite Landsat ETM+. Fuente: INEGI.

En el apartado **IV.3.1.2**., del capítulo IV, se hizo mención sobre la asociación del color a la cubierta reflejada para la composición de la Figura VI.40. por ser la más difundida, con lo que es posible asociar esa descripción a cualquier otra composición.

Destaca en las imágenes anteriores el color presente en algunas partes del Golfo de México –verde en la Figura VI.39., rojo en la Figura VI.40. y verde olivo en la Figura VI.41– cuya respuesta espectral parece corresponder a vegetación, sin embargo, se trata del efecto de la dispersión Mie (ver Capítulo IV apartado IV.1.3.7.) debido probablemente partículas en suspensión por la pulverización del agua marina.

Por otra parte la composición de las bandas 3,2,1 –Figura VI.41.– presenta una notoria distorsión en colores en ciertas partes de la imagen, tendiendo al morado, verde lima y amarillo; situación que no se presenta al trabajar los conjuntos de datos de manera de individual (2° X 1°), como se aprecia en las figuras VI.32. y VI.33. De acuerdo al análisis realizado en el presente trabajo, posteriormente a su detección, se observó que esta característica se da en las combinaciones en donde interviene la banda 1 del mosaico del estado de Puebla, por lo que la explicación se encuentra en el balance de tonos realizado al mosaico estatal para esa banda. Es decir, dadas las características de todas las escenas involucradas en conjunto, el balance no ha sido lo suficientemente bueno, para esta banda, de tal manera que los niveles digitales mantengan el comportamiento del segmento del espectro al que están caracterizando; lo cual no ocurrió para los conjuntos de datos de 2° X 1° debido al menor número de escenas involucradas en un espacio geográfico mucho menor.

En el DVD adjunto al presente trabajo, se encuentran, a manera de ejemplo, imágenes ilustrativas en RGB (carpeta *JPGs_RGBmosaico ETM+*).

VI.2. Generación de imágenes compuestas en RGB con imágenes de satélite Landsat TM.

Resulta conveniente recordar que de estas imágenes no se cuenta para el presente trabajo con las escenas, sino con los conjuntos de datos de 2° X 1° ya conformados desde las Oficinas Centrales del INEGI. En general las imágenes son del año 1993 y sólo están disponibles las bandas 3, 4 y 5, en proyección cartográfica UTM y datum de referencia NAD27 con una resolución espacial de 25 metros.

El procedimiento para estas imágenes del Landsat TM es igual al correspondiente a las ETM+, excepto el cálculo del OIF al disponer solo de tres bandas –ver Capítulo V–, razón por la cual seguirlo paso a paso resulta redundante. Ante esto, sólo se presentarán algunos resultados a manera de ejemplos y en casos necesarios se harán los comentarios pertinentes.

La Figura VI.42. muestra el conjunto de datos E1406 de la imagen correspondiente a la banda 5.

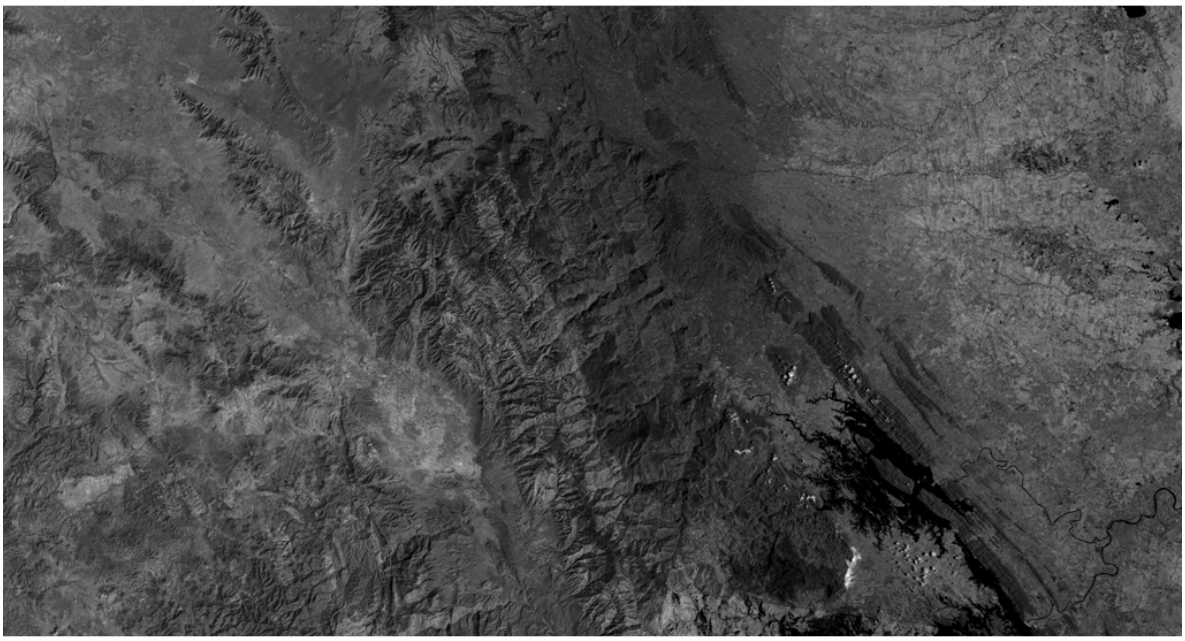


Figura VI.42. Imagen Landsat TM banda 5 para el conjunto de datos E1406. Fuente: INEGI.

En el caso particular del conjunto de datos E1406, se construye a partir de cuatro escenas: 2447, 2448, 2547 y 2548 cuyas fechas de obtención están en el periodo febrero-abril de 1993. La Figura VI.43. corresponde a la composición RGB de este conjunto de datos con las bandas disponibles (5, 4, y 3).

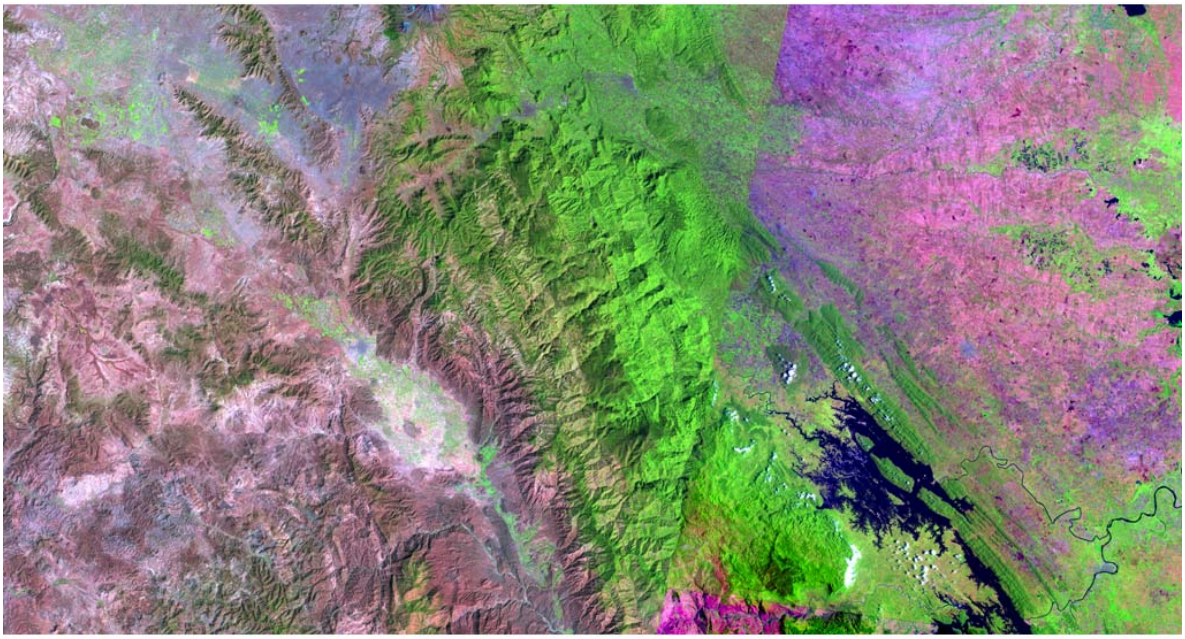


Figura VI.43. Composición RGB con imágenes Landsat TM para el conjunto de datos E1406. Fuente: INEGI.

Es conveniente presentar en este momento un comparativo visual de imágenes Landsat ETM+ año 2000 y TM 1993, mediante cortes del conjunto de datos E1406, los cuales se muestran en la Figura VI.44 a) y b).

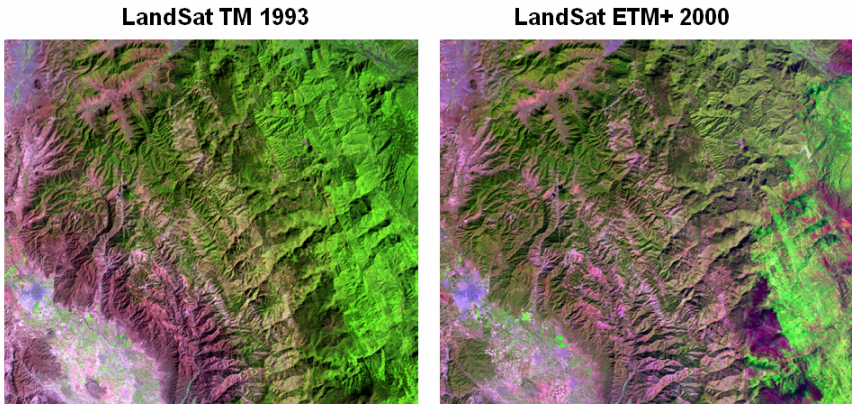


Figura VI.44 a). Comparativo imágenes Landsat TM y ETM+ Fuente:INEGI.

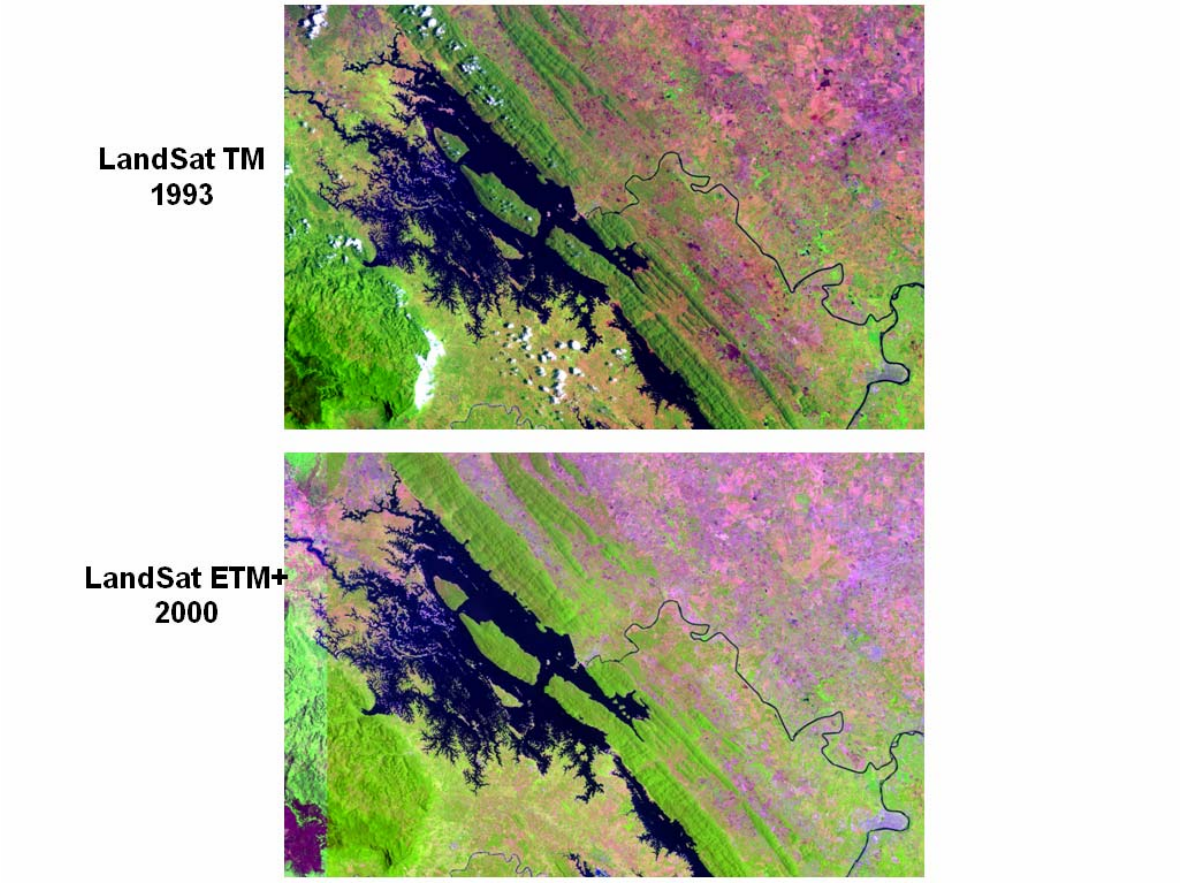


Figura VI.44 b). Comparativo imágenes Landsat TM y ETM+ Fuente:INEGI

Si bien el periodo de adquisición de las imágenes TM es febrero-abril del año 1993 –periodo seco–, el correspondiente a las ETM+ es diciembre del año 1999 –periodo aún húmedo en esta zona– para las escenas 2547 y 2548, y abril de 2000 –periodo seco– para las escenas 2447 y 2448; datos que deben ser tomados en cuenta al comparar las imágenes debido a las condiciones climáticas.
Los ochos conjuntos de datos son trabajados de la misma manera, tomando en cuenta que sólo se cuenta con tres bandas.

Como se estableció en el procedimiento debe conformarse el mosaico del estado de Puebla de acuerdo a la cobertura geográfica seleccionada. Al igual que los conjuntos de datos con imágenes ETM+, se realiza el mosaico con balance de tonos para cada banda, realizando finalmente el corte de acuerdo a las coordenadas extremas correspondientes (Figura VI.45).

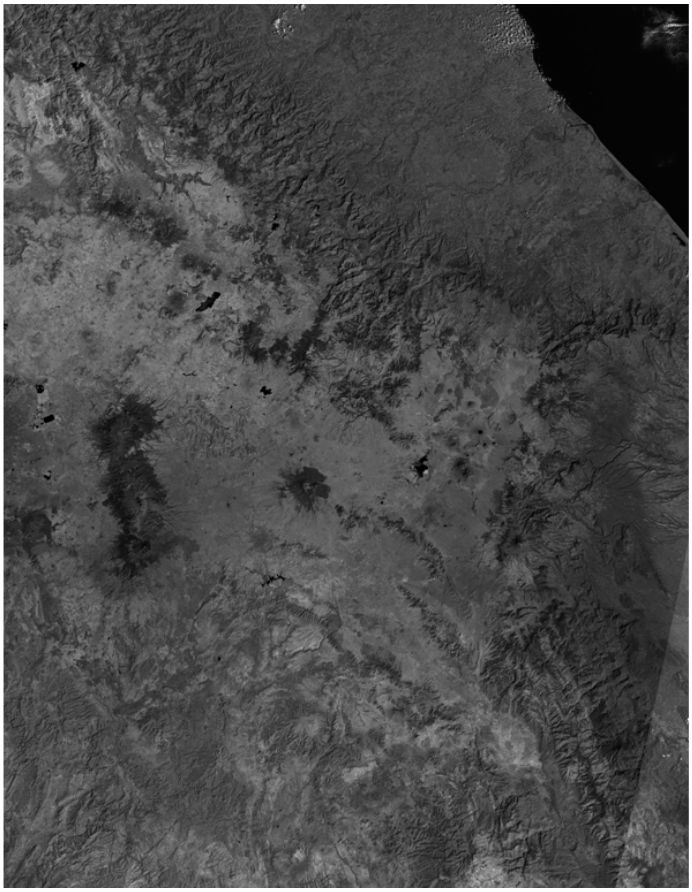


Figura VI.45 Mosaico para el estado de Puebla. Landsat TM 1993.
Fuente: INEGI.

Se observa en la parte sureste una región contrastante con el resto de la imagen. Esto debido a que los conjuntos de datos de esa zona fueron completados con segmentos de imágenes correspondientes al sensor MSS, situación que también se verá reflejada al generar la composición RGB.

Una vez obtenidos los mosaicos para las bandas 3, 4 y 5, se está en posibilidad de combinarlas para generar la composición RGB, que como se ha mencionado corresponde a la combinación en el orden 5, 4 y 3.
En la Figura VI.46. se presenta esta composición para la cobertura geográfica seleccionada para el estado de Puebla.

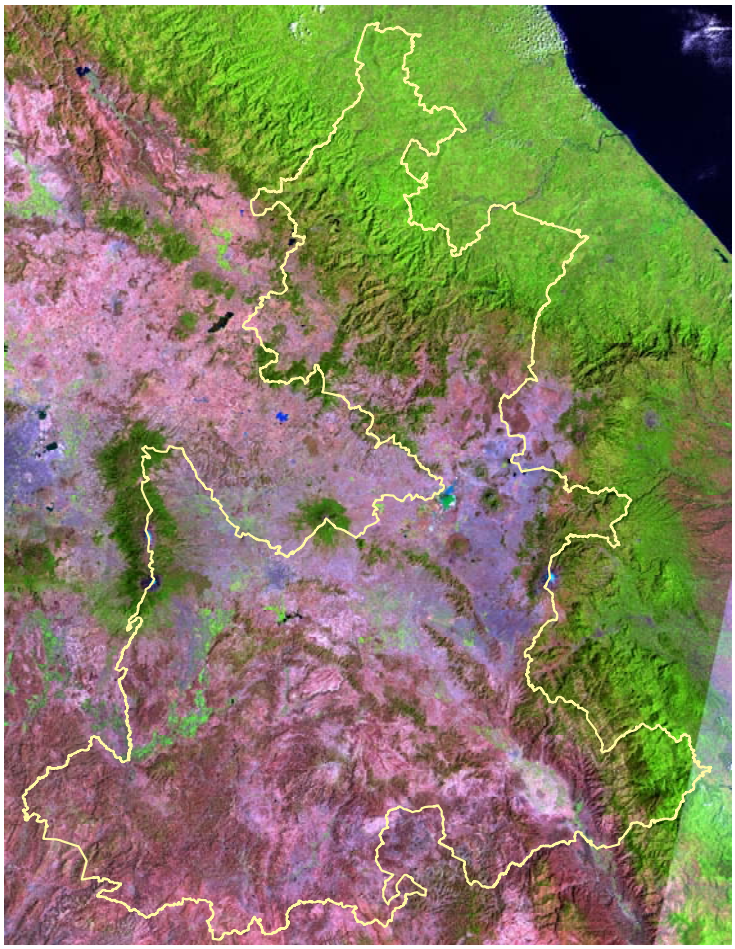


Figura VI.46. Composición RGB de las bandas 5, 4 y 3 del satélite Landsat TM. Fuente: INEGI.

Por otra parte, al igual que para el conjunto de datos E1406, también resulta útil presentar un comparativo de imágenes de los dos sensores –fechas diferentes– con la finalidad de ilustrar el aspecto de las regiones con una diferencia aproximada de siete años. Para esto, en el DVD adjunto al presente trabajo (carpeta *JPGs_TM vs ETM+*), se presentan cortes de la imagen estatal tanto de composiciones con imágenes TM como ETM+, de acuerdo a un índice gráfico (indice_ventanas_TM vs ETM.WMF) que también se encuentra en la misma carpeta. En el DVD adjunto se encuentran imágenes TM tratadas de acuerdo a los criterios aquí señalados.

VI.3. Algunos criterios generales sobre el color[87], para la interpretación de las composiciones RGB de imágenes Landsat.

Para el caso de la composición de las bandas 4, 3 y 2, quedó detallada la interpretación general de los colores en el Capítulo IV, apartado **IV.3.1.2**. como parte de las bases teóricas de la teledetección.

La composición de las bandas 3, 2 y 1 corresponde a la percepción más aproximada de lo que verían nuestros ojos desde el espacio, de ahí el nombre de color real o natural. Las bandas del espectro visible dan respuesta a la luz que ha penetrado más profundamente y por lo tanto sirven para discriminar el agua poco profunda y distinguir aguas turbias, corriente de agua y zonas con sedimentos. El azul oscuro indica aguas profundas mientras que el azul claro establece aguas de mediana profundidad. La vegetación se muestra en tonalidades de verde a negro y el suelo se presenta en marrones y tostados, particularmente el suelo arado en marrón oscuro. El suelo desnudo y la roca aparecen en tonos amarillentos y plateados. Las manchas urbanas se notan en tonos grises así como algunas carreteras y en general zonas edificadas.

La composición de las bandas 5, 4, y 3 con dos bandas en el espectro del infrarrojo muestra una mayor diferenciación entre el suelo y agua, la vegetación es mostrada en diversas tonalidades de verde que varían en función del tipo y de sus condiciones. El suelo expuesto aparece en tonos rosados y las manchas urbanas tendiendo al morado. El agua generalmente aparece en color negro.
Una variante de esta composición es colocar las mismas bandas pero asociadas de manera diferente a los colores básicos en la combinación (R=4, G=5, B=3), permitiendo una diferenciación de la vegetación en tonos marrones, verdes y

[87] "El Satélite Landsat. Análisis Visual de Imágenes obtenidas del sensor ETM+ Satélite LanSat." Ignacio Alonso Fernández-Coppel, Eliecer Herrero Llorente. Universidad de Valladolid, España; y http://www.ltid.inpe.br/selper/image/espanhol/ "Index of /selper/image/espanhol".

amarillos. Las áreas urbanas y suelos expuestos en tonos azules, mientras que las áreas inundadas y el agua aparecen en tonos azules oscuros.
De menos uso, la composición de las bandas 3, 4 y 1 ofrece en tonos verdes intensos la vegetación vigorosa; en tonos violetas zonas edificadas, en verdes a negros zonas arboladas intensas, en marrones claros terreno cultivado con cereal y en negros cuerpos de agua.

Existen otros criterios –además del color– para la interpretación de una composición RGB, mismos que de manera general fueron revisados en el Capítulo IV apartado **IV.3.1. Criterios Visuales Generales** y que entran en el campo de los especialistas en interpretación de acuerdo a sus distintas aplicaciones.

VI.4. Aplicaciones.

Como es de esperarse, el campo de aplicación gira en torno de estudios del territorio o en aquellos donde se busca espacializar información sociodemográfica y económica.
Como ejemplos de aplicación se presentan algunos casos:

Elaboración de espaciomapas.

El cuerpo de un espaciomapa contiene la vista, generalmente composiciones RGB en falso color, del territorio representado a partir del mosaico de imágenes de satélite, además de los nombres de las principales poblaciones y de algunos rasgos geográficos sobresalientes. Cuenta con marco, coordenadas geográficas y cuadrícula Universal Transversa de Mercator (UTM).
La información adicional o tira marginal, contiene los siguientes elementos:

- Nombre y clave
- Croquis de localización
- Escala gráfica
- Muestras de ayuda para interpretación

- Datos generales de las imágenes de satélite
- Especificaciones de elipsoide de referencia, tipo de proyección, *datum* horizontal y fechas de edición e impresión.

Responden a los requerimientos de cartografía de pronta respuesta. En la actualidad representan el producto operacional de mayor utilidad dentro del dominio de las aplicaciones de percepción remota. Permiten el acceso a información geográfica para la interpretación de cobertura de vegetación y uso del suelo, evaluación de erosión de suelos, análisis geológico y de estructuras regionales y otro tipo de trabajos relacionados con el monitoreo de recursos naturales. En este sentido los usuarios de información geográfica en el ámbito de los recursos naturales pueden disponer no solamente de imágenes de satélite sino de un mosaico de ellas en un formato cartográfico sistemático y en una presentación de color en la que destacan especialmente la vegetación, los suelos y los cuerpos de agua, así como cultivos de riego temporal, zonas urbanas, áreas incendiadas con humo y algunas nubes que con su sombra impiden observar los detalles de la superficie del terreno.
Por su escala uniforme, los espaciomapas se pueden usar como cualquier mapa, con el fin de hacer mediciones de longitud y área de objetos geográficos. Los espaciomapas representan el insumo más importante para los programas de actualización cartográfica en las escalas 1:250 000 y 1:1 000 000 del **INEGI**.

Determinación de zonas quemadas y su impacto ambiental.

Los incendios forestales son la causa de daños ambientales y económicos en una región. Debido a este gran problema se han realizado varios proyectos para conocer la magnitud del fenómeno y para estimar los daños producidos.
Para conocer la incidencia de los fuegos forestales y su distribución geográfica**,** es posible realizar cartografía de áreas quemadas en un periodo determinado a partir de imágenes Landsat compuestas bajo el criterio RGB de los sensores MSS, TM y ETM+. Para llevar a cabo esta tarea, es posible usar el método de diferencia

simple entre cada dos imágenes de fechas distintas, una anterior y otra posterior a los incendios, respectivamente, así como realizando una clasificación por alguna de las técnicas creadas ex profeso.

Estos estudios ponen en evidencia la gravedad del fenómeno en una región. Obtenida esta cartografía es posible llevar a cabo otros análisis en un Sistema de Información Geográfica como el de la vegetación afectada. En México el 80% de los incendios forestales son de origen antropogénico[88] y no natural.

Erosión de los suelos.

Como consecuencia de la destrucción de la cubierta vegetal debida a incendios forestales, deforestación o procesos naturales, se aceleran los procesos de erosión. El problema puede abordarse desde el punto de vista de la teledetección utilizado composiciones RGB de imágenes LanSat TM y ETM+ . A partir de éstas es posible cartografiar, para cada periodo de tiempo abordado en el estudio, el estado del suelo en una región, basándose en los cambios de reflectividad detectados en las imágenes. Con una serie temporal se pueden obtener las tendencias evolutivas de los estados erosivos.

Condiciones de la vegetación.

Mediante la interpretación de los colores en una combinación RGB de imágenes Landsat —principalmente en falso color— es posible determinar si una región forestal es saludable o no. Por ejemplo, en una composición de bandas 432, el color rojo intenso podría indicar que el crecimiento de la vegetación ha sido saludable, sin embargo, si se detecta un color oscuro en la zona forestal podría significar que su estado no es saludable.

[88] Romeo, 1998.

Deforestación.

Es conocido que el cambio del uso del suelo mediante la eliminación de grandes superficies de bosques o selva, constituye un importante evento que aporta al cambio global.
Las imágenes satelitales Landsat TM y ETM+ muestran su potencial aplicación como herramientas de control, en este caso para el cumplimiento de las normas legales que rigen la explotación de recursos forestales y habilitaciones de tierras. Por ejemplo, para la detección de las fajas de protección obligatorias por ley. En ambientes bajo estos tipos de utilización, las fajas de protección poseen un gran valor como refugio y corredores para la fauna autóctona.

Crecimiento urbano.

Tienen su utilidad en el estudio de la dinámica de crecimiento de emplazamientos urbanos, dirección, magnitud, etc. Estos fenómenos tienen, salvo raras excepciones, una frecuencia de cambio que se mide en varios años, por lo que es necesario obtener series de imágenes bastante espaciadas en el tiempo. Normalmente los productos se someten a un proceso de normalizado y extracción de las características principales a ser observadas —en este caso la superficie urbana o mancha urbana— para poder aplicar las herramientas de software que permitan realizar el análisis.

Seguros.

Para las compañías de seguros su aplicación se orienta a la valoración de daños agrícolas en cuanto a la estimación de superficies, el daño ambiental, planificación e impacto a la producción. Así mismo, en el análisis de peligros naturales y culturales, en el contexto de la valoración de daños, reducción de riesgos y cartografía preventiva. Destacan también los análisis de áreas inundables, proyección de escorrentías y la cartografía de cuerpos de agua.

El potencial de uso de las imágenes es basto y por lo mismo es complicado tratar de abarcar de manera pormenorizada sus aplicaciones. Resulta entonces conveniente presentar de manera general algunos usos con base al área de estudio, como se muestra en la Tabla VI.5.

Agricultura	Predicción de cosechas
	Evaluación de uso
	Degradación y erosión
	Mapas de suelo
Forestal	Identificación y cuantificación
	Planificación y exploraciones
	Tiempos de llegada en prevención de incendios
Uso de la tierra	Estudios demográficos
	Urbanización e industrialización
	Vías de comunicación
	Capacidad de uso de la tierra.
	Detección de cambios de uso
Hidrología	Identificación de recursos
	Inundaciones
Geología	Estudios estructurales
	Caracterización litológica
	Impacto ambiental en petróleo y minería
Medio ambiente	Contaminación
	Optimización de recursos
	Catástrofes naturales
	Desertificación

Tabla VI.5. Algunos usos de la imágenes de satélite Landsat.

VI.5. La Teledetección en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Los SIG y la teledetección surgen de inicio como tecnologías independientes. No obstante, uno de los objetivos del primer SIG, el Sistema de Información Geográfica de Canadá (CSIG) desarrollado por Roger Tomlinson en los sesenta[89], fue el almacenamiento y procesado de fotografía aérea.

Como se estableció en el Capítulo I, los SIG –desde la acepción de software– son programas que facilitan, de forma modular e integrada, las herramientas para el almacenamiento, gestión, análisis y representación gráfica de datos con una componente espacial, entonces estamos hablando de datos referenciados geográficamente.

En lo que respecta a la teledetección, se concibió inicialmente como una herramienta para la obtención de información medioambiental, sin un interés claro por su integración con otras capas de información, debido posiblemente a las deficiencias técnicas de la época.

Ya en la década de los 70´s, cuando se difunden las primeras imágenes de los satélites Landsat, se esbozan los primeros intentos por integrar información cartográfica con imágenes de satélite. El aumento de resolución permite por una parte una mayor capacidad de discriminación de objetos y clases. En los años 80 se empieza a considerar a la teledetección como una fuente de información para un SIG, especialmente útil para su evolución. Ya no sería necesario hacer supervisiones de campo intensivas para determinar el estado de la vegetación sino que bastaría con procesar una serie de imágenes, mediante el uso de algunas herramientas del SIG.

Esta convergencia de SIG y teledetección se ha visto favorecida por su desarrollo en el mismo tipo de entornos de trabajo y por similares requerimientos en cuanto a hardware y software. Ambos tratan con información espacial con referencia

[89] Ver Capítulo I.

geográfica, de la que se busca extraer conclusiones relevantes desde un punto de vista medioambiental o de planificación.

Como se ha visto, en teledetección el sensor explora la superficie terrestre a intervalos regulares y almacena, para cada uno de estos intervalos espaciales, un número que es función de la radiación recibida y cuyos valores están comprendidos en un intervalo bien definido, este número es el Nivel Digital (ND). De este modo una imagen de satélite es una matriz de niveles digitales en la que la fila y columna de cada ND indica su posición en el espacio.

En realidad existe una matriz por cada una de las bandas del satélite correspondiendo cada ND de cada banda (definido por un valor de fila y columna) a la misma localización en el espacio. Entonces, el elemento diferenciador no es por tanto entre SIG y teledetección sino entre SIG raster y vectorial cuando se trabaja en teledetección. En realidad la base conceptual de los SIG raster —el álgebra de mapas— es también la base conceptual de muchas de las operaciones de teledetección. Los cálculos de variables a partir de los ND de la imagen, gran parte de los procedimientos de corrección y la asignación de píxeles a clases se basan en operadores locales aritméticos o lógicos —presentes en un SIG—, mientras que los filtros se basan en operadores de vecindad —también presentes en un SIG—.

Aspectos específicos como la referencia geográfica o determinados tipos de análisis estadístico —análisis de componentes principales, regresiones lineales, entre otros—, o las herramientas de generación de clases, requieren módulos de análisis estadístico más complejos que los que serían a priori necesarios para un SIG. Sin embargo, la programación de estos módulos sí tiene mucho en común con la programación de módulos convencionales de SIG, por tanto la norma ha sido que programas de SIG con capacidades ampliadas —como los utilizados en la implementación en el presente trabajo— hayan sustituido a los antiguos programas exclusivamente para teledetección que solían ir asociados a hardware específico.

Entre los módulos incorporados dentro de los SIG, útiles para el tratamiento de imágenes de satélite cabe destacar:

- Módulos para la gestión de capas de información que permiten copiar, borrar o renombrar capas de información. Generalmente en un SIG una capa de información está formada por más de un archivo con lo que no basta con los programas para manejo de archivos del sistema operativo. Se requieren módulos que actúen sobre todos los archivos que forman una sola capa.
- Programas de visualización que permitan transformar los valores de ND —o variables elaboradas a partir de ellos— en colores para su representación en un monitor. Los criterios para llevar a cabo esta transformación —paleta de colores— deben poder ser modificados por el usuario. Por otra parte, dado que las capas raster que resultan de imágenes de satélite son de gran tamaño, son necesarias herramientas que permitan hacer acercamientos y desplazarse por la imagen.
- Cálculo de estadísticos. Uno de los primeros pasos en el análisis de una imagen de satélite es el análisis de su histograma y el cálculo de estadísticos básicos, sin embargo, son necesarios análisis estadísticos más sofisticados como el análisis de componentes principales o las técnicas de clasificación.
- Módulos de álgebra de mapas que van a facilitar muchos de los procedimientos de combinación de capas o de procesamiento de una misma imagen.

Finalmente, es importante decir que el universo de aplicaciones con el uso de las imágenes de satélite depende fundamentalmente de las herramientas de análisis espacial integradas en los Sistemas de Información Geográfica.

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO.

En el presente trabajo se ha mostrado que la teledetección no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o el espacio, sino también su posterior tratamiento en el contexto de una determinada aplicación. Se ha evidenciado que el análisis de imágenes de satélite se resume en dos fases, un análisis visual y un análisis digital (que incluye al análisis estadístico). El primero es similar en muchos aspectos a la fotointerpretación clásica con las ventajas que aporta la fotografía digital en cuanto a las posibilidades de "retocar" y realzar las imágenes. Sin embargo, una imagen de satélite presenta un aspecto bastante apagado, por lo que el análisis visual no resulta sencillo; ante esto, en teledetección se han desarrollado diferentes técnicas que permiten resaltar determinados aspectos para facilitar ese análisis.

Se ha puesto de manifiesto que el espectro electromagnético abarca un amplio número de regiones y que el ojo humano tiene cierta capacidad de discriminación de colores, siendo posible conformar prácticamente cualquier color mediante tres componentes (azul, verde y rojo) que corresponden a tres regiones del espectro visible. Entonces, una imagen de satélite (escena) tiene varias bandas, algunas de ellas responden a los colores básicos y otras a regiones fuera del espectro visible. Puesto que la imagen de cada banda representa niveles de intensidad de un color puede utilizarse también un monitor de computadora para representar la intensidad de cada banda y obtener así una composición de color, la más obvia sería simular el color real, pero como se dispone de más bandas, nada impide utilizarlas para generar visualizaciones en **falso color** utilizando las características físicas del sistema aditivo de colores. Estas composiciones servirán para resaltar los elementos que mayor reflectividad presentan en las bandas utilizadas, además de obtener visualizaciones más o menos "estéticas". En general, se trata de aprovechar la posibilidad de visualizar tres bandas a la vez para introducir aquellas que más van a ayudar a discriminar visualmente los elementos de interés. Ya que una imagen en falso

color es una representación artificial de una imagen multiespectral, entonces en algunas aplicaciones de teledetección, puede ser útil asociar las clases de cobertura del suelo con colores familiares al cerebro humano, por ejemplo, la vegetación con el verde. En otros casos, se prefieren los colores contrastados para resaltar objetos de interés en el fondo. Entonces, el color de las distintas cubiertas depende de las bandas seleccionadas para la combinación, dado que cada cubierta de suelo posee sus propias características espectrales, por lo que distintas combinaciones producen representaciones diferentes de la misma cubierta.

Ante esto, es posible afirmar que en la interpretación de las composiciones RGB deben tenerse presente la caracterización espectral de las principales cubiertas del paisaje, así como las interacciones de la atmósfera con la radiación electromagnética, además de la fecha y hora de captación de los datos. Una imagen de satélite compuesta en RGB puede entonces definirse como una selección de la realidad sensorial, como una representación icónica de estructuras y elementos y que cuentan con una sintaxis visual. Todo esto nos permite definir un modelo reducido de la realidad, sin embargo, la generación de estos modelos implica, en primera instancia el conocimiento básico de aspectos en cartografía, de la física de la teledetección, así como de los fundamentales en el tratamiento digital de las imágenes de satélite y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En el presente trabajo de tesis, también se muestra que los SIG desde su acepción de software, han evolucionado para adaptarse a los requerimientos del tratamiento digital de las imágenes derivadas de la percepción remota, y si consideramos que los procesos de planeación requieren cada vez más de información actualizada y disponible en sistemas de información que apoyen la gestión, entonces la relación SIG-Teledetección resulta ideal para los gobiernos, instituciones académicas y de investigación, así como para una sociedad cada vez más demandante de información; ya que con esta asociación es posible contar con gran capacidad de integración de información espacial y de otro tipo dentro de un solo sistema, esto es, ofrece una consistente estructura para la

generación y el análisis de los datos geográficos; se cuenta con un potencial de herramientas de análisis espacial orientadas al tratamiento de datos raster, contando con gran capacidad para manejar datos geográficos y de otro tipo en forma digital. Por lo que no existe un elemento diferenciador entre SIG y teledetección sino entre SIG raster y SIG vectorial cuando se trabaja en teledetección.

Técnicamente, la implementación de los procesos propuestos para la generación de imágenes compuestas RGB de la serie Landsat, deja las siguientes conclusiones:

- En procesos estadísticos se debe cuidar el no considerar valores del área no útil de una escena, cuyo ND generalmente es cero, ya que de hacerlo los resultados no serán los exactos.
- Para los valores de la desviación estándar observados y considerados como buenos en la determinación de una mayor variabilidad de los datos, no tienden a un valor específico o límite al cual aspirar, sino simplemente se consideran los más altos.
- Una desviación estándar alta no necesariamente significa buena visualización de la imagen, entran en juego otros factores como las condiciones climáticas al momento en que el sensor captó los datos, las características de las cubiertas de la región, los procesos previos de correcciones a la imagen, entre otros.
- El balance de tonos en las imágenes generadas a través de mosaicos, resulta útil y hasta necesario para presentar imágenes visualmente homogéneas.
- Las mismas operaciones realizadas en los procedimientos establecidos en el presente trabajo, se pueden llevar a cabo sin balance de tonos, conservando así la resolución radiométrica de las escenas originales, lo que naturalmente llevará a tener mosaicos heterogéneos visualmente, es decir, habrá contrastes diferentes en cada segmento de imagen que conforma el mosaico, así mismo, serán muy notorias las líneas de unión

entre dichos segmentos de imagen, sin embargo, se garantiza una correcta conformación de colores en todas las composiciones. En el presente trabajo, para el mosaico del estado de Puebla con imágenes LandSat ETM+ se nota una distorsión de colores en la composición de las bandas 321 debida a que el balance de tonos de los mosaicos previos no mantuvo el comportamiento del segmento del espectro al que están caracterizando.

- Por lo tanto, la resolución radiométrica de las imágenes procesadas en el presente trabajo, no es la original de las escenas toda vez en que en cada mosaico, ya sea para conformar los conjuntos de datos de 2° X 1° ó para generar el mosaico estatal, se realizó un balance de tonos. Sin embargo, de acuerdo a lo observado sí es conveniente el balance ya que en general los resultados no presentan diferencias importantes. Sin embargo, el balance de tonos no garantiza al 100% que en una composición RGB se presenten los niveles digitales más apropiados para su visualización, como se observó en la composición de las bandas 321 del mosaico del estado de Puebla con imágenes LandSat ETM+.
- De la misma manera esto implicó que el índice óptimo (OIF) utilizado para determinar las mejores composiciones, no se calculara con los niveles digitales originales ya que las imágenes tienen balance de tonos, pero este balance se hizo entre segmentos de imagen correspondientes a la misma banda de fechas muy cercanas entre sí, por lo que de acuerdo a la observado, se mantiene el comportamiento del segmento del espectro al que están caracterizando. El OIF calculado con y sin balance no es sustancialmente diferente por lo que resulta conveniente aplicar el balance por los beneficios a la imagen.
- El OIF puede ser utilizado en cualquier tipo de imágenes satelitales ya que involucra la variabilidad interna de cada imagen y su correlación entre cada par de imágenes de tres para generar una composición RGB.
- El OIF calculado en las bandas de conjuntos de datos individuales varía respecto al calculado para las mismas bandas en la cobertura total del

estado de Puebla debido a que las estadísticas de los archivos evidentemente varían al tener una mayor cobertura geográfica en la que hay mayor variabilidad de cubiertas y de condiciones en la captación de la imagen. No obstante, el resultado del cálculo del índice en ambos casos, no hace variar de manera importante cual es la mejor o la peor composición RGB, de acuerdo a su riqueza informativa (riqueza de colores).

- Se observa que una vez calculado el OIF y determinado las mejores combinaciones estadísticamente, aún es necesario aplicar un realce a cada banda involucrada en la combinación, con la finalidad de realmente enriquecer visualmente la imagen RGB resultante. Entonces, es oportuno preguntarse ¿no es mejor aplicar primero el realce a cada banda y después calcular el OIF? Desde el punto de vista de quien presenta este trabajo y de acuerdo a los comparativos realizados, resulta más exacto hacerlo con imágenes cuyos niveles digitales hayan tenido la menor alteración y mantengan el comportamiento del segmento del espectro al que están caracterizando. Por lo que el realce es una mejora visual a la composición RGB.
- El OIF ofrece información respecto de las tres bandas que combinadas representan la mayor riqueza informativa, no el orden en que deben combinarse. Para esto último se requiere un análisis más detallado que debe considerar aspectos como las condiciones climáticas específicas de la región de estudio, las características espectrales de las bandas a combinar, las características geográficas de la región de estudio, entre otras; aspectos que rebasan el objetivo del presente trabajo.
- Estadísticamente la combinación 432 no es la de mayor contenido informativo, siendo de las más utilizadas no sólo en nuestro país. Esta situación puede deberse principalmente a una herencia en las composiciones de imágenes del sensor MSS cuyas características técnicas permitían sin ningún problema esta composición. Al respecto, estadísticamente la mejor combinación resultó ser la 543.

- Existen combinaciones como 543, 541 y 542 que son muy parecidas, por lo que se pueden considerar como información redundante; ante esto, debe reconsiderarse el experimentar con más de una composición si el objeto de estudio ya está definido.
- Para generar una composición es indispensable identificar el uso que se le dará, así como las características de cada banda y las características geográficas de la región de estudio.
- Los espaciomapas generados por el INEGI se encuentran disponibles en medios analógicos, es decir, de manera impresa; por lo que el presente trabajo también es útil para guiar en la creación de éstos considerando que actualmente las imágenes pueden ser descargadas de manera gratuita en varios sitios de la Internet.
- Para análisis multitemporal se hace indispensable contar con imágenes captadas en periodos iguales, dependiendo del tipo de información que se desea analizar. Por ejemplo abril de 1993 y abril de 2000, de otra manera las condiciones climáticas diferentes hacen difícil el comparativo.
- Aunque podría resultar de poca relevancia, en opinión de quien presenta el presente trabajo, se hace necesario estandarizar los nombres de los archivos de las imágenes, tanto las originales como las que se generan en cada parte de los procedimientos. Esto con la finalidad de mantener un orden y una identificación de cada archivo.

Como consecuencia de este trabajo de tesis, al proponer un documento teórico-práctico en materia del tratamiento digital de imágenes de satélite LandSat, para finalmente generar composiciones RGB, existe una aportación para que a través de un proceso analítico, el usuario pueda establecer las posibles operaciones que puede desarrollar sobre la imagen de satélite para poder obtener la mejor interpretación de ella. Así mismo, quien se inicia en la materia puede contar con elementos fundamentales para desarrollar competencias en el manejo de información espacial.

De esta manera, la implementación de los procedimientos aquí propuestos en proyectos dentro de la Dirección de Geografía de la Dirección Regional Oriente (DRO) del INEGI, han tenido consecuencias favorables, encontrando en primera instancia que es posible hablar de un procedimiento estandarizado que garantiza que más de una persona, con los conocimientos mínimos necesarios, lo pueda realizar ofreciendo la misma calidad del producto en los tiempos esperados. En consecuencia, la oportunidad y calidad de esta información ha contribuido en la mejora del servicio brindado a los usuarios internos y/o externos al instituto (en el contexto de la Dirección de Geografía de la DRO).

Por otra parte, el presente trabajo de tesis ofrece un procedimiento útil y específico en proyectos institucionales (en el contexto de la Dirección de Geografía de la DRO) que pudieran derivarse del Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 del Ejecutivo Federal, principalmente en lo que se refiere a "Sustentabilidad ambiental".

Como continuación de esta tesis será útil investigar un procedimiento que defina la mejor composición RGB de las bandas satelitales, más allá del análisis estadístico; es decir, aquellos criterios de los especialistas en el medio natural, fotointérpretes e intérpretes de imágenes de satélite. Así mismo, extrapolar el procedimiento a imágenes multiespectrales provenientes de otros sensores. De la misma manera, profundizar en las relaciones existentes entre los procedimientos aquí propuestos y otros tipos de análisis como el "elipsoide de máxima variación" y el "valor de divergencia" para la selección de la mejor composición RGB.

Si bien, salta a la luz la utilidad de las imágenes satelitales compuestas bajo el criterio RGB, su estudio puede encontrar continuidad en su mejora a través del análisis e implementación de métodos de corrección topográfica que permitan "eliminar" las sombras derivadas de la topografía del terreno y del ángulo de elevación del sensor al momento de captar la imagen. Así también de su aplicación conjunta con modelos digitales de elevación con vistas en tres dimensiones y productos que se puedan derivar.

De manera complementaria, este trabajo podrá establecer la iniciación de una estandarización completa de los procedimientos acá propuestos, analizando detalladamente los tiempos para el desarrollo de los mismos, así como la generación de indicadores en la producción de las imágenes compuestas en RGB, lo que llevará a conocer el costo-beneficio en diferentes aplicaciones.

Toda vez que la implementación descrita en el presente trabajo ya está siendo llevada a cabo en la Dirección de Geografía de la Dirección Regional Oriente del INEGI, con resultados aceptables, se hace necesaria su divulgación para contribuir con la cultura geomática.

En aspectos académicos y con el fin de profundizar mediante la aplicación práctica sobre los conceptos aquí expresados, es posible su implementación en un laboratorio de computación con una inversión mínima, toda vez que muchas imágenes están disponibles de manera gratuita en Internet, el hardware actual ofrece el potencial requerido y existen versiones académicas de software robusto a bajo costo. De esta manera es posible desarrollar cierta habilidad en la comprensión y aplicación de algoritmos orientados al procesamiento digital de imágenes provenientes de los sensores remotos, así como su utilización práctica en diversos proyectos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y WEB

Sistemas de Información Geográfica.

AESIG (1996), *Anuario Geográfico 96*, AESIG, Madrid.

Arévalo, J. (1993), *Pasado y presente de la información geográfica*, Catastro, octubre 1993, pp.15-21.

Aronoff S., (1989), *Geographic Information Systems: A Management Perspective*. Ottawa: WDL Publications (Capítulos 1 y 2)

Baena Preysler, J.; Blasco Bosque; Quesada Sanz, F. (coord.), (1997), *Los SIG y el análisis espacial en arqueología*. Universidad Autónoma de Madrid. Servicio de Publicaciones.

Barredo Cano, José Ignacio, (1994), *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio*, Ra-Ma Editorial.

Bosque Sendra J., (1997), *Sistemas de información Geográfica*. Madrid: Ediciones Rialp, S.A., 2ª edición.

Burrough, P.A., *Principies of geographical information system for land resourses assesment*. Clarendon Press, Oxford, EUA., 1987

Calvo M., (1993), *Sistemas de información geográfica digitales: sistemas geomáticos*. Vitoria-Gasteiz: IVAP, Ediciones EUSKOIKER.

Cebrián de Miguel, Juan Antonio, (1992), *Información geográfica y sistemas de información geográfica*, Universidad de Cantabria. Servicio de Publicaciones.

Chorley R., (1988), S*ome Reflections on the Handling of Geographical Information*, International Journal GIS, 2 (1), 3-9.

Chrisman N., (1997). *Exploring Geographic Information Systems*. John Wiley and Sons.

Comas D. y Ruiz E., (1993), *Fundamentos de los sistemas de información geográfica*. Barcelona: ARIEL.

Coppock T., (1988), *The Analogue to Digital Revolution: A view from an unreconstructed geographer*, American Cartographer, 15 (3), 47-57.

Dale P.F. y McLaughlin J.D., (1988), L*and information management. An introduction with special reference to cadastral problems in third world countrie*s. Clarendon Press: Oxford (especialmente capítulo 5).

DeMers M.N., (1997). *Fundamentals of Geographic Information Systems*. John Wiley and Sons.

Departament of the Environment, (1987), H*andling Geographic Information. Report of the Committee of Enquiry chaired by Lord Chorley*. HMSO, London. (Capítulo 6, 7 y 8).

Environmental System Research Institute (ESRI), INC. *Understanding GIS:* The ARC/INFO Method, ESRI, EUA., 1990.

Escolano, S. Reques, P. (1997): *Los SIGs en la administración local española: los ayuntamientos urbanos. Implantación territorial, desarrollo y limitaciones*, Lurralde, 20, pp. 105-133.

Felicísimo Pérez, Angel Manuel, (1994), *Modelos digitales del terreno: principios y aplicaciones en las ciencias ambientales*, Pentalfa Ediciones.

Gavira, Carmen, (1994), *Sistemas de información geográfica (GIS): sus aplicaciones en redes*, Autor-editor de obra propia.

Goodchild M.F.Pascoe R.T. y Penny J.R., (1990), Construction of interfaces for the exchange of geographic data. *International Journal of Geographical Information Systems,* 4 (2), 147-56.

Gould, Michael, coord., (1994), *El uso de los sistemas de información geográfica: aplicaciones con Arc/Info*, ESRI España Geosistemas, S.A.

Green D.R., Rix D. Cadoux-Hudson J., (eds.) (1993), *Geographic Information 1994: The Sourcebook for GIS*. Taylor and Francis.

Grimshaw D.J., (1994), *Bringing Geographical Information Systems into Busines*. Longman.

Guimet, Jordi, (1992), *Introducción conceptual a los sistemas de información geográfica*, Estudio Gráfico Madrid, S.L.

Gutiérrez J. y Gould M., (1994), *SIG: Sistemas de información geográfica*. Madrid: Editorial Síntesis.

Harding S.M. y Wilkinson G.G., (eds.) (1997), *A strategic view of GIS research and tecnology development for Europe*. EUR 17313 EN. European Commission.

Heywood I., (1994), *Mountain environments and geographic information systems*. Taylor & Francis, London.

Heywood I., (1997), *Beyond Chorley, Association for Geographic Information*, London.

Huxhold W.E. (1991), *An Introduction to Urban Geographic Information Systems*. Oxfrod University Press.

Laurini R. y Thompson D., (1992), *Fundamentals of Spatial Information Systems*. Academic Press.

Maguire D.J., Goodchild M.F. y Rhind D.W. (eds.) (1991), *Geographical Information Systems: Principles and Applications (*2 volúmenes), Longman.

Maguire D.J., Raper J.F., (1990), *Design Models and Functionality in GIS, Proceedings of the GIS Design Models and Functionality Conference*. Midlands Research Laboratoy, Leicester, 10pp.

Maurer, A.B., *Geographical Population Analysis: tools for the analysis of biodiversity,* Blackwell Scientific Publications, EUA, 1994.

Marble D.F., (1984), *Geographic Information Systems: an overview*. In peuquet D.J. and Marble F.J., (eds.), *Introductory Reading in Geographical Information Systems*. London: Taylor & Francis, 8.17 pp.

Moldes F.J., (1995), *Tecnología de los Sistemas de información geográfica*. Madrid: Ra-ma.

National Research Council, (1997), *The future of spatial data and society*. National Academy Press.

Openshaw S., (1990), Spatial referencing for the user in the 1990s. *Mapping Awareness*, 4(3), 24-29.

Otero I., (1995), *Diccionario de Cartografía, Topografía, Fotogrametría, Teledetección, GPS, GIS, MDT*. Madrid: Ediciones Ciencias Sociales.

Palacio, J.L., *Introducción a los Sistemas de Información Geográfica*. Instituto de Geografía, UNAM. México, 1992.

Raper J., Rhind D. y Shepherd J., (1992), *Postcodes: the New Geography*. Longman.

Rhind D. y Mounsey H., (1988), The Chorley Commitee and "Handling Geographic Information".

Rhind D., (1987), Artificial Intelligence and GIS. *Mapping Awareness*, 5(9), 42-45.

Sawyer, J.S., *Geographical output from computers and the production of numerically forecast or analysed synoptic charts, Meteorological Magazine*, 1960, Vol. 89.

Star J. y Estes J., (1990), *Geographic Information Systems: An Introduction*. Prentice Hall.

Tivy, J. Biogeography: *a study of plants in the ecosphere,* Longman Scientific y Technical Publishers, EUA, 1993.

Toledo, V.M, "La diversidad biológica de México" *en Ciencia y Desarrollo*, Num. 81, año XIV, 1988.

Tomlinson R.F., (1987), Current and Potencial Uses of Geographical Information Systems: The North American Experience. *International Journal Geographical Information Systems*, 1(3), 203-218.

Sistemas de Información Geográfica
http://mx.geocities.com/migucubi/Informatica3_4.pdf

GIS + Información Geográfica
http://recursos.gabrielortiz.com/

Boletín de los Sistemas Nacionales Estadístico y de Información Geográfica.
http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/especiales/BoletinSNEIG/2005/bolsneig1.pdf

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
http://www.inegi.gob.mx

Sistemas de Información Geográfica. Monografías
http://www.monografias.com/trabajos/gis/gis.shtml#_Toc450533801

Ley de Información Estadística y Geográfica (LIEG)
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/41.pdf

Reglamento de la Ley de Información Estadística y Geográfica (LIEG)
http://www.economia.gob.mx/pics/p/p1376/R3.pdf

Centro de supercomputación de Galicia. España.
http://www.cesga.es/component/option,com_frontpage/Itemid,1/lang,es/

IRIS 4
http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/prodyserv/iris3/seccion/introduccion.cfm?c=698

GIS
http://campus.fortunecity.com/defiant/114/gis.htm

Mercator.org
http://www.mercator.org/?dl=1

Association for Geographic Information
http://www.agi.org.uk/

Los Sistemas de Información Geográfica
http://www.cica.es/aliens/geo/gibraltar/articulo/introducci.pdf

Sistemas de Información Geográfica
http://www.cica.es/aliens/geo/gibraltar/articulo/11_sistemas_de_informacion_geografica.pdf

Revista Digital Universitaria.
http://www.revista.unam.mx/vol.0/art3/introdu.html

Cartografía.

ACI-ICA (Asociación Cartográfica Internacional-International Cartographic Association) (1989): *Cartografía Básica*, vol. I, INEGI-SPP, México.

Béguin, M. y Pumain, D. (1994): *La Représentation des Données Géographiques*, Armand Colin, Paris.

Cartwrigt, W. et al (1999): *Multimedia Cartography*. Springer-Verlag. Germany.

Fernández-Coppel, Ignacio A., *La proyección UTM*, Universidad de Valladolid, España.

Fernández-Coppel, Ignacio A., *El Datum*, Universidad de Valladolid, España.

Fernández-Coppel, Ignacio A., *Las Coordenadas Geográficas*, Universidad de Valladolid, España.

Gómez Moreno, Raúl Ángel (2004), *Guía de Proyecciones Cartográficas*, INEGI.
H. Kern. *Scanvectorisation, Classification and Pattern Recognition as a Mean for Transforming Analogue Map into GIS*. Ed. 17th. International Cartogr. Conference and 10th. General Assembly ICA. Spain: 1995.

Hinks, A. R. *Map Projections, 2nd rev. ed.* Cambridge, England: Cambridge University Press, 1921.

Kraak, M. and Ormeling, F. (1996): *Cartography. Visualisation on Spatial Data*, Longman, London.

Lee, L. P. "The Nomenclature and Classification of Map Projections." *Empire Survey Review* **7**, 190-200, 1944.

Lowell. *Manipulating Uncertainty-based Digital Maps to Perfom like Polygon-based Thematic Maps*. Ed. 17th. International Cartogr. Conference and 10th. General Assembly ICA. Spain: 1995.

Maling, D. H. *Coordinate Systems and Map Projections, 2nd ed, rev.* Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 1993.

O. Pogrebnyak, V. Ponomarev. *Adaptive Filter for Image Processing*. Ed. Electromagnetic Waves & Electronic Systems. Russia: 1999.

O. Pogrebnyak, V. Ponomarev, V. Velasco. *Adaptive Digital Filter for Image Processing and Restoration*. Ed. Proceedings of 8th. international Conference on Signal Processing Applications & Technology. USA: 1997.

O. Pogrebnyak, V. Ponomarev. *Image Enhancement by Homorphic Filters*. Ed. Proceedings of SPIE's Inter. Conference "Applications of Digital Image Processing XVI". USA: 1995.

Peterson, M. P. (1995): *Interactive and Animated Cartography*, Prentice Hall, New Jersey.

Robinson, A. *et al*. (1987): *Elementos de Cartografía*, ed. Omega, Barcelona.

Robinson, A. *et al*. (1995): *Elements of Cartography*, 6th ed., John Wiley & Sons Inc, New York.

S. Levachkine, E. Polchkov. *El Problema del Reconocimiento Automatizado de los Patrones Cartográficos*. Ed. Soluciones Avanzadas. México: 1999.

S. Levachkine, E. Polchkov. *The Problem of Authomatic Digitalization of the Images of Raster Maps*. Ed. Information Bulletin of GIS Assosiation. Russia: 1999.

S. Levachkine. *Variational Problems in Computer Vision*. Ed. Notices of 3rd. Intensive Threemester of Study and Research. Italy: 1997.

S. Levachkine, H. Sossa. *Image Segmentation Based on Variational Calculus*. Ed. Informe Técnico #25, Serie: Azul, CIC-IPN. México: 1999.

Sanz, J. C. (1985): *El Lenguaje del Color*, 1ª ed., Hermann Blume, Madrid.

Sanz, J. C. (1993): *El Libro del Color*, Alianza, Madrid.

Sanz, J. C. (1996): *El libro de la Imagen*, Alianza, Madrid.

Snyder, J. P. *Flattening the Earth: Two Thousand Years of Map Projections.* Chicago, IL: University of Chicago Press, 1993.

Snyder, J. P. *Map Projections--A Working Manual.* U. S. Geological Survey Professional Paper 1395. Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1987.

Taylor, F. *et al*. (1985): *Education and Training in Contemporary Cartography*, Wiley & Sons, England.

V. Vesselovski. *Mathematical & Computer Modelling*. Ed. Informe Técnico #49, Serie: Roja, CIC-IPN. México: 1998.

Wong, W. (1981): *Fundamentos del Diseño Bi y Tri-Dimensional*, 2ª ed., Gustavo Gili, Barcelona.

Wong, W. (1995): *Principios del Diseño en Color*, 4ª ed., Gustavo Gili, Barcelona.

Wood, C. H. and Keller, P. (1996): "Design: Its Place in Cartography", in Wood and Keller, Eds., *Cartographic Design, Theoretical and Practical Perspectives*, Wiley & Sons, England.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)
http://www.inegi.gob.mx

Weisstein, E. W. "Books about Cartography."
http://www.ericweisstein.com/encyclopedias/books/Cartography.html.

Dana, P. H. "Map Projections".
http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/mapproj/mapproj_f.html.

Mulcahy, K. "The Map Projection Home Page" http://www.geography.hunter.cuny.edu/mp/.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática.
http://www.inegi.gob.mx/

Catálogo de proyecciones cartográficas para mapa mundis.
http://mercator.upc.es/Cataleg/SPAIN/SPAIN.HTM

Escola Politécnica Superior D'Edificació de Barcelona. "Laboratori de Cartografia i Fotogrametria"
http://mercator.upc.es/

The Geographer´s Craft project. Universidad de Texas.Texto e Imágenes.
http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/mapproj/mapproj.html

Dr. Keith C.Clarke. Hunter College, City University of New York Texto e Imágenes. Enlaces. Software.
http://everest.hunter.cuny.edu/mp/

Mapping in the social and environmental sciences
http://eratos.erin.utoronto.ca/fcs/TANI/map_2.html

GEOG 3530/8535: Introduction to Cartography and GIS
http://maps.unomaha.edu/Peterson/carta/Default.html

Teledetección.

Adams, J. B.; Sabol, D. E.; Kapos, V.; Almeida, R.; Roberts, D. A.; Smith, M. O. y Gillespie, A. R. (1995): *Classification of Multispectral Images Based on Fractions of Endmembers: Application to Land-Cover Change in the Brazilian Amazon*, Remote Sensing of Environment.

Adams, J. B.; Smith, M. O. y Johnson, P. E. (1986): *Spectral mixture modelling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site*, Journal of Geophysical Research.

Ahern, F. J.; Erdle, T.; Maclean, D. A. y Kneppeck, I. D. (1991): *A quantitative relationship between forest growth rates and Thematic Mapper reflectance measurements*, International Journal of Remote Sensing, 12, pp. 387-400.

Ahern, F. J.; Goldammer, J. G. y Justice, C. O. (eds.) (2001): *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a coordinated international effort*, The Haghe (Holanda), SPB Academic Publishing.

Alía, M.; Martín, C.; Ubanell, A. G. y Muñoz, L. (1976): *Determination by means of Landsat images of different geological structures in the central areas of the Iberian Plateau*, en R. Núñez de las Cuevas (ed.), *Thematic Mapping, Land Use, Geological Structure and Water Resources in Central Spain, Madrid*, NASA Project 28.760, pp. 172-208.

Anderson, J. R.; Hardy, E. E.; Roach, J. T. y Witmer, R. E. (1976): *A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data*, U. S. Geological Survey, Prof. Paper, Washington, D.C., p. 964.

Aronoff, S. (1982): *The map accuracy report: A user's view*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48, pp. 1309-1312.

Asrar, G. (ed.) (1989): Theory and Applications of Optical Remote Sensing, Nueva York, Wiley.

Asrar, G.; Myneni R. M. y Kanemasu E. T. (1989): *Estimation of plant canopy attributes from spectral reflectance measurements*, en G. Asrar (ed.), Theory and Applications of Optical Remote Sensing, Nueva York, Wiley, pp. 252-296.

Baker, J. C. (2001): *New users and established experts: bridging the knowledge gap in interpreting commercial satellite imagery*, en J. C. Baker, K. M. O'Connell y R. A. Williamson (eds.), Commercial Observation Satellites. At the leading edge of Global transparency, Santa Monica, RAND - ASPRS, pp. 533-557.

Barnsley, M. J. y Hobson, P. (1997): *Teaching the principles of optical remote sensing using graphical tools developed in TCL/TK*, Remote Sensing Society Annual Conference.

Baudot, Y. (1990): *Integration of high-quality remote sensing images with low cost geographical information systems*, EGIS'90, Utrecht, pp. 40-46.

Beaven, P. J. (1988): *A very low-cost microcomputer-based image processor*, en J. P. Muller (ed.), *Digital Image Processing in Remote Sensing*, Londres, Taylor & Francis, pp. 123-133.

Belward, A. S. (1991): *Spectral Characteristics of vegetation, Soil and Water in the Visible, Near-Infrared and Middle-Infrared Wavelengths*, en A. S. Belward y C. R. Valenzuela (eds.), *Remote Sensing and GIS for Resource Management in Developing Countries*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, pp. 31-53.

Benediktsson, J. A.; Swain, P. H. y Ersoy, O. K. (1990): *Neural network approaches versus statistical methods in classification of multisource remote sensing data*», IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 28, pp. 540-552.

Bernstein, R. (1978): *Digital image processing of Earth observation sensor data*, en R. Bernstein (ed.), Digital Image Processing for Remote Sensing, Nueva York, IEEE Press, pp. 55-72.

Bezdeck, J.C. (1987): Pattern Recognition With Fuzzy Objetive Function Algorithms. Plenum Press. New York.

Bhargava, D. S. y Mariam, D. W. (1990): *Spectral reflectance relationships to turbidity generated by different clay materials*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 56, pp. 225-229.

Bischof, H.; Schneider, W. y Pinz, A. J. (1992): *Multispectral classification of Landsat images using neural networks*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30, pp. 482-489.

Brookes, A. J. (1975): Photo Reconnaissance: The Operational History, Londres, Ian Allan. Brown, J. F.; Loveland, T. R.; Merchant, J.; Reed, B. C. y Ohlen, D. O. (1993): *Using multisource data in global land-cover characterization: concepts, requirements, and methods*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 59, pp. 977-987.

Carter, P. y Stow, B. (1979): *Clean-up of digital thematic maps of urban growth extracted from Landsat imagery*, en J. A. Allan y R. Harris, Remote Sensing and National Mapping, Reading, Remote Sensing Society, pp 27-40.

Casas, J. M. y Chuvieco, E. (1987): *Análisis visual de imágenes "Thematic Mapper" para el estudio urbano. El caso de la ciudad de Madrid*, Anales de Geografía de la Universidad Complutense, 7, pp. 401-415.

Castleman, K. E. (1978): *The Gray Level Histogram*, en Digital Image Processing, Englewood Cliffs, Prentice Hall, pp. 68-84.

Cebrián, J. A. (1988): *Sistemas de Información Geográfica*, en J. Bosque (ed.), Aplicaciones de la Informática a la Geografía y Ciencias Sociales, Madrid, Síntesis, pp. 125-140.

Chavez, P. S. y Kwarteng, A. Y. (1989*): Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55, pp. 339-348.

Chicharro, E. y Martínez, J. (1992): *El análisis visual de imágenes espaciales en la enseñanza de la Geografía*, Serie Geográfica, 2, pp. 65-80.

Chuvieco, E. (1985a): *Análisis espectral, cartografía e inventario de tipos de ocupación a partir de imágenes Thematic Mapper*, Geographica, 27, pp. 117-129.

Chuvieco, E. (2000): *Fundamentos de Teledetección Espacial*, 3ª Ed. RIALP. Madrid, España.

Chuvieco, E. y Sancho, J. (1986): *Tratamiento visual y digital de las imágenes espaciales: aplicaciones docentes*, Didáctica Geográfica, 14, pp. 17-28.

Chuvieco, E. y Congalton, R. G. (1988): *Using cluster analysis to improve the selection of training statistics in classifying remotely sensed data*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 54, pp. 1275-1281.

Clark, C. y Cañas, A. (1995): *Spectral identification by artificial neural network and genetic algorithm*, International Journal of Remote Sensing, 16, pp. 2256-2272.

Collado, A. (1998): *Cobertura del suelo y desertificación en el Centro-Sur de la provincia de San Luis, Argentina*. Evaluación multitemporal mediante técnicas de teledetección, tesis doctoral, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá.

Colwell, R. N. (ed.) (1983): *Manual of Remote Sensing*. Second Edition, Falls Church, Virginia, American Society of Photogrammetry.

Conners, R.W.; Trivedi, M.M. y Harlow, Ch.A. (1984) Segmentation of a High-Resolution Urban Scene Using Textura Operators. *Computer Vision, Graphics and Image Processing,* 25, pp. 273-310.

Coppin, P. R. y Bauer, M. E. (1994): *Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32, pp. 918-927.

Crippen, R.E. (1989): A Simple Spatial Filtering Routine for the Cosmetic Renoval of Scan-Line Noise From Landsat TM P-Tape Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* 58, pp. 327-331.

Curran, P. J. y Kupiec, J. A. (1995): *Imaging spectrometry: a new tool for ecology*, en F. M. Danson y S. E. Plummer (eds.), Advances in Environmental Remote Sensing, Chichester, John Wiley & Sons, pp. 71-88.

Danson, F. M.; Plummer, S. E. y Briggs, S. A. (1995): *Remote Sensing and the information extraction problem*, en F. M. Danson y S. E. Plummer (eds.), Advances in Environmental Remote Sensing, Chichester, John Wiley & Sons, pp. 171-177.

Estes, J. E. y Lenger, L. W. (eds.) (1974): *Remote Sensing, Techniques for Environmental Analysis*, Santa Barbara, California, Hamilton Publishing Co.

Estes, J. E. y Simonett, D. S. (1975): *Fundamentals of image interpretation*, en R. G. Reeves (ed.), Manual of Remote Sensing, Falls Church, American Society of Photogrammetry, pp. 869-1076.

Foody, G. M. y D. P. Cox (1994): *Sub-pixel land-cover composition estimation using a linear mixture model and fuzzy membership functions*, International Journal of Remote Sensing, 15, pp. 619-631.

Gausman, H. W. (1977): *Reflectance of leaf components*, Remote Sensing of Environment, 6, pp. 1-9.

Gurney, C. M. y Townshend, J. R. G. (1983): *The use of contextual information in the classification of remotely sensed data*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49, pp. 55-64.

Gong, P. y Howarth, J. (1992): Frequency-Based Contextual Classification and Gray-Level Vector Reduction for Land-Use Identification, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* 58, 423-437.

Harper, D. (1983): *Eye in the Sky. Introduction to Remote Sensing*, 2.8 ed., Montreal, Multiscience Publications Ltd.

Hazel, G. G. (2001): *Object-Level Change Detection in Spectral Imagery*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39, 553-561.

Herrera, V. (2001): *Estudio del crecimiento urbano de la ciudad de Valdivia (Chile) a través del use integrado de imágenes de satélite, SIG y equipos GPS*, Revista Española de Teledetección, 15, pp. 69-78.

Hervás, J. y Rosin, P. L. (2001): *Tratamiento digital de imágenes de teledetección en el espectro óptico para el reconocimiento y control de deslizamientos*, V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Madrid, Madrid, CEDEX, Ministerio de Fomento, pp. 63-74.

Hilwig, F. W. (1980): *Visual interpretation of multitemporal Landsat data for inventories of natural resources*, ITC Journal, 2, pp. 297-327.

Hord, R. M. (1982): *Digital Image Processing of Remotely Sensed Data*, Nueva York, Academic Press.

Howarth, P. J. y Wickware, G. M. (1981): *Procedures for change detection using Landsat digital data*, International Journal of Remote Sensing, 2, pp. 277-291.

Jensen, J. R. (1996): *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*, 2ª edición, Upper Saddle River, N.J., Prentice-Hall.

Koutsias, N.; Karteris, M. y Chuvieco, E. (2000): *The use of intensity-hue-saturation transformation of Landsat-5 Thematic Mapper data for burned land mapping*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66, pp. 829-839.

Lachowski, H.; Maus, P. y Platt, B. (1992): *Integrating remote sensing with GIS. Procedures from the forest service*, Journal of Forestry, 90, pp. 16-21.

Lira, Jorge (1995); *Introducción al Tratamiento Digital de Imágenes,* Instituto de Geofísica, UNAM. México.

Lira, Jorge (1987); *La Percepción Remota: Nuestros Ojos Desde el Espacio*. Serie la Ciencia desde México, Vol. 33, Fondo de Cultura Económica, México.

Mather, P. M. (1998): *Computer Processing of Remotely Sensed Images*, 2.a edición, Chichester, John Wiley & Sons.

Moore, G. K. y Waltz, F. A. (1983): *Objective procedures for lineament enhancement and extraction*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49, pp. 641-647.

Morain, S. A. y Budge, A. M. (eds.) (1996): *Earth Observing Platforms and Sensors*», Manual of Remote Sensing, Bethesda, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.

Mouat, D. A., Mattin, G. G. y Lancaster, J. (1993): *Remote sensing techniques in the analysis of change detection*, Geocarto International, 8, pp. 39-50.

Muller, J. P. (1988a): *Computing issues in digital image processing in remote sensing*, en J. P. Muller, Digital Image Processing in Remote Sensing, Londres, Taylor and Francis, pp. 1-20. - (ed.) (1988b): Digital Image Processing in Remote Sensing, Londres, Taylor & Francis. Munechika, C. K.

Nelson, R. y Grebowsky, G. (1982): *Evaluation of temporal registration of Landsat scenes*, International Journal of Remote Sensing, 3, pp. 45-50.

Pinilla, C. (1995): *Elementos de Teledetección Espacial, Madrid*, RA-MA.

Quattrochi, D. A. y Goodchild, M. F. (eds.) (1997): *Scale in Remote Sensing and GIS, Boca Raton*, CRC Press, Inc.

Richards, J. A. y Xia, X. (1999): *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction*, 3.8 edición, Berlín, Springer-Verlag.

Ruiz, L. A. (1994): *Introducción al tratamiento digital de imágenes*, Valencia, Universidad Politécnica, Servicio de Publicaciones.

Sader, S. A. y Winne, J. C. (1992): *RGB-NDVI colour composites for visualizing forest change dynamics*, International Journal of Remote Sensing, 13, pp. 3055-3067.

Snedecor, G. W. y Cochran, W. G. (1980): *Statistical Methods*, 7.a edición, Ames, The Iowa University Press.

Sobrino, J. A. (ed.) (2000): *Teledetección*, Valencia, Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia.

Thomas, I. L. (1980): *Spatial post-processing of spectrally-classified Landsat data*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46, pp. 1201-1206.

Tucker, C. J. (1979): *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*, Remote Sensing of Environment, 8, pp. 127-150.

Wang, F. (1990): *Improving remote sensing image analysis through fuzzy information representation*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 56, pp. 1163-1169.

Zuylen, L. V. (1978): «The use of remote sensing for updating maps», ITC Journal, 78/2, pp. 333-346.

Landsat 7 Science Data Users Handbook. NASA.
http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook.html

Nom-008-Scfi-1993 Sistema General De Unidades De Medida
http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/nom008i.html

El espectro electromagnético
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/espectro/espectro.htm

Las Leyes del Universo
http://www.astrocosmo.cl/anexos/anexos.htm#indice

Percepción remota.
http://www2.udec.cl/~lorbusto/tarea3.html#Defi

El Color
http://www.arqhys.com/principales4.html
Tratamiento digital de imágenes
http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/pant3.htm

Aplicaciones urbanas de los satélites de teledetección
http://www.aeroespacio.com.ar/site/anteriores/551-560/552/SITE/_11aplica.htm

Curso de procesado digital de imagen. (c) Francisco Bellas Aláez
Grupo de Procesado de Imagen de la E.T.S.I. de Telecomunicación de Vigo
http://www.gpi.tsc.uvigo.es/libro2/indice.htm

USGS Science for a changing World. Earth Resources Observation and Science (EROS).
http://edc.usgs.gov/

The Landsat Program
http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/landsat.html

Ficha técnica resumida Landsat 7 ETM+
http://www.bgeo.com.py/landsat7.html

Ficha técnica resumida Landsat 5 TM
http://www.bgeo.com.py/landsat5.html

Landsat 7
http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/l7.html

¿Qué es la teledetección?
http://www.argongra.com/portalsatelite/numerodebandas.htm

Prácticas de Teledetección
http://www.um.es/geograf/sig/teledet/compos.html

Percepción remota satelital
http://www.teledet.com.uy/quees.htm