FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
Ing. Néstor René Ledesma

UNSE
Universidad Nacional de Santiago del Estero

TELEDETECCIÓN

GUÍA DE TRABAJOS PRÁCTICOS



Equipo docente: Ing. Ftal. Fabian Reuter
Ing. Ftal. Amilcar B. Pedenovi

2026



TELEDETECCIÓN
Guía de trabajos prácticos

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
Ing. Néstor René Ledesma

UNSE
Universidad Nacional de Santiago del Estero

Universidad Nacional de Santiago del Estero

Facultad de Ciencias Forestales

Teledetección

Guía de trabajos prácticos

Ing. Ftal. Fabian Reuter
Ing. Ftal. Amílcar B. Pedenovi

Santiago del Estero

2026

Agradecimientos

La presente carpeta de trabajos prácticos, elaborada en el marco de las asignaturas Teledetección, y Teledetección y Cartografía, es el resultado de un proceso de trabajo conjunto que no habría sido posible sin el compromiso y el aporte de quienes formaron y actualmente forman parte de esta cátedra.

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento, en primer lugar, a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, por brindarnos el espacio institucional y las condiciones necesarias para el desarrollo de nuestra tarea docente. Asimismo, hacemos extensivo este reconocimiento a todos aquellos investigadores y científicos cuyo valioso aporte al campo de la teledetección y las ciencias de la observación terrestre constituye la base conceptual sobre la cual se sustentan los trabajos aquí presentados.

Un lugar central en este reconocimiento lo ocupan los estudiantes que recurran a esta carpeta como material de estudio y consulta a lo largo de su formación. A ellos dedicamos con particular afecto este esfuerzo, con el deseo de que encuentren en estas páginas un recurso técnico útil y una fuente de motivación para profundizar en la disciplina, facilitando así su tránsito por la asignatura.

A todos ellos, nuestro más profundo agradecimiento.

INDICE

TP 01

INTRODUCCIÓN A LA ESTEREOSCOPIA, ESTEREOSCOPIO DE ESPEJOS, ORIENTACION DE FOTOGRAFIAS AEREAS EN ESTEROSCOPIO DE ESPEJOS, VISÍON ESTEROSCÓPICA. 1

1. OBJETIVO GENERAL 1

2. OBJETIVOS SECUENDARIOS 1

3. MATERIAL REQUERIDO 2

4. INTRODUCCIÓN 2

5. MÉTODOS DE OBSERVACIÓN ESTEREOSCÓPICA 3

5.1. Métodos sin instrumentos 4

5.1.1 Lentes Anaglifos 4

5.1.2 Sistemas de polarización 5

5.2. Métodos con instrumentos 6

5.2.1 Estereoscopio de bolsillo 6

5.2.2. Estereoscopio de Espejos 8

5.2.2.1 Enfoque del estereoscopio de espejos 9

6. ACTIVIDADES 10

TP 02

PRINCIPIO DE FOTOINTERPRETACIÓN Y CLASIFICACIÓN 12

1. OBJETIVOS GENERALES 12

2. OBJETIVOS SECUNDARIOS 12

3. MATERIAL REQUERIDO 12

4. INTRODUCCIÓN 13

5. FASES DE LA FOTOINTERPRETACIÓN 14

6. ELEMENTOS DE INTERPRETACIÓN VISUAL DE IMÁGENES 14
6.1. Nitidez y resolución 14
6.2. Tono y color 14
6.3. Textura 15
6.4. Forma y tamaño 16
6.5. Patrón y disposición 17
6.6. Sombra 17
7. CLAVES DE IDENTIFICACIÓN 18
7.2. Clave dicotómica 18
8. NOCIONES DE ESCALA 19
9. ACTIVIDADES 20

TP 03
DETERMINACION DE ESCALA EN FOTOGRAFIAS AÉREAS MEDICIONES Y CONCEPTO DE PARALAJE. 21
1. OBJETIVOS GENERALES 21
2. OBJETIVOS ESPECIFICOS 21
3. MATERIAL REQUERIDO 22
4. INTRODUCCIÓN 22
5. CONCEPTO DE ESCALA 23
5.1. Determinación de escala a partir de parámetros de vuelo 24
5.2. Determinación de escala a partir de un mapa o del terreno. 25
6. PARALAJE ESTEREOSCÓPICA 25
6.1. Factores que influyen en la paralaje 26
6.2. Formulas básicas de paralaje 27
7. ACTIVIDADES ESCALA 28
8. ACTIVIDADES PARALAJE 30



TP 04

IMÁGENES SATELITALES. PLATAFORMAS Y SENSORES 32
1. OBJETIVOS GENERALES 32
2. OBJETIVOS SECUNDARIOS 32
3. MATERIAL REQUERIDO 32
3. INTRODUCCIÓN 33
4. BÚSQUEDA Y DESCARGA DE IMÁGENES 34
4.1. Descarga de imágenes a través de USGS de Earth Explorer 34
4.1.1. procedimiento de descarga 34
4.2. Descarga de imágenes a través de CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) 39
4.3. Búsqueda y descarga de imágenes a través de Land Viewer ... 41
7. ACTIVIDADES 44

TP 05

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES 45
1. OBJETIVOS PRINCIPALES 45
2. OBJETIVOS SECUNDARIOS 45
3. MATERIAL REQUERIDO 46
4. INTRODUCCIÓN 46
5. DIFERENCIAS EN LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES Y DE FOTOGRAFÍAS 47
5.1. Plataforma y altura 47
5.2. Trayectoria y cobertura 49
5.3. Geometría y adquisición 49
5.4. Naturaleza del sensor y espectro 50
5.5. Resolución y escala 51
5.6. Formato de datos y procesamiento inicial. 51
5.6.1. Organización de los ND dentro de una Imagen 52



6. CORRECCIÓN DE IMÁGENES 53
6.1. Fuentes de error comunes en imágenes satelitales 53
6.2. Errores geométricos 54
6.3. Errores radiométricos y atmosféricos 54
6.4. Correcciones radiométricas 55
6.5. Ajuste de contraste 56
6.6. Tabla de referencia de color (CILT) 57
6.7. Composición de bandas RGB 58
7. COMPRESIÓN DE CONTRASTE 59
8. MANEJO DE ERDAS 59
9. ACTIVIDADES 60

TP 06
GNSS, INTRODUCCIÓN AL SISTEMA GPS 65
1. OBJETIVOS GENERALES 65
2. OBJETIVOS SECUNDARIOS 65
3. MATERIAL REQUERIDO 66
4. INTRODUCCIÓN 66
5. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL SISTEMA GPS 68
5.1 Satélites y cobertura 69
6. SEGMENTOS 69
6.1. Segmento espacial 69
6.2. Segmento de control 71
6.2.1. Señales emitidas por el satélite GPS 73
6.3. Segmento usuario 75
7. ERRORES 76
7.1. Retrasos ionosféricos y troposféricos 76
7.2. Errores de reloj y efemérides 77
7.3. Multitrayectoria (MULTIPATH) 77
8. SISTEMA DE AUMENTACIÓN 79
8.1. Sistemas de aumentación activos (SBAS) 80

9. METODOS DE POSICIONAMIENTO 81
9.1. Posicionamiento absoluto y posicionamiento relativo 81
9.2. Métodos estáticos y métodos cinemáticas 82
9.3. Posicionamiento diferencial DGPS y posicionamiento RTK 82
9.4. Posicionamiento PUNTUAL PRECISO (PPP) 83
10. ACTIVIDADES 83

TP 07
GEORREFERENCIACION DE IMÁGENES SATELITALES 85
1. OBJETIVO PRTINCIPAL 85
2. OBJETIVOS SECUNDARIOS 85
3. MATERIAL REQUERIDO 86
4. INTRODUCCIÓN 86
5. CONCEPTOS IMPORTANTES 89
5.1. Coordenadas geodésicas latitud, longitud y altitud. 90
5.2. Proyección cartográfica. Clasificación. 90
6. CORRECCIONES GEOMÉTRICAS 93
6.1. Establecimiento de puntos de control 94
6.2. Cálculo de funciones de transformación 96
6.3. Transferencia de los ND originales a la posición corregida 97
6.3.1 Vecino más próximo 98
6.3.2 Interpolación bilineal 99
6.3.3 Convolución cúbica 99
7. PROCEDIMIENTO 100
7.1. Etapas a seguir 107
8. ACTIVIDADES 110



TP 08

GEORREFERENCIACION DE IMÁGENES SATELITALES 111
1. OBJETIVO PRINCIPAL 111
2. OBJETIVOS SECUNDARIOS 111
3. MATERIAL REQUERIDO 112
4. INTRODUCCIÓN 112
5. TIPOS DE GEORREFERENCIACIÓN 113
5.1. Georreferenciación imagen a imagen 114
5.2. El flujo de trabajo en Erdas Imagine 115
5.3. Cálculo del error y ajuste del modelo 117
5.4. Remuestreo y generación de la imagen final 118
6. REPROYECCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES 120
7.1. Procedimiento para re proyectar 121
8. ACTIVIDADES 123

TP 09

TRANSFORMACION DE IMÁGENES SATELITALES, ÍNDICES, FILTROS, COMPONENTES PRINCIPALES 125
1. OBJETIVO PRINCIPAL 125
2. OBJETIVOS SECUNDARIOS 125
3. MATERIAL REQUERIDO 126
4. INTRODUCCIÓN 126
5. REALCES RADIOMÉTRICOS 127
6. FILTROS ESPACIALES 127
6.1. Frecuencia espacial 128
6.2. Filtros de paso bajo (suavizado) 128
6.2.1. Principales tipos de filtros de paso bajo 129
6.3. Filtros de paso alto (realce de bordes) 129
6.4. Filtro estadísticos. 130
7. ÍNDICES ESPECTRALES 131

7.1. Índices de vegetación 131
7.1.1 NDVI 132
7.1.2. EVI 133
7.1.3. SAVI 134
8. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES 136
9. ACTIVIDADES 140

TP 10
TRANSFORMACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES, CLASIFICACION SUPERVISADA. 141
1. OBJETIVO PRINCIPAL 141
2. OBJETIVOS SECUNDARIOS 141
3. MATERIAL REQUERIDO 142
4. INTRODUCCIÓN 142
5. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA, MÉTODO 143
5.1. Proceso de asignación 144
5.1.1. Clasificador de mínima distancia 145
5.1.2. Clasificador de paralelepípedos 145
5.1.3. Clasificador de máxima probabilidad 146
6. ERDAS IMAGINE, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA - ESTUDIO DE CASO 147
7. RECODE 151
8. POSPROSESAMIENTO 152
9. MATRIZ DE CONFUSIÓN 153
10. ACTIVIDADES 155

TP 11

TRANSFORMACION DE IMÁGENES SATELITALES, CLASIFICACION NO SUPERVISADA 156
1. OBJETIVO PRINCIPAL 156
2. OBJETIVOS SECUNDARIOS 156
3. MATERIAL REQUERIDO 157
4. INTRODUCCIÓN 157
5. CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA 158
5.1. Algoritmo isodata 159
6. PROCESO 160
6.1. Método de asignación de pixeles 162
7. SUAVIZADO DE LOS RESULTADOS 163
7.1. Clump, Sieve y Eliminate 163
8. USO DE ERDAS IMAGINE 165
9. POSPROCESO 168
9.1. CLUMP 168
5. ACTIVIDADES 168

TP 12

TRABAJO CON DRONES 169
1. OBJETIVO PRINCIPAL 169
2. OBJETIVOS SECUNDARIOS 169
3. INTRODUCCIÓN 169
4. PLANIFICACIÓN DE VUELO 170
4.1. Mission planner 170
4.2. Pix4d capture 171
5. APOYO TERRESTRE 173
5.1. Receptores GNSS 174
5.2. Estación total 174
7. PROCESADO DE LAS IMÁGENES Y CÁLCULOS 176

7.1. Importar imágenes 177
7.2. Orientación de imágenes 178
7.3. Puntos de control. 179
7.4. Nube densa de puntos. 179
7.5. Malla 180
7.6. Textura 181
7.7. Mde - MDT 181
7.8. Ortomosaico. 182
7.9. Reporte final 184
8. ACTIVIDADES 184

BIBLIOGRAFIA 185

PRÁCTICO

01

INTRODUCCIÓN A LA ESTEREOSCOPIA, ESTEREOSCOPIO DE ESPEJOS, ORIENTACION DE FOTOGRAFIAS AEREAS EN ESTEROSCOPIO DE ESPEJOS, VISÍON ESTEROSCÓPICA.

1. OBJETIVO GENERAL

- Que los estudiantes de Ingeniería Forestal y Licenciatura en Ecología adquieran las competencias teórico-prácticas necesarias para comprender el fenómeno de la estereoscopía, así como para operar con destreza los instrumentos ópticos utilizados en la interpretación de fotografías aéreas. Se busca que el estudiante logre integrar los principios de la visión binocular con las técnicas de fotointerpretación aplicadas al relevamiento y diagnóstico de los recursos forestales y ecosistémicos, herramientas fundamentales en el ejercicio profesional de ambas disciplinas.
- Asimismo, se pretende que los alumnos desarrollen una actitud crítica y metódica frente al análisis de imágenes aéreas, reconociendo las potencialidades y limitaciones de cada tipo de estereoscopio en función del contexto de trabajo, ya sea en el laboratorio o en el campo, y que sean capaces de extraer información cuantitativa y cualitativa de los pares estereoscópicos con rigor técnico.

2. OBJETIVOS SECUENDARIOS

Al finalizar los trabajos prácticos, el estudiante estará en condiciones de:

Explicar el fundamento óptico y fisiológico de la visión estereoscópica, identificando los conceptos de paralaje y base estereoscópica.

Describir las características constructivas, ópticas y funcionales del estereoscopio de bolsillo y del estereoscopio de espejos, diferenciando sus componentes y condiciones de uso óptimas.

- Manipular correctamente el estereoscopio de bolsillo sobre pares de fotografías aéreas, ajustando el enfoque para obtener una imagen tridimensional nítida.

- Operar el estereoscopio de espejos en condiciones de laboratorio, orientando adecuadamente el par fotográfico.
- Valorar la importancia de la fotointerpretación estereoscópica como herramienta de diagnóstico en inventarios forestales, estudios de impacto ambiental y planificación del uso del suelo.

3. MATERIAL REQUERIDO

- Estereoscopio de espejos
- par estereoscópico de fotografías aéreas
- regla de 50 cm de longitud
- marcadores
- cinta adhesiva

4. INTRODUCCIÓN

La visión estereoscópica es un proceso inherente a los seres humanos, consistente en obtener una vista tridimensional de objetos percibidos mediante visión binocular. El cerebro humano interpreta la realidad a partir de las imágenes que le proporcionan los dos ojos, las cuales presentan diferencias entre sí, ocasionadas por su separación; la disparidad o paralaje entre dichas imágenes es utilizada por el cerebro para percibir la profundidad. Elsa Quiroga et. al. (2015). Este fenómeno se basa en la disparidad binocular: dado que los ojos humanos se encuentran separados entre sí aproximadamente 63 a 65 mm (distancia Inter pupilar promedio), cada uno recibe una imagen con un ángulo de observación levemente distinto respecto del mismo objeto. El sistema nervioso central, a través de los procesos de fusión binocular realizados en la corteza visual, combina ambas imágenes en una única percepción tridimensional, brindando información sobre la profundidad y la distancia relativa de los objetos observados

Una imagen 3D estereoscópica es aquella que reproduce la profundidad de los objetos a través de la visión binocular, (desde dos puntos de vista). Giacometti. (2010).

Esta diferencia angular entre las dos imágenes recibe el nombre de paralaje binocular. Cuanto mayor es la disparidad entre las dos imágenes, mayor es la sensación de relieve percibida por el observador. El cerebro interpreta grandes disparidades como objetos más cercanos y pequeñas disparidades como objetos más distantes. En condiciones normales de visión, el rango de profundidad que permite la estereoscopía natural alcanza hasta

unos 300 metros, más allá de los cuales la diferencia entre las imágenes de ambos ojos es tan pequeña que la percepción de profundidad se torna imperceptible y el observador debe recurrir a indicios monoculares como el tamaño relativo, la superposición o la perspectiva lineal

El concepto de fusión estereoscópica es central para comprender el funcionamiento de los instrumentos estereoscópicos utilizados en fotointerpretación. Para lograr la visión tridimensional, es condición necesaria que cada ojo observe únicamente la imagen que le corresponde: el ojo izquierdo debe ver la fotografía izquierda y el ojo derecho, la fotografía derecha. Cuando esta condición se cumple, el cerebro fusiona las dos imágenes y genera la sensación de profundidad o relieve estereoscópico.

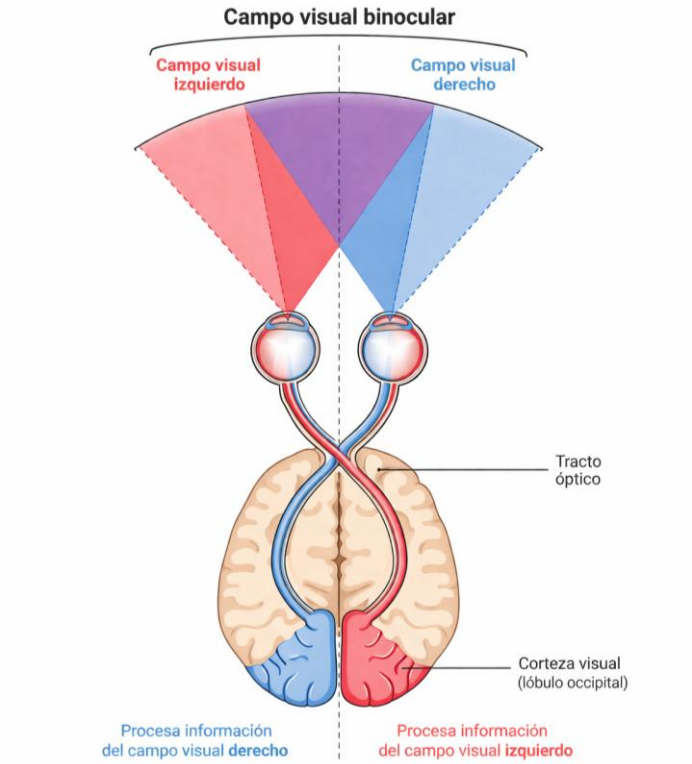


Figura 1.1 Campo de visión binocular. Fuente: Elaboración propia.

5. MÉTODOS DE OBSERVACIÓN ESTEREOSCÓPICA

Cuando se fotografía la misma zona de terreno desde dos posiciones diferentes en el aire y las dos fotografías obtenidas son observadas simultáneamente con un estereoscopio, se ve un modelo aparentemente sólido del terreno. Este es conocido como modelo estereoscópico. Para lograr el par estereoscópico las fotografías consecutivas deben estar solapadas por lo menos un 60%.

Un par de fotografias es estereoscópica en la parte común del terreno fotografiado. Peña et. Al. (2011).

Los métodos para la observación estereoscópica de fotografías suelen agruparse en métodos "a simple vista" (sin instrumentos) y métodos instrumentales (con estereoscopios). En el contexto de fotografías aéreas, los que se usan en prácticas de fotogrametría son principalmente los instrumentales.

5.1. Métodos sin instrumentos

Observación con ejes paralelos: el observador "relaja" la vista como si mirara al infinito y fusiona dos imágenes colocadas lado a lado.

Observación con ejes cruzados: el observador cruza los ojos para hacer coincidir la imagen izquierda con la derecha y lograr la fusión estereoscópica.

- Se coloca la fotografía A, a la izquierda y la fotografía B a la derecha como un par estereoscópico normal.
- El observador mira la fotografía derecha con el ojo izquierdo y la fotografía izquierda con el ojo derecho, hasta que la imagen central se superpone y aparece una imagen en 3D en el centro.

En este método, convergencia (cruce de los ojos) y acomodación (enfoque) no coinciden exactamente en la misma distancia, por lo que puede resultar incómodo y molesto si se mantiene mucho tiempo.

Por esa razón casi no se utiliza en prácticas de fotogrametría con estudiantes; se prefiere la visión con ejes paralelos o el uso de estereoscopios, que resultan más naturales y descansados.

5.1.1 Lentes Anaglifos

La visión estereoscópica mediante anaglifos es una técnica fundamental en fotointerpretación y fotogrametría que permite percibir la tercera dimensión —el relieve— a partir de un par de imágenes bidimensionales tomadas desde posiciones ligeramente distintas, replicando el principio de la paralaje que emplea nuestra visión binocular natural. El procedimiento se basa en superponer dos fotografías de una misma zona, obtenidas con cierto recubrimiento longitudinal (habitualmente entre el 55% y el 65% en vuelos fotogramétricos clásicos), coloreando una de ellas en rojo y la otra en cian, y desplazándolas horizontalmente entre sí hasta lograr una correcta correspondencia estereoscópica.

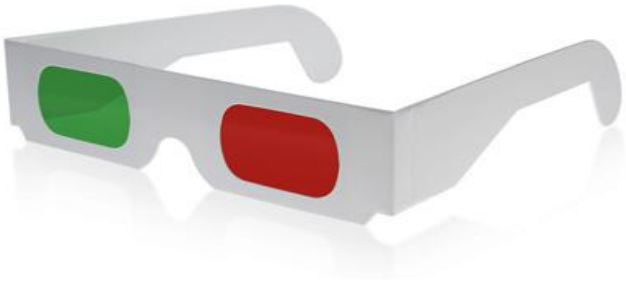


Figura 1.2. Lente Anaglifa

Al observar esta composición con anteojos cuyo filtro izquierdo es rojo y el derecho cian, cada ojo capta selectivamente solo una de las dos imágenes: el ojo cubierto por el filtro rojo absorbe la información del canal rojo y percibe la imagen cian, mientras que el ojo con filtro cian hace lo inverso. De esta manera, el cerebro recibe dos perspectivas ligeramente distintas de la misma escena y las fusiona en una única percepción tridimensional,

- Pese a estas limitaciones, los lentes anaglifos son muy usados en docencia y demostraciones porque son baratos, sencillos y permiten ver en 3D tanto imágenes impresas como en pantalla con solo disponer del anaglifo adecuado.

5.1.2 Sistemas de polarización

Los lentes polarizados funcionan como un "filtro direccional" de la luz: dejan pasar solo las vibraciones de luz en una dirección (normalmente vertical) y bloquean buena parte de las vibraciones horizontales, que son las que producen la mayor parte del deslumbramiento. Por eso mejoran mucho la visibilidad y el confort cuando hay reflejos fuertes en agua, asfalto, nieve o metal.

Los espectadores usan lentes con la misma polarización que las imágenes para asignar una perspectiva diferente a cada ojo. Giacometti. (2010).

La luz está formada por ondas que vibran en infinitas direcciones; cuando se refleja en una superficie plana (agua, carretera, nieve) tiende a polarizarse en gran medida en el plano horizontal, generando destellos muy intensos. Los lentes polarizados incorporan una lámina con moléculas alineadas que actúan como "rejilla": que dejan pasar principalmente el componente vertical del campo eléctrico y absorben gran parte del componente horizontal. la imagen para el ojo izquierdo y la imagen para el ojo derecho se proyectan con planos de polarización ortogonales, de modo que cada ojo, a través de su filtro correspondiente, solo percibe la imagen que le corresponde. (Cárdenas et al., 2015).

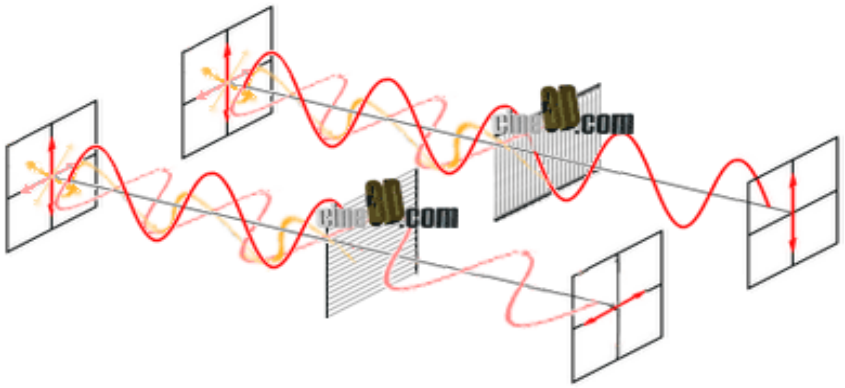


Figura 1.3. Esquema del sistema de Polarización para ver estereoscopia.

El usuario usa anteojos con filtros polarizadores complementarios a los de proyección, de modo que cada ojo recibe exclusivamente la imagen que le corresponde, sin superposición ni pérdida de saturación cromática, a diferencia de lo que ocurre con el filtrado por color de los anaglifos.

5.2. Métodos con instrumentos

Comprende aquellos dispositivos ópticos y optomecánicos que, a diferencia de los sistemas anaglifo o de polarización que requieren coloreado o filtrado previo de las imágenes, permiten la fusión estereoscópica directa de un par fotográfico sin alterar su información espectral original.

Dentro de los métodos de observación estereoscópica mencionamos los estereoscopios de bolsillos y de espejos.

5.2.1 Estereoscopio de bolsillo

El estereoscopio de bolsillo es un instrumento portátil formado por dos lentes convergentes montadas a una distancia similar a la separación de los ojos, generalmente con patas plegables para apoyarlo sobre las fotos. Las lentes actúan como lupas: separan los campos de visión de cada ojo, aumentan el tamaño aparente de la imagen y "desplazan" ópticamente el modelo hacia una distancia cómoda de enfoque, lo que facilita una visión 3D clara y descansada, aunque es limitado por su campo visual.

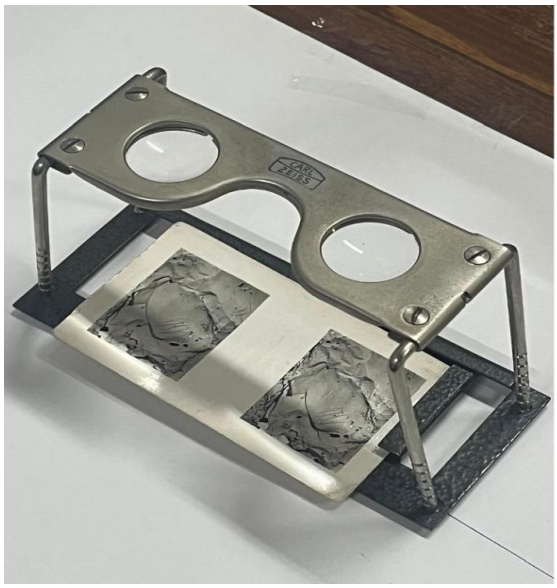


Figura 1. 4 *Estereoscopio de bolsillo. Fuente: Fotografía tomada por el autor.*

El procedimiento a seguir para la observación con estereoscopio de bolsillo es el siguiente.

- Colocar las dos fotos aéreas sobre la mesa, con la línea de vuelo aproximadamente horizontal y las imágenes solapadas de manera que la zona común quede entre ambas.
- Ajustar la separación entre centros de lentes del estereoscopio para que coincida con la base ocular del observador y situar el instrumento paralelo a la línea de vuelo, de forma que cada lente quede sobre la parte homóloga de la escena en cada foto.
- Mirar a través de las lentes y deslizar suavemente las fotos a lo largo de la línea de vuelo hasta que detalles (por ejemplo, un cruce de caminos) coincidan en posición aparente.

La principal ventaja del estereoscopio de bolsillo es su portabilidad y robustez: puede utilizarse en el campo, sobre mesas de reducidas dimensiones, incluso en condiciones de iluminación natural. Su principal desventaja radica en que el campo de visión estereoscópica es relativamente pequeño, lo que obliga a trasladar el instrumento sobre las fotografías para examinarlas en su totalidad. Adicionalmente, para que dos fotografías aéreas de formato estándar (23 × 23 cm) puedan ser observadas simultáneamente en su zona de solapamiento con el estereoscopio de bolsillo, es necesario doblar ligeramente los bordes de las fotografías, de manera que sus superficies queden al mismo nivel óptico bajo el instrumento. Si las fotografías son más grandes que el instrumento, deberán seccionarse o desplazarse sistemáticamente.

5.2.2. Estereoscopio de Espejos

El estereoscopio de espejos, es un instrumento óptico de mayor complejidad y precisión que el de bolsillo, diseñado para el trabajo sistemático sobre fotografías aéreas de formato estándar en condiciones de laboratorio. Su principio de funcionamiento se basa en el uso de espejos y prismas, que desvían la trayectoria de los rayos lumínicos de cada fotografía, dirigiéndolos hacia cada ojo del observador con una separación superior a la interpupilar normal. Esto permite que el observador pueda ver simultáneamente una fotografía aérea completa de 23 × 23 cm sin necesidad de doblarla.

Un estereoscopio de espejos típico está formado por un cuerpo superior que contiene un sistema de dos espejos planos montados en ángulo. Cada ojo mira hacia un par de espejos que desvían la imagen de la fotografía correspondiente hacia el observador, de modo que la observación se realiza de forma aproximadamente ortogonal al plano de las fotos.

Los espejos suelen estar montados en brazos o soportes ajustables que permiten modificar la distancia entre ellos, adaptándola a la distancia Inter pupilar y a diferentes tamaños o escalas de fotografía; además, muchos modelos incorporan oculares o lentes de aumento (por ejemplo, 2x–8x) y admiten accesorios como barras de paralaje o estereomicrómetros para medir alturas y desplazamientos.

El principio de funcionamiento de un estereoscopio de espejos es el siguiente.

Se basa en la reflexión: cada fotografía (izquierda y derecha) se coloca separada sobre la mesa, alineada con la dirección de vuelo, y su imagen se refleja en un sistema de espejos de forma que el ojo izquierdo solo ve la fotografía izquierda y el ojo derecho solo la derecha. La luz procedente de cada foto sufre una o varias reflexiones hasta llegar a los ojos, "recomponiendo" geométricamente una situación equivalente a tener las fotos más próximas y alineadas con la base ocular, pero sin necesidad de superponerlas ni de forzar la convergencia de los ojos.

Como las dos fotografías representan la misma zona del terreno desde puntos de vista ligeramente diferentes, el cerebro fusiona ambas proyecciones reflejadas en una única percepción tridimensional, interpretando las diferencias horizontales (paralaje) como profundidad; de esta forma se visualiza el cambio de relieve, la altura relativa de objetos (árboles, edificios) y los cambios en el uso del suelo.

Si poseemos algún problema visual, debemos compensar nuestro problema visual, mediante la corrección de dioptrías, en otras palabras, el estereoscópio permite ajustar individualmente cada ocular para corregir las deficiencias de visión de cada ojo y lograr un enfoque nítido y una visión binocular clara. El estereoscópio de espejos permite observar un par fotográfico completo sin solapamiento físicos.

La corrección de la dioptría en los estereoscopios de espejo es necesaria principalmente para compensar las diferencias individuales en la refracción ocular entre los dos ojos del

observador, como la miopía, hipermetropía o astigmatismo, asegurando que ambas imágenes estereoscópicas se enfoquen nítidamente en la retina de cada ojo de forma independiente.

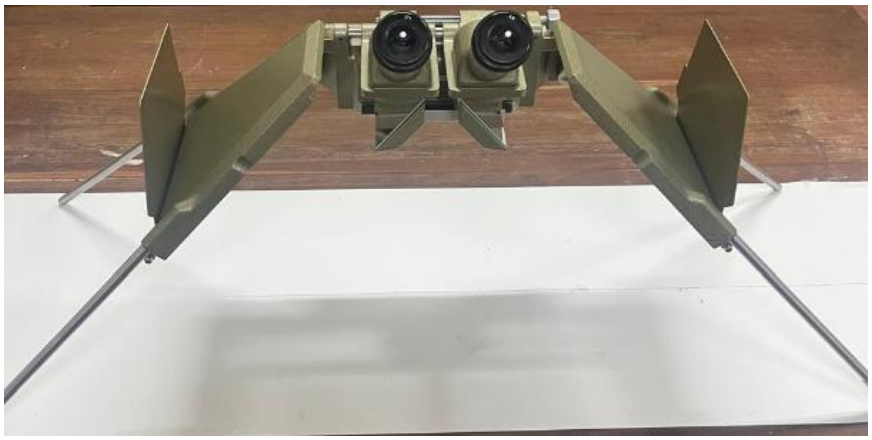


Figura1.5 Estereoscopio de espejos. Fuente: Fotografía tomada por el autor.

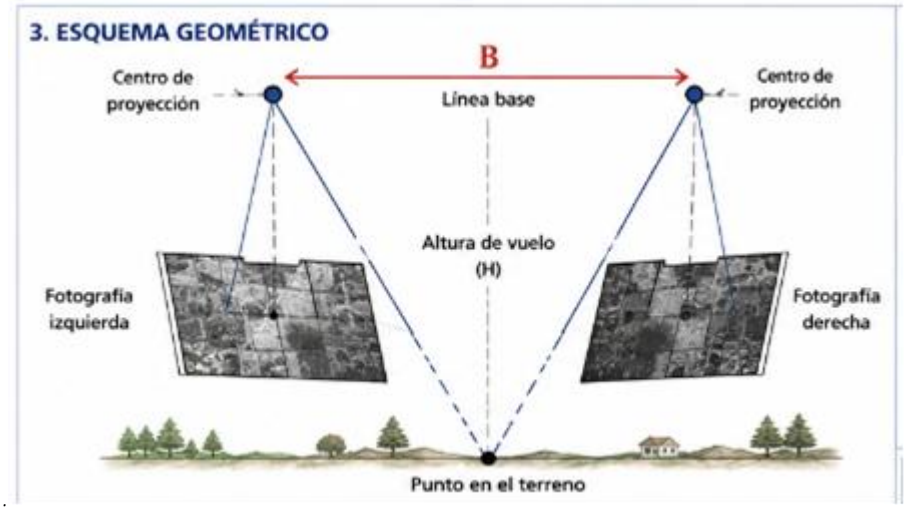


Figura 1.6 Determinación de la base del instrumento. Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.1 Enfoque del estereoscopio de espejos:

Para obtener un buen enfoque con los binoculares del estereoscopio de espejos seguir el siguiente procedimiento:

- Determinar la distancia Interpupilar del observador, (Medir con una regla la distancia entre las pupilas de ambos ojos)
- Girar el ocular izquierdo hacia la izquierda hasta que la imagen sea borrosa, luego girar a la derecha hasta que la imagen se vuelva nítida.
- Repetir el mismo procedimiento para el ocular derecho.

- Sobre una cartulina gruesa y blanca trazar una línea horizontal paralela al borde de la mesa de aproximadamente 60 cm. de largo en la parte media.
- Mediante el estereoscopio de espejos, observar y colocar en el medio del campo de visión de ambos oculares la línea dibujada previamente.
- Observar solo con el ojo izquierdo sobre el ocular izquierdo y marcar sobre la línea dibujada el punto medio del campo de vista de dicho ocular y asignarle una marca hacia arriba (A).
- Repetir el mismo procedimiento con el ojo derecho y marcar una marca hacia abajo (B), del punto medio del Campo de vista observado.
- La distancia A.B, es la base instrumental del estereoscopio a utilizar, adaptada a la base de sus ojos.
- Observar con ambos ojos al mismo tiempo a través de los oculares del estereoscopio los puntos A B anotados sobre la línea trazada en la cartulina, estos puntos al ser observados a través del estereoscopio, deberian superponerse exactamente, si eso ocurre Ud. se halla observando con ejes de visión paralela.

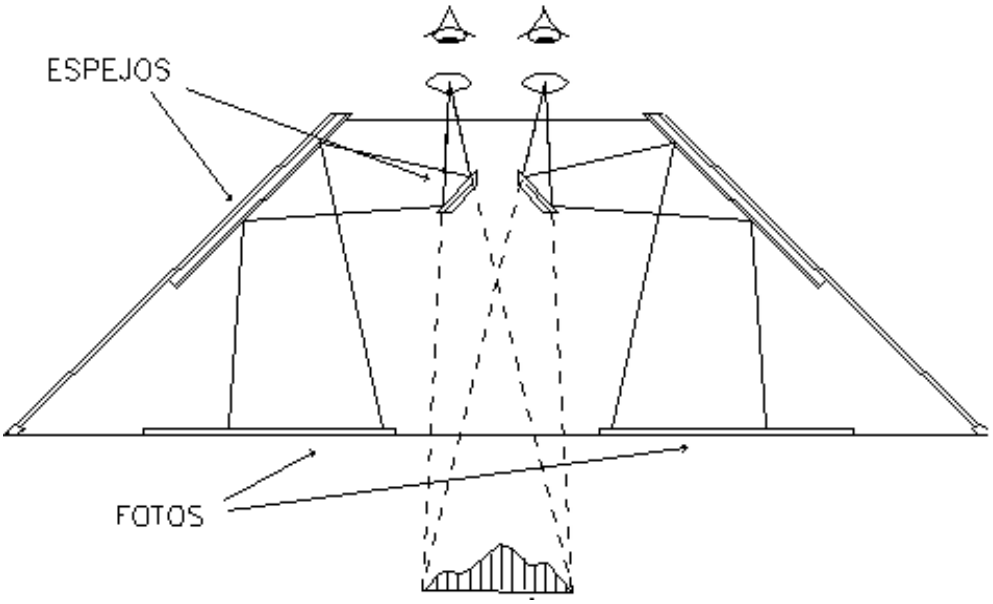


Figura 1.7 Enfoque estereoscópico. Fuente: Elaboración propia.

6. ACTIVIDADES

- Determine distancia pupilar.
- Corrija dioptrías

- Sobre una cartulina blanca trazar una línea horizontal paralela al borde de la mesa de aproximadamente 60 cm. de largo en la parte media.
- Mediante el estereoscopio de espejos, observar y colocar en el medio del campo de visión de ambos oculares la línea marcada en el punto 2.
- Ubique varios pares de fotografías y observe estereoscópicamente, definiendo regiones más altas y bajas en cada par.

PRÁCTICO

02 PRINCIPIO DE FOTOINTERPRETACIÓN Y CLASIFICACIÓN

1. OBJETIVOS GENERALES

- Capacitar al estudiante en el uso de la fotografía aérea como herramienta fundamental para el estudio y gestión de los recursos naturales y forestales.
- Desarrollar la capacidad de análisis crítico y síntesis para la identificación, delimitación y clasificación de coberturas vegetales y elementos del paisaje.
- Fomentar el uso de metodologías estandarizadas de fotointerpretación que permitan la generación de cartografía.

2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Dominar el uso del estereoscopio de espejos para la observación tridimensional del terreno.
- Identificar las variables cualitativas de la imagen (forma, tamaño, tono, textura, sombra, patrón y sitio) aplicadas a la discriminación de especies arbóreas y ecosistemas.
- Elaborar una leyenda de clasificación adaptada a la realidad ecológica del área de estudio.

3. MATERIAL REQUERIDO

- Estereoscopio de espejos.
- Par estereoscópico de fotografías aéreas.
- Barra de paralaje.
- Regla de 50 cm de longitud.

- Marcadores.
- Cinta adhesiva.

4. INTRODUCCIÓN

La fotointerpretación es el arte o ciencia de examinar las imágenes de los objetos fotografiados con el propósito de identificarlos, deducir su significado y valorarlos según el fin que se persigue. Menendez et. Al. (2009).

La enseñanza de la fotointerpretación y la clasificación de imágenes buscan que el estudiante sea capaz de extraer información territorial confiable a partir de fotografías aéreas e imágenes satelitales y traducirla en mapas temáticos útiles para la gestión del territorio y los recursos naturales.

La fotointerpretación se entiende como el examen sistemático de imágenes (tradicionalmente fotografías aéreas, hoy también imágenes de satélite de alta resolución) para identificar objetos, delimitar unidades del territorio y analizar sus relaciones espaciales. Es una técnica que complementa el trabajo de campo, permitiendo obtener una visión de conjunto del medio natural y antrópico, optimizar el esfuerzo de muestreo y apoyar decisiones en ordenamiento territorial, inventarios forestales, agricultura y gestión ambiental. Chuvieco. (2010)

En la enseñanza se presenta normalmente como parte introductoria de la teledetección, abordando conceptos como fotolectura, fotoanálisis y fotointerpretación propiamente dicha, junto con los elementos de interpretación (tono, textura, forma, patrón, contexto, etc.). Desde el punto de vista formativo, se remarca el paso de una lectura descriptiva de la imagen a una interpretación explicativa, apoyada en conocimientos previos de geografía, geología, ecología o ciencias forestales.

5. FASES DE LA FOTOINTERPRETACIÓN

Tabla 2.1 División de la fotointerpretación. Fuente: Elaboración propia

Foto lectura	Es la fase inicial y más básica. Se trata de identificar objetos directamente visibles (como caminos, ríos o edificios) tratándolos como si fueran un mapa detallado. El observador usa su experiencia para reconocer formas y nombrarlas sin profundizar en el porqué de su ubicación o su relación con el entorno.
Foto análisis	En este nivel se realiza una separación y análisis detallado de los elementos. Se consideran características técnicas como: Métricas y descriptivas: Forma, tamaño, tono, color y textura. Espaciales: Patrones, sombras, posición y asociación entre elementos. En esta etapa se clasifican los objetos en unidades específicas, como tipos de suelo o infraestructura.
Foto interpretación	Es el proceso más complejo y completo. Integra las dos etapas anteriores y añade un análisis deductivo e inductivo. Su objetivo es explicar lo observado: Relacionar los patrones con conocimientos científicos (geología, vegetación, etc.). Llegar a conclusiones: Entender procesos, estados actuales y posibles cambios en el territorio y generar productos: El resultado final suelen ser mapas temáticos e informes detallados.

6. ELEMENTOS DE INTERPRETACIÓN VISUAL DE IMÁGENES

6.1. Nitidez y resolución

Nitidez: una imagen nítida muestra bordes bien definidos entre caminos, parcelas, cauces y manchas de vegetación.

Ejemplo: en una foto aérea nítida se distingue claramente el borde entre un bosque denso y un cultivo; en una imagen movida ese límite se ve borroso y cuesta trazarlo.

Resolución espacial: indica el tamaño mínimo de objeto que se puede reconocer. Fernández et al., (2015).

Ejemplo: con imagen de alta resolución (30–50 cm) se diferencian calles, veredas y hasta hileras de árboles; con una de baja resolución (10–30 m) solo se distinguen grandes manchas de uso del suelo (urbano, agrícola, forestal).

6.2. Tono y color

El tono y el color constituyen dos de los elementos fundamentales del análisis visual en fotointerpretación y teledetección, entendidos como la manifestación perceptible de la

respuesta espectral que cada objeto o cobertura presenta frente a la radiación electromagnética registrada por el sensor. El tono se define, en sentido estricto, como la gradación de grises que un objeto exhibe en una imagen pancromática o en una banda individual, resultado directo de su reflectancia relativa en el rango espectral captado: superficies con alta reflectancia —como suelos desnudos secos o afloramientos rocosos claros— se registran en tonos claros, mientras que cuerpos de agua profunda o vegetación densa con alta absorción en determinadas longitudes de onda tienden a tonos oscuros. Este atributo resulta especialmente sensible a factores externos que pueden inducir variabilidad no atribuible al objeto mismo, como el ángulo de iluminación solar, la humedad del suelo, la fenología de la vegetación o la calibración radiométrica del sensor, razón por la cual su interpretación exige siempre un análisis contextual y comparativo dentro de la misma escena.

El color, por su parte, surge de la combinación de tres bandas espectrales asignadas a los canales rojo, verde y azul de un sistema de despliegue aditivo, y puede presentarse en composición de color verdadero —cuando la asignación respeta la correspondencia con el espectro visible humano— o en falso color, cuando se combinan bandas del infrarrojo cercano, infrarrojo medio u otras regiones no visibles con el objeto de resaltar contrastes espectrales imperceptibles al ojo humano. La composición en falso color infrarrojo, con la banda del infrarrojo cercano asignada al canal rojo, es la más utilizada en monitoreo de cobertura vegetal, ya que la vegetación sana —con su característica alta reflectancia en el infrarrojo cercano debido a la estructura celular del mesófilo— se despliega en tonalidades rojas intensas, permitiendo diferenciar con claridad estados fisiológicos, densidad de dosel y tipos de cobertura que resultarían indistinguibles en una composición de color natural.

6.3. Textura

La textura constituye el elemento de análisis visual que describe la frecuencia e intensidad con que varía el tono dentro de un área homogénea de la imagen, es decir, el patrón de rugosidad o suavidad aparente que resulta de la agregación de múltiples elementos individuales demasiado pequeños para ser identificados por separado a la escala de observación. Mientras el tono y el color informan sobre la respuesta espectral de un objeto puntual, la textura aporta información sobre la disposición espacial y la heterogeneidad interna de un conjunto de objetos.

Textura: aspecto de la superficie según la repetición de tonos y formas; puede ser lisa, rugosa, moteada, lineal, etc. Pinilla. (1995).

Ejemplo: un embalse o lago tiene textura muy lisa y homogénea; un bosque adulto presenta textura rugosa por las copas; un cultivo en surcos muestra textura lineal o bandeada.

La textura ayuda a diferenciar coberturas con tonos similares.

Ejemplo: dos áreas de vegetación con tono parecido pueden distinguirse porque una es muy homogénea (plantación forestal) y la otra muy heterogénea (monte nativo).

6.4. Forma y tamaño

Factores importantes para el reconocimiento de los objetos y es afectado por la escala del fotograma y poder de resolución del sensor. Menendez et. Al. (2009).

La forma constituye el elemento de reconocimiento que un objeto presenta cuando es observado en planta, es decir, la proyección bidimensional de su geometría real sobre el plano de la imagen. Se trata de uno de los criterios más directos y confiables en fotointerpretación, dado que numerosos objetos —particularmente aquellos de origen antrópico— poseen formas geométricas regulares y predecibles que los distinguen inmediatamente de las coberturas naturales: los lotes agrícolas se manifiestan como polígonos rectangulares o circulares (estos últimos característicos del riego por pivote central), las rutas y caminos como líneas rectas o de curvatura suave y continua, y las obras de infraestructura urbana como formas ortogonales reticuladas. Las coberturas naturales, en cambio, tienden a exhibir contornos irregulares y sinuosos: los cursos de agua presentan trazados meandriformes y las masas boscosas naturales despliegan límites difusos que responden a la variabilidad topográfica, edáfica e hídrica del terreno, en clara oposición a los bordes rectos y netos que caracterizan a una plantación forestal o a un desmonte reciente con fines productivos.

El tamaño, por su parte, es el elemento que permite estimar las dimensiones reales de un objeto a partir de su representación en la imagen, mediante la aplicación de la escala o de la resolución espacial del sensor conocida. Su valor resulta crítico porque numerosos objetos comparten forma y tono similares pero se diferencian inequívocamente por su magnitud: un cuerpo de agua de reducidas dimensiones puede corresponder a una represa predial o a un bebedero de ganado, mientras que una superficie de forma análoga pero de escala considerablemente mayor probablemente constituya un embalse o una laguna natural. En el análisis de coberturas vegetales, el tamaño del polígono discriminado —evaluado siempre en relación con la escala de trabajo y la unidad mínima cartografiable definida por la metodología aplicada— resulta determinante para distinguir un desmonte de pequeña escala, muchas veces no autorizado y de difícil detección, de un cambio de uso del suelo de magnitud significativa sujeto a control.

6.5. Patrón y disposición

Patrón: arreglo espacial (alineado, cuadricular, radial, disperso, etc.). que conforman los objetos en su distribución natural o artificial. Menendez *et al.* (2009).

El patrón se define como la disposición espacial repetitiva y ordenada con que se organizan en el terreno objetos individuales de forma, tamaño y tono similares, constituyendo un elemento de reconocimiento de orden superior al de la forma aislada, ya que su valor diagnóstico reside precisamente en la regularidad o irregularidad con que esos elementos se repiten dentro de un área determinada. Los patrones de origen antrópico tienden a manifestarse como arreglos geométricos sistemáticos y periódicos.

Las coberturas naturales, en contraste, presentan patrones aleatorios o condicionados por factores ambientales de variabilidad continua.

Ejemplo: un barrio urbano presenta patrón cuadricular de manzanas y calles; una plantación forestal muestra patrón de hileras regulares; el monte nativo aparece con patrón irregular y discontinuo.

6.6. Sombra

La sombra constituye un elemento de reconocimiento de naturaleza dual en fotointerpretación, ya que si bien oculta información espectral y tonal del área que cubre —representando en principio una limitación para el analista—, aporta simultáneamente información geométrica indirecta de enorme valor diagnóstico sobre la altura, el volumen y el perfil estructural de los objetos que la proyectan. La longitud de la sombra, medida sobre la imagen y corregida según la escala de trabajo, permite estimar mediante relaciones trigonométricas simples la altura real de un objeto.

Ejemplo: la sombra alargada de una fila de eucaliptos ayuda a identificar la altura relativa de los árboles.

7. CLAVES DE IDENTIFICACIÓN

Una clave es una guía sistemática que ayuda al fotointérprete a identificar y clasificar objetos o unidades del terreno en una imagen, utilizando criterios visuales organizados de manera lógica. Se apoya en el principio de analogía: se asume que una misma categoría de objeto (por ejemplo, bosque denso, cultivo de maíz, zona urbana) tiende a producir imágenes con características fotográficas similares en tono, textura, forma, patrón y contexto. De este modo, la clave funciona como un "diccionario" que traduce lo que se ve en la foto (rasgos visuales) en significado temático (tipo de cobertura, uso del suelo, unidad geomorfológica, etc.).

En la práctica, muchas claves se estructuran en forma similar a las usadas en botánica: se presenta una serie de preguntas o pares de opciones excluyentes (por ejemplo, "textura lisa" vs. "textura rugosa"; "forma regular" vs. "forma irregular") y, según la respuesta, se avanza por una rama u otra hasta llegar a una clase final. Esto permite que distintos intérpretes, incluso con distinta experiencia, sigan un procedimiento más objetivo y lleguen a resultados consistentes.

En síntesis, la clave de interpretación estandariza el proceso, reduce la subjetividad y facilita la repetibilidad de la fotointerpretación en estudios de inventario, ordenamiento territorial o evaluación de impactos.

7.2. Clave dicotómica

Una clave dicotómica es una secuencia organizada, de manera lógica, en la que se expresan características opuestas (duales y excluyentes).

Una clave dicotómica de interpretación es una herramienta estructurada que guía paso a paso al fotointérprete mediante una serie de decisiones binarias (dos opciones excluyentes en cada paso), hasta llegar a la identificación de una clase u objeto concreto en la imagen aérea o satelital. Cada "nodo" de la clave plantea una pregunta muy simple del tipo "¿textura lisa o rugosa?", "¿forma regular o irregular?", "¿tono claro u oscuro?", y según la respuesta se sigue una rama u otra hasta terminar en una categoría única, como "agua superficial", "bosque denso", "cultivo" o "área urbana". La lógica es dividir sucesivamente un conjunto amplio de posibles clases en subconjuntos cada vez más pequeños, usando criterios visuales claros, hasta que solo quede una opción coherente con las características observadas.

En fotointerpretación, estas claves se basan en los elementos clásicos de interpretación: tono/color, textura, forma, tamaño, patrón, sombra, localización y asociación con otros elementos del paisaje.

Una de las clasificaciones mas conocidas es la de Bosque - No Bosque.

Esta clasificación es, en esencia, el proceso de asignar a cada unidad espacial de una imagen —sea un píxel individual o un polígono delimitado manualmente— una etiqueta binaria que indica si dicha unidad corresponde o no a cobertura Boscosa, según una definición previamente establecida de qué constituye "bosque". Conceptualmente, no se trata de una tarea espectral trivial, porque el bosque no es una clase con una firma radiométrica única y constante, sino un gradiente continuo de biomasa, densidad de copas etc., que va desde el suelo desnudo, pasando por pastizal, matorral y renoval, hasta el bosque maduro de dosel cerrado.

El fundamento físico que hace posible esta discriminación es la respuesta espectral diferencial de la vegetación leñosa persistente frente al resto de las coberturas, particularmente evidente en la región del infrarrojo cercano, donde la estructura celular del mesófilo foliar genera una reflectancia elevada y sostenida a lo largo del año en especies leñosas perennes, en contraste con la señal más variable y estacionalmente dependiente de cultivos, pastizales o vegetación herbácea.

8. NOCIONES DE ESCALA

La escala en imágenes satelitales y fotografías aéreas se define como la relación proporcional entre una distancia medida en la imagen y la distancia real correspondiente en el terreno. Esta relación permite estimar tamaños reales a partir de las representaciones gráficas. Zarzalejo. (2003).

El tema escala lo vamos a estudiar en profundidad en el trabajo práctico N° 3, en esta oportunidad presentamos un cuadro donde se pueden ver los tipos de escala.

Tabla 2.2 *Tipos de escala y usos. Fuente: Elaboración propia.*

Escala pequeña.	≤1:50.000	Muy general se reconocen solo grandes unidades	Levantamiento de reconocimiento regional, cartografía general 1:50.000 – 1:100.000 estudios de contextos geológicos, grandes unidades de uso / cobertura.
Escala Media	1:40.000 -1: 15.000 a veces 1:25.000- 1:15.000	Detalle intermedio se distinguen unidades de paisaje y uso de suelo	Levantamiento semi detalle mapas 1:25.000- 1:15.000, fotointerpretación en geología suelos y aspectos forestales, clasificación de bosques y curvas de nivel de 10m – 5 m
Escala Grande	1:10.000- 1:5000- 1:2000- 1:1000	Se reconocen objetos pequeños, como calles, casas, hileras de árboles	Levantamiento detallado para ingeniería de planificación urbana, estudios forestales detallados, estudio de capacidad de uso de suelo

9. ACTIVIDADES

- Identificación de elementos en fotografías aéreas:
- A partir de las fotografías aéreas entregadas por la cátedra se solicita que el estudiante:
- identifique, marque y describa al menos cinco elementos de interpretación visual: tono/color, textura, forma, tamaño, patrón, sombra y asociación, ejemplificándolos con objetos concretos de la imagen (cauces, parcelas, áreas urbanas, bosques, etc.).
- Que el estudiante elabore una clave que le permita diferenciar categorías de cobertura: cultivo, plantación, monte nativo, utilizando como criterios tono/color, textura, patrón, mostrar el recorrido de decisiones hasta llegar a cada clase de cobertura.
- Dada una fotografía aérea de un paisaje mixto (rural–forestal), solicitar al estudiante que:
- Delimite unidades territoriales relativamente homogéneas (por ejemplo: área cultivos, monte nativo, cauces y/o cuerpos de agua).
- Elabore una leyenda clara para todas las unidades identificadas.

PRÁCTICO

03 DETERMINACION DE ESCALA EN FOTOGRAFIAS AÉREAS MEDICIONES Y CONCEPTO DE PARALAJE.

1. OBJETIVOS GENERALES

- Capacitar a los estudiantes en el dominio de las propiedades geométricas de la fotografía aérea como documento métrico para la gestión del territorio.
- Proporcionar las herramientas matemáticas y metodológicas necesarias para extraer información cuantitativa (distancias, áreas y alturas) de forma precisa.

2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Comprender el concepto de escala en fotografías aéreas y diferenciarlo de la escala de mapas, reconociendo los factores que la afectan (altura de vuelo, distancia focal y relieve).
- Aplicar procedimientos de gabinete para determinar la escala media de una fotografía aérea mediante comparación con un mapa y mediante el uso de los parámetros de cámara y vuelo.
- Realizar mediciones de distancias, perímetros y áreas sobre fotografías aéreas, convirtiendo correctamente los valores obtenidos en la fotografía a magnitudes reales en el terreno.
- Introducir y afianzar el concepto de paralaje como base de la visión estereoscópica, identificando su relación con la altura de los puntos del terreno.
- Utilizar un estereoscopio y barra de paralaje, para medir diferencias de paralajes y alturas. Aplicar el concepto de paralaje estereoscópico para la determinación de diferencias de nivel y perfiles topográficos.
- Integrar los resultados de escala, mediciones planimétricas y determinaciones altimétricas a partir de la paralaje, discutiendo su utilidad en aplicaciones concretas de ingeniería forestal, ordenamiento territorial y estudios ambiental.

3. MATERIAL REQUERIDO

- Fotografías aéreas.
- Estereoscopio de espejos.
- Barra de paralaje.
- Marcadores

4. INTRODUCCIÓN

La fotografía aérea, a diferencia de un mapa, tiene una proyección cónica central del área fotografiada. Esta distinción es fundamental para los estudiantes de Ingeniería Forestal y Ecología, ya que implica que la imagen contiene deformaciones geométricas inherentes que deberían ser corregidas o compensadas al realizar cualquier medición. López-Cuervo. (1996).

En el ámbito de la ingeniería forestal y de los recursos naturales, las fotografías aéreas constituyen una fuente de información extremadamente valiosa para describir, cuantificar y analizar el estado de la superficie terrestre, permitiendo identificar coberturas, estructuras del relieve y elementos antrópicos con un grado de detalle que complementa y en muchos casos optimiza el trabajo de campo.

Sin embargo, para que esa información resulte útil y cuantificable, el estudiante debe comprender la geometría de la fotografía aérea, el significado de la escala, la forma correcta de realizar mediciones métricas y la manera en que la paralaje se relaciona con el relieve y la altura de los objetos.

Entonces, debemos entender que la escala de una fotografía aérea expresa la relación constante (o aproximadamente constante) entre las distancias medidas en la imagen y las distancias reales en el terreno, siendo un puente esencial entre el plano fotográfico y el mundo real. A diferencia de un mapa cartográfico convencional, cuya escala se considera uniforme en toda su extensión, la escala en una foto aérea no es constante debido a las deformaciones radiales, producidas por la variación de la distancia objeto-sensor. Por ello, el estudiante debe aprender no solo a calcular una escala media a partir de parámetros de vuelo, sino también a determinarla en forma práctica comparando distancias conocidas entre la fotografía y un mapa de referencia. Esta comprensión permite que cualquier medición sobre la imagen, distancias, perímetros, áreas pueda traducirse en magnitudes reales que apoyen tareas como estimación de superficies, delimitación de parcelas, cálculo de longitudes de caminos etc.

Por otra parte, el paralaje constituye el fenómeno geométrico que sustenta la visión estereoscópica y, en consecuencia, la posibilidad de calcular alturas mediante pares de fotografías aéreas. El desplazamiento aparente de un mismo punto entre la foto izquierda y la foto derecha, observado a través de un estereoscopio y medido con instrumentos como la barra de paralaje, se vincula directamente con la diferencia de altura entre puntos del terreno. De esta manera, el estudiante no solo observa el modelo en tres dimensiones, sino que entiende cómo la geometría de la toma (base aérea, altura de vuelo, distancia focal) se traduce en información cuantitativa de altitudes. Integrar el concepto de paralaje con la determinación de escala y con las mediciones planimétricas sobre las fotografías permite construir una base sólida para trabajos más avanzados, tales como generación de modelos digitales de terreno, elaboración de curvas de nivel o estimación de alturas de vegetación y estructuras.

5. CONCEPTO DE ESCALA

En términos generales, la escala se define como la relación que vincula una distancia medida en una fotografía sobre la misma distancia medida en el terreno entonces:

$$E = d / D$$

Donde:

E es la escala de la fotografía (expresada habitualmente como fracción, por ejemplo 1:20.000).

d es la distancia medida sobre la fotografía.

D es la distancia homóloga medida en el terreno.

Podemos definir Escala en fotografías aéreas como una fracción, una ratio, una división, donde el denominador es un numero mucho mayor que 1 (uno). También podemos decir que la escala en fotografías aéreas: es la relación existente entre una distancia a medida en la fotografía y su correspondiente distancia A en el terreno. Menendez *et al.* (2009).

Esta escala en fotografías aéreas Verticales tomadas a una altura constante y sobre terreno perfectamente plano (toma ideal), es aproximadamente constante en toda la imagen y se expresa en forma fraccionaria (1:10 000, 1:25 000, etc.).En la práctica, el vuelo no es perfectamente constante en términos de alturas y el terreno no es totalmente plano, esto produce que la escala varíe ligeramente de un punto a otro, recordemos que la escala depende de la distancia focal y de la altura de vuelo, Quintana *et. al.* (2008), por lo que se

aconseja trabajar con una escala media, para ello hay que considerar las cotas máxima y mínima del terreno para calcular una altura media del terreno, obteniéndose de esta manera una escala media para el vuelo.

5.1. Determinación de escala a partir de parámetros de vuelo

Un método frecuente usa los parámetros geométricos de la toma: distancia focal de la cámara y altura de vuelo sobre el terreno medio. Si se conoce la altura de vuelo sobre el nivel del mar H y la cota media del terreno hm se obtiene la altura de vuelo sobre el terreno

$$Hn = \frac{\mathbf{f}}{\mathbf{Hm}}$$

Donde:

f es la distancia focal.

Hm es la altura media

En la práctica se obtiene H y f de la información del vuelo y de la cámara. Este método es especialmente útil cuando no se dispone de medidas directas en campo.

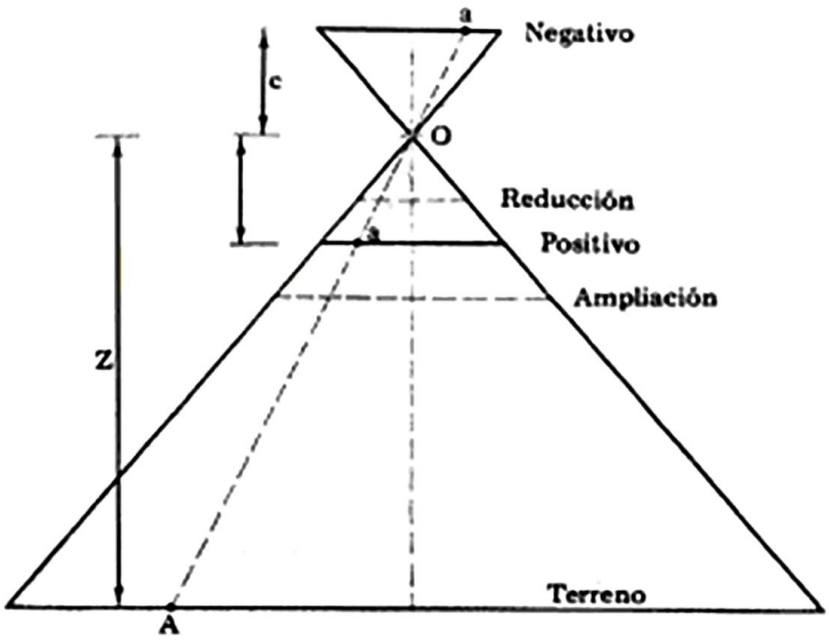


Figura 3.1 Determinación de c y z. Fuente: Elaboración propia.

5.2. Determinación de escala a partir de un mapa o del terreno.

La escala es la relación de proporción entre una distancia medida en el mapa y su distancia correspondiente en el terreno real. Se expresa generalmente como una razón numérica adimensional Este método consiste en comparar distancias entre puntos identificables en la foto y en el terreno o en un mapa de escala conocida.

Si medimos una distancia entre dos puntos en el mapa y esos mismos puntos en una fotografía, y se conoce la escala del Mapa, se obtiene la escala de la fotografía.

La escala siempre es un valor absoluto adimensional. Ejemplo. Escala =1/20.000

$$\frac{dm}{df} = \frac{Em}{Ef} = Ef = \frac{Em * df}{dm}$$

Donde:

dm = distancia en el mapa
df = distancia en la fotografía
Em = Escala del Mapa
Ef = Escala de la fotografía.

También es posible obtener la escala de una fotografía si conocemos una distancia real entre puntos considerados en el terreno.

Para mejorar la precisión se recomienda repetir el cálculo con dos o más parejas de puntos y promediar las escalas resultantes para obtener la escala media de la fotografía.

6. PARALAJE ESTEREOSCÓPICA

El paralaje es el fenómeno óptico-geométrico que constituye el fundamento físico de toda percepción de profundidad a partir de pares fotográficos superpuestos, y se define como el desplazamiento aparente de la posición de un mismo punto del terreno cuando este es observado desde dos puntos de toma distintas a lo largo de una línea de vuelo, y es la base de la visión estereoscópica y del cálculo de alturas en fotogrametría.

En términos prácticos, es la diferencia de la posición de un punto homólogo, medida a lo largo de la dirección de la base aérea (línea de vuelo), entre las dos imágenes que forman el par estereoscópico

El paralaje se mide en fracciones de milímetros, cuando se dispone de un par de fotos con recubrimiento longitudinal, cada punto del terreno aparece duplicado, y la pequeña

diferencia de posición entre ambas imágenes es la paralaje estereoscópica, que el ojo interpreta como diferencia de relieve cuando se observa el par con un estereoscopio.

Se suele distinguir entre paralaje estereoscópica absoluta (o paralaje X) y paralaje diferencial o relativa. La paralaje absoluta de un punto es la distancia, sobre la foto base, entre la imagen del punto principal y la imagen homóloga del punto, medida paralelamente a la línea de vuelo; la paralaje relativa entre dos puntos es simplemente la diferencia entre sus paralajes absolutas, y está directamente relacionada con la diferencia de altura entre ellos.

6.1. Factores que influyen en la paralaje

El valor de la paralaje estereoscópica depende de varios factores geométricos de la toma. Entre los más importantes se encuentran:

- La altura de vuelo sobre el terreno (H),
- la distancia focal de la cámara (f),
- la base aérea o distancia entre estaciones de toma (B)
- La altura del punto sobre el plano de referencia (Z).

Las fotografías deben estar a la misma escala. En todo caso, la escala entre dos fotografías sucesivas no debe diferir en más del 5%.

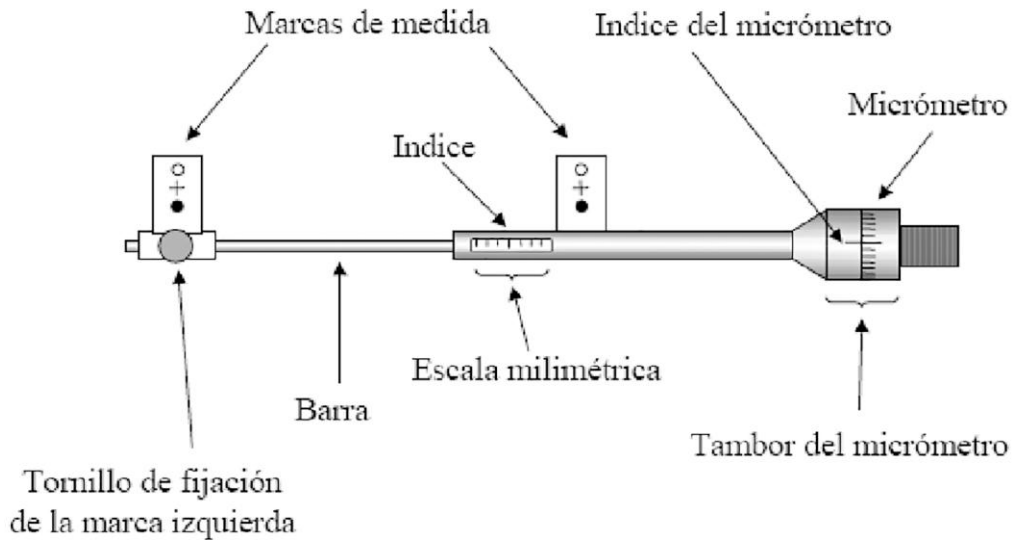


Figura 3.2. Barra de paralaje y sus partes. Fuente: Elaboración propia.

6.2. Formulas básicas de paralaje

La paralaje absoluta de un punto, magnitud primaria de todo el sistema, se define como la diferencia entre sus coordenadas fotográficas —medidas paralelamente a la línea de vuelo— en las dos fotografías del par.

$$p = x - x'$$

Cuando la toma es aproximadamente vertical y se adopta un plano de referencia horizontal, esta paralaje se relaciona con la geometría de vuelo

$$p = \frac{f \cdot B}{H - h}$$

expresión que permite, despejando h, calcular la elevación absoluta de un punto conocidas la altura de vuelo H, la base aérea B, la distancia focal f y la paralaje medida p. Esta es, en rigor, la fórmula fundamental de la paralaje absoluta,

$$h = H - \frac{f \cdot B}{p}$$

Cuando se trabaja con pares de fotografías aéreas superpuestas, no es la paralaje absoluta de un único punto la que interesa en la práctica, sino la diferencia de paralaje entre dos puntos, ya que esta magnitud permite determinar desniveles sin necesidad de mediciones directas en terreno. La paralaje absoluta p de un punto se define como el desplazamiento aparente de su posición entre ambas fotografías del par, medido paralelamente a la línea de vuelo:

A partir de esta definición se distinguen dos puntos de trabajo: el punto de referencia, de altura conocida Zr y paralaje medida pr, y el punto de interés, de altura desconocida Z y paralaje medida p, ambos determinados sobre el mismo par estereoscópico con la barra de paralaje.

$$\Delta p = p - p_r$$

La diferencia de altura entre ambos puntos, ΔZ = Z − Zr, se calcula entonces mediante:

$$\Delta h = \frac{H \cdot \Delta p}{p_r + \Delta p}$$

Donde:

Δp = p − pr es la diferencia de paralaje entre el punto de interés y el punto de referencia, obtenida directamente restando las lecturas de la barra de paralaje sobre ambos puntos.

H es la altura de vuelo.

pr es la paralaje absoluta medida en el punto de referencia.

Esta expresión muestra que la diferencia de altura es proporcional tanto a la diferencia de paralaje Δp como a la altura de vuelo H, y que su precisión depende críticamente de la exactitud con que se mide Δp, habitualmente en fracciones de milímetro sobre el par fotográfico.

7. ACTIVIDADES ESCALA

En una fotografía aérea la distancia entre dos mojones de un camino es de 3,2 cm. En el terreno se sabe que esos mojones están separados 1.600 m.

- Calcule la escala de la fotografía.
- Exprese el resultado como fracción (1: n) e indique cuántos metros representa 1 cm en la foto.

Una fotografía aérea fue tomada con una cámara de distancia focal f=152 mm desde una altura sobre el nivel del mar H=2.150m. La cota media del terreno en el área fotografiada es de 350 m s.n.m.

- Calcule la altura de vuelo sobre el terreno medio Hn.
- Determine la escala aproximada de la fotografía

En una fotografía, la distancia entre las esquinas opuestas de un lote rectangular mide 5,6 cm. La foto tiene escala 1:25.000.

- Calcule la distancia real entre esas esquinas en metros.
- Si el lado menor del lote mide en la foto 2,1 cm, ¿cuál es la longitud real de ese lado?

En una fotografía de escala desconocida, la distancia entre dos puentes de un río mide 4,0 cm. A partir de coordenadas geográficas de ambos puentes se ha calculado que la distancia real entre ellos es de 3,6 km.

- Determine la escala de la fotografía.
- Exprese cuántos kilómetros del terreno representa 1 cm en la foto.

En una serie de fotografías aéreas de la misma zona se trabajó con dos alturas de vuelo:

Vuelo A: Hn=1.500 m f=150 mm

Vuelo B: Hn=3.000 m f =150 mm

- Calcule la escala aproximada de cada vuelo.
- Indique cuál vuelo proporciona mayor nivel de detalle y justifique con las escalas obtenidas.

En un mapa topográfico a escala 1:100.000, dos rutas se cruzan a 24 cm de distancia. Para planificar un vuelo fotogramétrico se desea que esa distancia aparezca de 8 cm en la fotografía aérea.

- Calcule la escala que debería tener la fotografía.
- Indique si esta escala es más grande o más pequeña que la del mapa.

En una fotografía aérea se mide un camino recto que en la imagen tiene 9,0 cm. Se conoce que en el terreno ese camino mide 3,15 km.

- Determine la escala de la fotografía.
- ¿Cuánto mediría ese mismo camino en un mapa a escala 1:50?000?

Una fotografía aérea vertical cubre completamente una parcela cuadrada, cuya superficie real es de 25 ha. En la foto, cada lado del cuadrado mide 2,5 cm.

- Calcule la longitud real de un lado del cuadrado en metros.
- A partir de ello, determine la escala de la fotografía.

Una foto aérea fue tomada con f=210f=210 mm desde una altura de vuelo sobre el nivel del mar H=3000m. Según un mapa, la cota media del área es de 800 m s.n.m.

- Calcule la altura de vuelo sobre el terreno Hn.
- Estime la escala de la fotografía.
- Explique qué ocurriría con la escala si se repitiera el vuelo a la misma altura, pero sobre un área cuya cota media es 1.400 m s.n.m.

8. ACTIVIDADES PARALAJE

- Preparación del par estereoscópico: Oriente el par de fotografías aéreas estereoscópicas y fíjelas con cinta adhesiva en la mesa estereoscópica o visor, asegurando que coincidan perfectamente en los puntos de referencia.
- Selección de puntos de control: Examine el par estereoscópico e identifique 5-10 detalles bien definidos y distribuidos uniformemente (ej. esquinas de edificios, cruces de caminos o copas de árboles). Enumérelos (P1, P2, etc.) y anote su ubicación aproximada en cada foto.
- Posicionamiento inicial del punto: Para cada punto seleccionado, ubique su correspondiente en ambas fotos según su nomenclatura. Coloque la marca de visión izquierda de la barra de paralaje en el centro del campo de visión, exactamente sobre el detalle en la fotografía izquierda.
- Ajuste de paralaje en dirección Y: Gire tornillo micrométrico de la barra de paralaje, alrededor de la marca izquierda para desplazar la marca de medición derecha en dirección Y (vertical), hasta eliminar cualquier desplazamiento relativo entre las dos marcas sobre el detalle. Verifique que no haya flotación aparente.
- Ajuste fino en dirección X e Y: Usando el tornillo micrométrico, desplace la marca derecha en dirección X (horizontal) hasta que ambas marcas coincidan en un punto flotante único sobre el terreno.
- Verifique que no haya desplazamiento en Y.
- Asegúrese de que la marca izquierda permanezca fija sobre el detalle.
- Un pequeño movimiento en X de la marca derecha hará que el punto flotante "suba" o "baje"; ajuste hasta superposición perfecta.
- Contacto con el terreno: Baje la marca flotante hasta tocar la superficie del terreno, moviéndola siempre en el mismo sentido (hacia abajo). Confirme:
- La marca izquierda está exactamente sobre el detalle elegido.
- En este momento, ambas marcas identifican el mismo punto terrenal preciso.
- Lectura de la paralaje: En la escala graduada de la barra, lea el valor principal en milímetros (con el índice correspondiente). En el tornillo micrométrico, lea la fracción en décimas y centésimas de milímetro. Registre la lectura de paralaje (ej. 45.23 mm) para ese punto.
- Repetición para otros puntos: Repita los pasos 3-7 para cada punto seleccionado.

- Segunda lectura de verificación: Realice una segunda serie de mediciones para todos los puntos, pero evite medir el mismo punto consecutivamente (altere el orden para minimizar sesgos). Promedie las dos lecturas por punto.

Cálculo de alturas: Use la fórmula de paralaje para convertir las lecturas en alturas relativas.

PRÁCTICO

04

IMÁGENES SATELITALES. PLATAFORMAS Y SENSORES.

1. OBJETIVOS GENERALES

Presentar los conceptos básicos de las plataformas de distribución de imágenes satelitales (USGS EarthExplorer, Copernicus, CONAE, Land Viewer, INPE, Google Earth Engine).

Describir el procedimiento de registro, búsqueda, selección y descarga de imágenes Landsat y Sentinel desde sus plataformas oficiales, y comparar sus principales características (tipo de sensor, resolución espacial/espectral, costo, modo de acceso y periodicidad de revisita) para que el estudiante pueda elegir la más adecuada según las necesidades específicas de su proyecto, evaluando también criterios como formatos, nubosidad, niveles de procesamiento y compatibilidad con software GIS como ERDAS Imagine, ArcGIS.

2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Identificar y describir las funcionalidades principales de USGS EarthExplorer, y sus catálogos de datos disponibles (Landsat 8/9).
- Descargar imágenes Sentinel 2, de la plataforma Copernicus Browser.
- Obtener imágenes de la plataforma de CONAE, en argentina e INPE en Brasil.

3. MATERIAL REQUERIDO

- Computadora.
- Acceso a Internet.
- Acceso a diferentes plataformas de adquisición gratuita de imágenes.

3. INTRODUCCIÓN

Las imágenes satelitales son una fuente esencial de información para el análisis ambiental, la gestión de recursos naturales y el estudio de fenómenos como por ejemplos incendios forestales y cambios de uso etc. En la actualidad existen múltiples plataformas digitales que permiten descargar estas imágenes de forma gratuita o bajo licencias académicas, entre las que destacan USGS EarthExplorer para Landsat, Copernicus Open Access Hub para Sentinel, Land Viewer, en argentina tenemos la Comisión Nacional de Asuntos Espaciales (CONAE), en Brasil tenemos el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, (INPE), por lo que conocer el procedimiento de descarga en cada una de estas plataformas es un paso previo indispensable para cualquier proyecto de teledetección y SIG.

Las imágenes satelitales representan una fuente invaluable de datos para el monitoreo ambiental, la gestión de recursos naturales y el análisis de fenómenos dinámicos, como tambien para incendios forestales, deforestación, urbanización y cambios de uso, por lo que se requiere una adecuada resolución temporal o frecuencia de revisita que asegure la provisión de imágenes en los momentos críticos. Calvo *et al.* (2012).

El análisis visual de las imágenes permite detectar, delinear e identificar objetos y/o fenómenos en una imagen e interpretar su significado.

La teledetección se define como la técnica que permite obtener información de objetos a distancia sin contacto físico, basándose en la interacción de la energía electromagnética con la superficie terrestre (Chuvieco, 2010). Es fundamental comprender y diferenciar el concepto de plataforma y sensor.

Plataforma que es el vehículo (satélite, avión, globo o Dron) que transporta el sensor, que es el instrumento encargado de captar la radiación. Pinilla, (1995).

El monitoreo ambiental a través de la teledetección ha emergido como un campo decisivo para la comprensión y gestión efectiva de los recursos naturales y los cambios en la cobertura terrestre. Este enfoque, respaldado por avances en algoritmos y tecnologías de teledetección, ofrece una herramienta poderosa para analizar imágenes satelitales y obtener información detallada sobre la distribución de la vegetación, el uso del suelo y otros aspectos ambientales. Pedenovi. (2024).

Plataformas como USGS EarthExplorer ofrecen acceso gratuito a datos Landsat desde 1972, ideales para estudios históricos de cambios ambientales. Copernicus Open Access Hub proporciona imágenes Sentinel 2, con alta frecuencia de revisita (cada 5-10 días o menor), y resoluciones de 60, 20 y hasta 10 metros, perfectas para monitoreo. Otras opciones incluyen NASA EarthData para MODIS y herramientas como Google Earth Engine para visualizacion y procesamiento en la nube.

4. BÚSQUEDA Y DESCARGA DE IMÁGENES

4.1. Descarga de imágenes a través de USGS de Earth Explorer

El sitio del USGS (United States Geological Survey) permite buscar, seleccionar y descargar imágenes satelitales de múltiples plataformas. En nuestro caso, lo utilizamos principalmente para acceder a la serie completa de imágenes Landsat, que abarca desde las históricas Landsat 3 MSS hasta las más recientes de la misión Landsat 9. El acceso se realiza a través de la plataforma Earth Explorer, disponible en: http://earthexplorer.usgs.gov/

Si es la primera vez que ingresa al sitio, deberá registrarse para poder descargar las imágenes. Para ello, haga clic en "Register", ubicado en el menú superior derecho, y complete los datos solicitados en el formulario. Si ya cuenta con un nombre de usuario y contraseña, simplemente ingrese a través de la opción "Login".

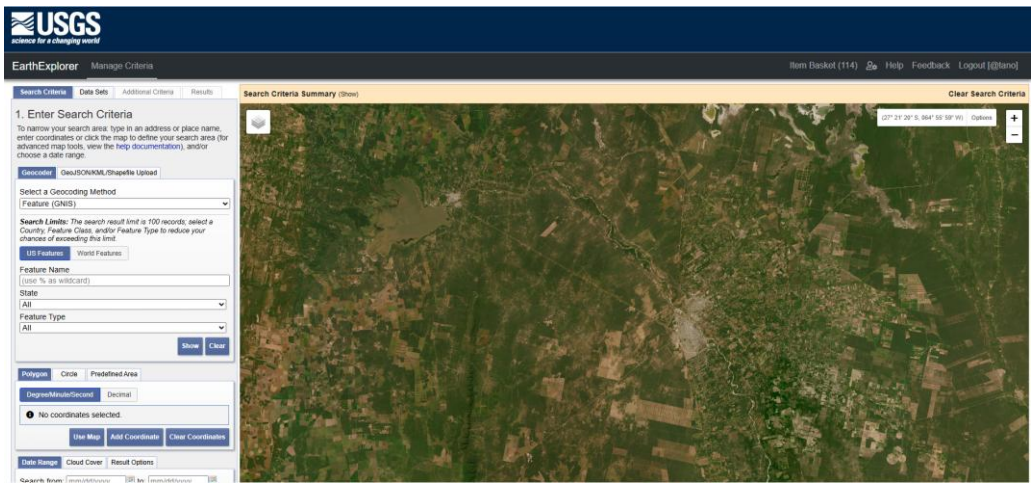


Figura 4.1 *USGS visor de datos geoespaciales.. Fuente: Earth Explorer.*

4.1.1. procedimiento de descarga

La pestaña "Search Criteria" (criterios de búsqueda) es la primera que aparece al ingresar al sistema, y permite definir el área de interés mediante distintos métodos de búsqueda. Las opciones disponibles son:

Buscar por "Address/Place", ingresando el nombre de un lugar o una dirección; por "Path/Row", especificando el path y row de la escena requerida; o por "Feature", a través de valores de coordenadas geográficas, ya sea en formato grados-minutos-segundos o en grados decimales. Alternativamente, es posible delimitar el área de interés cargando un shapefile (*.shp) previamente creado, teniendo en cuenta que el polígono no debe superar

los 30 vértices, o bien mediante un archivo KML/KMZ generado, por ejemplo, en Google Earth. Debajo de estas opciones se encuentra el campo para definir el rango de fechas o el mes específico sobre el cual se realizará la búsqueda.

A modo de ejemplo: si buscamos una escena determinada, podemos ingresar directamente los valores de path/row (229/80) para que el sistema recupere todas las imágenes disponibles para esa combinación.

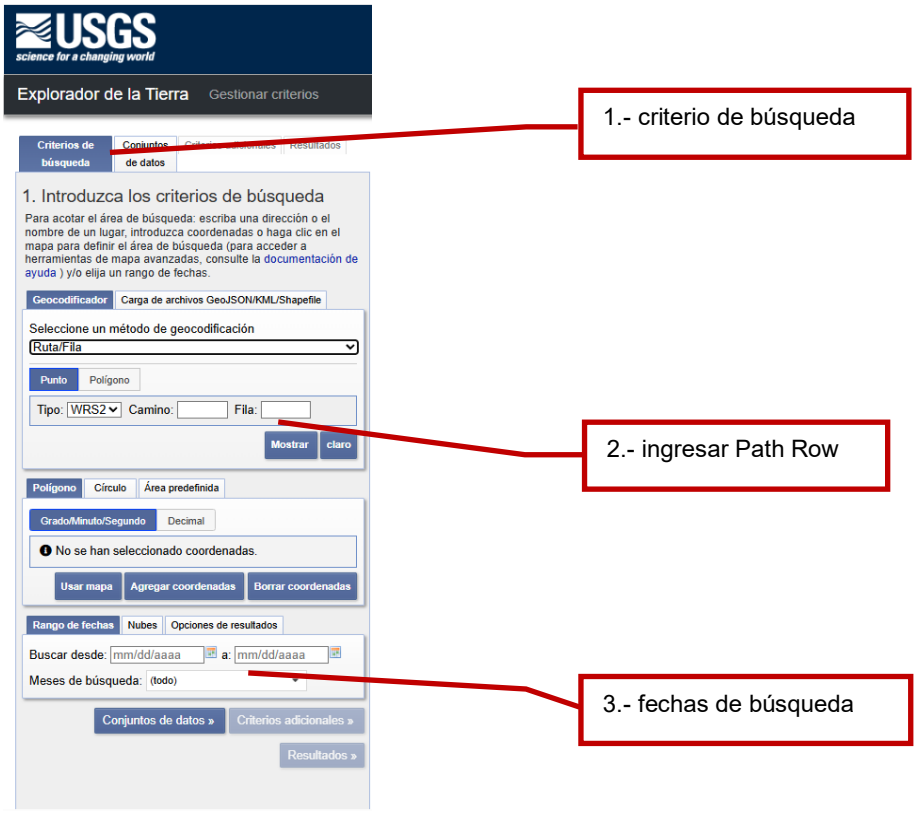


Figura 4.2 *Búsqueda por Path Row. Fuente: Earth Explorer.*

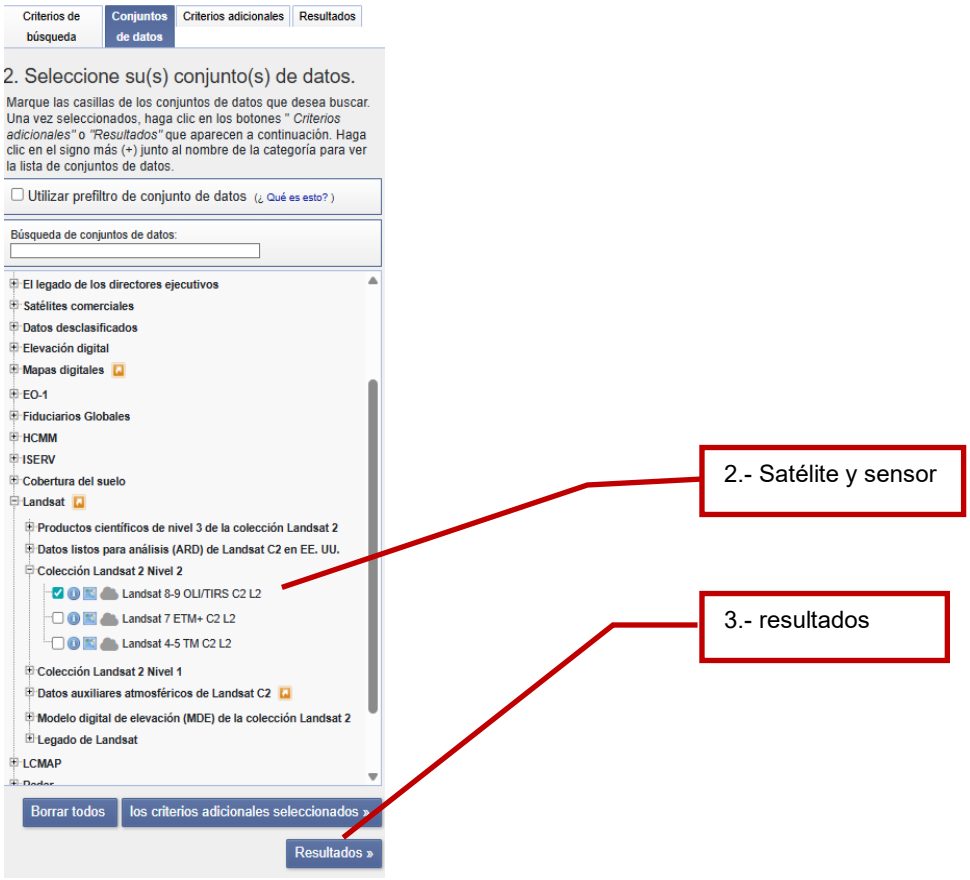


Figura 4.3 *Selección de la plataforma y sensor.*

Al presionar "Results" se despliegan los resultados de la búsqueda. Cabe destacar que Earth Explorer permite descargar imágenes Landsat 8 o 9 tanto con corrección atmosférica como sin ella, según se seleccione el nivel de procesamiento Level 1 o Level 2; este tema será abordado con mayor profundidad en la Serie Didáctica de Tratamiento Digital de Imágenes Satelitales. Pedenovi. (2024).



Figura 4.4 *Visualización de las imágenes disponibles.*

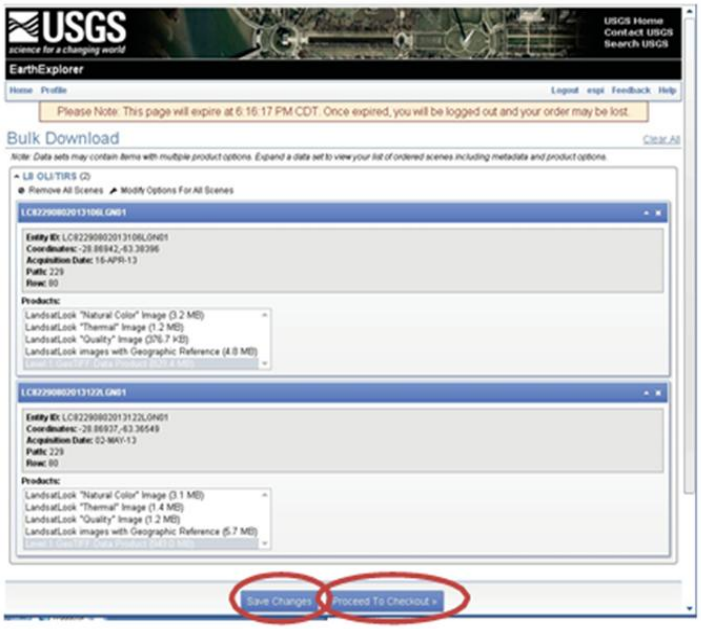


Figura 4.5 *Selección de descargas en conjunto.*

Opciones de descarga. Seleccionar Level 1 GeoTIFF. Debemos seleccionar la última opción.

Después nos aparece la ventana con la confirmación de la descarga.

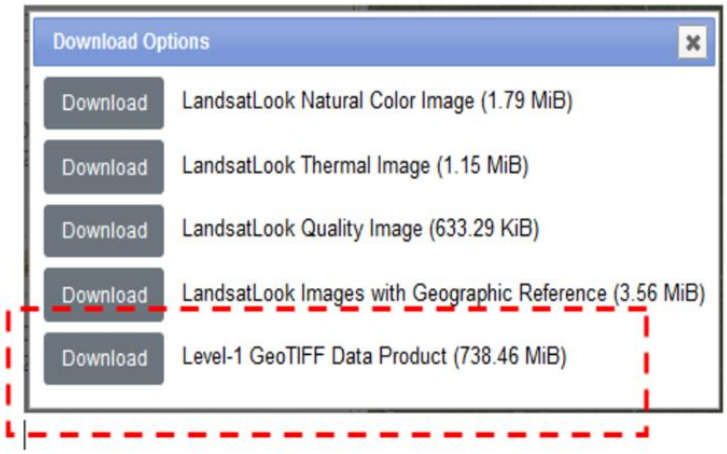


Figura 4.6 *Descarga de imagen con todas sus bandas.*

Para descargar varias imágenes de forma simultánea, se debe presionar el ícono "Add to Bulk Download" en cada escena de interés. A medida que se van agregando, la cantidad de imágenes seleccionadas se refleja en la parte superior derecha, en el "Item Basket". Una vez completada la selección, se presiona sobre el "Item Basket" y se despliega una nueva ventana con la orden de descarga correspondiente a las imágenes elegidas.

Antes de efectivizar la descarga, si la computadora está configurada para ello, el sistema solicitará indicar la carpeta de destino donde se guardarán las imágenes; caso contrario, la descarga se realizará por defecto en la carpeta de Descargas del equipo.

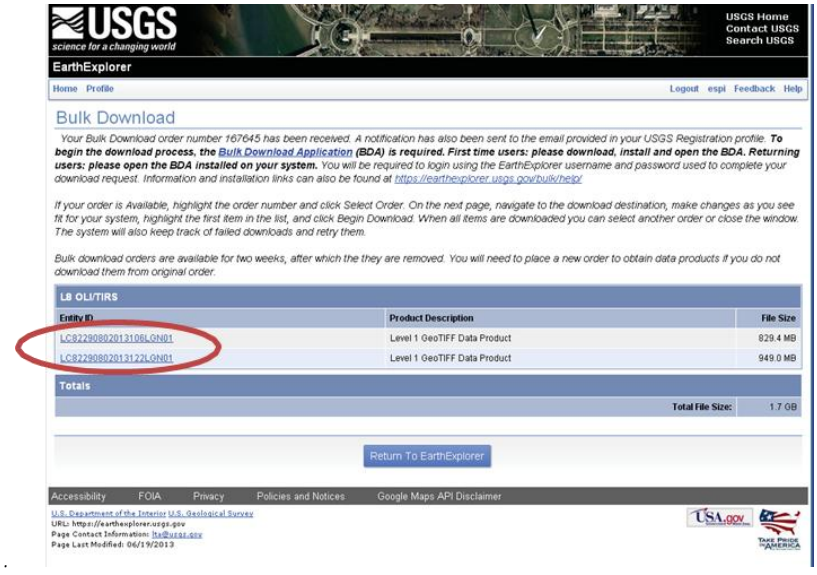


Figura 4.7 *Confirmación de imágenes seleccionadas.*

4.2. Descarga de Imágenes a través de CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales)

El acceso al catálogo satelital de la CONAE se realiza a través de https://catalogos.conae.gov.ar/catalogo/catalogoSat.html. Con el propósito de potenciar las capacidades de sus misiones, la CONAE integra sus satélites con los de otras agencias espaciales, conformando constelaciones que operan de manera conjunta para mejorar la calidad, cantidad y diversidad de la información obtenida, ampliando así el abanico de posibilidades del sistema en su conjunto.

Hasta el momento, la CONAE llevó adelante cuatro misiones de la serie SAC, con instrumentos ópticos desarrollados en cooperación con la NASA y otras agencias espaciales. El SAC-A cumplió una función tecnológica, mientras que el SAC-C y el SAC-D/Aquarius estuvieron orientados a la observación de la Tierra, cumpliendo ambos su misión satisfactoriamente, El SAC-B fue un satélite argentino de astrofísica diseñado para estudiar el Sol y el universo, fue construido por INVAP y lanzado en 1996. No logró cumplir su misión porque el cohete Pegasus falló al soltarlo.

Posteriormente se implementó SAOCOM 1, siendo la misma una constelación de satelites de observación con radar de microondas. Estaba integrada por el SAOCOM 1A, lanzado el 7 de octubre de 2018, y el SAOCOM 1B, lanzado el 30 de agosto de 2020. Cada uno de estos satélites porta un Radar de Apertura Sintética (SAR) en banda L, cuyo objetivo es generar información aplicable a la prevención, el monitoreo, la mitigación y la evaluación de catástrofes naturales o antrópicas, así como datos de humedad de suelo con aplicaciones para la actividad productiva nacional.

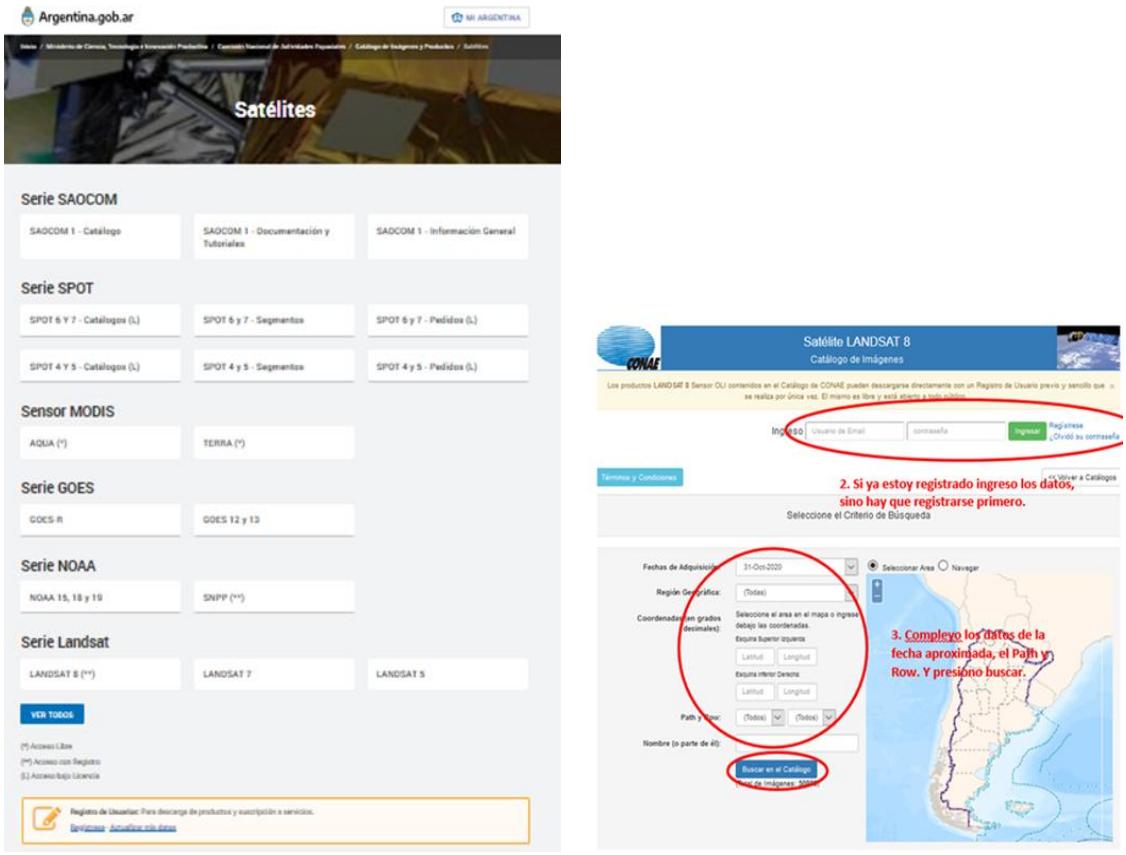


Figura 4.8. Selección de plataformas, Ingreso de usuario, contraseña, fecha y nubosidad. Fuente: CONAE.

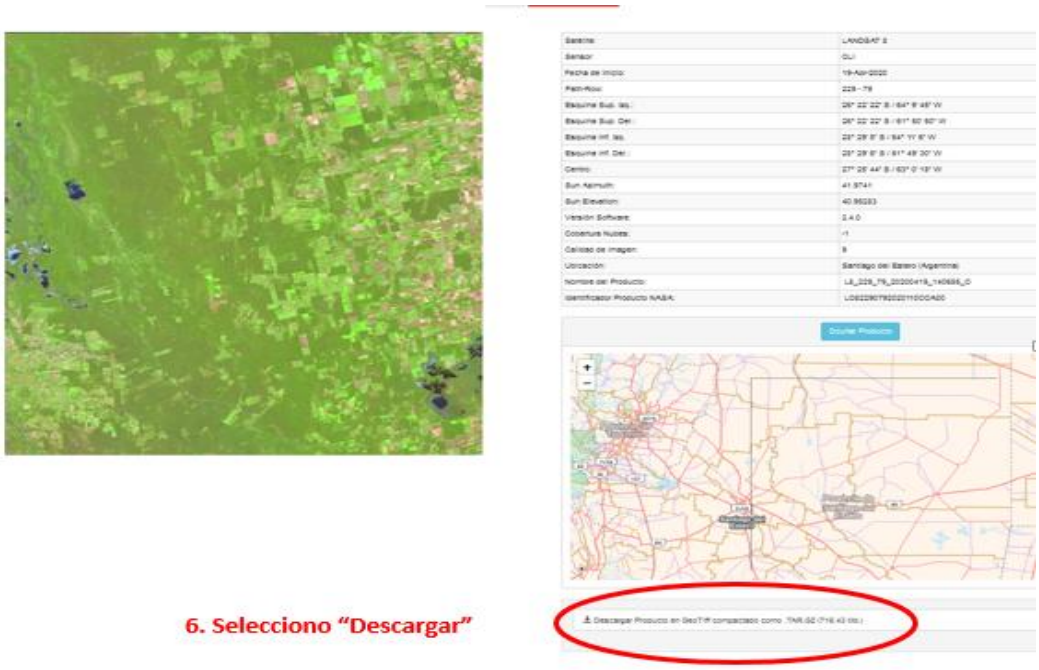


Figura 4.9 Interfase de descarga.

4.3. Búsqueda y descarga de imágenes a través de Land Viewer

LandViewer es un visor SIG desarrollado por EOS Data Analytics, compañía con sede en California, orientado a ofrecer un acceso rápido y eficiente a datos de teledetección.

Sus principales fortalezas radican en un catálogo de imágenes satelitales en constante actualización, ajustes de procesamiento que se renuevan de forma continua y un conjunto de herramientas avanzadas que permiten realizar análisis de teledetección en tiempo real, directamente desde el navegador.

El equipo de desarrollo del producto destina un esfuerzo considerable al análisis del comportamiento de los usuarios, lo que le permite identificar patrones de uso y simplificar la plataforma en función de las necesidades más frecuentes, priorizando así las funcionalidades que aportan mayor valor al flujo de trabajo habitual.

Para acceder al servicio, se debe ingresar a https://eos.com/landviewer/ e iniciar sesión con el nombre de usuario y la contraseña correspondientes; en caso de no contar aún con una cuenta, es necesario registrarse previamente. Una vez dentro de la plataforma, el sistema muestra la cantidad de imágenes disponibles restantes para ese día, ya que la modalidad gratuita permite descargar hasta 10 imágenes diarias sin costo.



Figura 4.10 Número de imágenes gratuitas para bajar. Fuente: Land Viewer.

Para definir la zona de interés, es posible desplazarse manualmente por el mapa hasta ubicar el sector requerido. Alternativamente, la plataforma permite cargar un archivo de área de interés (AOI) en formato shapefile (.shp) o KML, o bien dibujar directamente el polígono correspondiente sobre el mapa mediante las herramientas de edición disponibles.

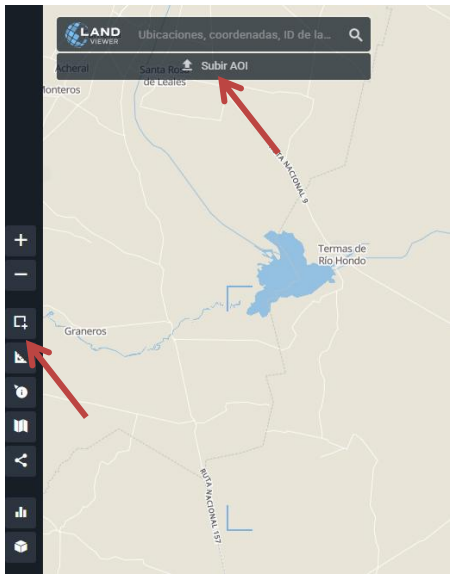


Figura 4.11 *Selección del área de interés. Fuente: Land Viewer.*

Si se opta por dibujar la zona de interés directamente sobre el mapa, esta puede guardarse en el disco mediante la opción "Save", lo que permite reutilizarla posteriormente cargándola a través del comando "Upload Area of Interest (AOI)".

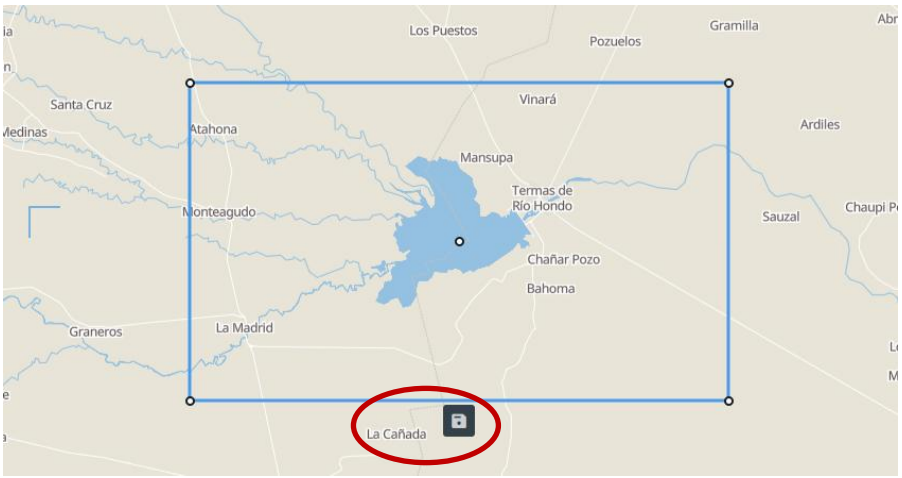


Figura 4.12: *Area seleccionada. Fuente: Land Viewer.*

En el sector derecho de la página se encuentran las herramientas de búsqueda de escenas, correspondientes a las imágenes disponibles. Por defecto, el sistema despliega todas las imágenes disponibles para la zona de interés seleccionada, provenientes de distintos sensores y fechas, ordenadas cronológicamente.

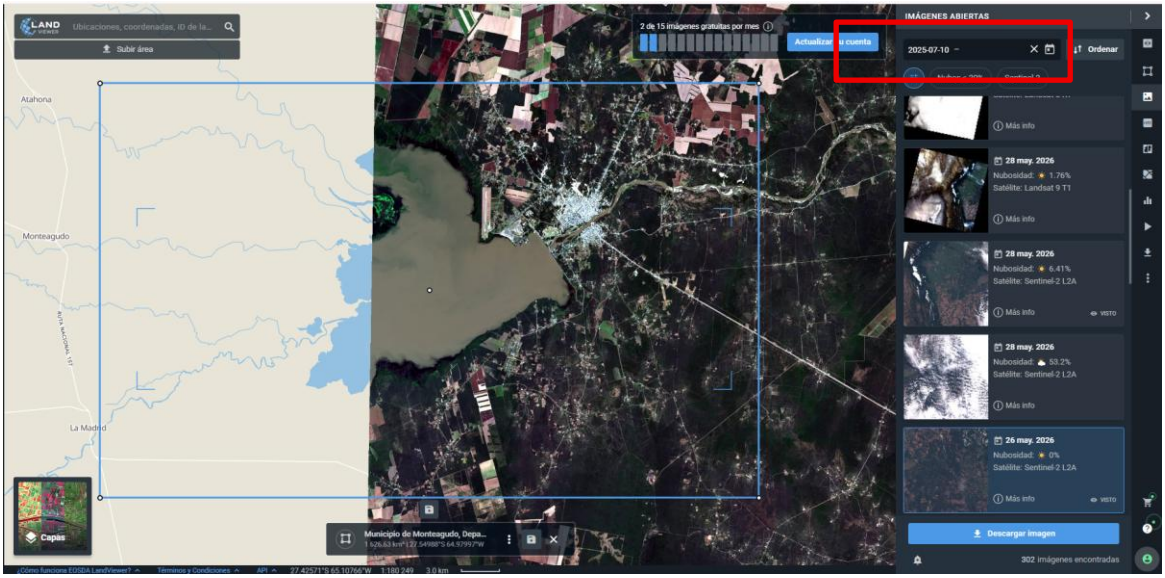


Figura 4.13 *Área de búsqueda. Fuente: Land Viewer.*

Una vez seleccionada la imagen se desplegará una vista previa de la misma sobre el mapa. cada vez que despliego la vista previa se computa como 1 de las 10 imágenes que puedo descargar al día de forma gratuita, por más que no la haya descargado siquiera. Aparecerá en la barra superior el conteo de imágenes que faltan al día para completar la cuota.)

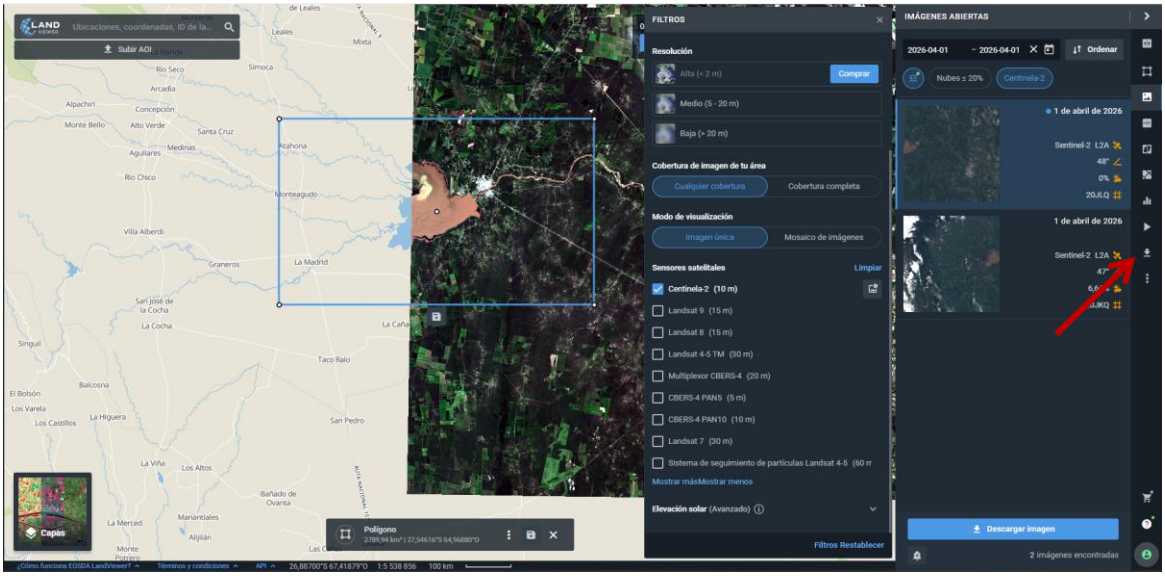


Figura 4.14 *Descarga de imagen Fuente: Land Viewer.*

Al momento de descargar, se despliega un menú donde se debe seleccionar la resolución de la imagen, el formato de salida y si se desea obtener la escena completa o bien un recorte ajustado al área de interés definida. Una vez configuradas estas opciones, se presiona "Download" y la imagen se descarga en la ubicación indicada por el usuario. Cabe

aclarar que, en este caso, la descarga corresponde a una imagen ráster de composición RGB, sin las bandas espectrales individuales.

Tabla 5.1 Combinaciones de bandas más usadas de Landsat 8/9 y Sentinel 2 Elaboración propia.

	Landsat 8	*Sentinel 2*
Falso color compuesto	*5,4,3*	*8,4,3*
Usos agrícolas	*6,5,2*	*11,8A,2*
Color natural (visible)	*4,3,2*	*4,3,2*

Existen otras páginas de donde se pueden obtener imágenes de satélite por ejemplo para descargar imágenes Sentinel-2 desde el portal oficial Copernicus, debe usar el Copernicus Data Space Browser. https://browser.dataspace.copernicus.eu.

El proceso requiere crear una cuenta gratuita, seleccionar tu área y rango temporal, filtrar por misión Sentinel-2 y luego descargar los productos en formatos como GeoTIFF o JP2.

7. ACTIVIDADES

- Los estudiantes deberán acceder a las diferentes plataformas de adquisición de imágenes, por lo que deberán registrarse y generar su usuario.
- Los estudiantes deben seleccionar áreas de interés preferentemente en la Provincia de Santiago del Estero.
- Deberán bajar imágenes de distintas fechas de una misma área seleccionada.
- Descargadas las imágenes deben descomprimirlas y combinar las bandas para obtener imagen multiespectrales.

PRÁCTICO

05 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

1. OBJETIVOS PRINCIPALES

El objetivo principal de este práctico consiste en guiar al estudiante a través del flujo completo de trabajo en teledetección, utilizando ERDAS Imagine, abarcando desde la adquisición y descarga de los datos satelitales hasta la generación de mapas temáticos listos para su análisis en un entorno SIG.

En este recorrido se busca que el estudiante reconozca cómo las distintas resoluciones que caracterizan a una imagen satelital —espacial, referida al tamaño del píxel; espectral, vinculada al número de las bandas; radiométrica, relacionada con los niveles de grises; y temporal, asociada a la frecuencia de revisita— condicionan tanto la interpretación como la precisión del análisis. Asimismo, se pretende que conozca la importancia del preprocesamiento de las imágenes, es decir, la aplicación de correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas, como paso indispensable para eliminar errores y garantizar que los datos representen fielmente las condiciones reales de la superficie terrestre.

Finalmente, el práctico promueve un uso crítico de las técnicas de realce de imagen, tales como los ajustes de histograma, la aplicación de filtros, las composiciones en color RGB y las representaciones en pseudocolor, con el propósito de evidenciar que el verdadero valor de la teledetección no reside únicamente en la calidad del sensor, sino en la combinación de esta con un procesamiento experto de los datos.

2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Utilizar en ERDAS Imagine las principales técnicas de realce visual —tales como el estiramiento de histograma lineal y no lineal, la ecualización, los filtros paso alto y paso bajo, y la compresión de contraste— con el fin de mejorar la legibilidad de las imágenes satelitales y resaltar rasgos particulares de la cobertura, como la vegetación o los suelos desnudos.

- que el estudiante discuta el impacto que tiene el cambio de escala y de resolución espacial sobre el análisis, estableciendo la relación entre píxeles de menor tamaño y estudios de mayor detalle, con píxeles de mayor tamaño asociados al monitoreo a escala regional.
- que realice subsets de las áreas de interés y aplique correcciones radiométricas básicas, valorando su rol dentro del flujo de preparación de datos como paso previo indispensable para el cálculo de índices espectrales y la elaboración de mapas temáticos.

3. MATERIAL REQUERIDO

- Software para el procesamiento.
- Imágenes satelitales.
- Computadoras

4. INTRODUCCIÓN

El procesamiento digital de imágenes satelitales es el conjunto de técnicas y procedimientos aplicados a datos numéricos obtenidos por sensores remotos con el fin de mejorar su calidad, corregir errores y extraer información temática de interés. (Jensen, J. R. 2015). En teledetección, cada imagen satelital se representa como una matriz de píxeles donde a cada elemento que la forma, se le asigna un nivel digital que cuantifica la radiancia o reflectancia registrada por el sensor en una determinada porcion del espectro, lo que permite caracterizar objetos y superficies de la Tierra en función de su respuesta espectral.

En teledetección, cuando hablamos de una imagen raw o cruda, nos referimos al producto de nivel más bajo que entrega un sensor: la señal digital tal como fue capturada por el instrumento a bordo de la plataforma, sin que se le haya aplicado ningún tipo de corrección posterior.

El preprocesamiento, es el conjunto de operaciones que se aplican sobre una imagen satelital antes de cualquier análisis temático propiamente dicho, con el objetivo de corregir las distorsiones y errores que se introducen durante la adquisición de los datos por parte del sensor y la plataforma, transforma la imagen raw, en un producto adecuado para análisis cualitativos y cuantitativos, integrable además en sistemas de información geográfica y modelos espaciales.

Las imágenes obtenidas a partir de plataformas espaciales constituyen una fuente importante de información sobre los recursos naturales y el ambiente. En efecto, las imágenes satelitales proveen una visión sinóptica de grandes áreas de la superficie terrestre, lo que permite una mejor comprensión de la organización espacial del territorio; permiten además acceder a información que nuestra visión no capta, como la que se registra en las bandas del infrarrojo, y resultan, por unidad de superficie relevada, considerablemente menos costosas que las fotografías aéreas o que el relevamiento de información directamente en el terreno. Proyecto de Bosques Nativos y Áreas Protegidas, BIRF 4085-AR. (2004).

La importancia del procesamiento digital en la teledetección radica en que constituye el eslabón intermedio entre la adquisición de los datos y su uso aplicado en estudios ambientales, agrícolas, forestales, urbanos o de recursos naturales. A través de las etapas de preprocesamiento —correcciones geométricas y radiométricas, generación de máscaras, correcciones atmosféricas y angulares— se dota de significado físico a los datos: los niveles digitales originales se transforman en variables que representan con mayor fidelidad las condiciones reales de la superficie terrestre. Sobre esa base, mediante realces de imagen, transformaciones espectrales y procedimientos de clasificación supervisada o no supervisada, se facilita la identificación de coberturas, la detección de cambios y la delimitación de unidades homogéneas, procedimientos que resultan esenciales para la generación de cartografía temática y para el apoyo a la toma de decisiones en la gestión del territorio..

5. DIFERENCIAS EN LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES Y DE FOTOGRAFÍAS

Las fotografías aéreas y las imágenes satelitales, aunque ambas derivan de sensores remotos, difieren radicalmente en su forma de adquisición, en la geometría de captura y en el tipo de información que proporcionan. Reconocer estas diferencias resulta clave a la hora de seleccionar la herramienta más adecuada para un inventario forestal o un monitoreo ambiental, ya que cada una responde a necesidades y escalas de trabajo distintas.

5.1. Plataforma y altura

Esta diferencia sustancial radica en la plataforma desde la que se realiza la toma y en la altura a la que esta opera. La fotografía aérea se obtiene desde plataformas de vuelo relativamente bajo —drones, helicópteros o aviones— que operan típicamente entre unas

pocas decenas de metros para el caso de drones y algunos kilómetros sobre el terreno para aviones. La percepción remota de un ambiente terrestre puede realizarse desde una gran variedad de plataformas de observación dependiendo de la distancia entre el sensor y el objetivo de estudio. Reuter. (2009) La imagen satelital, en cambio, se adquiere desde plataformas orbitales que se ubican a varios cientos de kilómetros de altura sobre la superficie terrestre, del orden de los 600 a 800 km en el caso de los satélites de observación de la Tierra que operan en órbita polar. Esta diferencia de altura explica buena parte de las diferencias, en particular las relativas a la cobertura, la escala y la geometría de la imagen resultante.

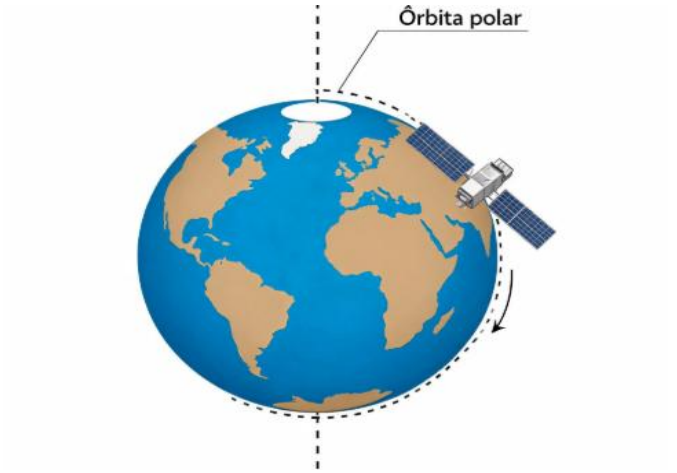


Figura 5.1 *Adquisición de imágenes satelitales. Fuente: Elaboración propia.*



Figura 5.2 *Adquisición de fotografías aéreas. Fuente: Alfa Geomatics.*

5.2. Trayectoria y cobertura

Una diferencia sustancial entre ambos tipos de adquisición reside en la trayectoria de captura y en cómo esta condiciona la cobertura resultante. En la fotografía aérea clásica, la toma se organiza mediante una misión de vuelo específicamente planificada, con líneas y pasadas diseñadas sobre el área de interés, lo que otorga al usuario un control casi a demanda sobre el día, la hora y el área exacta a relevar, aunque este control tiene como contrapartida las limitaciones propias de la logística y el costo de cada campaña de vuelo.

En la imagen satelital, en cambio, la trayectoria queda determinada por la órbita de la plataforma, de modo que la cobertura resulta repetitiva y sistemática, abarcando franjas de terreno muy extensas; aquí el usuario ya no decide el momento ni el área de la toma, sino que debe adaptarse a los tiempos de revisita del satélite y a la porción de superficie que cada pasada efectivamente cubre.

5.3. Geometría y adquisición

Otra diferencia entre ambos sistemas de adquisición es de naturaleza geométrica y tiene consecuencias directas sobre el tipo de tratamiento que cada producto requiere antes de su uso. La fotografía aérea responde a una geometría central o de perspectiva cónica, en la que todas las líneas de proyección convergen hacia un único punto, el centro óptico de la cámara, ubicado sobre la vertical del terreno en el instante del disparo. Esta geometría genera distorsiones crecientes hacia los bordes del fotograma de modo que, sin corrección, la imagen presenta una apariencia inclinada o abombada, con objetos de igual tamaño real apareciendo más grandes en el centro y progresivamente más pequeños hacia los márgenes; así, una fotografía de un rodal forestal puede mostrar árboles de dimensiones aparentemente mayores en el centro del fotograma que en sus bordes, aun cuando en el terreno sean equivalentes. Esta distorsión es la que obliga a someter la fotografía aérea a un proceso de ortorrectificación fotogramétrica antes de integrarla en un mosaico cartográfico confiable.

La imagen satelital, en cambio, se construye bajo una geometría de barrido paralelo, propia de los sensores tipo pushbroom, en la que el terreno se releva a medida que la plataforma avanza en su órbita. El resultado es una geometría libre de la distorsión radial característica de la fotografía, lo que permite, por ejemplo, que una banda de Sentinel-2 registre el trazado de un camino de manera recta y fiel a su forma real, sin las curvaturas aparentes que introduciría una proyección cónica, característica que resulta particularmente valiosa cuando se necesita realizar mediciones lineales o de superficie con precisión sobre la imagen.

5.4. Naturaleza del sensor y espectro

Una cuarta diferencia, refiere a la naturaleza misma del sensor y al rango del espectro que cada tecnología es capaz de registrar.

La fotografía aérea tradicional se apoya en cámaras fotográficas ópticas, sean analógicas o digitales, cuyo diseño responde a una lógica esencialmente "fotográfica": captan de manera dominante el rango visible del espectro y, en muchos casos, incorporan también el infrarrojo cercano, entregando como producto una imagen en color natural o en falso color, pero siempre acotada a esa porción relativamente estrecha del espectro electromagnético.

Las imágenes satelitales, en cambio, se generan mediante sensores multiespectrales o hiperespectrales concebidos específicamente para discriminar la respuesta espectral de las coberturas, registrando de forma simultánea numerosas bandas discretas que se extienden del visible al infrarrojo cercano, el infrarrojo de onda corta (SWIR), el térmico e incluso, en algunas misiones, el dominio de las microondas; a esto se suma que incluso algunas de las plataformas satelitales incorpora también sensores activos, como el radar, capaces de generar su propia fuente de energía y de operar independientemente de la iluminación solar o de la cobertura nubosa, algo completamente ajeno a la lógica de la fotografía aérea convencional.

En lo cotidiano tendemos a usar "luz" y "espectro" casi como sinónimos, cuando en realidad se trata de dos categorías de distinto orden: una es el todo, y la otra es apenas una parte de ese todo.

El espectro electromagnético es la totalidad de las longitudes de onda que puede adoptar la radiación electromagnética, desde las ondas de radio de kilómetros de longitud de onda, pasando por las microondas, el infrarrojo, el visible, el ultravioleta, los rayos X, hasta llegar a los rayos gamma de longitudes de onda extremadamente cortas.

La luz, en cambio, es apenas la porción de ese espectro que el ojo humano es capaz de percibir: la llamada banda o ventana del visible, que ocupa un rango extremadamente acotado de longitudes de onda, aproximadamente entre 0,4 y 0,7 micrómetros. Fuera de ese estrecho intervalo, toda la radiación que compone el resto del espectro electromagnético —el infrarrojo cercano, el infrarrojo de onda corta, el térmico, las microondas, y en el otro extremo el ultravioleta— existe y transporta información física perfectamente real, pero resulta invisible para nuestros ojos.

Esta distinción es la que justifica el valor agregado de la teledetección como disciplina: mientras que la fotografía convencional y nuestra propia percepción quedan confinadas al rango de la luz visible, los sensores satelitales fueron diseñados para extender la capacidad de observación registrando bandas del espectro que no constituyen luz en

sentido estricto y que nos permiten deducir propiedades de la superficie terrestre que jamás podríamos detectar apoyándonos únicamente en la luz visible.

5.5. Resolución y Escala

En lo que refiere a la resolución espacial alcanzable y a la noción misma de escala, en la fotografía aérea, el hecho de que la plataforma se desplace a una altura relativamente baja permite alcanzar resoluciones espaciales muy superiores a las que puede ofrecer cualquier sensor orbital; en este caso, la escala efectiva del producto no es un dato fijo sino que resulta de la combinación entre la altura de vuelo y la distancia focal del objetivo empleado.

La imagen satelital, en cambio, ofrece una gama de resoluciones bastante más amplia y heterogénea según la misión de que se trate: existen productos de resolución media, del orden de los metros o las decenas de metros, como los que entregan Sentinel-2 o Landsat, y también existen sensores comerciales capaces de alcanzar resoluciones submétricas, aunque estos últimos, por lo general, no se encuentran disponibles de manera gratuita.

5.6. Formato de datos y procesamiento inicial.

La última diferencia que conviene señalar atañe al formato en que cada producto llega a manos del usuario y al tipo de procesamiento inicial que exige antes de estar en condiciones de uso. La fotografía aérea, se registraba sobre película fotográfica y requería, por lo tanto, un proceso físico de revelado y un posterior escaneado para poder incorporarla a un flujo de trabajo digital; en su modalidad actual, en cambio, se captura directamente en formatos digitales —RAW, TIFF, JPEG— acompañados de metadatos de orientación externa provistos por sistemas GPS embarcados en la aeronave, de modo que el primer procesamiento ya no consiste en revelar una película sino en calibrar la cámara, realizar la aerotriangulación del bloque de fotografías y generar, a partir de ese ajuste, el correspondiente ortomosaico.

La imagen satelital, por su parte, se recibe desde el satélite directamente en formato digital, organizada en bandas espectrales discretas y clasificada según distintos niveles de procesamiento —desde el dato raw, pasando por productos con corrección geométrica, hasta llegar a productos con reflectancia de superficie ya corregida atmosféricamente—, de modo que el flujo de trabajo típico exige, antes de cualquier análisis temático, aplicar las correcciones radiométricas, atmosféricas y geométricas correspondientes al nivel de procesamiento en que la imagen fue distribuida.

5.6.1. Organización de los ND dentro de una Imagen

En una imagen satelital digital, los niveles digitales se organizan siempre bajo la misma lógica estructural: una matriz de píxeles dispuesta en filas y columnas, replicada tantas veces como bandas espectrales tenga el sensor que la generó. Es decir, no estamos frente a una única matriz bidimensional, sino frente a un arreglo tridimensional de datos, donde a las dos dimensiones espaciales (fila y columna) se suma una tercera dimensión espectral (la banda), de modo que cada píxel de la imagen no contiene un único valor de brillo sino un vector de valores, uno por cada banda registrada por el sensor en esa misma posición del terreno.

El modo en que el archivo almacena la información en disco puede variar, y esa variación es la que determina distintos formatos de organización interna, siendo los tres esquemas clásicos el BSQ (Band Sequential), el BIL (Band Interleaved by Line) y el BIP (Band Interleaved by Pixel). En el esquema BSQ, cada banda se almacena de manera completa y consecutiva, una después de la otra, como si fueran archivos independientes.

En el esquema BIL, en cambio, el almacenamiento se intercala por línea: se graba la primera fila de la banda 1, luego la primera fila de la banda 2, luego la primera fila de la banda 3, y recién después se pasa a la segunda fila de cada banda, repitiendo el ciclo.

El esquema BIP lleva ese entrelazado un paso más allá, intercalando los valores por píxel: para cada posición fila-columna se almacenan de manera consecutiva los valores de todas las bandas correspondientes a ese único píxel, antes de avanzar al píxel siguiente.

La unidad mínima de toda esta estructura, en cualquiera de sus formas de almacenamiento, sigue siendo el píxel —acrónimo del inglés picture element, "elemento de imagen"—, es la minima porción de una imagen representada por un dato.

Cada píxel queda definido por tres atributos que conviene distinguir con precisión: su posición dentro de la matriz, su tamaño, que es el que determina la resolución espacial de la imagen y, su Nivel Digital o nivel de gris.

Tabla 5.1 Diferentes formatos de grabación de imágenes satelitales. Fuente: Elaboración propia.

Formato	Descripción	Ventajas	Desventajas	Uso típico
BSQ (Band Secuencial)	Almacena banda completa por banda (toda la banda 1, luego banda 2, etc.). slideshare+1	Acceso rápido a una banda completa; eficiente para procesar una sola banda.	Lento para operaciones multibanda (requiere saltos grandes).	Análisis espectral por banda en imágenes Landsat o Sentinel.
BIL (Band Interleaved by Line)	Intercala por líneas: línea 1 banda 1, línea 1 banda 2, etc. slideshare+1	Buen balance para visualización y procesamiento mixto.	Compromiso medio en velocidad para bandas o píxeles.	Procesamiento estadístico en ERDAS Imagine o ArcGIS.
BIP (Band Interleaved by Pixel)	Intercala por píxel: todos los valores de un píxel, luego siguiente píxel. slideshare+1	Rápido para operaciones por píxel (ej. clasificación espectral).	Ineficiente para bandas completas.	Clasificación supervisada en Google Earth Engine.

6. CORRECCIÓN DE IMÁGENES

La corrección de imágenes satelitales comprende el conjunto de procedimientos destinados a eliminar o, al menos, reducir a niveles aceptables los errores geométricos y radiométricos que toda imagen arrastra desde el momento mismo de su adquisición, con el fin de que el producto final represente con la mayor fidelidad posible las condiciones reales de la superficie terrestre.

Se trata de un paso imprescindible y previo a cualquier análisis cuantitativo de los que estudiaremos más adelante en este curso —índices espectrales, clasificación temática, detección de cambios—, y resulta igualmente indispensable cuando se busca combinar escenas adquiridas en distintos momentos o integrar la imagen con otras fuentes de información georreferenciada, ya que cualquier desajuste geométrico o radiométrico no corregido se propaga inevitablemente a todos los productos derivados.

6.1. Fuentes de error comunes en Imágenes Satelitales

Las fuentes de error que afectan a una imagen satelital admiten agruparse en tres grandes categorías: los errores geométricos, los errores radiométricos y atmosféricos.

Aunque las tres categorías conviven y con frecuencia se superponen en una misma escena, conviene diferenciarlas con claridad porque cada una afecta de manera distinta al dato: las primeras alteran la posición de los píxeles respecto de su ubicación real sobre el

terreno, las segundas alteran el valor numérico que cada píxel registra, y las terceras introducen ambigüedad en la interpretación de ese valor una vez que la imagen ya fue geométrica y radiométricamente corregida.

6.2. Errores Geométricos

Dentro de los errores geométricos, una primera fuente de distorsión proviene del movimiento propio de la plataforma y del sensor durante la adquisición: pequeñas variaciones en la órbita, en la actitud del satélite —esto es, en su orientación respecto de los tres ejes de rotación— o en el mecanismo de escaneo del propio instrumento se traducen en distorsiones características de la posición y de la forma de los elementos de la escena, que pueden manifestarse como inclinaciones, estiramientos o curvaturas aparentes de objetos que en el terreno son perfectamente regulares. A esto se suma una segunda fuente de error, vinculada esta vez al modelo de la Tierra y al relieve del terreno observado: la curvatura terrestre, las particularidades de la proyección cartográfica elegida para representar una superficie curva sobre un plano, y las diferencias de altura propias del relieve, provocan desplazamientos sistemáticos de los píxeles respecto de su posición real si no se aplica sobre la imagen una ortorrectificación adecuada, proceso que corrige justamente ese desplazamiento por relieve utilizando un modelo digital de elevación de la zona.

6.3. Errores radiométricos y Atmosféricos

En el plano radiométrico, una primera fuente de error se origina en el propio sensor y en su electrónica: el ruido intrínseco del detector, la deriva de calibración que un instrumento acumula con el paso del tiempo en órbita, la presencia de píxeles o líneas defectuosas, y las variaciones de ganancia u offset entre los distintos elementos del arreglo detector dan lugar a los defectos característicos de bandeado, franjas o diferencias sistemáticas en los niveles digitales que se observan en muchas imágenes crudas.

La segunda fuente de error radiométrico proviene de la atmósfera y de las condiciones de iluminación al momento de la toma: la dispersión y la absorción atmosférica, el contenido de vapor de agua, la presencia de aerosoles, el ángulo de elevación solar y las sombras propias del relieve o de la cobertura modifican la radiancia que efectivamente llega al sensor, de modo que el nivel digital registrado deja de representar con exactitud la reflectancia real de la superficie. Cabe destacar, en particular, que el fenómeno de dispersión o scattering afecta fundamentalmente a la dirección de propagación de la radiación en el rango visible, aunque su influencia puede extenderse también a las

longitudes de onda vecinas del espectro, motivo por el cual su efecto debe considerarse no solo sobre la banda directamente afectada sino también sobre las bandas espectralmente próximas a ella. Reuter, (2009).

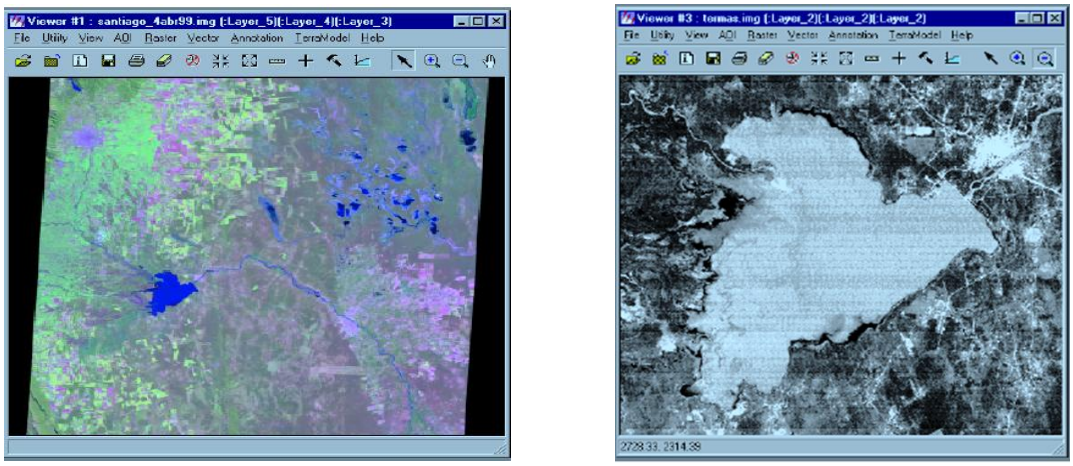


Figura 5.3 *Ejemplo de distorsiones habituales de los sensores. Fuente: USGS Earth Explorer.*

6.4. Correcciones radiométricas

Las correcciones radiométricas constituyen el conjunto de procesos orientados a depurar y estandarizar los valores digitales de los píxeles, es decir, todo procedimiento conducente a la restauración de los niveles digitales de una imagen con el propósito de estimar, con la mayor aproximación posible, su valor real de reflectancia o radiancia.

A diferencia de las correcciones geométricas, que atienden a la posición espacial de los píxeles, las correcciones radiométricas se ocupan exclusivamente de los errores y variaciones que introducen el sensor y la atmósfera sobre el nivel digital.

Del lado del sensor, estas correcciones apuntan a resolver el ruido electrónico propio del instrumento, la presencia de líneas o columnas defectuosas, y el fenómeno de bandeo, además de otros defectos característicos de la electrónica de a bordo.

Del lado de la atmósfera, en cambio, buscan reducir los efectos de dispersión y absorción producidos por aerosoles, vapor de agua y gases atmosféricos, así como compensar las diferencias de iluminación de manera que escenas adquiridas en fechas distintas resulten efectivamente comparables entre sí.

Sin corrección radiométrica, dos imágenes de la misma zona pueden mostrar valores muy distintos solo por cambios en la atmósfera, la iluminación o el sensor, y no por cambios reales en la superficie.

Al aplicar correcciones radiométricas adecuadas se obtienen productos más estables y comparables en el tiempo, condición clave para monitoreo de vegetación, incendios, deforestación, calidad del agua y otros estudios ambientales.

6.5. Ajuste de contraste

El ajuste de contraste constituye una técnica de realce radiométrico orientada a modificar la distribución de los niveles digitales de una imagen con el fin de que estos ocupen de manera más eficiente el rango dinámico disponible, mejorando así su legibilidad visual. Dicho de otro modo, el procedimiento consiste en estirar o comprimir el rango de valores originales para incrementar o reducir la diferencia perceptible entre las zonas claras y oscuras de la escena.

Es frecuente que, en una imagen satelital, la mayor parte de los píxeles se concentre en un intervalo relativamente estrecho de niveles digitales —por ejemplo, entre 40 y 90 en una banda determinada— aun cuando el sensor sea capaz de registrar valores en un rango mucho más amplio, típicamente de 0 a 255 para el caso de 8 bits. Frente a esta situación, el ajuste de contraste aplica una transformación que remapea esos valores originales hacia un rango más amplio, de modo que diferencias sutiles de radiancia se traduzcan en diferencias tonales más evidentes en la visualización. Cabe destacar que esta operación no altera en ningún momento la geometría de la imagen ni su información radiométrica de base, sino únicamente la tonalidad con la que dicha información se representa en pantalla.

Entre las formas más habituales de implementar este ajuste se encuentra, en primer lugar, la transformación lineal simple, que consiste en tomar los valores mínimo y máximo del histograma (o bien percentiles bajos y altos, a fin de evitar la influencia de valores atípicos) y asociarlos respectivamente al negro (ND = 0), y al blanco (ND = 255), escalando linealmente todos los valores intermedios entre ambos extremos.

Existen también los ajustes basados en el análisis del histograma, que consisten en examinar la frecuencia de aparición de cada nivel de gris para aplicar un estiramiento que expanda su distribución, o bien recurrir a métodos como la ecualización del histograma, orientada a redistribuir los tonos de manera más homogénea a lo largo de todo el rango disponible.

En síntesis, dentro del marco conceptual de la teledetección, el ajuste de contraste se clasifica como un realce de tipo visual: no introduce modificaciones sobre la información física registrada por el sensor, pero sí optimiza sustancialmente su visualización, favoreciendo con ello la identificación de rasgos, patrones y unidades de interés dentro de la escena analizada.

6.6. Tabla de referencia de color (CLUT)

La forma en que un valor numérico almacenado en una imagen digital se traduce en un color o tono de gris sobre la pantalla no es una propiedad intrínseca del dato, sino el resultado de una convención de visualización que el sistema aplica en el momento de desplegar la información. Esa convención se materializa en la denominada tabla de referencia de color, o CLUT (*Colour Look Up Table*), un dispositivo lógico que actúa como intermediario entre el nivel digital (ND) registrado por el sensor y el nivel visual (NV) efectivamente mostrado al usuario.

Conceptualmente, la CLUT puede describirse como una función de mapeo que asigna a cada uno de los valores posibles del rango dinámico una terna de valores correspondientes a las componentes roja, verde y azul con las que dicho nivel será representado en el dispositivo de salida.

Esta separación entre el dato y su representación visual tiene una consecuencia metodológica relevante: permite modificar sustancialmente la apariencia de una imagen sin alterar en ningún momento la información radiométrica original almacenada en el archivo. La reasignación de valores mediante la CLUT opera exclusivamente sobre la capa de visualización, de modo que los ND permanecen inalterados y disponibles para cualquier procesamiento cuantitativo posterior, mientras que lo que cambia es únicamente la clave de interpretación cromática con la que el usuario percibe esos valores en pantalla.

Cuando se trabaja con imágenes multibanda, el concepto de CLUT se extiende naturalmente a las composiciones de color, en las que cada banda seleccionada se vincula a uno de los tres canales del dispositivo de visualización, por lo que resulta conceptualmente equivalentes a un conjunto de tres CLUT independientes, una por banda, cada una de las cuales define su propia correspondencia entre el ND de esa banda y el nivel visual del canal correspondiente. Esta equivalencia conceptual es la que permite, por ejemplo, aplicar un estiramiento de contraste de manera independiente a cada banda, optimizando así la discriminación visual de cada canal por separado.

En definitiva, la comprensión de la CLUT resulta central para diferenciar con precisión entre aquellas transformaciones que afectan la información física registrada por el sensor y aquellas que operan exclusivamente sobre su representación en pantalla, distinción que, como señala Chuvieco. (2020), resulta fundamental para no confundir el realce interpretativo con una alteración del dato original.

6.7. Composición de bandas RGB

La composición de bandas RGB constituye uno de los procedimientos más extendidos en la visualización de imágenes satelitales multiespectrales, en la medida en que permite condensar la información contenida en tres bandas espectrales distintas —cada una de ellas, en rigor, una imagen monocromática independiente— en una única representación en color que explota la capacidad del sistema visual humano para discriminar variaciones cromáticas con mayor sensibilidad que variaciones de brillo en escala de grises.

El procedimiento consiste en asignar cada una de las tres bandas seleccionadas a uno de los canales de color del dispositivo de visualización, de modo tal que el ND de la banda asociada al canal rojo determine la intensidad de rojo del píxel resultante, el ND de la banda asignada al canal verde determine su intensidad de verde, y así sucesivamente para el canal azul, generando por combinación aditiva de estos tres canales el color final observado en pantalla.

Resulta necesario distinguir, en este punto, entre dos grandes modalidades de composición según la relación que guarden las bandas seleccionadas con la sensibilidad espectral del ojo humano. La composición en color verdadero, se obtiene asignando la banda del rojo al canal R, la banda del verde al canal G y la banda del azul al canal B, reproduciendo de este modo, de manera aproximada, la apariencia cromática que la escena tendría ante la percepción visual directa.

Sin embargo, gran parte del valor analítico de la teledetección reside precisamente en la posibilidad de trascender el rango del espectro visible mediante las denominadas composiciones en falso color, en las que al menos una de las bandas asignadas a los canales RGB corresponde a una región del espectro no perceptible por el ojo humano, típicamente el infrarrojo cercano o el infrarrojo de onda corta. La composición en falso color convencional, ampliamente utilizada para estudios de vegetación, asigna la banda del infrarrojo cercano al canal R, la banda del rojo al canal G y la banda del verde al canal B; dado que la vegetación sana presenta una reflectancia particularmente alta en el infrarrojo cercano como consecuencia de la estructura celular del mesófilo foliar, esta composición hace que la cobertura vegetal se destaque en tonalidades rojas intensas, facilitando notablemente su discriminación respecto de otras coberturas del terreno.

Finalmente, es importante destacar que la elección de la combinación de bandas a emplear en una composición RGB no responde a un criterio arbitrario, sino que debe fundamentarse en el objetivo específico del análisis y en las propiedades espectrales de las coberturas que se pretende discriminar, existiendo para ello un conjunto de composiciones orientadas a la identificación de cuerpos de agua, áreas urbanas, superficies con distinto contenido de humedad o zonas afectadas por incendios, entre otras aplicaciones temáticas propias de la interpretación visual de imágenes satelitales.

7. COMPRESIÓN DE CONTRASTE

La compresión de contraste constituye una operación de realce radiométrico que opera en sentido inverso al del estiramiento de contraste abordado anteriormente: en lugar de expandir el histograma de la imagen para ocupar un rango más amplio de niveles digitales, esta técnica lo contrae, reduciendo el rango efectivo de niveles de gris y disminuyendo, en consecuencia, la separación visual entre los tonos claros y oscuros de la escena.

Esta operación resulta particularmente pertinente en imágenes que presentan un contraste excesivamente fuerte, situación que se manifiesta cuando zonas muy oscuras y zonas muy brillantes coexisten dentro de una misma escena, generando una amplitud radiométrica tal que ciertos detalles quedan efectivamente perdidos, ya sea por saturación en las áreas de mayor brillo o por falta de discriminación tonal en las sombras más profundas. Frente a esta circunstancia, la compresión de contraste aplica una función de transferencia que atenúa deliberadamente las diferencias entre niveles digitales adyacentes, concentrando el histograma resultante en un intervalo más estrecho de niveles de gris.

Cabe señalar que, en la práctica de la teledetección, se hace referencia con mayor frecuencia a los procedimientos de aumento de contraste que a los de compresión, en la medida en que el primero resulta más habitual para mejorar la interpretabilidad de escenas con bajo contraste inherente.

8. MANEJO DE ERDAS

El propósito de esta practica es que los estudiantes se familiaricen con algunas de las herramientas fundamentales que ofrece ERDAS Imagine para la visualización, el realce y el manejo elemental de imágenes satelitales, entendiendo que el dominio de estas funciones constituye una condición previa indispensable para abordar posteriormente procedimientos y análisis temático más avanzados.

La apertura y visualización de imágenes se realiza desde los menús File o Session, seleccionando la opción Open y, dentro de ella, Ráster, lo cual permite cargar archivos en los formatos habituales de la teledetección, entre ellos GeoTIFF, el formato propio IMG de ERDAS, u otros formatos de imágenes satelitales compatibles con el software.

Resulta importante que el estudiante comprenda, en este punto, que el visor de ERDAS (Viewer), solo permite desplegar simultáneamente tres bandas, asociadas respectivamente a los canales rojo, verde y azul, de modo que, al trabajar con una imagen

multibanda, es necesario definir explícitamente cuales de las tres bandas del archivo original se asignarán a esos tres canales.

Esta selección se realiza a través del cuadro de diálogo denominado "Ráster Layer Properties", donde el usuario indica la combinación de bandas deseada según el sensor y el objetivo del análisis; así, por ejemplo, la combinación 4-3-2 en imágenes Landsat 8 y 9 corresponde a una composición en color natural, mientras que la combinación 6-5-4 genera una composición en falso color estándar orientada al realce de la vegetación, en virtud de la alta reflectancia que esta presenta en la banda del infrarrojo cercano.

Una vez cargada y visualizada la imagen, el software ofrece un conjunto de herramientas de realce y operaciones básicas que resultan de uso frecuente en el trabajo cotidiano con imágenes satelitales.

Entre ellas se encuentra la extracción de porciones de imagenes, mediante "subset", procedimiento mediante el cual se recorta de la escena original un área de interés particular, reduciendo así el volumen de datos a procesar y concentrando el análisis exclusivamente en la porción del territorio relevante para el estudio en cuestión.

Asimismo, el ajuste de brillo y contraste, los distintos tipos de estiramiento de histograma discutidos anteriormente, y los cambios de paleta de color, se ejecutan todos ellos desde las herramientas agrupadas bajo los módulos de Image Enhancement.

Complementan estas funciones las herramientas de navegación espacial, como el acercamiento y alejamiento de la vista (zoom) y el desplazamiento sobre la escena (pan), así como las herramientas de medición de coordenadas geográficas directamente sobre la imagen desplegada.

Finalmente, es preciso destacar que todo resultado generado debe guardarse explícitamente como un nuevo archivo ráster independiente, operación que se realiza mediante la opción Save As del menú File, o alternativamente a través de las herramientas específicas de exportación del software, debiendo el estudiante tener siempre presente que las modificaciones visuales aplicadas sobre una vista no alteran por sí solas el archivo original si no se ejecuta expresamente esta acción de guardado.

9. ACTIVIDADES

La primera actividad a realizar es el despliegue de una imagen utilizando para ello el modulo VIEWER.



Figura 5.4 : Esquema de la interfase del ERDAS donde se observan los diferentes módulos que lo componen.

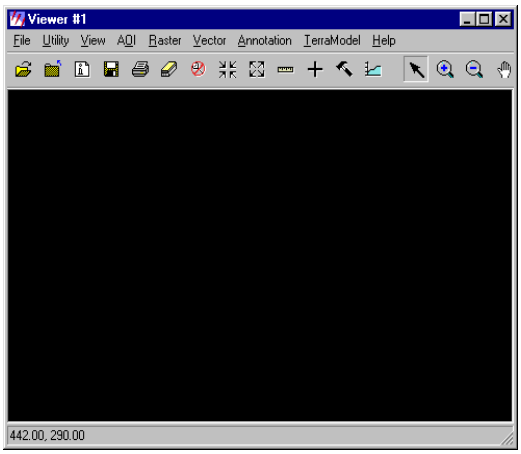


Figura 5-5: Ventana del modulo viewer donde se desplegaran las imágenes, en cualquiera de los diferentes formatos tanto ráster como vector, soportados por ERDAS.

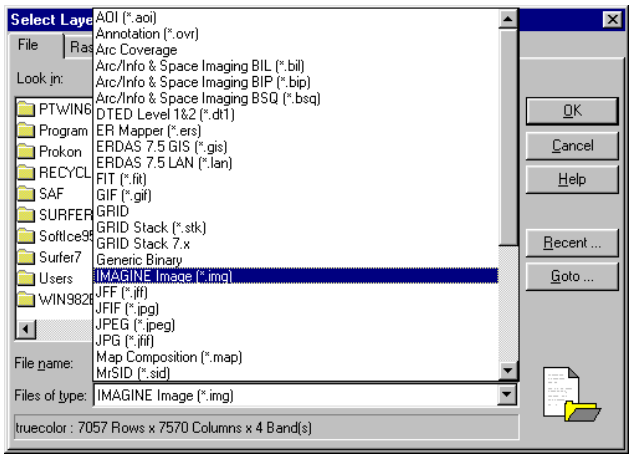


Figura 5.6: Ventana en donde se observan los formatos soportados por ERDAS. Y en donde se elegirá la imagen a desplegarse.

Las imágenes con extensión "*.img" tienen al menos una banda y hasta 7, 8, (Landsat), o 12 en el caso del sensor Sentinel 2. Usualmente se seleccionan para desplegar una o tres bandas, según sea monocromático o color respectivamente.

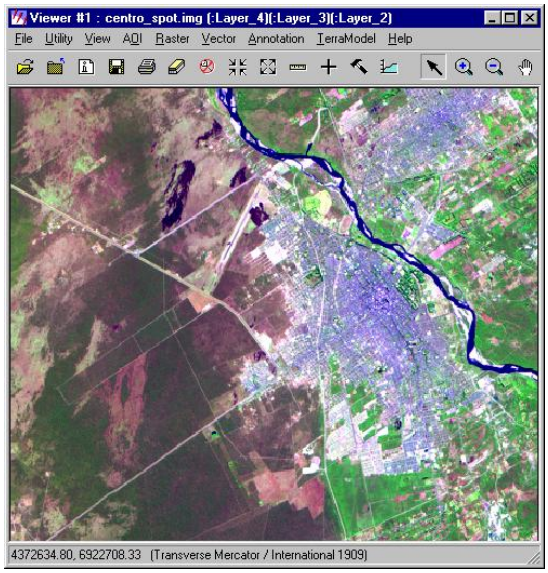


Figura 5.7: Ejemplo de una imagen desplegada.

En este caso los diferentes valores de archivo son cargados en la memoria de la imagen y representados en la pantalla del monitor RGB mediante valores de grises asignados por el lookup tables (LUT).

El estudiante deberá examinar la imagen de muestra mediante la utilización de las herramientas correspondientes (icono en forma de mano y el manejo de las herramientas de Zoom).

En la barra de iconos de la ventana disponemos de los iconos de Zoom (lupas + y -).

Obtener y abrir una imagen Sentinel 2, correspondiente al área de la Ciudad Capital en Santiago del Estero.

Trabaje con la herramienta Inquire box (Botón derecho del mouse).

- De la Imagen extraída ubique el punto con coordenadas.

X = 4374258 Y = 6926004

Luego de ubicar la posición, conteste a que tipo de cobertura corresponde.

El siguiente grafico muestra la transmisividad atmosférica en función de la longitud de onda, teniendo en cuenta al espectro electromagnético como continuo. (Los limites son artificiales y puestos por el hombre para facilitar su estudio).

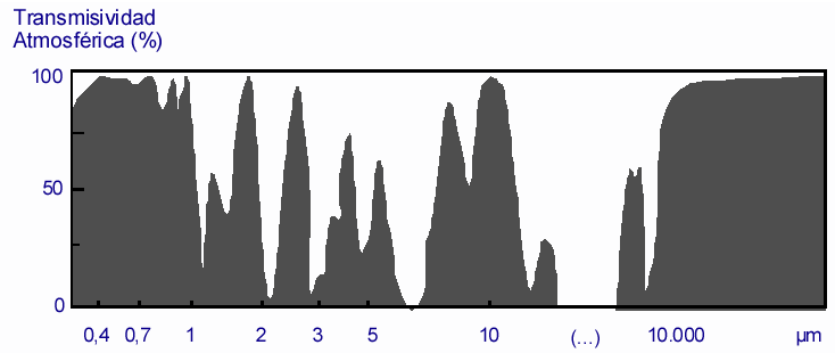


Figura 5.8: "Transparencia" de la atmosfera en función de la Longitud de onda.

Razone

Hay alguna limitación en las porciones del espectro captada por los sensores sobre satélites. ¿Que zonas deberían tratar de evitarse?

Despliegue una imagen de satélite correspondiente al centro de la ciudad, para las siguientes combinaciones de bandas, y complete la siguiente tabla con los tonos observados.

Sentinel 2

	3,2,1	4,3,2	3,2,1	1,1,1	4,4,4
Ciudad					
Agua					
Parque Aguirre					
Monte al oeste de la ciudad					
Incendios recientes					
Incendios Antiguos					

LANDSAT 8

	3,2,1	5,4,3	4,3,2	1,1,1	4,4,4
Ciudad					
Agua					
Parque Aguirre					
Monte al oeste de la ciudad					
Incendios antiguos					

En base a los conocimientos teóricos sobre las porciones del espectro ocupado por cada banda espectral correspondiente al Sensor Landsat TM. y teniendo en cuenta el siguiente gráfico, correspondiente a las firmas espectrales medias para: agua, suelo, Vegetación Sana, Vegetación enferma y nieve. Razone.

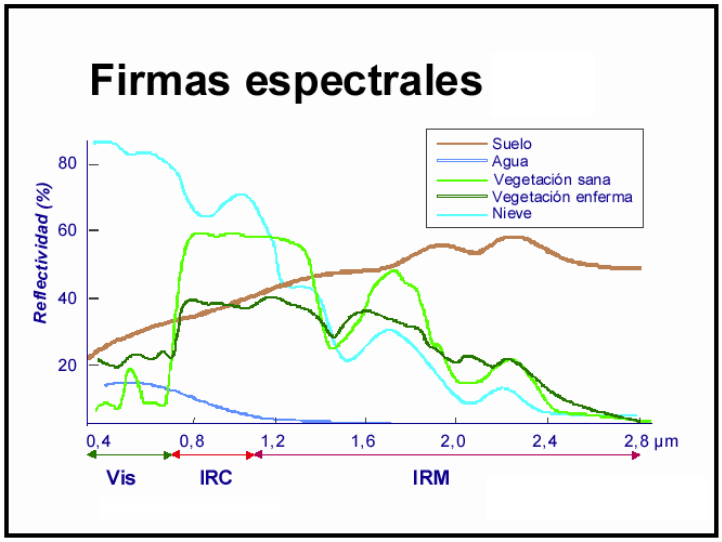


Figura 5.9. En función de las firmas espectrales esquematizadas responda.

¿Que bandas utilizaría para discriminar los siguientes elementos? Fundamente su respuesta.

Suelo – Agua .....____ ____

Veg. Sana - Veg. Enferma____ ____

Nieve – Suelo.....____ ____

Vegetación Sana – Suelo.____ ____

PRÁCTICO

06 GNSS, INTRODUCCIÓN AL SISTEMA GPS

1. OBJETIVOS GENERALES

El presente práctico tiene como propósito que el estudiante adquiera una comprensión conceptual y operativa del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) como herramienta fundamental para la georreferenciación de datos, comprendiendo tanto los fundamentos físicos y geométricos que sustentan su funcionamiento como su integración práctica dentro de los flujos de trabajo propios de la teledetección y la cartografía digital.

2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

Al finalizar el presente práctico, se espera que el estudiante sea capaz de:

Describir los fundamentos del sistema de posicionamiento satelital, comprendiendo el principio de trilateración sobre el cual se basa la determinación de una posición a partir de las distancias medidas a un conjunto de satélites.

Reconocer los segmentos que integran la arquitectura del sistema GPS —el segmento espacial, el segmento de control, y el segmento de usuario, identificando la función que cada uno de ellos cumple dentro del funcionamiento integral del sistema.

Identificar las principales fuentes de error que afectan la precisión de una posición obtenida mediante GPS, comprendiendo su incidencia sobre la exactitud final del dato posicional y las estrategias de mitigación aplicables.

Operar de manera práctica un receptor GPS de uso común, ejecutando tareas elementales tales como la toma de puntos de referencia en el terreno, el registro de tracks o trayectorias de desplazamiento, y la configuración básica de los parámetros del equipo, incluyendo el sistema de coordenadas.

Exportar e integrar la información de coordenadas obtenidas a campo dentro de un entorno de Sistemas de Información Geográfica, vinculando las tareas de relevamiento satelital con los procedimientos de análisis espacial y cartográfico del curso.

3. MATERIAL REQUERIDO

Se requiere para este trabajo práctico:

- imagen satelital.
- Receptores GPS
- Teléfonos celulares con apps GPS instaladas.

4. INTRODUCCIÓN

El término GNSS —Sistema Global de Navegación por Satélite— constituye la denominación genérica que engloba al conjunto de todas las constelaciones satelitales actualmente empleadas para la determinación de posición sobre la superficie terrestre, entre las cuales se cuentan el sistema GPS de los Estados Unidos, el sistema GLONASS de la Federación Rusa, el sistema Galileo de la Unión Europea y el sistema BeiDou de la República Popular China. El GPS, en particular, no debe confundirse con el conjunto GNSS en su totalidad, sino que debe entenderse como una de sus constelaciones constitutivas, distinción que resulta relevante desde el punto de vista técnico en tanto un receptor configurado para trabajar exclusivamente con la constelación GPS opera únicamente con los satélites de dicho sistema, mientras que un receptor GNSS propiamente dicho es capaz de rastrear simultáneamente satélites pertenecientes a varias constelaciones a la vez, lo cual redunda en una mayor disponibilidad satelital, una geometría de observación más robusta y, en consecuencia, una precisión posicional generalmente superior a la obtenida mediante el uso de una única constelación.

Resulta pertinente, en el marco de la formación de un ingeniero forestal, situar el estudio del GPS dentro de este panorama más amplio de los sistemas GNSS, en la medida en que su rol excede ampliamente el ámbito específico de la disciplina forestal y adquiere hoy un carácter marcadamente transversal en numerosas áreas profesionales afines, integrándose de manera prácticamente sistemática con los Sistemas de Información Geográfica y con la teledetección como soporte fundamental para la toma de decisiones territoriales. En el campo de la topografía y de las obras de infraestructura, por ejemplo, el empleo de receptores de alta precisión permite ejecutar tareas de replanteo en obras viales, redes de servicios y estructuras civiles con niveles de exactitud y celeridad muy superiores a los alcanzables mediante los métodos topográficos clásicos. En el ámbito de la agricultura de precisión, por su parte, el GNSS constituye la base tecnológica del guiado automático de maquinaria agrícola, de la aplicación localizada de insumos según la variabilidad espacial del suelo y del monitoreo georreferenciado de rendimientos,

contribuyendo con ello a una optimización del uso de recursos y a una reducción de los impactos ambientales asociados a la actividad agropecuaria.

La gestión del riesgo y la protección civil constituyen otro campo de aplicación en el que el posicionamiento satelital resulta indispensable, tanto para el mapeo de escenarios de inundación, remoción en masa, incendios forestales y otros eventos extremos, como para la coordinación operativa de equipos de emergencia y el registro georreferenciado de evidencias en tiempo real durante el desarrollo de dichos eventos. De modo análogo, en los estudios urbanos y de transporte, el GNSS se emplea habitualmente para el análisis de flujos de movilidad, el diseño de rutas de transporte público, la gestión de flotas vehiculares y el desarrollo de aplicaciones de navegación y localización en dispositivos móviles de uso masivo.

Particular atención merece, dentro de este panorama, el campo de las ciencias ambientales, en tanto disciplina más próxima a la formación del ingeniero forestal, donde el GNSS se utiliza sistemáticamente para georreferenciar estaciones de monitoreo climático, hidrológico y de calidad del aire, así como puntos de muestreo de suelos y de cuerpos de agua, y para llevar a cabo tareas de validación en terreno de productos derivados de teledetección, tales como imágenes satelitales o datos LIDAR, vínculo que conecta directamente el contenido del presente práctico con los procedimientos de verificación de campo abordados a lo largo del curso. Incluso en el ámbito de la geodesia y de los estudios sobre la dinámica de la corteza terrestre, las técnicas de posicionamiento GNSS de alta precisión permiten hoy medir deformaciones del orden milimétrico asociadas a procesos geodinámicos tales como terremotos, subsidencia o levantamiento del terreno.

En este contexto amplio y marcadamente interdisciplinario, el estudio del GPS dentro de la carrera de Ingeniería Forestal no debe entenderse limitado a la resolución de problemas puntuales de localización en el trabajo de campo, sino que debe concebirse como parte de la formación de un profesional capaz de integrarse con solvencia a equipos de trabajo interdisciplinarios, en los cuales la disponibilidad de una referencia espacial geodésicamente consistente constituye un componente central de la planificación y la gestión del territorio.

GNSS (Global Navegación Satellite System), es el acrónimo que se refiere al conjunto de

Tecnologías de sistemas de navegación por satélite que proveen de posicionamiento geoespacial con cobertura global de manera autónoma. Álvarez. (2008).

En lenguaje cotidiano se suele decir “GPS” para referirse a cualquier receptor satelital, aunque técnicamente muchos equipos modernos son receptores GNSS multiconstelación.

En Ingeniería usar equipos GNSS (que integran GPS + otros sistemas) permite reducir tiempos de espera y lograr mejores precisiones que con equipos que solo usan GPS.

Tabla 6.1 *Diferencia GNSS, GPS. Fuente: Elaboración propia.*

Aspecto	GNSS	GPS
Definición	Conjunto de sistemas de navegación satelital.	Sistema satelital de EE. UU. dentro del GNSS.
Constelaciones	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, etc.	Solo GPS.
Receptor	Usa varias constelaciones.	Usa únicamente GPS.
Ventaja clave	Más satélites, mejor disponibilidad y precisión.	Tecnología muy difundida y estándar.

5. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL SISTEMA GPS

Los orígenes conceptuales del posicionamiento satelital se remontan al lanzamiento del satélite soviético Sputnik en 1957, evento que, más allá de su significación como hito de la carrera espacial, permitió a los científicos de la época constatar que resultaba posible determinar y seguir la órbita de un satélite artificial experimentado por su señal de radio a medida que este se desplazaba respecto de un observador fijo en la superficie terrestre. Esta observación contenía el principio que años más tarde daría origen a los sistemas de posicionamiento satelital, la posición conocida de un conjunto de satélites debería permitir, determinar la posición de un observador situado en un punto de la superficie terrestre.

A partir de esta idea, la Marina de los Estados Unidos desarrolló durante la década de 1960 los primeros sistemas operativos de navegación satelital, entre los cuales se destaca el sistema TRANSIT, concebido originalmente con el propósito específico de proporcionar posicionamiento a las naves de la armada estadounidense. Si bien TRANSIT constituyó una demostración exitosa de la viabilidad técnica del posicionamiento satelital, presentaba limitaciones operativas significativas, en tanto su cobertura resultaba intermitente —dado el reducido número de satélites que integraban su constelación— y su precisión resultaba insuficiente para numerosas aplicaciones que excedieran el ámbito de la navegación naval de baja exigencia.

Fue recién durante la década de 1970 que surgió el proyecto NAVSTAR GPS —acrónimo de *Navigation System with Timing and Ranging, Global Positioning System*—, concebido desde su origen con el objetivo explícito de proporcionar un servicio de posicionamiento global, continuo, de alta precisión y disponible en toda condición meteorológica, superando de este modo las limitaciones operativas que habían caracterizado a los sistemas precedentes.

El primer satélite de la constelación NAVSTAR fue puesto en órbita en el año 1978, dando inicio a un proceso de despliegue gradual que se extendería a lo largo de toda la década

de 1980 y hasta comienzos de la década de 1990, período durante el cual la constelación fue completándose progresivamente hasta alcanzar, hacia el año 1993, la configuración de veinticuatro satélites operativos que constituye la arquitectura clásica del sistema. Cabe subrayar que el GPS fue concebido originalmente como un sistema de uso estrictamente militar, motivo por el cual su empleo se mantuvo, durante los primeros años de su desarrollo, restringido casi exclusivamente a las fuerzas armadas de los Estados Unidos.

En 1995, se procedió a la apertura formal del denominado Servicio de Posicionamiento Estándar, o SPS por su sigla en inglés, destinado específicamente al uso civil, si bien este servicio ofrecía inicialmente una precisión sensiblemente inferior a la del servicio de posicionamiento preciso reservado para uso militar, en virtud de la aplicación de un mecanismo de degradación intencional de la señal conocido como Disponibilidad Selectiva, o Selective Availability. Fue recién con la desactivación de este mecanismo de degradación en el año 2000 que los usuarios civiles pudieron acceder por primera vez a niveles de precisión sustancialmente mejorados, hito que resultó determinante para la posterior expansión masiva del GPS hacia campos de aplicación tan diversos como la navegación automotriz, la gestión de flotas de transporte, los teléfonos inteligentes de uso cotidiano, la agricultura de precisión y las diversas ramas de la ingeniería.

5.1 Satélites y cobertura

Aunque el diseño base es de 24 satélites, en operación suelen mantenerse más de 24 para asegurar redundancia, reemplazar unidades envejecidas y mejorar la geometría de posicionamiento.

Esta configuración asegura que en cualquier lugar de la Tierra un receptor disponga, en condiciones normales, de varios satélites visibles simultáneamente, lo que permite calcular posición 3D y tiempo con suficiente precisión.

6. SEGMENTOS

6.1. Segmento espacial

El segmento espacial del sistema GPS está constituido por los satélites, componente orbital del sistema y responsable directo de la generación y transmisión de las señales de radionavegación que los receptores emplean para determinar su posición.

Esta constelación fue diseñada desde su origen con el objetivo de garantizar una cobertura global y continua, de modo tal que, desde prácticamente cualquier punto de la superficie terrestre, resulte posible observar simultáneamente un mínimo de cuatro satélites, condición geométrica indispensable para resolver el problema del posicionamiento tridimensional.

Cada satélite de la constelación cuenta con cuatro paneles solares capaces de suministrar aproximadamente 600 W de potencia, complementados por baterías recargables que garantizan la continuidad operativa durante los períodos de eclipse, es decir, durante los intervalos en que el satélite atraviesa la sombra terrestre y queda momentáneamente privado de radiación solar directa (Reuter, 2001).

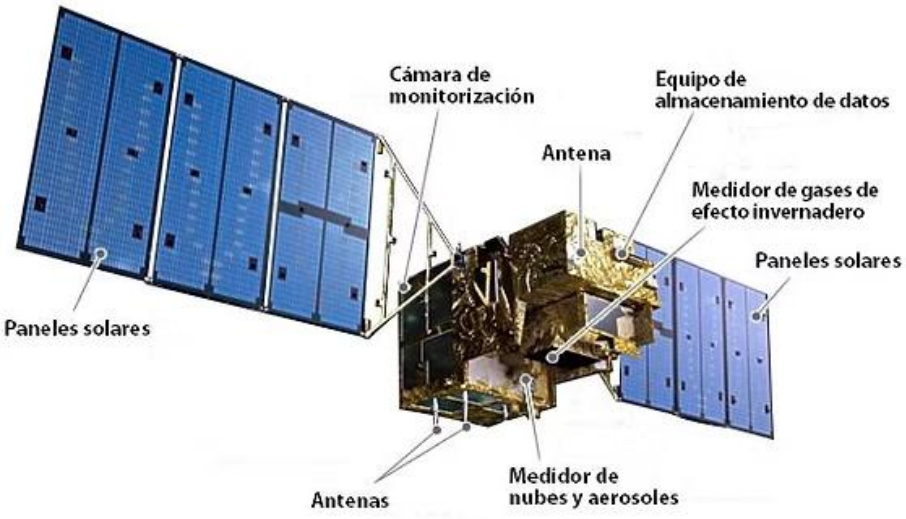


Figura 6.1 *Constelación de Satélites GPS. Fuente: METEOCEUS https://trabajocienciasdel.wixsite.com/misitio/single-post/2017/11/10/partes-de-un-sat%C3%A9lite*

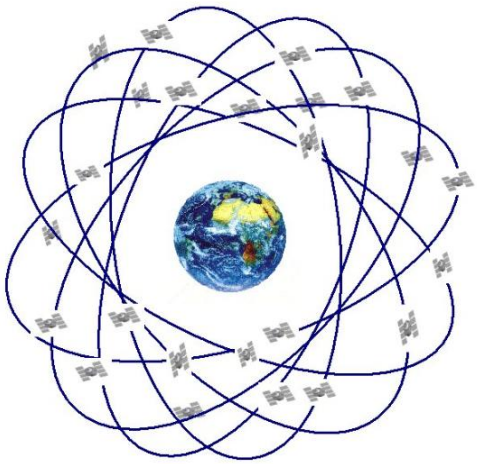


Figura 6.2 *Detalle orbital Satélite GPS. Fuente: Sistema de posicionamiento Global. https://geografandoemfloripa.blogspot.com/2014/08/sistema-de-posicionamento-global.html*

La constelación se organiza en 24 satélites distribuidos en 6 planos orbitales con 4 satélites cada uno, aunque en la operación real suele mantenerse un número superior al nominal con el fin de mejorar la redundancia y la disponibilidad del servicio.

Estos planos orbitales se encuentran uniformemente espaciados alrededor del planeta, con una inclinación aproximada de 55° respecto del ecuador, lo cual asegura una cobertura satisfactoria tanto en latitudes bajas como medias, y una visibilidad aceptable en latitudes altas. Los satélites operan en órbita media, a una altura cercana a los 20.200 km sobre la superficie terrestre, completando cada uno dos vueltas orbitales por cada día sidéreo, lo que equivale a un período orbital de aproximadamente 12 horas.

En cuanto a su función operativa, cada satélite transmite de manera continua señales de radiofrecuencia en la banda L, las cuales incorporan información temporal de altísima precisión —derivada de los relojes atómicos que cada unidad lleva a bordo— junto con datos de efemérides que describen con exactitud la posición orbital del propio satélite en cada instante. Esta información se encapsula en el denominado mensaje de navegación, el cual incluye asimismo datos de almanaque con parámetros orbitales aproximados del resto de la constelación, permitiendo al receptor conocer de antemano qué satélites deberían encontrarse visibles y en qué posición aproximada, optimizando así el proceso de adquisición de señal.

6.2. Segmento de control

El segmento de control del sistema GPS constituye la infraestructura terrestre encargada de monitorizar, gobernar y mantener la constelación de satélites en condiciones óptimas de operación, garantizando que las señales recibidas por el usuario resulten coherentes, precisas y estén disponibles de forma continua. Su función resulta, en este sentido, tan indispensable como la del propio segmento espacial, en la medida en que, sin la intervención sistemática de este componente, los satélites experimentarían una pérdida progresiva de exactitud tanto en sus parámetros orbitales como en la sincronización de sus relojes atómicos, degradación que repercutiría en un plazo relativamente breve sobre la calidad general del posicionamiento y de la referencia temporal que el sistema ofrece a sus usuarios.

Dada la extrema exactitud precisada, hay que considerar los efectos relativistas provocados por la gran velocidad de los satélites y por la diferente gravedad existente a 20.169 km de la tierra. Reuter (2001). Desde el punto de vista organizativo, el segmento de control está conformado por un conjunto de estaciones terrestres distribuidas alrededor del planeta, cuyas coordenadas se conocen con extrema precisión y que reciben de manera continua las señales emitidas por la constelación mediante receptores de doble frecuencia equipados con osciladores de cesio, registrándose además, de forma

simultánea, otros parámetros ambientales, en virtud de la influencia significativa que estas variables ejercen sobre la propagación de las señales satelitales a través de la atmósfera terrestre (Reuter, 2001).

Estas instalaciones se agrupan en tres categorías funcionales complementarias: una estación de control maestra, denominada *Master Control Station*, un conjunto de estaciones de monitorización o seguimiento distribuidas estratégicamente en distintas latitudes, y varias antenas de carga o *uplink*, generalmente emplazadas en proximidad al ecuador terrestre, a fin de asegurar una visibilidad frecuente de los satélites y posibilitar un seguimiento prácticamente continuo de la totalidad de la constelación.

Las estaciones de monitorización cumplen la función de recibir las señales de todos los satélites que resultan visibles desde su posición, realizando mediciones de pseudodistancia y de fase de manera conceptualmente similar a como lo haría un receptor de usuario ordinario, aunque empleando para ello equipamiento geodésico de muy alta precisión y partiendo de coordenadas de estación perfectamente conocidas de antemano. A partir de estas observaciones resulta posible evaluar la órbita real efectivamente seguida por cada satélite, así como el comportamiento específico de su reloj a bordo, contrastando ambos parámetros con los modelos teóricos previstos y con la escala de tiempo de referencia del sistema, denominada GPS Time. Este proceso de comparación permite detectar tanto desviaciones en la trayectoria orbital —los llamados errores orbitales— como derivas progresivas en el funcionamiento de los relojes atómicos embarcados, desviaciones que resulta necesario corregir de manera sistemática para preservar la exactitud global del sistema en su conjunto.

La estación de control maestra, por su parte, recibe de manera ininterrumpida los datos brutos generados por las distintas estaciones de seguimiento, procesándolos con el fin de generar efemérides precisas y correcciones de reloj actualizadas para cada uno de los satélites de la constelación. A esta tarea se suma la determinación de otros parámetros necesarios para la elaboración del mensaje de navegación, entre ellos el estado de salud operativa de cada satélite, la información relativa a maniobras orbitales planificadas, y los datos de almanaque que resumen la configuración general de la constelación en su conjunto. Una vez calculada, toda esta información se transmite hacia cada satélite a través de las antenas de carga correspondientes, siendo incorporada por este a su propio mensaje de navegación y difundida posteriormente hacia la totalidad de los receptores de usuario distribuidos por el globo.

Una función adicional de considerable relevancia que cumple el segmento de control es la gestión de las maniobras orbitales necesarias para mantener a cada satélite dentro de su posición asignada, dentro del plano orbital correspondiente; cuando se detectan desviaciones significativas respecto de la órbita nominal, se planifican y ejecutan maniobras de corrección mediante órdenes enviadas desde las instalaciones terrestres,

maniobras que insumen parte del combustible disponible a bordo del satélite y que, por lo tanto, se encuentran limitadas por la vida útil operativa de cada unidad.

El segmento de control supervisa asimismo el estado técnico general de cada satélite, identificando eventuales anomalías en sus sistemas de potencia, de comunicaciones o de carga útil de navegación, encontrándose facultado para declarar a un satélite en condición de no saludable, de modo que los receptores de usuario lo excluyan automáticamente del cálculo de posicionamiento mientras se resuelve la anomalía detectada.

Más allá de su contribución directa a la precisión del posicionamiento, el segmento de control garantiza también la integridad y la continuidad del servicio en su conjunto.

La actualización periódica de los mensajes de navegación, que se produce típicamente con una frecuencia del orden de pocas horas, contribuye a reducir los errores de predicción tanto orbital como de reloj, preservando de este modo los niveles de precisión especificados tanto para los usuarios civiles como para los usuarios militares del sistema. En síntesis, el segmento de control opera como el verdadero centro de coordinación y corrección del sistema GPS, articulando el funcionamiento del segmento espacial y del segmento de usuario para que ambos puedan interactuar de manera fiable y precisa en cualquier punto del planeta.

Resulta pertinente añadir, finalmente, que los procedimientos de sincronización de relojes dentro del sistema GPS se sustentan sobre dos principios centrales complementarios: por un lado, el mantenimiento de los relojes atómicos embarcados en los satélites y, por otro lado, la estimación y corrección del desfase propio del reloj del receptor de usuario, la cual se resuelve matemáticamente a partir de las observaciones simultáneas realizadas a varios satélites.

Es precisamente esta doble estrategia de sincronización la que permite que las mediciones de tiempo de propagación de la señal puedan convertirse en distancias con niveles de precisión del orden de centímetros en el caso de aplicaciones geodésicas de alta exigencia (Martín-Asín, 2001).

6.2.1. Señales emitidas por el satélite GPS

Las señales de los satélites GPS son ondas de radio en banda L diseñadas específicamente para permitir el cálculo preciso de distancias (ranging) y la transmisión del mensaje de navegación a los receptores. Cada señal combina tres elementos básicos: una portadora, uno o más códigos PRN (pseudoaleatorios) y datos de navegación modulados sobre esa portadora.

Los satélites GPS transmiten principalmente en dos frecuencias: L1 a 1575,42 MHz, L2 a 1227,60 MHz. Ambas portadoras incluyen además el denominado mensaje de navegación. Huerta, *et al.* (2005)

La portadora L1 se utiliza para el código C/A (civil), el código P(Y) de precisión y las señales modernas L1C/M; L2 transporta P(Y) y L2C,

El uso de varias frecuencias permite corregir errores ionosféricos y mejorar precisión en receptores de doble o triple frecuencia.

Los satélites GPS transmiten principalmente en dos frecuencias portadoras dentro de la banda L: la portadora L1, centrada en 1575,42 MHz y la portadora L2, centrada en 1227,60 MHz, ambas derivadas de una frecuencia fundamental común generada por los relojes atómicos a bordo del satélite mediante multiplicación por factores enteros específicos, lo cual garantiza una coherencia de fase extremadamente estable entre ambas señales Huerta *et al.* (2005). Sobre la portadora L1 se modulan varios tipos de señal: el código C/A, de acceso libre y orientado al uso civil, el código P(Y), de mayor precisión y acceso restringido originalmente al uso militar y gubernamental autorizado, y las señales modernizadas L1C y M, incorporadas progresivamente en los bloques satelitales más recientes de la constelación. Sobre la portadora L2, por su parte, se transmiten el código P(Y) y la señal civil L2C, esta última introducida específicamente con el propósito de ampliar el acceso de los usuarios civiles a una segunda frecuencia de trabajo, posibilidad que hasta su incorporación se encontraba prácticamente reservada a los receptores de uso militar.

La disponibilidad de señales en más de una frecuencia portadora reviste una importancia técnica considerable, en la medida en que habilita a los receptores diseñados para operar en doble o triple frecuencia a implementar procedimientos de corrección del error ionosférico sustancialmente más eficaces que los disponibles para un receptor de frecuencia única. Ello se debe a que el retardo introducido por la ionósfera sobre la propagación de la señal presenta una dependencia funcional conocida respecto de la frecuencia de la portadora, de modo que, al comparar las mediciones de pseudodistancia obtenidas simultáneamente en dos frecuencias distintas sobre un mismo satélite, resulta posible aislar y eliminar en gran medida la componente del error atribuible a la refracción ionosférica, mejorando sustancialmente la precisión final del posicionamiento obtenido, particularmente en aplicaciones de carácter geodésico o topográfico que exigen niveles de exactitud del orden del centímetro.

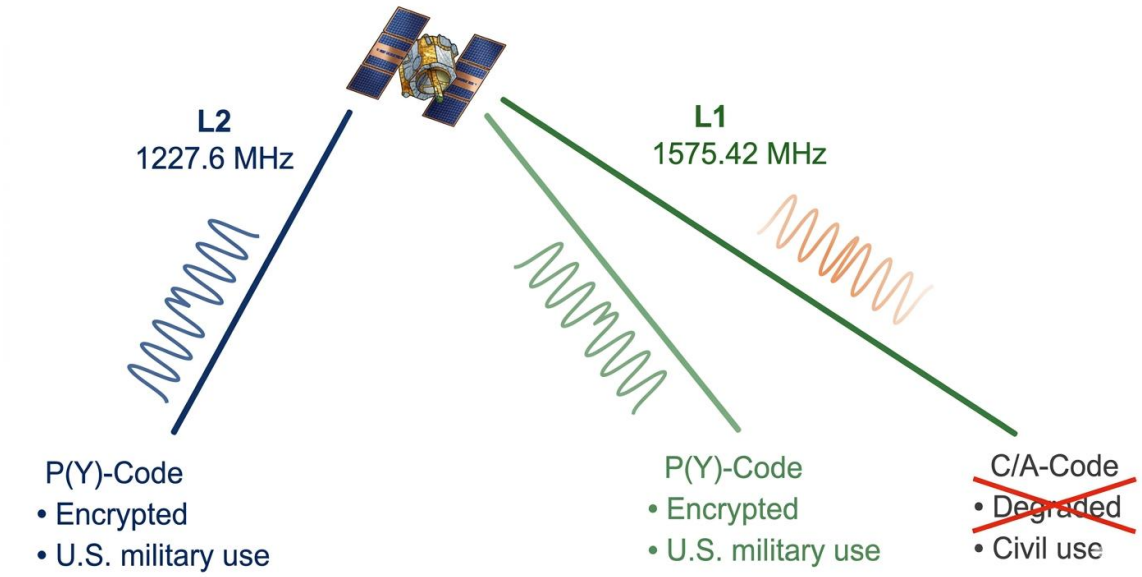


Figura 6.3 *Portadoras L1 y L2. Fuente: Elaboración propia.*

6.3. Segmento usuario

El sector de usuarios del GPS comprende todos los ámbitos en los que personas, empresas e instituciones utilizan la información de posición, navegación y tiempo para tomar decisiones, operar sistemas o prestar servicios. Estos usuarios se reparten entre aplicaciones cotidianas de navegación personal y sectores profesionales donde la precisión y la disponibilidad del sistema son críticas, como transporte, agricultura, topografía, seguridad y telecomunicaciones.

En el ámbito profesional, uno de los grupos más importantes es el de transporte y logística, que usa GPS para gestión de flotas, optimización de rutas, control de tiempos, seguimiento de cargas y mejora de la seguridad vial. Empresas de transporte por carretera, paquetería, reparto urbano y servicios de delivery dependen del posicionamiento continuo para reducir costos de combustible, mejorar tiempos de entrega y ofrecer trazabilidad en tiempo real a clientes y operadores. A esto se suman el transporte marítimo y aéreo, donde el GPS se integra con otros sistemas de navegación para guiar rutas, aproximaciones, maniobras portuarias y operaciones en espacios aéreos controlados.

Otro sector clave es el de topografía, cartografía, ingeniería civil y construcción, donde los usuarios emplean receptores GNSS de alta precisión para levantar puntos, trazar obras, controlar deformaciones y generar modelos digitales del terreno. La agricultura de precisión constituye un segmento específico y en fuerte crecimiento: productores y contratistas utilizan GPS para guiado automático de maquinaria, aplicación variable de insumos, mapeo de rendimiento y seguimiento de labores, mejorando productividad y

reduciendo insumos. También en minería y explotación de recursos naturales, el GPS se usa para control de maquinaria pesada, seguridad operacional y monitoreo de frentes de trabajo.

En el sector de seguridad, emergencias y defensa, los usuarios utilizan GPS para localización de vehículos policiales, ambulancias, bomberos, personal en campo, así como para coordinar operaciones de búsqueda y rescate. Los localizadores personales permiten proteger niños, adultos mayores, trabajadores en entornos de riesgo y activos valiosos, mediante seguimiento en tiempo real y geocercas con alertas automáticas. Paralelamente, las fuerzas armadas y cuerpos de seguridad emplean versiones y servicios específicos de GPS para navegación táctica, guiado de medios y sincronización de sistemas.

Por último, el público general constituye un grupo masivo de usuarios: conductores que usan navegadores y apps de mapas, deportistas que registran rutas y rendimiento, turistas que planifican recorridos y usuarios de teléfonos inteligentes y wearables que integran GPS para fitness, redes sociales y servicios basados en localización. En conjunto, el sector de usuarios del GPS abarca desde aplicaciones recreativas y de consumo hasta operaciones críticas y de alto valor económico, apoyándose en la misma infraestructura global de posicionamiento y tiempo preciso.

7. ERRORES

La determinación de una posición mediante el sistema GPS no se encuentra exenta de un conjunto de fuentes de error que afectan, en mayor o menor medida, a la exactitud final del dato posicional obtenido por el usuario. Comprender la naturaleza física de estas fuentes de error, así como su magnitud relativa y las estrategias disponibles para mitigarlas, resulta indispensable para todo profesional que emplee esta tecnología en tareas que exijan un nivel de precisión determinado, en la medida en que la selección del equipamiento, de la técnica de observación y del método de procesamiento posterior depende, en buena medida, del conocimiento cabal de estos errores.

7.1. Retrasos ionosféricos y troposféricos

Al atravesar las capas atmosféricas que rodean a la Tierra, la señal emitida por el satélite experimenta fenómenos de refracción y de ralentización respecto de su velocidad de propagación en el vacío, afectándola tanto a su paso por la ionósfera como por la troposfera. Dado que el cálculo de la pseudodistancia entre el satélite y el receptor se fundamenta precisamente en la medición del tiempo que la señal demora en recorrer

dicho trayecto, cualquier alteración en su velocidad efectiva, y direccion de propagación se traduce directamente en un error de distancia.

La ionósfera, en particular, puede dar lugar a un fenómeno conocido como centelleo ionosférico, consistente en fluctuaciones rápidas e irregulares tanto de la fase como de la amplitud de la señal recibida, fenómeno que se intensifica notablemente durante períodos de alta actividad solar o en determinadas regiones geográficas particularmente afectadas por la dinámica de la ionósfera, como las zonas ecuatoriales o las de alta latitud. Este efecto puede provocar la pérdida temporal del seguimiento de la señal por parte del receptor, un incremento significativo del ruido en las observaciones, y una degradación considerable de la precisión final del posicionamiento, efecto que resulta particularmente crítico en técnicas de posicionamiento de alta exigencia como el RTK (*Real Time Kinematic*) o el PPP (*Precise Point Positioning*), ambas fuertemente dependientes de la continuidad y de la calidad de la señal recibida.

7.2. Errores de reloj y efemérides

Una segunda categoría de errores relevante se vincula con las pequeñas imperfecciones inevitables en el funcionamiento de los relojes involucrados en el proceso de posicionamiento, tanto el reloj atómico embarcado en el satélite como el reloj, generalmente de menor estabilidad, incorporado en el receptor de usuario. Dado que el sistema completo se sustenta sobre la medición extremadamente precisa del tiempo de viaje de la señal entre el satélite y el receptor, incluso derivas mínimas en cualquiera de estos dos relojes generan errores directos en el cálculo del tiempo de propagación y, en consecuencia, en la distancia derivada de dicho tiempo, error que se traslada íntegramente a la solución final de posicionamiento si no es adecuadamente corregido.

De manera análoga, resulta necesario considerar el impacto de las imperfecciones existentes en los modelos orbitales, o efemérides, empleados para describir la posición exacta de cada satélite en un instante determinado. En la medida en que dichos modelos orbitales presenten desviaciones respecto de la posición real efectivamente ocupada por el satélite en el momento de la observación, tales desviaciones se trasladan de manera directa a la posición calculada del usuario, en tanto todo el procedimiento de trilateración parte de la premisa de que la posición del satélite es conocida con exactitud.

7.3. Multitrayectoria (multipath)

El fenómeno de multitrayectoria, conocido habitualmente por su denominación en inglés, *multipath*, se produce cuando la señal emitida por un satélite no llega al receptor

exclusivamente por el trayecto directo entre ambos, sino que alcanza también la antena receptora tras haberse reflejado en superficies cercanas tales como edificios, cuerpos de agua o estructuras metálicas presentes en el entorno de observación (Lira, 2003). Como consecuencia de este fenómeno, el receptor recibe simultáneamente la señal directa y una o varias réplicas reflejadas de la misma, de trayecto necesariamente más largo, lo cual introduce una distorsión en el proceso de correlación empleado para determinar el tiempo de viaje de la señal, traduciéndose en una medición de pseudodistancia sistemáticamente mayor a la real.

Este efecto adquiere particular relevancia en las proximidades de superficies fuertemente reflectantes y en entornos urbanos densamente edificados, donde la multiplicidad de superficies reflectantes cercanas a la antena receptora incrementa notablemente la probabilidad de recepción de señales multitrayecto, degradando de manera significativa la precisión del posicionamiento obtenido, circunstancia que resulta especialmente problemática en aplicaciones que exigen un alto grado de exactitud geodésica o topográfica.

7.4. Geometría satelital y DOP

Finalmente, resulta necesario considerar que, aun en el supuesto de contar con señales de excelente calidad y prácticamente libres de las fuentes de error anteriormente descriptas, la geometría relativa que presenten los satélites observados respecto del receptor puede, por sí sola, degradar sustancialmente la precisión final del posicionamiento obtenido.

Cuando los satélites disponibles para la observación se encuentran agrupados dentro de una misma región relativamente reducida del cielo visible —situación caracterizada por una escasa separación angular entre ellos y por elevaciones generalmente bajas respecto del horizonte—, el indicador conocido como Dilución de la Precisión, o DOP por su sigla en inglés (*Dilution of Precision*), se incrementa notablemente, amplificando en la solución final de posicionamiento cualquier error de medida presente en las observaciones individuales, con independencia de la magnitud original de dichos errores (Pardo Pascual, 2012).

Por el contrario, cuando la constelación de satélites observados se encuentra bien distribuida en el cielo visible —es decir, cuando incluye satélites situados a elevaciones adecuadamente altas y espaciados de manera uniforme en azimut alrededor del receptor—, el valor del DOP disminuye considerablemente, lo cual mejora sensiblemente la precisión de la solución de posicionamiento obtenida, aun partiendo del mismo conjunto de observaciones básicas en cuanto a su calidad individual. Esta consideración resulta de particular relevancia práctica para el trabajo de campo, en tanto pone de

manifiesto que la calidad de un posicionamiento GPS no depende únicamente de la calidad intrínseca de las señales recibidas, sino también, y de manera decisiva, de las condiciones geométricas de observación existentes en el momento y el lugar específicos en que dicha observación se lleva a cabo, factor que el usuario puede en buena medida anticipar y planificar mediante el uso de herramientas de predicción de visibilidad satelital previas a la salida a terreno.

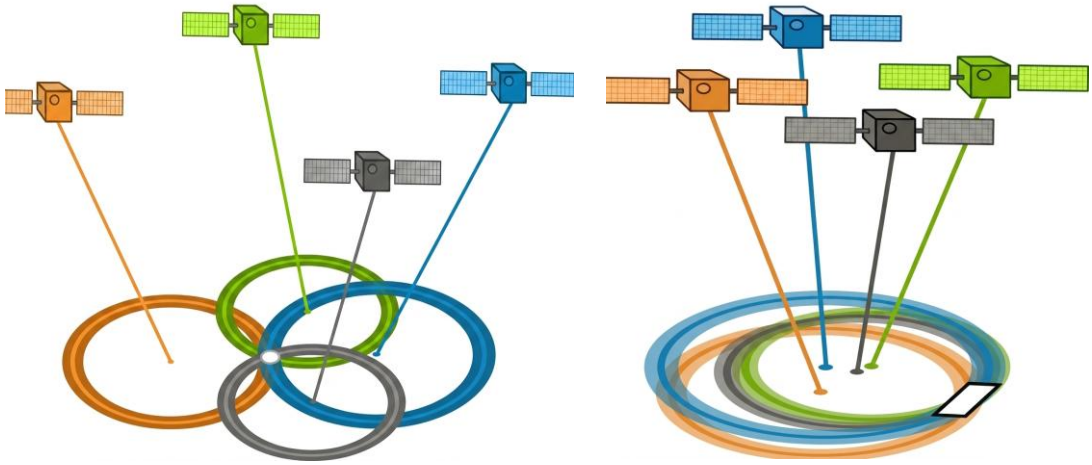


Figura 6.4 *Geometría correcta* *Geometría incorrecta. Fuente: Elaboración propia.*

8. SISTEMA DE AUMENTACIÓN

Los sistemas de aumentación GNSS constituyen conjuntos de infraestructuras y algoritmos específicamente diseñados con el propósito de mejorar tres atributos fundamentales del posicionamiento satelital: la precisión, la integridad y la disponibilidad de las señales básicas provistas por el GPS y por los restantes sistemas GNSS.

Estos sistemas operan corrigiendo, en tiempo prácticamente real, las principales fuentes de error desarrolladas en el apartado anterior —esto es, los errores ionosféricos, los errores orbitales y los errores de reloj— al tiempo que vigilan de manera continua la calidad general del servicio, condición que resulta indispensable para habilitar el empleo del GNSS en aplicaciones de carácter crítico, tales como la aviación comercial, las aproximaciones de precisión durante el aterrizaje, o el guiado de maquinaria que requiere niveles de exactitud particularmente exigentes. Sevilla. (2010).

Desde el punto de vista de su arquitectura general, un sistema de aumentación combina tres componentes esenciales que operan de manera articulada: un conjunto de estaciones de referencia instaladas en tierra, cuya función consiste en observar de manera

continua las señales GNSS desde posiciones perfectamente conocidas; centros de procesamiento, encargados de analizar la información recibida desde dichas estaciones y de calcular a partir de ella las correcciones pertinentes; y un medio de difusión de dichas correcciones hacia los usuarios finales, el cual puede materializarse mediante satélites geoestacionarios, mediante enlaces de radio en la banda VHF, o mediante equipos específicos instalados a bordo del vehículo o aeronave receptora, según el tipo particular de sistema de aumentación de que se trate.

Las correcciones generadas y difundidas por estos sistemas incluyen, típicamente, ajustes sobre los errores de reloj y de efemérides de los satélites de la constelación GNSS, un modelo refinado de la refracción ionosférica y troposférica sensiblemente más preciso que el empleado por defecto en un receptor autónomo, e indicadores específicos de integridad, cuya función consiste en advertir al usuario, con la mayor celeridad posible, cuando la señal de un satélite determinado o la propia solución de posicionamiento no resultan suficientemente confiables como para sustentar una operación de carácter seguro. El objetivo general perseguido por estos sistemas consiste en reducir el error de posicionamiento desde el orden de varios metros, característico de un posicionamiento GPS autónomo sin ningún tipo de corrección adicional, hasta niveles del orden de uno a dos metros en el caso de los sistemas SBAS.

8.1. Sistemas de aumentación activos (SBAS)

Entre los sistemas de aumentación satelital actualmente operativos o en distintas etapas de despliegue en el mundo, se destaca:

- WAAS (Wide Área Augmentation System, Estados Unidos y Norteamérica), operativo y ampliamente usado en aviación para aproximaciones LPV con precisiones del orden de 1,5–2 m.
- EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service, Europa), complementa GPS/Galileo en L1, proporcionando correcciones e integridad para aviación, agricultura y aplicaciones terrestres en Europa.
- MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System, Japón), da servicio sobre Japón y zonas adyacentes, mejorando precisión e integridad para aviación regional.
- GAGAN (GPS Aided GEO Augmented Navigation, India), cubre el subcontinente indio y está orientado a aviación civil y navegación regional.
- Otros proyectos y extensiones SBAS incluyen sistemas en desarrollo o expansión para África (ASECNA), Rusia (SDCM) y otros entornos regionales, con el objetivo de lograr interoperabilidad global entre servicios de aumentación.

9. METODOS DE POSICIONAMIENTO

Los métodos de posicionamiento GNSS pueden clasificarse de acuerdo con diversos criterios técnicos, entre los cuales resultan particularmente relevantes, a los fines de este curso, el criterio referido al número de receptores involucrados en la observación y a la existencia o no de corrección diferencial, el criterio referido a la dinámica del receptor durante la observación, y el criterio referido al tipo de observable GNSS empleado como base del cálculo. La comprensión de esta clasificación resulta indispensable para que el estudiante pueda seleccionar, en cada situación concreta de trabajo de campo, el método de posicionamiento que mejor se ajuste a la precisión requerida por la aplicación específica que se pretenda desarrollar, ya se trate de un relevamiento expeditivo de reconocimiento territorial o de un control geodésico de alta exactitud.

9.1. Posicionamiento absoluto y posicionamiento relativo

Desde el punto de vista del número de receptores involucrados, resulta posible distinguir, en primer término, entre el posicionamiento absoluto y el posicionamiento relativo. El posicionamiento absoluto, también denominado posicionamiento autónomo o *stand alone*, es aquel en el cual un único receptor determina su posición de manera independiente, a partir exclusivamente de las señales recibidas directamente de la constelación satelital, sin recurrir a ninguna estación de referencia adicional ni a ningún tipo de corrección externa. Este método constituye la modalidad más simple y de más rápida obtención dentro del conjunto de técnicas de posicionamiento GNSS, aunque presenta como contrapartida una precisión relativamente limitada, del orden de varios metros.

El posicionamiento relativo, por su parte, involucra la utilización simultánea de dos o más receptores, uno de los cuales, denominado estación base o receptor de referencia, se sitúa sobre un punto de coordenadas conocidas con precisión, mientras que el o los restantes, denominados receptores móviles o *rover*, ocupan las posiciones cuya determinación resulta de interés para el usuario. El fundamento técnico de este método reside en el hecho de que buena parte de las fuentes de error que afectan a la señal GNSS presentan un comportamiento espacialmente correlacionado cuando la distancia entre la estación base y el receptor móvil no resulta excesivamente grande, de modo tal que dichos errores afectan de manera muy similar a ambos receptores y pueden, en consecuencia, eliminarse en gran medida mediante el cálculo de diferencias entre las observaciones simultáneas de ambos equipos, procedimiento que da lugar a la denominada corrección diferencial. Gracias a esta estrategia, el posicionamiento relativo permite alcanzar niveles de precisión

sustancialmente superiores a los del posicionamiento absoluto, del orden decimétrico o incluso centimétrico según la técnica específica empleada.

9.2. Métodos estáticos y métodos cinemáticas

Un segundo criterio de clasificación, referido en este caso a la dinámica del receptor durante el proceso de observación, permite distinguir entre los métodos de posicionamiento estático y los métodos de posicionamiento cinemático. El posicionamiento estático supone que el receptor permanece inmóvil sobre el punto a determinar durante todo el período de observación, período que puede extenderse desde algunas decenas de minutos hasta varias horas según la precisión requerida y la longitud de la línea base respecto de la estación de referencia, siendo este el método que habitualmente permite alcanzar los mayores niveles de precisión dentro del conjunto de técnicas GNSS, motivo por el cual resulta el método de elección para trabajos de carácter geodésico o para el establecimiento de puntos de control de alta exactitud.

El posicionamiento cinemático, por el contrario, permite al receptor desplazarse durante el proceso de observación, registrando su posición de manera continua o en intervalos predeterminados a lo largo de su trayectoria, modalidad que resulta particularmente adecuada para el relevamiento de elementos lineales o para la generación de recorridos georreferenciados, aunque a costa, en términos generales, de una precisión ligeramente inferior a la alcanzable mediante observación estática, dada la menor cantidad de tiempo disponible para promediar el efecto de los errores aleatorios presentes en cada observación individual.

Dentro de esta modalidad cinemática resulta necesario distinguir, además, entre el posicionamiento cinemático en tiempo real, en el cual la posición corregida se obtiene de manera instantánea en el propio momento de la observación en campo, y el posicionamiento cinemático en modo posproceso, en el cual las observaciones se registran en campo para ser posteriormente procesadas en gabinete en conjunto con los datos de la estación de referencia correspondiente.

9.3. Posicionamiento diferencial DGPS y posicionamiento RTK

Dentro del conjunto de técnicas de posicionamiento relativo, resulta pertinente distinguir dos modalidades de particular relevancia práctica según el tipo de observable GNSS empleado como base del cálculo diferencial. El método DGPS (*Differential GPS*), o posicionamiento diferencial de código, se sustenta sobre las mediciones de pseudodistancia obtenidas a partir de los códigos transmitidos por los satélites,

permitiendo alcanzar, mediante la aplicación de correcciones diferenciales calculadas a partir de una estación de referencia, precisiones del orden del metro o submétrico, niveles que resultan adecuados para una amplia variedad de aplicaciones de relevamiento de campo en las que no se requiere una exactitud geodésica de mayor exigencia.

El método RTK (*Real Time Kinematic*), por su parte, se fundamenta en el empleo de la medición de fase de la onda portadora, observable considerablemente más precisa que la medición de código, aunque de resolución matemáticamente más compleja en virtud de la denominada ambigüedad de fase, esto es, la indeterminación inicial respecto del número entero de ciclos completos de la portadora comprendidos entre el satélite y el receptor. Una vez resuelta esta ambigüedad mediante los algoritmos correspondientes, el posicionamiento RTK permite alcanzar precisiones del orden centimétrico en tiempo real, constituyendo por ello la técnica de elección para aplicaciones que exigen una exactitud particularmente elevada, tales como el replanteo topográfico de obras de infraestructura o el guiado de precisión de maquinaria agrícola, mencionado ya al introducir las aplicaciones transversales del GNSS en la unidad correspondiente.

9.4. Posicionamiento puntual preciso (PPP)

Finalmente, corresponde mencionar dentro de esta clasificación una técnica de desarrollo relativamente más reciente, denominada posicionamiento puntual preciso, o PPP por su sigla en inglés (*Precise Point Positioning*), la cual se distingue de las modalidades anteriores en que no requiere la operación simultánea de una estación de referencia local, sino que recurre a productos de efemérides y de correcciones de reloj satelital de altísima precisión, generados y distribuidos globalmente por distintos servicios geodésicos internacionales, para corregir un posicionamiento originalmente absoluto y elevarlo hasta niveles de precisión centimétrica o decimétrica sin necesidad de establecer una línea base respecto de un punto de referencia próximo, si bien a costa, generalmente, de un tiempo de convergencia inicial más prolongado que el requerido por las técnicas RTK convencionales.

10. ACTIVIDADES

Configurar el receptor GPS, (Coordenadas, proyección, unidades), e instalar en sus teléfonos celulares las apps según las especificaciones del docente.

Actividad 1

Delimitación del área de estudio sobre una imagen satelital o Fotografías aéreas.

Elección sobre el material a utilizar de los posibles puntos a medir en base a criterios de Accesibilidad y precisión en la imagen y en el terreno

Medición de los Puntos seleccionados previamente, utilizando el método de posicionamiento absoluto con simples lecturas.

Actividad 2

Establecer una ruta con varios "waypoint", convenientemente seleccionados, y proceder a su navegación, utilizando para ello el Receptor GPS, y observar las distintas pantallas de información mostradas por el receptor GPS (Interfase receptor - usuario).

Para eso téngase en cuenta la siguiente información.

- Rumbo
- Distancia al punto considerado
- Velocidad de acercamiento
- Tiempo promedio de llegada a la velocidad actual
- Doblar a la izquierda o derecha y cuantos grados.
- Distancia a la recta teórica del punto de inicio y fin de la "pierna" de la ruta.

PRÁCTICO

07 GEORREFERENCIACION DE IMÁGENES SATELITALES

1. OBJETIVO PRTINCIPAL

El presente práctico tiene como objetivo principal que el estudiante comprenda los fundamentos conceptuales y adquiera la destreza operativa necesaria para llevar a cabo el proceso de georreferenciación de imágenes satelitales, entendido este como el procedimiento mediante el cual una imagen inicialmente carente de una referencia espacial explícita, es vinculada a un sistema de coordenadas, de modo tal que cada uno de sus píxeles quede asociado a una posición real sobre la superficie terrestre.

2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Distinguir conceptualmente entre los procesos de georreferenciación y ortorrectificación, reconociendo los fundamentos y alcances propios de cada uno de ellos, así como las circunstancias particulares que determinan la necesidad de aplicar uno u otro procedimiento sobre una imagen determinada.
- Identificar y comprender las principales fuentes de distorsión geométrica presentes en una imagen satelital.
- Seleccionar e identificar puntos de control terrestre (GCP, *Ground Control Points*) apropiados sobre una imagen satelital, empleando para ello tanto cartografía de referencia previamente georreferenciada como coordenadas obtenidas mediante posicionamiento GPS en terreno.
- Aplicar un modelo de transformación geométrica adecuado —polinómico de distinto orden— a partir del conjunto de puntos de control seleccionado, evaluando la calidad del ajuste obtenido mediante el análisis del error cuadrático medio (RMS) resultante.
- Ejecutar el proceso de remuestreo necesario para generar la imagen georreferenciada final, seleccionando de manera fundamentada el método de

remuestreo más apropiado de la imagen a procesar y el uso posterior previsto para el producto resultante.

- Verificar la calidad geométrica final del producto georreferenciado mediante su superposición visual con cartografía de referencia confiable, evaluando la presicion posicional y detectando eventuales desajustes.

3. MATERIAL REQUERIDO

Para el desarrollo del práctico se requiere:

- Computadora
- Software Erdas Imagine
- Imágenes de satélites
- Puntos de control obtenidos en el práctico de GPS
- Puntos de control obtenidos de Google Earth

4. INTRODUCCIÓN

Los trabajos geodésicos, que implican la ubicación o posicionamiento de puntos dentro de nuestro planeta, requieren siempre una clara definición sobre el sistema en el cual se proporcionarán las coordenadas de los puntos. Comité de Geodesia. (1999). La georreferenciación de imágenes satelitales constituye un proceso fundamental dentro del procesamiento de imagenes satelitales, en la medida en que permite alinear las imágenes con un sistema de coordenadas geográficas conocido y previamente definido, dotando a dichas imágenes de validez cartográfica precisa y, con ello, de la posibilidad de ser empleadas con rigor técnico en tareas de análisis territorial.

Este procedimiento tiene por finalidad corregir el conjunto de distorsiones geométricas que resultan inherentes a toda imagen satelital cruda, distorsiones que se originan en factores tan diversos como la rotación de la Tierra durante el tiempo de adquisición de la escena, la inclinación propia de la órbita del satélite respecto del plano ecuatorial, el relieve del terreno relevado, la curvatura de la superficie terrestre, y las variaciones instantáneas en la posición y en la orientación del sensor durante el barrido de la escena. En ausencia de una georreferenciación adecuada, estas imágenes no podrían superponerse correctamente ni con otras imágenes de la misma región adquiridas en fechas distintas, ni con cartografía vectorial, ni con otras fuentes de información geoespacial o con datos de verificación relevados en el propio terreno, circunstancia que limitaría severamente su

utilidad en aplicaciones prácticas tales como el monitoreo ambiental, la planificación urbana, la gestión de recursos naturales o el análisis de desastres de origen natural.

Resulta pertinente señalar, en términos históricos, que la teledetección satelital ha experimentado una evolución considerable desde los primeros sensores operativos, como el programa Landsat iniciado en la década de 1970 y caracterizado por resoluciones espaciales moderadas, hasta las misiones actualmente en operación, entre las que se cuentan Sentinel, MODIS o la serie más reciente Landsat 8/9, dotadas de capacidades multiespectrales e incluso hiperespectrales que permiten capturar información simultáneamente en numerosas bandas del espectro electromagnético.

No obstante, la riqueza de información espectral y espacial que estas imágenes ofrecen, resulta habitual que lleguen al usuario en formatos considerados brutos, carentes de una corrección geométrica suficientemente precisa para su uso cartográfico directo, circunstancia que hace necesaria la intervención de un proceso de corrección, ya sea de carácter manual o asistido mediante herramientas automatizadas.

El proceso de georreferenciación se inicia, en su modalidad clásica, mediante la selección de los denominados Puntos de Control de Terreno, conocidos por su sigla en inglés como GCP (*Ground Control Points*), los cuales consisten en rasgos identificables con precisión tanto en la imagen a corregir como en una fuente cartográfica de referencia, tales como cruces de caminos, curvas pronunciadas de cursos de agua, esquinas de edificaciones estables u otros elementos topográficos de fácil reconocimiento visual. Las coordenadas reales correspondientes a estos puntos se obtienen habitualmente de fuentes cartográficas confiables, entre las que se cuentan mapas topográficos de escala adecuada, observaciones GNSS de campo relevadas con la precisión requerida por el trabajo, o bases de datos geoespaciales de reconocida calidad, ya sean plataformas de acceso público como Google Earth o bases catastrales de carácter oficial. Resulta indispensable que estos puntos de control se distribuyan de manera razonablemente uniforme a lo largo de la escena, evitando su concentración en sectores particulares de la imagen, a fin de prevenir sesgos sistemáticos en el modelo de transformación resultante; como criterio orientativo general, suele recomendarse un mínimo de entre seis y diez puntos de control para transformaciones polinómicas de orden cuadrático, número que puede resultar considerablemente mayor en función de la complejidad geométrica del terreno relevado.

Una vez seleccionado el conjunto de puntos de control, se procede a la aplicación de un modelo matemático de transformación que vincula las coordenadas de posición de cada píxel dentro de la imagen, expresadas habitualmente en términos de fila y columna, con las coordenadas geográficas correspondientes, ya sea en el sistema de latitud y longitud o en un sistema de proyección cartográfica determinado. Entre los modelos de transformación más habitualmente empleados se cuentan las transformaciones lineales o afines, apropiadas para distorsiones geométricas de carácter relativamente simple; las transformaciones polinómicas de segundo o tercer orden, más adecuadas para terrenos

de topografía irregular; e incluso, en aplicaciones de mayor exigencia técnica, modelos rigurosos que incorporan explícitamente los parámetros orbitales propios del satélite que capturó la escena. Programas especializados de procesamiento digital de imágenes, entre los que se cuentan ERDAS Imagine, ENVI, QGIS o ArcGIS, facilitan considerablemente la ejecución de este proceso mediante herramientas tanto de detección automática como de selección manual de puntos de control, calculando en todos los casos un error residual, denominado RMSE por su sigla en inglés (*Root Mean Square Error*), cuyo valor debe mantenerse razonablemente bajo —típicamente inferior a 0,5 píxeles cuando se busca alcanzar una precisión de orden submétrico— como criterio de aceptación de la calidad del ajuste obtenido. Una vez validado el modelo de transformación mediante este indicador, se procede a la aplicación de un método de remuestreo —ya sea el método del vecino más próximo, la interpolación bilineal o la convolución cúbica, según fuera desarrollado en el apartado correspondiente a esta técnica— con el fin de interpolar los valores digitales sobre la nueva grilla georreferenciada, procurando en todo momento preservar en la mayor medida posible la integridad radiométrica original de las distintas bandas espectrales de la imagen.

La relevancia de este procedimiento se manifiesta con particular claridad en su amplia aplicación interdisciplinaria: en el ámbito de la agricultura de precisión, la georreferenciación permite generar mapas de cobertura vegetal basados en índices como el NDVI, correctamente alineados con los límites reales de las parcelas productivas; en el campo de la hidrología, resulta indispensable para el modelado confiable de cuencas hidrográficas y de los flujos de agua asociados a ellas; y en el contexto del estudio del cambio climático, habilita el monitoreo preciso de procesos tales como la deforestación o el retroceso de masas glaciares mediante series temporales de imágenes correctamente coregistradas entre sí. En el caso particular de la Argentina, organismos como el Instituto Geográfico Nacional y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria emplean sistemáticamente estas técnicas para la elaboración de cartografía oficial y para la generación de alertas tempranas de incendios en distintas provincias, entre ellas Santiago del Estero, integrando para ello datos provenientes de diversas plataformas satelitales, como el sistema CBERS o la serie Landsat, en estudios orientados al relevamiento de suelos y al seguimiento de eventos de sequía.

Resulta importante subrayar, finalmente, que cualquier error introducido durante el proceso de georreferenciación tiende a propagarse inevitablemente hacia los análisis posteriores que se sustenten sobre dicha imagen, ya se trate de procedimientos de clasificación supervisada o de modelados tridimensionales del terreno, circunstancia que pone de manifiesto la necesidad ineludible de validar los resultados obtenidos mediante datos de verificación relevados directamente en el campo. Este proceso, en definitiva, no solo contribuye a mejorar sustancialmente la interoperabilidad de los datos dentro de un entorno de Sistemas de Información Geográfica, sino que además democratiza considerablemente el acceso a información geoespacial de calidad, en la medida en que

numerosas plataformas de distribución gratuita, tales como USGS EarthExplorer o el Copernicus Open Access Hub, permiten hoy acceder sin costo a imágenes ya parcialmente corregidas, fomentando de este modo tanto la investigación académica como la toma de decisiones territoriales fundamentada en evidencia objetiva. En síntesis, la georreferenciación transforma datos originalmente brutos en herramientas efectivamente accionables para el análisis territorial, constituyendo el puente metodológico indispensable entre la observación orbital y la realidad concreta del terreno.

5. CONCEPTOS IMPORTANTES

Las coordenadas geográficas son un sistema de referencia angular que permite ubicar cualquier punto en la superficie terrestre con precisión, basado en una representación elipsoidal del planeta (Sánchez, 2012).

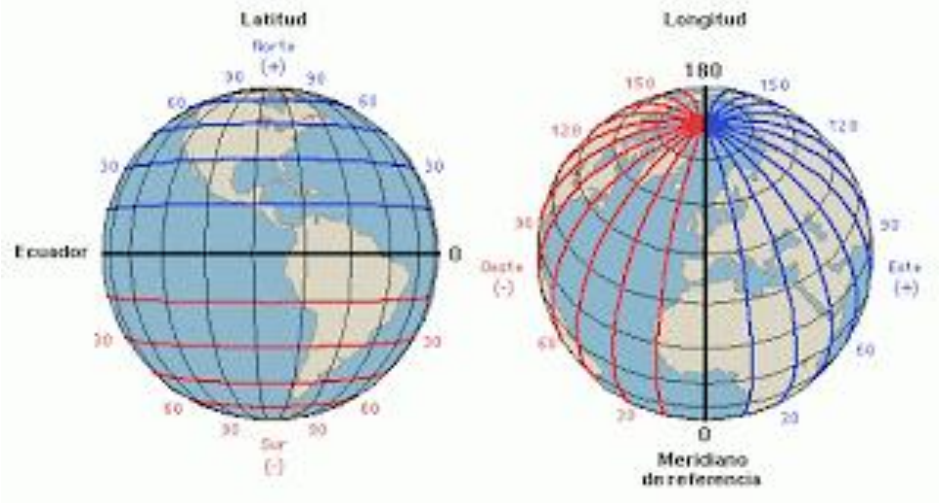


Figura 7.1 *Coordenadas. Extraído de Biblioteca de Alejandría 3.0: 1° y 2°ESO COORDENADA GEOGRÁFICAS http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/*

Este sistema utiliza principalmente dos valores angulares: la latitud y la longitud, expresados en grados (°), minutos (') y segundos ("). Opcionalmente, se incluye la altitud para especificar la altura sobre el elipsoide. Representan la posición respecto a líneas imaginarias como el ecuador y el meridiano de Greenwich.

.

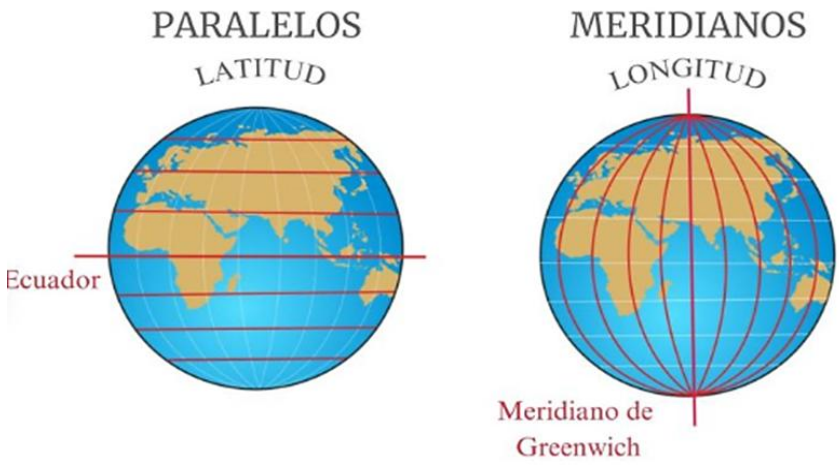


Figura 7.2 Paralelos y meridianos. Fuente: Elaboración propia.

5.1. Coordenadas geodésicas Latitud, Longitud y Altitud.

La latitud mide el ángulo entre el plano ecuatorial y la línea radial desde el centro de la Tierra hasta el punto en cuestión, variando de 0° en el ecuador a 90° en los polos (N para hemisferio norte, S para sur). Todos los puntos con la misma latitud forman paralelos, círculos horizontales paralelos al ecuador.

La longitud indica la distancia angular este-oeste desde el meridiano cero (de Greenwich), que pasa por Londres, hasta 180° en ambos sentidos (E para este, W para oeste). Los meridianos son semicírculos verticales que conectan los polos y convergen en ellos, reduciendo la distancia por grado hacia los polos.

La altitud (o altura) complementa las coordenadas horizontales, medida en metros sobre el elipsoide. En notación decimal, se usan grados con decimales (ej. 34.6037° S, 58.3816° W para Buenos Aires); en sexagesimal, incluye minutos y segundos para mayor precisión

Las coordenadas geográficas de latitud y longitud forman un sistema de referencia global que se visualiza comúnmente en un globo terráqueo o mapa con una grilla de paralelos y meridianos

5.2. Proyección cartográfica. Clasificación.

Una proyección cartográfica puede definirse como el conjunto de procedimientos matemáticos mediante los cuales las posiciones de los puntos ubicados sobre la superficie curva de la Tierra, expresadas originalmente en términos de latitud y longitud, se transforman en posiciones sobre una superficie plana, susceptible de ser representada gráficamente en un mapa o de ser almacenada digitalmente mediante coordenadas

cartesianas. La necesidad de recurrir a este tipo de transformación se desprende directamente de un hecho geométrico ineludible: resulta matemáticamente imposible representar sobre un plano la totalidad de una superficie esférica o elipsoidal sin introducir, en dicho proceso, algún tipo de deformación sistemática.

En virtud de esta limitación, toda proyección cartográfica implica necesariamente un compromiso entre la preservación de determinadas propiedades geométricas de la superficie terrestre y la consecuente distorsión de otras, resultando la propiedad efectivamente preservada el criterio fundamental para la clasificación de las proyecciones.

Las proyecciones conformes son aquellas que privilegian la preservación de los ángulos y, en consecuencia, de las formas locales de los objetos representados, aunque a costa de introducir deformaciones progresivamente mayores en las superficies y en las distancias a medida que uno se aleja de determinadas líneas o puntos de tangencia.

Las proyecciones equivalentes, por su parte, priorizan la preservación de las superficies o áreas representadas, garantizando que la relación de tamaño entre distintas regiones del mapa se corresponda fielmente con la relación de tamaño real de dichas regiones sobre la superficie terrestre, propiedad de considerable relevancia en aplicaciones de carácter estadístico o en estudios que requieran comparar extensiones territoriales.

Existe, un tercer grupo de proyecciones denominadas equidistantes, las cuales preservan las distancias reales únicamente a lo largo de determinadas líneas particulares del mapa, careciendo de la propiedad de conformidad o de equivalencia en sentido estricto, y constituyendo en muchos casos una solución de compromiso intermedia entre los dos tipos anteriores.

Un segundo criterio de clasificación de las proyecciones cartográficas se vincula con la naturaleza de la superficie geométrica auxiliar empleada como intermediaria en el proceso de transformación entre el elipsoide terrestre y el plano final del mapa.

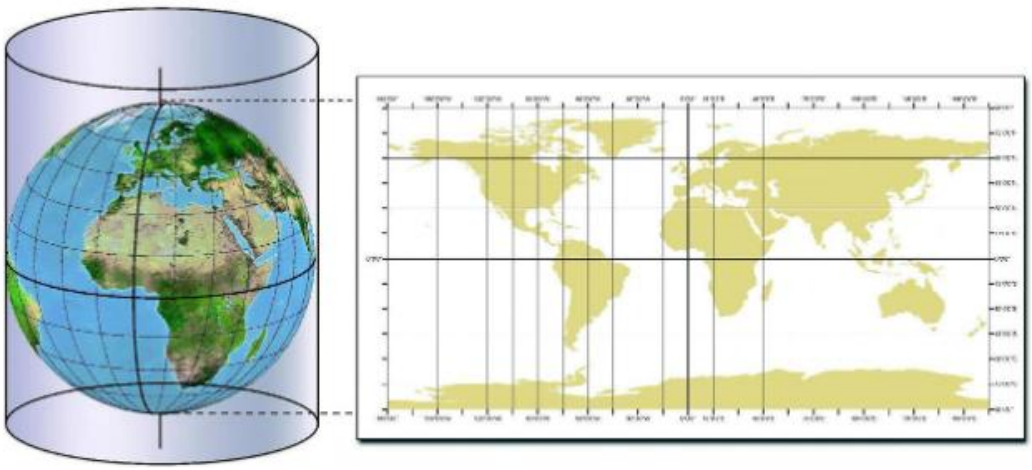


Figura 7.3 *Proyección cilíndrica. Fuente: Elaboración propia.*

Las proyecciones cilíndricas emplean como superficie auxiliar un cilindro, tangente o secante a la superficie terrestre, que posteriormente se desarrolla sobre un plano; las proyecciones cónicas recurren, en cambio, a un cono como superficie intermediaria, resultando particularmente apropiadas para la representación de regiones de latitudes medias y de extensión predominantemente longitudinal en sentido este-oeste; y las proyecciones acimutales o planas proyectan directamente los puntos de la superficie terrestre sobre un plano tangente o secante, orientación que las hace especialmente adecuadas para la representación de las regiones polares, donde tanto las proyecciones cilíndricas como las cónicas tienden a introducir distorsiones extremas.

En argentina usamos transversal Mercator, variante de la proyección de Mercator que rota el cilindro 90° para hacerlo tangente o secante a un meridiano central, ideal para regiones norte-sur como husos estrechos. (Chuvieco, 1995)

Es una proyección conforme (preserva ángulos y formas locales), con baja distorsión cerca del meridiano central. El meridiano central se proyecta como línea recta vertical sin deformación; paralelos forman curvas suaves.

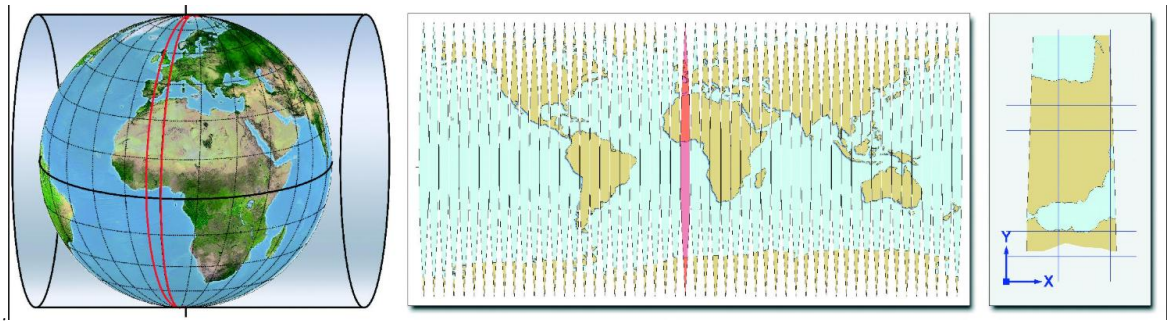


Figura 7.4 Proyección transversal Mercator. Fuente: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Es necesario conocer dos sistemas de proyección estrechamente emparentados entre sí, ambos derivados del mismo principio de proyección cilíndrica transversa conforme, aunque con parametrizaciones ligeramente distintas.

- El sistema oficial adoptado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) para la cartografía sistemática del país es la proyección Gauss-Krüger, aplicada sobre el datum POSGAR 07 (Posiciones Geodésicas Argentinas, versión 2007), que constituye el marco de referencia geodésico oficial vigente en el país y que se encuentra vinculado, a su vez, al sistema de referencia internacional ITRF.
- El sistema UTM, que subdivide la superficie terrestre en husos o fajas de 6° de amplitud.

El sistema Gauss-Krüger empleado en la Argentina utiliza fajas meridianas más angostas, de 3° de amplitud cada una, numeradas del 1 al 7 y centradas en meridianos que van desde los -72° hasta los -54°.

6. CORRECCIONES GEOMÉTRICAS

Las correcciones geométricas constituyen el conjunto de procedimientos orientados a corregir las distorsiones espaciales que afectan a una imagen satelital en su forma original, distorsiones que hacen que la posición de cada píxel dentro de la matriz de la imagen no se corresponda de manera exacta con la posición real del elemento del terreno que dicho píxel representa. Resulta importante distinguir, desde el inicio, este tipo de corrección de las correcciones radiométricas desarrolladas en apartados anteriores del curso, en la medida en que estas últimas operan sobre el valor numérico almacenado en cada píxel, mientras que las correcciones geométricas operan, en cambio, sobre la posición espacial que dicho píxel ocupa dentro de la imagen, sin alterar necesariamente el valor radiométrico de dicho pixel.

Las fuentes de distorsión geométrica que afectan a una imagen satelital cruda son de naturaleza diversa y pueden agruparse, siguiendo a Chuvieco, en distorsiones de carácter sistemático y distorsiones de carácter no sistemático o aleatorio.

En función de esta distinción, resulta habitual clasificar los métodos de corrección geométrica en dos grandes enfoques complementarios. La corrección sistemática, también denominada corrección orbital, se basa en el empleo de modelos matemáticos que reconstruyen la geometría de adquisición de la escena a partir de los parámetros orbitales y de actitud del satélite, conocidos con precisión gracias a la telemetría del propio segmento espacial, permitiendo corregir la totalidad de las distorsiones de origen sistemático sin necesidad de recurrir a información adicional sobre el terreno relevado; este tipo de corrección suele encontrarse ya aplicada, en mayor o menor medida, en los productos de nivel de procesamiento estándar que distribuyen las principales agencias espaciales, tales como los productos de nivel L1T de Landsat o de nivel 1C de Sentinel-2.

La corrección mediante puntos de control terrestre, en cambio, aborda tanto las distorsiones sistemáticas residuales como las de carácter no sistemático, recurriendo para ello a la selección de un conjunto de puntos de control identificables simultáneamente en la imagen y en una fuente cartográfica de coordenadas conocidas, y que constituye, el método más frecuentemente empleado por el usuario final.

Resulta pertinente, en este punto, introducir una distinción conceptual de considerable importancia práctica, referida a los distintos niveles de rigurosidad con que puede abordarse la corrección geométrica de una imagen según se considere o no el efecto del

relieve del terreno sobre la posición aparente de los objetos representados. Cuando la corrección geométrica se resuelve mediante un modelo de transformación puramente bidimensional, sin incorporar información alguna sobre las variaciones de altitud del terreno, se obtiene lo que se denomina una imagen simplemente georreferenciada, la cual conserva aún cierto grado de distorsión residual atribuible al denominado desplazamiento por relieve, fenómeno mediante el cual los objetos de mayor altura se representan desplazados de su posición planimétrica real en una magnitud proporcional tanto a su elevación como al ángulo de observación del sensor respecto del punto considerado. Cuando, en cambio, la corrección geométrica incorpora explícitamente un modelo digital de elevación del terreno con el fin de compensar dicho desplazamiento por relieve, corrigiendo la posición de cada píxel en función de la altitud real del terreno que representa, se obtiene lo que se denomina propiamente una imagen ortorrectificada.

La corrección geométrica de una imagen satelital, sigue una secuencia metodológica, cuyas etapas conviene desarrollar con cierto detalle a los fines de su aplicación tanto teórica como operativa dentro del entorno de ERDAS Imagine empleado en este curso.

El procedimiento se inicia, en primer término, con la definición del sistema de referencia de destino hacia el cual se transformará la imagen.

Luego se definen 3 etapas

- Localización de puntos de control comunes a la imagen y el mapa (o a otra imagen de referencia).
- Cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y las del mapa.
- Transferencia de los ND originales a la nueva posición, definida por la transformación previa.

6.1. Establecimiento de puntos de control

Una vez definido el sistema de destino, corresponde proceder a la selección de los puntos de control terrestre, o GCP, etapa que constituye habitualmente la de mayor incidencia sobre la calidad final del producto corregido.

Para que el ajuste entre imagen y mapa sea correcto, ser requiere atender a tres aspectos en la selección de puntos de control, cantidad, localización y Distribución.

La cantidad de puntos a utilizar, depende del tamaño y la complejidad geométrica de la imagen. Cuanto mayor sea el grado de la ecuación de ajuste, se precisa también un mayor número de puntos de control. Matemáticamente solo son necesarios tres puntos para una función de Ajuste de primer grado, seis para una de segundo grado y diez para una

de tercer grado. Ahora bien, conviene superar este número mínimo para garantizar una buena conformidad entre imagen y mapa.

En caso de que el contraste topográfico sea importante, convendrá seleccionar un mayor número de puntos y acudir a polinomios de transformación más complejos.

Se recomienda que con respecto a su localización sean puntos claramente identificables en la imagen y en el mapa, preferiblemente rasgos humanos del paisaje no sujetos a dinamismo temporal: cruces de carreteras, presas, vías de ferrocarril, etc. Los programas más modernos de corrección geométrica facilitan la localización interactiva de estos puntos de control, con ayuda del digitalizador o ratón electrónico. Conviene seleccionar solo aquellos puntos claramente identificables sobre el mapa y la imagen. En caso de que se pretenda el registro de dos imágenes, alguno de estos programas permite visualizar ambas simultáneamente facilitando mucho el proceso de selección.

En lo que hace a su distribución, conviene que los puntos de control se sitúen uniformemente sobre todo el territorio abarcado en la imagen. Esto evitara errores debidos a una ponderación excesiva de algún sector del área de estudio. La norma es especialmente importante cuando la zona presenta contrastes topográficos. Aunque el efecto de desplazamiento por relieve es menor que en el caso de la fotografía aérea (debido a la altura de la órbita) también en las imágenes de satélite existe un efecto de desplazamiento que puede causar serios problemas en su ajuste cartográfico. Para intentar paliarlos, resulta recomendable introducir puntos de control sobre áreas de distinta altitud, e incluso sobre cotas, siempre que estas resulten identificables en la imagen y que sean posibles de alcanzar.

.

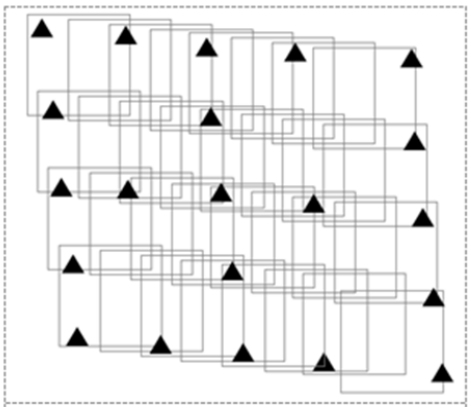


Figura 7.5 Distribución de puntos de control en bloques de imágenes. Fuente: TP 10, Teledetección forestal FCF UNSE.

6.2. Cálculo de funciones de transformación

La corrección digital de la geometría de una imagen se realiza estableciendo una función matemática, que pone en relación las coordenadas de la imagen con las del mapa.

Desde el punto de vista práctico, conviene considerar que una función lineal basta para aplicar unas transformaciones elementales de la imagen, como cambiar su escala y origen, inclinarla, modificar la relación entre sus ejes y rotarla. Estas alteraciones serán, de modo habitual, suficientes para corregir imágenes pequeñas, siempre que no se presentes contrastes altimétricos importantes. En caso de precisar una modificación más rigurosa, puede acudirse a funciones de segundo o tercer grado, en donde se abordan alteraciones geométricas no lineales.

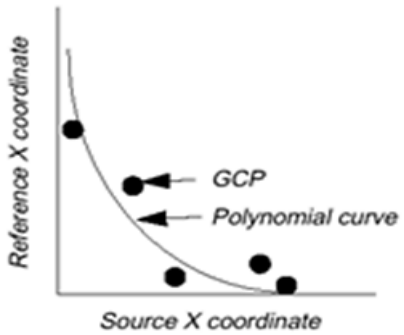


Figura 7.6 *Puntos de control curva de regresión lineal. Fuente: TP 10 Teledetección forestal FCF UNSE.*

La bondad del grado de ajuste conseguido se mide por la importancia de los residuales. Como es bien sabido, el residual de la regresión es la diferencia entre el valor estimado y el real, para cada una de las observaciones empleadas en el proceso. Cuando mayor sea ese valor, el ajuste entre las variables independientes y dependientes es menor. En nuestro caso la calidad de la corrección geométrica puede valorarse comparando para cada punto de control, las coordenadas estimadas por la regresión con las reales. El indicador más utilizado, con este objetivo, es el error medio-cuadrático (RMS).

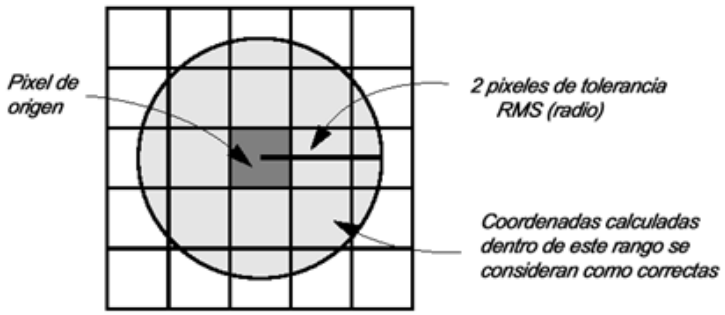


Figura 7.7 *Error de tolerancia (RMS). Fuente: TP 10 Teledetección Forestal FCF UNSE.*

Un valor alto de RMS (para el caso de la figura, RMS mayor que 2), indica que ese punto no se ajusta convenientemente a la transformación imagen / mapa. El promedio de los RMS para todos los puntos de control facilita una evaluación de la calidad general del ajuste. Si ese valor no es satisfactorio, puede optarse por eliminar aquellos puntos con un alto RMS, ya que se asume que no se localizaron correctamente. Al eliminarse algún punto de control, se calcula de nuevo la ecuación de ajuste y los RMS para cada punto. El proceso se interrumpe cuando todos los puntos seleccionados presentan un RMS por debajo de un cierto umbral, previamente fijado por el operador. El error medio debe estar, en ese momento, dentro de unos márgenes tolerables, de acuerdo a la precisión con que se pretenda obtener los resultados, esto también depende de la resolución espacial de la imagen.

6.3. Transferencia de los ND Originales a la posición corregida

Las funciones antes analizadas permites traducir coordenadas del mapa a la imagen. Ahora bien, si pretende crearse una imagen que se corresponda adecuadamente con esas coordenadas, resulta necesario trasvasar, de alguna forma, los ND de la imagen original a esa nueva posición. Las funciones de ajuste permiten calcular la posición correcta de cada píxel.

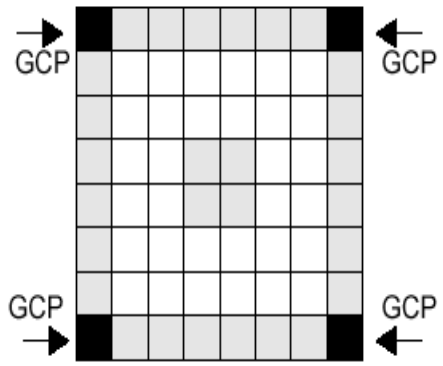


Figura 7.8 Entrada de los puntos de control.

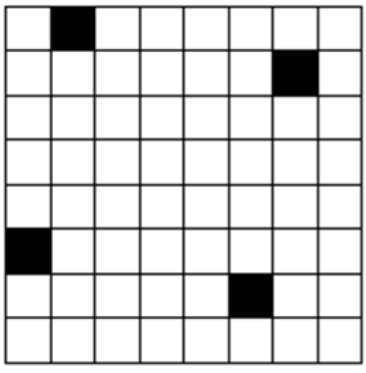


Figura 7.9 Grilla de la imagen de salida mostrando la posición de los GSP

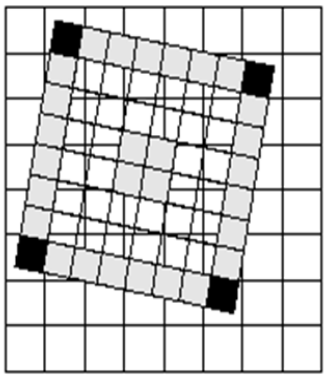


Figura 7.10 *Para comparar las dos grillas (ráster), la imagen de entrada es superpuesta sobre la grilla de salida, de tal forma que los GCP de las dos grillas coincidan.*

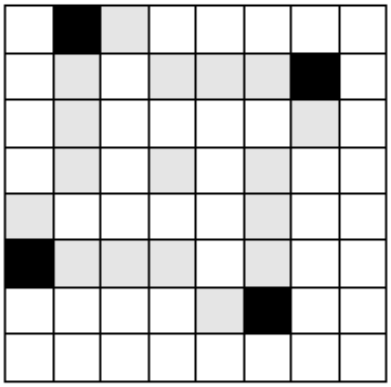


Figura 7.11 *Usando alguno de los métodos de Remuestreo (Resample), los ND de la imagen de entrada, son asignados a los pixeles de la imagen de salida.*

Fuente de imágenes: https://www.academia.edu/12828280/Digital_Image_Processing_of_Satellite_image

Idealmente, cada píxel de la imagen corregida deberá corresponderse a un solo píxel en la original. Lo normal es que no sea así, sino que el píxel de la nueva imagen se sitúe entre varios de la original, ya que este proceso supone una alteración considerable de la geometría original de la escena. Por otra parte, puede variarse también el tamaño del píxel en la imagen corregida, haciendo aún más complejo encontrar el ND que mejor exprese el valor radiométrico originalmente detectado por el sensor. El Remuestreo de ND a la imagen corregida será abordado por tres métodos:

- Vecino más próximo.
- Interpolación bilineal.
- Convolución cúbica.

Los tres métodos de remuestreo empleados habitualmente en el proceso de transferencia de niveles digitales hacia la grilla corregida —el vecino más próximo, la interpolación bilineal y la convolución cúbica— se diferencian fundamentalmente por el número de píxeles de la imagen original que cada uno de ellos considera al momento de calcular el valor digital correspondiente a un píxel de la grilla de destino, así como por la naturaleza matemática de la operación aplicada sobre dichos píxeles vecinos, diferencias que determinan, en cada caso, un compromiso particular entre la fidelidad radiométrica del producto resultante y la calidad visual o geométrica de la imagen corregida.

6.3.1 Vecino más próximo

El método del vecino más próximo, conocido en inglés como nearest neighbour, constituye la aproximación conceptualmente más simple de las tres, en la medida en que considera un único píxel de la imagen original: aquel cuyo centro se encuentra geométricamente

más próximo a la posición calculada. El valor digital de dicho píxel se transfiere sin modificación alguna al píxel de la grilla de destino, de modo tal que el conjunto de valores digitales presentes en la imagen corregida resulta idéntico, en su totalidad, al conjunto de valores presentes en la imagen original, sin la introducción de ningún valor interpolado. Esta propiedad de preservación radiométrica exacta constituye la principal ventaja del método, resultando de particular importancia cuando la imagen a remuestrear corresponde a un producto de naturaleza categórica, como una imagen ya clasificada temáticamente, en la cual cada valor digital representa una clase discreta de cobertura del terreno.

Como contrapartida, el método del vecino más próximo tiende a producir un efecto de escalonamiento visible a lo largo de los bordes y de los rasgos lineales de la escena, en tanto la asignación discreta de píxeles completos genera transiciones abruptas entre valores contiguos, efecto que resulta particularmente notorio cuando el factor de cambio de escala aplicado es considerable.

6.3.2 Interpolación bilineal

La interpolación bilineal, por su parte, amplía la vecindad considerada a los cuatro píxeles de la imagen original más próximos a la posición calculada, es decir, aquellos que rodean inmediatamente dicha posición en las cuatro direcciones cardinales. El valor digital asignado al píxel de destino se calcula, en este caso, como un promedio de los cuatro píxeles más cercanos a esa posición. Este procedimiento produce un resultado visualmente más suavizado que el obtenido mediante el vecino más próximo, reduciendo sensiblemente el efecto de escalonamiento en los bordes de la escena, aunque introduce, como contrapartida ineludible, valores digitales promedios que no se corresponden exactamente con ninguna medición original efectuada por el sensor, en tanto todo valor resultante de un promedio ponderado constituye, en rigor, una estimación matemática y no una observación directa.

6.3.3 Convolución cúbica

La convolución cúbica, finalmente, extiende este mismo principio de ponderación a una vecindad considerablemente más amplia, compuesta típicamente por los 16 píxeles circundantes a la posición calculada, dispuestos en una matriz de cuatro por cuatro elementos alrededor de dicha posición. El valor de destino se calcula mediante una función de ponderación que tiende a producir resultados aún más suavizados y visualmente continuos, particularmente apropiados para la generación de productos cartográficos de presentación final en los que la calidad visual de la imagen resulta un criterio prioritario. No obstante, este método conlleva tanto un costo computacional sensiblemente mayor que los dos anteriores, en virtud del número considerablemente

superior de píxeles involucrados en cada cálculo individual, como una alteración más pronunciada de los valores radiométricos originales respecto del método bilineal, circunstancia que debe sopesarse cuidadosamente frente al objetivo específico perseguido por el producto final que se pretende generar.

En síntesis, la selección entre estos tres métodos de remuestreo no responde a un criterio de superioridad absoluta de uno sobre los restantes, sino que debe fundamentarse en la naturaleza de la imagen a procesar y en el uso posterior previsto para el producto corregido: el vecino más próximo resultará el método de elección toda vez que la preservación exacta de los valores digitales originales constituya una condición ineludible del análisis, mientras que la interpolación bilineal y, en mayor medida aún, la convolución cúbica, resultarán preferibles cuando el objetivo prioritario del trabajo sea la obtención de un producto cartográfico de calidad visual óptima, destinado fundamentalmente a la interpretación visual antes que al análisis cuantitativo riguroso de sus valores radiométricos. De una correcta georreferenciación depende en gran medida, el aprovechamiento que pueda hacerse de un SIG, Comité de Geodesia. (1999).

7. PROCEDIMIENTO

El procedimiento de georreferenciación dentro del entorno de ERDAS Imagine sigue una secuencia operativa relativamente estandarizada, con independencia de que la fuente de los puntos de control provenga de una imagen de referencia ya georreferenciada, de coordenadas relevadas en terreno mediante GPS, o de un visor de acceso público como Google Earth. A continuación se describe dicha secuencia en sus etapas fundamentales, tal como se aplica de manera habitual en los trabajos prácticos de este curso.

El proceso se inicia con la apertura, dentro del entorno de trabajo de ERDAS Imagine, tanto de la imagen que se pretende georreferenciar —denominada habitualmente imagen fuente o *source*— como, en el caso de la georreferenciación imagen a imagen, de la imagen o cartografía que servirá como referencia de coordenadas conocidas, denominada imagen de referencia o *reference*.

A continuación, se accede al módulo específico de georreferenciación del software.

Es necesario definir en primer término el modelo de transformación geométrica que se empleará para el ajuste, seleccionando entre las opciones disponibles —polinómica de primer, segundo o tercer orden, u otros modelos ofrecidos por el software— según la complejidad de las distorsiones presentes en la imagen.

Definido el modelo de transformación, corresponde configurar la ventana de selección de proyección, especificando el sistema de coordenadas de destino bajo el cual quedará

expresada la imagen corregida, ya sea el sistema Gauss-Krüger adoptado por la cartografía oficial argentina —debiendo en tal caso definirse explícitamente el esferoide, el datum, y la faja correspondiente según la ubicación geográfica del área de trabajo, o bien un sistema geográfico de latitud y longitud sin proyección cartográfica, empleando en este último caso el esferoide y el datum WGS84, consistente con el sistema nativo de los receptores GPS.

Una vez configurado el sistema de referencia, se procede a la incorporación efectiva de los puntos de control, etapa que puede resolverse de dos maneras según la modalidad de trabajo elegida. En la georreferenciación imagen a imagen, el operador selecciona de manera visual un punto identificable simultáneamente en ambas imágenes, haciendo clic primero sobre dicho rasgo en la imagen fuente y luego sobre el rasgo homólogo en la imagen de referencia, de modo que el software toma automáticamente las coordenadas ya georreferenciadas de esta última y las asigna como coordenadas de destino del punto seleccionado. En la modalidad de ingreso manual, en cambio, seleccionando la opción *Keyboard Only* dentro de la configuración de herramientas de GCP, el operador hace clic únicamente sobre el punto de interés en la imagen fuente —quedando sus coordenadas de pantalla automáticamente registradas en los campos X input e Y input—, debiendo luego tipear manualmente las coordenadas reales correspondientes a dicho punto, ya provengan estas de un relevamiento GPS de campo o de una extracción realizada sobre Google Earth, quedando dichas coordenadas registradas en los campos X Ref. e Y Ref. del software.

Este proceso de incorporación de puntos se repite de manera sucesiva hasta alcanzar un número de puntos de control adecuado para el orden del modelo de transformación seleccionado, prestando atención constante, a medida que cada nuevo punto se incorpora, a la evolución del error cuadrático medio, o RMSE, que el software recalcula automáticamente en cada instancia. En caso de que la incorporación de un punto determinado produzca un incremento significativo de dicho error, corresponde identificar cuál de los puntos ya ingresados presenta el mayor error residual individual —información que ERDAS Imagine despliega habitualmente en una tabla de puntos de control junto al valor de error correspondiente a cada uno de ellos— y proceder a su eliminación, recalculando en consecuencia el modelo de transformación con el conjunto de puntos restantes, repitiendo este ciclo de depuración cuantas veces resulte necesario hasta alcanzar un nivel de RMSE considerado aceptable para los fines del trabajo.

Alcanzado un ajuste satisfactorio, corresponde configurar los parámetros finales del proceso de remuestreo, seleccionando el método más adecuado —vecino más próximo, interpolación bilineal o convolución cúbica— según la naturaleza de la imagen a procesar y el uso posterior previsto para el producto resultante, tal como fuera desarrollado en el apartado correspondiente a esta técnica, y definiendo asimismo la resolución espacial de salida y la ruta de destino del nuevo archivo ráster a generar. Ejecutado el proceso, el

software genera finalmente la imagen corregida, la cual debe someterse a una última etapa de verificación visual, superponiéndola con la cartografía de referencia disponible y examinando la coherencia posicional de los rasgos identificables en ambas fuentes a lo largo de toda la escena, a fin de confirmar que el producto obtenido resulta apto para su posterior integración dentro del entorno de Sistemas de Información Geográfica empleado en las etapas subsiguientes del análisis territorial.

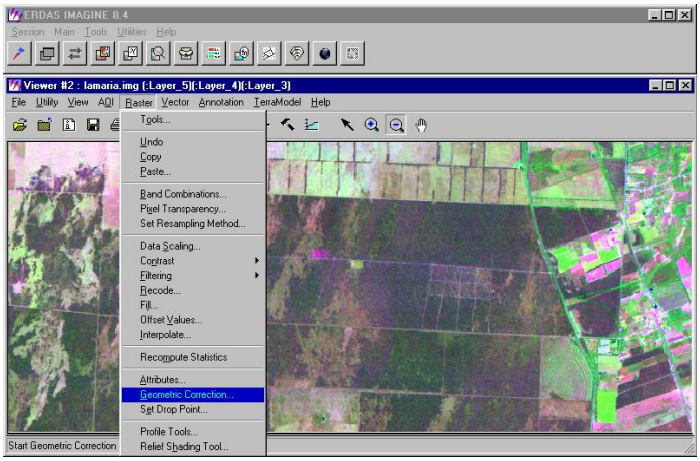


Figura 7.12. Comenzamos seleccionando desde la barra de Menú correspondiente a la ventana VIEWER, desplegando la imagen que se quiere referenciar, se elegirá "Geometric Correction".

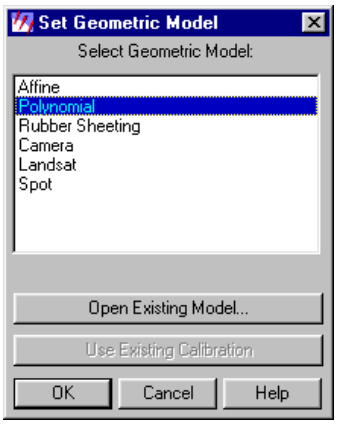


Figura 7.13. Se despliega esta ventana en donde elegiremos polynomial, las distintas opciones se refieren a modelos geométricos conocidos y utilizados para optimizar los valores proyectados, eliminando las deformaciones por desplazamiento debido al relieve, errores en la inclinación del eje principal del sensor etc. (es necesaria información adicional para los distintas opciones).

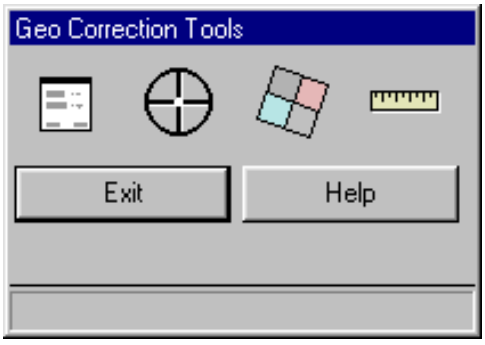


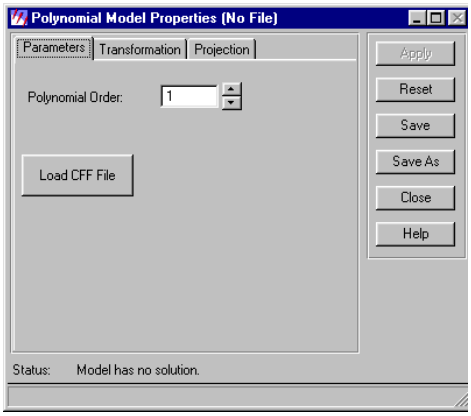
Figura 7.14. En esta ventana es donde seleccionaremos los Iconos correspondientes a:

Display Model Properties

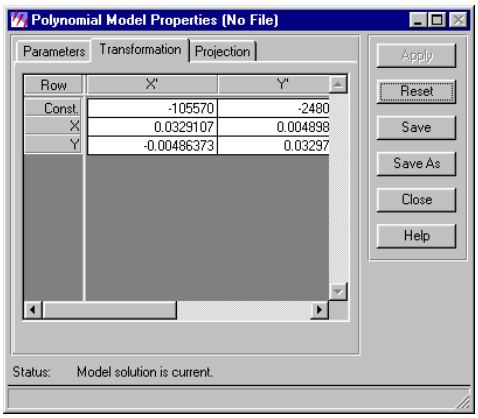
Start GCP editor

Display resample image dialog

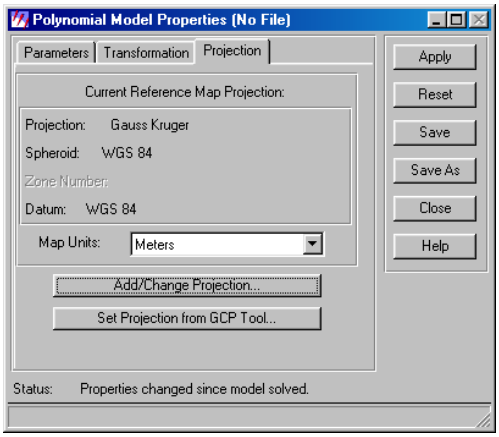
Calibrate image



a



b



c

Figura 7.15. Cuadro de dialogo: Display Model Properties con sus tres solapas.

a.- Parameters. Donde se seleccionan el orden de transformación, lineal (1), no lineal (2,3 etc.)

b.- Transformation. Mostrando los parámetros calculados, para la ecuación de ajuste elegida. (En el ejemplo se muestra parámetros correspondientes a un ajuste de primer orden).

c.- Projection: En donde se selecciona el tipo de Sistema de coordenadas, en los que están expresados los puntos de control terrestres utilizados. GCP.

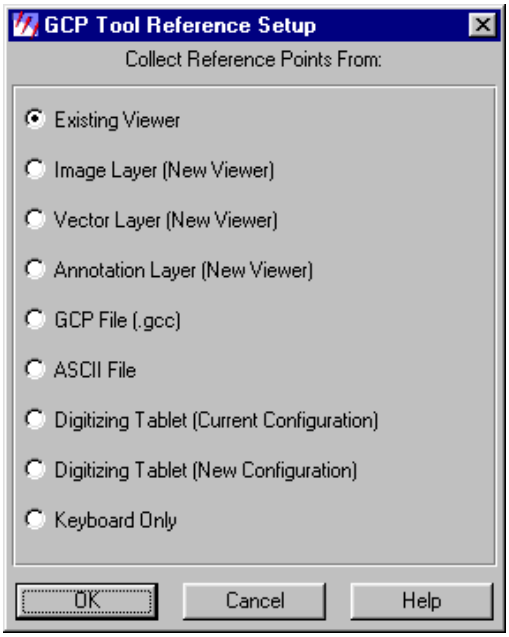


Figura 7.16. Cuadro de Dialogo "GCP tool reference setup", en donde seleccionaremos, alguna de las distintas fuentes desde donde obtener los valores de coordenadas de los puntos de control (GCP).

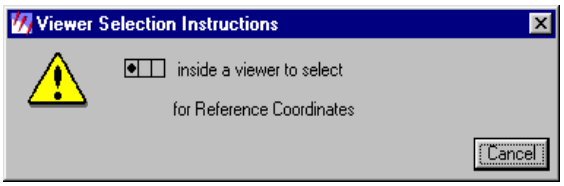


Figura 7.17. En caso de seleccionar la primera opción, aparecerá una ventana como esta indicándonos, la necesidad de seleccionar el Viewer, donde esta desplegada la imagen que servirá de referencia.

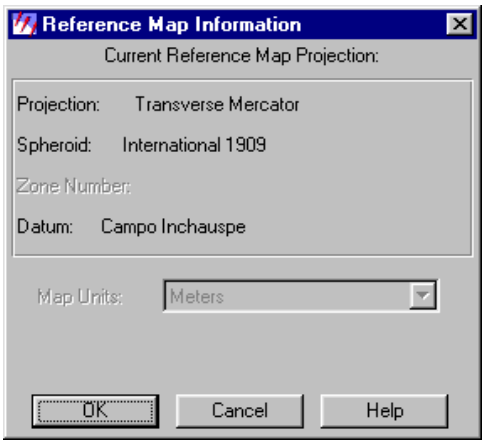


Figura 7.18. Luego de elegir el viewer de referencia, seesplegara una ventana como esta, en donde se muestra el tipo de Sistema de coordenadas que posee la imagen.

También se muestra las unidades en las que están expresados los valores de coordenadas de asociadas a la imagen (en este caso Metros).

En el caso de seleccionar la opción de introducir los puntos GCP desde teclado, será necesario configurar el tipo de proyección y coordenadas en las que están expresados dichos valores de coordenadas.

Para ello desde el Cuadro de dialogo: "Display Model Properties", solapa Projection, se seleccionará la opción de adicionar / cambiar el sistema de proyección, y se nos mostrará una ventana como la que se muestra a continuación.

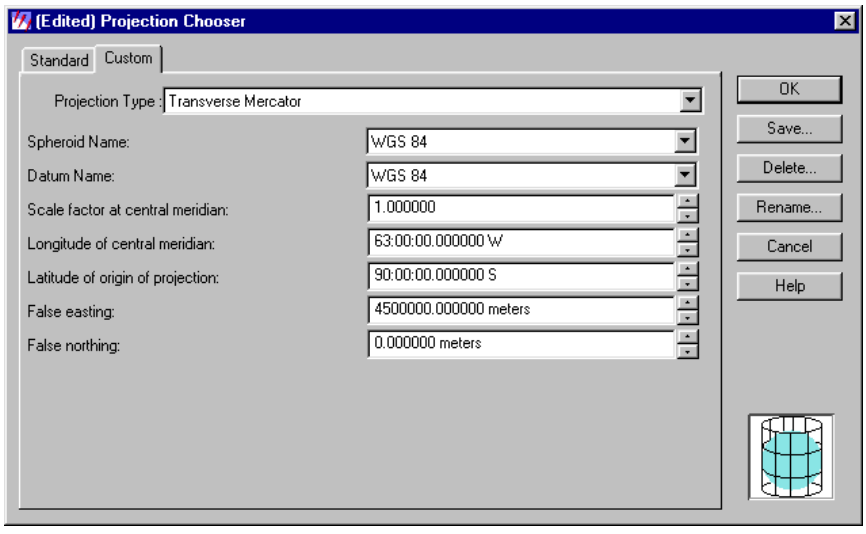


Figura 7-19 Cuadro de dialogo para configurar sistema de coordenadas.

La configuraremos con los datos visualizados, en caso de desear trabajar con el sistema POSGAR94.

Estos datos son para obtener valores de coordenadas Gauss-Krüger, cuarta faja. (Que cubre a Santiago del Estero casi en su totalidad.

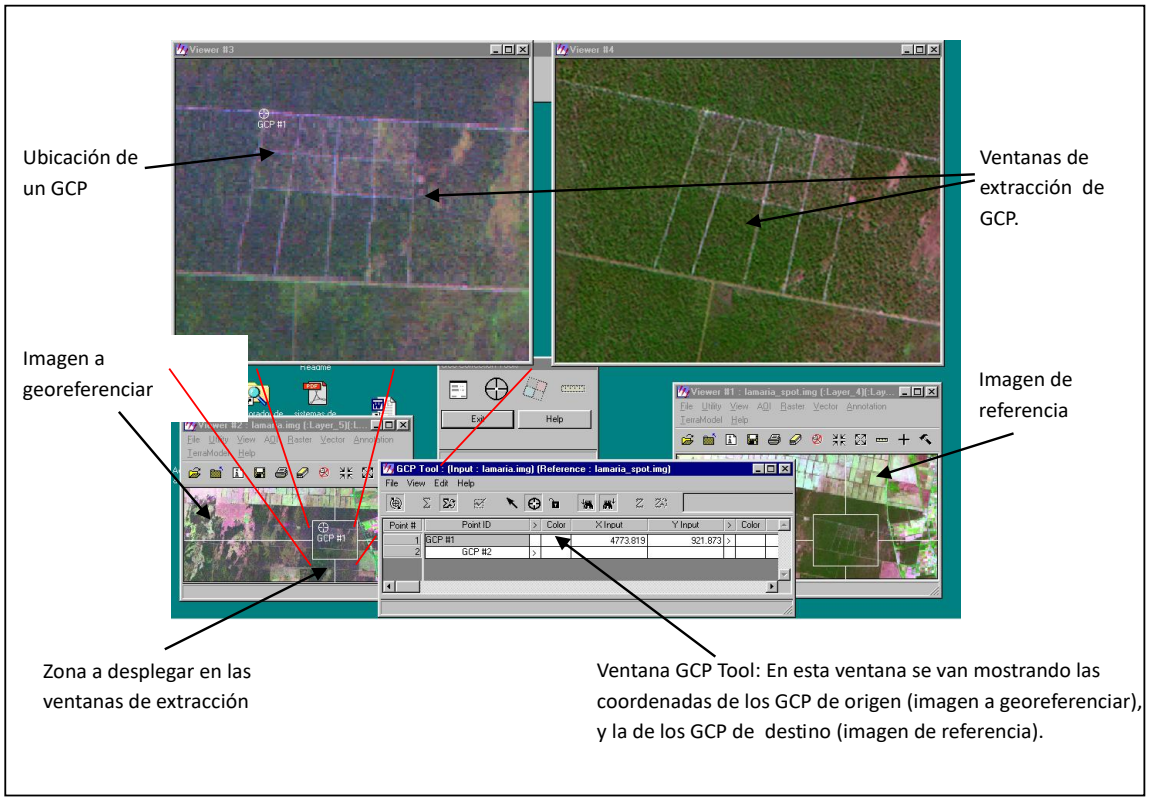


Figura 7.20. Esquema de disposición de las ventanas para el proceso de georeferenciar de imagen a imagen.

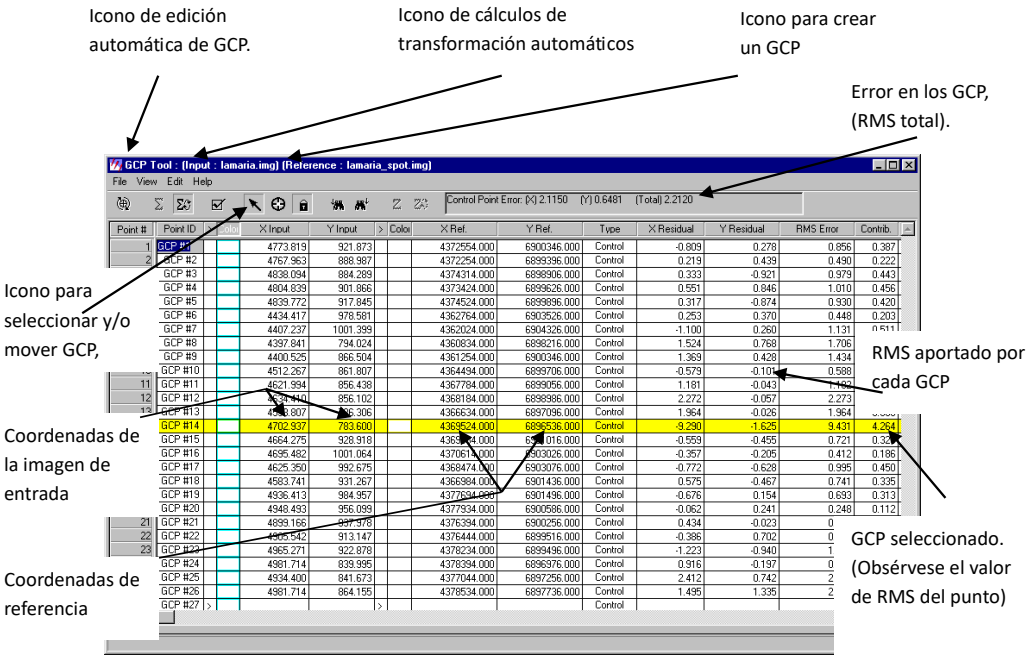
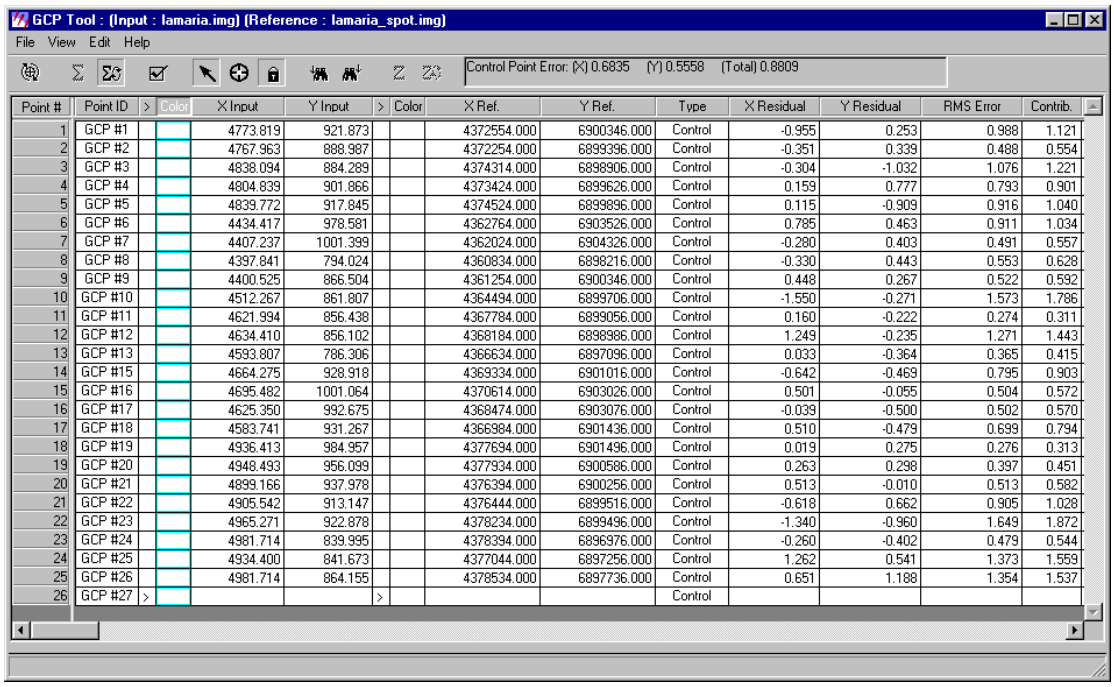


Figura 7.21. Ventana GCP Tool: Elementos que la componen



Point #	Point ID	Color	X Input	Y Input	Color	X Ref.	Y Ref.	Type	X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.
1	GCP #1		4773.819	921.873		4372554.000	6900346.000	Control	-0.955	0.253	0.988	1.121
2	GCP #2		4767.963	888.987		4372254.000	6899396.000	Control	-0.351	0.339	0.488	0.554
3	GCP #3		4838.094	884.289		4374314.000	6898906.000	Control	-0.304	-1.032	1.076	1.221
4	GCP #4		4804.839	901.866		4373424.000	6899626.000	Control	0.159	0.777	0.793	0.901
5	GCP #5		4839.772	917.845		4374524.000	6899896.000	Control	0.115	-0.909	0.916	1.040
6	GCP #6		4434.417	978.581		4362764.000	6903526.000	Control	0.785	0.463	0.911	1.034
7	GCP #7		4407.237	1001.399		4362024.000	6904326.000	Control	-0.280	0.403	0.491	0.557
8	GCP #8		4397.841	794.024		4360834.000	6898216.000	Control	-0.330	0.443	0.553	0.628
9	GCP #9		4400.525	866.504		4361254.000	6900346.000	Control	0.448	0.267	0.522	0.592
10	GCP #10		4512.267	861.807		4364494.000	6899706.000	Control	-1.550	-0.271	1.573	1.786
11	GCP #11		4621.994	856.438		4367784.000	6899056.000	Control	0.160	-0.222	0.274	0.311
12	GCP #12		4634.410	856.102		4368184.000	6898986.000	Control	1.249	-0.235	1.271	1.443
13	GCP #13		4593.807	786.306		4366634.000	6897096.000	Control	0.033	-0.364	0.365	0.415
14	GCP #15		4664.275	928.918		4369334.000	6901016.000	Control	-0.642	-0.469	0.795	0.903
15	GCP #16		4695.482	1001.064		4370614.000	6903026.000	Control	0.501	-0.055	0.504	0.572
16	GCP #17		4625.350	992.675		4368474.000	6903076.000	Control	-0.039	-0.500	0.502	0.570
17	GCP #18		4583.741	931.267		4366984.000	6901436.000	Control	0.510	-0.479	0.699	0.794
18	GCP #19		4936.413	984.957		4377694.000	6901496.000	Control	0.019	0.275	0.276	0.313
19	GCP #20		4948.493	956.099		4377934.000	6900586.000	Control	0.263	0.298	0.397	0.451
20	GCP #21		4899.166	937.978		4376394.000	6900256.000	Control	0.513	-0.010	0.513	0.582
21	GCP #22		4905.542	913.147		4376444.000	6899516.000	Control	-0.618	0.662	0.905	1.028
22	GCP #23		4965.271	922.878		4378234.000	6899496.000	Control	-1.340	-0.960	1.649	1.872
23	GCP #24		4981.714	839.995		4378394.000	6896976.000	Control	-0.260	-0.402	0.479	0.544
24	GCP #25		4934.400	841.673		4377044.000	6897256.000	Control	1.262	0.541	1.373	1.559
25	GCP #26		4981.714	864.155		4378534.000	6897736.000	Control	0.651	1.188	1.354	1.537
26	GCP #27							Control				

Figura 7.22. Ventana GCP Tool luego de eliminar el GCP # 14

Es importante tener en cuenta la función de algunos de los iconos anteriormente nombrados:

Icono de edición automática de GCP. Si esta activado, ubicara los GCP de entrada o de referencia en forma automática. Es decir calculará los valores de coordenada y los ubicara en el Viewer correspondiente. (En función del RMS calculado).

Se deberá mover el GCP, (desde la posición estimada), hasta la posición considerada como correcta. (Georeferenciamiento de imagen a imagen).

O se deberá modificar los valores de coordenadas estimados para el caso de introducción manual de coordenadas. (En el caso de utilizar GPS para la localización de GCP).

Este proceso de estimación de coordenadas y su posicionamiento automático, dependerá del orden de transformación elegido (luego del 3er punto si es lineal, después del 6to si es cuadrático, etc.)

Icono de cálculos de transformación automáticos: Si está activado, los valores de RMS se calcularán y actualizaran automáticamente al introducir o eliminar los GCP.

7.1. Etapas a seguir

Se deberá ir introduciendo la posición de los GCP (en las ventanas de extracción) y los valores de coordenadas correspondientes a cada GCP. Una vez terminado esto, se grabaran los valores de coordenadas de entrada y de referencia.

Se determinará el orden de transformación deseado.

Teniendo en cuenta el valor de RMS aportado por cada punto, se procederá a la eliminación de aquellos puntos que aporten un valor de RMS alto, este proceso finalizará cuando se llegue a un valor de RMS total, (control point error) deseado, o cuando ya sea por razones de una mala distribución o de un numero reducido de GCP no se pueda seguir eliminándolos.

Realizar la creación del nuevo archivo georeferenciado.

Verificar la imagen obtenida, y sus coordenadas.

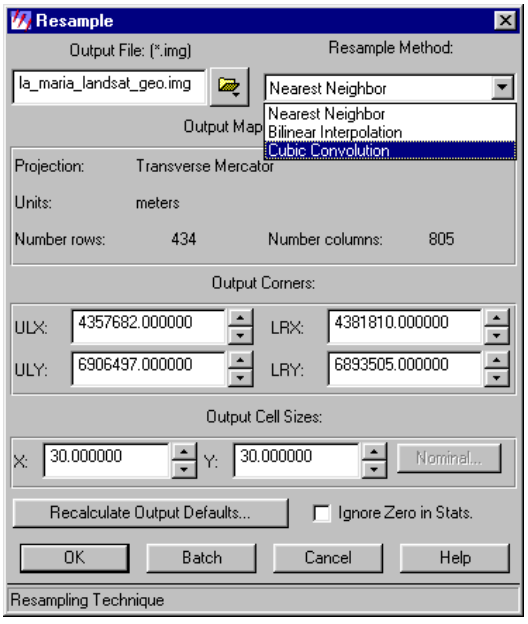


Figura 7.23. Al seleccionar del cuadro de dialogo "Geocorrection Tools" el icono correspondiente a "Display resample image dialog".

Se abrirá esta ventana en donde se seleccionará

el nombre del archivo a ser creado (imagen Georeferenciada).

Método de Remuestreo elegido.

Tamaño del píxel de la imagen georeferenciada (en unidades de mapa).



Figura 7.24. Comienza el proceso...

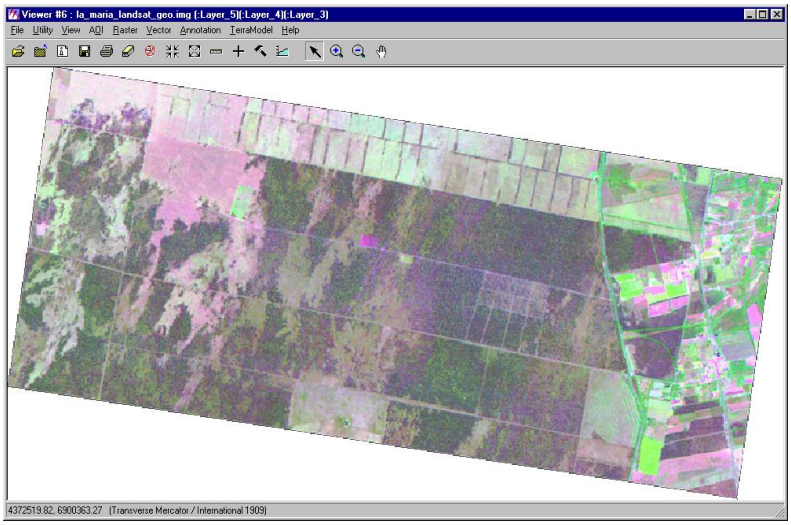


Figura 7.25. Imagen Georeferenciada: obsérvese la rotación producida.

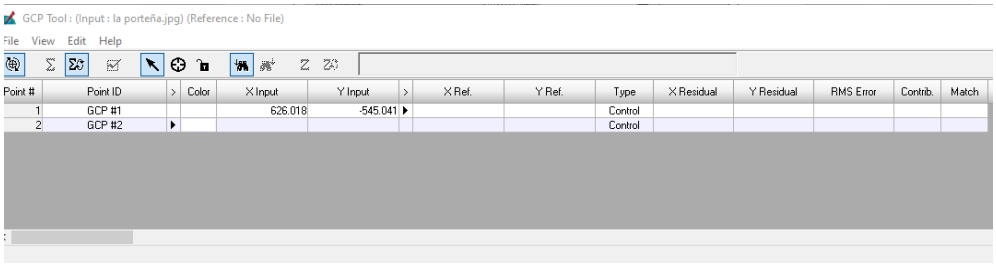


Figura 7.26. Ingreso manual de los GCP. Fuente Erdas Imagine Geometric Correction

Cuando consideramos que el RMS total se ajusta a nuestras expectativas se procede a ejecutar el Resample

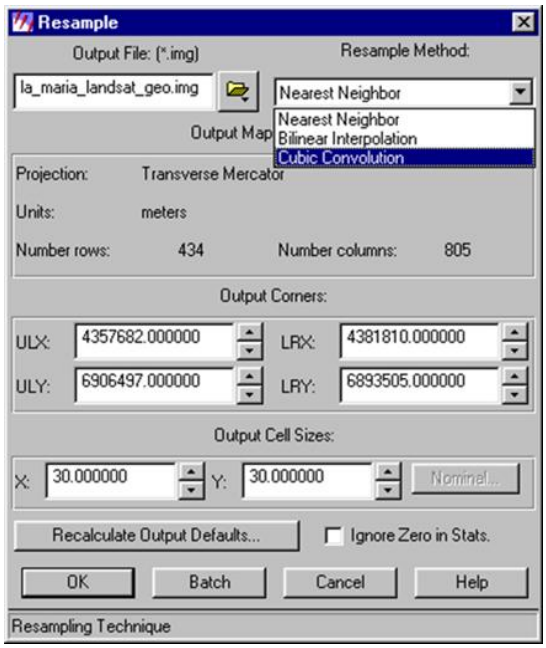


Figura 7.27 Cuadro de Dialogo de Resample. Fuente: Erdas Imagine Geometric Correction

Al seleccionar del cuadro de dialogo “Geocorrection Tools” el icono correspondiente a “Display resample Image dialog”.

Se abrirá la ventana en donde se seleccionará el nombre del archivo a ser creado (imagen georreferenciada), y el método de Remuestreo elegido, tambien deberá ingrasar el tamaño del píxel de la imagen georreferenciada (en unidades de mapa). Cuyos valores por default se recomienda en principio no modificar.



Figura 7.28 *El sistema trabaja Fuente Erdas Imagine Geometric Correction*

Como resultado se obtiene una imagen georreferenciada.

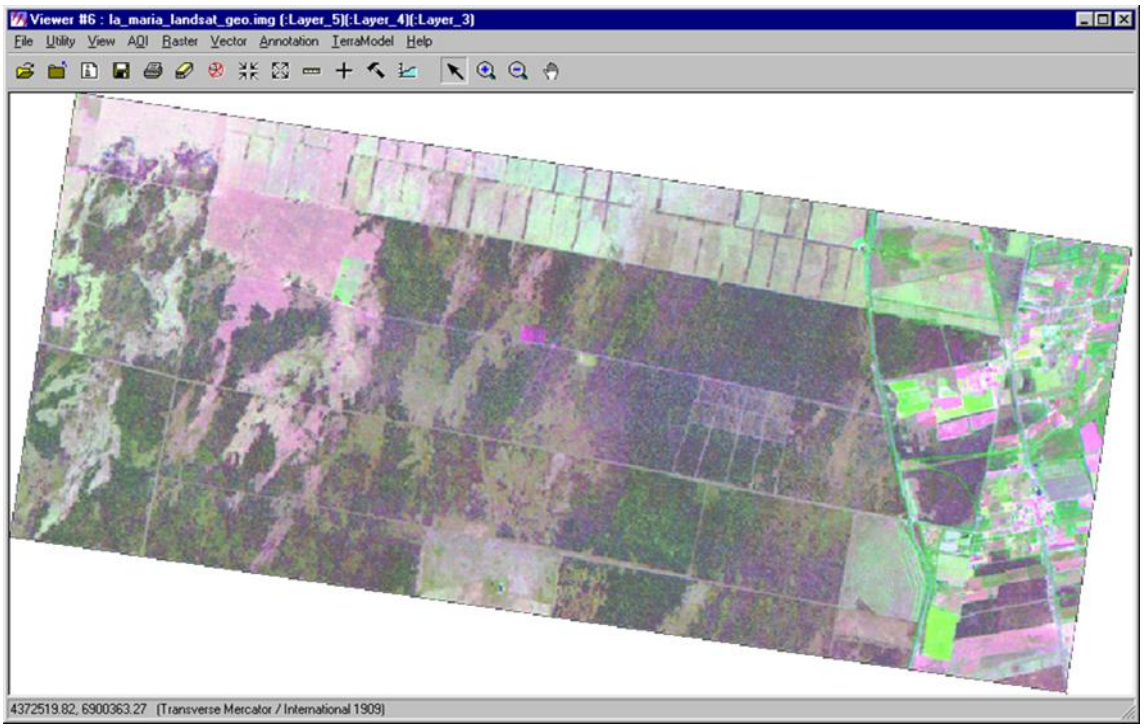


Figura 7.29 *Imagen Georreferenciada. Fuente: Elaboración Propia.*

8. ACTIVIDADES

- Estos procedimientos no admiten equivocaciones, para no perder tiempo siga estrictamente las indicaciones del profesor.
- Despliegue una imagen a georreferenciar
- Seleccione área a georreferenciar y extraiga el área.
- Georreferenciar imagen a imagen usando coordenadas de Google Earth
- Georreferenciar una imagen Utilizando Puntos de control, obtenidos con GPS.

PRÁCTICO

08 GEORREFERENCIACION DE IMÁGENES SATELITALES

1. OBJETIVO PRINCIPAL

Georreferenciar una imagen satelital Landsat (sensores TM, ETM u OLI) que carezca de referencia espacial, mediante el método imagen a imagen basado en puntos de control terrestre (GCP, *Ground Control Points*), utilizando el software ERDAS Imagine.

Se busca alcanzar un Error Medio Cuadrático (RMS, *Root Mean Square Error*) inferior a 1 píxel, de modo de obtener un producto cartográfico con precisión geométrica suficiente para su aplicación en inventarios forestales, evaluación de áreas afectadas por incendios y monitoreo multitemporal de cambios en la cobertura vegetal.

2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Comprender los fundamentos conceptuales de la georreferenciación y su diferencia respecto de la ortorrectificación.
- Identificar y seleccionar puntos de control (GCP) correctamente distribuidos sobre la escena —privilegiando esquinas, bordes y zona central de la imagen— a partir de una imagen de referencia previamente georreferenciada.
- Aplicar una transformación polinomial (de primer o segundo orden, según la complejidad de la deformación geométrica) en ERDAS Imagine, con el fin de minimizar las distorsiones.
- Generar la imagen georreferenciada final mediante un método de remuestreo adecuado y validar su precisión posicional respecto de capas de referencia conocidas.
- Evaluar críticamente la calidad del resultado obtenido, interpretando el informe de errores RMS por punto y su distribución espacial.

3. MATERIAL REQUERIDO

Para el desarrollo del práctico se requiere:

- Computadora
- Software Erdas Imagine
- Imágenes de satélites

4. INTRODUCCIÓN

La georreferenciación de imágenes satelitales y aéreas mediante puntos de control terrestre (GCP, *Ground Control Points*) —recolectados con receptores GPS/GNSS o identificados sobre plataformas como Google Earth— constituye uno de los pilares fundamentales del procesamiento de datos geoespaciales, particularmente en aplicaciones de teledetección y análisis ambiental.

El proceso consiste en alinear una imagen carente de referencia espacial (o con distorsiones geométricas) con un sistema de coordenadas real, utilizando los GCP como enlaces precisos entre el píxel de la imagen y el terreno. En software como ERDAS Imagine, esta transformación se resuelve habitualmente mediante un modelo polinómico que convierte coordenadas píxel (X, Y) en coordenadas geográficas (Este, Norte), minimizando el error de ajuste a través del cálculo del Error Medio Cuadrático (RMS). La importancia de contar con imágenes correctamente georreferenciadas trasciende la corrección técnica en sí misma: condiciona de manera directa la fiabilidad científica y operativa de numerosas disciplinas que dependen de información espacial.

En el campo de la ingeniería forestal y las ciencias ambientales, disponer de imágenes con precisión resulta esencial para el monitoreo efectivo de los ecosistemas. En inventarios forestales, por ejemplo, una imagen Landsat deficientemente alineada puede introducir errores significativos en la estimación de coberturas arbóreas, llegando a subestimar o sobreestimar áreas deforestadas cuando el RMS supera los 2 píxeles.

En el análisis de impactos por incendios forestales —una problemática de particular relevancia en regiones como Santiago del Estero— la georreferenciación imagen a imagen permite superponer con precisión las áreas quemadas detectadas por sensores remotos con límites administrativos, datos de campo tomados con GPS y modelos digitales de elevación (DEM). Esta integración facilita la cuantificación exacta de las superficies afectadas y la planificación posterior de tareas de restauración. Sin una corrección geométrica adecuada, la superposición de capas en un SIG (como ArcGIS) genera

desplazamientos que invalidan los modelos predictivos de propagación del fuego o de recuperación de la cobertura vegetal.

El empleo de GCP validados mediante GPS RTK/DGPS —con precisión centimétrica— y preubicados sobre imágenes de referencia como Google Earth contribuye a minimizar sesgos sistemáticos, en particular en zonas de topografía variable.

En terrenos llanos, una transformación polinomial de orden 1 (lineal) suele ser suficiente; en relieves complejos, en cambio, resulta necesario recurrir a polinomios de orden 2 o 3 para capturar adecuadamente las distorsiones no lineales introducidas por el desnivel del terreno. Este cuidado no solo permite mantener el RMS por debajo del umbral considerado estándar en aplicaciones científicas, sino que además preserva la integridad radiométrica de la imagen durante el remuestreo (bilineal o vecino más cercano), o evitando alteraciones en los valores digitales (ND) que resultan cruciales para el cálculo posterior de índices como el NDVI.

Este contenido busca desarrollar competencias eminentemente prácticas: desde la correcta recolección de GCP en terreno —evitando elementos efímeros como vehículos estacionados o construcciones temporales— hasta la validación estadística del proceso de rectificación geométrica. Su relevancia radica en formar profesionales capaces de generar información geoespacial confiable para la toma de decisiones y el diseño de políticas públicas, integrando la teledetección con los sistemas de referencia geodésicos oficiales vigentes en Argentina, como el POSGAR07*. En síntesis, contar con imágenes correctamente georreferenciadas no constituye un refinamiento técnico opcional, sino una condición necesaria para la credibilidad científica, la eficiencia operativa y la toma de decisiones fundamentadas, en un contexto en el que los datos satelitales conforman la columna vertebral de la gestión territorial contemporánea.

**el marco de referencia geodésico oficial en Argentina a partir de 2009 es POSGAR07, siendo el sistema vigente y recomendado para trabajos cartográficos actuales.*

5. TIPOS DE GEORREFERENCIACIÓN

La demanda creciente ejercida por una sociedad cada vez más tecnificada sobre los recursos naturales y el medio ambiente que hace que cada vez sea más importante contar con información territorial precisa y actualizada. Comité de Geodesia (1999). Las fuentes de datos geograficos en procesos de Georeferenciación pueden ser variadas, abarcando desde mediciones a campo hasta bases de datos geoespaciales.

En el marco de este curso, se explorarán de manera fundamental la obtención de puntos de control, obtenidos desde una imagen georreferenciada.

5.1. Georreferenciación Imagen a Imagen

La georreferenciación imagen a imagen constituye una de las metodologías más utilizadas en el procesamiento digital de imágenes satelitales, particularmente cuando no se dispone de puntos de control tomados directamente en el terreno mediante GPS/GNSS, pero sí se cuenta con otra imagen de la misma zona que ya posee un sistema de coordenadas confiable. Este procedimiento se fundamenta en un principio relativamente simple: si dos imágenes representan la misma porción de la superficie terrestre, es posible identificar en ambas una serie de elementos u objetos comunes —cruces de caminos, confluencias de cursos de agua, límites de parcelas agrícolas, esquinas de edificaciones, entre otros— que sirven como puntos de anclaje para calcular matemáticamente cómo debe transformarse la imagen sin coordenadas para que coincida espacialmente con la imagen de referencia.

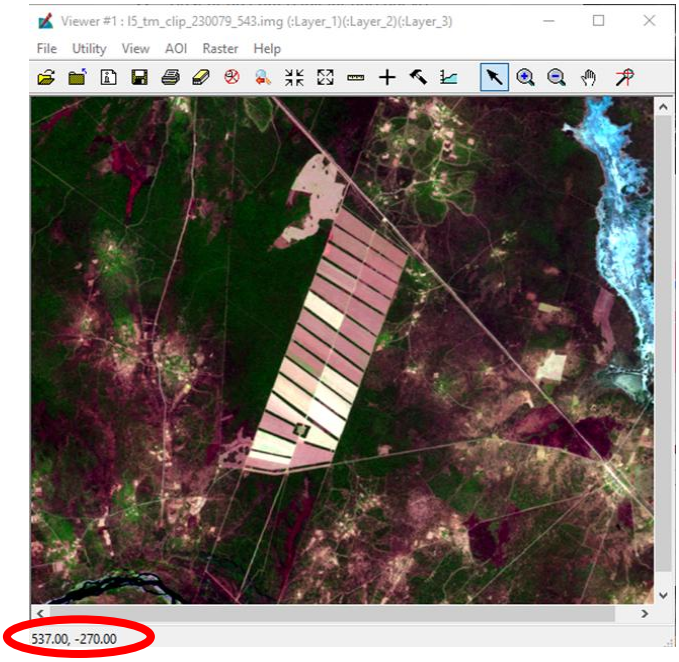


Figura 8.1 Imagen a georreferenciar, .solo se observan valores de coordenadas de pantalla.

A diferencia de la georreferenciación mediante coordenadas de campo (donde los GCP se toman con receptores GPS), en el método imagen a imagen los puntos de control se seleccionan visualmente, comparando pantalla contra pantalla los rasgos reconocibles en ambas escenas. Esto implica una responsabilidad adicional para el operador: la calidad del resultado final depende enteramente de la habilidad para identificar puntos verdaderamente homólogos —es decir, que correspondan exactamente al mismo punto físico en el terreno— y de la calidad geométrica de la imagen de referencia utilizada, ya que cualquier error presente en ella se trasladará inevitablemente a la imagen corregida.

Este método resulta especialmente valioso en el trabajo con series temporales de imágenes Landsat, donde frecuentemente las escenas más antiguas (sensores MSS de las décadas de 1970 y 1980, o incluso TM de los años 90) carecen de una georreferenciación confiable, mientras que las imágenes más recientes del mismo sensor o de sensores posteriores (como Landsat 8/9 OLI o Sentinel-2) sí cuentan con correcciones geométricas de alta precisión provistas por el proveedor de datos.

5.2. El flujo de trabajo en ERDAS Imagine

El primer paso operativo consiste en abrir el software ERDAS Imagine y desplegar la imagen que se desea corregir. Sin embargo, antes de avanzar a la selección de puntos de control, es fundamental cargar simultáneamente en el visor tanto la imagen a georreferenciar como la imagen de referencia, generalmente en dos viewers separados mostrados en paralelo. Esta disposición permite al operador desplazarse y hacer zoom sincronizadamente en ambas imágenes, facilitando la identificación de los mismos rasgos del terreno en las dos escenas.

Una vez desplegadas ambas imágenes, se accede al módulo de corrección geométrica del software (en versiones modernas de ERDAS Imagine, esto se encuentra dentro del menú Raster, en la herramienta Geometric Correction).

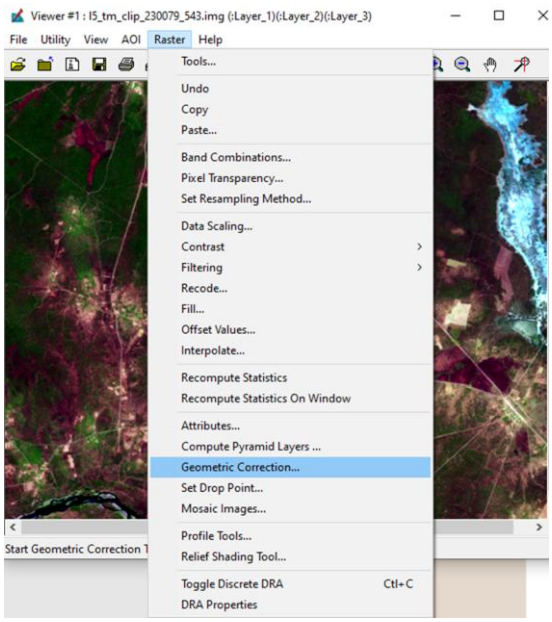


Figura 8.2 *Interface Viewer de Erdas Imagine.resaltando al módulo de corrección geométrica*

Al iniciar este módulo, el sistema solicita definir el modelo geométrico que se utilizará para calcular la transformación. Entre las opciones disponibles se encuentran modelos

polinómicos, modelos basados en sensores específicos (para corrección orbital) y, para el caso que nos ocupa, el modelo polinomial, que es el más apropiado y más utilizado en georreferenciación imagen a imagen debido a su simplicidad matemática y su buen desempeño en terrenos sin grandes desniveles.

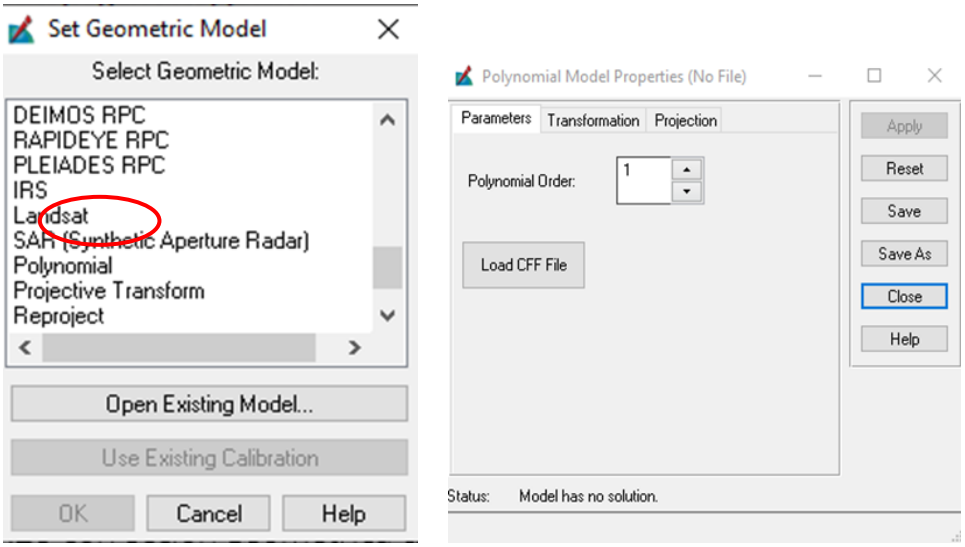


Figura 8.3 *Interfase de selección del Modelo Geométrico (set Geometric Model), y del orden del polinomio*

Con el modelo definido, el software habilita una herramienta interactiva de selección de puntos, que en ERDAS Imagine suele representarse mediante un ícono de cruz o marcador. El procedimiento consiste en hacer clic sobre un punto reconocible en la imagen de referencia (por ejemplo, la intersección de dos caminos rurales) y, acto seguido, localizar y marcar ese mismo punto exacto en la imagen a corregir. Cada par de clics genera automáticamente un registro en la tabla de puntos de control, que consigna las coordenadas píxel-línea de la imagen de origen y las coordenadas geográficas (o píxel-línea georreferenciadas) de la imagen de referencia.

La distribución espacial de estos puntos dentro de la escena resulta un factor determinante para la calidad del ajuste. Una recomendación metodológica ampliamente aceptada en teledetección es distribuir los GCP cubriendo las cuatro esquinas de la imagen, los puntos medios de cada borde y, al menos, un punto central. Esta disposición evita que el polinomio de ajuste extrapole de manera poco confiable hacia zonas de la imagen donde no existe información de control cercana, lo cual generaría deformaciones importantes en los bordes o esquinas no cubiertas por puntos.

5.3. Cálculo del error y ajuste del modelo

A medida que se van incorporando puntos de control a la tabla, ERDAS Imagine calcula de manera automática y en tiempo real el Error Medio Cuadrático (RMS) asociado a cada punto individual, así como el RMS total del conjunto de puntos. Este valor representa, expresado en unidades de píxel, la discrepancia entre la posición que el punto debería tener según el polinomio de ajuste calculado y la posición real que el operador marcó sobre la imagen. Un RMS elevado en un punto particular indica que ese GCP está introduciendo una distorsión significativa en el modelo, ya sea por un error de digitalización (el operador marcó un punto ligeramente desplazado respecto de su verdadero homólogo) o porque el punto seleccionado no es realmente representativo de un desplazamiento sistemático coherente con el resto de la escena.

Frente a esta situación, el flujo de trabajo habitual consiste en revisar la tabla de puntos, identificar aquellos con mayor error residual, y decidir si conviene reubicarlos con mayor precisión o eliminarlos directamente del cálculo. Este proceso es iterativo: cada vez que se elimina o corrige un punto, el software recalcula el polinomio y el RMS total, permitiendo al operador converger progresivamente hacia un ajuste que cumpla con el umbral de calidad exigido.

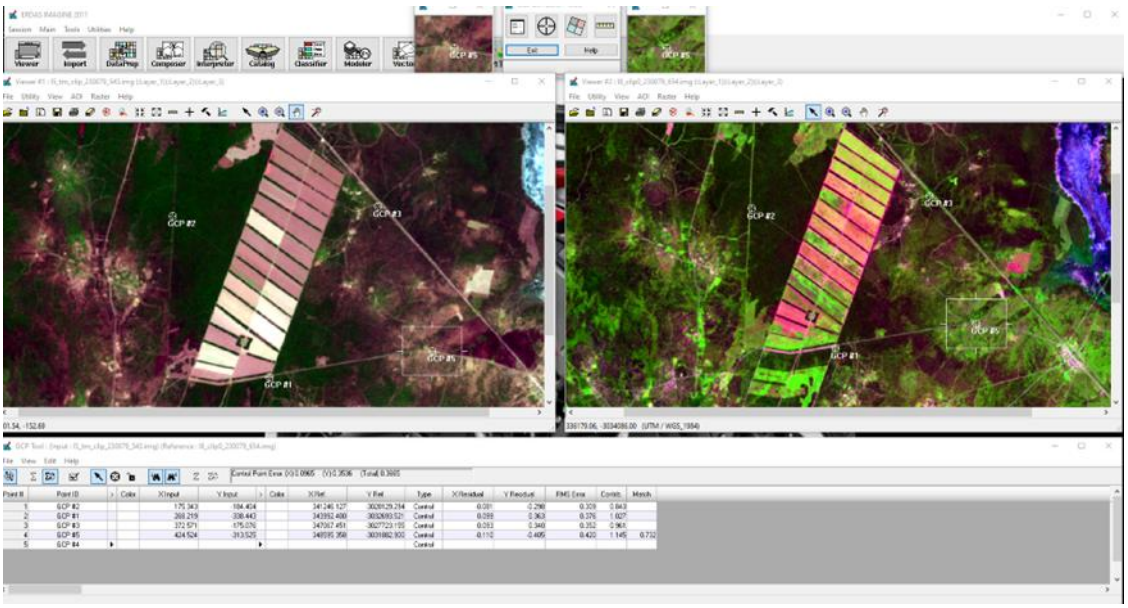


Figura 8.4 Distribución de los GCP control de Error cuadrático medio (RMS). Fuente: Elaboración Propia.

Cabe destacar que la elección del orden del polinomio incide directamente en este proceso. Un polinomio de primer orden requiere un mínimo de tres puntos y corrige únicamente distorsiones simples (traslación, rotación, escala y sesgo), siendo adecuado para sectores de topografía llana o de extensión reducida. Un polinomio de segundo

orden permite capturar deformaciones no lineales más complejas, pero exige un número mayor de puntos bien distribuidos para evitar el sobreajuste, fenómeno en el cual el modelo se ajusta perfectamente a los puntos de control utilizados, pero introduce oscilaciones y deformaciones artificiales en las zonas de la imagen alejadas de dichos puntos.

5.4. Remuestreo y generación de la imagen final

Una vez alcanzado un RMS satisfactorio, el paso final consiste en aplicar el remuestreo, proceso mediante el cual se recalculan los valores digitales de cada píxel de la nueva imagen georreferenciada, ya que la grilla original de píxeles no coincide exactamente con la nueva grilla geográfica resultante de la transformación. En este punto, ERDAS Imagine ofrece distintos métodos, ya explicados en la guía anterior, el método de vecino más cercano, interpolación bilineal y convolución cúbica.

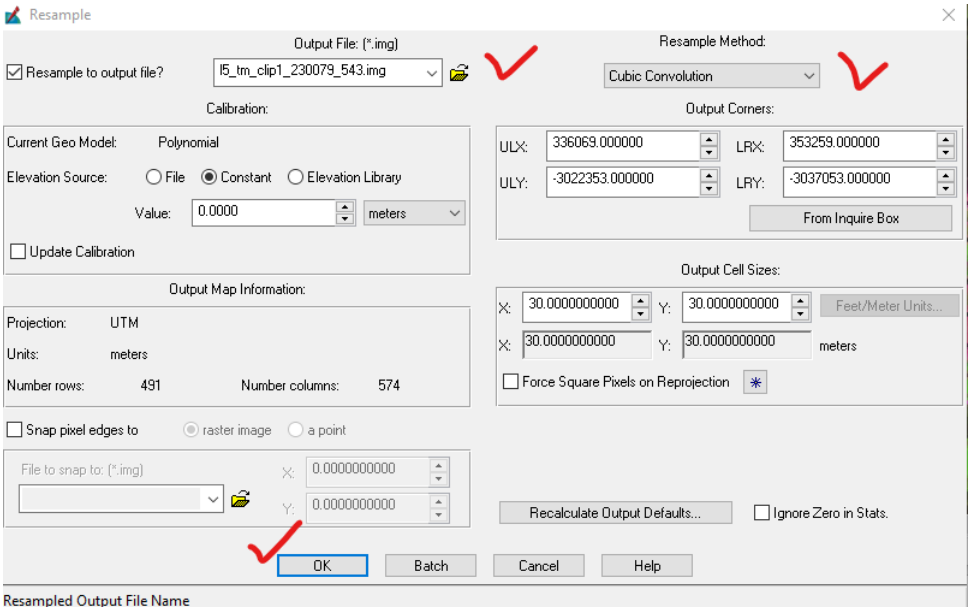


Figura 8.5 *Resample. Fuente: Erdas Imagine Geometric Correction*

Finalmente, la imagen resultante debe guardarse en un nuevo archivo y validarse visualmente superponiéndola con la imagen de referencia u otras capas vectoriales com ser shapefiles de caminos, o límites catastrales, para confirmar que la corrección geométrica cumplió su objetivo de manera consistente en toda la extensión de la escena.

De una georreferenciación correcta depende, en gran medida, el aprovechamiento que pueda hacerse de un SIG y también su valor de mercado por cuanto lo hace útil a un

mayor número de usuarios. Tal condición sólo puede cumplirse si las coordenadas de apoyo de todos los levantamientos están vinculadas al mismo sistema de referencia. Comité de Geodesia. (1999)

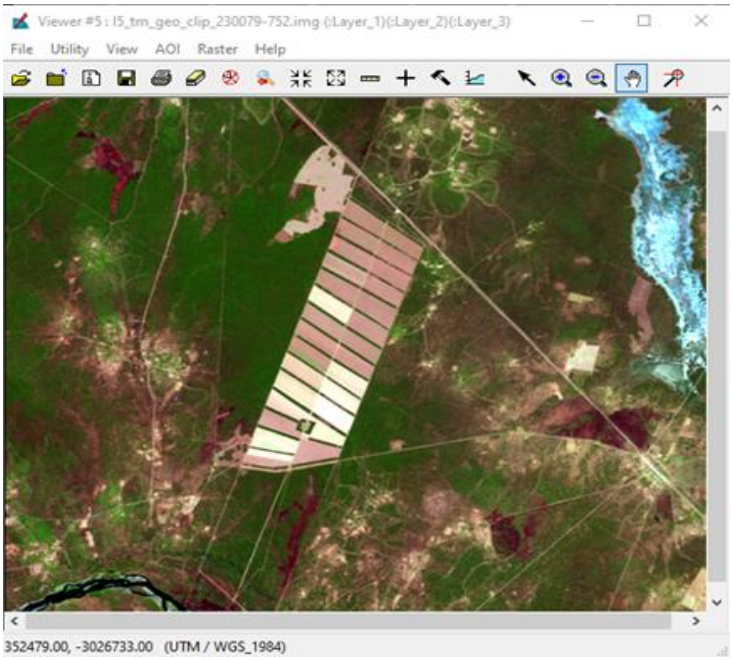


Figura 8.6 Imagen Georreferenciada. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8.1. Ventajas y desventajas en la georreferenciación con puntos de control obtenidos con GPS o a partir de otra imagen de referencia. Fuente: Elaboración Propia.

Criterio	GCP de campo (GPS/GNSS)	GCP imagen a imagen
Fuente de datos	Medición directa en terreno	Identificación visual sobre imagen de referencia
Precisión típica	Métrica a centimétrica (según equipo)	Depende de la imagen de referencia utilizada
Costo operativo	Alto (traslados, equipamiento, tiempo de campo)	Bajo (trabajo íntegramente de gabinete)
Aplicable a imágenes históricas	No, si el paisaje cambió sustancialmente	Sí, es su principal ventaja
Requiere imagen de referencia previa	No	Sí, indispensable
Precisión absoluta respecto del terreno	Alta	Limitada por la referencia utilizada
Uso típico en el curso	Validación de clasificaciones, deslinde de parcelas	Corrección de series históricas Landsat MSS/TM

6. REPROYECCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES

Se tiende a confundir los conceptos de georreferenciación y reproyección, ya que ambos procesos modifican la relación entre los píxeles de una imagen y su ubicación espacial real. Sin embargo, se trata de operaciones conceptualmente distintas, y resulta fundamental distinguirlas con claridad.

La **georreferenciación** es el proceso mediante el cual se le asigna a una imagen un sistema de coordenadas válido, a partir de puntos de control (GCP) tomados en campo o identificados sobre otra imagen ya referenciada.

La **reproyección**, en cambio, parte de una imagen que ya posee un sistema de coordenadas y una proyección cartográfica definida y válida, y consiste en transformar matemáticamente esas coordenadas de un sistema de referencia a otro distinto.

Es decir, no se corrige un error ni se asigna una referencia inexistente, sino que se convierte información geográfica correcta de un "sistema" cartográfico a otro. Un ejemplo típico en nuestro contexto de trabajo: una imagen Landsat descargada del USGS Earth Explorer llega proyectada por defecto en el sistema UTM (Universal Transversal Mercator), referida al datum WGS84, correspondiente a la zona UTM que le corresponde según su ubicación geográfica.

Nuestro trabajo es presentar la información en el sistema Gauss-Krüger, POSGAR07 y la faja correspondiente a la provincia de Santiago del Estero, por lo que será necesario reproyectar la imagen de UTM a Gauss-Krüger.

La necesidad de reproyectar imágenes surge por varias razones concretas:

- Compatibilidad con cartografía oficial: los límites catastrales, los polígonos de OTBN, las cartas topográficas del IGN y prácticamente toda la información oficial argentina se encuentra en Gauss-Krüger/POSGAR07, mientras que las imágenes satelitales de descarga gratuita (Landsat, Sentinel) llegan por defecto en UTM/WGS84. Para poder superponer correctamente ambas fuentes de información en un SIG, muchas veces es necesario que compartan el mismo sistema de referencia.
- Cálculo correcto de superficies y distancias: si se realizan mediciones de área sobre una imagen proyectada en un sistema inadecuado para la escala de trabajo, los resultados pueden contener errores sistemáticos, dado que cada proyección introduce sus propias deformaciones de superficie según la latitud y la distancia al meridiano central.

- Integración de múltiples fuentes de datos: en un proyecto real es común combinar imágenes satelitales, capas vectoriales catastrales, datos de GPS de campo y modelos digitales de elevación, cada uno potencialmente en un sistema de referencia distinto. La reproyección permite unificar todas estas fuentes bajo un único sistema de trabajo coherente.

7.1. Procedimiento para Re proyectar

Antes de ejecutar cualquier reproyección, resulta imprescindible verificar cuál es el sistema de proyección actual de la imagen, ya que reproyectar partiendo de una definición incorrecta del sistema de origen generará un resultado erróneo, aun cuando el sistema de destino esté correctamente configurado.

En el caso de una imagen Landsat recién descargada, típicamente se observará: Proyección UTM, Datum WGS84, Huso correspondiente a la ubicación geográfica de la escena (para Santiago del Estero, generalmente huso 20 Sur).

Una vez confirmado el sistema de origen, se accede a la herramienta específica de reproyección dentro de ERDAS Imagine, ubicada en el menú Raster > Geometric Correction. Esta herramienta es conceptualmente distinta, ya que aquí no se requiere seleccionar puntos de control: el cálculo es puramente matemático y automático, basado en fórmulas de conversión entre sistemas geodésicos conocidos.

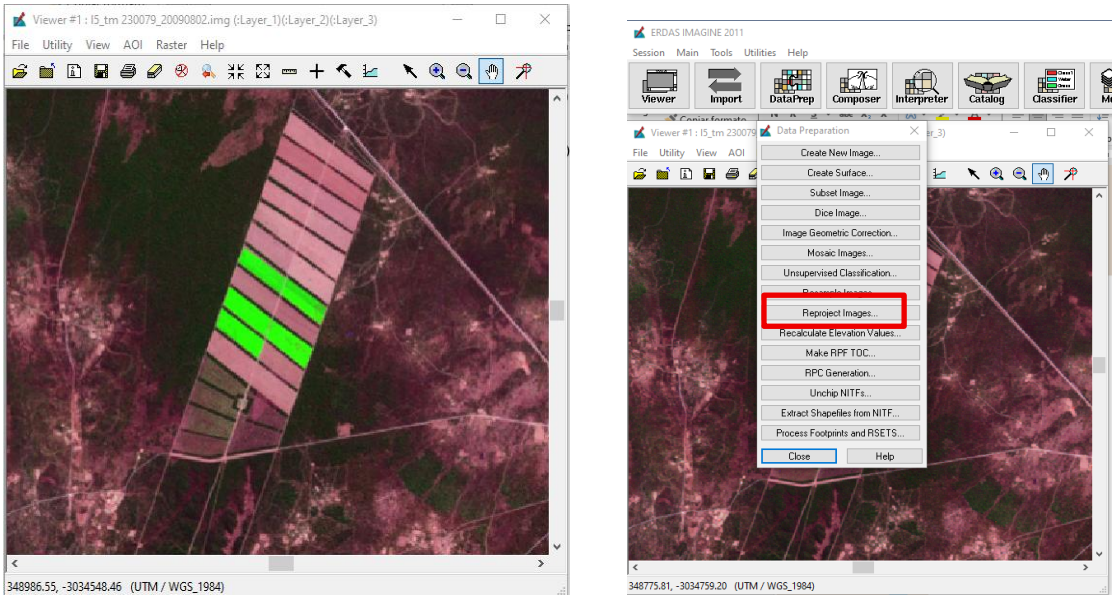


Figura 8.7 Imagen a Re proyectar e interfase Reproyección.

Al igual que en la corrección geométrica con GCP, la reproyección exige recalcular los valores digitales de la imagen en la nueva grilla de coordenadas, por lo que nuevamente debe seleccionarse un método de remuestreo. Se aplican aquí los mismos criterios desarrollados anteriormente: **vecino más cercano** cuando la imagen reproyectada será insumo de análisis cuantitativos posteriores (clasificación, cálculo de índices espectrales), y **interpolación bilineal** o **convolución cúbica** cuando el objetivo sea exclusivamente cartográfico o de presentación visual.

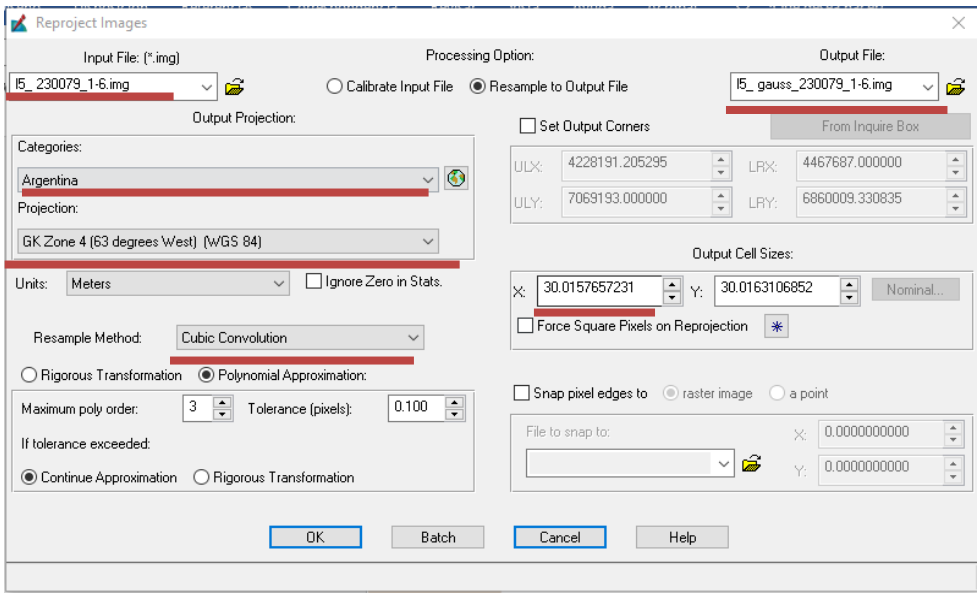


Figura 8.8 *Ventana Erdas Imagine Reproyecccion. Fuente: Project Images Erdas Imagine.*

Definidos todos los parámetros, se ejecuta el proceso, generando un nuevo archivo raster (habitualmente en formato .img) con el sistema de proyección de destino ya aplicado. Es fundamental, como paso final, verificar el resultado.

Control de superposición: desplegar la imagen reproyectada junto con una imagen, o capa vectorial de referencia ya conocida en Gauss-Krüger+, verificando visualmente que ambas capas coincidan espacialmente sin desplazamientos apreciables.

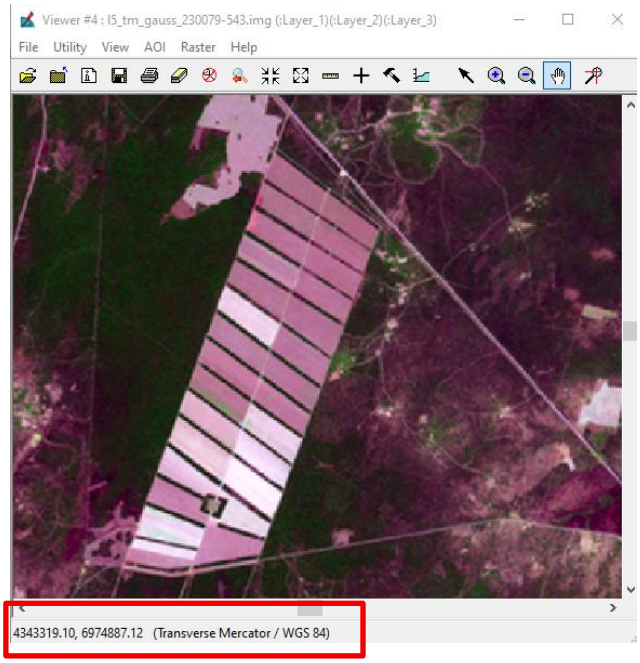


Figura 8.9 *Imagen Reporoyectada Gauss Kruger 4 faja*

Conviene aclarar que la reproyección, a diferencia de la georreferenciación imagen a imagen o con GCP de campo, no introduce ni corrige ningún error geométrico de la imagen: Por esta razón, no se calcula ni se reporta un error RMS en este proceso, ya que no existe ajuste estadístico alguno: la transformación es una fórmula matemática exacta entre sistemas geodésicos conocidos, y el único requisito para su correcta ejecución es haber identificado con precisión el sistema de origen y haber configurado correctamente los parámetros del sistema de destino.

8. ACTIVIDADES

a) Descarga de imágenes satelitales

El alumno deberá descargar, para una misma zona de estudio (a definir por la cátedra o seleccionada libremente dentro del área de Santiago del Estero).

- Una escena Landsat TM (Thematic Mapper, sensor correspondiente a los satélites Landsat 4/5), sin georreferenciación confiable o con errores geométricos conocidos.
- Una escena Landsat 8/9 OLI (Operational Land Imager) de la misma zona, correctamente georreferenciada.
- Una escena Sentinel-2 (sensor MSI) de la misma zona, igualmente georreferenciada con precisión.

b) Georreferenciación imagen a imagen

Utilizando las imágenes provistas, el alumno deberá georreferenciar la escena Landsat TM (que actúa como imagen a corregir, por carecer de coordenadas confiables) tomando como imagen de referencia, a elección, la escena Landsat 8/9 OLI o la escena Sentinel-2 de la misma zona, aplicando el método imagen a imagen desarrollado en el Práctico N.º 08: selección de GCP bien distribuidos, ajuste mediante transformación polinomial, control del RMS (inferior a 1 píxel) y remuestreo final.

c) Reproyección de las imágenes corregidas

Una vez georreferenciada la imagen Landsat TM, el alumno deberá reproyectar la imagen corregida, y la imagen Landsat 8/9 OLI utilizada como referencia, llevando ambas del sistema UTM/WGS84 (proyección de origen habitual de los productos Landsat) al sistema oficial argentino Faja 4°, Gauss-Krüger/POSGAR07.

PRÁCTICO

09

TRANSFORMACION DE IMÁGENES SATELITALES, ÍNDICES, FILTROS, COMPONENTES PRINCIPALES

1. OBJETIVO PRINCIPAL

Aplicar las principales técnicas de transformación digital de imágenes satelitales: realces radiométricos, filtros espaciales, índices espectrales y Análisis de Componentes Principales (ACP), utilizando ERDAS Imagine, con el fin de mejorar la interpretación visual de la escena, resaltar información temática de interés y reducir la redundancia entre bandas espectrales, generando productos derivados aplicables al monitoreo de coberturas vegetales, la detección de estrés hídrico en la vegetación y el seguimiento de procesos de deforestación y degradación.

2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Comprender la diferencia conceptual entre transformaciones radiométricas (realces de contraste) y transformaciones espaciales/espectrales (filtros, índices, ACP), identificando en qué etapa del flujo de trabajo corresponde aplicar cada una.
- Calcular e interpretar los principales índices espectrales de vegetación (indice Verde, NDVI), reconociendo su fundamento matemático a partir del comportamiento espectral de la vegetación sana, estresada y del agua.
- Aplicar filtros espaciales de paso bajo (suavizado) y paso alto (realce de bordes) sobre imágenes satelitales, evaluando su efecto sobre la calidad visual.
- Ejecutar un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre una imagen multiespectral, interpretando cada componente y su utilidad para la reducción de dimensionalidad.

3. MATERIAL REQUERIDO

Para el desarrollo del práctico se requiere:

- Computadora
- Software Erdas Imagine
- Imágenes de satélites Sensores Landsat TM y Oli, imágenes Sentinel MSI etc.

4. INTRODUCCIÓN

Una vez que una imagen satelital ha sido correctamente georreferenciada y/o proyectada en el sistema de coordenadas de trabajo, se encuentra en condiciones de ser sometida a un conjunto de procesos que constituyen el núcleo del análisis digital en teledetección: las transformaciones de imágenes.

A diferencia de las correcciones geométricas abordadas en unidades anteriores, cuyo objetivo es garantizar que cada píxel ocupe su posición espacial correcta, las transformaciones que se desarrollan en esta unidad operan sobre el contenido radiométrico y espectral de la imagen, con el propósito de extraer, resaltar o sintetizar información temática que no siempre resulta evidente en la observación directa de las bandas originales.

El punto de partida conceptual de esta unidad es reconocer que una imagen satelital, en su formato de adquisición original, constituye una matriz de valores digitales (ND) que registran, banda por banda, la energía electromagnética reflejada por la superficie terrestre en distintas longitudes de onda. Estos valores brutos, si bien contienen toda la información espectral necesaria, no siempre están dispuestos de la manera más adecuada para su interpretación visual ni para la cuantificación de fenómenos biofísicos específicos, como la densidad de la cobertura vegetal, la presencia de agua superficial o la ocurrencia de un cambio de cobertura entre dos fechas. Es precisamente allí donde cobran relevancia las técnicas de transformación digital: operaciones matemáticas que reorganizan, combinan o realzan la información original de la imagen para hacerla más útil frente a un objetivo de análisis determinado.

Esta unidad aborda cuatro grandes familias de transformación, cada una con un fundamento matemático y un propósito diferenciado, aunque frecuentemente complementario dentro de un mismo flujo de trabajo.

- Realces radiométricos
- Filtros espaciales
- Índices espectrales
- Análisis de Componentes Principales (ACP)

5. REALCES RADIOMÉTRICOS

Los realces radiométricos constituyen la forma más simple de transformación, y operan exclusivamente sobre la distribución estadística de los valores digitales de una imagen —su histograma—, redistribuyéndolos sobre un rango de visualización más amplio para mejorar el contraste percibido por el ojo humano. Se trata de una transformación de naturaleza fundamentalmente visual, que no altera la información espectral relativa entre bandas ni introduce nueva información temática, pero que resulta indispensable como paso previo a cualquier tarea de fotointerpretación, dado que una imagen de bajo contraste dificulta seriamente la identificación de coberturas, límites y patrones espaciales relevantes. Una de las principales técnicas que componen el procesamiento digital de imágenes es la de realce o mejora de imágenes. Esta técnica comprende un conjunto de operaciones tendentes a mejorar la calidad visual de una imagen. Estas operaciones permiten realzar las características de brillo y contraste de una imagen, reducir su contenido de ruido, o agudizar o intensificar detalles presentes en ella. Aldalur et. Al. (2002).

6. FILTROS ESPACIALES

Los filtros espaciales constituyen una familia de técnicas de procesamiento digital que, a diferencia de los realces radiométricos —que operan sobre cada píxel de manera aislada, en función únicamente de su propio valor digital—, modifican el valor de cada píxel de la imagen considerando el contexto de su vecindad inmediata, es decir, los valores digitales de los píxeles que lo rodean. Esta característica los convierte en herramientas fundamentales para el análisis de la componente espacial de una imagen: la textura, los patrones de repetición, los bordes y contornos, y el ruido introducido por el sensor durante la adquisición.

El mecanismo matemático que sustenta el funcionamiento de todo filtro espacial es la convolución, un proceso mediante el cual una matriz de valores numéricos de tamaño reducido —denominada kernel o ventana de convolución, típicamente de 3×3, 5×5 o 7×7 píxeles— se desplaza sistemáticamente sobre toda la extensión de la imagen. En cada

posición, el valor del píxel central de la ventana es reemplazado por el resultado de una operación matemática entre los valores digitales de los píxeles originales contenidos en la ventana. Este proceso se repite de manera sistemática, píxel por píxel, hasta cubrir la totalidad de la imagen, generando como resultado una nueva imagen filtrada de las mismas dimensiones que la original (con la salvedad de un margen perimetral, donde el cálculo puede no ser posible por falta de vecinos).

6.1. Frecuencia espacial

Para comprender el comportamiento de los filtros espaciales, resulta útil introducir el concepto de **frecuencia espacial**, entendida como la velocidad con la que varían los valores digitales de una imagen a lo largo del espacio. Una zona de la imagen donde los valores digitales cambian lentamente y de manera gradual entre píxeles vecinos —por ejemplo, el interior de una masa forestal homogénea— se caracteriza por una **baja frecuencia espacial**. Por el contrario, una zona donde los valores digitales cambian abruptamente entre píxeles contiguos —por ejemplo, el límite entre un rodal boscoso y un camino, o el borde de una cicatriz de incendio recién ocurrido— se caracteriza por una **alta frecuencia espacial**.

Bajo esta óptica, el ruido aleatorio introducido por el sensor durante la captura de la imagen (variaciones puntuales no representativas del terreno real) constituye, en términos generales, un componente de alta frecuencia espacial.

6.2. Filtros de paso bajo (suavizado)

Los filtros de paso bajo (*low-pass filters*), también denominados filtros de suavizado, tienen como objetivo atenuar las componentes de alta frecuencia espacial presentes en la imagen, preservando o realzando relativamente las componentes de baja frecuencia. En términos prácticos, esto se traduce en una imagen visualmente más "suave", donde las variaciones bruscas y aisladas de valores digitales —generalmente atribuibles a ruido del sensor— son atenuadas mediante un proceso de promediado con los píxeles del entorno.

Los filtros de paso bajo son una categoría de filtros utilizados en el procesamiento de imágenes para dejar pasar las frecuencias más bajas mientras atenúan las frecuencias más altas. Estos filtros son útiles para suavizar o eliminar detalles finos, reducir ruido y preservar componentes de baja frecuencia. Pedenovi (2004)
Esta atenuación del ruido tiene, sin embargo, un costo asociado: al promediar los valores de cada píxel con los de su vecindad, se produce inevitablemente una pérdida de nitidez

en los bordes y detalles finos genuinos de la imagen, generando un efecto de desenfoque que se acentúa a medida que aumenta el tamaño de la ventana del kernel utilizado.

6.2.1. Principales tipos de filtros de paso bajo

Filtro de media (Mean filter): el más simple y utilizado de los filtros de paso bajo, calcula el nuevo valor de cada píxel como el promedio aritmético simple de todos los valores digitales contenidos en la ventana del kernel. Para una ventana de 3×3, el kernel correspondiente asigna un coeficiente de 1/9 a cada una de las nueve posiciones. Resulta efectivo para reducir ruido gaussiano (variaciones aleatorias distribuidas de manera normal), pero es sensible a valores atípicos extremos, que pueden distorsionar el promedio calculado.

Filtro de mediana (Median filter): en lugar de calcular un promedio, este filtro ordena todos los valores digitales presentes en la ventana y asigna al píxel central el valor correspondiente a la mediana de dicha distribución. Esta característica lo hace considerablemente más robusto frente a valores atípicos aislados (por ejemplo, un píxel defectuoso con un valor digital anómalo, conocido como *ruido sal y pimienta*), ya que dichos valores extremos son descartados en el ordenamiento sin influir en el resultado, a diferencia de lo que ocurre con el filtro de media. Por esta razón, el filtro de mediana resulta particularmente recomendable quiero cuando se sospecha la presencia de píxeles defectuosos puntuales en la imagen original.

Filtro gaussiano: asigna a los coeficientes del kernel una distribución de pesos gaussiana, otorgando mayor ponderación a los píxeles más cercanos al centro de la ventana y menor ponderación progresiva a medida que aumenta la distancia respecto del píxel central. Esto produce un suavizado más natural y menos abrupto que el filtro de media simple, preservando en mayor medida la estructura general de la imagen.

6.3. Filtros de paso alto (realce de bordes)

Los filtros de paso alto (*high-pass filters*) operan en sentido inverso a los anteriores: su objetivo es atenuar las componentes de baja frecuencia espacial (las variaciones graduales y homogéneas de la imagen) mientras acentúan las componentes de alta frecuencia, resaltando de este modo los bordes, contornos y transiciones abruptas entre distintas coberturas del terreno. El resultado visual es una imagen en la que los límites entre objetos aparecen marcadamente realzados, mientras que las zonas internas homogéneas tienden a aplanarse hacia un valor neutro.

Kernel de paso alto: se construye una matriz de convolución con un coeficiente central positivo elevado y coeficientes negativos en las posiciones circundantes, de manera tal

que la suma total de los coeficientes del kernel sea igual a 1 (para preservar el brillo medio general de la imagen) o igual a 0 (cuando se busca obtener exclusivamente la componente de borde, sin información de brillo).



Figura 9.1 Imagen Original



Filtro paso bajo



***Figura 9.2** Filtro paso alto. Fuente: Elaboración propia.*

6.4. Filtro estadísticos.

Los filtros estadísticos constituyen una categoría particular dentro de los filtros espaciales, que se diferencia claramente de los filtros de convolución lineal (paso bajo y paso alto) desarrollados anteriormente. Mientras que los filtros de convolución calculan el nuevo valor de cada píxel mediante una suma ponderada de los valores digitales contenidos en la ventana de análisis, los filtros estadísticos —también llamados filtros no lineales o filtros de vecindad— calculan el nuevo valor del píxel central aplicando una función estadística (moda, mediana, mínimo, máximo, rango, desviación estándar, entre otras) sobre el conjunto de valores presentes en dicha ventana.

Esta distinción tiene una implicancia práctica fundamental en cuanto al tipo de dato sobre el que se aplican: los filtros de convolución lineal están diseñados para operar sobre **datos continuos** (valores digitales de reflectancia o radiancia de una imagen multiespectral), donde promediar o ponderar los valores vecinos tiene pleno sentido físico.

Los filtros estadísticos, en cambio, resultan especialmente apropiados —y en muchos casos indispensables— para operar sobre **datos categóricos o temáticos**, como el resultado de una clasificación digital de coberturas (donde cada píxel no representa un

valor de reflectancia, sino un número de clase o categoría: 1 = bosque, 2 = agua, 3 = suelo desnudo, etc.). En este tipo de datos, promediar aritméticamente los valores de la ventana carecería de sentido (el "promedio" entre la clase 1 y la clase 3 no representa ninguna categoría real), lo que hace indispensable recurrir a funciones estadísticas de naturaleza distinta, como la moda.

Uno de los filtros estadísticos más usados es el filtro modal, para mejora espacial en procesamiento de imágenes, se basa en la estadística de "modo o moda", destacando los valores más frecuentes alrededor del valor central. Esto se desarrollara con mayor profundidad en la guía de Clasificación de Imágenes

7. ÍNDICES ESPECTRALES

Los índices espectrales son combinaciones matemáticas de valores de reflectancia en distintas bandas del espectro electromagnético, diseñadas para resaltar propiedades específicas de la superficie terrestre (vegetación, agua, suelo, etc.) y minimizar efectos no deseados (iluminación, atmósfera, suelo de fondo).

Cada cubierta terrestre tiene una firma espectral característica: refleja y absorbe la energía electromagnética de manera distinta según la longitud de onda. Los índices explotan estas diferencias, típicamente combinando bandas donde el contraste entre una cubierta de interés y el resto es máximo.

7.1. Índices de vegetación

Los índices de vegetación constituyen una de las herramientas más difundidas en teledetección para el estudio de la cobertura vegetal, ya que permiten transformar la información contenida en varias bandas espectrales en un único valor que resume el estado, vigor o densidad de la vegetación presente en cada píxel de una imagen satelital. Su fundamento reside en el comportamiento espectral característico de las plantas sanas, que absorben fuertemente la radiación en la región del rojo debido a la actividad fotosintética de la clorofila, mientras que reflejan de manera intensa la radiación en el infrarrojo cercano a causa de la estructura interna de las hojas, particularmente del mesófilo. Este contraste tan marcado entre ambas regiones del espectro es lo que da origen a la mayoría de los índices de vegetación desarrollados hasta la fecha.

Todo índice de vegetación se sustenta en un principio biofísico fundamental: la vegetación fotosintéticamente activa presenta un patrón de reflectancia espectral característico y claramente distinguible del de otras coberturas terrestres (suelo desnudo, agua,

superficies construidas), lo cual permite diseñar combinaciones matemáticas entre bandas que aíslen y cuantifiquen selectivamente su presencia, densidad y vigor.

ejemplos: NDVI, EVI, SAVI.

7.1.1 NDVI

El NDVI, o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, es sin duda el más conocido y utilizado de todos ellos, tanto por su simplicidad de cálculo como por la enorme cantidad de estudios que lo respaldan desde su formulación en la década de 1970.

Se basa en la relación entre la cantidad de reflectancia, dada por los rasgos en la superficie terrestre en dos regiones del espectro electromagnético. INEGI. (2021).

Se calcula como el cociente entre la diferencia y la suma de las reflectancias en el infrarrojo cercano y el rojo, de modo que su expresión matemática resulta NDVI igual a NIR menos Red, dividido por NIR más Red.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

El resultado de esta operación arroja siempre un valor comprendido entre menos uno y uno, lo cual facilita enormemente su interpretación y comparación entre distintas escenas o fechas. Valores cercanos a cero o negativos suelen corresponder a superficies sin vegetación, como cuerpos de agua, suelo desnudo, nieve o áreas urbanas, mientras que valores intermedios, entre aproximadamente 0.2 y 0.3, indican vegetación escasa o en estado de estrés, y valores superiores a 0.6 son propios de vegetación densa, vigorosa y fotosintéticamente activa, como bosques tropicales o cultivos en pleno desarrollo.

Tabla 9.1 Operaciones entre bandas NDVI para diferentes sensores nota Fuente: Elaboración Propia.

Sensor	*Bandas*
Landsat Oli	*(B5-B4) / (B5+B4)*
Landsat 4-7 MSS, TM, ETM +	*(B4-B3) /(B4+B3)*
Sentinel 2 MSI	*(B8-B4) / (b8+B4)*

La aplicación de métodos de percepción remota multiespectral se enfoca en el análisis de los valores en las bandas de las imágenes satelitales, al buscar relaciones que acusen propiedades específicas que se puedan encontrar en el territorio. Los valores en las bandas son usados para generar nuevos valores que pueden resaltar cierto tipo de

terreno, para así facilitar la identificación de diversos usos de suelo. Un ejemplo muy notable es la generación de índices para identificar vegetación. INEGI (2021).

7.1.2. EVI

Precisamente para atender algunas de las limitaciones descriptas para el NDVI, surge el EVI, o Índice de Vegetación Mejorado, desarrollado en el marco del programa MODIS con el propósito explícito de optimizar la señal de vegetación reduciendo la influencia atmosférica y del suelo, así como corrigiendo el problema de saturación que afecta al NDVI en zonas de alta densidad vegetal.

Su fórmula incorpora, además de las bandas del infrarrojo cercano y el rojo, la banda del azul, que actúa como corrector de los efectos atmosféricos residuales relacionados con la dispersión de aerosoles, junto con una serie de coeficientes empíricos ajustados mediante calibración. La expresión resultante es EVI igual a 2.5 multiplicado por el cociente entre NIR menos Red, y NIR más 6 veces Red menos 7.5 veces Blue más 1. Gracias a esta formulación más compleja, el EVI logra mantener sensibilidad incluso en coberturas de biomasa muy elevada, como selvas tropicales densas, donde el NDVI tiende a aplanarse y perder capacidad discriminante. Sin embargo, esta mayor sofisticación tiene también un costo, ya que el EVI requiere datos de mayor calidad radiométrica y resulta más sensible al ruido presente en la banda azul, lo cual puede introducir inestabilidad en sensores con menor relación señal-ruido o en condiciones atmosféricas particularmente adversas.

La operación entre bandas es:

$$EVI = 2.5 \times \frac{NIR - Red}{NIR + 6\,Red - 7.5\,Blue + 1}$$

NIR = Es la reflectancia en el infrarrojo cercano.

R = Es la reflectancia en el rojo.

B = ES la reflectancia en el azul.



Figura 9.3 *Calculadora Ráster en Arcgis, utilizada para realizar operaciones entre bandas.*

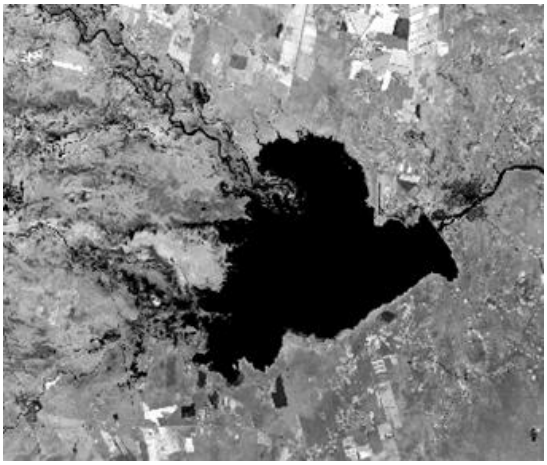


Figura 9.4 *NDVI*

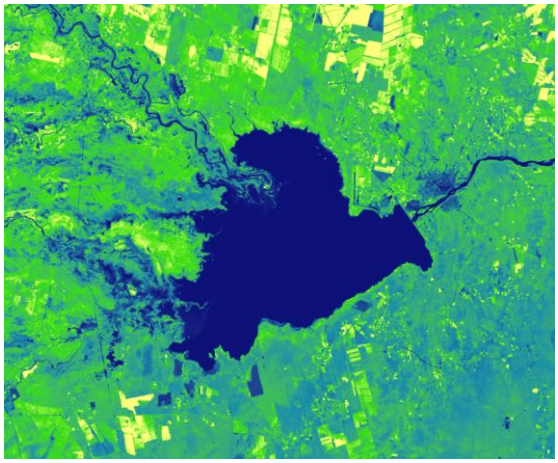


Figura 9.5 *NDVI color* *Fuente: Elaboración Propia*

7.1.3. SAVI

El SAVI, o Índice de Vegetación Ajustado al Suelo, fue concebido específicamente para minimizar la influencia que ejerce el suelo desnudo visible entre la vegetación sobre el valor final del índice, un problema especialmente relevante en zonas áridas, semiáridas o en cultivos incipientes donde la cobertura vegetal es parcial y el suelo aporta una señal espectral considerable que distorsiona la medición. Su formulación introduce un factor de corrección denominado L, cuyo valor puede oscilar entre cero y uno según la densidad de la vegetación presente, siendo 0.5 el valor más comúnmente empleado por representar un compromiso razonable para densidades intermedias. La fórmula queda expresada como SAVI igual a NIR menos Red, dividido por NIR más Red más L, y el resultado multiplicado por uno más L.

$$SAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L}(1 + L)$$

NIR = banda del infrarrojo cercano.
R= banda del visible, roja.
L= constante de compensación promedio, 0.5

Cuando L toma el valor de cero, el SAVI se reduce matemáticamente al NDVI convencional, mientras que valores de L cercanos a uno son apropiados para coberturas muy dispersas donde la señal del suelo domina ampliamente la escena. Existen además variantes derivadas de este índice, como el MSAVI o SAVI modificado, que calculan de manera iterativa el valor óptimo de L en función de las condiciones particulares de cada imagen, eliminando así la necesidad de fijar este parámetro de forma arbitraria.

Tabla 9.2. Combinación de bandas sensores más importantes para calcular SAVI

Sensor	Operaciones entre bandas
Landsat 4,5, 7	(((4-3) / (4+3+L))) * (1+L)
Landsat 8.	(((5-4) / (5+4+L))) * (1+l)
Sentinel 2	(((8-4) / (8+4+L)))* (1+l)

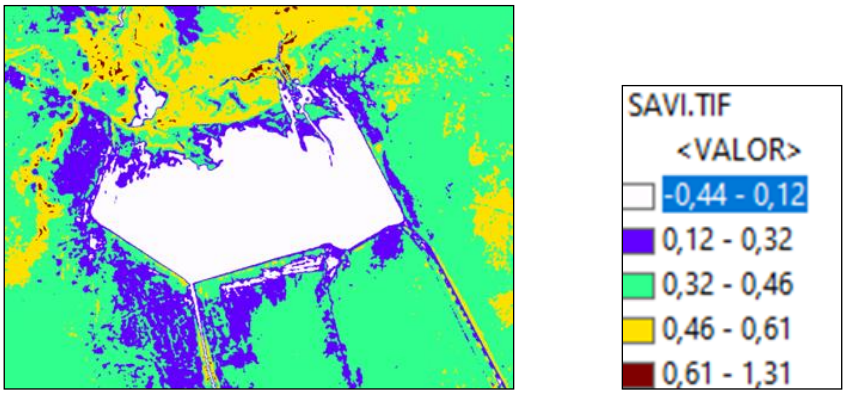


Figura 9.6 Savi Dique Figueroa después de aplicar paleta de colores. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 9.3. Comparación entre NDVI, EVI y SAVI.

Aspecto	NDVI	EVI	SAVI
Fórmula	(NIR − Red) / (NIR + Red)	2.5 × (NIR − Red) / (NIR + 6·Red − 7.5·Blue + 1)	[(NIR − Red) / (NIR + Red + L)] × (1 + L)
Bandas usadas	Rojo, infrarrojo cercano	Rojo, infrarrojo cercano, azul	Rojo, infrarrojo cercano
Parámetros adicionales	Ninguno	Coeficientes fijos de calibración	Factor de ajuste de suelo L (típico 0.5)
Rango de valores	-1 a 1	Aprox. -1 a 1 (uso práctico 0–1)	-1 a 1
Corrección atmosférica	No	Sí, mediante banda azul	No
Influencia del suelo	Alta, sobre todo con cobertura dispersa	Moderada	Baja, es su objetivo principal
Saturación en biomasa alta	Se satura en vegetación muy densa	No se satura, mantiene sensibilidad	Similar al NDVI, también puede saturarse
Sensibilidad al ruido	Baja, robusto	Alta, sensible al ruido de la banda azul	Baja, similar al NDVI
Complejidad de cálculo	Muy simple	Compleja, requiere calibración	Simple, requiere definir L
Contexto ideal	Series históricas largas, vegetación media-densa	Bosques tropicales, cultivos de alta biomasa	Suelos áridos, cultivos incipientes, vegetación dispersa
Relación con NDVI	—	Corrige saturación y at[illegible]era	Se reduce al NDVI cuando L = 0

8. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El Análisis de Componentes Principales, conocido comúnmente por su sigla ACP o por su denominación en inglés PCA (Principal Component Analysis), es una técnica estadística de transformación multivariante ampliamente utilizada en teledetección para reducir la dimensionalidad de las imágenes satelitales, comprimir la información redundante presente entre bandas espectrales y resaltar patrones que no resultan evidentes al observar las bandas originales de manera individual. Su aplicación resulta especialmente valiosa cuando se trabaja con sensores multiespectrales o hiperespectrales que capturan decenas o incluso cientos de bandas, muchas de las cuales presentan un alto grado de correlación entre sí debido a que registran información similar sobre la misma superficie terrestre.

En términos de interpretación temática, el primer componente principal suele estar asociado al brillo general de la escena, ya que la mayoría de las bandas espectrales tienden a covariar positivamente ante variaciones de iluminación, humedad del suelo o albedo superficial, de modo que PC1 tiende a resumir esta variabilidad común de manera muy eficiente. El segundo componente principal frecuentemente se relaciona con el contraste entre vegetación y suelo, dado que captura el patrón de variación asociado al comportamiento diferencial entre el infrarrojo cercano y las bandas visibles, de forma similar a lo que expresan los índices de vegetación. Los componentes de orden superior, en cambio, suelen recoger variaciones más sutiles, contrastes específicos entre coberturas particulares, o bien ruido instrumental y atmosférico que no aporta información temática relevante para la mayoría de las aplicaciones.

Entre las principales aplicaciones del ACP en teledetección se encuentra, en primer lugar, la reducción de dimensionalidad previa a procesos de clasificación digital de coberturas, ya que trabajar con dos o tres componentes principales en lugar de las bandas originales completas permite disminuir significativamente el volumen de datos y el tiempo de procesamiento sin perder información sustancial, además de reducir el efecto de la correlación entre bandas que puede afectar negativamente el desempeño de ciertos algoritmos de clasificación. Otra aplicación relevante es la detección de cambios multitemporales, donde se aplica el ACP sobre un conjunto de imágenes correspondientes a distintas fechas, de manera que los componentes de menor orden, que concentran la varianza no común entre fechas, resaltan de forma muy efectiva las áreas donde se han producido transformaciones en la cobertura del suelo.

El ACP también se utiliza frecuentemente como técnica de realce visual, generando composiciones en color falso a partir de los tres primeros componentes principales, lo cual suele producir imágenes con mayor contraste y separabilidad visual entre coberturas que las composiciones tradicionales basadas en bandas originales.

Es importante señalar que el ACP presenta también ciertas limitaciones que conviene considerar antes de su aplicación. La interpretación física directa de los componentes principales no siempre resulta sencilla, especialmente a partir del tercer o cuarto componente, dado que estos representan combinaciones lineales abstractas de las bandas originales sin una correspondencia directa y evidente con procesos físicos o biofísicos concretos. Finalmente, al tratarse de una transformación derivada estadísticamente de los datos de entrada, los componentes principales calculados para una escena particular no son directamente transferibles ni comparables con los obtenidos para otra escena distinta, salvo que se apliquen procedimientos específicos de estandarización que garanticen dicha comparabilidad entre distintas fechas o regiones de estudio.

En síntesis, el Análisis de Componentes Principales constituye una herramienta estadística poderosa y versátil dentro del procesamiento digital de imágenes satelitales, cuya

capacidad para sintetizar la información espectral redundante en un número reducido de componentes ortogonales la convierte en un paso frecuente dentro de los flujos de trabajo orientados a la clasificación de coberturas, la detección de cambios y la mejora visual de las imágenes de percepción remota.

Con el software, Erdas imagine, se puede no solo calcular las componentes individuales sino también, obtener una imagen color, combinando las componentes que mejor expliquen lo que deseamos ver. en este caso en particular se combinarán las componentes 3,2,1.

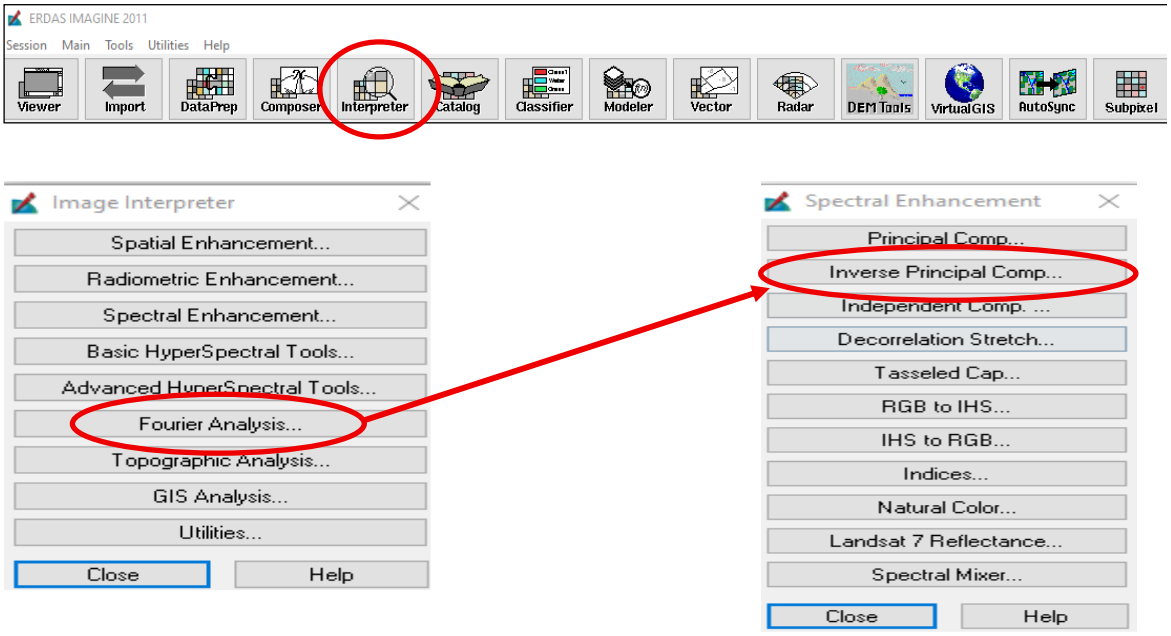


Figura 9.7 Análisis de componentes Principales Erdas Imagine. Fuente: Elaboración Propia.

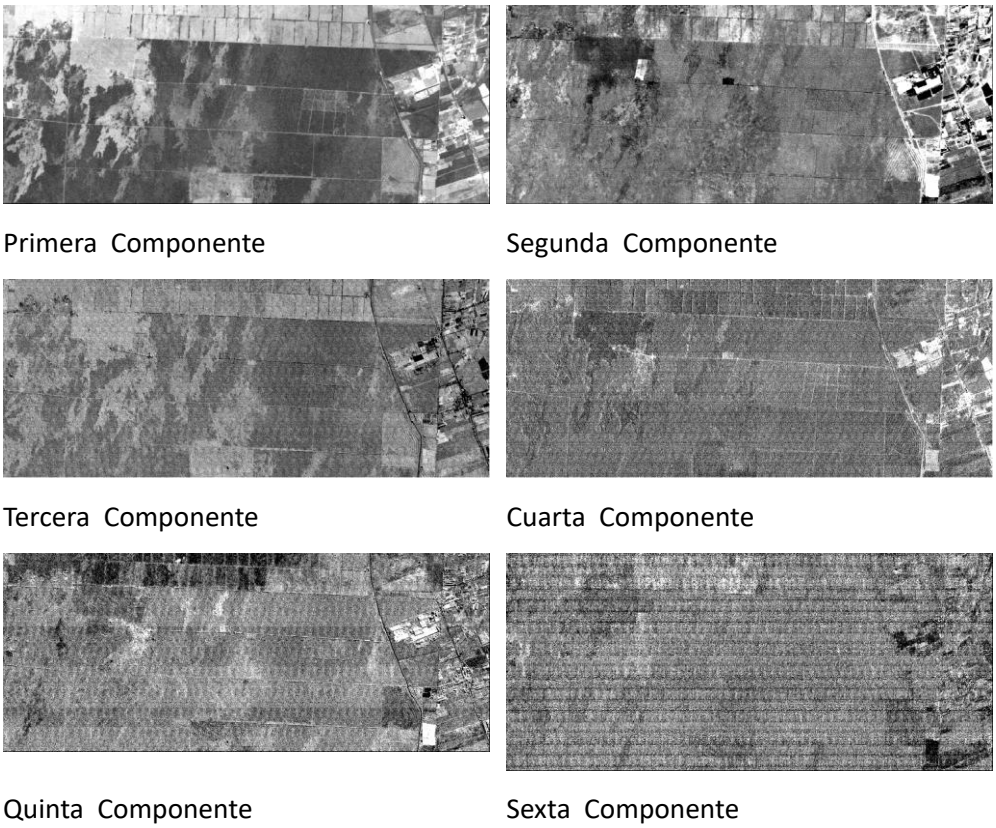


Figura 9.8. Componentes Principales

Tabla 9.4. Tabla Resumen

Criterio	Realce radiométrico	Filtros espaciales	Índices espectrales	Componentes Principales (ACP)
Tipo de operación	Píxel a píxel, independiente de vecinos	Basada en vecindad (kernel/matriz de convolución)	Combinación matemática entre bandas (mismo píxel)	Transformación estadística multivariada (todas las bandas)
Insumo	Una banda o composición RGB	Una banda (o cada banda por separado)	Dos o más bandas específicas (ej. NIR y RED)	Todas las bandas del stack multiespectral
Modifica valores digitales originales	No (solo visualización, salvo que se guarde)	Sí, genera una nueva imagen	Sí, genera una nueva banda derivada	Sí, genera nuevas bandas (componentes)
Objetivo principal	Mejorar la interpretación visual (contraste)	Suavizar ruido o resaltar bordes/contornos	Cuantificar una propiedad biofísica (vegetación, agua)	Reducir redundancia entre bandas / concentrar varianza
Resultado interpretable físicamente	Sí (son los mismos ND reescalados)	Sí (siguen siendo ND de reflectancia)	Sí (valores con significado biofísico, ej. NDVI de -1 a 1)	No directamente (combinación estadística abstracta)
Nº de bandas de salida	Igual al de entrada	Igual al de entrada	Una banda nueva (o pocas, si son varios índices)	Igual al de entrada (pero jerarquizadas por varianza)
Herramienta típica en ERDAS Imagine	Contrast > Stretch / Histogram Equalize	Focal Analysis > Convolution	Model Maker / Spectral Indices	Multispectral > Principal Components

9. ACTIVIDADES

- Componga una imagen Landsat TM y OLI calcule NDVI.
- Haga lo mismo mediante la calculadora de ArcGIS.
- Calcúle todos los componentes Principales de la imagen TM y Olí utilizada anteriormente
- A partir de una imagen Landsat Oli 8/9 calcule SAVI y EVI
- Aplique filtro paso bajo y paso alto observe las diferencias con respecto a la imagen original.

PRÁCTICO

10 TRANSFORMACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES, CLASIFICACION SUPERVISADA.

1. OBJETIVO PRINCIPAL

- Aplicar la técnica de clasificación supervisada sobre una imagen satelital, con el fin de que el alumno desarrolle competencias metodológicas para identificar, delimitar y cuantificar las distintas coberturas del suelo presentes en un área de estudio, evaluando la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos.
- Realizar clasificaciones supervisadas en ERDAS Imagine para generar mapas temáticos de coberturas forestales a partir de imágenes satelitales.

2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Identificar y describir las principales coberturas presentes en el área de estudio, a partir de la interpretación visual de la imagen satelital.
- Realizar el preprocesamiento necesario de la imagen (recorte del área de interés, composiciones de color) previo al proceso de clasificación.
- Definir un esquema de clasificación (leyenda temática) coherente con los objetivos del estudio y con las coberturas identificables en la imagen.
- Seleccionar y digitalizar áreas de entrenamiento representativas y estadísticamente separables para cada clase temática definida.
- Evaluar la calidad de las firmas espectrales obtenidas antes de ejecutar la clasificación.
- Generar un mapa temático de coberturas del suelo como producto final del proceso de clasificación.

3. MATERIAL REQUERIDO

- Software Erdas imagine.
- Imagenes satelitales
- Computadora

4. INTRODUCCIÓN

La clasificación supervisada de imágenes satelitales constituye una de las técnicas más utilizadas dentro del procesamiento digital de imágenes en el campo de la teledetección, dado que permite transformar la información espectral capturada por los sensores remotos en mapas temáticos que representan de manera sistemática las distintas coberturas y usos del suelo presentes en un territorio determinado. A diferencia de la interpretación visual tradicional, que depende en gran medida de la experiencia y el criterio subjetivo del analista, la clasificación supervisada se apoya en procedimientos que permiten asignar de manera automática o semiautomática cada píxel de la imagen a una clase temática predefinida, sobre la base de sus valores de reflectancia en las distintas bandas espectrales del sensor. Esta capacidad de transformar datos numéricos en información geográfica interpretable convierte a la clasificación supervisada en una herramienta fundamental para disciplinas tan diversas como la agricultura de precisión, el monitoreo forestal, la planificación urbana, la gestión de recursos hídricos, el estudio del cambio climático y la evaluación de desastres naturales, entre muchas otras aplicaciones.

El objetivo de una clasificación de imágenes de satélites consiste en identificar las zonas (parcelas o regiones), y su localización, ocupada por tipos (clases) de cubiertas dadas o deducidas de la superficie terrestre por medio de métodos de reconocimiento de patrones. García et. Al. (1997)

El fundamento conceptual de la clasificación supervisada radica en la existencia de una relación relativamente estable entre el tipo de cobertura del suelo y su comportamiento espectral, es decir, la manera particular en que cada superficie refleja, absorbe o transmite la radiación electromagnética en distintas longitudes de onda. La vegetación, el agua, el suelo desnudo, las áreas urbanas y otras coberturas presentan patrones de reflectancia característicos que, si bien pueden superponerse parcialmente entre sí, resultan lo suficientemente distintivos como para permitir su discriminación mediante algoritmos matemáticos apropiados. A diferencia de la clasificación no supervisada, en la cual el algoritmo agrupa los píxeles en clústeres espectrales sin intervención previa del analista, la clasificación supervisada requiere que el usuario defina de antemano un esquema de

clasificación o leyenda temática, y que además seleccione manualmente muestras representativas de cada clase, denominadas comúnmente áreas de entrenamiento o firmas espectrales, a partir de las cuales el algoritmo aprende el patrón estadístico característico de cada categoría antes de aplicarlo al resto de la imagen.

5. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA, MÉTODO

El proceso metodológico de la clasificación supervisada involucra una secuencia de etapas que resulta importante comprender de manera integral antes de abordar su aplicación práctica. En primer lugar, es necesario contar con un conocimiento previo, aunque sea general, de las coberturas presentes en el área de estudio, ya sea a través de trabajo de campo, imágenes de referencia de alta resolución o conocimiento experto del territorio, información que permitirá definir un esquema de clasificación coherente y jerárquicamente organizado. A continuación, se procede a la selección de las áreas de entrenamiento, etapa considerada crítica dentro de todo el proceso, ya que la calidad, representatividad y pureza espectral de estas muestras determinará en gran medida la exactitud final de la clasificación obtenida. Una vez definidas las firmas espectrales, se aplica el algoritmo de clasificación seleccionado, existiendo actualmente una amplia variedad de métodos disponibles que van desde los clasificadores estadísticos clásicos, como la Máxima Verosimilitud, la Mínima Distancia a la Media o los Paralelepípedos, cada uno de los cuales presenta ventajas y limitaciones particulares según las características del conjunto de datos y del área de estudio.

Un aspecto igualmente relevante dentro de este proceso, y que con frecuencia recibe menor atención de la que merece, es la evaluación de la exactitud temática del mapa de clasificación resultante. En efecto, obtener un mapa de coberturas visualmente coherente no garantiza necesariamente que dicho producto sea confiable, por lo cual resulta imprescindible contrastar los resultados de la clasificación con un conjunto independiente de puntos de verdad de campo o de referencia, mediante la construcción de una matriz de confusión, la cual permite cuantificar el grado de confiabilidad del mapa generado.

El Método Supervisado parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. Esta mayor familiaridad con la zona, permite al interprete delimitar sobre la imagen unas áreas de interes (AOIs), que se consideran suficientemente representativas de las categorías que componen la leyenda.

Estas áreas se denominan en la bibliografía anglosajona “training fields” (campos o áreas de entrenamiento). El termino indica que tales áreas sirven para “entrenar” al ordenador en el conocimiento de las distintas categorías.

En otras palabras, a partir de ellas el ordenador calcula los ND que definen cada una de las clases, para luego asignar el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de sus ND.

La mayor parte de los equipos de tratamiento permiten trazar los campos de entrenamiento. Con ayuda del digitalizador, (ratón electrónico), el usuario introduce sobre la pantalla los vértices que definen cada una de estas áreas, asignándolas a una de las categorías definidas previamente en la leyenda. Los trabajos de campo y otros documentos auxiliares como la fotografía aérea o la cartografía convencional pueden ser de gran ayuda para una localización más precisa de estas áreas, teniendo en la mente que debe tratarse de ejemplos suficientemente representativos y homogéneos de la clase que pretende definirse.

Acabada la delimitación de un campo de entrenamiento, pueden seleccionarse otros para la misma categoría, o bien culminar la definición de esa clase. En general, resulta conveniente seleccionar varios campos por categoría, a fin de reflejar adecuadamente su variabilidad en la zona de estudio.

Se asume que las áreas de entrenamiento son fieles representantes de las distintas categorías, y que, por tanto, las medidas extraídas a partir de sus ND definen convenientemente a esas clases. De aquí que sea crucial la correcta selección de los campos de entrenamiento. De otra forma la clasificación estaría viciada de partida, al pretender discriminar categorías con escaso significado espectral.

5.1. Proceso de asignación

Una vez culminada la etapa de selección y caracterización estadística de las categorías que intervendrán en la clasificación —esto es, una vez definidas y validadas las firmas espectrales de cada clase temática—, se inicia la siguiente fase del proceso, denominada fase de asignación o fase de decisión. En esta etapa se procede a adscribir cada uno de los píxeles que componen la imagen a una de las clases previamente establecidas.

Esta asignación se realiza tomando como base los niveles digitales (ND) que cada píxel presenta en todas y cada una de las bandas espectrales que intervienen en el proceso. El algoritmo de clasificación compara estos valores de ND con las firmas espectrales de referencia de cada clase, aplicando un criterio estadístico o geométrico determinado para decidir a qué categoría pertenece el píxel en cuestión. Como resultado de esta fase se genera una nueva imagen —el mapa temático clasificado—, cuyos niveles digitales ya no representan valores de reflectancia, sino códigos numéricos que identifican la categoría o clase de cobertura en la cual ha quedado incluido cada píxel de la imagen original.

La elección del criterio de decisión empleado para trazar estas fronteras estadísticas entre clases no es un aspecto menor, ya que de él depende en gran medida la exactitud final del mapa obtenido, así como el tiempo de procesamiento requerido. Entre los criterios más comúnmente utilizados se destacan los siguientes:

- Mínima Distancia, por el cual el píxel se asigna a la clase más cercana.
- Paralelepípedos, que permite señalar al usuario unos umbrales de dispersión asociados a cada clase.
- Máxima Probabilidad, en donde el píxel se asigna a aquella clase con la que posee mayor probabilidad de pertenencia.

5.1.1. Clasificador de mínima distancia

Este criterio asigna cada píxel a la clase cuyo valor medio espectral, calculado a partir de las áreas de entrenamiento, resulta más cercano al vector de valores del píxel analizado, empleando habitualmente la distancia euclidiana como medida de proximidad. Lógicamente, no se trata de una distancia geográfica, sino espectral, consecuencia de comparar los ND de cada píxel con los del centro de las distintas categorías, para todas las bandas que intervienen en el análisis.

Entre sus principales ventajas se encuentra la simplicidad conceptual y la rapidez de cálculo, ya que no requiere operaciones matemáticas complejas ni el cómputo de matrices de covarianza, lo cual lo convierte en un método computacionalmente eficiente incluso para imágenes de gran tamaño o con numerosas bandas. Sin embargo, esta misma simplicidad constituye también su principal debilidad: al considerar únicamente la media de cada clase, el método ignora por completo la dispersión, varianza o forma de la nube de puntos característica de cada categoría. Esto significa que clases con alta variabilidad espectral interna —por ejemplo, coberturas heterogéneas como zonas urbanas mixtas— pueden verse mal representadas, y que clases con distinta dispersión pueden generar asignaciones erróneas cuando sus nubes de puntos se superponen parcialmente en el espacio espectral, aun cuando sus medias estén relativamente separadas. Puesto que siempre existe una clase más cercana, no deja lugar a píxeles sin clasificar, incluso aunque éstos se alejen notablemente del centro de clase.

5.1.2. Clasificador de paralelepípedos

El método de clasificación por Paralelepípedos, se fundamenta en definir para cada clase temática un rango de valores aceptables en cada banda espectral, generalmente establecido a partir de la media y la desviación estándar calculadas sobre las muestras de entrenamiento. Concretamente, para cada banda y cada clase se determina un límite inferior y un límite superior, habitualmente calculados como la media menos un

determinado número de desviaciones estándar y la media más ese mismo número de desviaciones estándar respectivamente, definiendo así un intervalo de tolerancia en torno al valor central de la clase.

Cuando este procedimiento se replica de manera simultánea para todas las bandas que intervienen en la clasificación, el resultado geométrico es una región en forma de n-rectángulo —o paralelepípedo, cuando se trabaja con tres bandas— dentro del espacio espectral multidimensional, delimitada por los umbrales superior e inferior correspondientes a cada banda. Un píxel de la imagen es asignado a una clase determinada únicamente cuando sus valores digitales caen simultáneamente dentro de los límites definidos para dicha clase en todas y cada una de las bandas consideradas.

La principal ventaja de este método radica en su sencillez interpretativa, ya que el usuario puede visualizar y ajustar directamente los umbrales de dispersión asignados a cada clase, otorgando un control relativamente intuitivo sobre el proceso de clasificación, además de resultar computacionalmente económico. No obstante, presenta dos limitaciones importantes que conviene señalar. La primera es la posible superposición entre los paralelepípedos correspondientes a distintas clases, situación que genera ambigüedad en la asignación de aquellos píxeles ubicados en las zonas de solapamiento, para lo cual el software suele aplicar reglas de desempate adicionales, como recurrir a la distancia mínima entre los centroides involucrados. La segunda limitación consiste en la existencia de píxeles que no caen dentro de ningún paralelepípedo definido, quedando por tanto sin clasificar.

5.1.3. Clasificador de máxima probabilidad

El criterio de Máxima Verosimilitud, frecuentemente denominado también Máxima Probabilidad, representa el método de asignación estadísticamente más sofisticado y robusto entre los algoritmos clásicos de clasificación supervisada. A diferencia de los dos métodos anteriores, este criterio asume que los valores espectrales de los píxeles pertenecientes a cada clase temática siguen una distribución de probabilidad normal, la cual describe tanto la dispersión de los valores en cada banda individual como el grado de correlación existente entre las distintas bandas para esa clase en particular.

A partir de esta función de densidad de probabilidad estimada para cada clase, el algoritmo calcula, para cada píxel de la imagen, la probabilidad de que dicho píxel pertenezca a cada una de las categorías definidas, considerando su posición relativa dentro de la distribución estadística de cada clase. El píxel es finalmente asignado a aquella clase respecto de la cual presenta la mayor probabilidad de pertenencia, de donde deriva el nombre del método. Esta formulación permite que el algoritmo module la forma y orientación de las regiones de decisión ajustándose de forma mucho más precisa a la verdadera distribución de los datos espectrales que los métodos de distancia mínima o

paralelepípedos, que asumen implícitamente formas esféricas o rectangulares respectivamente.

Entre las ventajas más destacadas de este método se encuentra su capacidad para lograr, en la mayoría de los casos, niveles de exactitud superiores a los obtenidos mediante los métodos anteriores, motivo por el cual es ampliamente considerado el algoritmo de referencia dentro de la clasificación supervisada paramétrica clásica y es el más utilizado en software de procesamiento digital de imágenes como ENVI, ERDAS Imagine o QGIS. Asimismo, su costo computacional es mayor que el de los métodos anteriores, factor que puede resultar relevante al trabajar con imágenes de gran volumen de datos o con un número elevado de bandas espectrales, como ocurre en sensores hiperespectrales.

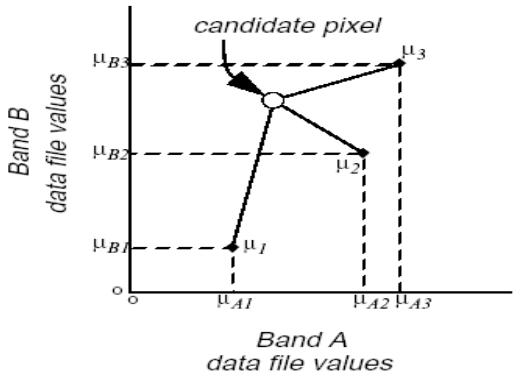


Figura 10.1 *Clasificador minia distancia*

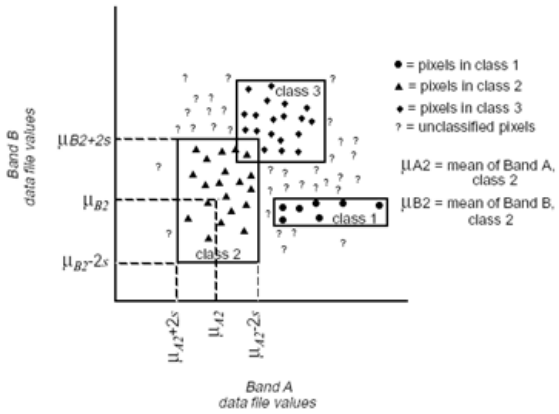


Figura 10.2 *Clasificador paralelepípedo*

Fuente: TP 11, Teledetección FCF UNSE.

6. ERDAS IMAGINE, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA - ESTUDIO DE CASO

El método supervisado como se explicó, es controlado más de cerca por el operador con respecto al método no supervisado que es más automático.

En este proceso usted selecciona pixeles que representan patrones que sean conocidos o que puedan identificarse con ayuda de otras fuentes (fotografías aéreas o imágenes de alta definición, por ejemplo).

Se realizarán las siguientes operaciones:

- Definir las áreas de entrenamiento (firmas espectrales).
- Evaluar las firmas espectrales.
- Realizar una clasificación supervisada.

Los AOIs (Area of Interest), o área de entrenamiento es un polígono o límite geográfico que delimita la zona específica de la imagen satelital, no existe un tamaño fijo universal para un AOI en clasificación supervisada, ya que depende de la resolución de la imagen, heterogeneidad del terreno y objetivos del análisis forestal, pero se recomienda que sea lo suficientemente grande para capturar variabilidad representativa.

El módulo de ERDAS IMAGINE Signatura Editor le permite crear, manejar, evaluar y editar firmas espectrales.

Se extraerá las firmas espectrales desde la imagen a ser clasificada usando área of interest (AOI), Por lo tanto, el primer paso es desplegar la imagen a clasificar, Luego hacer click en el menú image clasificación

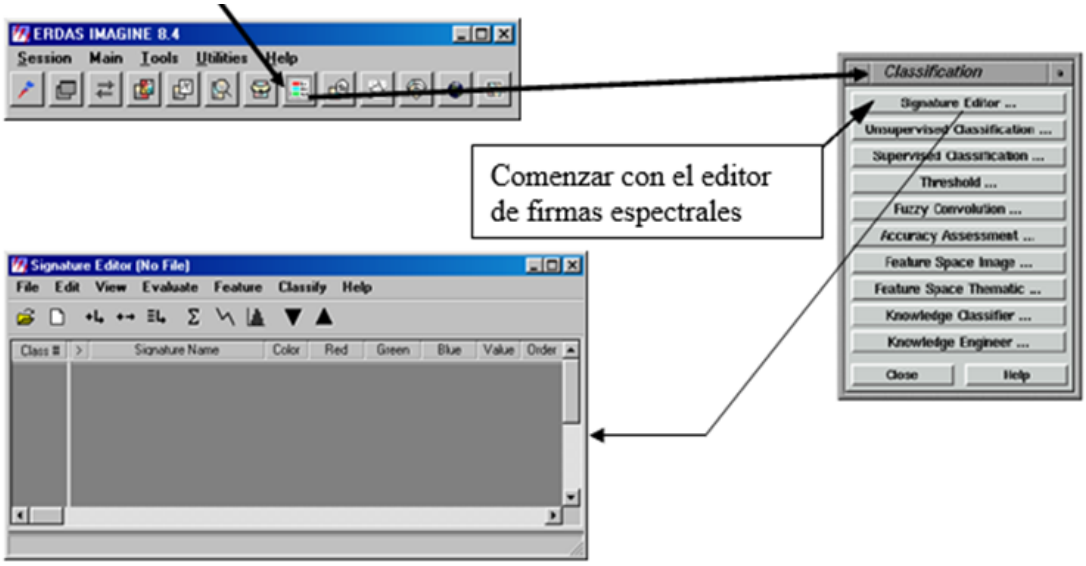


Figura 10.3 *Signature Editor de Erdas Imagine*

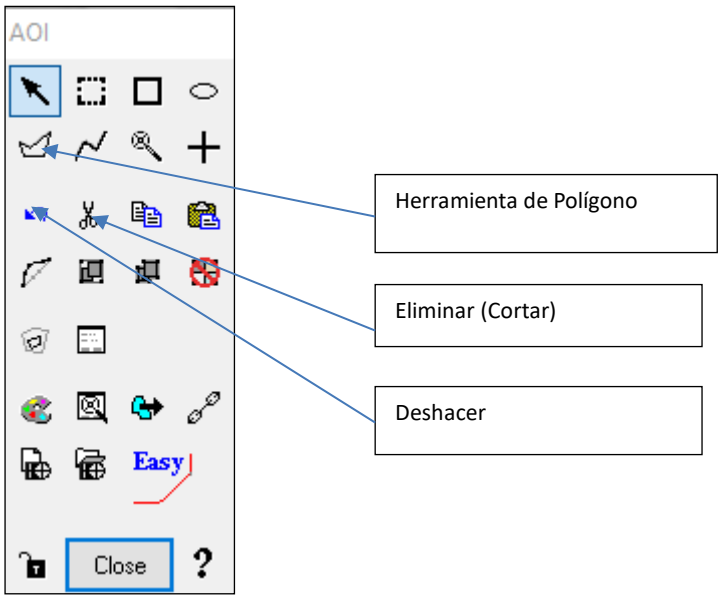


Figura 10.4 *Herramienta AOI para selección de áreas de entrenamiento. Fuente: Erdas Imagine.*

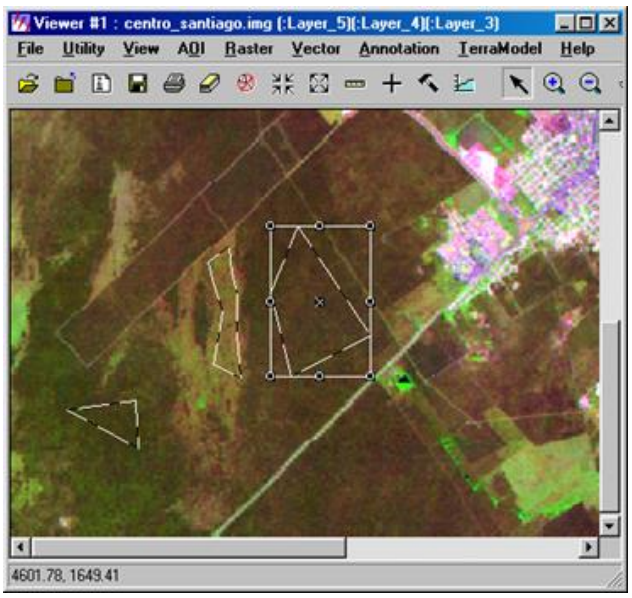


Figura 10.5 *Selección de áreas de entrenamiento. Fuente: Erdas Imagine.*

En la imagen desplegada dibuje un polígono que encierre un área específica. Después que el AOI es creado, un límite (borde rectangular) engloba al AOI indicando que es el que esta seleccionado en ese momento.

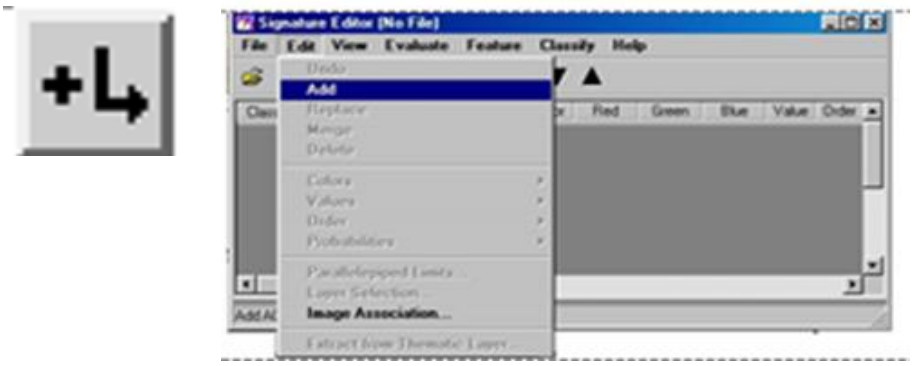


Figura 10.6 *Icono de Créatre New Signature (S) From AOIs de Erdas Imagine.*

Seleccione Edit | Add desde la barra de menú para asignar esta AOI como firma espectral.

Repetir este proceso para todas las firmas.

Una vez que las firmas espectrales son creadas, ellas pueden ser evaluadas, borradas, y fusionadas con firmas espectrales provenientes de otros archivos.

Utilice la herramienta ALARM para evaluar las firmas espectrales.

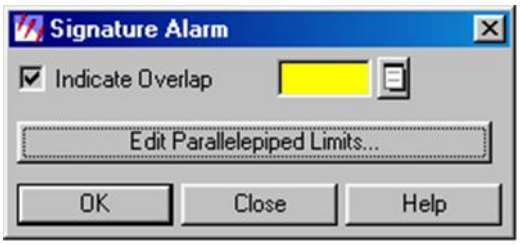


Figura 10.7 *Comando alarma de Erdas Imagine*

Esta resalta los pixeles en el Viewer correspondiente a la/las firmas espectrales. ALARMA puede ser ejecutado con una o más firmas simultáneamente.

Los pixeles que sean clasificados por varias firmas espectrales aparecerán coloreados (en este caso de color amarillo).

En el caso de obtenerse regiones extensas de color amarillo, que como hemos visto estarían indicando la presencia de pixeles clasificados en mas de una clase, habrá que volver a obtener, fusionar o eliminar las firmas espectrales correspondientes a esa clase espectral.

Es importante tener en cuenta que si los píxeles clasificados en dos o más clases se encuentran por fuera del área de interés. No es relevante.

Luego de evaluadas las firmas, asegurarse que no haya zonas sin clasificar (color negro). En ese caso esta fase del proceso termina.

Luego en el Signature editor, haga click dentro de la columna Signature Name cambie el nombre a cada firma obtenida. De igual manera puede modificar los colores. Ambos (nombre y Color son Arbitrarios. Es decir a elección del operador.

Guarde el archivo de firmas espectrales.

7. RECODE

El comando Recode, disponible dentro del software ERDAS Imagine, constituye una herramienta de procesamiento digital diseñada para reasignar o "recodificar" los valores de los píxeles de una imagen ya clasificada, permitiendo agrupar, fusionar o reorganizar las clases espectrales obtenidas durante el proceso de clasificación en un nuevo esquema de categorías más simplificado, coherente o adecuado a los objetivos temáticos del estudio. En términos simples, este comando toma como entrada una imagen temática —producto habitual de una clasificación supervisada o no supervisada— y genera como salida una nueva imagen en la cual determinados valores digitales originales han sido sustituidos por nuevos valores, de acuerdo con las reglas de reasignación definidas por el usuario.

Esta operación resulta especialmente relevante en el contexto de la clasificación digital de imágenes satelitales, dado que es habitual que los procesos de clasificación —particularmente los de tipo no supervisado, pero también en ocasiones los supervisados— generen un número de clases espectrales mayor al número de categorías temáticas que realmente interesan al analista desde el punto de vista conceptual o de aplicación. Esta situación se produce porque el algoritmo de clasificación trabaja exclusivamente sobre la base de la similitud espectral de los píxeles, sin considerar necesariamente su significado temático, de modo que una misma cobertura del suelo —por ejemplo, Áreas Agrícolas, puede quedar fragmentada en varias clases espectrales distintas debido a diferencias sutiles de iluminación, tipos de cultivos, humedad o composición de especies, aun cuando desde la perspectiva del usuario todas ellas deberían agruparse bajo una única categoría temática de "NO BOSQUE".

8. POSPROSESAMIENTO

Una vez obtenida la imagen clasificada, se inicia una etapa fundamental denominada posprocesamiento o mejora de la clasificación, orientada a evaluar, refinar y validar el mapa temático obtenido, con el propósito de corregir imperfecciones propias del proceso de asignación píxel a píxel y de obtener un producto cartográfico final más coherente, tanto desde el punto de vista estadístico como visual y cartográfico.

Esta etapa resulta necesaria porque los algoritmos de clasificación digital, al operar de manera independiente sobre cada píxel en función exclusivamente de su información espectral, ignoran por completo el contexto espacial en el que dicho píxel se inserta. Como consecuencia directa de este enfoque, es habitual que el mapa clasificado presente un patrón de ruido conocido coloquialmente como efecto "sal y pimienta", caracterizado por la aparición de píxeles aislados o pequeños grupos de píxeles clasificados en una categoría distinta a la de su entorno inmediato.

Este ruido no solo afecta la legibilidad visual del mapa, sino que también puede introducir errores significativos en análisis posteriores, como el cálculo de superficies por clase o la generación de polígonos vectoriales.

Para atender esta problemática se recurre a la aplicación de filtros espaciales de posprocesamiento, técnicas que analizan la relación de cada píxel con sus vecinos dentro de una ventana móvil de tamaño definido (habitualmente 3x3, 5x5 o 7x7 píxeles), con el fin de suavizar la imagen clasificada, eliminar artefactos y mejorar la coherencia espacial del resultado, sin necesidad de recurrir a una nueva clasificación espectral. En particular nosotros utilizaremos un Filtro Modal (o de Mayoría).

El filtro de Mayoría constituye la técnica de suavizado más utilizada en el posprocesamiento de imágenes clasificadas. Su funcionamiento consiste en recorrer la imagen mediante una ventana móvil de tamaño definido por el usuario —comúnmente 3x3 o 5x5 píxeles— y, para cada posición de dicha ventana, identificar cuál es la clase temática que aparece con mayor frecuencia entre los píxeles vecinos, reasignando el valor del píxel central de la ventana a esa clase mayoritaria, independientemente de cuál fuera su valor original.

Este procedimiento resulta particularmente eficaz para eliminar el efecto "sal y pimienta" descrito anteriormente, dado que los píxeles aislados que difieren de su entorno son, por definición, minoritarios dentro de la ventana de análisis, y por lo tanto quedan reasignados a la clase dominante circundante. El resultado es un mapa temático visualmente más limpio, con manchas o polígonos de cobertura más compactos y homogéneos, lo cual favorece tanto la interpretación visual como la posterior vectorización del mapa.

No obstante, es importante señalar que este filtro no está exento de efectos secundarios: al aplicarse de manera generalizada sobre toda la imagen, tiende también a suavizar y difuminar los bordes reales entre distintas coberturas, así como a eliminar clases minoritarias genuinas que ocupan superficies reducidas dentro de la escena —como pequeños cuerpos de agua, parches aislados de vegetación particular o infraestructuras puntuales—, las cuales pueden desaparecer del mapa final

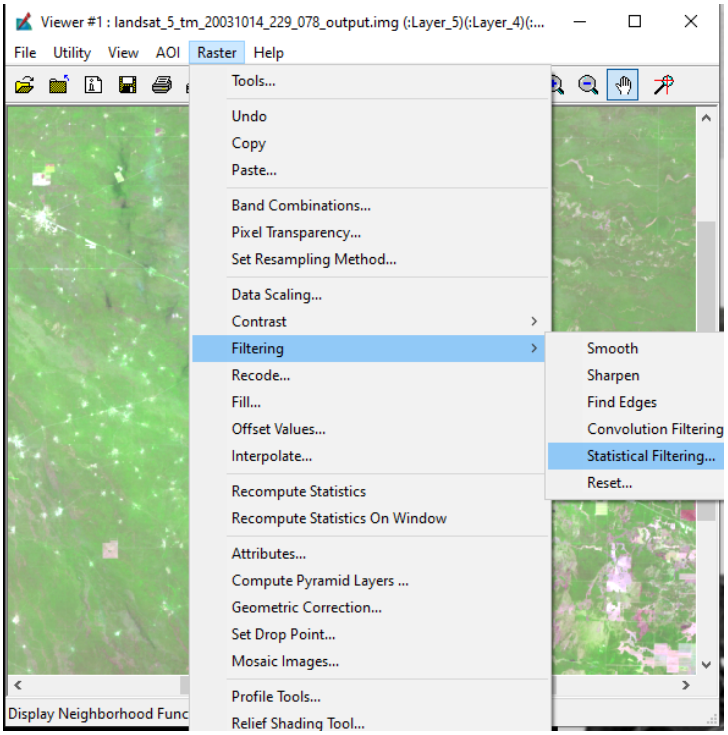


Figura 10. 8 menu de Filtrado en Erdas Imagine

9. MATRIZ DE CONFUSIÓN

La matriz de confusión, también denominada matriz de error o tabla de contingencia, constituye la herramienta estadística fundamental para evaluar la exactitud temática de una clasificación ya sea supervisada, o no supervisada. Se trata de una tabla de doble entrada que permite comparar las categorías asignadas por el clasificador a cada píxel frente a la categoría real de dicha unidad, determinada de manera independiente a partir de una fuente de referencia confiable, comúnmente denominada "verdad de campo" o "verdad terreno".

Su construcción responde a la necesidad de contar con un procedimiento objetivo y reproducible que permita cuantificar el grado de acuerdo entre el mapa temático generado por el proceso de clasificación y la realidad del territorio.

En su forma habitual, la matriz de confusión se organiza disponiendo en las columnas las clases asignadas por el clasificador (datos de la clasificación) y en las filas las clases de referencia o verdad de campo. Cada celda de la matriz contiene el número de píxeles o unidades muestrales que fueron clasificados en una determinada categoría por el algoritmo y que, según la información de referencia, realmente pertenecen a otra (o a la misma) categoría.

Los elementos ubicados en la diagonal principal de la matriz representan los casos de coincidencia entre la clasificación y la referencia, es decir, los píxeles correctamente clasificados en cada categoría. Por el contrario, los elementos ubicados fuera de la diagonal principal representan los errores de clasificación, evidenciando qué proporción de píxeles de una clase determinada fue erróneamente asignada a otra categoría, información sumamente valiosa para identificar patrones específicos de confusión espectral entre clases temáticas.

En una clasificación supervisada (por ejemplo, "bosque", "agricultura", "agua", "urbano"), la matriz de confusión es una tabla cuadrada donde:

- Filas: clases reales (Verdad-Terreno).
- Columnas: Clases establecidas por el clasificador.
- Diagonal principal: número de píxeles correctamente clasificados por clase (aciertos).
- Fuera de la diagonal: errores de asignación (confusión entre clases).

Ejemplo aplicado a cobertura de suelo

Imagina un mapa de bosque, agricultura y agua. Con 100 puntos de validación de campo se construye una matriz como esta:

Tabla 10.1 Matriz de confusión. Fuente: Elaboración propia.

	Predicho: Bosque	Agricultura	Agua
Real: Bosque	**35**	3	2
Real: Agro	2	**32**	5
Real: Agua	1	5	**15**

Interpretación:

- Bosque: 35 aciertos; 5 errores (3 por “agricultura” y 2 por “agua”).
- Agro: 32 aciertos; 7 errores (2 por “bosque” y 5 por “agua”).
- Agua: 15 aciertos; 6 errores (1 por “bosque”, 5 por “agricultura”).

Con esto es posible calcular:

- Precisión global = píxeles en diagonal / total ≈ 82/100 = 82%.

10. ACTIVIDADES

- Baje y componga una imagen satelital.
- Seleccione un área de estudio.
- Extraiga esa área de estudio.
- Clasifique de manera supervisada esa área de estudio.
- Aplique Recode y Filtrado Modal.

PRACTICO

11

TRANSFORMACION DE IMÁGENES SATELITALES, CLASIFICACION NO SUPERVISADA

1. OBJETIVO PRINCIPAL

- Comprender y aplicar la técnica de clasificación no supervisada sobre imágenes satelitales, con el fin de que el alumno desarrolle competencias metodológicas para identificar de manera automática agrupamientos espectrales presentes en una escena, interpretar su correspondencia con coberturas reales del territorio y evaluar su utilidad como herramienta exploratoria dentro del procesamiento digital de imágenes.
- Utilizar el software ERDAS Imagine para realizar clasificación no supervisada de imágenes satelitales, generando mapas temáticos útiles para análisis e inventarios forestales.

2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Comprender los principios estadísticos que sustentan la clasificación no supervisada, en particular la lógica de los algoritmos de agrupamiento (clustering) aplicados sobre la imagen.
- Diferenciar metodológicamente la clasificación no supervisada de la clasificación supervisada, identificando las ventajas y limitaciones de cada enfoque.
- Conocer y aplicar el algoritmo de clasificación no supervisada ISODATA, comprendiendo su lógica de funcionamiento iterativo.
- Identificar los parámetros de configuración del algoritmo (número de clases, número máximo de iteraciones, umbral de convergencia) y evaluar su influencia sobre el resultado final de la clasificación.
- Ejecutar el proceso de clasificación no supervisada sobre una imagen satelital de estudio, generando un número determinado de clases espectrales.

- Analizar e interpretar las clases espectrales generadas por el algoritmo, asignándoles un significado temático a partir del conocimiento del área de estudio, imágenes de referencia o información de verdad de campo.

3. MATERIAL REQUERIDO

- Software Erdas imagine.
- Imagen satelital
- Computadora

4. INTRODUCCIÓN

La clasificación no supervisada constituye uno de los dos grandes enfoques metodológicos empleados en el procesamiento digital de imágenes satelitales para la generación de mapas temáticos de coberturas del suelo, diferenciándose sustancialmente de la clasificación supervisada en cuanto al grado de intervención previa del analista sobre el proceso.

Mientras que en la clasificación supervisada el usuario define de antemano un esquema de clases y selecciona manualmente áreas de entrenamiento representativas de cada categoría, en la clasificación no supervisada es el propio algoritmo el que identifica, de manera automática y exclusivamente a partir de las propiedades estadísticas de los datos espectrales, agrupamientos naturales de píxeles con comportamiento espectral similar, sin que exista un conocimiento previo ni una intervención directa del usuario sobre el significado temático de dichas agrupaciones.

Este enfoque se fundamenta en la premisa de que los píxeles correspondientes a una misma cobertura del suelo tienden a presentar valores digitales similares en el espacio espectral definido por las distintas bandas del sensor, formando por tanto nubes o clústeres de puntos relativamente compactos y diferenciables de otros grupos de píxeles asociados a coberturas distintas. El algoritmo de clasificación no supervisada explora este espacio espectral e identifica de manera automática dichos agrupamientos, generando como resultado un número determinado de clases espectrales, las cuales solo posteriormente, en una etapa de interpretación realizada por el analista, son asociadas a categorías temáticas con significado real sobre el territorio.

5. CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

El proceso de clasificación no supervisada se desarrolla habitualmente en dos grandes etapas claramente diferenciadas.

La primera etapa, de naturaleza puramente estadística y automática, corresponde a la ejecución del algoritmo de agrupamiento (clustering) sobre la totalidad de los píxeles de la imagen, el cual, a partir de un número de clases predefinido por el usuario y de determinados parámetros de configuración, genera de manera iterativa un conjunto de agrupamientos espectrales, cada uno caracterizado por un centroide y una determinada dispersión en el espacio de bandas.

La segunda etapa, de naturaleza interpretativa y necesariamente dependiente del criterio del analista, consiste en examinar cada una de las clases espectrales resultantes y asignarle un significado temático concreto, apoyándose para ello en el conocimiento del área de estudio, en imágenes de referencia de mayor resolución, en información de verdad de campo o en la propia lógica de composición de color de la imagen clasificada.

Esta segunda etapa reviste particular importancia metodológica, ya que el número de clases espectrales generadas por el algoritmo no coincide necesariamente con el número de categorías temáticas de interés para el estudio. Es habitual que una misma cobertura real quede fragmentada en varias clases espectrales distintas debido a variaciones internas de humedad, densidad, iluminación o composición, situación que requiere posteriormente fusionar dichas clases mediante herramientas de recodificación.

De manera inversa, también puede ocurrir que el algoritmo agrupe bajo una única clase espectral píxeles correspondientes a coberturas reales distintas mas espectralmente similares, situación considerablemente más problemática, ya que no admite una solución sencilla de post-clasificación y suele requerir aumentar el número de clases espectrales generadas inicialmente por el algoritmo, o incorporar bandas que mejoren la separabilidad entre dichas coberturas.

Entre las principales ventajas de este enfoque se destaca, en primer lugar, su independencia respecto de un conocimiento previo detallado del área de estudio, lo cual la convierte en una herramienta particularmente valiosa en regiones poco conocidas, de difícil acceso para el trabajo de campo, o en las etapas iniciales de un proyecto de investigación, cuando aún no se dispone de información suficiente para definir un esquema de clasificación supervisada.

En segundo lugar, al no depender de la selección subjetiva de áreas de entrenamiento por parte del analista, reduce en cierta medida el componente de subjetividad presente en la clasificación supervisada, generando agrupamientos basados exclusivamente en la estructura estadística objetiva de los datos.

Finalmente, su relativa sencillez operativa y menor demanda de trabajo previo la convierten en una técnica ágil, frecuentemente utilizada como paso exploratorio inicial para conocer la variabilidad espectral de una escena antes de abordar un proceso de clasificación supervisada más detallado.

No obstante estas ventajas, el método presenta limitaciones importantes que deben considerarse. La principal de ellas radica en que las clases espectrales generadas carecen, en sí mismas, de significado temático directo, por lo que siempre resulta indispensable una etapa posterior de interpretación y etiquetado por parte del analista, proceso que reintroduce un componente de subjetividad y que puede resultar laborioso, especialmente cuando el número de clases espectrales es elevado. Asimismo, la calidad del resultado depende fuertemente de la correcta selección de los parámetros del algoritmo, particularmente del número de clases inicial.

Es de interés poder entender que son la clase informacionales y las clases espectrales:

Clases informacionales: Representan categorías reales de interés, como "bosque denso", "Arbustal" o "Pastizal", asignadas por el analista.

Clases espectrales: Estas clases agrupan píxeles por similitud en sus valores numéricos de reflectancia, sin considerar el significado Temático, definido por el Algoritmo.

5.1. Algoritmo ISODATA

ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique, o Técnica Iterativa de Análisis de Datos Auto-organizados) es uno de los algoritmos más utilizados en la clasificación no supervisada de imágenes satelitales. Se trata de un método de agrupamiento (clustering) estadístico que identifica de manera automática, iterativa y sin intervención directa del usuario, agrupamientos naturales de píxeles con comportamiento espectral similar dentro de una imagen.

Gracias a esta mayor flexibilidad, ISODATA suele ofrecer resultados más ajustados a la verdadera estructura espectral de los datos, motivo por el cual constituye el algoritmo de clasificación no supervisada más utilizado en software especializado de teledetección como ENVI, ERDAS Imagine o QGIS.

A continuación se incorpora una tabla para comparar aspectos que diferencian entre clasificación supervisada y clasificación no supervisada.

Tabla 11.1 Comparación entre clasificación supervisada y no supervisada. Fuente: Elaboración propia.

Aspecto	Supervisada	No Supervisada
Entrenamiento	Usuario proporciona muestras	Automático (sin muestras)
Precisión	Alta, si muestras buenas	Media; requiere interpretación
Tiempo	Más largo (entrenamiento)	Rápido
Uso ideal	Coberturas conocidas (inventarios forestales)	Exploración (daños por fuego)
Algoritmos comunes	Máxima verosimilitud, SVM	K-means, ISODATA

6. PROCESO

El proceso de Clasificación No Supervisada es un método de análisis de imágenes, muy usado en teledetección/percepción remota, donde el algoritmo agrupa los píxeles o datos en clases sin que el usuario defina previamente las categorías. El sistema descubre patrones espectrales o estadísticos por sí mismo, y luego el analista interpreta y etiqueta esos grupos.

La ejecución del algoritmo requiere que el usuario defina previamente una serie de parámetros que condicionan de manera directa el resultado obtenido. Entre los más relevantes se encuentran:

- Número de clases espectrales a generar, el cual debe establecerse considerando que resulta preferible solicitar un número de clases superior al de categorías temáticas finales deseadas, dado que posteriormente será posible fusionar clases mediante recodificación.
- Número de iteraciones permitidas antes de detener el proceso, aun cuando no se haya alcanzado la convergencia completa.
- Umbral de convergencia, que define el porcentaje máximo de píxeles que puede cambiar de clase entre una iteración y la siguiente para considerar que el proceso ha finalizado.

A continuación desarrollo el proceso general, paso a paso:

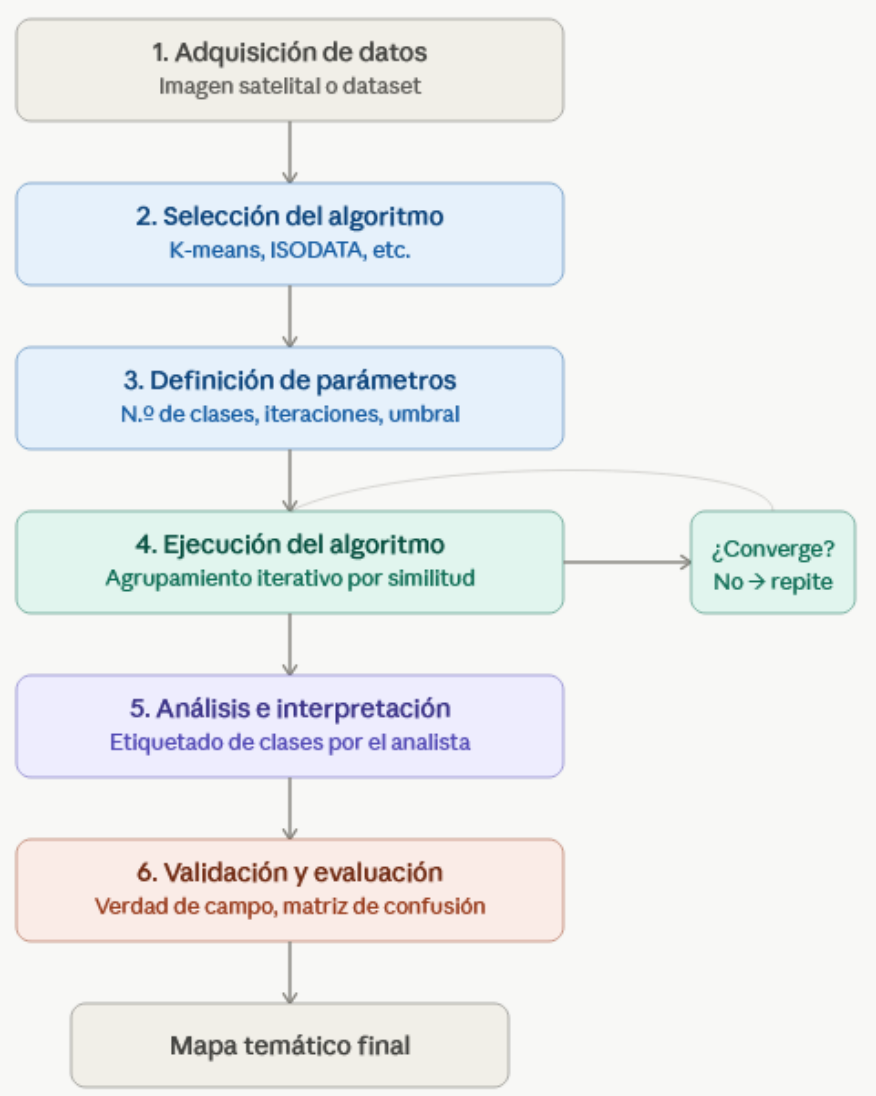


Figura 11.1 *Diagrama de flujo clasificación no supervisada. Fuente: Elaboración propia.*

Desde el punto de vista estadístico, este algoritmo parece bastante adecuado para delimitar los grupos de valores homogéneos dentro de la imagen. Sin embargo, en ocasiones resulta artificioso señalar unos parámetros de control significativos, puesto que el usuario no conoce, de partida, el número de grupos espectrales presentes en la imagen, ni el valor idóneo de dispersión interna o de distancia entre grupos. De esta forma, el análisis No Supervisado se convierte en un proceso interactivo, en donde el usuario establece unos valores arbitrarios que se van modificando a la vista de los resultados.

El posproceso o mejora de la imagen clasificada es la misma que se utiliza para una clasificación Supervisada por lo que se explicará en detalle en ese tema. Se recomienda su repaso para su aplicación también en este proceso de clasificación.

6.1. Método de asignación de pixeles

En ERDAS Imagine, el método de asignación en ISODATA utiliza la distancia euclidiana mínima como criterio principal para agrupar píxeles en clústeres durante la clasificación no supervisada. Este proceso es iterativo y se basa en minimizar la varianza espectral dentro de cada clase.

1. El algoritmo comienza ubicando N centroides (o centros de clase), uno por cada clase, definida en el espacio de características espectrales. (figura 11.2).
2. Cada píxel de la imagen se compara con los centros de clases usando una medida de distancia, la más común es la distancia euclidiana. El píxel se asigna a la clase cuyo centro de clases esté espectralmente más próximo. (figura 11.3).
3. Una vez que todos los píxeles quedaron asignados a alguna clase, se recalcula la posición de cada centroide como el promedio de todos los píxeles que ahora pertenecen a esa clase. El centro de clase "se mueve" a una nueva posicion. (figura 11.4).

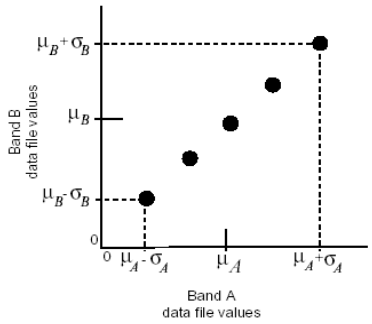


Figura 11.2

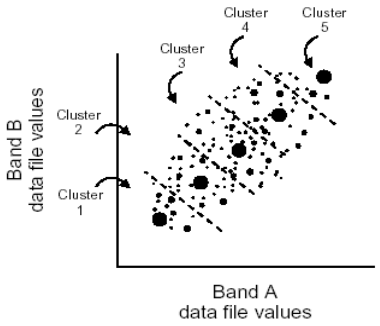


Figura 11.3

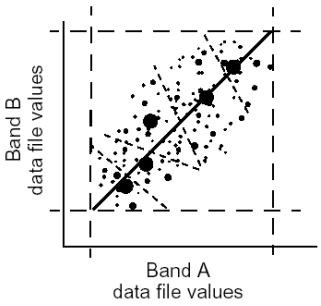


Figura 11.4

Fases de ISODATA. Fuente: TP 11 Teledetección FCF UNSE.

4. Se compara la pertenencia de los pixeles a las clases actuales con la de la iteración anterior:
   - Si el % de pixeles que cambiaron de clase es menor al umbral definido, el algoritmo se detiene.
   - Si aún no se alcanzó el número máximo de iteraciones, se repiten los pasos 2 y 3 con los centros de clases actualizados.
   - Si se llega al límite de iteraciones sin converger al valor del umbral, el proceso se detiene igual, tomando el resultado de la última iteración (esto puede indicar que los parámetros elegidos no son óptimos).

7. SUAVIZADO DE LOS RESULTADOS

Resulta bastante frecuente que los resultados de una clasificación adolezcan de una excesiva fragmentación. En otras palabras, las diversas categorías aparecen fragmentadas entre sí, en una compleja sucesión espacial. Manchas de color, más o menos homogéneas se encuentran salpicadas por píxeles asignados a otras categorías, perdiéndose su unidad geográfica y dificultándose la interpretación de los resultados. Este suceso se debe a una doble causa:

- Por un lado, a que la mayor parte de los criterios de asignación no tienen en cuenta la pertenencia de píxeles vecinos
- Por otro, a la propia complejidad del paisaje, directamente relacionada con la aparición de píxeles de borde –fronterizos a dos o más categorías que son los principales responsables de la discontinuidad visible en el mapa.

Para solventar este problema, dependiendo de la escala de trabajo, suele aplicarse una técnica de suavización de resultados, aplicando filtros modales.

Sin embargo, cuando se trabaja sobre grandes superficies no es recomendable su uso.

7.1. Clump, Sieve y Eliminate

Es precisamente para resolver este problema que ERDAS IMAGINE incorpora un conjunto de herramientas de generalización post-clasificación, entre las cuales las más utilizadas son Clump, Sieve y Eliminate, que trabajan de manera secuencial sobre la capa raster temática ya clasificada.

La primera herramienta de esta cadena es Clump, cuyo nombre puede traducirse como "agrupar o aglutinar". Su función es identificar, dentro del raster clasificado, todos los conjuntos de píxeles contiguos que comparten el mismo valor de clase y asignarles un identificador único de región, de modo que cada mancha conectada deje de ser simplemente una colección de píxeles individuales y pase a convertirse en un objeto geográfico identificable, análogo a un polígono.

El resultado de aplicar Clump es una nueva capa raster donde cada región contigua tiene asignado un identificador numérico propio, además de conservar el atributo de la clase temática original a la que pertenece. Este paso es indispensable porque las herramientas siguientes, Sieve y Eliminate, necesitan trabajar sobre regiones ya delimitadas para poder medir su tamaño y decidir si deben conservarse, eliminarse o fusionarse con otras. Una

vez que la imagen ha sido procesada con Clump y cada mancha cuenta con su propio identificador de región, entra en juego la segunda herramienta, Sieve.

Sieve, cuyo nombre hace referencia justamente a la acción de "tamizar o cernir", la función de Sieve es recorrer todas las regiones generadas por Clump y comparar el tamaño de cada una, medido en número de píxeles, con un umbral mínimo definido por el usuario. Todas aquellas regiones cuyo tamaño sea inferior a ese umbral son eliminadas de la clasificación, quedando marcadas como valores sin clase o NoData, mientras que las regiones que superan el umbral se conservan intactas con su clase original.

La elección del umbral mínimo de píxeles no es un valor arbitrario ni universal, sino que depende directamente de la resolución espacial de la imagen de origen y de la unidad mínima cartografiable que se desea representar en el producto final. Por ejemplo, si se trabaja con una imagen Landsat de 30 metros de resolución espacial, cada píxel representa un área de 900 metros cuadrados en el terreno, por lo que un umbral de nueve píxeles equivaldría aproximadamente a un hectárea, una unidad mínima razonable para muchos estudios de cobertura del suelo a escala regional. En cambio, si se trabaja con imágenes Sentinel-2 de 10 metros de resolución, cada píxel equivale a solo 100 metros cuadrados, por lo que sería necesario un umbral considerablemente mayor en número de píxeles para representar esa misma unidad mínima de una hectárea, concretamente cien píxeles.

La tercera herramienta de esta secuencia es Eliminate, que entra en acción precisamente para resolver el problema que deja pendiente Sieve. Cuando Sieve elimina las regiones pequeñas, esos píxeles no desaparecen físicamente del raster, sino que quedan marcados como sin valor de clase, generando huecos dentro del mapa temático que antes estaba completamente clasificado. Si el proceso se detuviera en este punto, el producto final tendría vacíos de información distribuidos por toda la superficie, lo cual resulta inaceptable tanto desde el punto de vista analítico como cartográfico, ya que impediría calcular superficies totales por clase de manera precisa y generaría un mapa visualmente incompleto. La función de Eliminate es precisamente reasignar esos píxeles a una clase válida, tomando como criterio la región vecina de mayor tamaño con la que cada hueco comparte un borde de contacto. En otras palabras, Eliminate examina el entorno inmediato de cada área eliminada y decide fusionarla con la clase dominante que la rodea.

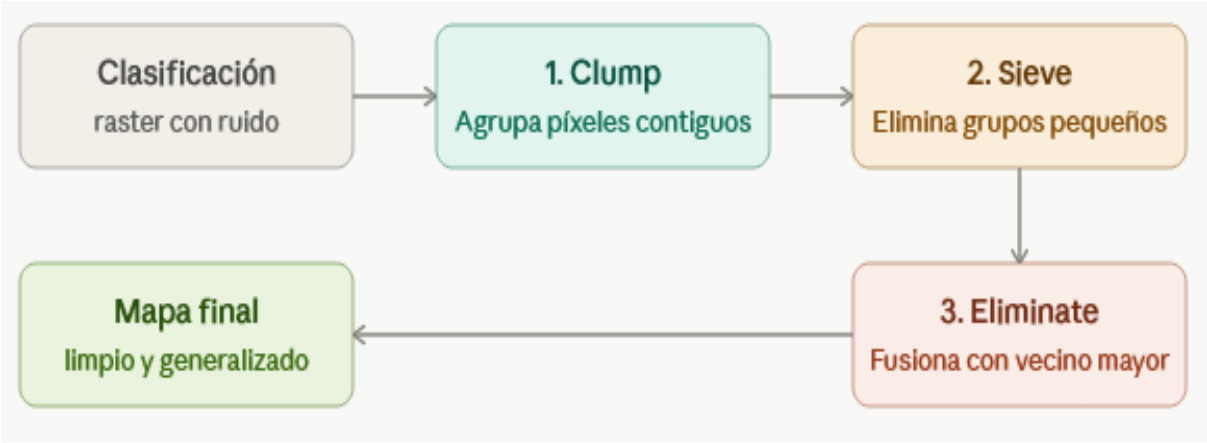


Figura 11.5 *Orden de ejecución. Fuente: Elaboración Propia.*

Clump debe ejecutarse siempre en primer lugar, porque sin la identificación previa de regiones conectadas no existe ninguna unidad sobre la cual medir tamaños. Sieve depende directamente del resultado de Clump, porque necesita conocer cuántos píxeles conforma cada región para poder compararlos con el umbral definido. Y Eliminate, a su vez, depende del resultado de Sieve, porque solo puede reasignar aquellas áreas que fueron previamente marcadas como eliminadas por no alcanzar el tamaño mínimo.

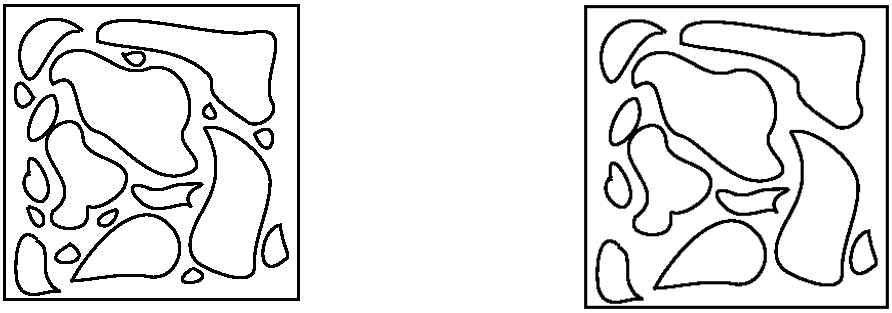


figura 11.6 *Resultado Inicial y Final de Clump, Sieve y Eliminate. Fuente: TP 11, Teledetección FCF UNSE.*

8. USO DE ERDAS IMAGINE

Clasificar una imagen es el proceso de ordenar pixeles en un numero finito de clases individuales, o categorías de datos, basado en sus valores de ND.

Si un pixel satisface un cierto set de criterios, el pixel es asignado a la clase que corresponda a ese criterio

Erdas Imagine → Image Classification options → Unsupervissed Classification

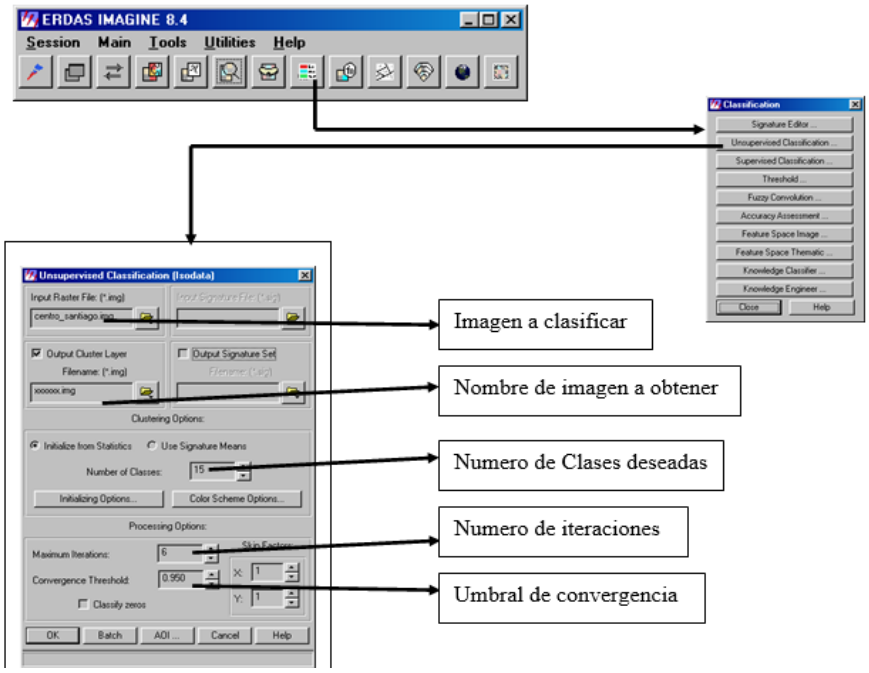


Figura 11.7 *Clasificación no supervisada. Fuente: Erdas Imagine.*

Cuando el algoritmo termina de agrupar los píxeles, el resultado es una capa raster donde cada píxel tiene un valor entero (1, 2, 3... N) correspondiente al clúster al que fue asignado. Ese número es puramente arbitrario: no indica si la clase 3 es agua o vegetación, ni guarda relación con ningún esquema de color estándar. Por defecto, ERDAS IMAGINE suele aplicar una paleta genérica o aleatoria (a veces una escala de grises o un arcoíris automático) solo para poder visualizar las clases separadas entre sí, pero sin ningún significado temático real.

El primer paso es asignar colores con sentido tematico, la asignación se realiza generalmente a través del Raster Attribute Editor (editor de atributos raster):

- Seleccionar cada clase individualmente y asignarle un color RGB específico.
- Renombrar la clase (por ejemplo, cambiar "Clase 3" por "Cuerpo de agua"), lo cual queda guardado en la columna de nombre de la tabla de atributos.
- Guardar el esquema de colores como una paleta o archivo de color.

Es importante recordar que la asignación de colores es una tarea puramente de visualización e interpretación humana Arbitraria, no modifica los valores espectrales originales ni la clasificación numérica, solo cambia cómo se representa cada clase en pantalla o en el mapa impreso. Por eso, dos analistas distintos podrían asignar colores diferentes a las mismas clases sin que eso altere la validez técnica de la clasificación.

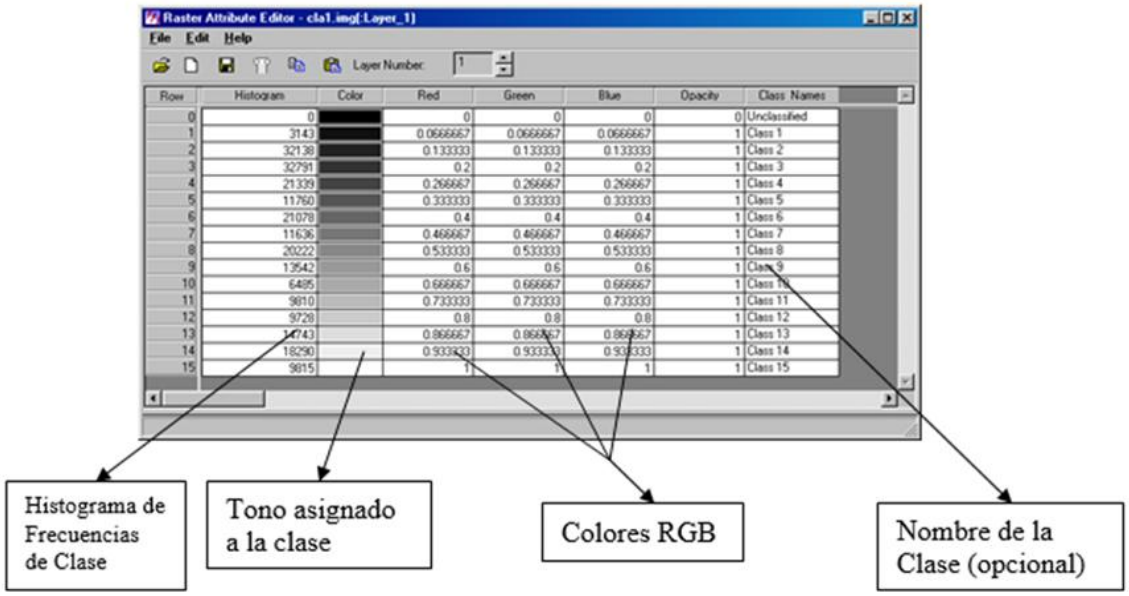


Figura 11.8 *Editor de Atributos Ráster. Fuente: Erdas Imagine.*

Luego debemos ir a:

Image Interpreter → GIS Analysis → RECODE → Setup Recode

Luego de realizar este proceso debemos utilizar el comando RECODE, para agrupar "clases semejantes" o a las que el operador le asignó colores diferentes.

El comando RECODE disminuye el número de clases, creando una nueva imagen temática, al combinar clases asignando un mismo número de clase a más de una clase original.

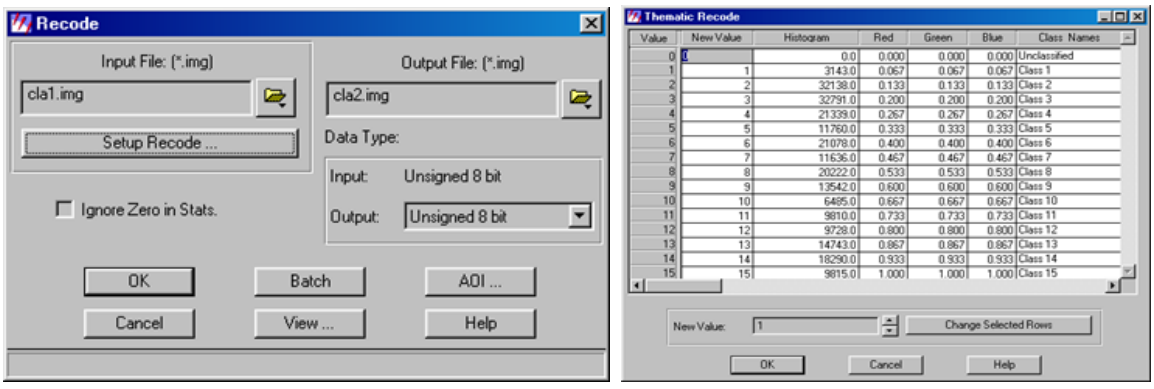


Figura 11.9. *Cuadro de dialogo de recode.*

9. POSPROCESO

9.1. Clump

Aplicar los comandos Clump, Sieve y Eliminate de ERDAS Imagine, sobre la imagen clasificada, utilizando el concepto de área mínima de 5 hectáreas.

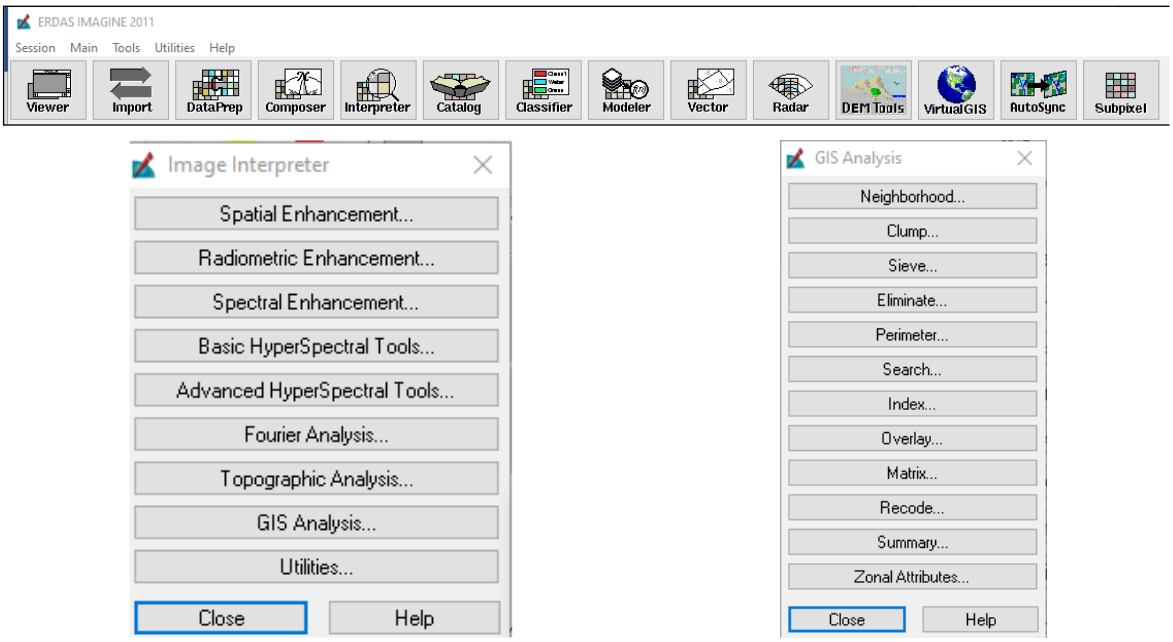


Figura 11.10. Comandos Clump, Sieve y Eliminate. Fuente: Erdas Imagine.

5. ACTIVIDADES

- Baje y componga una imagen satelital.
- Seleccione un área de estudio de al menos 50.000 ha.
- Extraiga esa área de estudio.
- Clasifique de manera no supervisada esa área.
- Recodifique para obtener finalmente como maximo 5 clases finales, asignando nombre y calculando superficies de cada clase.
- Ejecutar Clump, sieve y Eliminate con una superficie minima de 10 has.

PRACTICO

12 TRABAJO CON DRONES

1. OBJETIVO PRINCIPAL

- Aplicar tecnología de vehículos aéreos no tripulados (UAV/drones) para la captura, procesamiento e interpretación de información geoespacial, integrando estos datos a un flujo de trabajo típico de SIG y teledetección.
- Adquirir experiencias en el manejo de software para procesar fotografías aéreas..

2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Planificar una misión de vuelo definiendo altura, solape (frontal y lateral), resolución espacial objetivo (GSD) y patrón de vuelo adecuados a las condiciones del rodal o parcela a relevar.
- Ejecutar el vuelo con el UAV, aplicando protocolos de seguridad operacional (checklist pre-vuelo, normativa aeronáutica vigente, condiciones meteorológicas) y georreferenciación mediante puntos de control terrestre (GCP).
- Procesar las imágenes adquiridas mediante software de fotogrametría (ej. Pix4D, Agisoft Metashape) para generar Ortomosaico Modelo Digital de Superficie (MDS) y Modelo Digital de Elevación (MDE).

3. INTRODUCCIÓN

Las etapas para la obtención de un producto cartográfico comprenden cuatro fases, para la obtención de los datos y para el procesado de los mismos:

1. Planificación de vuelo,
2. Apoyo terrestre,

3. Registro fotográfico,
4. Procesado de las imágenes y cálculos.

4. PLANIFICACIÓN DE VUELO

El diseño del vuelo se hace en función de la resolución o de la escala que se pretenda obtener, del tipo de terreno, su ubicación, sus detalles, la extensión a relevar y condiciones meteorológicas imperantes, fundamentalmente la velocidad del viento.

Pueden programarse varias misiones, variando los parámetros.

Para la ejecución del vuelo fotogramétrico hay que hacer una planificación del mismo de forma que, a partir de una resolución fijada y teniendo en cuenta las características del equipo fotográfico, se determinen altura y velocidad del vuelo así como tiempos de disparo y distancias entre pasadas para asegurar los recubrimientos fotográficos necesarios para su posterior tratamiento.

La planificación del vuelo del dron es el proceso que tiene mayor influencia en la calidad de los resultados.

Hay dos aspectos que suelen ser el origen de problemas a la hora de realizar fotogrametría con drones:

- Insuficiente solape entre imágenes.
- Inadecuada localización / orientación de las fotos.

Citaremos las principales aplicaciones que se utilizan para el cálculo y programación de los vuelos.

4.1. Mission Planner

Mission Planner es una completa aplicación de estación terrestre la cual nos permite crear un proyecto de piloto automático, en dicho proyecto se puede crear una ruta de coordenadas y alturas. El software utiliza mapas base de diferentes fuentes y trabaja con coordenadas geográficas, planas etc.

Es una aplicación muy completa, con la que podremos configurar infinidad de parámetros de nuestro dron y de nuestra controladora. Está disponible para Windows pero también existe una versión multiplataforma llamada APM Planner. Con este software tendremos que planificar nuestro vuelo desde el PC y posteriormente pasar la misión a nuestro dron.



Figura 12.1 *Software Mission Planner para la planificación de vuelo. Polígono a volar se corresponde con el INSIMA, El zanjón)*

4.2. Pix4d Capture

E

s una de las aplicaciones más conocidas para la planificación de vuelo. Se trata de una aplicación móvil disponible tanto para Android como para iOS. Es compatible con la mayoría de drones profesionales más comercializados (phantom, inspire, mavic, bebop 2, 3dr solo...). Tiene una integración perfecta con los diferentes sistemas de software del fabricante.

Esta app permite definir vuelos en forma de cuadrícula, doble cuadrícula (solapando dos cuadrículas perpendiculares), vuelos circulares, incluso unir varios de los anteriores dentro de un único vuelo.

Con esto tenéis aseguradas las reconstrucciones tanto de mapas planos, volúmenes y objetos tridimensionales.

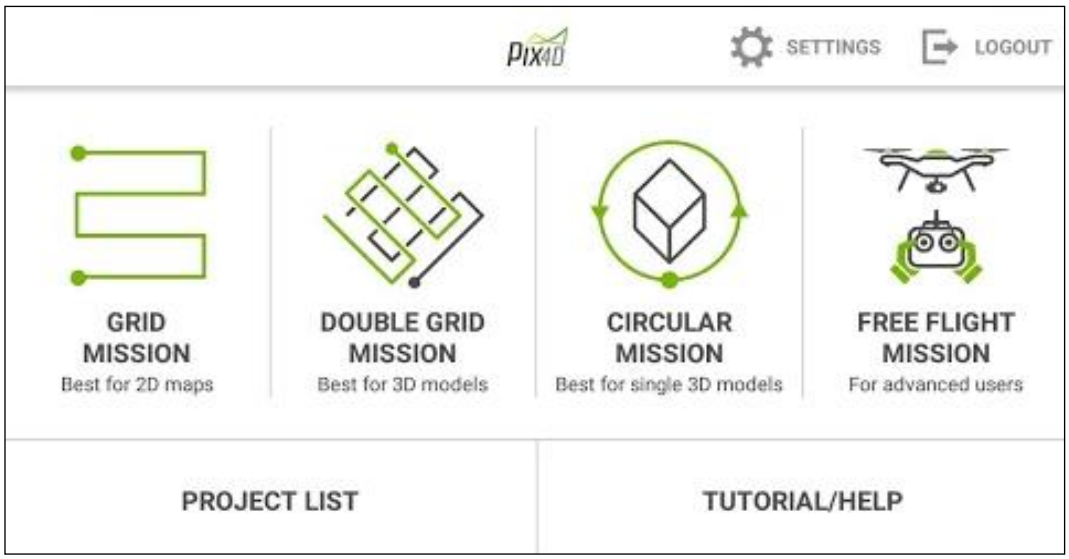


Figura 12.2. *Interfase del Pix4Capture*

El funcionamiento de esta aplicación es realmente sencillo. Una vez que tengamos clara la zona que queremos mapear, abrimos la aplicación y seleccionamos el área a sobrevolar. Como en otras apps, es muy sencillo configurar aspectos relativos a nuestro vuelo: velocidad, ángulo de inclinación de la cámara o el porcentaje de solape entre imágenes.

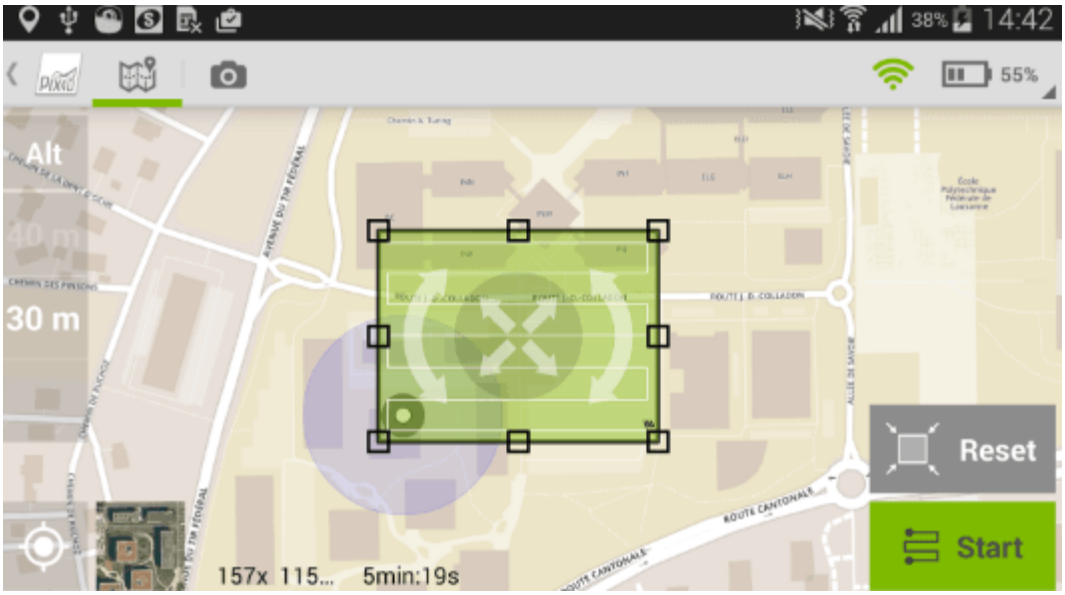


Figura 12.3. *Imagen obtenida de pix4d.com, durante la selección del área a volar.*

En líneas generales, se realiza un plan de vuelo definiendo recorridos con waypoints que constituyen la ruta que seguirá el dron capturando imágenes.

Para la delimitación de la zona de vuelo se utiliza en general una imagen georreferenciada obtenida desde el Google Earth que fue exportada al programa, o que viene por defecto configurada en las distintas aplicaciones.

Una vez definido y calculadas las rutas, la aplicación se comunicará con nuestro dron y éste empezará el vuelo de forma autónoma.

En Mission Planner se programan los recorridos ingresando parámetros tales como distancia entre tomas, porcentaje de superposición entre las imágenes consecutivas, altura de vuelo, tiempo de obturación de la cámara, velocidad de ascenso o desplazamiento del aparato; además se marcan los waypoints sobre los que se producirán los registros fotográficos.

Cada misión y sus valores asociados se guardan en la memoria del Modulo de piloto automático (APM), para la realización del vuelo y para su posterior utilización en postproceso.

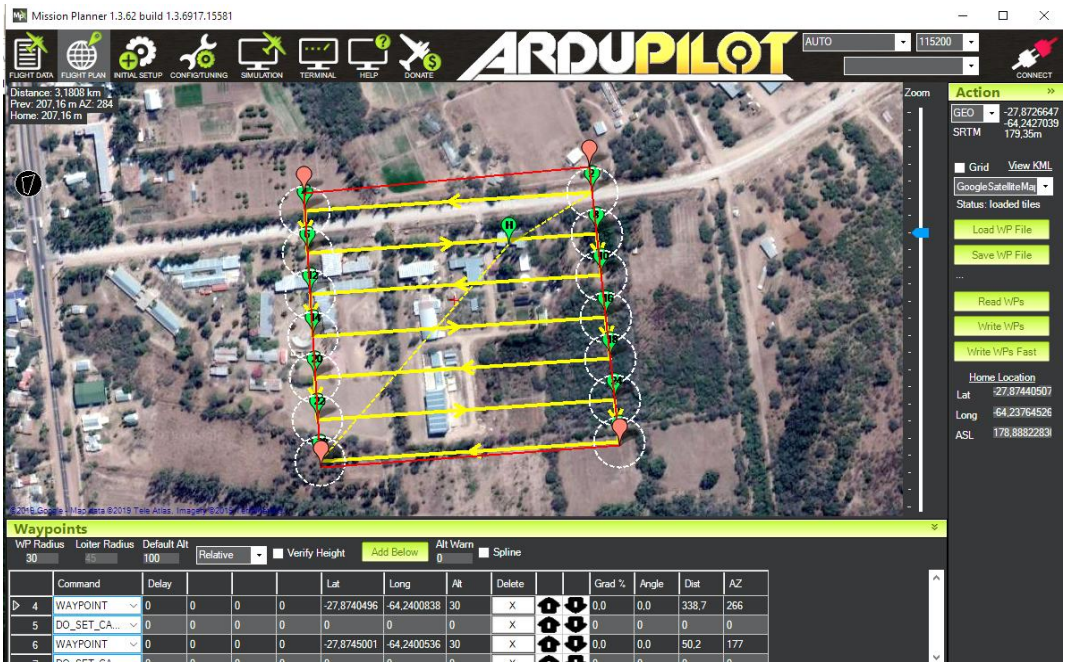


Figura 12.4. Planificación de vuelo con Mission Planner.

5. APOYO TERRESTRE

Para el apoyo topográfico se colocan referencias o señales (dianas), en toda la superficie a fotografiar para la obtención de los puntos de apoyo con coordenadas G.P.S. Estos puntos servirán para transformar el modelo fotogramétrico en modelo del terreno.

Los puntos de control en los vuelos tripulados y no tripulados son de vital importancia, ya que de ellos depende la georreferenciación del proyecto y son los que me garantizan que nuestros productos, como modelos digitales de terreno no van a estar desconfigurados ni en posición ni en altura.

Para ello pueden utilizarse:

5.1. Receptores GNSS

Las precisiones de los puntos de apoyo deben están acordes con la escala del producto, por lo que la medición con GPS deberá ser realizada en método diferencial.

Será útil para la medición de puntos de control o targets en el suelo. Estos puntos de control pueden ser elementos naturales fácilmente reconocibles o preseñalizados mediante dianas de puntería o señales.

Además esta tecnología nos puede servir para establecer una red topográfica inicial y enlazar con el sistema geodésico de referencia, si es que la zona donde vamos a trabajar carece de ello.

5.2 Estación total

Normalmente, en este tipo de trabajos nos encontraremos elementos elevados como torres o tejados en los que no podremos medir puntos utilizando el GPS. Mediremos así puntos de control en pequeñas dianas de puntería que podamos colocar o si no es posible en clavos, tornillos o detalles de la mampostería. Es importante hacer croquis de estos puntos para no cometer errores en el procesamiento.

Además de obtener la posición de los puntos sobre el terreno, estos también deben identificarse claramente en las fotografías, para poder establecer una correcta correlación.

En el reconocimiento preliminar de campo se determinan los lugares ideales para el emplazamiento de puntos de control, pero en muchos casos, estos pueden llegar a ser impracticables debido a la restricción de la propiedad privada, a la obstrucción por vegetación, falta de caminos etc.



Figura 12.3. Punto base para medición diferencial, y puntos de control en área de estudio.

El tamaño del píxel en el terreno, limitará la mínima dimensión que deben tener las marcas o dianas a utilizar.

Es de obvio razonamiento que un solo píxel no es suficiente a la hora de detectar una marca en el terreno dentro de la fotografía. Se necesitan por lo menos 3 o 4 píxeles para lograrlo. Para el caso de que se quiera realizar un vuelo con un tamaño de píxel de 6 cm., por lo tanto las marcas que materialicen puntos de apoyo y/o de control deben tener una dimensión mínima de 18 cm x 18 cm.

En algunos casos bastaran objetos preexistentes, que deberán buscarse a campo, Los fenómenos ideales (y los más utilizados en el trabajo) para que quede claramente representado un punto es un cruce de dos líneas definidas por distintos materiales. Ello provoca un contraste que es fácilmente detectable en las fotografías.



Figura 12.3. Derecha: Diana sobre base. Izquierda: Foto en la zona de base, se observa la diana utilizada.

6. REGISTRO FOTOGRÁFICO

Las imágenes se obtienen según el plan de vuelo planificado, entonces se registra una imagen en cada punto waypoint programado. Mientras esto ocurre se puede visualizar en tiempo real toda la información de telemetría, estado del dispositivo y posición del mismo así como también se puede hacer un seguimiento en tiempo real del dron a través de la cámara de video que lleva a bordo.

Las imágenes se guardan en la memoria de almacenamiento de la cámara y tras finalizar el vuelo se realizará en gabinete la descarga de datos de telemetría de vuelo e imágenes para el posterior procesamiento de dicha información asociando los datos de vuelo al momento de toma de cada imagen.

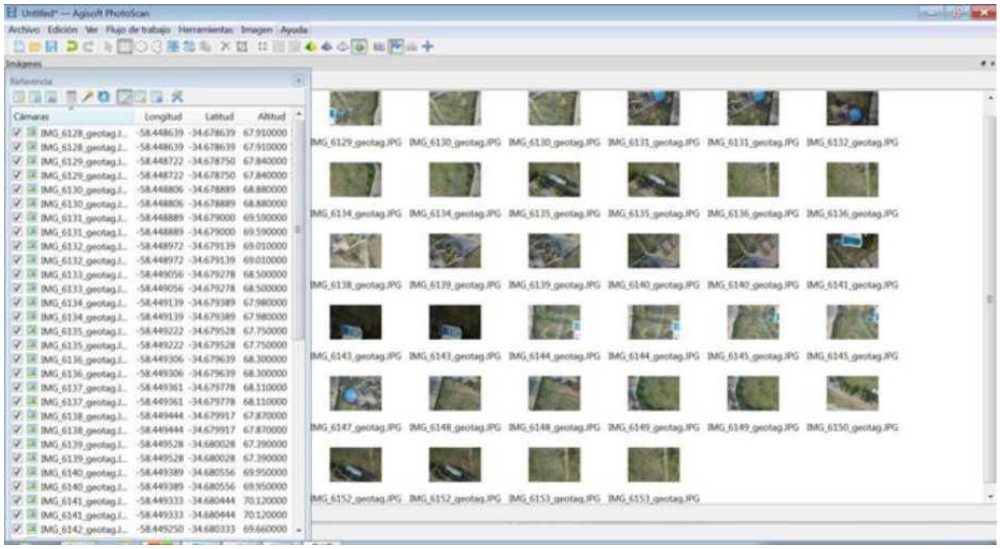


Figura 12.3. Lista de fotografías

7. PROCESADO DE LAS IMÁGENES Y CÁLCULOS

Se realizará un ejemplo del procesamiento de fotografías en el software Agisoft Photoscan. El vuelo será realizado con un Dron PHANTOM 4

El primer paso a seguir es importar nuestras imágenes, para esto vamos al “workspace” o espacio de trabajo, procedemos a seleccionar la carpeta de las imágenes y posteriormente procedemos a cargarlas.

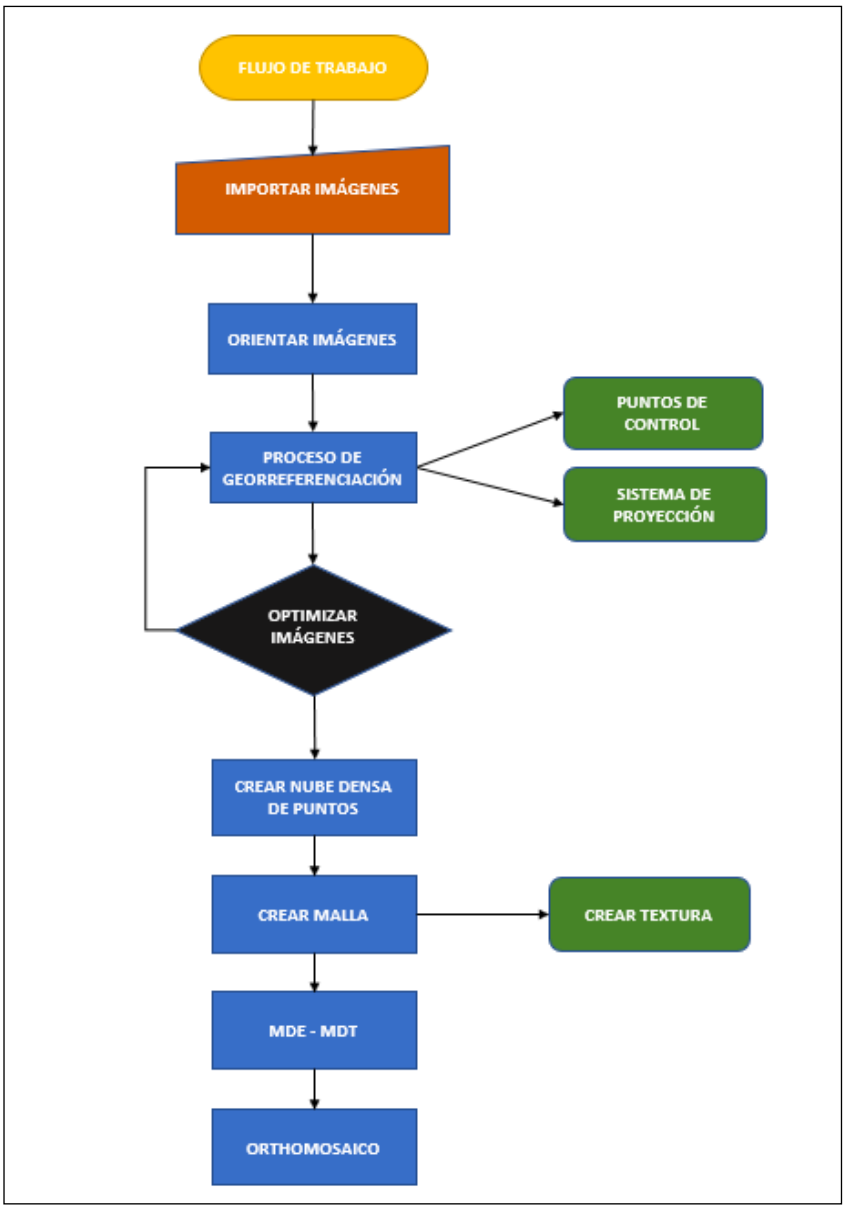


Figura 12.3. Flujo de trabajo

7.1. Importar Imágenes

Los datos asociados a cada imagen son:

- Coordenadas GPS según el sistema configurado.
- Actitud del dron (yaw, pitch y roll, la rotación del avión en los tres ejes de navegación).
- Altura de vuelo
- Distancia Focal de la cámara.

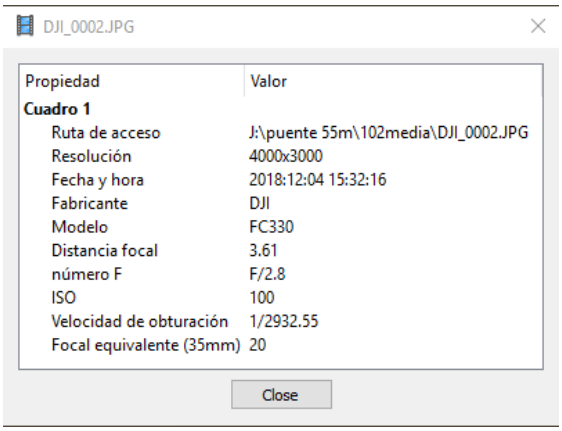


Figura 12.3. Datos de Encabezado de una foto.

Cámaras	Este est (m)	Norte est (m)	Alt. est (m)	Precisión (m)	Error (m)	Yaw est (deg)	Pitch est (deg)	Roll est (deg)
DJI_099...	4401103.678755	6866683.155523	184.457275	10.000000	72.013314	46.049	-2.416	4.555
DJI_073...	4401193.633542	6866460.442050	187.777377	10.000000	68.312296	46.052	-1.332	-2.139
DJI_066...	4401208.403606	6866393.016843	188.999959	10.000000	67.802826	46.064	0.161	0.706
DJI_061...	4401022.200040	6866529.225257	186.178336	10.000000	75.823366	46.089	22.646	3.383
DJI_074...	4401285.563250	6866593.929495	187.921796	10.000000	68.123767	46.119	-1.238	3.551
DJI_099...	4401110.442918	6866693.228651	184.586940	10.000000	71.797397	46.120	-0.576	4.165
DJI_099...	4401083.360633	6866652.723476	184.814047	10.000000	71.627503	46.149	-1.428	5.088
DJI_081...	4401297.931009	6866701.497655	185.286061	10.000000	70.603248	46.160	0.934	1.748
DJI_066...	4401221.144458	6866411.924645	188.403042	10.000000	68.634490	46.161	1.586	0.256
DJI_074...	4401278.315145	6866583.458993	187.705482	10.000000	68.361938	46.180	-2.033	3.670
DJI_087...	4401221.157578	6866679.662272	187.818805	10.000000	68.226494	46.248	-0.394	0.745
DJI_087...	4401200.715449	6866648.367748	187.273926	10.000000	68.716641	46.297	1.461	0.289
DJI_006...	4401116.514840	6866797.846251	184.823730	10.000000	71.101937	46.383	-1.799	2.328
DJI_093...	4401161.550847	6866680.637206	185.991723	10.000000	70.061171	46.419	-2.580	0.814

Figura 12.3. Datos generales de las fotografías.

7.2. Orientación de imágenes

El primer procedimiento para orientar las imágenes consiste en realizar una geolocalización o geo-etiquetado de las imágenes.

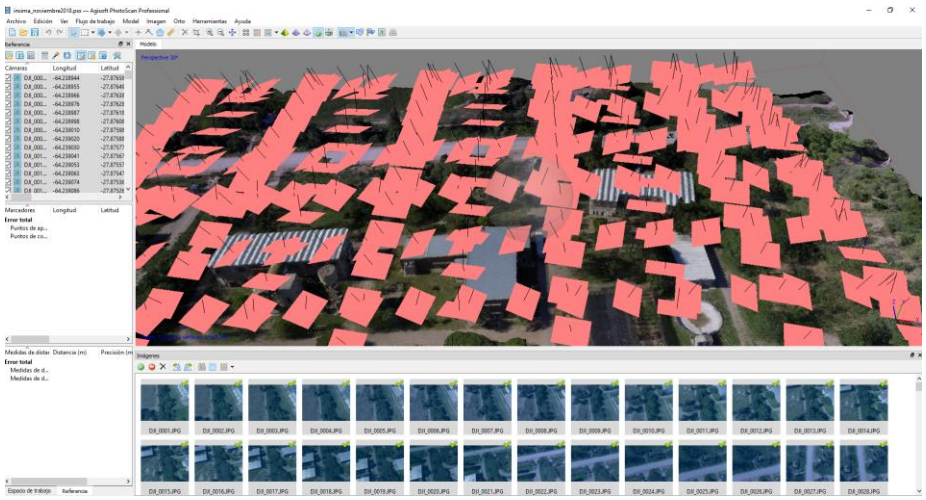


Figura 12.3. Reconstrucción de la posición de las cámaras, INSIMA, El Zanjón

El programa en el que se realizó la planeación del vuelo nos permite descargar un archivo de coordenadas geográficas que fueron asignadas a cada punto en donde el dron tomó una fotografía.

Una vez el programa termina el proceso de alineación obtenemos como resultado una nube de puntos con las fotografías alineadas.

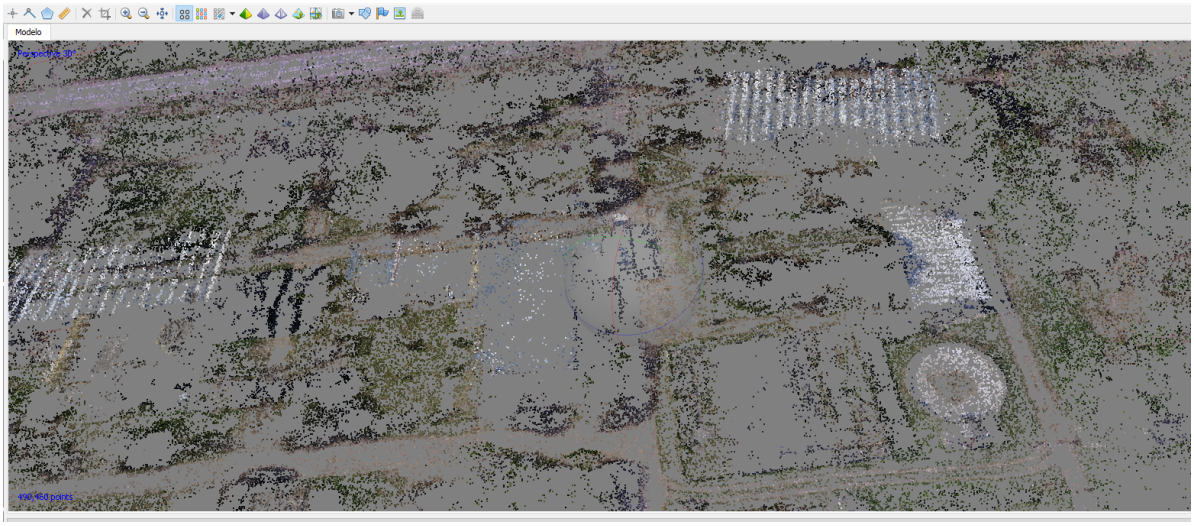


Figura 12.3. *Nube de punto inicial.*

7.3. Puntos de control.

La georreferenciación de las imágenes en el software consiste en cargar las coordenadas conocidas de los puntos de control (materializados) que obtuvimos en campo con nuestro GPS diferencial o con nuestra estación total, y posteriormente ubicarlos en las fotografías (por esta razón es de gran importancia materializar o marcar bien los puntos en el terreno para que se visualicen con facilidad en las fotografías). Como lo decíamos anteriormente la georreferenciación se realiza con el fin de que las fotografías no queden desconfiguradas ni en posición (X, Y), ni en altura (z). Además de que los productos tengan una localización geográfica correcta para poder empalmar con cualquier otro proyecto o realizar un análisis espacial apropiado.

7.4. Nube densa de puntos.

georreferenciado y optimizado nuestro proyecto procedemos a continuar con nuestro flujo de trabajo, el siguiente paso a realizar es la nube densa de puntos para este proceso nos vamos a “workflow” o flujo de trabajo y picamos en “build dense cloud” o construir

nube densa de puntos. Igualmente, que en el proceso de alineación de las fotos, el software nos pide la calidad con la que deseamos nuestros productos. Es importante tener en cuenta que los procesos se realizan internamente en el computador y no en el software.

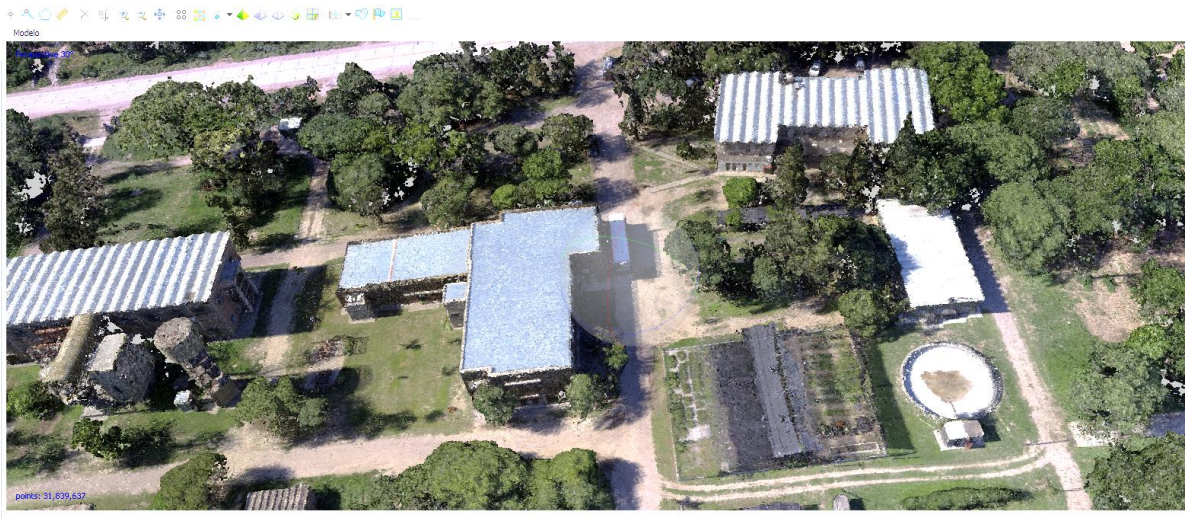


Figura 12.3. Nube densa de puntos. INSIMA, SOOM e IITM

La calidad del producto también depende del filtrado de profundidad que realice el software, para esto se puede desplegar un campo en e cual podemos escoger si queremos que este desactivado, sea un filtrado leve, moderado o agresivo.

Teniendo una nube densa de puntos georreferenciada podemos generar diferentes productos como: superficies (curvas de nivel), MDE, MDT entre otros. Estos productos pueden ser generados en diferentes tipos de software como ArcGIS, Autocad civil 3D, global mapper, etc. Para guardar la información de la nube de puntos en un archivo compatible con dichos programas procedemos a exportar la nube de puntos.

7.5. Malla

Seguidamente de generar la nube densa de puntos podríamos, crear la malla que nos servirá de base para generarle una textura al modelo. Para generar la malla vamos al botón "workflow" o flujo de trabajo, y seleccionamos la opción "build mesh" o construir malla. De igual forma que en los procesos anteriores seleccionamos la calidad con la que deseamos construir la malla, seleccionado el número de caras que se desean, el tipo de superficie, eligiendo la fuente de los datos que en este caso serán de la nube densa de puntos y seleccionando el tipo de interpolación.

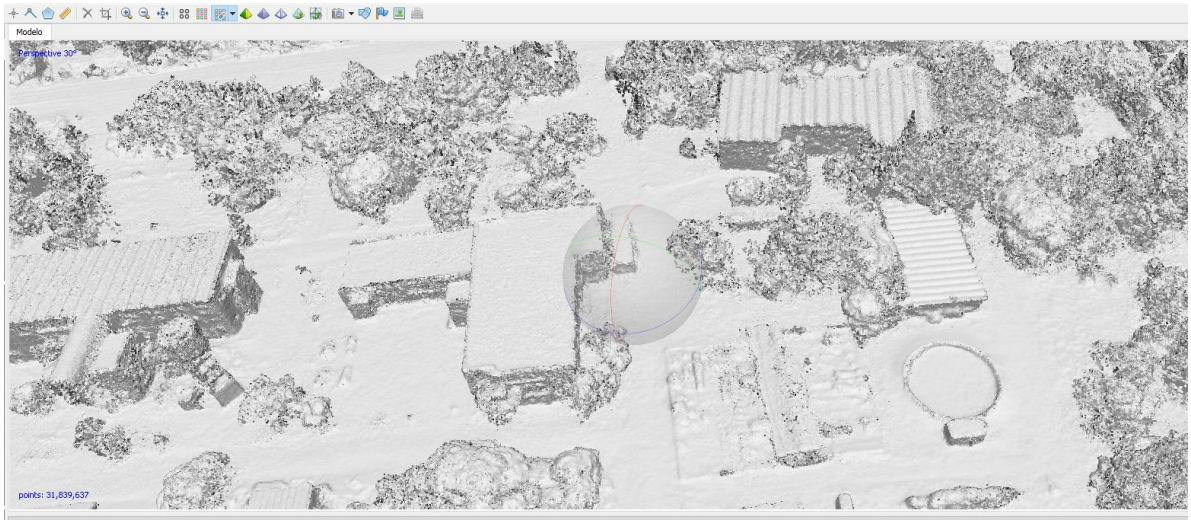


Figura 12.3. Malla de triángulos irregulares (TIN).

7.6. Textura

La textura del proyecto se genera a partir de la malla calculada, continuando con el proceso, nos vamos a "workflow" o flujo de trabajo desplegamos las opciones y seleccionamos "build texture" o crear textura, de igual forma podemos cambiar los parámetros como intensidad o corrección de la textura por color o rellenos de agujeros del modelo.

7.7. MDE - MDT

El modelo digital de elevación es uno de los productos con mayor interés en el procesamiento de imágenes, ya que a partir de esta imagen ráster es posible generar modelos digitales de terreno, curvas de nivel, entre otros. Para la creación del MDE es necesario continuar con el "workflow" o trabajo de flujo, picamos en Workflow y nos vamos a "Build DEM" o crear modelo digital de elevación, y procedemos a cambiar los parámetros.

En esta parte nuestro proyecto ya tiene un tamaño de GSD o píxel con relación al terreno, en este caso cada píxel mide 0.197 m en el terreno.

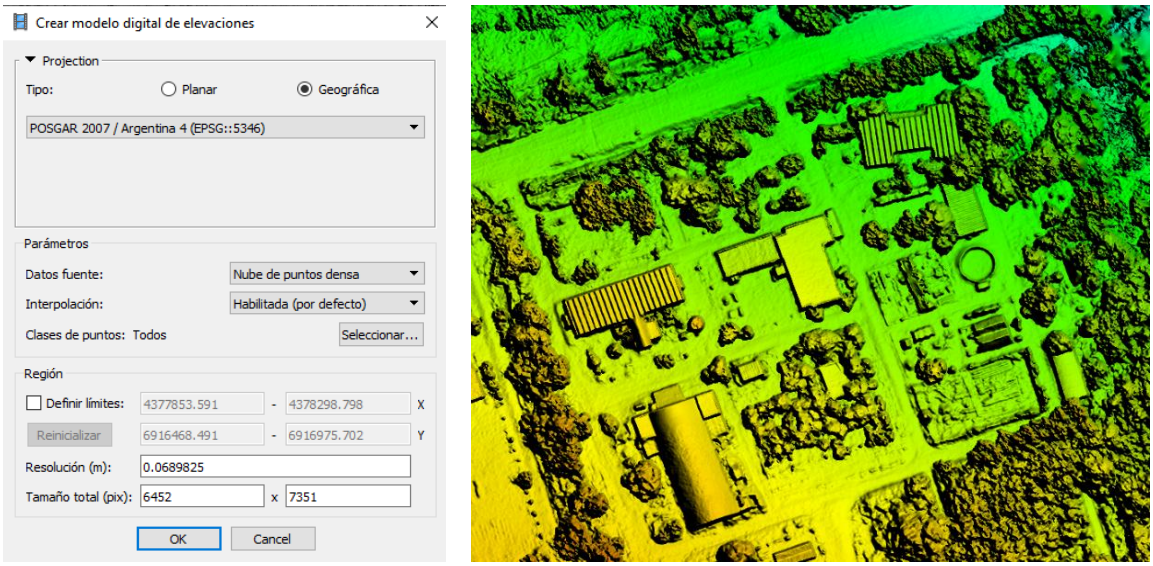


Figura 12.3. Modelo de Elevación Digital, INSIMA,

7.8. Ortomosaico.

Un Ortomosaico es un producto de imagen georreferenciado organizado como mosaico a partir de una colección de imágenes en el que la distorsión geométrica se ha corregido y orto-rectificado. (ESRI, 2017).

Este es el último proceso de imágenes y como producto final en él se puede realizar medidas lineales de gran precisión y sirve como base para cualquier tipo de sistema de información geográfica.

Para realizar el Ortomosaico nos dirigimos a “workflow” o trabajo de flujo y damos clic en “build Ortomosaic” o crear Ortomosaico y procedemos a cambiar los parámetros según necesitemos el resultado.

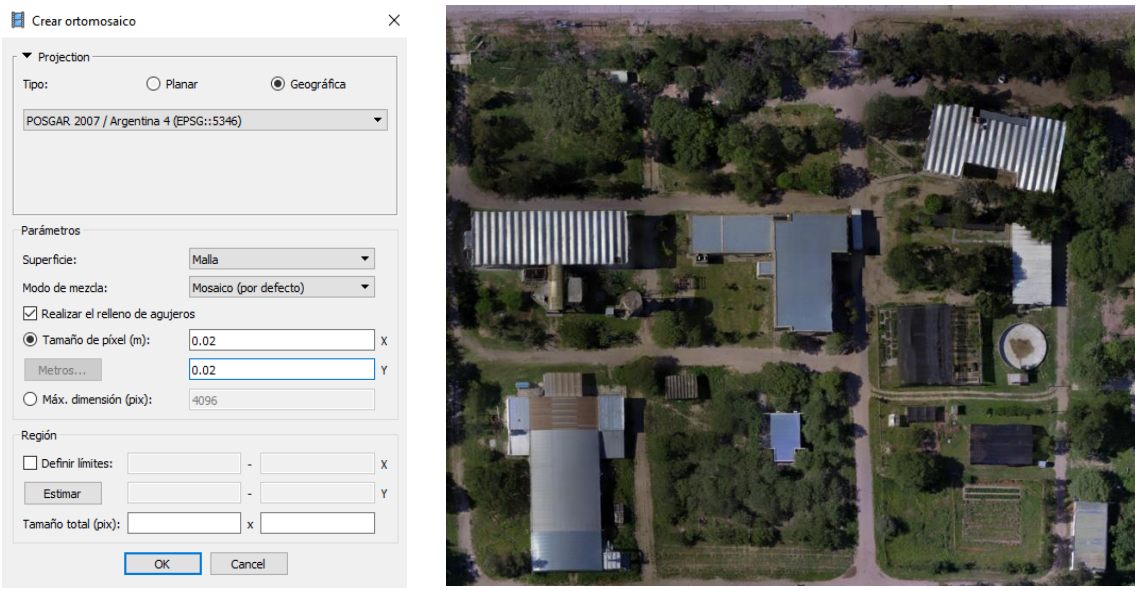


Figura 12.3. *Resultado Final Ortomosaico con un tamaño de píxel de 2 cm.*

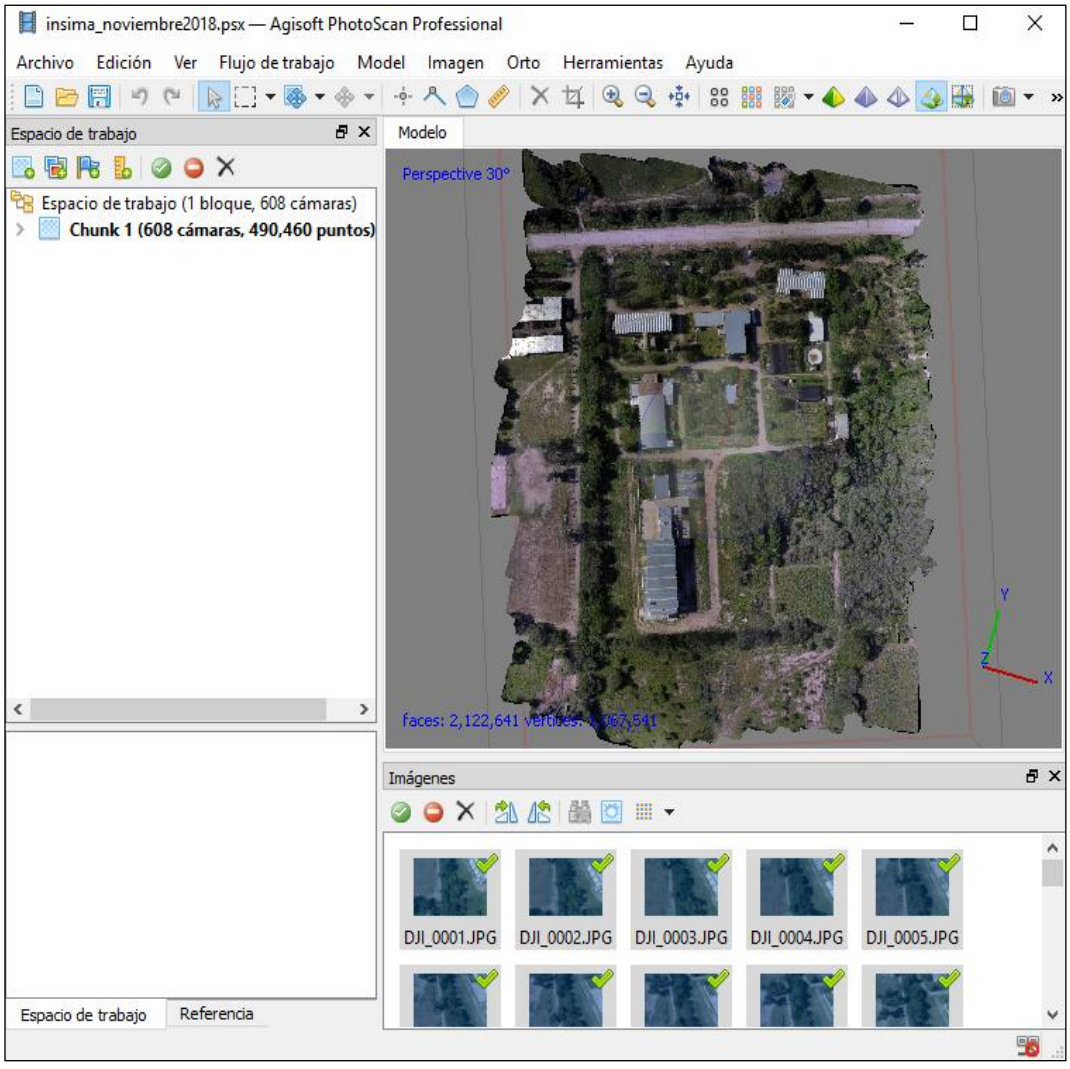


Figura 12.3. *13: Ortomosaico compuesto por las 608 imágenes registradas*

7.9. Reporte Final

El último paso a realizar es generar el reporte final de los procesos, para eso damos clic derecho en el espacio de trabajo, luego desplegamos "export" o exportar y luego "generate report" o generar reporte.

Acá tenés una lista de actividades organizadas por fases, pensada para que los alumnos las ejecuten de forma práctica durante la salida de campo y el trabajo de gabinete posterior:

8. ACTIVIDADES

- Revisar la normativa vigente de UAV aplicable a la zona (restricciones de altura, zonas de exclusión, permisos).
- Consultar el pronóstico meteorológico (viento, nubosidad, probabilidad de lluvia) y evaluar si las condiciones son aptas para volar.
- Delimitar el área de estudio sobre una imagen satelital o mapa base (en ArcGIS o similar).
- Diseñar el plan de vuelo: altura, solape frontal/lateral, objetivo, patrón (grilla, doble grilla, circular).
- Cargar el plan de vuelo en el software de la estación de control (ej. Pix4Dcapture, DJI Pilot,).
- Preparar y distribuir los puntos de control terrestre (GCP) en campo,.
- Armar el checklist pre-vuelo (batería, hélices, calibración de brújula/IMU, tarjeta de memoria, condiciones del terreno de despegue).
- Realizar el despegue y ejecutar la misión programada.
- Monitorear el vuelo en tiempo real (altura, batería, señal, cobertura de la misión).
- Registrar incidencias durante el vuelo (correcciones manuales, interrupciones, reintentos).
- Aterrizar el UAV y verificar la descarga completa de imágenes.
- Procesar el vuelo, obtener Ortomosaico y DEM.

BIBLIOGRAFIA

1. **Aldalur, B. y M. Santamaría.** s.f. *Realce de imágenes: Filtrado espacial*. Departamento de Ingeniería y Departamento de Matemática, Universidad Nacional del Sur. Disponible en: http://www.bibliotecacpa.org.ar/
2. **Álvarez, D. A.** 2008. *Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System)*. Universidad Autónoma de Madrid. Disponible en: http://arantxa.ii.uam.es/
3. **Chuvieco, E.** 1995. *Fundamentos de la teledetección espacial*. 2.ª ed. Ediciones Rialp, Madrid.
4. **Chuvieco, E.** 2010. *Teledetección ambiental*. 3.ª ed. Ariel, Barcelona.
5. **Comité de Geodesia.** 1999. *Sistemas geodésicos*. Instituto Geográfico Nacional. Disponible en: https://www.ign.gob.ar/
6. **De la Fuente Fernández, S.** 2015. *Componentes principales*. Universidad Autónoma de Madrid. Disponible en: https://www.fuenterrebollo.com/
7. **García Bleda, J.** 1997. Problemática en la clasificación de imágenes de satélite Landsat. *Dialnet*. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2291888
8. **Giacometti, A. G.** 2010. *Manual básico sobre la estereoscopía* [Trabajo de grado, Universidad de las Américas].
9. **Huerta, E.; A. Mangiaterra y G. Noguera.** 2005. *Posicionamiento satelital GPS*. Universidad Nacional de Rosario. Disponible en: https://www.fceia.unr.edu.ar/
10. **Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).** 2021. *Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) Landsat, 1984–2021*. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/
11. **López-Cuervo y Estévez, S.** 1996. *Topografía*. 2.ª ed. Ediciones Mundi-Prensa.
12. **Martínez Cañada, Á.; J. A. Gallud Lázaro y F. J. Abad Cerda.** 1998. *Distorsión en la adquisición de imágenes de teledetección y su corrección*.
13. **Menéndez, M.; M. S. V. P. Z. G. R. E. G. y E. G.** 2009. *Uso de los sensores remotos en los recursos naturales: La fotografía aérea y la fotointerpretación*. INRED, Universidad Nacional de Salta.
14. **Pedenovi, A. B.** 2024. *Transformación de imágenes satelitales* (Serie Didáctica N.º 52). Cátedra de Teledetección, Universidad Nacional de Santiago del Estero.
15. **Proyecto de Bosques Nativos y Áreas Protegidas (BIRF 4085-AR).** 2004. *Manual de teledetección*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/

16. Quiroga, E.; A. M. E. R. y J. R. P. 2015. La estereoscopia, métodos y aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento. *Revista de Cartografía e Ingeniería Geográfica* 13(16):109-122.

17. Reuter, F. 2009. *Principios de teledetección* (Serie Didáctica N.º 33). Universidad Nacional de Santiago del Estero.

18. Reuter, F. s.f. *Sistema de posicionamiento global* (Serie Didáctica N.º 3). Universidad Nacional de Santiago del Estero.

19. Santamaría Peña, J. y T. Sanz Méndez. 2011. *Fundamento de la fotogrametría*. Universidad de La Rioja.