

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**Formación de mosaicos ortorectificados a partir de
imágenes aéreas digitales de formato pequeño**

Tesis que para obtener el grado de:

LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A:

Francisco López Martínez

Director de tesis: M en I. Jorge Prado Molina

Ciudad Universitaria, México, D. F., noviembre del 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA:

A mi Madre Rosa López, por su apoyo y su gran cariño que siempre lo tendré.

Y a todos mis amigos que, de una u otra forma, también me han apoyado y me han aconsejado en todo momento.

RECONOCIMIENTOS:

A la Universidad Nacional Autónoma de México por su gran apoyo en mi educación, gracias a los maestros que participaron ampliamente en la educación de cada uno de nosotros como futuros profesionistas.

A mi facultad de Filosofía y Letras, la cual me brindó un lugar privilegiado para mis estudios y mi preparación como un buen Licenciado en Geografía.

A todos mis profesores geógrafos que me ayudaron a mi preparación como profesionista.

Al Instituto de Geografía por haberme brindado su apoyo en todo momento que requería, junto con todos sus colaboradores que fueron, son y serán excelentes amigos.

A mi Director de tesis Jorge Prado, por su infinita paciencia y apoyo en todo momento.

A Armando Peralta, por su buena vibra y su apoyo, junto con los consejos que me daba en todo momento.

ÍNDICE

RESUMEN

Página

1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 PERCEPCIÓN REMOTA	2
1.1.1 Imágenes multiespectrales	3
1.1.2 Imágenes de satélite	4
1.1.2.1 Órbitas Satelitales	7
1.1.3 Aerofotografía	8
1.1.4 Imágenes aéreas digitales	9
1.1.5 Imágenes aéreas digitales de pequeño formato y video	10
1.1.5.1 Características de las imágenes aéreas digitales de pequeño formato	11
1.1.5.2 Sistema de adquisición de imágenes aéreas digitales de pequeño Formato	12
1.2 NECESIDAD DE CORREGIR GEOMÉTRICAMENTE UNA IMAGEN	14
1.3 FOTOGRAMETRÍA	15
1.3.1. Objetivo de fotogrametría	15
1.4 FORMACIÓN DE MOSAICOS DE IMÁGENES PARA DIVERSOS ESTUDIOS	16
1.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	17
1.5.1 Reseña histórica	18
1.5.2 Definición de los Sistemas de Información Geográfica, SIG	19
2. <u>CALIBRACIÓN DE CÁMARAS DIGITALES DE FORMATO PEQUEÑO</u>	21
2.1 Tipos de cámaras y sus aplicaciones	21
2.1.1 Tipos de imágenes aéreas	21
2.1.2 Tipos de cámaras	23
2.1.3 Tamaño del negativo	23
2.1.4 Cámaras aerofotográficas	24
2.2 CÁMARAS DIGITALES DE FORMATO PEQUEÑO	26
2.2.1 Características de los sensores de imagen digital	26
2.2.2 Dispositivos de carga acoplada (CCD)	28
2.2.3 Sensor Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)	29
2.3 LENTES FOTOGRÁFICOS	30
2.3.1 La geometría del lente	31
2.3.2 La distorsión en la imagen producida por el lente y su evaluación	32
2.4 CALIBRACIÓN DE CÁMARAS FOTOGRÁFICAS DE PEQUEÑO FORMATO	34
2.4.1 Método de laboratorio para la calibración de cámaras aerofotográficas	34
2.4.2 Calibración de las cámaras no métricas	36
2.4.3 Reducción de coordenadas cuyo origen es el punto principal	37
2.4.4 Corrección de las distorsiones del lente	38

3. <u>CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE IMÁGENES AÉREAS DIGITALES</u>	39
3.1 El proceso de corrección de imágenes aéreas digitales	39
3.2 Corrección de la deformación debida al lente	40
3.3 Programa para corregir las distorsiones en imágenes obtenidas con cámaras de formato pequeño	43
3.4 La curvatura de la Tierra	50
3.5 Corrección por refracción atmosférica	51
4. <u>ORTORRECTIFICACIÓN DE IMÁGENES Y FORMACIÓN DE MOSAICOS</u>	53
4.1. LOS MAPAS Y LAS ORTOFOTOS	54
4.1.1 Georeferencia	55
4.1.2 Rectificación	55
4.2. ORTORRECTIFICACIÓN	55
4.2.1 Aerotriangulación	57
4.2.2 Generación de modelos digitales de elevación	58
4.2.3 Correlación estructural de imágenes para el reconocimiento automático de puntos de control	62
4.3 FORMACIÓN DE MOSAICOS	63
4.4 Transformación de imágenes digitales en ortofotos	66
4.4.1 Remuestreo de la imagen	66
4.4.2 Ortorrectificación polinomial	67
4.4.3 Transformación proyectiva	68
4.4.4 Rectificación diferencial	69
4.4.5 Ecuaciones de colinealidad	71
4.4.6 Modelo- extendido	72
5. <u>MÉTODOS PARA LA GENERACIÓN DE MOSAICOS Y ORTOMOSAICOS</u>	73
5.1 MOSAICOS CONTROLADOS Y ORTOMOSAICOS	73
5.1.1 Programa Adobe Photoshop® 7.0	73
5.1.2 Programa PCI Works® (OrthoEngine)	78
5.1.3 Programa ERDAS® IMAGINE 8.4	82
6. <u>RESULTADOS Y CONCLUSIONES</u>	91
6.1 ALGUNOS ASPECTOS IMPORTANTES SOBRE LA FORMACIÓN DE MOSAICOS CON IMÁGENES AÉREAS DIGITALES	92
6.2 CONSIDERACIONES FINALES	95
6.3 CONCLUSIONES	96
6.4 SUGERENCIAS	97
BIBLIOGRAFÍA	98
GLOSARIO	101

RESUMEN

El objetivo central de este trabajo fue desarrollar la programación necesaria para desplegar y almacenar en el disco duro de una PC, los datos de orientación y posición asociados a las imágenes digitales adquiridas durante diferentes campañas de percepción remota. También se desarrolló un sistema de planeación de las campañas aéreas y un sistema de monitoreo que a partir de los datos de posición grafica sobre un mapa digital del terreno la ubicación de la nave; esto ayuda a mantener el rumbo correcto durante el recorrido sobre las diferentes líneas de vuelo al momento de adquirir las imágenes. El programa de despliegue y almacenamiento está en comunicación continua con la plataforma donde van montadas las cámaras, para que se almacenen los datos de posición y orientación al momento de la toma. La plataforma tiene un sistema de control que compensa las perturbaciones y desviaciones que ocurren durante el vuelo. Estas desviaciones, son indeseables ya que obligan a realizar un cuantioso trabajo de corrección geométrica en las imágenes.

Los ángulos de orientación, junto con los datos provenientes de un sistema de posicionamiento global, son almacenados en disco duro, para su posterior utilización en la corrección geométrica y en el procesamiento de las imágenes.

Como vimos anteriormente, el procedimiento a seguirse para determinar los elementos de orientación interna de una cámara aerofotográfica convencional de formato 23 x 23 cm y la manera en que podría adaptarse esta metodología, para lograr corregir las distorsiones que la cámara y el lente que producen en la imagen digital de pequeño formato.

Se llevó a cabo una selección del lenguaje de programación más adecuado a esta aplicación, se efectuaron las rutinas de: despliegue y captura de valores iniciales en el menú principal, despliegue de los datos de vuelo, de graficación y actualización en tiempo real del mapa digital del terreno en estudio, y las rutinas de almacenamiento y recuperación de datos.

Se presentan los resultados de las pruebas realizadas en tierra con este sistema y aquellos obtenidos durante una campaña intensiva de adquisición de imágenes, a lo largo y ancho del país en una rejilla de 100 km por lado en el Norte y de 50 km en el Centro, Sur y Sureste; para la validación de la interpretación del Inventario Nacional Forestal 2000.

Definición del problema:

Durante la realización de las campañas de percepción remota es necesario contar con un apoyo visual de la ubicación de la aeronave, para mantener el rumbo correcto, sobre todo durante la realización del barrido secuencial sobre el terreno en estudio. También es necesario contar, entre otros datos, con la información del vector de apuntamiento, para determinar si las imágenes serán útiles o si tendrán tal distorsión que tengan que ser repetidas, con los consecuentes contratiempos y gastos.

Es necesario contar con la información de la ubicación X,Y,Z de la toma de las imágenes, así como la dirección del vector de apuntamiento de la plataforma, para llevar a cabo la corrección geométrica en tierra. Esta corrección es indispensable para la formación de mosaicos del terreno en estudio y poder llevar a cabo mediciones sobre el mismo.

Método.

Determinación de las variables que es necesario desplegar y/o almacenar.

Determinar el o los lenguajes de programación a utilizar.

Desarrollo de las rutinas de programación (Despliegue, almacenamiento, recuperación de datos).

Pruebas de funcionamiento con datos simulados y pruebas con los sensores de orientación.

Pruebas definitivas y validación de resultados.

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN

La percepción remota o teledetección, puede definirse como la ciencia y arte de obtener información de un objeto, mediante algún dispositivo que no está en contacto directo con dicho objeto.

La historia de la percepción remota comenzó hace unos 600 millones de años, cuando alguna forma inferior de vida animal modificó algunas de sus células, volviéndolas fotosensibles. Durante millones de años dicho rudimento fotosensible evolucionó convirtiéndose en un poderoso y sofisticado sensor: el ojo humano. Muchos años después, éste tuvo un imitador mecánico, la cámara fotográfica, que hizo su aparición hace algo más de un siglo y que fue notoriamente mejorada durante la década de 1930, para ser utilizada en la fotografía aérea. La Segunda Guerra Mundial dio un gran impulso a la aerofotografía, así como a otras formas de percepción remota. Sin embargo, el "*salto cuántico*" en esta disciplina se produjo en la década de 1960 cuando las plataformas satelitales reemplazaron a las aéreas y los sensores electrónicos multiespectrales, acoplados a computadoras, reemplazaron a las cámaras fotográficas convencionales.

Las imágenes de percepción remota sirven para extraer información útil de la zona de estudio que representan. Algunas técnicas de procesamiento son utilizadas para realzar rasgos en la imagen, para facilitar la interpretación visual y para corregirla o restaurarla si ésta ha sido sujeta a distorsiones geométricas, oscurecimiento en los bordes (viñeta), se ve borrosa o está degradada por cualquier otro factor. Existen muchas técnicas de análisis de imágenes disponibles y los métodos usados dependerán de los requisitos que el problema específico determine. En muchos casos, el procesamiento de imágenes es usado para delimitar diferentes clases temáticas en algunas partes de una imagen. El resultado produce un mapa temático de la zona bajo estudio, éste puede ser combinado con otras bases de datos de la misma área (como infraestructura hidráulica, carreteras, líneas eléctricas, construcciones, etc., etc.) para constituir

una poderosa herramienta de análisis: **Un sistema de información geográfica**, en donde es posible contar con toda la información de la zona, en capas sobrepuestas y realizar un análisis bajo diferentes contextos, tanto en espacio como en tiempo.

1.1 PERCEPCIÓN REMOTA

La aplicación de los métodos de percepción remota o teledetección busca optimizar la relación costo beneficio para la investigación y desarrollo, vinculado al manejo de los recursos naturales, la planeación y la toma de decisiones para su uso sobre la superficie terrestre.

La percepción remota utiliza sensores para la adquisición de información sobre objetos. Los sensores, son sistemas fotográficos u opto-electrónicos capaces de detectar y registrar, en forma de imágenes o no, el flujo de energía radiante reflejado o emitido por objetos distantes. La energía, por regla general, es alguna forma de radiación electromagnética. Dentro de las imágenes de percepción remota encontramos diferentes tipos como: satelitales, aéreas, radar, etc.



Figura 1.1 Percepción remota (Fuente: Teledet SRL)

Los elementos básicos que existen en cualquier sistema de teledetección son: a) sensor, b) objeto observado, y c) flujo energético. La detección se puede llevar a cabo por: reflexión, emisión o reflexión-emisión. Según la teoría ondulatoria la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, viajando a la velocidad de la luz.

Las ondas electromagnéticas, son energía transportada a través del espacio en forma de perturbaciones periódicas de campos eléctricos y magnéticos. Un flujo de radiación electromagnética al propagarse por el espacio puede interactuar con superficies u objetos, siendo reflejado o absorbido. Las variaciones que éstas interacciones producen, dependen fuertemente de las propiedades físico-químicas de los elementos en la superficie.

La luz visible representa sólo una pequeña porción del espectro. En un extremo están las ondas de radio con longitudes de onda millones de veces más largas que la luz visible, y en el otro están los rayos gamma, que tienen longitudes de onda millones de veces más pequeñas. Las ondas visibles tienen gran utilidad en la percepción remota para la identificación de diferentes objetos por sus colores, sin embargo, el infrarrojo proporciona la capacidad de discernir elementos u objetos sobre el terreno en ausencia de luz. Esta región del espectro se extiende desde 0.7 micras hasta cerca de un milímetro. Las ondas infrarrojas incluyen la radiación térmica que produce información importante sobre el bienestar de las cosechas o cultivos, y sobre todo, pueden ayudar a distinguir incendios forestales aún si éstos están envueltos en una cortina de humo.

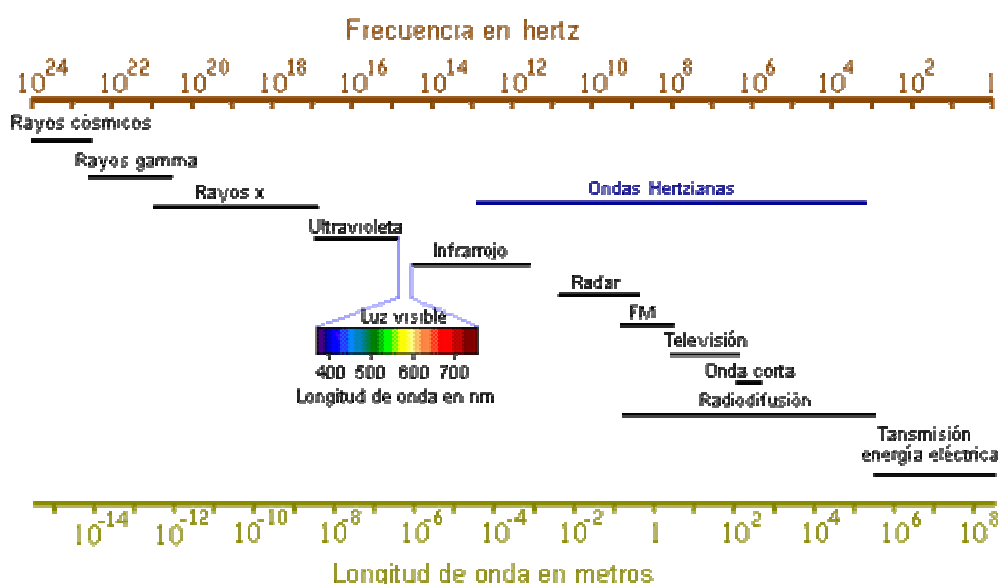
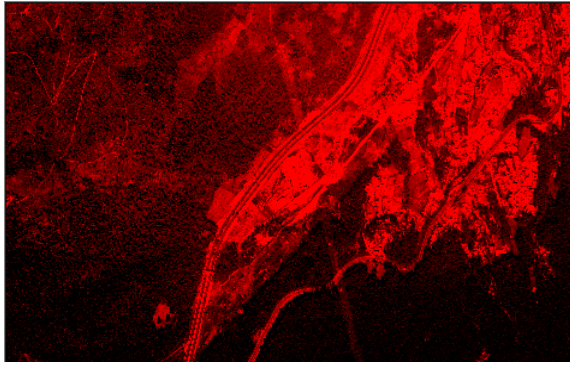


Figura 1.2 Espectro electromagnético (Física y sociedad, 2005)

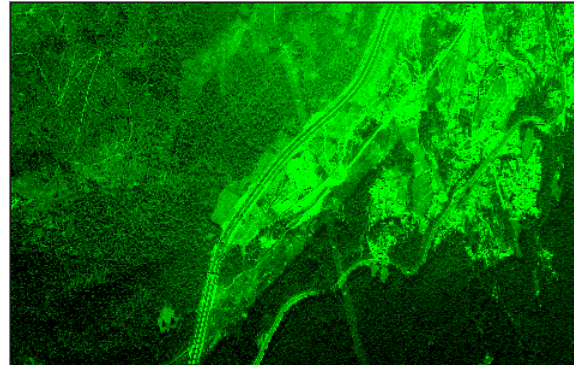
1.1.1 Imágenes Multiespectrales

Cuando la radiación solar choca con un objeto, el material puede ser identificado a partir de su señal espectral reflejada. Esta premisa provee la base para la percepción remota multiespectral.

Una imagen multiespectral esta formada por varias bandas de datos. La imagen resultante es una imagen multicapas que contiene la información espectral de los objetos observados. Para su despliegue visual, las bandas pueden ser combinadas de diferente manera para observar diferentes cosas, facilitando así la interpretación.



Banda roja



Banda verde



Banda IR(Infrarrojo)

Figura 1.3 Ejemplo de imágenes multiespectrales RGB(Bandas: Red, Green and Blue) e IR (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM).

Todos los materiales reflejan, transmiten y absorben la luz incidente a diversas longitudes de onda de manera selectiva y por lo tanto exhiben un color característico al ojo humano. El color de las plantas dice mucho sobre ellas, incluyendo su clase taxonómica y su estado fisiológico. Por ésta razón, las imágenes multiespectrales obtenidas por satélites han sido utilizadas con gran éxito durante muchos años para elaborar mapas de vegetación.

1.1.2 Imágenes de satélite

Una imagen de satélite es un recurso tecnológico usado ampliamente hoy en día por los especialistas dedicados a estudiar las distintas áreas de las Ciencias de la Tierra (como un método de reconocimiento). Los satélites ven sólo la superficie, la radiación electromagnética no se propaga dentro del medio acuoso, la penetración de la luz es limitada. Pero lo que más interesa a los investigadores usualmente, se refleja principalmente en la superficie: mareas, tormentas, hielo flotante, polución y patrones climáticos. En formato digital, una imagen de satélite puede concebirse como un conjunto de números que refieren un valor de reflectancia; una vez

transformados, estos valores permiten generar una imagen. Cada número es adjudicado a una *celda* o elemento de imagen (*píxel*), cuyas dimensiones en el terreno definen la resolución espacial de la imagen. Así, el valor de cada celda en una imagen de satélite representa la cantidad de radiación que llega al sensor. En forma simplificada, se puede suponer que ésta se encuentra cubierta por los siguientes elementos fundamentales: vegetación, suelo, agua, y sus combinaciones.

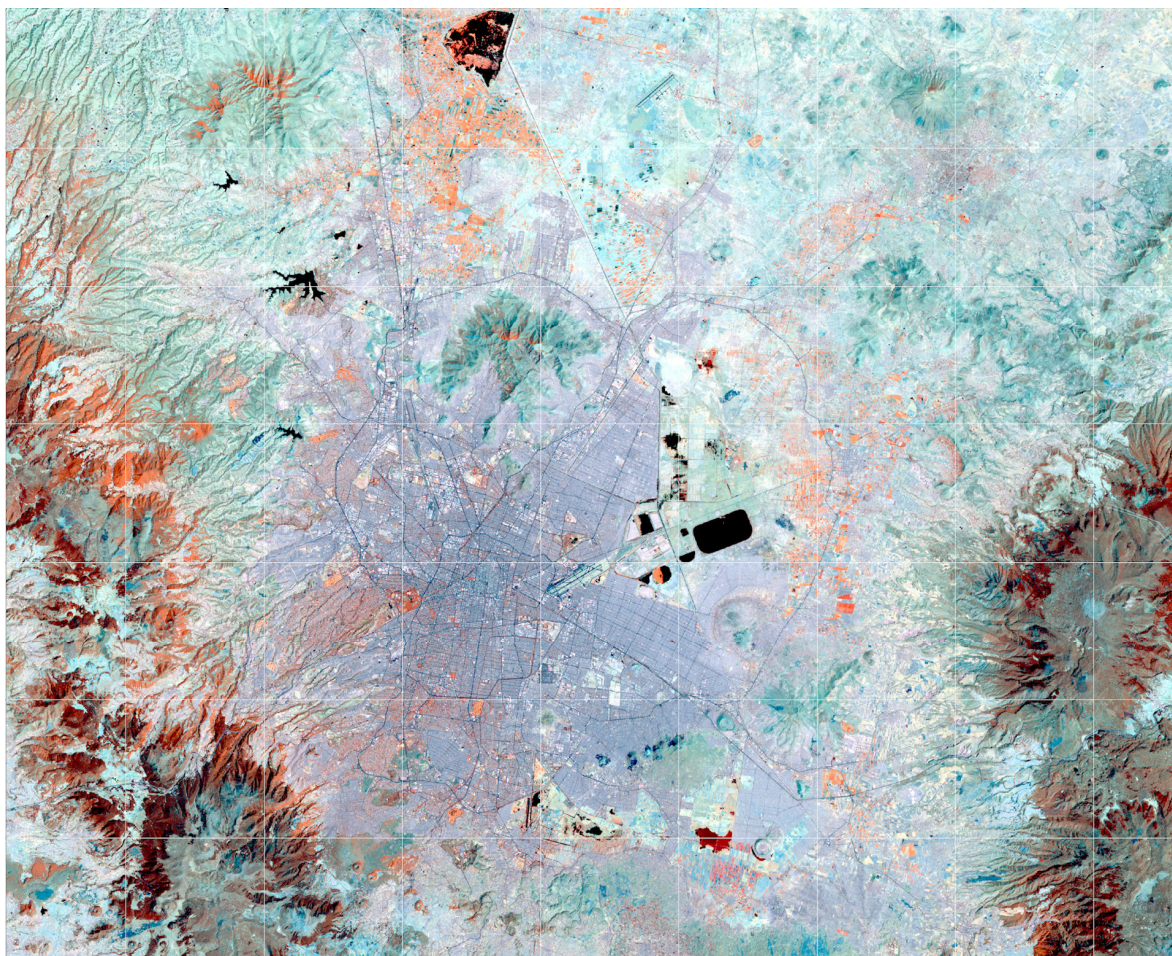


Figura 1.4 Imagen de satélite ETM+ compuesta en falso color (bandas 1, 2, 3) de la cuenca de México. (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Las imágenes de satélite complementan y enriquecen las tareas de gabinete y campo, encaminadas a conocer las características y rasgos de las formas y dimensiones de los elementos naturales y artificiales de la superficie terrestre; así como su interrelación con otros objetos. Es decir, ayuda a obtener con mayor celeridad un conocimiento acerca del entorno o medio físico-geográfico mediante la imagen, logrando con ello obtener una síntesis más adecuada de un territorio dado, mediante un simple análisis visual (*Fig. 1.4*). También, dan cuenta de los

cambios cuantitativos y cualitativos provocados por fenómenos o desastres naturales o aquellos inducidos por la actividad humana a través del análisis del entorno, captado por la imagen, antes y después del fenómeno ó desastre.

El procesamiento de imágenes, consiste en manejar los valores de reflectancia en dos etapas relacionadas entre sí: pre-procesamiento y clasificación multispectral; la primera implica las correcciones radiométricas y geométricas de la imagen. La segunda la segmentación del paisaje con base en la respuesta espectral de su cobertura. Esta extracción de información temática es comúnmente el objetivo central cuando se analizan imágenes de satélite para estudios del ambiente. Los criterios para el análisis visual de una imagen son: tono, color, textura (gruesa, mediana y fina) sombras, patrón espacial, contorno, formas de la imagen. Como ejemplo, las características espectrales de las imágenes de satélite Landsat 7, se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Bandas espectrales del Sensor Remoto Lansat 7 ETM+

BANDA	LONGITUD DE ONDA, en μ	RESOLUCIÓN (m)
1	0.450-0.515 (azul)	30
2	0.525-0.690 (verde)	30
3	0.630-0.690 (rojo)	30
4	0.760-0.900 (infrarrojo cercano)	30
5	1.550-1.750 (infrarrojo medio)	30
6	10.40-12.50 (infrarrojo térmico)	120
7	2.080-2.35 (infrarrojo medio)	30
8	0.52-0.92 Pancromática	15

(Fuente: NASA, National Aeronautics and Space Administration, Landsat Mapeador Temático Mejorado ETM+, <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

Tabla 1.2 Características del sensor AVHRR.

Canal	Región del espectro	Longitud de onda (mm)	Resolución espacial (metros)
1	Visible	0.58 - 0.68	1100
2	Infrarrojo cercano	0.725 - 1.10	1100
3	Infrarrojo mediano	3.55 – 3.93	1100
4	Infrarrojo térmico	10.3 – 11.3	1100
5	Infrarrojo térmico	11.5 – 12.5	1100

Las bandas localizadas en el infrarrojo cercano, tienen particular interés desde el punto de vista de la evaluación de los cultivos verdes y su biomasa. De hecho existen algunos satélites especializados en estas bandas como los NOAA que registran las imágenes por medio del sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)* que provee 4 bandas en el IR. Actualmente se encuentran activos los satélites NOAA12, NOAA15, NOAA16, NOAA17. Sus características se presentan en la tabla 1.2 (NASA, 2006. <http://gsfc.nasa.gov/>).

El sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) registra imágenes a bordo de los satélites Terra-1 y Aqua-1, provee de una alta sensibilidad radiométrica (12 bits) con 36 rangos de bandas espectrales en longitudes de onda de 0.4 μm (micrones) a 14.4 μm . Las imágenes tienen 3 resoluciones: dos canales de 250 metros, cinco canales de 500 metros y el resto de 1000 metros.

Las imágenes de satélite tienen generalmente una resolución más baja comparada con la fotografía aérea, no obstante, la resolución en las imágenes de un metro o menos, es ya una realidad, con el lanzamiento de satélites comerciales de percepción remota de muy alta resolución como el *IKONOS*, por ejemplo.

1.1.2.1 Órbitas Satelitales

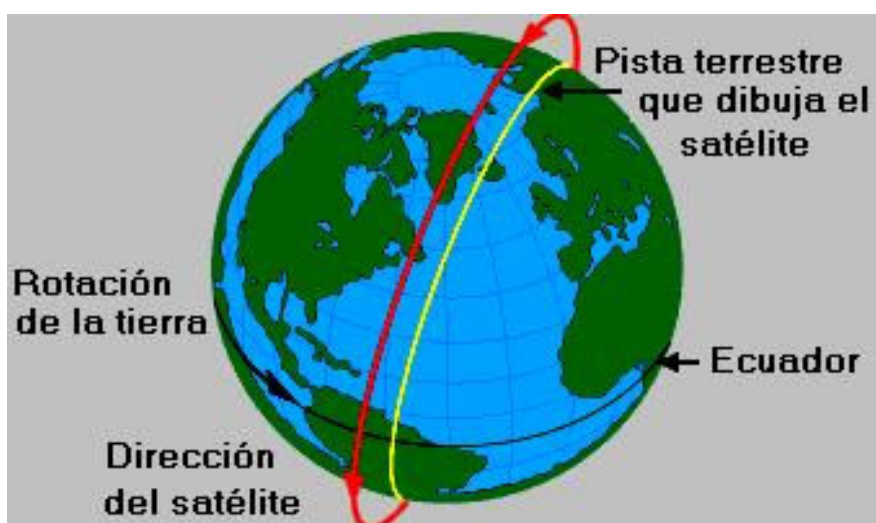


Figura 1.5 Órbita polar heliosíncrona (Wolf, 2000)

Un satélite de percepción remota generalmente sigue una órbita circular alrededor de la Tierra, a una altura entre 900 y 1300 km, con un periodo orbital entre 90 y 110 minutos, aproximadamente. Los satélites de percepción remota, a menudo son ubicados dentro de órbitas polares, heliosincronas, tales que el satélite pasará siempre por el mismo lugar, en una latitud dada, a la misma hora solar local. Bajo este concepto, la misma condición de iluminación solar (excepto por la variación

estacionaria) encontrará el satélite al adquirir las imágenes. El tiempo que tarda el satélite en pasar exactamente por el mismo lugar, se llama ciclo de repetición y varía de dieciséis a veinticuatro días. Recientemente algunos satélites han implementado la función de adquirir imágenes oblicuas del terreno, por lo que este periodo se ha reducido a dos o tres días.

1.1.3 Aerofotografía

La fotografía ha llegado a ser un documento objetivo, gráfico, fiel y de amplia cobertura sobre el terreno en el momento de la exposición, permitiendo ampliar los horizontes de observación del medio físico y satisfacer la curiosidad humana por comprender mejor el mundo que lo rodea y responder a las preguntas formuladas en torno al ambiente. Al igual que las imágenes de satélite, la fotografía aérea constituye un insumo fundamental para la elaboración de cartografía básica y temática.

Las cámaras son montadas en una plataforma que las mantiene apuntando hacia el nadir. Una ventaja de la percepción remota aérea, comparada con la espacial, es la capacidad de ofrecer imágenes de muy alta resolución (20 cm o menos); y una desventaja es la mínima cobertura y un elevado costo por unidad aérea fotografiada. No es muy rentable cubrir grandes zonas con un sistema de percepción remota aérea, sin embargo, cuando se necesita mayor resolución, no queda otra alternativa.

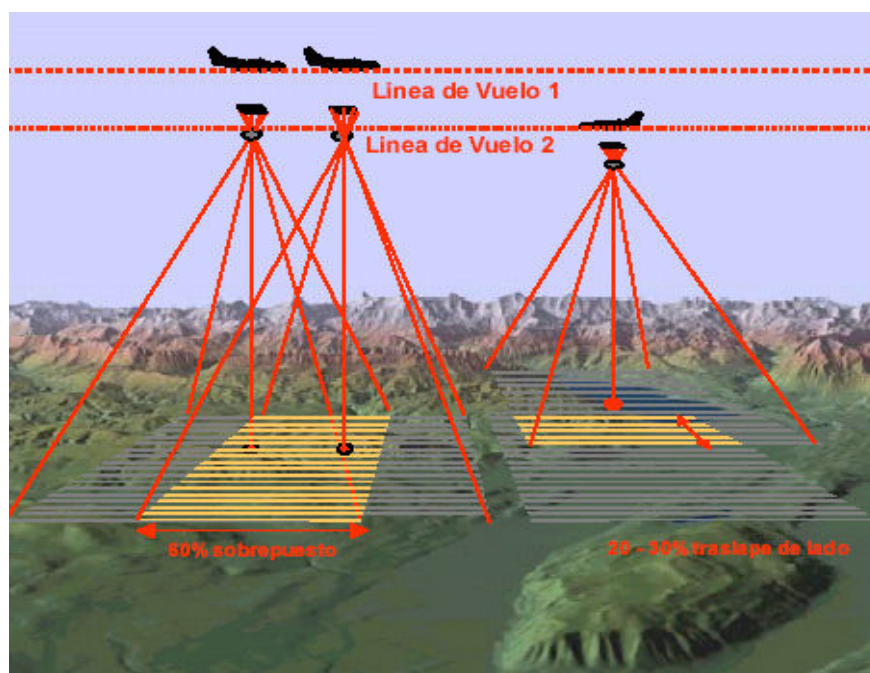


Figura 1.6 Toma de la fotografía aérea (Wolf, 2000)

En los últimos años, la integración de los datos del receptor de posicionamiento global GPS (*Global Positioning System*) en vuelo, junto con los de la Unidad de Medición Inercial, proporcionan una localización geográfica exacta y los parámetros de orientación a todos los sensores y cámaras de la aeronave, independientemente unos de otros. Esto elimina la necesidad de puntos de apoyo en el terreno y posterior proceso de aerotriangulación, georeferenciando a todos los sensores con el mismo grado de precisión, aumentando la productividad y reduciendo tiempos y costos. Este proceso de aerofotografía, al utilizar toda esta tecnología avanzada, permite brindar un servicio de la más alta calidad posible en un lapso de tiempo mínimo.

1.1.4 Imágenes aéreas digitales.

Las herramientas informáticas y la tecnología han impactado significativamente en la generación de la fotografía aérea y los derivados fotogramétricos. En la actualidad, las tendencias tecnológicas en este sentido son cuatro:

- 1) La asociación de las tomas aerofotográficas al Sistema de Posicionamiento Global, lo cual redundará en la disponibilidad de coordenadas específicas para cada centro de foto.
- 2) La utilización de programas de aplicaciones para las tareas de restitución fotogramétrica digital.
- 3) La consolidación de imágenes fotográficas geométricamente corregidas, como son las ortofotos digitales, cuya producción está ligada a los modelos digitales de elevación.
- 4) La Toma de fotografía digital.



Figura 1.7 Equipo a bordo de aeronaves, para la adquisición de imágenes aéreas digitales (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

El proceso para la toma de fotografía aérea se ha modernizado al equipar las aeronaves con cámaras que cuentan con microprocesadores para el control automático de sus funciones, incluyendo la compensación de movimiento de la imagen. También se han instalado sistemas GPS para la conducción precisa de las aeronaves, lo que permite ubicar geográficamente el centro de cada fotografía al momento de la toma y con ello mejorar los procesos fotogramétricos que en la actualidad son digitales (*ver figura 1.7*). Mediante este sistema, se generan y actualizan las cartas topográficas en diversas escalas. Estas fotografías se utilizan también para la realización de cartografía temática y estudios geográficos diversos (como es este caso).

1.1.5 Imágenes aéreas digitales de formato pequeño y video

La aparición de las cámaras de video y posteriormente las de fotografía digital: equipadas con sensores de estado sólido CCD (*Charged-Coupled Device*: Dispositivo de carga acoplada), introducen al equipo televisivo y a las cámaras a las tareas de teledetección. Las cámaras digitales de formato pequeño, son el equivalente a una cámara de película de 35 mm, y se les llama así para distinguirlas de las cámaras aerofotográficas convencionales que utilizan negativos de 23 x 23 cm. La utilización de este tipo de cámaras CCD, en conjunto con filtros de interferencia en sectores bien delimitados del espectro electromagnético, generó una nueva tecnología que se ha denominado: videografía y fotografía digital multispectral de alta resolución. Para realizar análisis multispectral, se colocan filtros enfrente del sistema óptico. Los mas

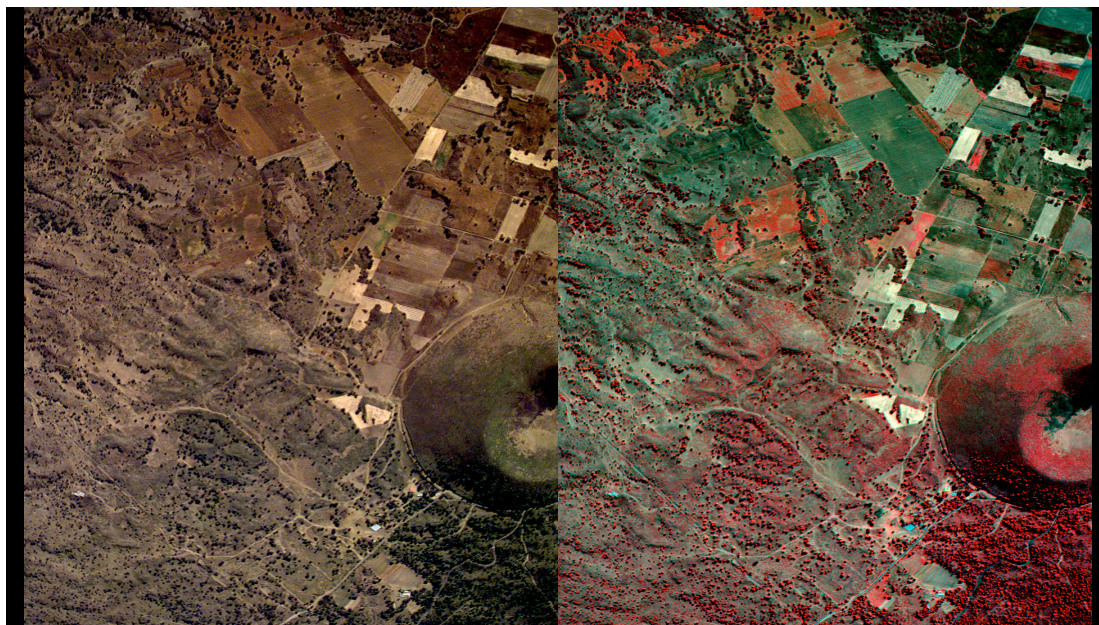


Figura 1.8 Fotografías aéreas digitales de pequeño formato. Visible y compuesta (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

usados son los típicos RGB (*Red, Green and Blue*: Rojo, verde y azul) que permiten analizar las características del terreno y sus propiedades. Otros filtros manejados son los del infrarrojo cercano, como aquellos centrados en los 750 y en los 850 nanómetros. Los filtros rojo, verde y azul han demostrado ser de gran utilidad para muchas aplicaciones en la banda visible, sin embargo, para cada misión es necesario realizar pruebas preliminares para determinar cuales son los filtros mas adecuados, dependiendo del problema específico que se quiera abordar. En el caso de la fotografía digital, es posible llevar a cabo la separación de bandas a partir de la misma imagen en sus componentes RGB (*Red, Green and Blue*). Como los sensores además son capaces de captar el IR (*Infrarrojo*), entonces es posible contar con imágenes desde 900 nanómetros hasta 1.1 micras.

Las imágenes aéreas digitales de formato pequeño, ofrecen algunas ventajas con respecto a la aerofotografía convencional, como el hecho de que se obtienen en color, lo cual es de gran ayuda en los procesos de interpretación. Además, se tiene la posibilidad de hacer combinaciones multiespectrales para lograr todavía una mejor distinción de los objetos en el terreno, lo que permite a las imágenes analizarlas e interpretarlas directamente con la ayuda de una computadora.

La fotografía aérea convencional, también es posible obtenerla en color e infrarrojo, pero a costos aún mas elevados. Es capaz de proveer gran resolución espacial, su interpretación es hecha de forma visual por experimentados analistas, sin embargo, debe ser digitalizada por medio de barredores, para su posterior utilización en análisis asistido o para la manipulación y procesamiento de imágenes en la formación de mosaicos. El video se ha utilizado en algunas aplicaciones, sin embargo, la baja resolución de las imágenes no permite su uso en levantamientos relativamente grandes (1,000 km² o más) por la gran cantidad de imágenes que se producirían. En México, como a nivel mundial, se ha usado muy poco, y solo cuando se trata de zonas pequeñas, por esta gran desventaja que presenta.

1.1.5.1 Características de las imágenes aéreas digitales de formato pequeño

Las imágenes aéreas digitales de formato pequeño, son obtenidas a partir de cámaras digitales de 35 *milímetros* de tipo SLR (*Single lens reflex*: cámaras de un solo lente). Dependiendo de la aplicación es necesario seleccionar el tipo de lente; hay que considerar el tamaño del CCD ya que un gran angular en combinación con un sensor de tamaño reducido, se traduce en el equivalente de un lente normal. En el Laboratorio Percepción Remota Alternativa y Tecnología Avanzada, del Instituto de Geografía, de la UNAM, se han utilizado diferentes cámaras para obtener imágenes de formato pequeño, por ejemplo: la Kodak DCS 420 en color y la DCS 420IR sensible al infrarrojo (IR), con una resolución espacial de 1524X1012 píxeles. También se ha usado las cámaras Nikon D1 en color con 2012X1324 píxeles, D2X en color con 4288X2848 píxeles; y la Sony DSCF707, modificada para obtener imágenes infrarrojas, de 2560X1920 píxeles y la Canon

EOS Revel, también modificada para obtener IR, de 3450X2300 pixeles, utilizadas con eficiencia en varias decenas de levantamientos. Todas las cámaras permiten seleccionar diferentes modos de almacenamiento, así como la resolución de la imagen de salida. Esto es muy importante, ya que en vuelos bajos y rápidos, es necesario almacenar con celeridad las imágenes.

1.1.5.2 Sistema de adquisición de imágenes aéreas digitales de pequeño formato.

Como una alternativa a los sistemas de adquisición de imágenes convencionales, como la aerofotografía y imágenes de satélite, en el Instituto de Geografía de la UNAM, se ha desarrollado un sistema de captura de imágenes a bajo costo, que representa una alternativa muy interesante para muchas aplicaciones y a costos significativamente menores. Este sistema de adquisición de imágenes aéreas, incluye una plataforma donde se colocan las cámaras digitales; como apoyo en tareas de reconocimiento e interpretación, y dos cámaras de video digital. Un sistema de navegación inercial determina las desviaciones de la plataforma de manera independiente de la aeronave y un sistema de control mantiene el apuntamiento hacia nadir con un determinado rumbo, por un tiempo mínimo de cuatro horas, con una precisión menor o igual a un grado en los tres ejes; como se muestra en la figura 1.9.

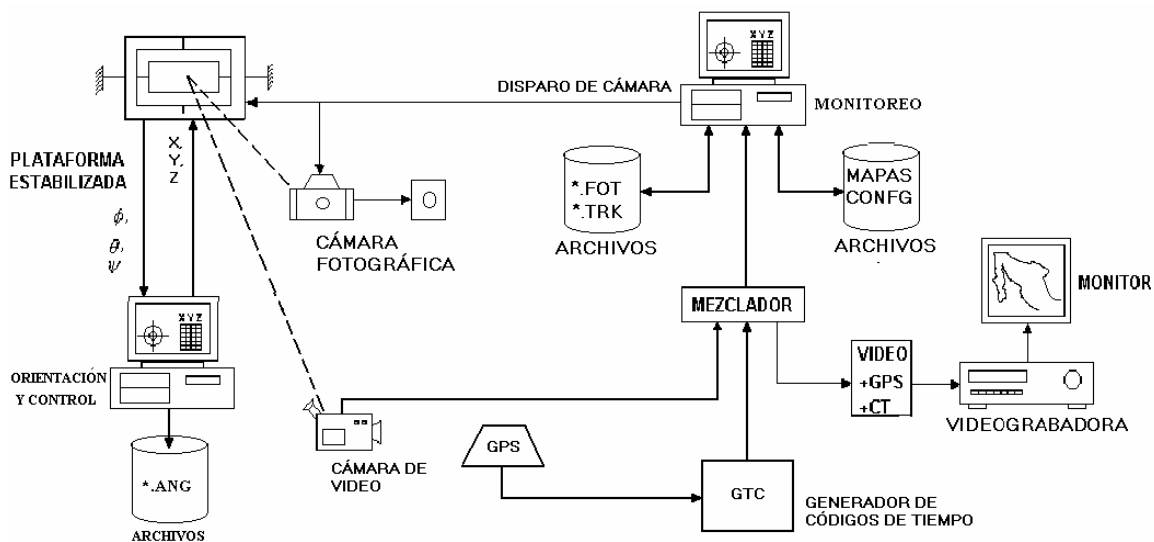


Figura 1.9 Diagrama de bloques del sistema de adquisición de imágenes aéreas digitales de alta resolución (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Un sistema de monitoreo recibe los datos iniciales del levantamiento, grafica sobre un mapa digital del terreno las líneas de vuelo y va actualizando su posición en tiempo real, graba en un archivo los datos de la posición de la captura de cada

imagen digital y la desviación sobre la vertical; esto último con la finalidad de corregir cada imagen geométricamente y poder llevar a cabo la formación del mosaico de imágenes de la zona de estudio, de una manera más sencilla. Cuando no es posible utilizar un avión aerofotográfico para efectuar un levantamiento, entonces se colocan las cámaras en la parte exterior de la aeronave, teniendo la posibilidad de emplear prácticamente cualquier aeronave, para obtener imágenes, como se muestra en la figura 1.10.



Figura 1.10 Montaje de las cámaras en la parte exterior de las aeronaves (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

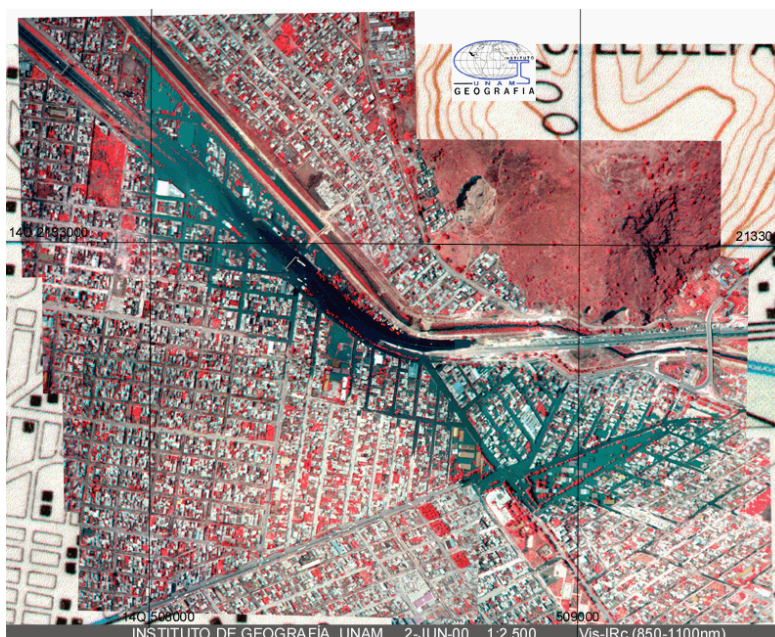


Figura 1.11 Mosaico de una zona de desastre creado a partir de imágenes visibles e IR (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de geografía, UNAM)

Las aplicaciones de este sistema son diversas, aunque se busca ampliarlas aún más todavía con la posibilidad de ortocorregir las imágenes y generar ortomosaicos de la zona de estudio. Una de las principales ventajas es la rapidez de obtención de las imágenes, esto quiere decir que, regresando del levantamiento, ya se tienen grabadas en el disco duro de una computadora personal, las imágenes listas para procesarse. Esto es de particular importancia en casos de desastre, donde una evaluación rápida y objetiva es indispensable para mitigar los daños a la población. En casos como el desbordamiento del canal de la compañía en el valle de Chalco, Estado de México, en mayo del 2000; el levantamiento aéreo y el mosaico fueron ejecutados en cuestión de cinco ó seis horas (figura 1. 11).

1.2 NECESIDAD DE CORREGIR GEOMÉTRICAMENTE UNA IMAGEN

Las fotografías que se obtienen cuando la cámara apunta directamente hacia abajo, son las mas útiles ya que, aunque no son proyecciones verdaderamente ortogonales de la superficie, nos proporcionan una buena representación del terreno. No obstante, siempre existen distorsiones producidas por el lente de la cámara que es necesario corregir.

Para poder realizar mediciones sobre las fotografías, es necesario hacer una corrección geométrica de las mismas. Dicha corrección consiste en minimizar la distorsión causada por el sistema de adquisición de la imagen y conseguir una representación lo más plana posible del terreno y que se obtenga la misma escala en toda su superficie.

La toma física de la fotografía sigue un proceso que consiste en cubrir totalmente el área de estudio con líneas o transectos de vuelo. Estas líneas tienen la finalidad de obtener secuencialmente todas las fotografías necesarias sobreponiéndose una sobre el área de la anterior un 65% aproximadamente y entre líneas de vuelo, un traslape de 30% del área; esto permite generar estéreo-pares indispensables para la identificación de objetos mediante la observación en tercera dimensión de las imágenes. Esto es muy útil cuando se realizan estudios geográficos y topográficos para la obtención de mapas precisos de alguna zona.

Durante la obtención de las imágenes, uno de los principales problemas al que uno se enfrenta es, la variación en la escala, que se presenta por la distancia variable entre la superficie y el punto de toma. Otro factor que afecta grandemente son las irregularidades del vuelo (alabeo, cabeceo, guiñada), ya que la orientación de la nave no se mantiene constante. Con las coordenadas del centro de toma de cada imagen y el vector de apuntamiento de cada una de ellas, es posible corregirlas geométricamente y ajustar la escala, además que la formación de mosaicos se facilita enormemente. Para obtener los datos de las variaciones en la orientación de la cámara, ésta, es instrumentada con diferentes sensores para obtener información de la inclinación, la dirección de vuelo, la posición (X, Y, Z) y

el tiempo. Todos estos parámetros son adquiridos durante el vuelo y almacenados, para su uso posterior.

1.3 FOTOGRAMETRÍA

En la fotogrametría existen dos áreas de estudio específicas: la métrica y la interpretativa. La primera permite la ejecución de medidas precisas sobre las fotos y mapas cartográficos ó temáticos, y proporciona la localización relativa de puntos específicos sobre el terreno. Esto permite encontrar distancias, áreas, ángulos, volúmenes, elevaciones y medidas para así poder clasificar objetos; este tipo de fotogrametría encuentra su aplicación más común en la preparación planimétrica, topográfica y de cartas geográficas.

La fotogrametría interpretativa, se encarga del reconocimiento e identificación de objetos a través del análisis sistemático de las imágenes. En este caso no se realizan mediciones sobre las imágenes, su uso es cualitativo.

1.3.1 Objetivo de fotogrametría

El objetivo principal de la fotogrametría es lograr la reconstrucción de un espacio tridimensional, llamado espacio objeto, a partir de imágenes bidimensionales llamadas espacio imagen.

Para lograr esta transformación entre sistemas, utiliza el sistema bidimensional de coordenadas propio de cada cámara, con origen aproximadamente en el centro de su cuadro y que ha sido determinado por la calibración de la cámara en el laboratorio, antes de su utilización. Un sistema tridimensional, en el caso mas común, representa un sistema de coordenadas del terreno sobre el cual se obtienen imágenes, las que pueden estar representadas en coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altitud), planialtimétricas (E, N y altitud) o cartesianas (X, Y, Z). Para otros tipos de casos, como monumentos u objetos pequeños, se puede crear un sistema de referencia propio, de origen arbitrario.

Para que la transformación sea implementada, también es necesario un conjunto de puntos de control ó de campo; que son expresiones en el espacio-objeto. Una vez localizados en espacio imagen, éstos constituyen los parámetros de entrada para la deducción de la función que maneja la transformación de un sistema a otro. Cuanto mayor sea el número de puntos de control, mejores son los resultados finales. Es conveniente verificar, cuando sea económicamente viable, la localización de los puntos de control. Algunos procesos como la aerotriangulación, por ejemplo; han sido desarrollados de modo que, a partir de apenas algunos puntos de control, pueda ser generada una infinidad de otros, con suficiente precisión para que sean utilizados en la corrección de la imagen.

1.4 FORMACIÓN DE MOSAICOS DE IMÁGENES PARA DIVERSOS ESTUDIOS

Un mosaico aerofotográfico es el arreglo de fotografías aéreas que cubren una región, ajustadas a una escala uniforme, recortadas y ensambladas ordenadamente, para dar la impresión de un todo continuo del área que se trate. Los diversos tipos de mosaicos dependen básicamente del control cartográfico o apoyo de algún otro tipo que se emplee al elaborarlos; de acuerdo con esto, se consideran tres tipos de mosaicos: no controlados, semicontrolados o controlados y los ortofotográficos (Wolf, 2000).

Mosaicos no Controlados

Consisten de la integración directa de las fotografías aéreas, basadas exclusivamente en sus sobreposiciones laterales y longitudinales, las cuales estarán colocadas en la posición relativa en que fueron tomadas durante el vuelo.

Mosaicos Semicontrolados-controlados

Son aquellos en cuya construcción se emplea un control gráfico para fijar, en forma aproximada, la posición de los accidentes principales existentes en el área (ríos, caminos o poblaciones).

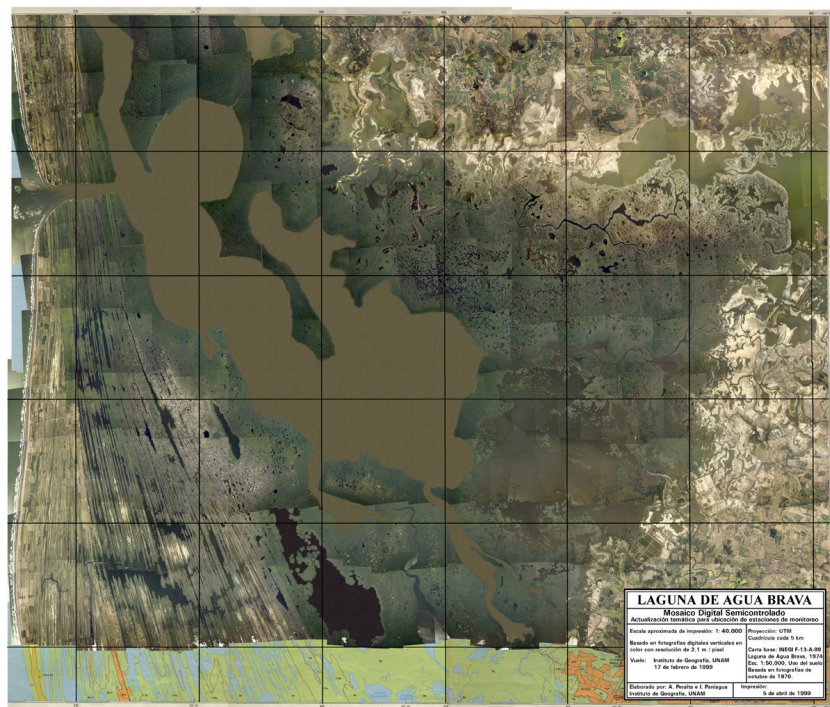


Figura 1.12 Mosaico controlado de la Laguna de Agua Brava en Nayarit, México. Está compuesto de 300 imágenes (Laboratorio SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Mosaicos Controlados

Para la construcción de estos mosaicos se emplea un control gráfico, topográfico o fotográfico, para fijar exactamente la posición de los principales accidentes de un área, puede considerarse que en los mosaicos controlados la escala horizontal es precisa.

Mosaicos Ortofotográficos

Son mosaicos elaborados mediante equipo opto-mecánico, o comúnmente electrónico que compensa analíticamente las diferentes fuentes de error presentes en las fotografías aéreas, integrando así materiales de un alto grado de precisión cuyo uso sustituye, a los mapas elaborados por medios fotogramétricos o topográficos.

Hasta este momento el laboratorio de SIG Y PR, del instituto de Geografía, no se había establecido un procedimiento confiable para la formación de mosaicos ortorrectificados, sin embargo, la calibración de la cámara y la corrección geométrica de las imágenes, ya han sido obtenidas. El objetivo específico de esta tesis es lograr la formación de mosaicos ortorrectificados utilizando imágenes aéreas digitales de pequeño formato, que han sido previamente corregidas contra distorsiones producidas por la cámara y corregidas geométricamente. Para lograr este objetivo se usarán los programas denominados *PCI geomatics® Orthoengine* y *ERDAS® Imagine*, este procedimiento se describe con detalle en el capítulo cinco.

1.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, (SIG)

Existe un mundo básicamente espacial y temporal por naturaleza y por consiguiente, es una rutina diaria al interactuar con complejos conceptos espaciales.

Es por eso que muchos procesos de importancia involucrados en la toma de decisiones, deben estar referidos espacialmente. Investigadores en Geografía y otras disciplinas, por muchos años tuvieron problemas para relacionar el análisis y manipulación de entidades en un marco de trabajo en el espacio-tiempo. El medio más común para almacenar y presentar esta información fue tradicionalmente el mapa, pero la incorporación de los sistemas de cómputo y el avance conceptual de otras áreas, facilitaron el problema de almacenamiento, manipulación y análisis de grandes volúmenes de datos espaciales.

La cantidad de información que puede ser observada y analizada en un mapa, es equiparable a muchos libros y listados extensos de datos, de ahí la relevancia de

los SIG como tecnología de la información geográfica y, el por qué hoy en día son usados en tan diversas áreas: cartografía, negocios, planeación, manejo ambiental, transporte, telecomunicaciones, turismo, seguridad, salud, entre otras (Ortiz, 2005 <http://recursos.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>).

Los SIG son parte de una red contemporánea de conocimiento, ideología y práctica, que define patrones sociales y medioambientales dentro de un amplio significado. Esto implica nuevas formas de pensar, actuar y escribir. De allí la importancia de que sus elementos principales sean conocidos por los profesionales que se relacionan con el manejo de los recursos naturales.

1.5.1 Reseña Histórica

El primer Sistema de Información Geográfica(SIG), que funcionó bajo este concepto, fue el Canadian Geographical System, su creación inició en 1964 y desde 1967 ha sido utilizado para el inventario y planeación del uso de suelo en el territorio canadiense. Este sistema fue desarrollado por Roger Tomlinson, siendo IBM la empresa que aportó el equipo de cómputo necesario. Durante su creación se plantearon muchos de los problemas técnicos y conceptuales que después se han ido resolviendo, en especial los referentes a la estructura y organización de las bases de datos y a los métodos de captura de la información (Ortiz, 2005 <http://recursos.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>).

En los años setentas la utilización de un SIG estaba ligada a necesidades muy concretas de instituciones públicas. Dichos sistemas eran instalados en grandes computadoras cuya finalidad principal era realizar el inventario de recursos; en especial de uso de suelo, aunque con muy pocas capacidades analíticas.

En México, el primer Sistema de Información Geográfica, “*Sistema Geomunicipal de Información*” fue un sistema con tecnología de punta. Lo realizó el Centro de Procesamiento Arturo Rosenblueth (CPAR) perteneciente a la Secretaría de Educación Pública, a principios de los años setentas. Este sistema se ha depurado hasta llegar al Sistema de Información para la Planeación Educativa y cuenta con la cartografía de todo el país a nivel municipal, las variables de educación y censal (fuente: Dirección General de Acreditación, Incorporación y Revalidación, DGAIR).

En los últimos años los SIG se han convertido en un tema muy importante y en rápida expansión. Se han comenzado a utilizar en aquellas disciplinas que necesitan la combinación de planos cartográficos y bases de datos como: la Ingeniería Civil (diseño de carreteras, presas y embalses), estudios del medio ambiente, socioeconómicos y demográficos, planificación de líneas de comunicación, ordenación del territorio, estudios geológicos y geofísicos, prospección y explotación de minas, entre otros.

1.5.2 Definición de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

A los SIG se les define de acuerdo con:

- ❖ El tipo de información que manejan, se define como una base de datos que contiene información espacial (información distribuida en un área o superficie de un espacio geográfico).
- ❖ Sus funciones y capacidades, se define como un conjunto de equipos, programas y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, manejo, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente georeferenciados para resolver problemas diversos.

Su finalidad se concibe como un modelo del mundo real, organizado a partir de capas o estratos de datos clasificados por temas (*Fig. 1.13*), cuyos valores se pueden estimar para cualquier espacio geográfico. En cada capa o estrato los datos tienen las mismas componentes conceptuales.

Las características geográficas de un SIG se describen comúnmente por objetos vistos tanto en el medio natural (roca, suelo, clima, atmósfera, flora, fauna, etc.) como en el que ha sido modificado por el hombre (redes de agua potable y alcantarillado, catastro, líneas de transmisión etc.). Dichas características están asociadas a un marco de referencia geográfico y son representadas en formato digital en mapas mediante objetos geográficos abstractos (puntos, líneas o áreas diferenciadas por colores, símbolos o anotaciones, explicadas por leyendas o textos descriptivos (Bernabé, R. 2003).

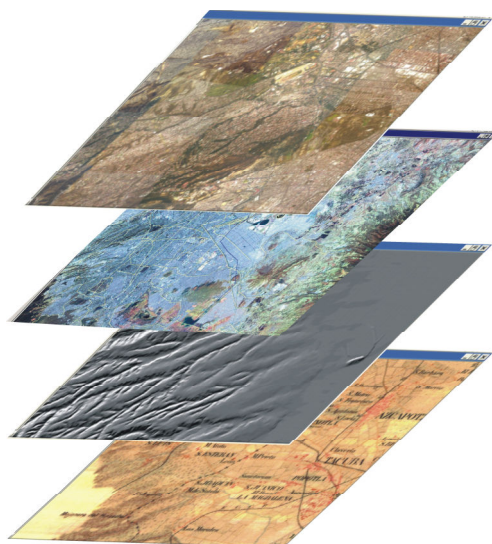


Figura 1.13 Conjunto de mapas de la misma porción de un territorio, georeferenciados y manejados por medio de un SIG (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Un SIG relaciona datos espaciales y de atributo para el soporte de visualización de mapas con el propósito de permitir la actualización, la consulta y el análisis.

Existen dos tipos de datos geográficos y se definen como:

- ❖ **Los datos espaciales**, son aquellos que se encuentran distribuidos en un área o superficie y que proporcionan la localización de los elementos geográficos bajo un sistema de referencia geográfico de coordenadas x, y. Se traducen en objetos simples, como: puntos, líneas, áreas, mallas, etc. Por ejemplo, un sondeo está representado por un punto, una línea de transmisión, un predio, un área, etc.
- ❖ **Los datos de atributo**, son registros que sirven para describir a los elementos geográficos; por ejemplo, el nombre del ejecutor de un sondeo, la longitud de un tramo de cableado, el nombre del propietario de un predio, etc.

La utilización de un SIG facilita la obtención, almacenamiento, manipulación, análisis y representación de la información requerida.

De manera más simple e inmediata un Sistema de Información Geográfica se puede contemplar como “un conjunto de mapas de la misma porción del territorio; donde un lugar en particular (*ver Fig. 1.13*) tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas incluidos en el sistema de información” (Bernabé, R. 2003).

CAPÍTULO 2

Calibración de cámaras digitales de formato pequeño

Uno de los dispositivos más importantes, dentro del campo de la percepción remota, es la cámara. Este es el instrumento básico que se encarga de obtener imágenes, a partir de las cuales se obtienen diferentes productos, como se ha discutido con anterioridad.

La definición de la cámara, según la ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing), es: *un instrumento resistente al paso de la luz o caja cerrada, en la cual la imagen de un objeto exterior se proyecta sobre una placa sensible o película, a través de una abertura usualmente equipada con lentes, obturador y apertura variable*. Esta definición ha sido ampliada en años recientes, con la llegada de la cámara digital, la cual capta la energía luminosa a través de un dispositivo semiconductor electrónico en lugar de una película. En muchos casos un término más general, tal como: “*dispositivo de adquisición de imágenes*” puede ser mas apropiado para describir el instrumento usado para la toma primaria de datos en la percepción remota.

2.1 TIPOS DE CÁMARAS Y SUS APLICACIONES

2.1.1 Tipos de imágenes aéreas.

Hay diferentes tipos de imágenes aéreas, las cuales se encuentran divididas, en:

A. Vertical. La foto vertical proporciona una imagen de un objeto fotografiado directamente desde arriba, a una escala relativamente constante que permite que el intérprete pueda lograr una visión estereoscópica y las mediciones más precisas. Por lo tanto, es el tipo más adecuado de imágenes fotográficas para usarse en cartografía, construcción de mosaicos y de modelos del terreno.

B. Oblicua. Proporciona una cobertura de un área fotografiada con un ángulo distinto de la vertical. Las fotografías oblicuas altas incluyen una parte del horizonte detrás de la zona de estudio; las oblicuas bajas no lo incluyen.

C. Panorámica. Se toman con cámaras especiales, con visión de gran angular. Proporcionan la cobertura vertical directamente debajo de la aeronave, mientras que adquieren imágenes oblicuas que se extienden al horizonte en cada lado de la línea de vuelo de la aeronave.

D. Par estereoscópico. Consta de dos fotografías aéreas en las que una parte del área total proyectada allí, es común en ambas imágenes. La observación de tales pares, con un estereoscopio, proporciona una vista tridimensional exagerada del terreno del área traslapada. La mejor visión estereoscópica se logra con fotografías verticales.



Figura 2.1 Imágenes estereoscópicas que se traslapan un 60%, lo que permite la visión tridimensional del terreno (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

E. Fotografía gran angular. La fotografía de gran ángulo es aquella tomada con una cámara que tiene un lente que enfoca un cono de aproximadamente 90 grados.

2.1.2 Tipos de cámaras

Las cámaras se clasifican con base en algunos de sus aspectos generales: el formato del negativo, el tipo de lente y por la arquitectura interior. En términos generales, para la mayoría de las aplicaciones, las cámaras de 35 mm con lentes intercambiables es la de mayor versatilidad. Pueden ser “armadas” con base en módulos por un lado el cuerpo de la cámara y, por el otro, los diferentes tipos de objetivos y accesorios. Para aquellas aplicaciones donde se necesita una mayor calidad de imagen; como para realizar grandes ampliaciones, impresos de libros de arte, publicidad, reproducciones, entre otros. Se requieren cámaras que proporcionen negativos de mayor tamaño, de 4.5 x 6 cm o de 6x 9 cm. Pero cuando la calidad absoluta de la imagen es un aspecto prioritario, tanto en nitidez como en un completo control de la perspectiva, como sucede en tomas arquitectónicas, foto aérea, etc., se utiliza la cámara de gran formato (23 x 23 cm).

Por ser de mayor relevancia para este trabajo de tesis, solamente se discutirá la clasificación por tamaño del negativo.



Figura 2.2 Algunos ejemplos de cámaras fotográficas de pequeño formato (35 mm), utilizadas para obtención de fotografía aérea digital (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

2.1.3 Tamaño del negativo

Este es uno de los factores que determinan la calidad absoluta de la imagen, debido a que cuanto mayor es su superficie, menor es el grado de ampliación y mayor el nivel de detalle que se puede discernir en la imagen. Se clasifican las cámaras en los siguientes grupos:

- ❖ **Subminiatura.** Es el formato mas pequeño, el rollo es de 16 mm, proporciona un negativo de 13 x 17 mm y su utilización esta limitada a las cámaras mas económicas de uso familiar.

- ❖ **APS** (*Advanced Photo System*). Sistema de cámara y película integrados, que proporciona negativos de 16.7 x 30.2 mm, cuyos rollos son denominados IX240.
- ❖ **35 mm**. Es una película de origen cinematográfico, que se ha convertido en el formato de mayor aceptación. Proporciona fotogramas de 24 x 36 mm.
- ❖ **Formato Medio**. Estas cámaras utilizan película en rollo de formato 120 y/o 220 (para 12 o 24 tomas de 6 x 6 cm). Son equipos mas voluminosos que los de 35 mm y según el modelo, proporcionan fotogramas de 4 x 4 – 4.5 x 6 cm – 6x6 – 6x7- 6x8 – 6 x 9 o multiformato.
- ❖ **Gran Formato**. Se caracterizan por utilizar placas de 10 x 12.5 (4 x 5 pulgadas) a 20 x 25 cm (8 x 10 pulgadas), con movimientos de basculamiento y descentrado del respaldo y del objetivo, para control de la perspectiva y de la profundidad de campo.

2.1.4 Cámaras aerofotográficas

Las cámaras para cartografía, son tal vez los instrumentos fotogramétricos más importantes, ya que con ellas se toman las fotos de las que depende toda esta tecnología. Para entender la fotogrametría, especialmente la base geométrica de sus ecuaciones, es fundamental tener un conocimiento elemental de las cámaras y como operan. Las cámaras aéreas tienen que realizar un gran número de exposiciones en rápida sucesión, mientras se desplazan en un aeroplano a alta velocidad, de modo que se necesita un ciclo corto, lente rápida, obturador eficiente y magazín de gran capacidad.

Las cámaras fotogramétricas exponen todo el cuadro simultáneamente, a través de una lente sostenida a una distancia fija, del plano focal. Generalmente, el plano focal tiene un tamaño de 9 x 9 pulgadas y los lentes a una distancia focal de 6 pulgadas, aunque también existen de $3^{1/2}$, $8^{1/4}$ y de 12 pulgadas.

Los componentes principales de una cámara son: *una lente*, que capta los rayos de luz incidente y los dirige hacia el plano focal; *el obturador*, para controlar el intervalo de tiempo en que pasa la luz por el lente; *el diafragma*, que regula el diámetro de la abertura del paso de la luz; *el filtro*, que reduce el efecto de la bruma o neblina y distribuye la luz uniformemente sobre el cuadro; *el cono de soporte*, que sostiene el conjunto lente-obturador-diafragma e impide que haya infiltraciones de luz a la película; *el plano focal*, que es la superficie donde descansa la película expuesta; *las marcas de colimación o fiduciales*, cuatro u ocho en número y que sirven para definir el punto principal de una fotografía; *el mecanismo impulsor*, cuya función es preparar y disparar el obturador, extender la película para su perfecto aplanamiento, y hacer que se desplace entre una y otra exposición; y *el magazín* que aloja las cargas de material fotográfico expuesto y no expuesto.

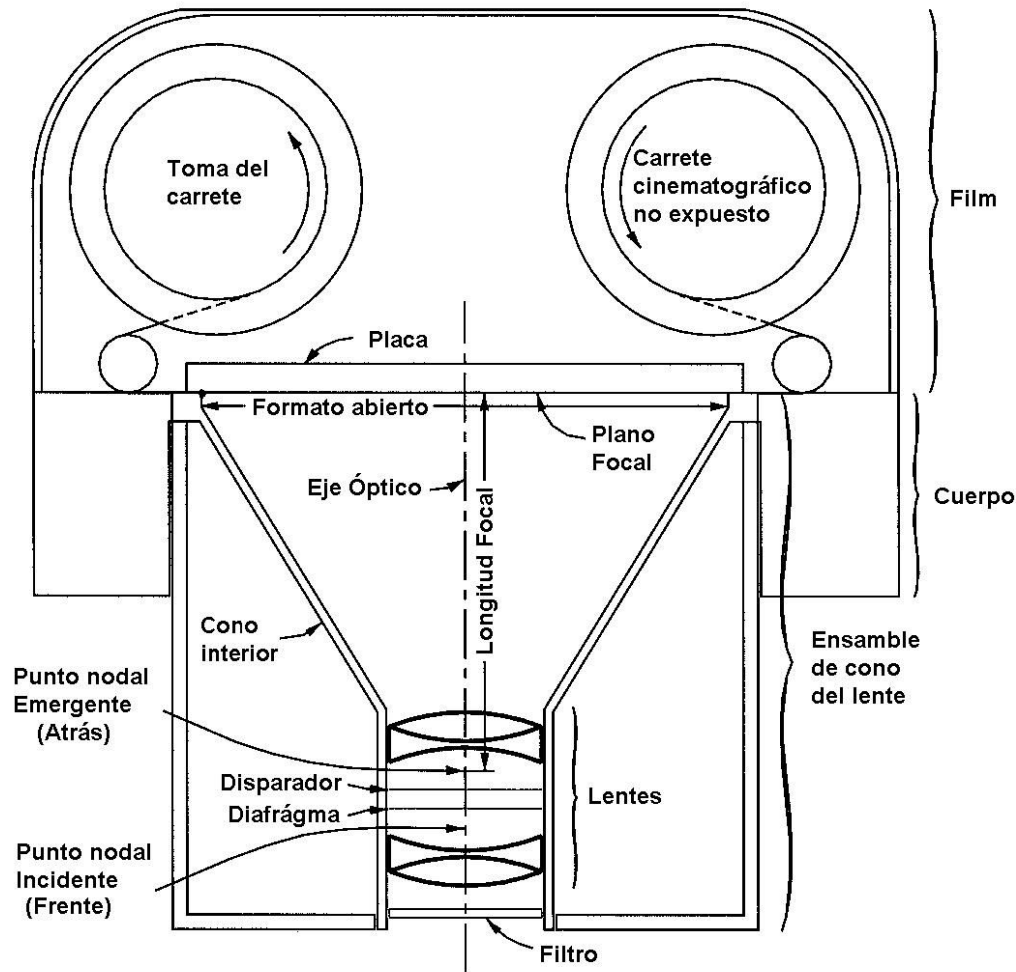


Figura 2.3 Esquema de una cámara fotogramétrica con negativos de tamaño de 23x23 cm (Wolf, 1997)

El obturador de la cámara aérea puede accionarlo un operador en forma manual, o bien, con un intervalómetro, que automáticamente dispara a intervalos de tiempo específicos. Un nivel de burbuja ayuda a mantener vertical su eje óptico (que es perpendicular al plano focal), un sistema de control independiente puede contrarrestar cualquier ladeo o inclinación de la aeronave. Las marcas de colimación aparecen en las fotografías, de manera que las líneas que unen pares opuestos se cortan en el punto principal, o muy cerca de este, el cual se define como un punto donde incide, en el plano focal, una perpendicular desde el punto nodal emergente del sistema óptico. Las marcas de colimación pueden estar en las esquinas, en los lados, o bien, en ambos lugares.

Las fotografías aéreas para cartografía, se calibran en el laboratorio para especificar valores precisos de la distancia focal y las distorsiones de las lentes, como se verá más adelante. También se especifica la planicidad del plano focal y

la posición relativa del punto principal con respecto a las marcas de colimación. Todos los datos de calibración anteriores son necesarios para cálculos fotogramétricos precisos, aquí radica su importancia, ya que esto permite la generación de mapas detallados.

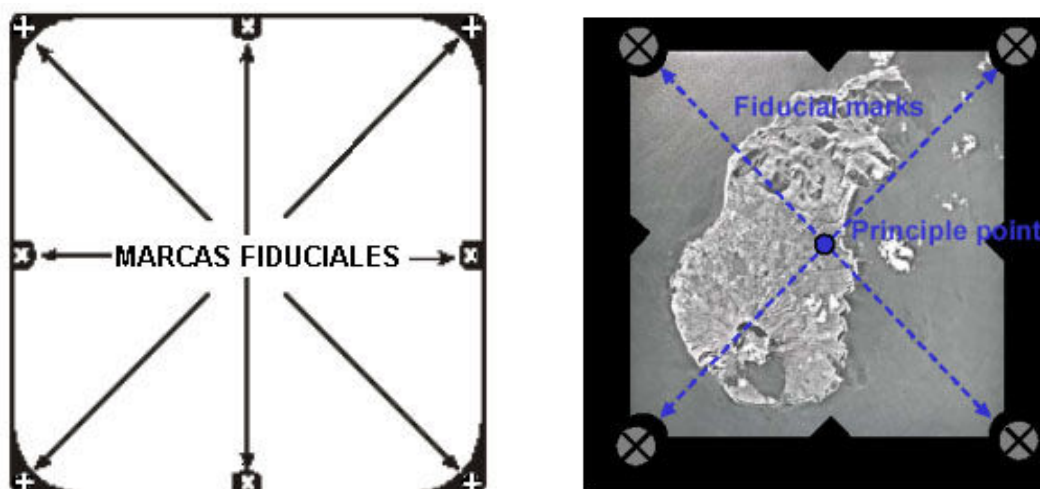


Figura 2.4 Marcas fiduciales en un negativo fotográfico (INEGI, 2006)

2.2 CÁMARAS DIGITALES DE FORMATO PEQUEÑO

Las cámaras particularmente importantes para nuestros propósitos, son las de formato pequeño por su relativo bajo costo de adquisición y de operación (Prado, 2006), pero de tipo digital, equipadas con sensor CCD (*Charge-Coupled Device*) o CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor* o *Metal Óxido Semiconductor Complementario*), que captura la imagen proyectada en el plano focal a través del objetivo, digitalizándola y archivándola en la memoria interna de la cámara o enviándola directamente a una computadora. La imagen ya digitalizada puede ser manipulada por medio de diversos programas gráficos de computación, sin pasar nunca por el proceso de revelado. En lo que se refiere a su funcionamiento, las cámaras digitales funcionan en forma idéntica a las tradicionales, aunque la respuesta espectral de sus sensores es más amplia, es decir que son capaces de captar el IR en la mayoría de los casos.

2.2.1 Características de los sensores de imagen digital

Una imagen digital es un arreglo rectangular de píxeles o elementos de imagen, en el cual el brillo de una escena para cada pixel, ha sido cuantificado. Para grabar la luz incidente (el equivalente a lo que realizan los cristales de haluro de

plata, como ocurre dentro de una película de emulsión); los dispositivos digitales de adquisición de imágenes usan detectores de estado sólido para sensar la energía.

Las clases de detectores comúnmente utilizados hoy en día son el CCD y el CMOS. Aunque existen muchos arreglos posibles y diferentes configuraciones, el principio de operación básico es el mismo. A cada una de las posiciones específicas de un píxel, el elemento es expuesto a una energía luminosa incidente, y este acumula una carga eléctrica proporcional a la intensidad de luz incidente. La carga eléctrica es subsecuentemente ampliada y convertida a una archivo de imagen digital. La cámara digital cuenta con un arreglo bidimensional de elementos, llamado sensor de cuadro completo, para diferenciarlo de los arreglos lineales. El sensor es montado en el plano focal. Al tomar una fotografía, expone todos los elementos del sensor de forma simultánea, esto produce la imagen digital.

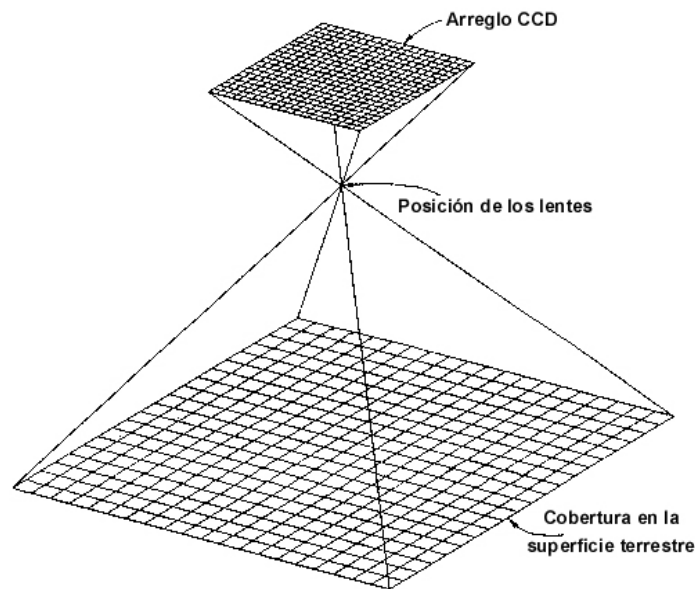


Figura. 2.5 Geometría de una cámara digital (Wolf, 1997)

Las cámaras digitales pueden ser clasificadas en términos de píxeles (del inglés *picture element*, o sea: elemento de la imagen) en la imagen. Aquellas económicas pueden tener arreglos cercanos a las 1000 filas por 1500 columnas para un total de $1000 \times 1500 = 1,500,000$ píxeles. Arreglos mayores tienen por ejemplo 2000×3000 elementos, aunque algunos pueden tener 16 millones o más. Actualmente la tecnología puede producir circuitos electrónicos con elementos individuales aproximadamente de 5 a 15 μm (micrón) en tamaño; para un arreglo de 4096×4096 se puede tener un marco cuadrado entre 20 y 60 mm y más aún,

cuatro sensores de estos se pueden juntar para formar un arreglo de 64 Megapíxeles (millones de píxeles). Por supuesto que la tecnología evoluciona y cada vez contamos con más elementos de imagen en este tipo de cámaras.

La calibración de la cámara digital es en la mayoría de los casos, más simple que la de una cámara con película. Dado que los elementos de imagen se encuentran esencialmente fijos en una posición, la cual prácticamente elimina las consideraciones de distorsión de la película, es decir, cada elemento de imagen constituye una marca fiducial en sí mismo. Cada píxel en la imagen, es representado por un número digital en un arreglo rectangular, forma parte de un patrón reticular perfecto. En realidad, el arreglo de elementos en el circuito integrado, puede estar alejado de este patrón perfecto. Esta desviación del modelo de una cuadrícula perfecta puede ser calibrada, mediante la incorporación de una transformación en el modelo de calibración.

2.2.2 Dispositivos de carga acoplada *Charge-Coupled Devices* (CCD)

El CCD es un sensor opto-electrónico encargado de la conversión de luz en señales eléctricas. Disponen en su superficie de pequeños sensores, encargados de capturar la luz y de generar las cargas eléctricas que, posteriormente, se transfieren a un registro para su procesamiento. Todo sensor CCD dispone de un arreglo de puntos horizontales y verticales, y dependiendo del número de píxeles de que disponga el CCD, se obtendrá una mayor resolución.

Como un ejemplo, tenemos el sensor de la cámara Nikon D1, que forma un mosaico de 2012 X 1324 píxeles. Cada uno de estos elementos es llamado *FOTOSENSOR*, el tamaño de cada uno de ellos es de 11.8 micrómetros (formando un sensor de marco completo de 23.7 X 15.6 mm). Este tamaño de sensor captura una gran cantidad de luz y la cámara produce imágenes más claras y menos granulosas. Todos estos fotosensores liberan de manera individual e independiente, una corriente proporcional a la cantidad de luz que reciben, construyendo así la imagen.



Figura 2.6 Sensor de la cámara Nikon D1 comparado con el de la coolpix 950, una cámara no profesional de buena resolución (Hernández, 2003)

Para que las fotografías puedan ser presentadas en color, es necesario especializar cada uno de los fotosensores del CCD mediante un color primario, esto es, utilizar un filtro de Bayer colocado encima de cada cuarteto de fotosensores (el cual consta de cuatro lentes, cada uno del tamaño de un fotosensor con los tres colores primarios) y con ello constituir un punto elemental de la imagen o pixel.

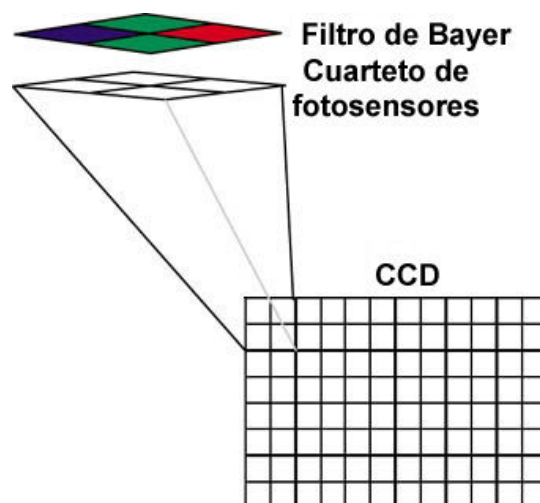


Figura 2.7 Filtros de Bayer colocados sobre un cuarteto de fotosensores en un CCD (Laboratorio de SIG Y PR, Inst. Geografía, UNAM)

Así, si un pixel es iluminado por un haz de luz blanca (conteniendo todos los colores del espectro visible) los cuatro píxeles reciben la misma cantidad de luz, por tanto, producen una cantidad idéntica de corriente. Cada pixel está compuesto de dos elementos verdes por uno rojo y uno azul, esto con la intención de tratar de igualar la sensibilidad del ojo humano.

2.2.3 Sensor Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)

Es un detector semiconductor fabricado con la TECNOLOGÍA CMOS; convierte la luz en carga eléctrica y la procesa en señales electrónicas. Cada pixel tiene su propia conversión de carga-voltaje, y también incluye en el mismo, circuitos de procesamiento de señales. Estas funciones adicionales ejecutadas en el mismo circuito integrado, reducen el tamaño del sensor y como cada pixel hace su propia conversión, la uniformidad es más alta. Ofrecen una disipación mas baja de energía, un tamaño más pequeño y flexibilidad de la imagen. Las cámaras fotográficas con sensores CMOS pueden requerir pocos componentes y menos energía, pero necesitan los circuitos del post-proceso para compensar la calidad

más baja de la imagen, comparada con los circuitos CCD mencionados con anterioridad.

Algunas ventajas técnicas que tienen los CMOS son:

- No hay deformación del color,
- Consumo de energía bajo. Ideal para los dispositivos que funcionan con batería,
- Salida digital directa (incorpora el convertidor Analógico / Digital),
- Tamaño pequeño.

Estos sensores están a la vanguardia de calidad en Canon, Nikon y Sigma.

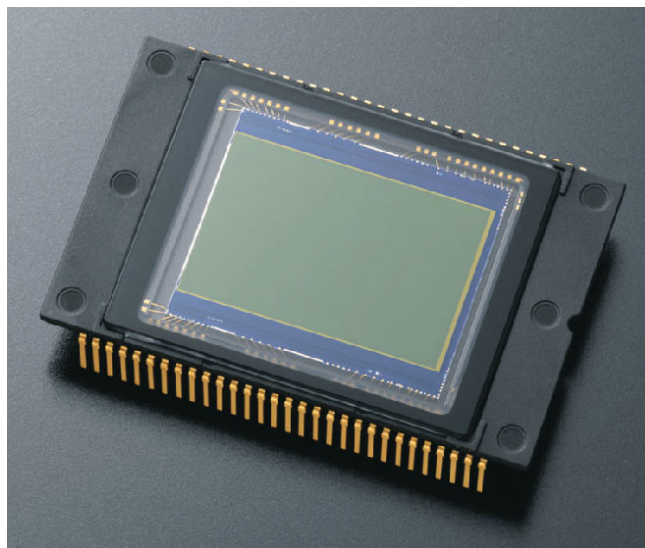


Figura 2.8 Circuito integrado fabricado con la tecnología CMOS, para la formación de imágenes digitales de pequeño formato (fuente: Nikon, <http://www.nikon.com>)

En los primeros años de su construcción, éstos sensores tenían problemas de nitidez, sin embargo, se hicieron mejoras y en la actualidad este sensor de imagen mide la sensibilidad de la luz 50% mejor que los diseños previos y es 30% más pequeño que otros modelos con resolución semejante. El CMOS cumple con el mismo propósito de un CCD, pero utilizará menos energía y tiene un precio más competitivo.

2.3 LOS LENTES FOTOGRÁFICOS

Es imposible para un lente producir una imagen perfecta, siempre se tendrá una imagen con falta de nitidez y geométricamente distorsionada. Las imperfecciones que causan la degradación de la resolución, son llamadas **ABERRACIONES**. A través del uso de lentes complementarios, es posible corregir las aberraciones y

dejar éstas dentro de límites tolerables. La distorsión debida a los lentes deteriora la calidad geométrica, es decir, la exactitud en la posición de cada punto de la imagen. Las distorsiones de los lentes son clasificadas como *DISTORSIÓN RADIAL SIMÉTRICA* y *DESCENTRALIZADA*. Ambas ocurren si la luz de los rayos al ser refractados cambian de dirección, y no emergen paralelos a la dirección de entrada. La distorsión radial simétrica, como su nombre lo indica, causa que puntos de la imagen sean distorsionados a lo largo de líneas radiales a partir del eje óptico. La distorsión radial hacia afuera es considerada positiva y hacia adentro negativa. La distorsión descentralizada tiene componentes radiales, tangenciales y asimétricos.

2.3.1 La geometría del lente

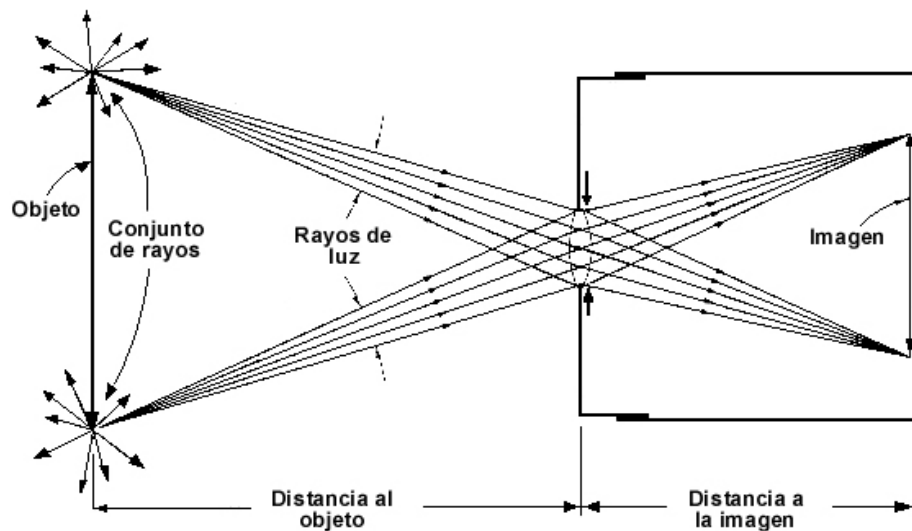


Figura 2.9 Formación de la imagen en una cámara de un solo lente (Wolf, 1997)

Un lente simple consiste de una pieza de vidrio óptico que ha sido pulido. Puede tener dos superficies esféricas o una esférica y una plana. Su función primaria es juntar los rayos de luz provenientes de todos los puntos del objeto, en el foco; a una distancia cualquiera, en el lado opuesto del lente. Un lente junta varios rayos de luz provenientes de cada punto del objeto. Cuando dichos puntos son iluminados, reflejan una gran cantidad de rayos de luz. Un lente puesto enfrente del objeto junta esa gran cantidad de rayos de luz, y concentra estos rayos en el foco, en un punto dentro de un plano en el otro lado de los lentes, llamado *PLANO DE LA IMAGEN*. Un número infinito de puntos del objeto, enfocados en el plano de la imagen, forman la imagen del objeto completo.

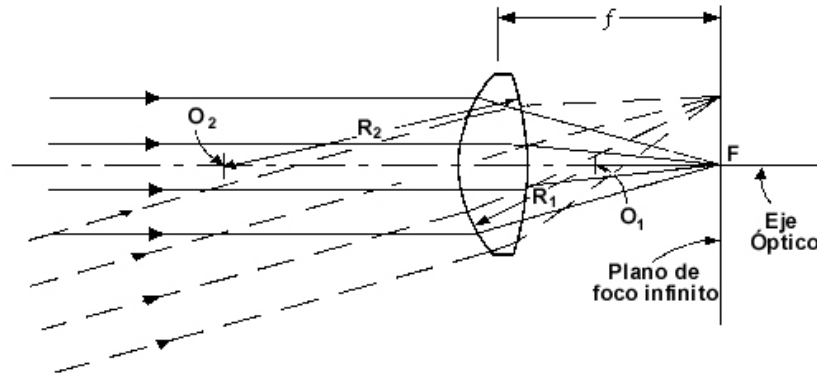


Figura 2.10 Eje óptico, distancia focal y plano de foco infinito del lente (Wolf, 1997)

El eje óptico, es definido como la línea que conecta los centros de curvatura de las superficies esféricas de los lentes (puntos O_1 y O_2). En la figura 2.15, R_1 y R_2 son los radios de la superficie de los lentes, y el eje óptico es la línea O_1O_2 . Los rayos de luz que son paralelos al eje óptico entran al lente y son dirigidos al foco F , el punto focal de los lentes; f la distancia focal, la distancia del punto focal al centro de los lentes. Un plano perpendicular al eje óptico que pasa a través del punto focal es llamado el *PLANO DE FOCO INFINITO*, o simplemente *PLANO FOCAL*. Cuando rayos paralelos entran a una *LENTE CONVERGENTE*, sin depender del ángulo que ellos forman con el eje óptico, son idealmente enfocados en el plano del foco infinito.

2.3.2 La distorsión de la imagen producida por el lente y su evaluación

Después de fabricadas y antes de ser utilizadas, las cámaras aéreas son cuidadosamente calibradas para determinar valores precisos para un determinado número de constantes. Dichas constantes, generalmente conocidas como los **elementos de orientación interna**, son necesarias para determinar información espacial precisa a partir de las fotografías.

En general, los métodos para calibración de cámaras son normalmente llevados a cabo por los fabricantes de la cámara y por agencias gubernamentales. Consiste en fotografiar un arreglo de puntos cuyas posiciones relativas son conocidas de manera precisa. Los elementos de la orientación interior son entonces determinados haciendo mediciones precisas de los puntos en las imágenes y comparando su localización actual en la imagen, con la posición que deberían ocupar si la cámara produjera una perspectiva perfecta.

Los elementos de orientación interna que pueden ser determinados a través de los métodos de calibración de la cámara son los siguientes:

DISTANCIA FOCAL CALIBRADA (DFC). Actualmente este parámetro puede ser mejor llamado *DISTANCIA PRINCIPAL CALIBRADA* puesto que representa la distancia desde la parte posterior del punto nodal del lente, al punto principal de la fotografía.

DISTORSIÓN RADIAL SIMÉTRICA (DRS). Este es el componente simétrico de la distorsión que ocurre a lo largo de líneas radiales a partir del punto principal. Este tipo de distorsión está siempre presente aún teóricamente, incluso hasta en los sistemas de lentes de la más alta calidad, fabricados perfectamente bajo especificaciones de diseño. La figura 2.11 muestra un patrón típico de distorsión radial simétrica, cuya magnitud ha sido exagerada. Nótese que la distorsión ocurre en dirección del centro hacia afuera o de afuera hacia el centro.

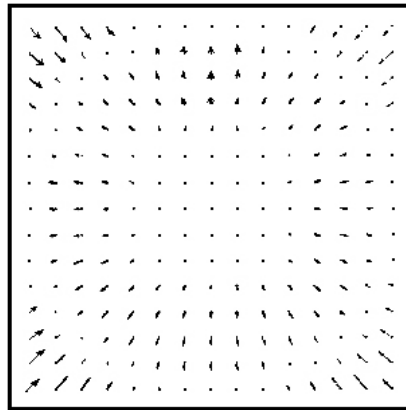


Figura 2.11 Distorsión radial simétrica (Wolf, 2000)

DISTORSIÓN DESCENTRALIZADA

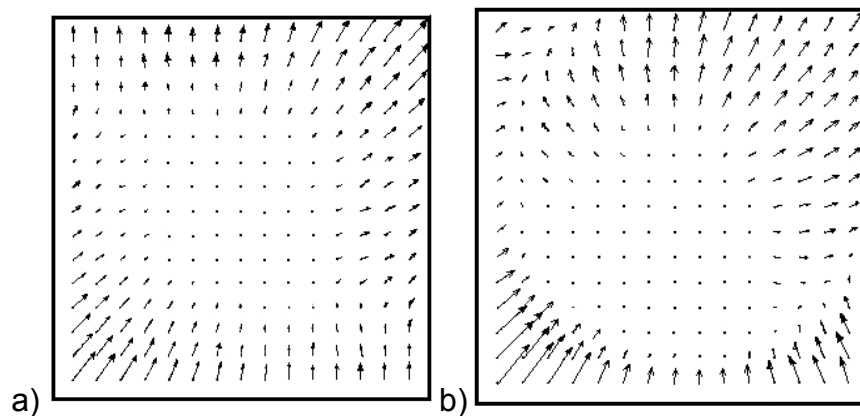


Figura 2.12 a) Distorsión descentralizada. b) distorsión combinada radial y descentralizada (Wolf, 2000)

Esta es la distorsión de los lentes que permanece después de realizar la compensación para la distorsión radial simétrica. La distorsión descentralizada puede ser separada en componentes *RADIALES ASIMÉTRICOS* y *TANGENCIALES*. Estas distorsiones son causadas por las imperfecciones en la fabricación y la alineación del sistema de lentes. La figura 2.12a muestra un patrón típico de distorsión descentralizada, otra vez con las magnitudes exageradas. La figura 2.12b muestra un patrón combinado de distorsión radial simétrica y descentralizada.

LOCALIZACIÓN DEL PUNTO PRINCIPAL. Este está especificado por las coordenadas del punto principal dado, con respecto a las coordenadas x , y a partir de las marcas fiduciales. No obstante se hace el intento durante la fabricación de la cámara, para poner las marcas fiduciales de tal manera que las líneas entre pares opuestos se intersecten en el punto principal, éste tiene siempre una pequeña desviación a partir de esta condición ideal.

COORDENADAS DE LAS MARCAS FIDUCIALES. Estas son las coordenadas x , y de las marcas fiduciales, las cuales proveen una referencia de posición en dos dimensiones tanto para el punto principal, como para un objeto en la fotografía.

Adicionalmente a la determinación de los elementos mencionados de orientación interior, algunas otras características de la cámara pueden ser medidas. **RESOLUCIÓN** (la agudeza o definición con la cual la cámara puede producir una imagen) es determinada para varias distancias a partir del punto principal. Debido a las características de los lentes, altas resoluciones son alcanzadas cerca del centro, y bajas en las esquinas de las fotografías. La planicidad del plano focal (desviación del plano focal de un plano verdadero) es medido por un calibrador especial. Dado que las relaciones fotogramétricas asumen una imagen plana, el plano focal debe estar cercano al plano verdadero, generalmente con una desviación no mayor a 0.01mm. Algunas veces, la eficiencia del disparador, es decir, la habilidad de éste para abrir de forma instantánea, el permanecer abierto, la duración específica de la exposición y su cierre instantáneo, es también cuantificada.

2.4 CALIBRACIÓN DE CÁMARAS AEROFOTOGRAFICAS Y DE FORMATO PEQUEÑO

En esta sección se discuten los métodos tradicionales de calibración de cámaras aerofotográficas y las modificaciones y adaptaciones que fueron realizadas para lograr la calibración de cámaras de formato pequeño.

2.4.1 Método de laboratorio para la calibración de cámaras aerofotográficas

El método del multicolimador consiste en fotografiar, sobre una placa de vidrio, imágenes proyectadas a través de un cierto número de colimadores individuales;

montados en un arreglo angular, medido de manera muy precisa. Un solo colimador consiste de un lente con una cruz montada en su plano de foco infinito. Entonces, los rayos de luz que acarrean la imagen de la cruz, se proyectan a través de los lentes del colimador y emergen paralelos. Cuando estos rayos de luz se dirigen hacia dentro del lente de la cámara, la cruz quedará perfectamente visible en el plano focal de la misma, debido a que ésta fue diseñada para enfocar los rayos de luz paralelos; cuando está enfocada al infinito.

Un multicolimador, cuando es utilizado con el propósito de llevar a cabo la calibración de cámaras, consiste de varios colimadores individuales montados en dos planos verticales perpendiculares (algunas veces, más de dos planos son utilizados).

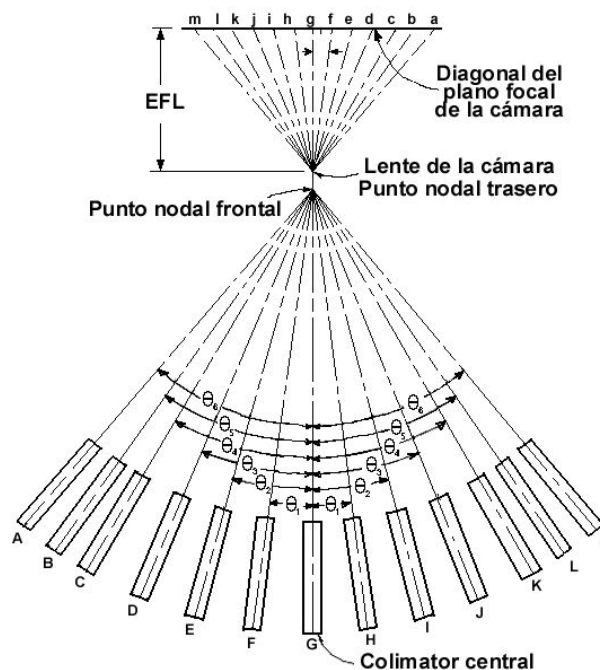


Figura 2.13 Banco de 13 colimadores para la calibración de la cámara (Wolf, 2000)

La figura 2.13 muestra un conjunto de 13 colimadores colocados en un plano. Cada uno de ellos está montado rígidamente, de tal manera que el eje óptico de colimadores adyacentes se intersectan en ángulos conocidos, tales como θ_1 . La cámara que va a ser calibrada es colocada de tal manera que su plano focal sea perpendicular al eje del colimador central, para que el punto nodal frontal del lente se localice en la intersección de todos los ejes de los colimadores. En esta orientación, la imagen g del colimador central, el cual es llamado el PUNTO PRINCIPAL DE AUTOCOLIMACIÓN, se forma muy cerca del punto principal, y también muy cerca de la intersección de las líneas que unen marcas fiduciales opuestas. La cámara es posteriormente orientada de tal manera que cuando la

exposición de calibración está hecha, las cruces del colimador aparecen a lo largo de las diagonales de la fotografía, como se muestra en la figura 2.14.

Esta figura también contiene una vista ampliada (muy cerca del centro de la foto), con la cual se ilustran varios detalles clave. En el acercamiento, las líneas fiduciales son indicadas como si fueran simples líneas que juntan pares opuestos de marcas fiduciales, y esa intersección define el PUNTO PRINCIPAL. La posición de la cruz del colimador central (punto principal de autocolimación) también sirve como origen del sistema de foto coordenadas.

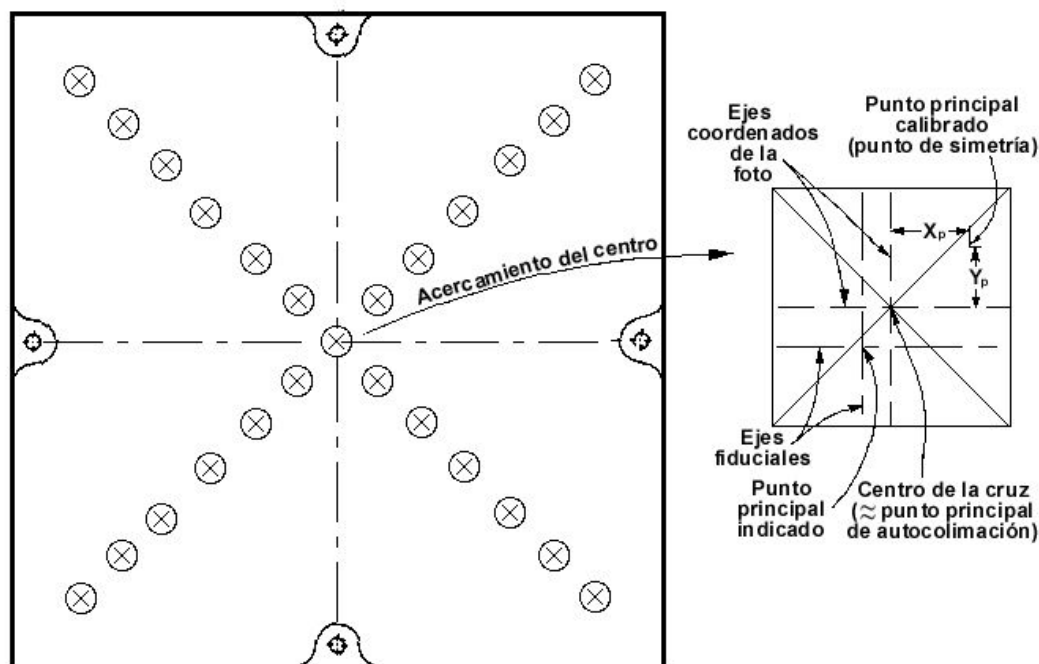


Figura 2.14 Imágenes de las cruces de los colimadores y definiciones del punto principal (Wolf, 2000)

En la determinación de los parámetros de calibración, se utiliza un modelo matemático complejo, el cual incluye términos para la distancia focal calibrada y coordenadas para el punto principal calibrado, así como los coeficientes de distorsión radial simétrica de los lentes y la distorsión descentralizada. Esto se efectúa por medio de una solución por mínimos cuadrados, la cual se muestra en el libro de Wolf (2000), que calcula los valores más probables para los términos y coeficientes arriba mencionados.

2.4.2 Calibración de cámaras no métricas

En ciertas situaciones donde los requisitos de exactitud y el presupuesto son bajos, los fotogrametristas pueden emplear cámaras no métricas para la

adquisición de imágenes. Las cámaras no métricas se caracterizan por tener una distancia principal ajustable, la no planicidad del sensor, ni marcas fiduciales, y lentes con distorsiones relativamente grandes. La calibración de una cámara no métrica permite por lo menos que se pueda realizar una compensación para estos errores sistemáticos.

Una complicación posterior en la calibración de cámaras no métricas, se presenta cuando uno comienza a trabajar con diferentes distancias focales. Los valores de la distorsión de los lentes, varían a diferentes distancias, de tal modo que se requiere un modelo más general de distorsión. Este problema puede ser evitado poniendo el foco de la cámara a infinito durante la calibración, así como durante su uso normal

2.4.3 Reducción de coordenadas cuyo origen es el punto principal

Como se ha mencionado con anterioridad, el punto principal de una fotografía raramente se encuentra precisamente en la intersección de las líneas fiduciales. Las coordenadas actualizadas del punto principal, con respecto al sistema de coordenadas x, y calibrado de la cámara, son x_p, y_p , mostradas en la *figura 2.14*.

Dichas coordenadas especifican la localización del punto principal, alrededor del cual las distorsiones del lente son más simétricas. Las ecuaciones fotogramétricas que utilizan fotocoordenadas están basadas en geometría proyectiva y asumen un origen localizado en el punto principal. Entonces, es teóricamente correcto deducir foto coordenadas a partir de mediciones del sistema de ejes fiducial, hacia el sistema de ejes cuyo origen está en el punto principal.

Los fabricantes de cámaras para cartografía de precisión, tratan de montar las marcas fiduciales y el lente de tal manera que el punto principal y la intersección de las líneas fiduciales coincidan. Normalmente llevan a cabo esto con un error de algunas micras, y por consiguiente en aquellos trabajos de baja precisión que utilizan escalas ingenieriles e impresiones en papel, esta corrección puede se ignora. Para trabajo fotogramétrico analítico de precisión, es necesario hacer la corrección para obtener las coordenadas del punto principal.

La corrección se aplica después de que una transformación de coordenadas en dos dimensiones realizada a las coordenadas medidas por el comparador. Las coordenadas del punto principal x_p, y_p obtenidas de la calibración, son sustraídas a partir de las coordenadas x, y transformadas, respectivamente.

En resumen, la corrección para el desplazamiento del punto principal se aplica conjuntamente con la corrección de la distorsión del lente.

2.4.4 Corrección de las distorsiones del lente

Como se ha descrito anteriormente, la distorsión en el lente causa que los puntos en la imagen, sean desplazados de sus localidades ideales. Las ecuaciones matemáticas que son utilizadas para modelar las distorsiones de los lentes, están típicamente comprimidas en dos componentes: *DISTORSIÓN RADIAL SIMÉTRICA* y *DESCENTRALIZADA*. En las cámaras modernas para mapeo aéreo de precisión, las distorsiones de los lentes son típicamente menores de cinco micras y se aplican solamente cuando se va a realizar trabajo fotogramétrico analítico de precisión.

La distorsión radial simétrica es un producto inevitable de la manufactura de los lentes, sin embargo con un cuidadoso diseño, sus efectos pueden ser reducidos a una cantidad muy pequeña. Por otra parte, **la distorsión descentralizada**, es principalmente el resultado de un ensamblado imperfecto de los elementos de los lentes y no del diseño en sí. Históricamente las cámaras aéreas para mapeo métrico, tienen significativamente mayor cantidad de distorsión radial simétrica que la descentralizada.

Los procedimientos tradicionales de calibración de cámaras proveen información atendiendo solamente a la componente radial simétrica. El valor de la distorsión radial consiste en los desplazamientos radiales a partir de una localización ideal en la imagen de la cruz del colimador, con valores positivos indicando desplazamientos hacia fuera.

En resumidas cuentas, lo que se debe obtener es la desviación del eje óptico con una serie de distancias desde el mismo, hacia las orillas de la imagen y con sus correspondientes valores de desviación. A partir de un conjunto de datos, se modela el comportamiento del lente, es decir, se obtiene una ecuación que por sustitución de datos X,Y, permite corregir la posición de todos los pixeles de la imagen y obtener una imagen corregida. De esta manera se remueven las distorsiones en la imagen producidas en los lentes.

El método utilizado para determinar los valores de la distorsión radial de los lentes, se detalla con mejor exactitud en Hernández (2003). Allí se presenta una adaptación de un método de laboratorio (*Wolf, 2000*) aplicado a cámaras digitales de pequeño formato.

En el capítulo tres, se muestra un programa de computadora, que se utiliza para obtener los valores de *r(rango de error de la cámara)* y su distorsión, con este se completan los parámetros necesarios para poder efectuar la calibración de la cámara. Después, se aplica otra rutina que corrige la posición de los pixeles en toda la imagen.

CAPÍTULO 3

Corrección Geométrica de imágenes aéreas digitales

Las imágenes captadas por los sensores remotos, a las que aquí se hace referencia, son proyecciones de una superficie esférica irregular, la de la Tierra, sobre un plano. El tipo de proyección depende en cada caso de las características ópticas y mecánicas del sensor, de la altura y órbita o trayectoria de la plataforma de soporte (satélite, avión, etc.) y del ángulo con que es observada la superficie terrestre (*vertical u oblicua*). Por esto, para poder superponer imágenes de distintos sensores entre sí o para poder referenciar las coordenadas de la imagen con las de un mapa (*UTM, geográficas, etc.*) es necesario llevar a cabo un proceso de corrección geométrica o de registro de un documento respecto al otro, según sea el caso.

En este capítulo se presenta un método de corrección geométrica de imágenes aéreas digitales que fue desarrollado en el laboratorio y se presenta un ejemplo de calibración efectuado en una cámara de formato reducido.

3.1 El proceso de corrección de imágenes aéreas digitales

La corrección geométrica o registro, puede ser de tipo relativo o absoluto. Una corrección relativa pretende transformar geométricamente una imagen respecto a otra, que se toma como referencia, de tal forma que después de la transformación la imagen de referencia y la imagen transformada, tengan el mismo tamaño, orientación y origen.

Una corrección de tipo absoluto o cartográfico; pretende hallar una función, que permita transformar las coordenadas imagen (fila-columna) a coordenadas X, Y cartográficas. Generalmente suelen emplearse funciones polinómicas de grado variable ajustadas por el método de mínimos cuadrados.

Otros algoritmos pueden incluir en el cálculo de la función de transformación, parámetros directamente derivados de la posición de la aeronave al momento de la toma y las características de la cámara, como son los elementos de orientación interna.

También, ciertos algoritmos permiten hallar puntos homólogos entre la imagen de referencia y la imagen a transformar, de forma automática, a partir de correlaciones entre ventanas móviles, con el fin de usarlos como puntos de amarre entre imágenes.

3.2. Corrección de la deformación debida al lente

Para obtener la calibración de una cámara fotográfica de pequeño formato, se deberá llevar un procedimiento para poder determinar las distorsiones. Esto es posible a partir de mediciones reales hechas sobre la fotografía, así se podrán determinar los parámetros de calibración. Lo que se necesita ahora básicamente, es tener una distancia desde el centro de la imagen y su valor correspondiente de distorsión.

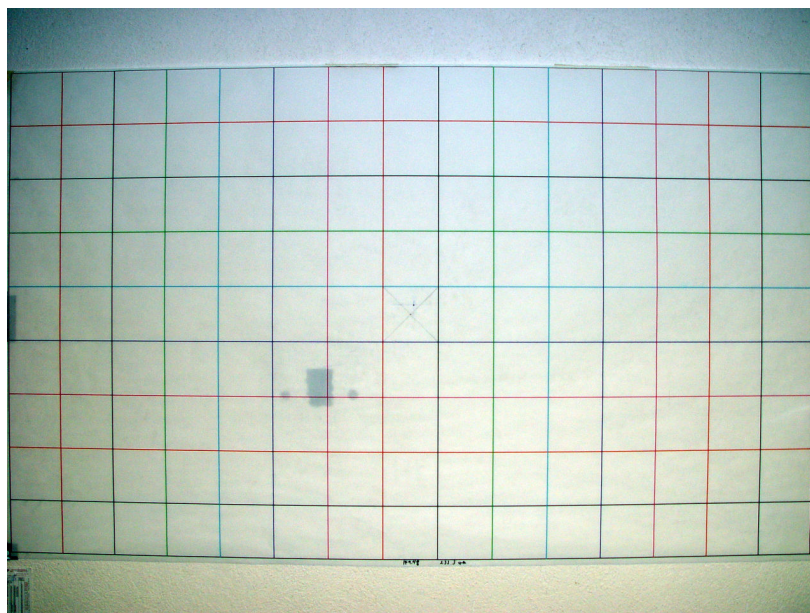


Figura 3.1 En esta primera figura se observa la malla-patrón así como el ajuste casi total a la capacidad del sensor de imagen (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Con esta información inicial, será posible llevar a cabo el procedimiento de calibración de la cámara y posteriormente el de la corrección geométrica de las imágenes.

El primer paso, consiste en imprimir un patrón de calibración, éste se encuentra formado por una malla con cuadros de 10 cm por lado, con un grosor de línea de un milímetro, tiene 90 cm de ancho y 150 cm de largo (figura 3.1). La malla-patrón se imprimió a escala 1:1 para evitar posibles variaciones al utilizar alguna escala diferente. Se monta de manera perpendicular al eje óptico de la cámara que se quiere calibrar y se toman varias fotografías; alineando el centro de la malla-patrón con el centro del lente de la cámara sobre un mismo eje. Con una cámara fotográfica SONY modelo DSC-F707, se obtuvo una imagen, tratando de abarcar al máximo la rejilla. Se tomaron medidas, utilizando una cinta métrica, tratando de mantener una precisión de ± 1 mm en cada una de ellas, se procedió a tomar las distancias desde el plano focal hacia el lente y hacia el patrón de pruebas; y a corroborar que existiera la misma altura entre el eje óptico de la cámara con el centro de la imagen. A partir de estas mediciones, es posible calcular la distancia focal real del lente, por simple semejanza de triángulos (Fig. 3.2).

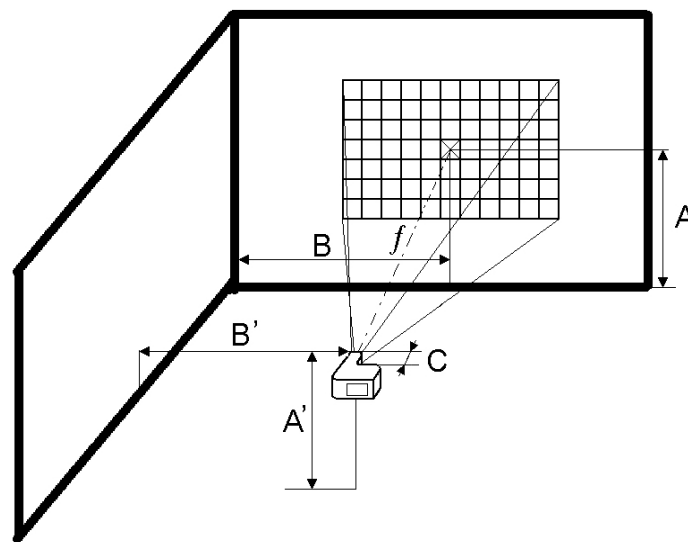


Figura 3.2 Arreglo utilizado para la calibración de la cámara y medidas realizadas para calcular la distancia focal real del lente (Laboratorio de SIG Y PR, Inst. de Geografía, UNAM)

Con la finalidad de poder hacer las mediciones que nos permitan determinar que tanta desviación presenta la imagen, una vez tomada la fotografía, en un programa de diseño asistido por computadora (*Autocad®*), se sobrepone a ésta la malla anteriormente descrita (*malla-patrón que se imprimió*), y se comienzan a

hacer mediciones reales sobre la fotografía, con la ayuda del mismo programa *Autocad®*. Las mediciones se harán partiendo del centro de la fotografía en dirección hacia los bordes, teniendo en cuenta que se deberán localizar los puntos-patrón que servirán como base de la medición. Estos puntos deberán de ser un mínimo de 8, teniendo en cuenta que con una mayor cantidad de éstos, la exactitud de la ecuación para modelar la distorsión ($k's$), aumenta. Las unidades de las mediciones deberán ser en milímetros debido a los requerimientos del programa: "*obtención_ks*", que se describe más adelante.

Se observa una diferencia muy clara entre la fotografía y la malla-patrón, la distorsión es principalmente radial puesto que va variando desde el centro y va aumentando hacia la parte exterior de la fotografía. También se puede ver que la distorsión es simétrica, es decir, que es idéntica a lo largo y a lo ancho de la imagen (coordenadas X, Y).

Es necesario, para poder determinar la posición del centro de la cuadrícula y la posible desviación del eje de la cámara, sobreponiendo diagonales en la malla y saber con exactitud donde se encuentra localizado este punto en la fotografía (*Fig.3.3*).

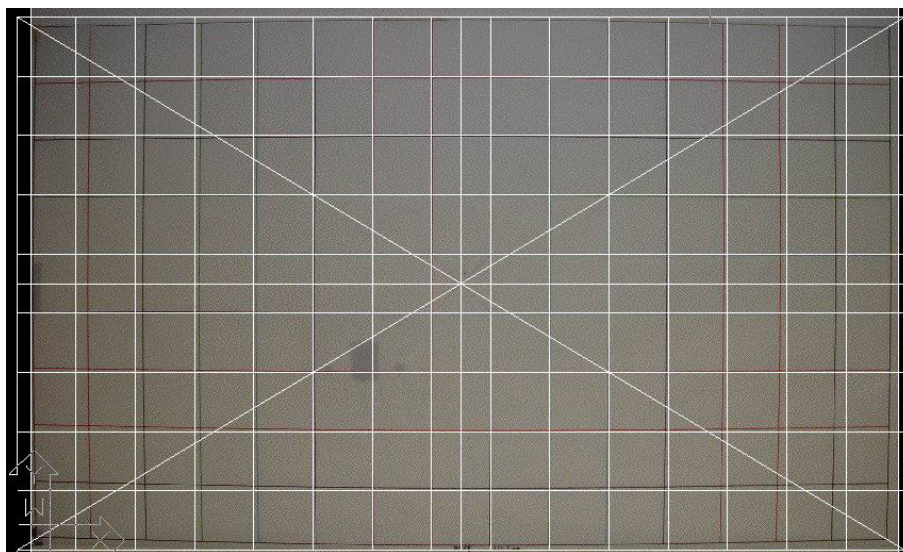


Figura 3.3 Trazo de diagonales para determinar la desviación del eje óptico lente (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

A la imagen tomada se le añadió un patrón de círculos, para efectuar las mediciones con mayor precisión, (*Fig. 3.4*). El siguiente paso será proceder a obtener la diferencia entre cada uno de los puntos que conforman una serie (por un lado las medidas ideales y por otro lado las reales) haciendo notar que las diferencias tienen un signo, por lo cual se deberá observar si la distorsión es hacia adentro, es decir, si la fotografía es mas chica que la malla-patrón superpuesta

original, en cuyo caso la diferencia será negativa; por el contrario, si resulta que en el lugar de la medición la fotografía se encuentra desplazada hacia fuera de la malla-patrón, en este caso las diferencias serán positivas.

Con esta información se puede calcular la r (*rango de error*), dado que la Δr se mide directamente, considerando el signo de la distorsión. Las distancias así medidas tienen un error bajo, dada la precisión que presenta el programa especializado en diseño asistido por computadora (*Autocad*®). La desviación del eje óptico es medida directamente sobre la imagen. La corrección para el desplazamiento del punto principal es aplicada en conjunto con la corrección de la distorsión del lente; así es factible obtener las k 's(*distorsiones*) y efectuar la calibración de la cámara y corregir geoméricamente las imágenes.

Con estas mediciones se termina el proceso de obtención de datos por lo que solo restará introducir cada uno de ellos, en los correspondientes espacios destinados dentro del programa: "*obtención_k's*", que nos dará como resultado un conjunto de cuatro parámetros, que a su vez serán empleados en el proceso de corrección geométrica de la distorsión debida al lente.

3.3 Programa para corregir las distorsiones en imágenes obtenidas con cámaras de formato pequeño

El programa tiene una aplicación general, para las imágenes y fue escrito en *Matlab* (Hernández, 2003). A continuación, a manera de ejemplo, se dan los pasos necesarios, para utilizar el programa de determinación de los valores de las K 's a partir de las mediciones realizadas.

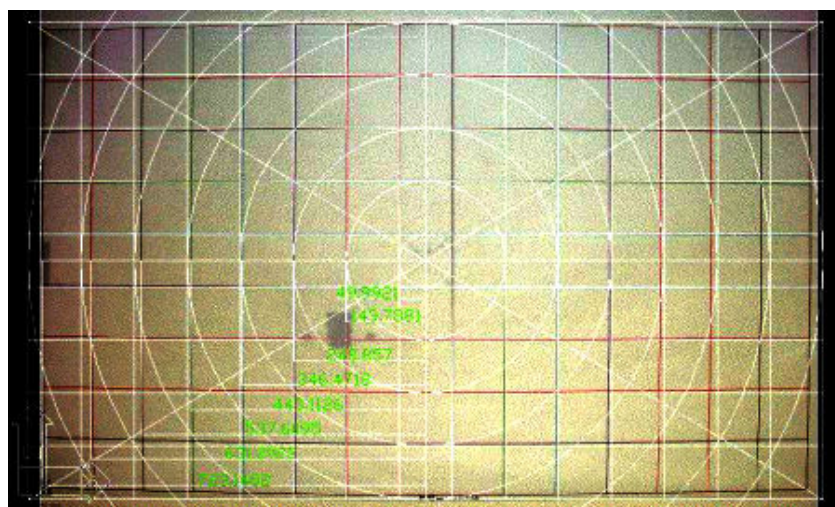


Figura 3.4 Círculos concéntricos para efectuar mediciones sobre la imagen para cuantificar las magnitudes de las distorsiones lente (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Se ejecutará el programa llamado: “*obtención_ks*”, para hacerlo, es necesario buscar dentro de la computadora, la liga hacia Matlab.exe y se dará doble clic. Una vez que se haya iniciado *Matlab®* en el “*prompt*” se deberá teclear: -- ***obtener_ks*** (enter)

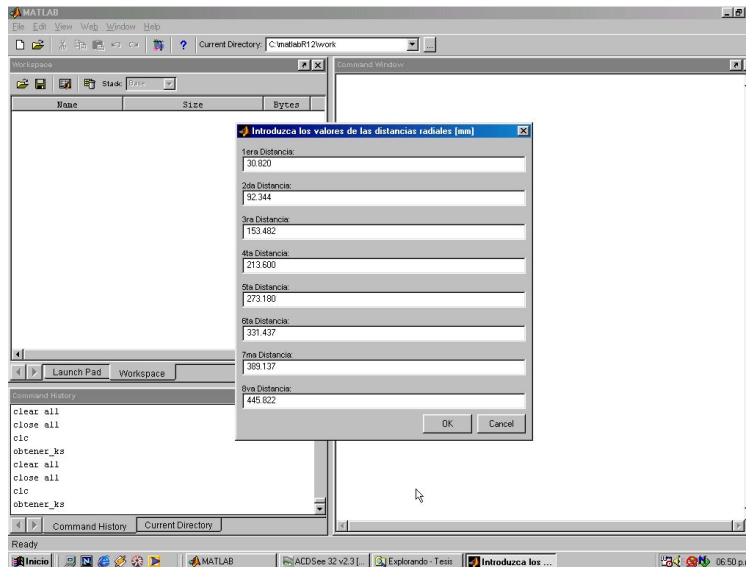


Figura 3.5 Espacios disponibles para insertar los datos. Se introducen los valores de los incrementos o errores en la imagen lente (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

En la pantalla inicial se da una breve introducción sobre lo que significan los datos que serán insertados, recordando que las distancias radiales serán medidas sobre la malla-patrón fotografiada. Cada dato deberá ser dentro de cada uno de los cuadros de texto designados para ello. Son como mínimo ocho, una vez introducidos todos los valores se procederá a dar clic en “O.K”.

Se ejecuta el proceso y se desplegará un resultado visible (en la pantalla de comandos de *Matlab®*) y se efectuarán las operaciones matemáticas correspondientes, obteniéndose los valores de las k's. De forma análoga pero invisible al usuario, dentro del directorio de *Matlab®*. Se han creado cuatro archivos del tipo texto llamados: k1, k2 k3 y k4. Estos archivos contienen la misma información que se desplegó en la ventana de comandos, pero de forma más exacta, completa y lista para ser llamada por el programa de corrección. Una vez obtenidos estos archivos se ha finalizado el proceso de obtención de los parámetros k.

En la pantalla aparecen los valores calculados, como se puede apreciar en la figura 3.6.

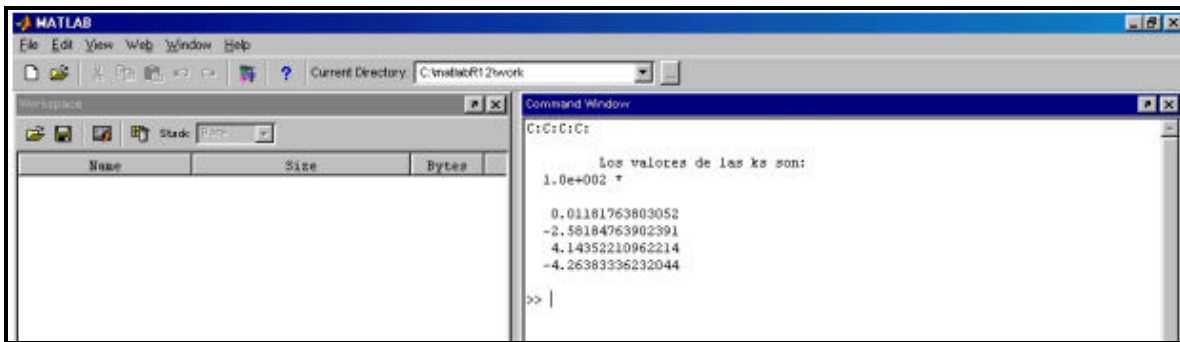


Figura 3.6 Despliegue visual de los valores de K (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Ahora se procede a la corrección de la imagen. El programa encargado de esta tarea, hace las compensaciones necesarias para que dicha imagen, que anteriormente estaba deformada, sea corregida.

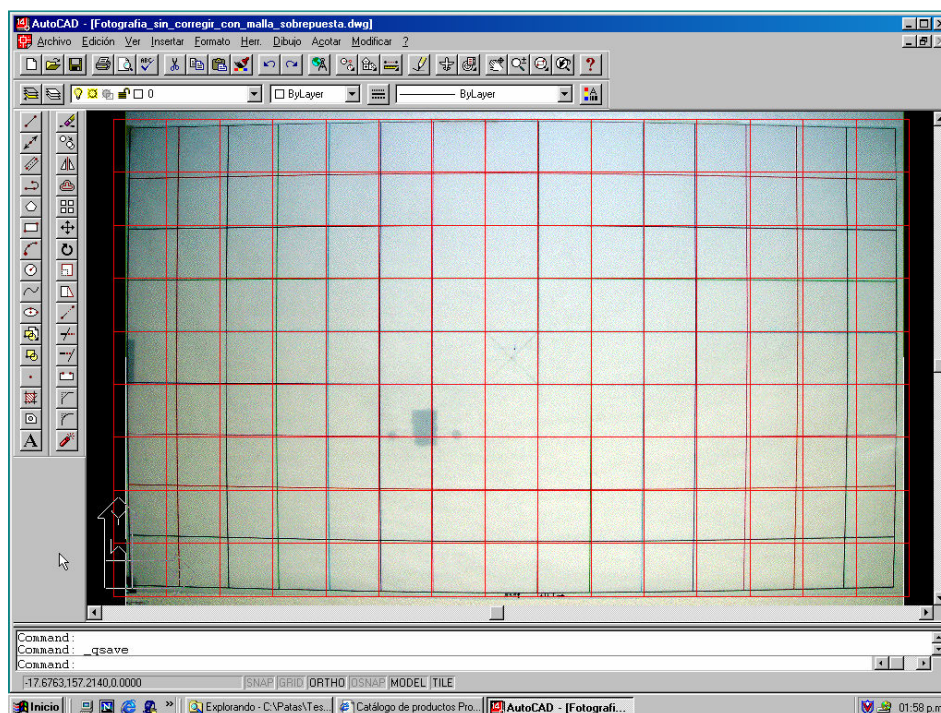


Figura 3.7 Imagen a corregir geométricamente (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Para cada uno de los pixeles, el proceso a realizar será el mismo matemáticamente, es decir, se hará un corrimiento. Se obtiene la distancia desde

el origen de coordenadas, para ese píxel en específico, y junto con él hay que obtener un valor de desplazamiento, para ello se efectúa la medición tomando en cuenta dónde está el píxel y donde debería de estar. Finalmente se hace un reacomodo en una nueva matriz-imagen vacía para introducir paulatinamente, los valores correspondientes de RGB para cada elemento y con ello conformar la imagen ya corregida.

A continuación se ejemplifica el uso del programa desarrollado para efectuar la corrección geométrica de imágenes. Lo que se deberá hacer será abrir el paquete de programación *Matlab*[®], una vez iniciado, desde la línea de comando teclear: **>> corregir_imagen (enter)**

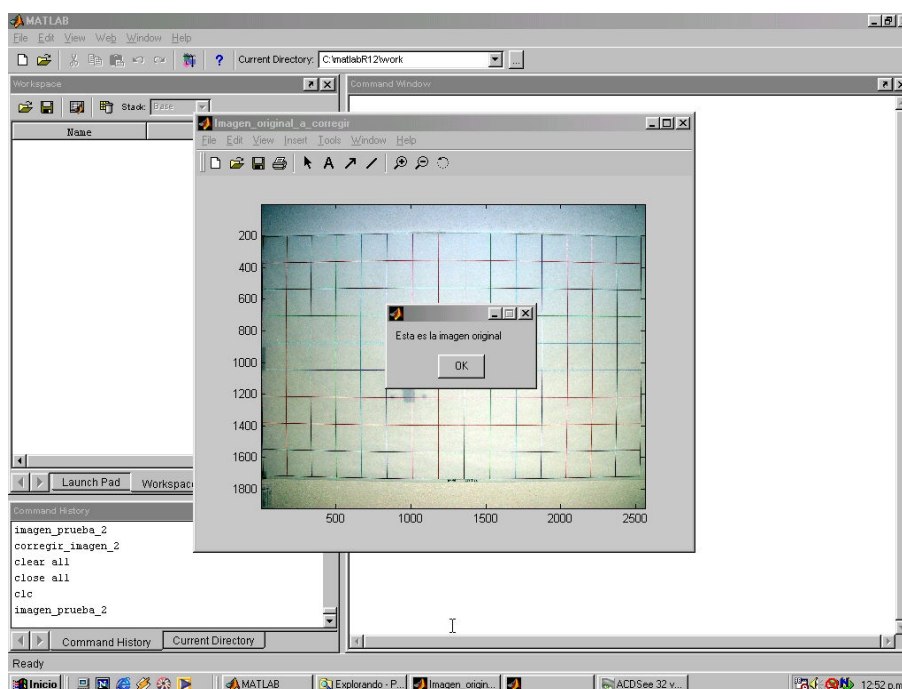
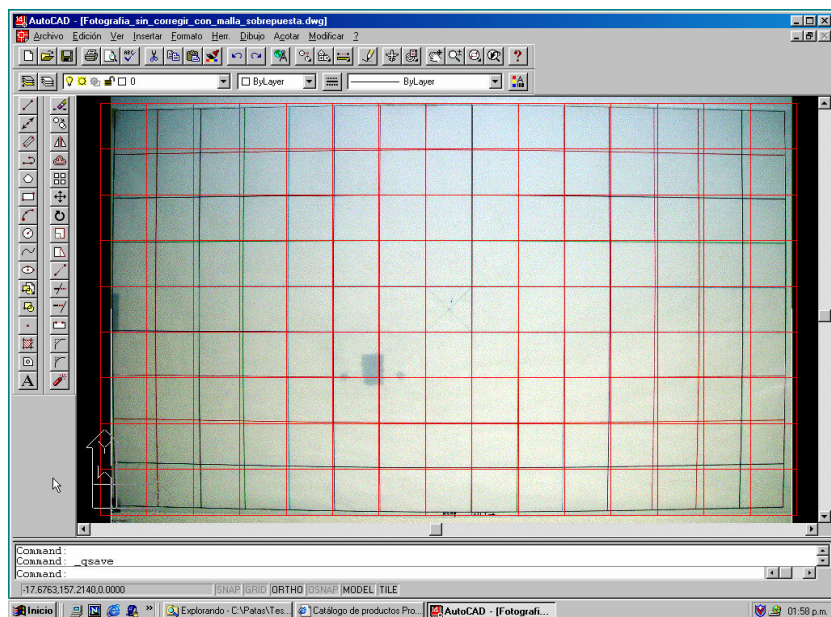


Figura 3.8 Se pregunta si la imagen a corregir, es la correcta (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

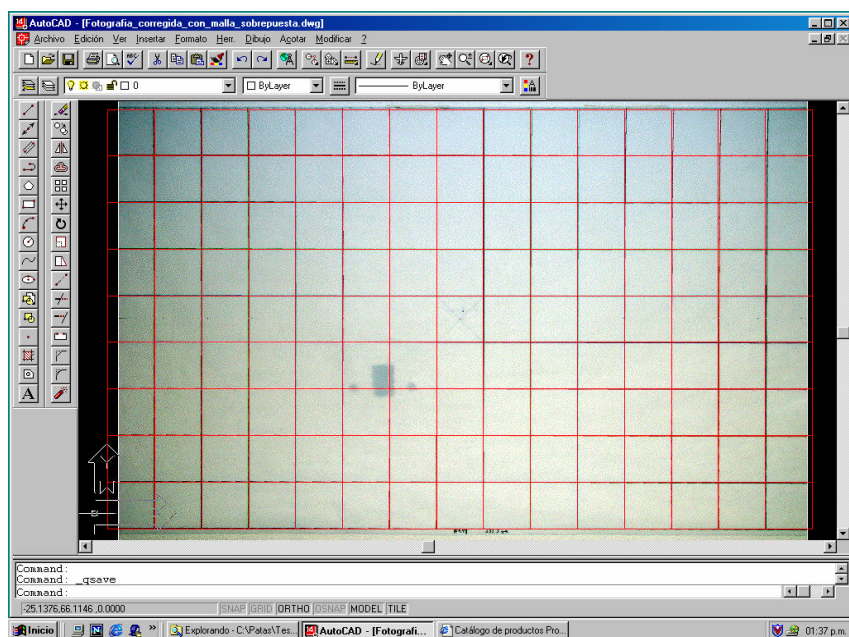
Aparecerá una pantalla en la que se deberá seleccionar el archivo a corregir, verifica que la imagen seleccionada sea la correcta, se introducen los valores de la resolución de la fotografía (número de píxeles), se inicia el proceso de corrección, se introduce el nombre de la nueva imagen, ya corregida, el programa pregunta si se desea corregir una nueva fotografía:

Si la respuesta es afirmativa (SI, Si, si, s, enter), el programa contesta en la pantalla “Abrir_archivo_a_corregir” y continua su funcionamiento.

A continuación se presentan ejemplos del resultado obtenido mediante los procesos de calibración de la cámara y la corrección geométrica, utilizando el programa desarrollado en el Laboratorio de SIG Y PR, IGg, UNAM.



(a)



(b)

Figura 3.9 Comparación entre una fotografía sin corregir (a) y corregida (b). Nótese que desde el punto de vista geométrico, la imagen ha quedado corregida de manera más que satisfactoria (fuente: Laboratorio de SIG Y PR, Inst. de Geografía, UNAM)



(a)



(b)

Figura 3.10 (a y b) Mismo procedimiento en una imagen con un patrón cuadrículado sobrepuesto, para observar el proceso inverso (Laboratorio de SIG Y PR, Inst. de Geografía, UNAM)



(a)



(b)

Figura 3.11 Comparación entre imágenes sin corrección (a) y con corrección geométrica (b), de un levantamiento aéreo realizado con la misma cámara SONY modelo DSC-F707(Laboratorio de SIG Y PR, Inst. de Geografía, UNAM)

En la figura 3.9 (b) se muestra la imagen de la malla-patrón ya corregida. En la figura 3.10, se presenta un ejemplo de una imagen aérea adquirida con la misma cámara a la que se le sobrepuso un patrón cuadrulado; este ejemplo es muy ilustrativo de la distorsión introducida por los lentes de algunas cámaras de pequeño formato. La *figura 3.11*, muestra la misma imagen, con y sin distorsión, respectivamente; las diferencias se encuentran principalmente en las orillas, como se aprecia fácilmente en la *figura 3.12*, donde se hicieron coincidir las imágenes en el centro y hacia las orillas se aprecia la distorsión tan grande que existe.

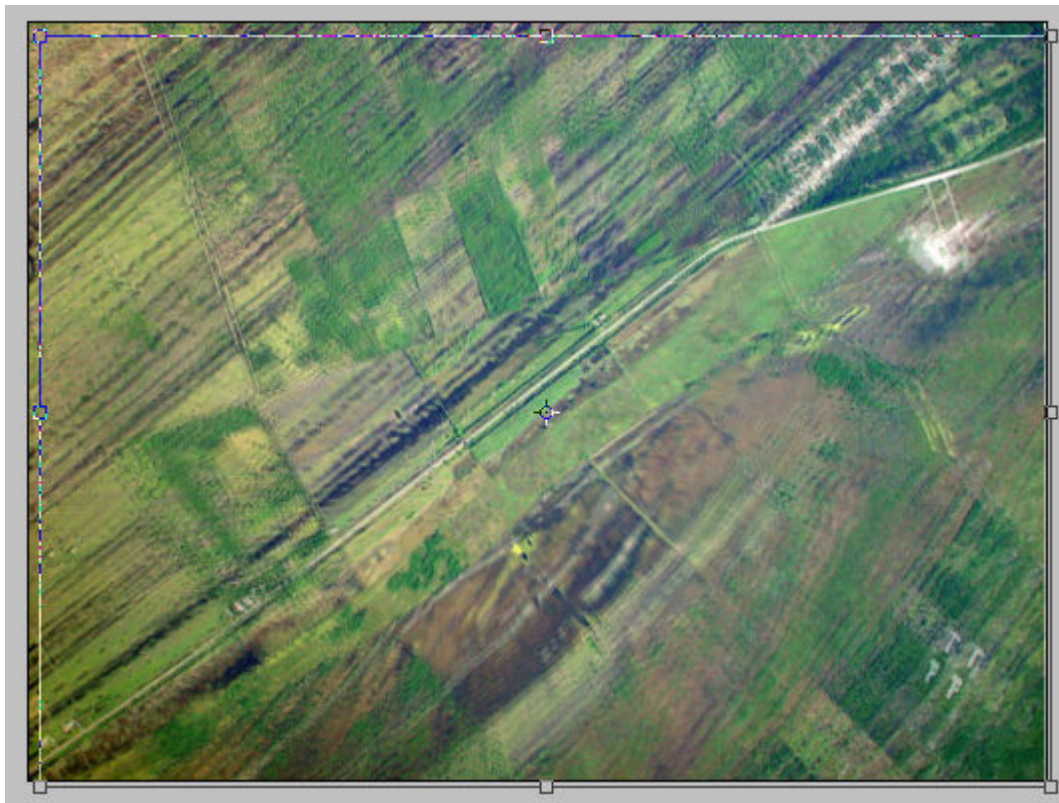


Figura 3.12 La imagen sin corregir ha sido empalmada con la imagen corregida, haciéndolas coincidir en la parte central, permitiendo apreciar las distorsiones tan grandes que existen en este caso (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

3.4 Corrección por la curvatura de la Tierra

Aparte de las correcciones hechas hasta ahora, es necesario considerar otras más que afectan la medición en forma real sobre las fotografías. Tradicionalmente, en la fotogrametría analítica, se han aplicado correcciones a la medición de las coordenadas de las fotos para compensar por los efectos de la curvatura de la Tierra. El razonamiento es que las elevaciones están referidas a un datum esférico aproximado, al nivel medio del mar.

Mientras que las ecuaciones fotogramétricas asumen una elevación cero y una superficie plana. Ha sido conocido que la práctica de hacer correcciones debido a la curvatura de la Tierra para medir fotocoordenadas no es teóricamente correcta. Sin embargo, también ha sido aceptado que usando la corrección, generalmente conduce a resultados más exactos, particularmente en determinadas elevaciones.

El primer problema para efectuar la corrección debido a la esfericidad de la Tierra, es que por la naturaleza de la proyección de las coordenadas del mapa, la corrección de las fotocoordenadas puede ir degradando la exactitud para cada coordenada espacial X o Y del objeto. Cuando se usa una proyección UTM, se pueden producir elevaciones y valores de Y exactos, pero los valores de X pueden estar degradados, debido a que la proyección UTM no es una curva en la dirección X.

La aproximación correcta, la cual evita la necesidad de corrección para cualquier clase de curvatura, emplea un sistema ortogonal tridimensional de coordenadas espaciales del objeto, es decir, un *SISTEMA LOCAL DE COORDENADAS VERTICALES*. La curvatura de la Tierra termina para pasar a ser un efecto de distorsión o ser una simple característica natural del terreno, y esto puede ser corregido en la misma forma como cualquier otra característica topográfica.

3.5 Corrección por refracción atmosférica

Es bien sabido que la densidad y por lo tanto, también el índice de refracción de la atmósfera, disminuye con el incremento de la altura. Debido a esta condición, los rayos de luz no viajan en línea recta, sino que se desvían de acuerdo con la *ley de Snell*.

En la figura 3.13, se puede notar que el rayo de luz entrante, proveniente del punto A de la figura, forma un ángulo α con la vertical. Si la refracción fuera ignorada, el rayo de luz puede aparentar más bien provenir del punto B que del punto A. Las ecuaciones fotogramétricas asumen que los rayos de luz viajan en trayectorias rectas, y entonces para compensar por el cambio en las trayectorias debido a la refracción, las correcciones se aplican en las coordenadas de la imagen.

En ésta figura, puede apreciarse, que si los rayos de luz provenientes del punto A han seguido un camino recto, entonces su imagen debería estar en a'. La distorsión angular debido a la refracción es $\Delta\alpha$, y la distorsión lineal en la fotografía es Δr . La refracción causa que todos los puntos de la imagen sean desplazados hacia el exterior, a partir de su correcta posición. La magnitud de distorsión por refracción se incrementa cuando aumenta la altura de vuelo y el ángulo α . La distorsión por refracción ocurre radialmente a partir del punto nadir fotográfico (punto principal de una foto vertical) y es cero en el propio punto.

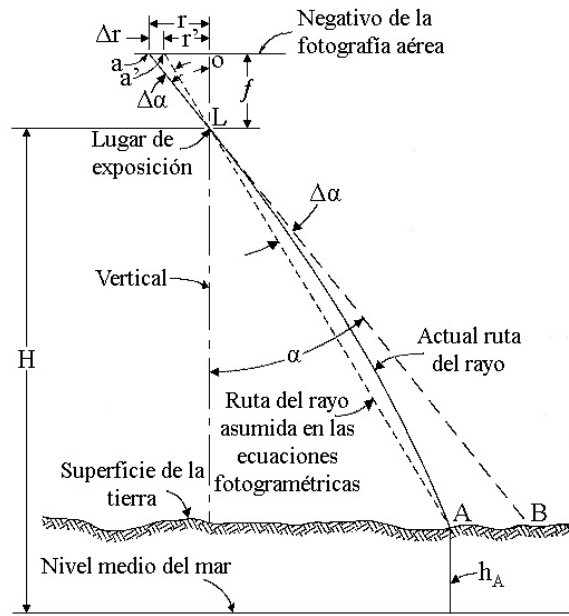


Figura 3.13 Refracción atmosférica en la fotografía aérea (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

La tendencia más común para la corrección de la imagen por refracción atmosférica, se basa en la suposición de que el cambio del índice de refracción del aire, es directamente proporcional al cambio de altura.

En resumen, la corrección por la curvatura de la Tierra y por refracción atmosférica son necesarias solamente cuando la altura de vuelo es grande y la cobertura de la imagen lo es también, sin embargo en este caso, en donde se obtienen fotografías de alta resolución, se tiene la necesidad de volar a baja altura, con respecto al nivel medio del terreno, y la cobertura de la imagen es pequeña, por lo que estos dos factores de corrección no se consideran necesarios para este caso.

CAPÍTULO

4

Ortorrectificación de imágenes digitales y formación de mosaicos

Una ortofoto es un producto que tiene las cualidades pictóricas de una fotografía y la corrección planimétrica de un mapa. Debido a esta característica tan especial, es el producto más demandado por los usuarios. Existen diferentes métodos que pueden ser aplicados para generar ortofotos digitales. En este capítulo se analizan y se comparan tres aproximaciones comúnmente usadas en la rectificación de fotografías aéreas digitales de pequeño formato. Dichos métodos de rectificación son: los polinomiales, los proyectivos y los diferenciales. Los primeros dos están definidos por transformaciones analíticas entre la imagen y la ortofotografía, sin considerar la geometría y la orientación de la cámara, siendo soluciones aproximadas. El último método, modela la realidad física del proceso de captura de las imágenes, considerando los elementos de orientación externa, por medio de las ecuaciones de colinealidad y corrige el desplazamiento por relieve. También elimina las distorsiones de la cámara, al incluir los parámetros de la orientación interna. Esto es particularmente importante cuando las imágenes se captan por cámaras digitales de pequeño formato o video-cámaras que introducen distorsiones importantes en las imágenes. De los tres métodos principales; el diferencial debe ser preferido sobre los otros dos, ya que, es el que menos deformaciones presenta después de rectificadas las imágenes.

En este capítulo se muestran los aspectos teóricos sobre la ortorrectificación de imágenes y formación de mosaicos.

4.1 LOS MAPAS Y LAS ORTOFOTOS

La combinación de las líneas que se pueden encontrar de manera regular en los mapas, junto con las fotografías aéreas, es muy deseable para muchas aplicaciones. Mientras que las líneas en los mapas usualmente describen elementos topográficos tales como curvas de nivel, caminos, construcciones y ríos; muchas características importantes para estudios temáticos como la geología, arqueología, explotación forestal, cubierta vegetal, se pierden. Sin embargo, todas estas características se encuentran en las imágenes aéreas. Para poder sobreponer imágenes y mapas, su geometría debe de ser la misma, para ello, se debe tener una representación ortogonal de todos los puntos del terreno en una superficie de referencia. Este proceso es llamado ortorectificación, y el mapa basado en la imagen resultante es la ortofoto.

Los métodos de ortorrectificación han ganado importancia paulatinamente, debido al hecho de que los mapas digitales, almacenados en sistemas de información geográfica, son susceptibles de ser combinados con imágenes. Para estar seguros de que pueden ser sobrepuestos en las localidades correctas, ambos elementos deben de estar relacionados con el mismo datum o proyección cartográfica.

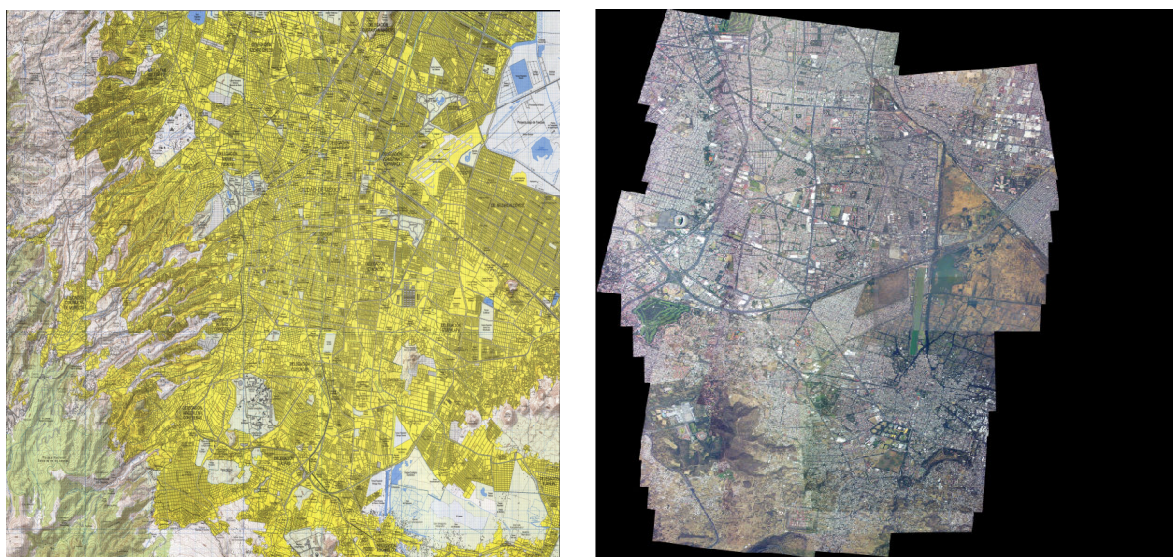


Figura 4.1 Un mapa y un ortomosaico de la misma zona. Se puede apreciar claramente la diferencia entre ambos productos cartográficos (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto Geografía, UNAM)

Como se explicará más adelante, el método de rectificación diferencial es de particular importancia, si lo que se pretende es crear un modelo más realista de la superficie de la Tierra. Debido a que las imágenes digitales y los datos digitales de elevación están relacionados a una cuadrícula planimétrica, ambos se encuentran

almacenados básicamente de la misma forma; como matrices de tonos de gris o como valores de elevación. La rectificación digital asigna un valor de gris a cada elemento de la cuadrícula del Modelo Digital de Elevación (DEM), de tal manera que, tanto la elevación como la densidad de la superficie, están almacenados en la misma localización planimétrica.

4.1.1 Georeferencia

Al momento de ser adquiridas, las imágenes digitales o de cualquier otro tipo, no presentan ninguna relación con un sistema de coordenadas Terrestres. En su lugar, lo que tienen como coordenadas base es una serie de renglones y columnas que especifican la localización de los elementos de imagen en un arreglo rectangular. Georeferenciar, o llevar a cabo un registro Terrestre de la imagen; es una técnica en la que los renglones y columnas de la imagen resultante, están alineados con el Norte y el Este en un sistema coordenado Terrestre.

Algunos autores, le llaman rectificación al proceso de georeferenciación, sin embargo, en el contexto fotogramétrico, el término rectificación es reservado al proceso de remover los efectos de inclinación de una fotografía aérea (Wolf, 2000).

4.1.2 Rectificación

La rectificación es el proceso de producir fotografías verticales equivalentes, a partir de imágenes con un cierto grado de inclinación. Las fotografías verticales obtenidas son llamadas: *fotografías rectificadas*. Éstas son teóricamente fotos verticales verdaderas y como tales, están libres de corrimientos debidos a la inclinación. Sin embargo, siguen conteniendo desplazamientos en la imagen y variaciones de escala debidas al relieve. Estos errores pueden ser removidos mediante un proceso llamado *ortorrectificación*, donde el producto obtenido es una *ortofoto*. Las ortofotos son preferidas sobre las fotos rectificadas debido a que poseen una calidad geométrica superior.

4.2 ORTORRECTIFICACIÓN

La ortorrectificación es un proceso que consiste en remover los errores geométricos inherentes dentro de las fotografías y generar una representación plana del terreno. Las variables que contribuyen a los errores geométricos son las siguientes:

- *La orientación de la cámara y el sensor, al momento de la toma (elementos de orientación externa)*

- *Errores sistemáticos asociados con la cámara y el sensor (elementos de orientación interna)*
- *Desplazamiento debido al relieve (diferencias de escala)*
- *Curvatura de la tierra (representación plana)*

Como en el capítulo anterior, los elementos de orientación interna se determinan mediante un proceso de calibración de la cámara, y son removidos antes de pasar a la formación del mosaico.

Mediante la técnica de resección de una imagen, es posible determinar los elementos de orientación externa, es decir, este método nos define los ángulos de orientación asociados con la cámara y el sensor. Otra manera de determinar los ángulos de orientación de cada imagen es de forma directa, utilizando un sistema de medición inercial que captura la desviación con respecto a la horizontal y la dirección de vuelo, para todas y cada una de las imágenes.

Los efectos del desplazamiento debido al relieve, son tomados en cuenta utilizando un Modelo Digital de Elevación (MDE); ya que éste permite determinar la altura de cada elemento de imagen, calcular entonces su posición y escala (Prado, 2000).

Los efectos de la curvatura terrestre son significativos, si existe un gran bloque de fotografías o si las imágenes de satélite cubren áreas extensas. Pero como se mencionó también en el capítulo anterior, ni la curvatura de la tierra, ni los efectos atmosféricos serán tomados en cuenta para la formación de mosaicos en la fotografía aérea digital de pequeño formato que se utiliza.

La aplicación sistematizada de las ecuaciones de colinealidad, para cada píxel, produce una ortofoto. La *figura 4.2* ilustra la condición de colinealidad para un punto en el terreno (P), en el MDE. Las coordenadas X,Y del punto P están basadas en renglones y columnas dentro del arreglo del MDE y su coordenada Z se encuentra almacenada en el arreglo del MDE en esa posición. Dadas las coordenadas X,Y,Z del punto P y los valores de orientación externa para la fotografía, las ecuaciones de colinealidad son resueltas para obtener las fotocoordenadas x_p y y_p . Estas fotocoordenadas definen la posición después de que la imagen se ortorrectificó.

Después de que la imagen se ortorrectificó, cada píxel dentro de una imagen adquiere fidelidad geométrica. Así que las mediciones que se hacen sobre una imagen ortorrectificada, representan las posiciones de los objetos; como si ellas fueran hechas directamente sobre la superficie terrestre.

Una imagen o una fotografía con una proyección ortogonal, es aquella en la cual cada punto luce como si un observador estuviera mirando directamente en línea recta a través de ella, a lo largo de una línea de vista que es perpendicular

(ortogonal), a la superficie terrestre (en el lugar del vuelo). La imagen ortorrectificada resultante es conocida como ortoimagen digital.

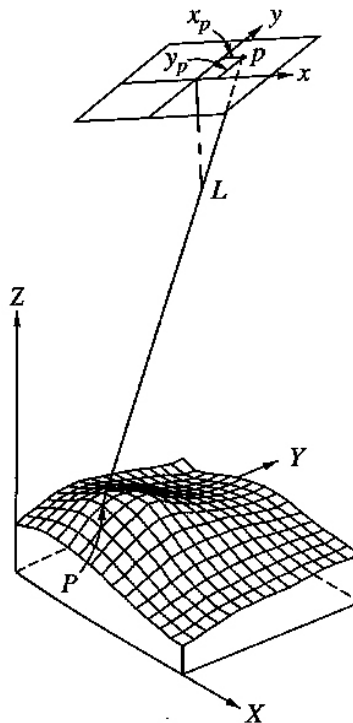


Figura 4.2 Relaciones de colinealidad para un punto P del MDE y su correspondiente imagen p (Wolf, 2000)

El desplazamiento debido al relieve es corregido tomando cada píxel de un MDE y encontrando la posición equivalente en la imagen. Un valor de brillo es determinado para esta posición, basado en el remuestreo de los píxeles circundantes. El valor de brillo, la elevación y la información de orientación exterior, son usadas para calcular la posición equivalente en el archivo de la ortoimagen.

La ortorrectificación se basa en los datos de elevación digital, a menos que el terreno sea plano. Existen varias fuentes de datos de elevación tales como los MDE que son creados automáticamente, a partir de pares de imágenes estereoscópicas. También son obtenidos mediante levantamientos topográficos convencionales y a través de técnicas más novedosas como el LIDAR (Light Detection and Ranging o Medición de distancias por medio de luz).

4.2.1 Aerotriangulación

La aerotriangulación es la aplicación simultánea de un proceso de resección y otro de intersección de rayos de imagen, capturados por una cámara aérea. Los rayos

de imagen conjugados proyectados desde dos o más fotografías que se traslapan, se intersectan en puntos comunes sobre el terreno, determinándose así las coordenadas en el espacio tridimensional de cada punto. El conjunto total de rayos de imagen es asignado a puntos conocidos en el terreno por medio de un proceso de ajuste. Entonces, cuando el ajuste terminó, las coordenadas terrestres de algunos puntos desconocidos en el terreno se determinan a través de la intersección de rayos de imagen ajustados.

El proceso de resección se define de una manera muy simple, como aquel método que nos permite obtener los elementos de orientación externa de la plataforma aérea, al momento de efectuar cada toma; utilizando al menos tres puntos de control terrestre conocidos. Este proceso hace uso de las ecuaciones de colinealidad, considerando las relaciones geométricas que existen entre la cámara y el terreno al momento de capturar una imagen. Estas relaciones geométricas se describirán, de manera resumida, en la sección 4.4.5

El propósito de la aerotriangulación es el de extender el control tanto horizontal como vertical, a partir de relativamente pocos puntos de control iniciales, a todos aquellos puntos desconocidos del terreno que se incluyan en el proceso. Los puntos de control suplementarios son llamados puntos de transferencia (pass points) y serán usados para controlar el proceso de mapeo subsecuente. Estos puntos de transferencia se localizan estratégicamente para que se encuentren visibles en las tres imágenes adyacentes de la tira(bloque de imágenes). Se llama *modelo* o *estereomodelo* a aquella porción de la imagen que se traslapa con la siguiente y que se encuentra dentro de los puntos de transferencia. Cada estereomodelo es escalado y nivelado usando los valores coordenados ajustados de los puntos de transferencia localizados dentro del mismo.

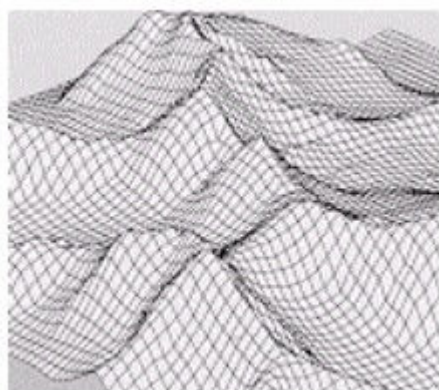
La aerotriangulación es esencialmente una herramienta de interpolación, capaz de extender los puntos de control hacia algunas áreas localizadas entre puntos de control terrestre, a través de varios estereomodelos contiguos no controlados. Dentro de una tira o bloque de imágenes deben existir puntos de control, obtenidos en campaña, a intervalos de varios estereomodelos para evitar la propagación de errores durante el ajuste de las coordenadas de los puntos transferidos.

4.2.2 Generación de modelos digitales de elevación

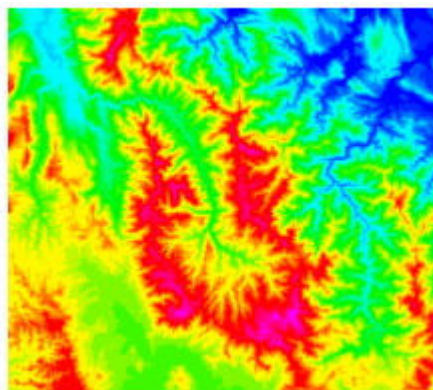
Un Modelo Digital de Elevación (MDE), es una representación de las elevaciones del terreno, mediante valores numéricos. Es una forma simplificada de la geometría de la superficie del terreno. Consiste en una serie de puntos con coordenadas conocidas referenciadas a un sistema de coordenadas bidimensionales a las que se les asocia un valor de elevación.

En términos técnicos, un Modelo Digital de Elevación es un grupo de valores que representa puntos sobre la superficie del terreno cuya ubicación geográfica está

definida por coordenadas "X" y "Y" a las que se les agrega un valor de "Z" que corresponde a la elevación. Los puntos deben estar espaciados y distribuidos de modo regular, de acuerdo con un patrón cuadrículado (INEGI, 2006).



*Representación tipo malla
en vista isométrica*



*Representación en dos dimensiones
por medio de tonos*

Figura 4.3 Diferentes representaciones gráficas de un MDE (INEGI, 2006)

El modelo digital de elevación normalmente se conforma mediante conjuntos de datos tipo raster. La estructura de estos archivos es un arreglo matricial de valores de un atributo particular. Para el caso de las imágenes, los valores son de la reflectancia del terreno para cada elemento de imagen. Cuando se trata de los modelos de elevación, se habla de valores de altura del terreno.

Los valores de elevación pueden ser manipulados digitalmente y desplegados en un monitor como una malla, o como un conjunto de celdas, a la que se asocian los valores de altura de cada una de las intersecciones de líneas de la malla. Para este caso, la presentación visual es una vista isométrica.

Para el caso de que a las celdas de una cuadrícula raster se le asignen los valores correspondientes a los intervalos de alturas diferenciados por gamas, ya sea de tonos de gris o de colores, la presentación gráfica puede ser en dos o tres dimensiones.

Los MDE para su uso a nivel regional, como los que genera el INEGI(2006); se encuentran disponibles a una escala de 1: 50 000, con las siguientes características:

- Los valores de "z" son de altitud o de alturas ortométricas, en unidades enteras de metro y están referidos al nivel medio del mar, con base en el Datum Vertical para Norteamérica de 1929: NAVD29 (INEGI, 2006).

- Los puntos del MDE están referenciados horizontalmente al sistema de coordenadas de proyección Universal Transversa de Mercator (UTM). El Sistema de referencia geodésico es NAD27 o ITRF92 Época 1988.
- El cubrimiento de cada MDE corresponde al formato regular de 15' de latitud por 20' de longitud de la cartografía elaborada a escala 1:50 000 por el INEGI.
- El espaciamiento (resolución espacial) entre las intersecciones de la retícula de elevaciones es de 50 metros en las dos direcciones, es decir, la retícula forma una cuadrícula regular de 50x50 metros de lado. El número de puntos y en consecuencia el tamaño del archivo, varía según la latitud de la ubicación del área del mapa.

En el INEGI los MDE escala 1:50 000 se generan por dos métodos digitales: mediante la conversión de curvas de nivel de mapas topográficos escala 1:50 000, originalmente generados por el INEGI, o bien, por el método fotogramétrico de correlación de imágenes (INEGI, 2006).

A) Generación de MDE a partir de la conversión de mapas

En la elaboración de los MDE por conversión de mapas se hace uso de Las cartas originales por la restitución fotogramétrica de curvas de nivel, los cuales, al estar en una base de material plástico que tiene características físicas de estabilidad dimensional, aseguran que no existe deformación de la información con el paso del tiempo.

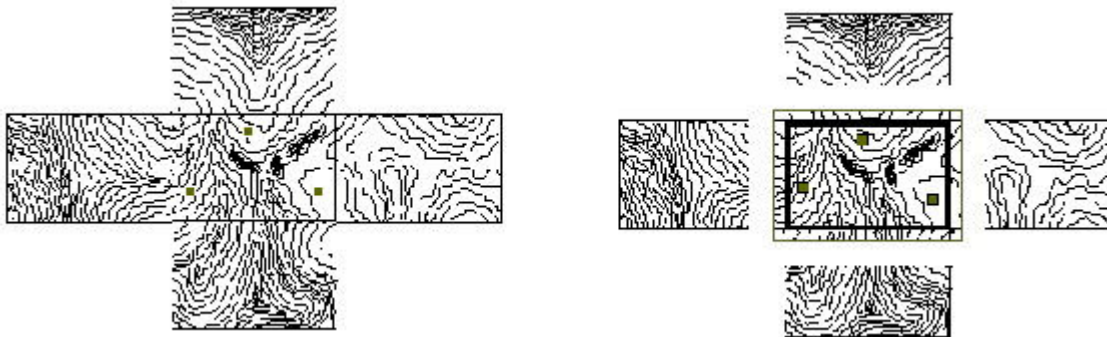


Figura 4.4 Esquema de unión de mapas adyacentes para agregar la franja adicional de curvas de nivel (INEGI, 2006)

Lo que se obtiene una unión(positivo) de curvas de nivel con extensión de curvas que garantiza la liga entre conjuntos de datos. El positivo obtenido se digitaliza con un equipo automático para generar un archivo en formato raster, mismo que se

vectoriza mediante un programa de computadora interactivo de tipo “seguidor de línea”.

El archivo vectorial resultante es el insumo para la generación de la matriz de datos para el MDE. Para ello se crea, a partir de los vértices de los vectores de las curvas de nivel, una red irregular de triángulos con la que se obtienen, por interpolación, los valores de altura que serán usados para calcular los valores de una red regular de puntos(INEGI, 2006).

B) Generación de MDE usando el método fotogramétrico de correlación de imágenes

Los métodos fotogramétricos de captura de MDE son ampliamente usados hoy en día. Para su elaboración es necesario disponer de fotografías aéreas y puntos de control terrestre, instrumentos analógicos, analíticos o digitales y paquetes de programación específicos para esta aplicación.

Cuando un modelo fotogramétrico está orientado de manera absoluta en un instrumento, cualquier punto del modelo, incluyendo los puntos mismos del MDE, puede ser identificado por la marca de medición del instrumento, por lo que sus coordenadas pueden registrarse en un archivo digital.

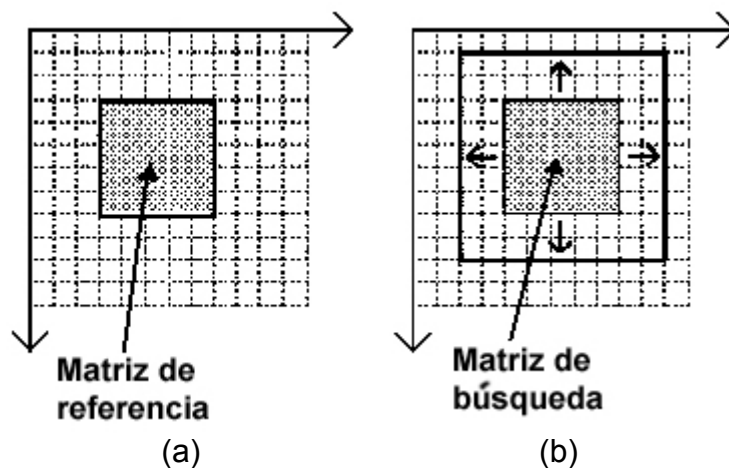


Figura 4.5 La matriz de referencia (a), se toma como elemento para comparar los tonos de gris(b), con la matriz de búsqueda (INEGI,2006)

La técnica de *correlación de imágenes*, también llamada *correlación cruzada*, (INEGI, 2006), se fundamenta en la comparación de imágenes digitales a partir de pares estereoscópicos de fotografías aéreas. Este es un método automatizado de generación de MDE. En este método se extraen subimágenes homólogas digitales de ambas fotografías, izquierda y derecha, que subsecuentemente se correlacionan por medio de su información radiométrica (los valores de la escala

de tonos grises), para que se determinen puntos del MDE a partir de píxeles homólogos de cada imagen.

Para calcular las coordenadas planimétricas de los puntos del MDE, así como sus elevaciones, se hace uso tanto de las coordenadas de la fotografía, obtenidas por transformación del píxel para cada foto, en todos los pares de píxeles homólogos, así como de los elementos de orientación externa de las fotos aéreas.

Por supuesto que los puntos del MDE generados por este procedimiento, no se encuentran en una retícula o malla espaciada regularmente, por lo que los puntos para tener una red regular, se obtienen por interpolación(INEGI, 2006).

4.2.3 Correlación estructural de imágenes para el reconocimiento automático de puntos de control

La importancia de los métodos de correlación se ve reflejada en su aplicación para el reconocimiento automático de puntos de amarre entre imágenes. Este procedimiento es de particular importancia en la aerotriangulación.

La correlación basada en objetos determina la correspondencia que existe entre dos elementos. La mayoría de las técnicas basadas en objetos extraen elementos puntuales (esto se conoce como correlación de objetos puntuales), para diferenciarlos de otros, tales como líneas y formas complejas. Los objetos puntuales son comúnmente mencionados como puntos de interés. Las áreas de contraste pobre deben ser evitadas cuando se hace correlación basada en objetos.

Para implementar la correlación basada en objetos, éstos deben ser extraídos de la imagen (*Moravec, 1988*). Después de que los objetos son extraídos, se comparan los atributos de éstos entre dos imágenes. El par de objetos que tienen los atributos con el mejor ajuste se reconoce como una correlación.

La correlación basada en relaciones estructurales también se conoce como *correlación estructural*. Esta clase de técnica de correlación usa los objetos de la imagen y la relación entre los objetos. Con la correlación basada en relaciones, las estructuras de imágenes correspondientes pueden ser reconocidas automáticamente, sin ninguna información a priori. Sin embargo, el proceso es bastante lento debido a que se está trabajando con diferentes tipos de información.

Debido a la gran cantidad de datos de imágenes, la pirámide de imágenes es usualmente adoptada durante las técnicas de correlación de imágenes para reducir el tiempo de procesamiento y para incrementar la confiabilidad de la misma. La pirámide es una estructura de datos que consiste de la misma imagen representada varias veces, a una resolución espacial menor cada vez.

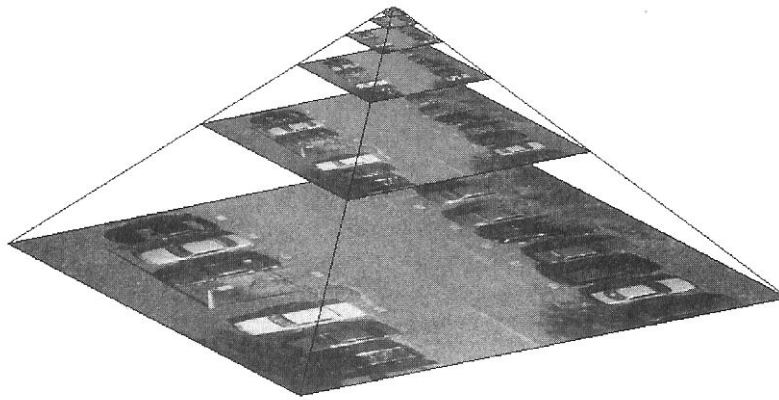


Figura 4.6 Representación piramidal de imágenes a diferente resolución (Wolf, 2000)

El proceso de correlación es realizado en cada nivel de resolución. La búsqueda se realiza primero en cada nivel de resolución inferior y subsecuentemente en el nivel más alto.

4.3 FORMACIÓN DE MOSAICOS

Para llevar a cabo los diferentes estudios sobre un territorio o zona en particular, es necesario abarcarla de manera completa con un barrido fotográfico; esto significa que su ámbito va más allá de una sola imagen aérea. Por ello, se debe unir varias fotografías en una sola imagen más grande, lo que implica la formación de un modelo bidimensional del terreno, que contiene el conjunto de fotografías aéreas rectificadas y unidas en un solo formato (Hernández, 2003). Siempre es deseable contar con una base cartográfica para poder efectuar el mosaico de una zona, y que dicha base sea adecuada a la escala que se maneja.

Cuando se ha hecho todo el trabajo correctamente, las uniones entre fotografías serán perfectas. Así el mosaico que se estudia, tendrá una calidad comparable a la de una ortofoto realizada con estaciones fotogramétricas digitales.

Todos los métodos de ortorrectificación se facilitan cuando existen numerosos elementos geográficos artificiales (edificios, caminos, parcelas, etc.) ya que de esta manera es más sencillo encontrar puntos de control y de amarre sobre las imágenes. Una cartografía digital, restituida, de escala igual o mayor a la de las ortofotos a crear, puede proporcionar un gran número de puntos de control, para cumplir con los requisitos mínimos del proceso de ortorrectificación. Sus coordenadas son bien conocidas, a diferencia de los puntos de amarre, que solo sirven para ligar una imagen con las adyacentes.

Para el procesamiento de un ortomosaico el número mínimo requerido es de tres fotos, cada una debe tener una coordenada asociada y puntos de amarre distribuidos al azar para asegurar que el conjunto sensor-cámara esté modelado de manera exacta.

Si se está procesando una faja de imágenes adyacentes, por cada estereomodelo deben de existir dos puntos de control horizontal y tres de control vertical. Para incrementar la calidad de la ortorectificación es deseable contar con más puntos de control que ofrezcan redundancia. Para una tira de imágenes debe tenerse un traslape longitudinal del 60%; de esta manera, las posiciones de imágenes de las fotos se miden en las áreas de traslape entre imágenes.

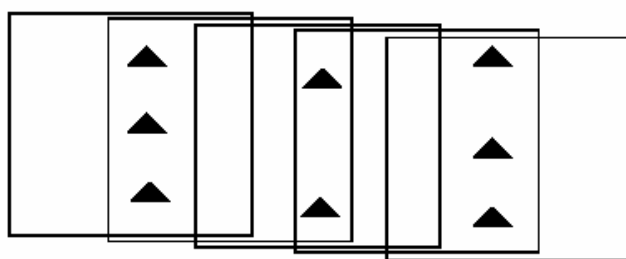


Figura 4.7 Se muestra la configuración estándar de los GCP (Ground Control Points o Puntos de Control Terrestre) para un bloque de imágenes, que comprende cuatro tiras de imágenes que se traslapan (Corbley, 2000)

En este caso, los puntos de control terrestre forman una red geométrica fuerte de observaciones. Adicionalmente, siempre que sea posible, se deben localizar GCP que estén en muchas imágenes, alrededor de los bordes exteriores de los bloques y a determinadas distancias unos de otros dentro del bloque.

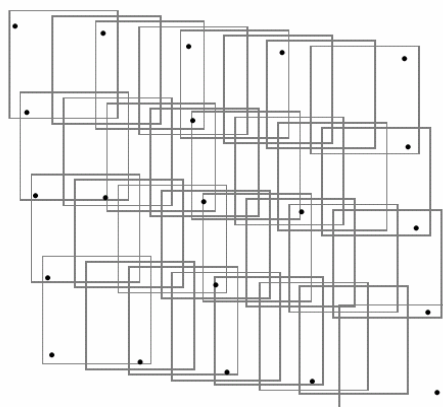


Figura 4.8 Puntos de amarre en un bloque de imágenes (Corbley, 2000)

Existen por otra parte los puntos de amarre, cuyas coordenadas exactas en el terreno no son conocidas, pero son claramente reconocibles visualmente en el área de traslape entre dos o mas imágenes. Las posiciones de imagen correspondientes a los puntos de amarre que aparecen en las áreas de traslape se deben identificar y medir manual o automáticamente.

Los puntos de amarre deben de estar bien definidos visualmente en todas las imágenes. Idealmente, ellos deberán tener un buen contraste en las dos direcciones, como ocurre con la esquina de un edificio o la intersección de dos vías y deben de estar bien distribuidos sobre toda el área del bloque. Lo más usual es que se definan nueve puntos de amarre en cada imagen para obtener una adecuada triangulación del bloque.

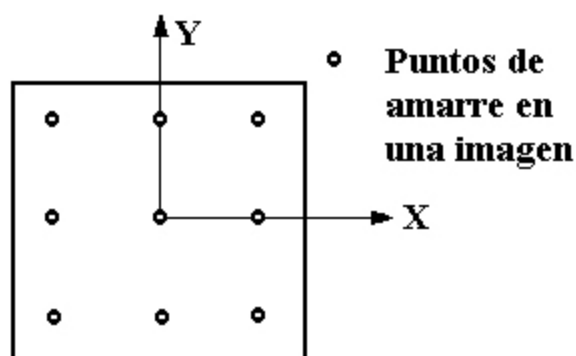


Figura 4.9 En un bloque de imágenes con traslape longitudinal del 60% y lateral entre 25 y 30%, nueve puntos son suficientes para amarrar tanto el bloque como las tiras individuales (Corbley, 2000)

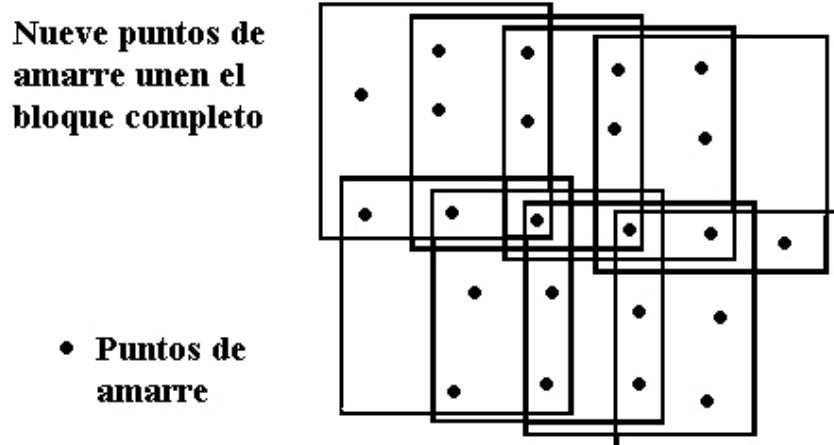


Figura 4.10 Nueve puntos de amarre en cada imagen, mantienen el bloque completo unido (Corbley, 2000)

4.4 Transformación de imágenes digitales en ortofotos

Los tres métodos que son mayormente utilizados en sistemas de procesamiento de imágenes para generar ortofotos, y que representan solo una parte del espectro de aproximaciones disponibles, son los que se verá a continuación. Antes se introducirá un concepto que es esencial para estos propósitos y que es el remuestreo de la imagen.

4.4.1 Remuestreo de la imagen

En el paso final de la transformación de una imagen digital a una ortofoto, para el reacomodo definitivo de los píxeles en su ubicación exacta, es posible utilizar el método directo o indirecto. El método indirecto toma cada ubicación de píxel de la imagen resultante, determina su posición en la imagen original mediante la transformación seleccionada f_x, f_y (ecuación 4.1) e interpola el valor de gris a través de un método de remuestreo (Fig. 4.11.a); esto es,

$$\begin{aligned}x &= f_x(x', y') \\ y &= f_y(x', y')\end{aligned}\tag{4.1}$$

Que es la transformación indirecta del punto (x', y') a partir de la ortofoto, hacia la imagen original, donde:

x, y	son las coordenadas del píxel de la imagen original,
x', y'	son las coordenadas del píxel de la imagen resultante (ortofoto), y
$f_x(), f_y()$	son las funciones de transformación.

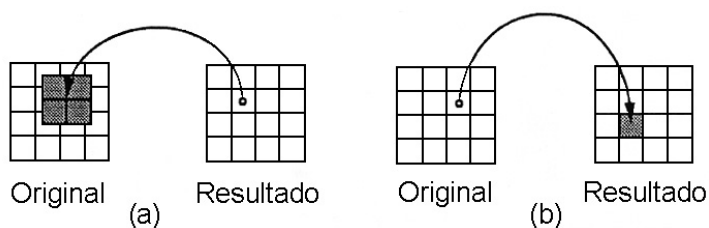


Figura 4.11 Transformaciones indirecta (a) y directa (b) de un píxel (Novak, 1992)

Por otro lado, el método directo inicia a partir de la ubicación del píxel en la imagen original, transforma sus coordenadas dentro de la imagen resultante, y coloca el valor del tono de gris, en el píxel entero más cercano (figura 4.11.b). El método directo, solamente asigna valores en tonos de grises que son dados por la

imagen original, por tanto, el contraste y la densidad de tonos de gris, no son cambiados por la transformación. Sin embargo, puede ocurrir que algunos pixeles no tomen ningún valor en tono de gris, lo cual significa que serán llenados después, en un segundo paso sobre la imagen resultante. La transformación indirecta asigna exactamente un valor de gris a un solo píxel en la imagen resultante, como un par de coordenadas con valor entero. Esto debe ser calculado por interpolación, a partir de los valores originales de tonos de grises. Esto es necesario, tanto como la ubicación del píxel; el cual fue transformado en el original, y que no corresponde a una posición entera. En esto consiste el remuestreo de las imágenes y es indispensable en el proceso de ortorrectificación.

Algunos métodos sencillos de remuestreo se presentan en la tabla 4.1, donde se compara el tamaño de la ventana de pixeles involucrados para la reasignación del nuevo valor del píxel y nos muestra el número de multiplicaciones necesarias para la interpolación de un solo píxel.

Tabla 4.1 Comparación de tres métodos diferentes de remuestreo

Método	Ventana (pixeles)	Multiplicaciones
Remuestreo del vecino más cercano	(1X1)	0
Remuestreo bilineal	(2X2)	4
Convolución cúbica	(4X4)	110

Para la mayoría de las aplicaciones, el remuestreo bilineal produce resultados suficientemente eficientes. La convolución cúbica produce un mejor contraste que el remuestreo bilineal, el cual alisa los valores originales en tonos de grises. El remuestreo del vecino más cercano, produce patrones escalonados en la mayoría de las líneas horizontales o verticales; sin embargo, es un método computacional menos intenso (Hernández, 2003).

4.4.2 Ortorrectificación polinomial

La transformación entre la imagen original y la imagen ortorectificada es llevada a cabo con polinomios (ecuación 4.2). Esto es:

$$\begin{aligned} x &= x'^T A \quad y' = fx(x', y') \\ y &= x'^T B \quad y' = fx(x', y') \end{aligned} \tag{4.2}$$

Donde:

- x, y son las coordenadas de la imagen original,
- x', y' son las coordenadas de la imagen rectificadas, y
- A, B son las matrices de coeficientes de los polinomios

$$X'^T = (1, x', x'^2, x'^3, \dots)$$

$$Y'^T = (1, y', y'^2, y'^3, \dots)$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & \dots \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & \dots \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_{00} & b_{01} & b_{02} & \dots \\ b_{10} & b_{11} & b_{12} & \dots \\ b_{20} & b_{21} & b_{22} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

(Hernández, 2003)

Este método corrige las distorsiones de la imagen, utilizando como referencia un conjunto muy denso, de puntos de control en el terreno. El orden del polinomio depende del número de puntos de control disponibles. Mientras mayor sea el orden, mayor será la exactitud del resultado de la rectificación. Esta aproximación es completamente independiente de la geometría de la cámara, de tal manera que puede usarse tanto para las imágenes de satélite, como para las fotografías aéreas. A causa de la transformación polinomial, la imagen original es corrida, rotada, escalada y extendida para que mejor se ajuste a los puntos de referencia dados. Esta es la razón principal por la que el método, a menudo más usado, para la rectificación de imágenes de satélite, cuya geometría y distorsión son, en ocasiones, difíciles de modelar. Además, el desplazamiento por relieve, debido a la topografía de la superficie terrestre, es relativamente pequeño, comparado con la altura a la cual orbitan los satélites y no influye significativamente en el resultado final (Novak, 1992).

Los polinomios son muy fáciles de usar para la rectificación, aunque pueden causar problemas y errores en la imagen transformada, ya que no pueden corregir adecuadamente los desplazamientos por relieve, ni pueden considerar la geometría especial del sistema de adquisición de imágenes. Para un usuario no experimentado, un polinomio de alto orden, puede parecer que provee un ajuste perfecto en los puntos referenciados, dado que los residuos son pequeños; sin embargo, debido a las ondulaciones entre los puntos de referencia, puede caerse en errores grandes (Novak, 1992). La gran ventaja de la transformación polinomial, es el hecho de que todas las distorsiones de la imagen se corrigen simultáneamente de una forma relativamente simple.

4.4.3 Transformación proyectiva

La transformación proyectiva, describe la relación entre dos planos (figura 4.12). Esta es definida por ocho parámetros (ecuación 4.3), la cual puede ser derivada a partir de cuatro puntos localizados en un plano y sus correspondientes coordenadas en la imagen. Los elementos de las orientaciones externa e interna no son necesarios, porque están implícitos en esos parámetros. Este método se

usa principalmente para rectificar fotografías aéreas de un terreno plano o imágenes de fachadas de edificios.

$$\begin{aligned} X &= \frac{(a_1x' + a_2y' + a_3)}{(c_1x' + c_2y' + 1)} = f_x(x', y') \\ Y &= \frac{(b_1x' + b_2y' + b_3)}{(c_1x' + c_2y' + 1)} = f_y(x', y') \end{aligned} \quad (4.3)$$

Donde $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2$ son los parámetros proyectivos,

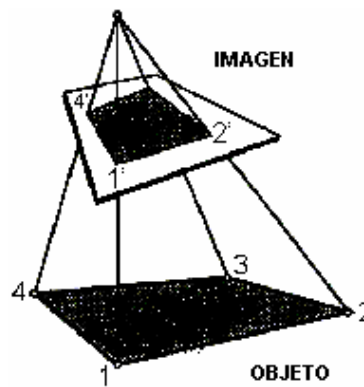


Figura 4.12 Las relaciones proyectivas entre un objeto y la imagen, están definidas por ocho parámetros, que pueden ser determinados a partir de cuatro puntos de control (Wolf, 2000)

4.4.4 Rectificación diferencial

El término *rectificación diferencial*, tiene su origen en el método de rectificar pequeñas partes de una fotografía a la vez, son elementos lineales o elementos de plano, que implican aproximaciones a la superficie real del terreno, que serán tanto más exactas cuanto menor sean las dimensiones de la zona elemental de fotografía transformada en ortofotografía. Los ortoproyectores análogos o analíticos convencionales, realizan este trabajo por medio de una transferencia óptica de la imagen. Una pequeña rendija es movida sobre la ortofoto, mientras la parte correspondiente en la imagen original, se localiza mediante corrimientos, rotaciones y escalamiento. Para la rectificación diferencial digital, cada píxel es transferido por separado desde la imagen original, hacia la imagen resultante usando el método indirecto, como se ve en la ecuación 4.1.

Un modelo digital de elevación, es necesario, para corregir el desplazamiento por relieve en la imagen. En el caso digital, el objetivo de la rectificación, es asignar valores de tonos de gris a partir de una fotografía aérea o una imagen de satélite,

a cada uno de los elementos del MDE. Después de la rectificación, tanto la elevación como la densidad son almacenados en la misma ubicación (x, y) . Para determinar los valores en tonos de grises, se sigue este procedimiento: las coordenadas tridimensionales (x, y, z) definidas para un píxel del MDE, se transforman dentro de la imagen, por las ecuaciones de colinealidad, las cuales se exponen en el apartado 4.4.5. En la posición (x, y) de la imagen, el valor de tonos de gris es interpolado por uno de los métodos de remuestreo. La densidad se almacena en la ubicación X, Y de la ortofoto digital, que es igual a la posición del punto del MDE (figura 4.14).

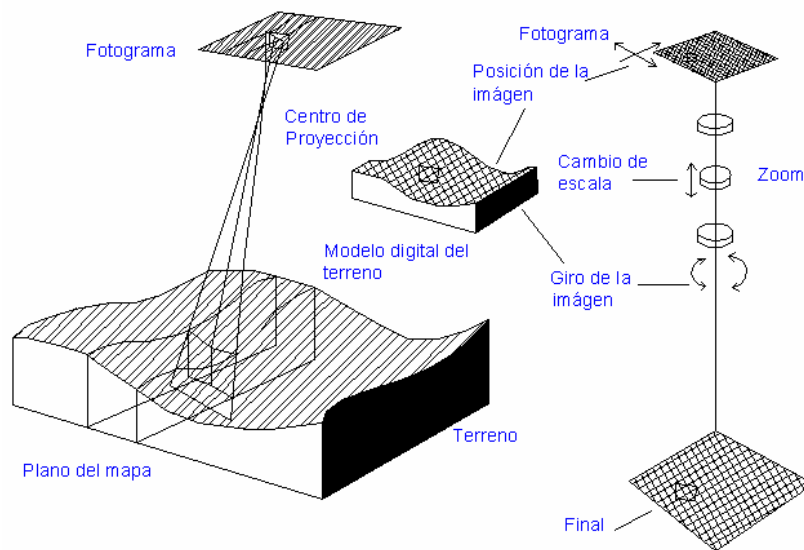


Figura 4.13 Un ortoprojector analítico es un sistema que transforma la proyección central de una fotografía en una proyección ortogonal.

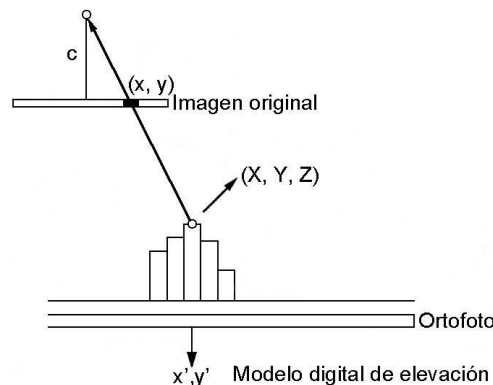


Figura 4.14 Cada punto de la superficie tridimensional, definido como un píxel en el MDE, es transformado en la imagen, para encontrar la densidad a partir de una imagen digital. Este valor de tono de gris es asignado a la ortofoto en la misma localización del píxel que en el MDE (Hernández, 2003)

4.4.5 Ecuaciones de colinealidad

Posiblemente, la relación fundamental y más útil en fotogrametría sea la condición de colinealidad. Ésta implica que tanto la plataforma de adquisición de la imagen, así como cualquier objeto en el terreno y su correspondiente fotoimagen se encuentran todos en una sola línea recta en el espacio tridimensional. Esta condición de colinealidad se puede ver expresada en la figura 4.15 donde L , a y A se localizan en una línea recta.

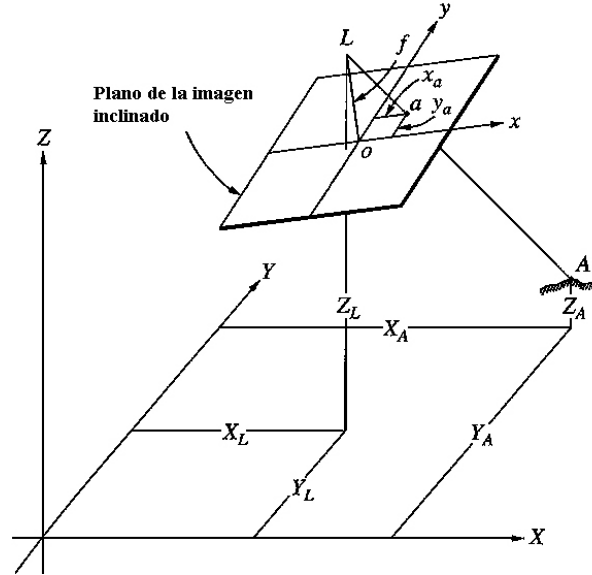


Figura 4.15 La condición de colinealidad (Wolf, 2000)

Dos ecuaciones expresan la condición de colinealidad para cualquier punto en la imagen; una para la foto coordenada x y otra para la coordenada y . Las ecuaciones de colinealidad se expresan como:

$$\begin{aligned} x_a &= x_0 - f \left[\frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right] \\ y_a &= y_0 - f \left[\frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right] \end{aligned} \quad (4.4)$$

donde x_a, y_a son las fotocoordenadas del punto a que se encuentra sobre la imagen.

X_A, Y_A, Z_A son las coordenadas del punto A que se encuentra sobre el terreno.

X_L, Y_L, Z_L son las coordenadas espaciales del centro de la toma.

f es la distancia focal de la cámara.

x_0, y_0 son las coordenadas del punto principal

m son funciones de los ángulos de orientación de la cámara al momento de la toma.

Para realizar esta transformación, son necesarios los siguientes parámetros:

- Los elementos de orientación interna de la cámara: x_0, y_0, c
- Los elementos de orientación externa de la cámara: X_L, Y_L, Z_L (el centro de la toma), m es una matriz de rotación compuesta de los ángulos de orientación ω, ϕ, κ .
- El espaciamiento entre píxeles de la imagen digital (en unidades de la cámara): P_x, P_y en milímetros
- El tamaño de celda de los píxeles del MDE en unidades terrestres: g_x, g_y metros(m)
- Las coordenadas de referencia de un píxel del MDE en la proyección del mapa, las cuales se encuentran normalmente en la esquina superior izquierda del archivo del MDE.

4.4.6 Modelo-extendido

Una rectificación diferencial corrige el desplazamiento debido al relieve, las distorsiones introducidas por el lente y las desviaciones de la cámara durante la toma. Proporciona los mejores resultados y además puede emplearse con cualquier tipo de imagen (foto aérea, digital e imágenes de satélite). La exactitud de la rectificación diferencial puede ser mejorada extendiendo el modelo, añadiendo dos coeficientes que tienen como finalidad corregir las distorsiones radiales: simétrica, asimétrica y tangencial. Esto es especialmente importante si se utilizan cámaras CCD de pequeño formato o videocámaras para la adquisición de imágenes, debido a que sus lentes son de menor calidad comparados con los de las cámaras métricas, ya que muestran una distorsión considerable, como se explicó anteriormente.

La adición de parámetros, mejora la calidad de la rectificación, sin embargo, para este trabajo se optó por hacer la corrección geométrica de la imagen, en primer lugar, y la ortorectificación en un segundo paso, manteniendo la generalidad del método, pero sobretodo, tener un mejor control en cada uno de los procesos.

CAPÍTULO

5

Métodos para la generación de mosaicos y ortomosaicos

5.1 MOSAICOS CONTROLADOS Y ORTOMOSAICOS

En este capítulo se describen los procedimientos desarrollados para llevar a cabo la formación de mosaicos, a partir de imágenes aéreas digitales de pequeño formato. En primer lugar, se hace referencia a la construcción de mosaicos controlados utilizando el programa *photoshop®*, dado por entendido que al final no se obtiene un producto ortofotográfico, por tanto, es complicado establecer el error que se obtiene con este producto. Sin embargo, el control topográfico que se emplea para fijar exactamente la posición de los principales accidentes de un área, permite considerar que en los mosaicos controlados, la escala horizontal es precisa. En segunda instancia se expone lo concerniente a la utilización de programas especializados para la generación de ortomosaicos como son *PCI geomatics® Orthoengine* y *ERDAS® Imagine*. En éstos dos últimos casos se explican los procedimientos utilizados y los errores finales obtenidos, sin embargo, como *ERDAS Imagine* se encontraba disponible en versión para la computadora personal, fue el programa que mas se utilizó y el cual se describe con mayor detalle.

5.1.1 Programa Adobe Photoshop® 7.0

Dentro del Laboratorio de SIG y PR del Instituto de Geografía de la UNAM, este programa ha sido ampliamente utilizado para la generación de mosaicos de imágenes para su aplicación en diversos proyectos (*Peralta 2001, Peralta 2003*). Mediante su uso se estableció un método sencillo para el procesamiento y la formación de mosaicos de imágenes aéreas digitales. Este paquete presenta un entorno completo de edición profesional que permite trabajar de forma eficaz las

imágenes; ya que cuenta con un conjunto de herramientas para escalar, rotar, traslapar y aplicar filtros de realce y mejoramiento a las fotografías; además permite el manejo de bandas de imágenes: infrarrojas y visibles. Otro de sus atributos importantes, es que permite cambiar la transparencia u opacidad de las imágenes; esto es muy importante cuando se está llevando a cabo el registro de una imagen con otra, porque se tiene la ventaja de aumentar o disminuir la densidad de color, para obtener una mejor identificación de rasgos y lograr un mejor empalme entre imágenes.

En la *Figura 5.1* muestra uno de los mosaicos fotográficos que se elaboró siguiendo la metodología que a continuación se describe y que corresponde a un levantamiento aéreo sobre el Valle de México en el año 2001. El mosaico final está compuesto por 803 fotografías y fue necesario llevar a cabo 11 líneas de vuelo para obtener el levantamiento completo. Cada fotografía aérea digital abarca una área de aproximadamente 7 km², es decir que cada imagen tiene 3.5 x 2.0 Km. La altura de vuelo fue de 18,000 pies sobre el nivel del mar (5,486.4 metros).

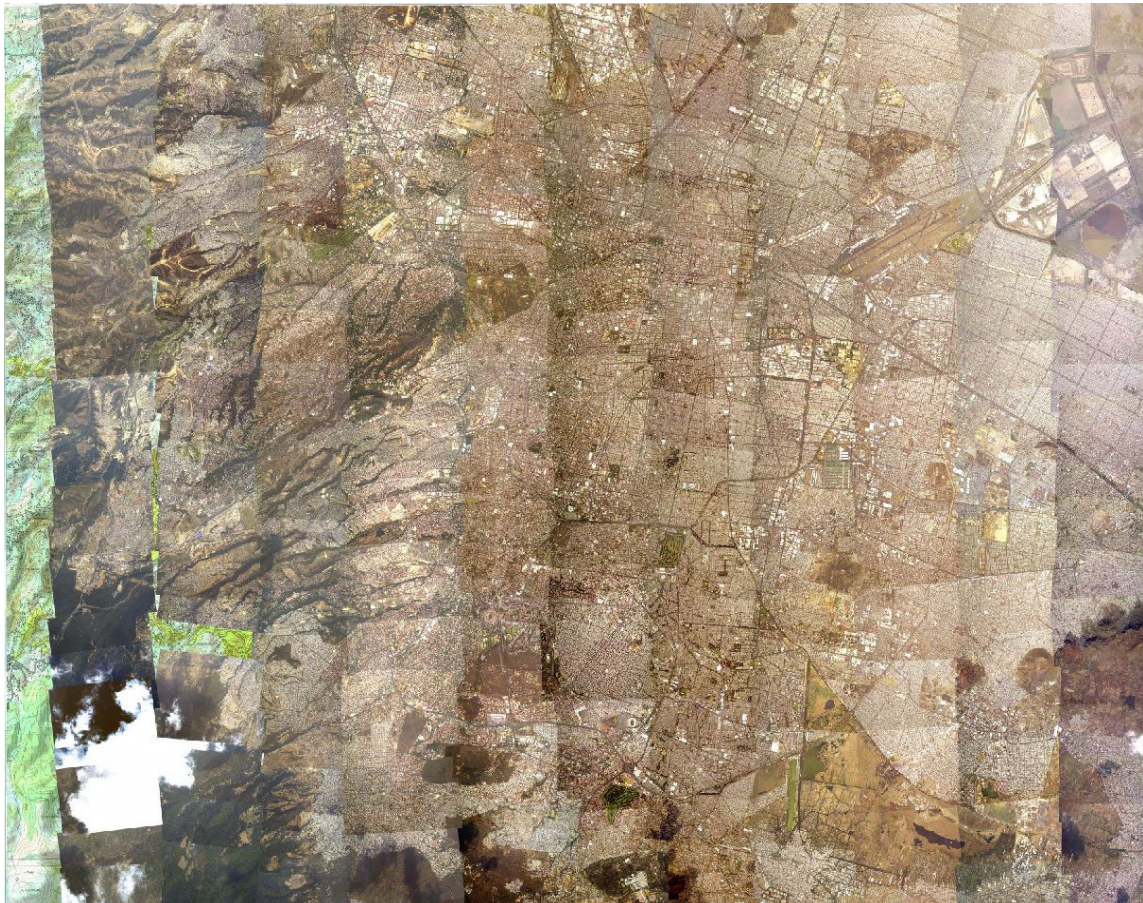


Figura 5.1. Mosaico fotográfico digital del Valle de México, correspondiente a un levantamiento efectuado en 2001. (Fuente: Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM).

Cabe destacar, que debido a la gran cantidad de fotografías requeridas para formar mosaicos como este, de la zona metropolitana de la ciudad de México; se hizo necesario proponer un método práctico que facilitara y agilizara el traslape de fotografías para la formación de cada línea de vuelo hasta cubrir toda el área.

Para llevar a cabo la formación de mosaicos con este software, es indispensable disponer de un mapa base que sirva de guía para la colocación de las fotografías aéreas digitales. Es ampliamente recomendable que el mapa base sea una carta topográfica, una ortofoto o un ortomosaico de la zona, que sea un producto de calidad cartográfica, para que los errores en el mosaico final se encuentren dentro de límites razonables; ya que con este procedimiento no se siguen los lineamientos estándar de la generación de un producto fotogramétrico. Sin embargo, el usar un producto base de calidad adecuada, permite que los errores estén dentro de límites tolerables, ya que cada imagen, debe ajustarse cuidadosamente a dicho mapa.

La gran utilidad de este procedimiento radica en el hecho de que es posible generar un mosaico de la zona de estudio con recursos realmente limitados, como son: las imágenes aéreas digitales de pequeño formato, una computadora de escritorio y un paquete de manejo de imágenes de costo razonable. Con este procedimiento se puede obtener una actualización de un ortomosaico anterior o, a partir de un mapa, se obtenga un nuevo producto que proporcione información visual de los elementos presentes en el terreno, con un margen de error mínimo.

Para ilustrar el procedimiento, se tomo como ejemplo, la generación de un mosaico del Valle de México. Para que el método resulte más general, se describe la formación de un mosaico cuando éste se compone de imágenes visibles e infrarrojas. Como ya se mencionó con anterioridad, la banda infrarroja (IR) permite determinar la presencia de vegetación y su estado de actividad fotosintética.

Los pasos de la metodología empleada son los siguientes:

1. El primero consiste en transformar la carta topográfica 1: 50,000 a formato digital mediante el barrido de dicho documento, haciendo uso de un barreador o escáner, con el fin de utilizarla como fondo de referencia para ubicar las fotos y hacer coincidir los rasgos cartográficos de la carta con los de cada una de las fotografías.
2. El segundo paso, se refiere al tratamiento de cada una de las fotografías y consiste en obtener un realce en cada una de ellas, dándoles un mejor contraste y haciendo un balance de color. Esto ayudará a observar mejor los rasgos sobre el terreno y que el mosaico terminado no tenga disparidades de iluminación en diferentes zonas.
3. *En la tercera fase se empalman las fotos visibles con sus correspondientes infrarrojas (figura 5.2).* Pero como se sabe, son muchas las fotografías que se manejarán, por lo que es muy recomendable crear una *acción*, esto es: un *macro* en el cual se pueden realizar todos los procedimientos repetitivos; como aquellos que involucran el cambiar el tamaño de una de las imágenes, rotación, corrimientos o ajustes.

- Se selecciona una foto visible y su correspondiente infrarroja.
- En la paleta *Acciones*, se hace *click* en el botón acción nueva y se le da un nombre.
- Posteriormente se da *click* en el botón rojo, grabar.
- Se seleccionan los comandos y se realizan las siguientes operaciones, como son: seleccionar la imagen, copiar, pegar, cerrar, ajustar, rotar, dar 50% de opacidad, pegar, recortar, cerrar, etc.

Así, el macro queda grabado, preestablecido y permite llevar a cabo las transformaciones o modificaciones en las fotos subsecuentes. En la *figura 5.3* se ilustra el resultado final al traslapar una imagen visible y una IR. Como puede observar claramente, las cámaras tienen diferente cobertura, debido a que no son exactamente iguales, sin embargo, con los debidos ajustes de escala, éstas quedan preparadas para comenzar a formar el mosaico. Las imágenes son recortadas al mismo tamaño, para facilitar el proceso de unión.

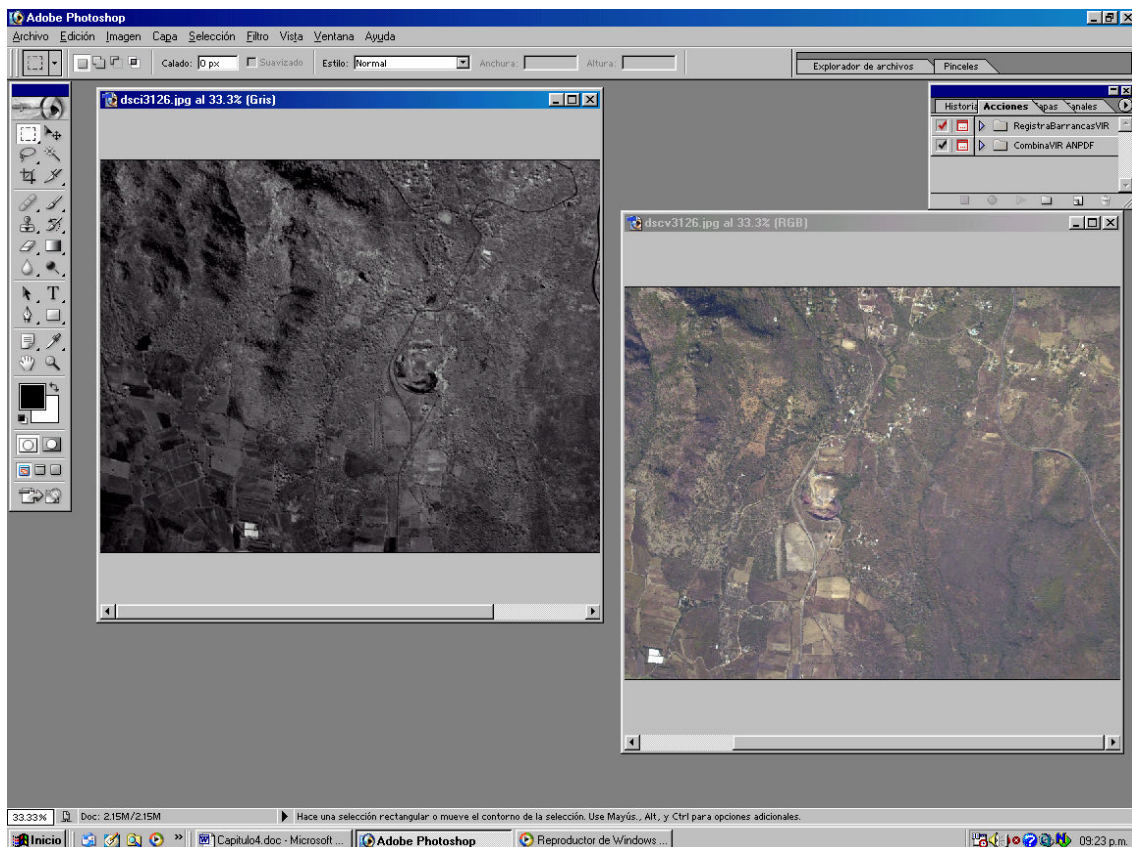


Figura 5.2 Una imagen visible y otra infrarroja de la misma zona de estudio (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

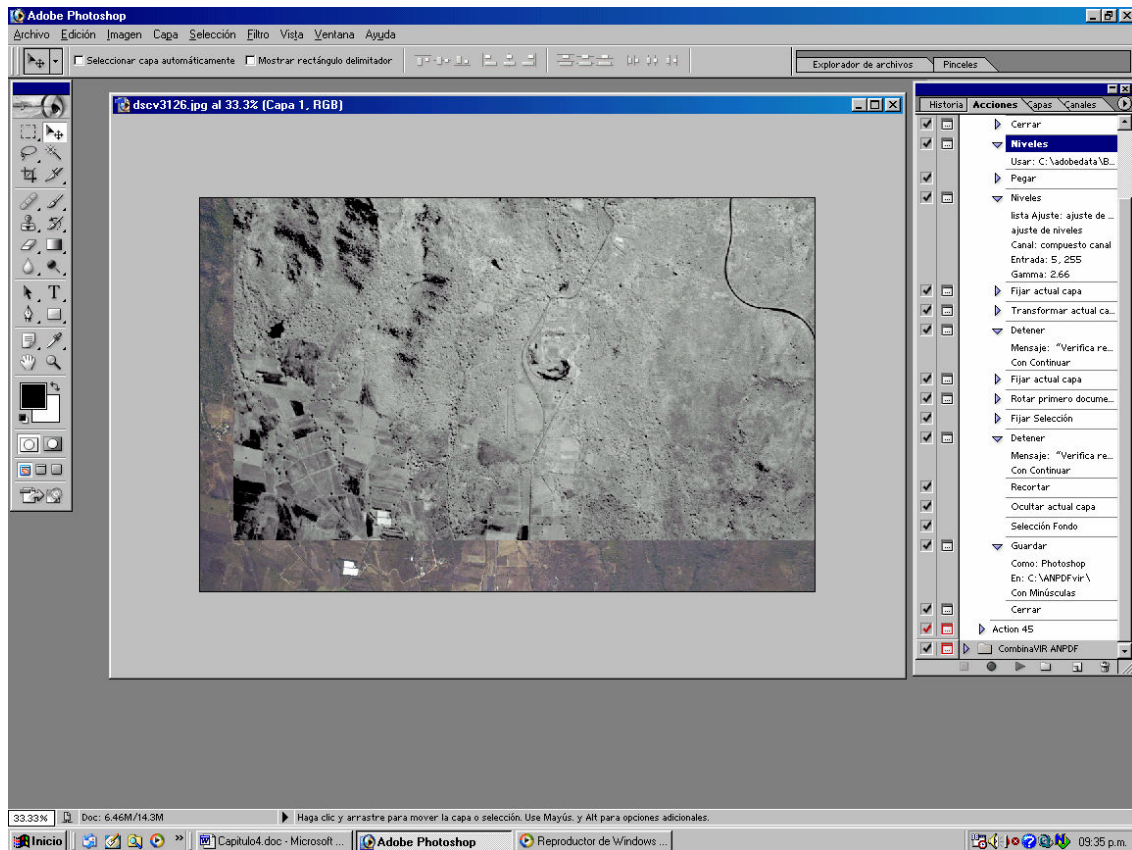


Figura 5.3 Imágenes traslapadas donde se hace evidente la diferencia de cobertura entre imágenes (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

4. El siguiente paso consiste en abrir el archivo de la carta base y colocarla en una capa.
5. También hay que comenzar de nuevo a abrir cada archivo imagen de una línea de vuelo, cambiarle la opacidad o transparencia al 50%, escalarla hasta que se obtengan las dimensiones adecuadas y por último, rotar la fotografía hasta lograr hacer coincidir los rasgos de ésta con los de la carta, o *fotomosaico base*.
6. Comenzar a traslapar las fotografías hasta formar una línea de vuelo y a su vez integrar las líneas para formar el mosaico. La *figura 5.4* muestra un detalle de como realizar el procedimiento para unir las imágenes.
7. Finalmente, se guarda la imagen del mosaico en el formato que más convenga para su despliegue o impresión en papel. En ambos casos, es conveniente agregar información sobre la escala y realizar la georeferenciación para que este producto se pueda integrar a un SIG, y se continúe con el desarrollo del estudio.

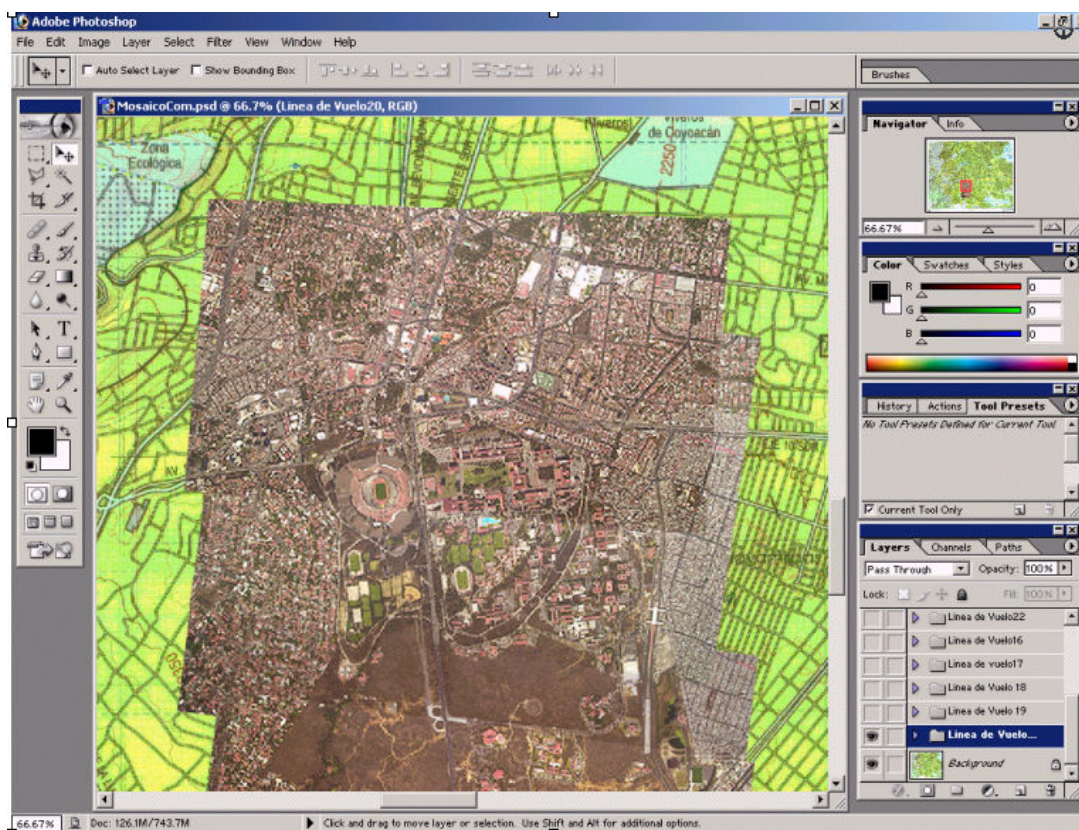


Figura 5.4 Traslape de fotografías aéreas, sobre una línea de vuelo (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

5.1. 2. Programa *PCI Works® (OrthoEngine)*

El módulo *OrthoEngine* de la compañía *PCI Geomatics*, es un paquete muy utilizado para realizar diversas actividades especiales de gran utilidad para la ortorectificación de imágenes; una de sus herramientas más importantes es para la creación de mosaicos con imágenes aéreas, el cual se basa en la construcción y realización de un proyecto de construcción de mosaicos ortorectificados de la zona en estudio.

Para obtener los puntos de control, es posible utilizar imágenes digitales ortorectificadas de la zona. Dado que la imagen ya está georeferenciada, las coordenadas de los puntos se pueden obtener directamente sobre el monitor empleando el cursor del *mouse*. Los puntos de control terrestre, también pueden obtenerse por el procedimiento de digitalización, a partir de un mapa existente, donde los rasgos del terreno sean fácilmente reconocibles.

Los pasos para la realización de un proyecto son:

Iniciando un nuevo proyecto

Para realizar un proyecto con *OrthoEngine*, se teclea desde UNIX (estación de trabajo) el comando: *pciworks (modulo de OrthoEngine)*, para comenzar con la apertura del programa,

Introduciendo información al proyecto

Se introduce la información al proyecto, como el nombre y una breve descripción del mismo, asignándole la extensión **prj**. Aquí mismo se indica el tipo de cámara que se utiliza, por ejemplo: digital/video para el presente proyecto.

Indicar la proyección cartográfica utilizada

Esta debe ser la misma para el mosaico final y para coleccionar los puntos de control; la información para el proyecto desarrollado es la siguiente:

UTM 14 Q D000

Colocando el valor del tamaño del píxel de salida: 1.5 m

Introducir los datos de calibración de la cámara

Estos datos ya se obtuvieron con anterioridad

La distancia focal: en este caso 22 mm

El tamaño del sensor: Debe indicarse es de 23.7 x 15.6 mm.

Cargando las fotos

- Con el *mouse* se selecciona la opción: *Processing Step/Photos*. Apareciendo un nuevo menú, se oprime el icono *Open Photo*. Enseguida se presiona *New Photo* y después se selecciona la primera foto con la que se va a trabajar, por ejemplo 17v-9890.jpg seguido de OK.
- Se selecciona la foto del panel principal y se oprime *Open*, aparecerá una ventana.

Colectando puntos de control

Una vez desplegada la primer foto se da inicio a la colecta de los puntos de control:

- Se oprime el icono: *Collect GCPs from geocoded image*. El GCP collection Panel para la foto 17v-9890.jpg (*imagen sin rectificar*) aparecerá con el punto de control G0001 desplegado en la ventana
- En la parte inferior de este panel esta la opción *Load/Geocoded Image* desde el cual se podrá elegir el modelo de terreno Mdedf.gis desde *Select/DEM*

A partir de aquí se tendrán dos ventanas, una con la foto sin corregir, y otra con la ortoimagen, de donde se obtendrá los puntos de control.

En cada ventana se tiene la opción de aplicar la función *Zoom*, se localiza un punto en común en las dos ventanas, después se oprime *Use as GCP*, aparecerán las coordenadas en el panel: se oprime *Extract Elevation* para obtener la altura de ese punto, enseguida se oprime *Accept* y la información será adherida a la lista. Se repite el mismo procedimiento para los restantes puntos deben ser de 3 a 9 puntos por foto de preferencia. Para cargar las fotos restantes se usa la función: *New Photo*.

Colectando los puntos de amarre: Tie Points

Al tener dos imágenes de una línea de vuelo se notan puntos semejantes entre ellas, las que pueden servir de amarre, aunque no se conozcan sus coordenadas, ya que, esto hace evidente la necesidad de la sobreposición entre imágenes. Se oprime el icono *Collect Tie points*, después se visualiza un punto en la foto 17v-9890 que

pueda ser visto en la foto consecutiva 17v-9891. Se ajustan los dos cursores hasta que el sitio este exactamente sobre el mismo punto. Se oprime el botón *Use as Tp* en ambas ventanas. Después se oprime *Accept* para que se introduzca a la lista, es aconsejable coleccionar por lo menos 3 puntos por cada par de fotos.

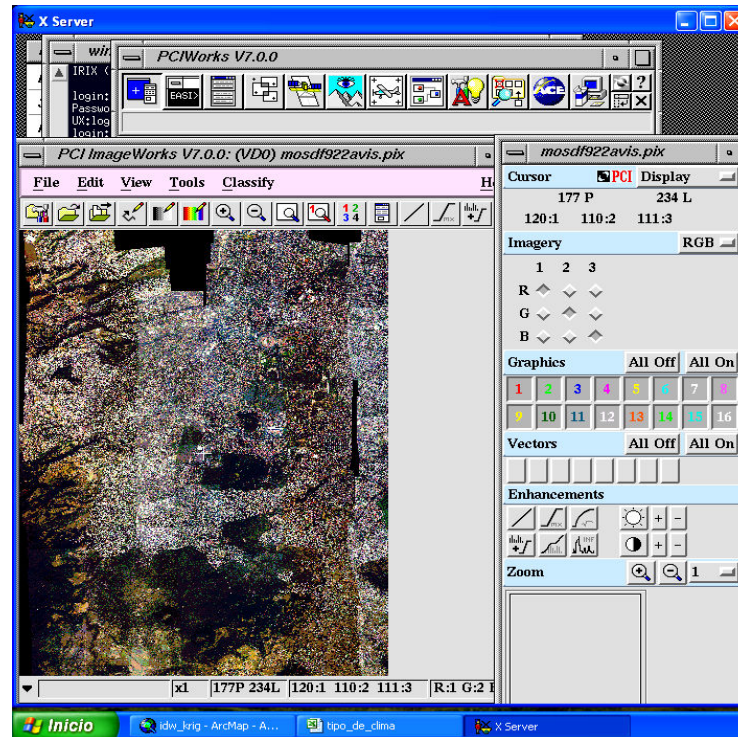


Figura 5.5 Formación de un mosaico con el programa PCI works (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Verificación de la distribución de las fotos

Con *photo layout* se hace un despliegue que ilustra la localización de las fotos del proyecto. También se despliega la localización de cada uno de los puntos de control y de amarre coleccionados; si se está de acuerdo con la distribución de las fotos y los puntos, es tiempo de correr el modelo.

Bundle Adjustment

Este método es utilizado para obtener los elementos de orientación externa, considerando todas las fotos del proyecto; se hace click en el icono *Bundle Adjustment/Model Calculations* y un mensaje aparecerá informando que el proceso se realizó: *¡Bundle Adjustment has completed!*

Reportes

El reporte de los errores residuales, se utiliza para identificar y corregir posibles puntos alejados de su posición verdadera.

Ortorrectificación de las fotos

Cuando se ha generado el modelo satisfactoriamente, se pueden crear las ortofotos; se oprime en el icono *Schedule Ortho Generation*, desde *Processing/Ortho Generation*

- Desde el panel se selecciona la foto 17v-8889 y con la flecha se mueve esta foto a una lista de fotos a procesar, se da nombre a la nueva foto siendo por *default 17v-8889.pix*
- Es necesario utilizar un Modelo Digital de Elevación, oprimiendo en *Browse* y localizando el archivo del modelo, después se oprime *Apply DEM options to all images*
- Para generar las ortofotos, se selecciona *Generate Orthos* y cuando el proceso termina, se oprime *Close* para cerrar el panel.

Definiendo un Área para el mosaico

Antes de crear un mosaico, se debe definir un área y salvarla, pasando después a la opción *Automosaic*; se confirma y por ultimo se genera.

Para este proyecto fueron colectados 900 puntos de control, distribuidos uniformemente, obtenidos de ortofotos y se usó un DEM de INEGI. El error cuadrático medio, RMS (Root Means Squared) obtenido de la ortorrectificación, fue de 25 m, lo cual puede considerarse como aceptable dado el tipo de estudio y las condiciones homogéneas del terreno que no permiten una identificación muy precisa de los puntos de control terrestre.

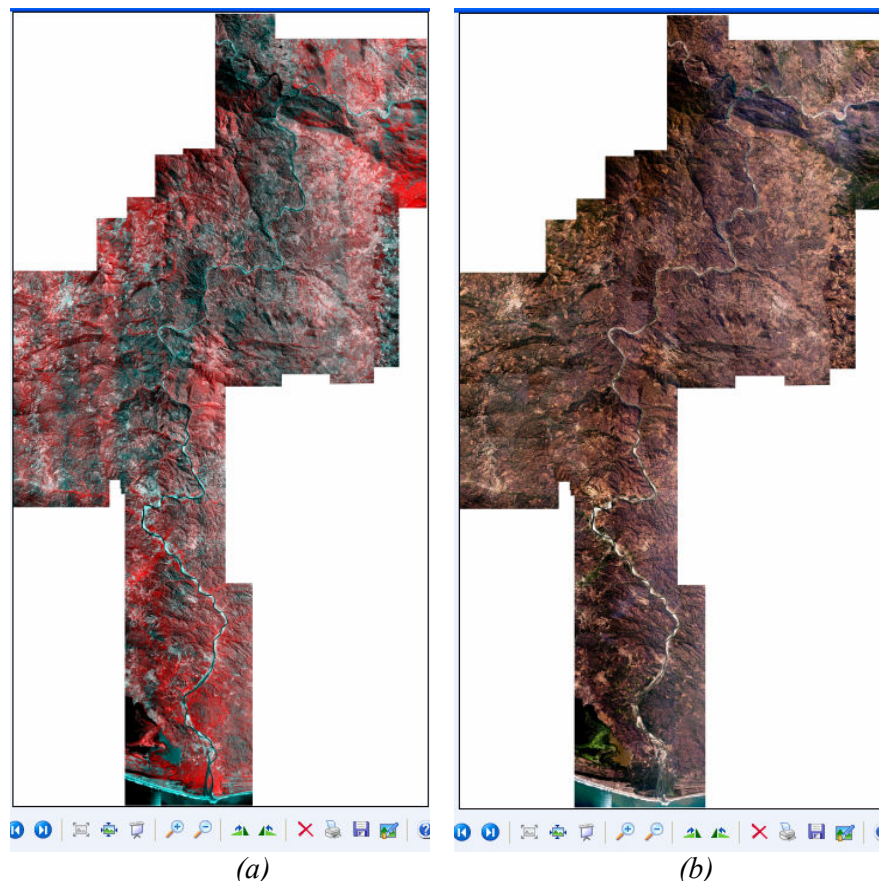


Figura 5.6 Mosaico del embalse del río Papagayo, en Guerrero, México.
(Laboratorio de SIG y PR Instituto de Geografía, UNAM)

5.1.3 Programa *ERDAS® IMAGINE 8.4*

A continuación se describe el método propuesto para la formación de mosaicos con fotografías aéreas digitales de pequeño formato, empleando el paquete *ERDAS® IMAGINE 8.4* edición profesional.

El ejemplo que se presenta a continuación, corresponde a la formación de un mosaico de una parte de la zona del Sur de la Ciudad de México. Las imágenes utilizadas corresponden a un levantamiento aéreo del año 2005. Las imágenes fueron registradas y ortorectificadas para formar el mosaico consistente, en una sola imagen de gran cobertura y alta resolución. Tiene tres bandas espectrales de color y una infrarroja. Las cámaras usadas en este levantamiento; fueron: *Kodak DCS14 Pro* para el visible y *SONY DSC-707* para el infrarrojo. No obstante que las imágenes tienen una resolución de 40 a 80 cm por pixel, la escala de trabajo se fijó en una escala de 1:20 000, que se encuentra muy por debajo de la precisión potencial obtenible con ese tamaño de pixel. Esto provee de cierta tolerancia debido a algunas desventajas, que presentan las cámaras de formato pequeño, particularmente cuando se trabaja con escalas grandes. Al final de este capítulo se hacen algunas observaciones sobre el uso de dichas imágenes y los errores obtenidos sobre la formación de mosaicos ortorectificados. El proceso de aerotriangulación se llevó a cabo con puntos de control, obtenidos de ortofotos existentes, y de un MDE de INEGI. La proyección del mosaico es la Universal Transversa de Mercator (UTM).

Los pasos para efectuar la formación de mosaicos se describen a continuación:

- a) Previo a la realización del mosaico, las imágenes deben corregirse geométricamente, es decir a cada una de ellas se le aplica el programa que remueve las distorsiones causadas por el lente y la desviación del eje óptico.

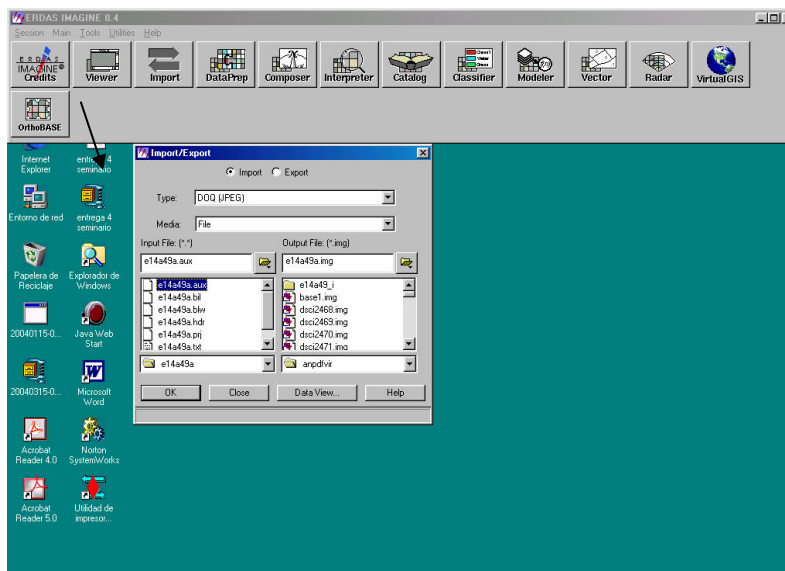


Figura 5.7 Conversión de imágenes con extensión TIFF ó JPG a formato IMG. de ERDAS Imagine 8.4 (Laboratorio de SIG Y PR, Inst. Geografía, UNAM)

b) El siguiente paso consiste en importar las imágenes del proyecto, en formato IMG. para poder trabajar en *ERDAS*; y así utilizarlas para la estructuración del mosaico ortorectificado.

c) El tercer paso, se refiere a la selección y agrupamiento de cada una de las capas en las fotografías, que consiste en:

- Abrir cada imagen visible, y agregarle sus respectivas capas según sea el caso; así por lo regular, a cada fotografía se le asignan sus tres capas: roja, verde y azul.
- En la imagen infrarroja se le asigna su capa por *default* (infrarroja) en cada fotografía. Esta capa ayudará en la interpretación y el análisis de algunos rasgos, pero fundamentalmente proporcionará información sobre el estado de la vegetación.
- Por último, se le asigna a cada archivo un nombre para distinguirlo, lo más común es asignarle un número de línea y un número de imagen y si ésta es visible o infrarroja para evitar confusiones durante el proceso.

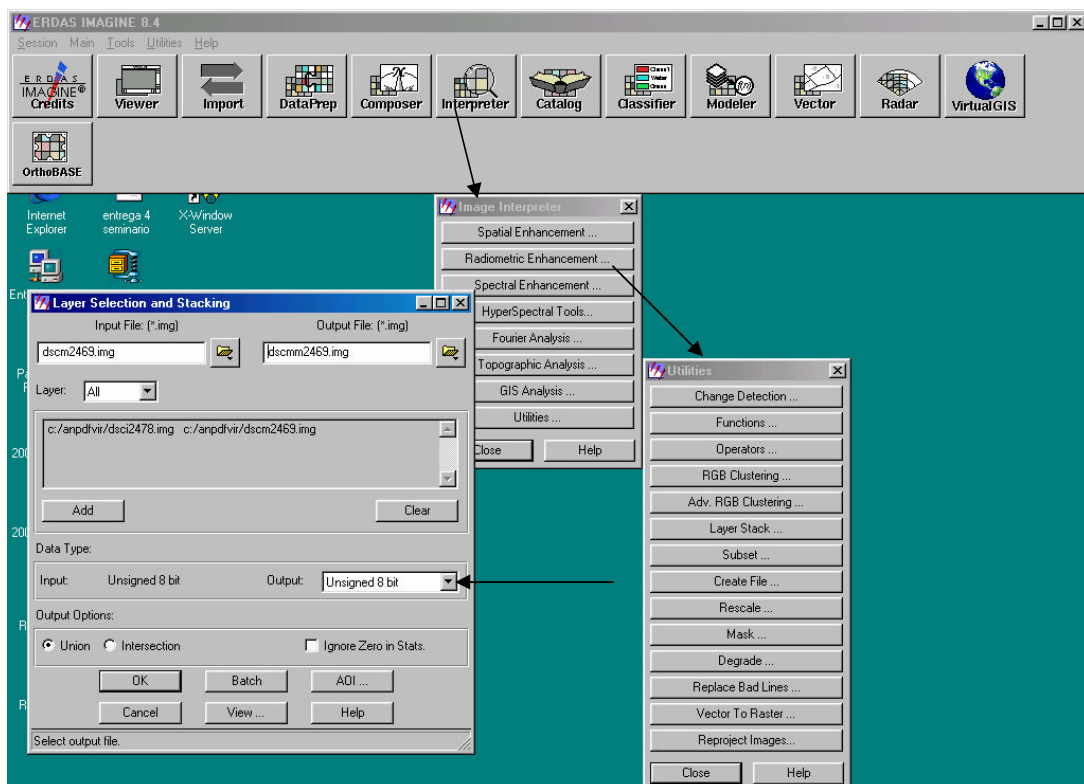


Figura 5.8 Agrupamiento por capas para las imágenes visibles e IR (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

d) El cuarto paso, consiste en trabajar ya directamente con la imagen, de acuerdo a lo siguiente:

- Se debe abrir la imagen como “*raster layer*”.
- Teniendo la imagen abierta, se accede a la opción “layer info” para ver el tipo de archivo, y saber como se va a proceder.
- Después se selecciona la opción “*raster*” y en esa opción se toma el comando “band combinations” y se procede a enumerar las capas en orden ascendente (1, 2 y 3).
- Por último, se selecciona a la opción “*general contrast*” y se ubica la palabra “*linear*” y se acepta la acción. Esto permite mejorar el contraste de la imagen para poder trabajar mejor al momento de identificar puntos sobre el terreno, ya sean de amarre o de control.

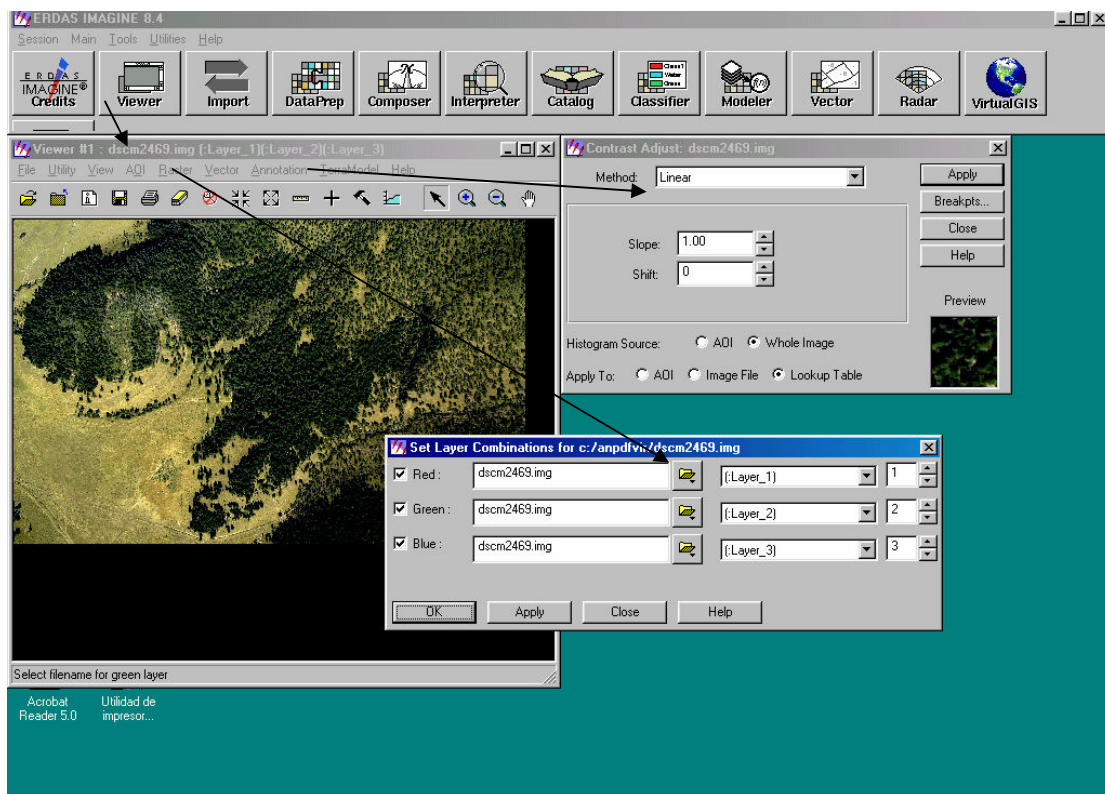


Figura 5.9 Se muestra el procedimiento para contrastar y combinar las bandas (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

e) Para esta fase se comienza a formar el mosaico con todas las fotografías definidas para el presente proyecto. Esta es una de las etapas más importantes y que involucra la mayor parte del tiempo del proceso total.

Ubicados en la opción *orthoBASE*, se genera un nuevo proyecto y se empieza a proporcionar la información sobre los parámetros básicos; como la proyección cartográfica, el elipsoide de referencia y el datum, el tipo de cámara usada y los elementos de orientación interna o datos de calibración, el tamaño de pixel en el terreno, etc.

En la información referente a la calibración de la cámara hay que definir todo con cero, ya que esta parte de la calibración y su correspondiente corrección, ha sido efectuada previamente.

1. Proyección: UTM
2. Esferoide: Clarke 1854
3. Zona geográfica: Zona 14 Q
4. Datum: ITRF92
5. Unidades de referencia: metros
6. Sistema de rotación: omega, phi, kappa
7. Modelo de cámara: Kodak DCS14Pro digital camera
8. Datos de calibración de la cámara (ninguno)

f) Se comienzan a cargar las imágenes hasta completar un bloque tanto definido, como fijo. Se genera un listado en forma de tabla, donde es posible apreciar si la imagen se encuentra activa, si ya se corrió la triangulación.

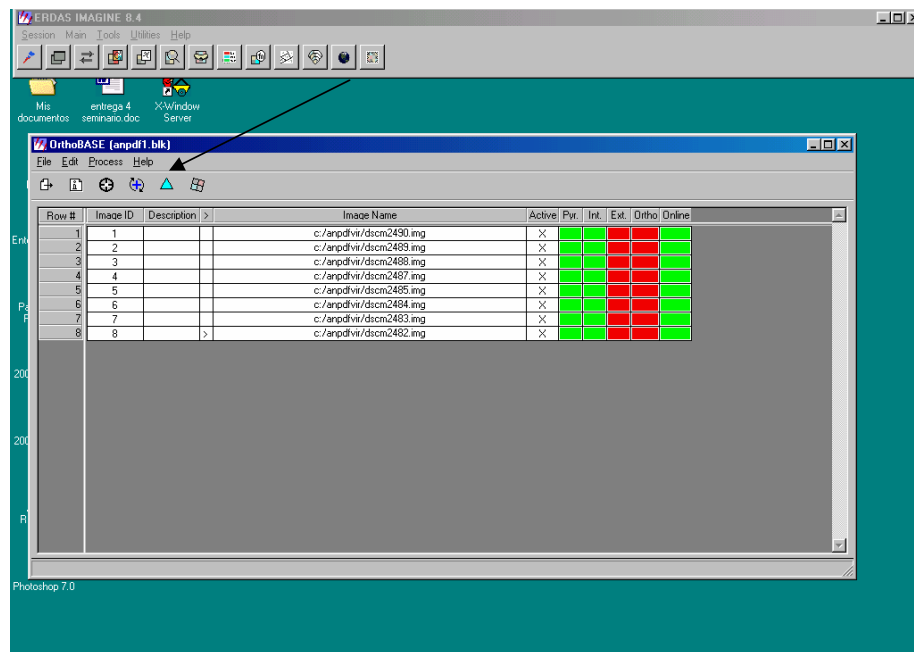


Figura 5.10 Se muestra la tabla de las imágenes, las cuales se convertirán en ortofotos (Laboratorio de SIG Y PR, Inst. Geografía, UNAM)

- Se da *click* en “add options” y se van agregando las imágenes a la tabla
- En la columna de “pyramid” se selecciona la opción “all pyramids”

g) En este paso se selecciona la opción “*Point Measurement*” que tiene como finalidad comenzar a identificar puntos en las imágenes para asignarles sus valores correspondientes de coordenadas X,Y,Z. Para llevar a cabo esta tarea, es necesario contar con una ortofoto o un mapa topográfico de escala adecuada, para poder identificar los puntos en ambas imágenes. Normalmente la imagen digital de alta resolución, es mas detallada que la ortofoto; y los mapas topográficos rara vez son útiles para esta tarea, dada la escala más común que se maneja: 1:50 000.

Otra manera de asignar coordenadas a las imágenes, es por medio de puntos de control, obtenidos mediante una campaña de GPS. Esta es definitivamente la mejor opción desde el punto de vista de la precisión, sin embargo, las campañas con GPS geodésico son muy tardadas y para zonas tan amplias como la cuenca de México, resultaría demasiado costoso. Esta opción se puede aplicar en zonas pequeñas donde además sea indispensable obtener una buena precisión (Prado, 2005).

También es necesario contar con un modelo digital de elevación para corregir las diferencias de escala, causadas por el relieve del terreno.

Se abrirá el siguiente recuadro:

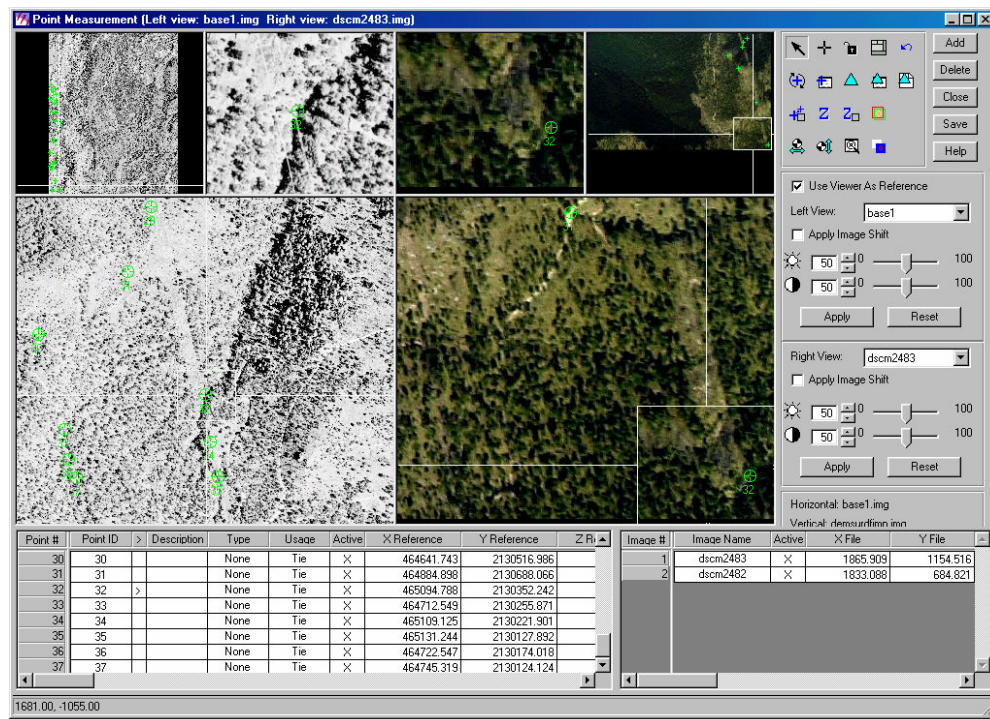


Figura 5.11 Identificación de puntos en la ortofoto y en la imagen a procesar para asignarle las coordenadas respectivas y proceder a la triangulación y la formación del mosaico (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Se comienzan a ubicar los puntos en cada imagen. Para cada foto, por lo menos debe de haber tres puntos, siendo preferible que tenga nueve, distribuidos de tal

manera que cubran la mayor parte de la foto. Esto facilitará el amarre entre imágenes, ya que tres puntos serán comunes con la imagen anterior y tres con la siguiente imagen.

En este punto del proceso, toma particular relevancia el hecho de que el levantamiento aéreo se haya efectuado correctamente; desde el punto de vista del traslape de imágenes. Como es bien sabido, el traslape sobre la misma línea debe ser del 60 al 65% y entre líneas debe tener por lo menos el 30%, para asegurar que no queden huecos en el mosaico. Además, en caso de haber duda, se pueden consultar los estereopares correspondientes a la zona o punto de interés, al momento de efectuar la interpretación.

h) Después de haber localizado y definido los puntos de control, el siguiente paso es llevar a cabo la triangulación automática. Como ya se mencionó anteriormente, este proceso sirve para obtener nuevos puntos de amarre entre imágenes.

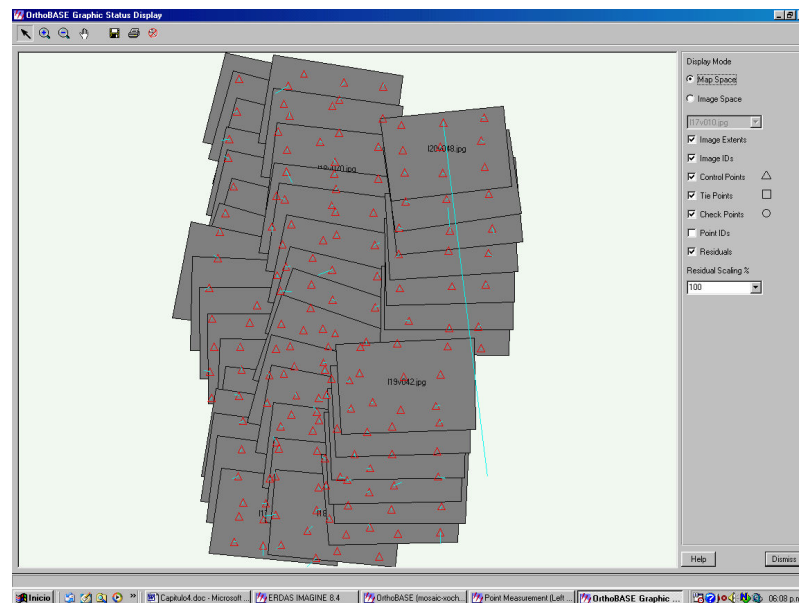


Figura 5.12 Se efectúa la triangulación y se obtiene una gráfica que ilustra aquellos puntos que presentan errores importantes. La longitud de la línea azul es proporcional al error de la imagen señalada (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Después de correr la triangulación, es necesario corregir aquellos puntos que tienen demasiado error. Hay que rectificar dichos puntos usando nuevamente la imagen ortorrectificada, para asegurarse de que la identificación con la imagen correspondiente haya sido correcta y no se haya confundido un punto con otro.

Aquí se entra en un proceso repetido, donde hay que estar corrigiendo, añadiendo o quitando puntos, hasta que se encuentre un error razonable, o se llegue a un punto en donde el error ya no disminuya.

i) Superando la etapa de la triangulación, hay que convertir las imágenes en ortofotos, mediante el proceso de “*ortho resampling*”. En esta fase, es donde se inserta el modelo digital de elevación en el proceso:

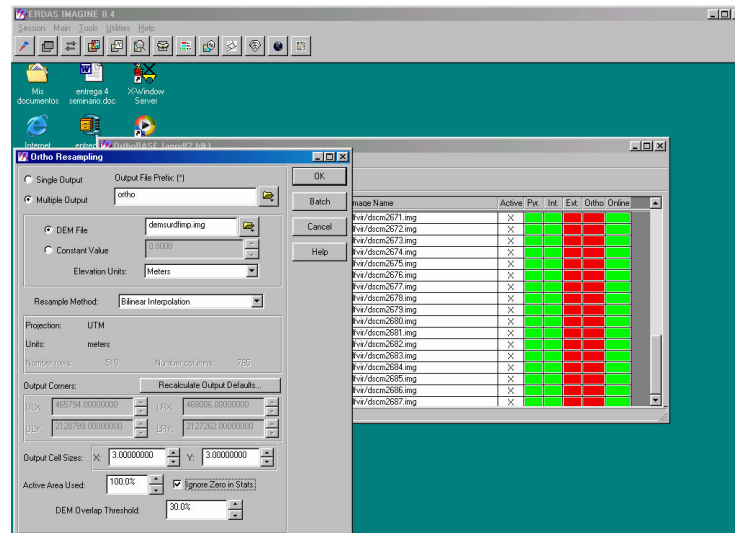


Figura 5.13 Proceso de ortorrectificación de todas las imágenes contenidas en el proyecto (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

j) En el siguiente paso hay que formar el mosaico, mediante la función: “*mosaic operation*”,

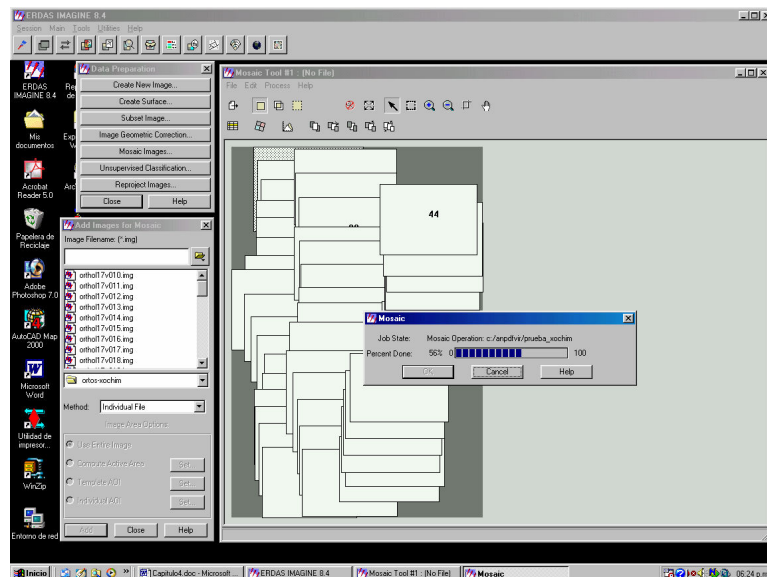


Figura 5.14 Proceso de formación del mosaico (Laboratorio de SIG Y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

k) El mosaico del bloque formado presenta un aspecto similar al que se muestra en la figura 5.15.

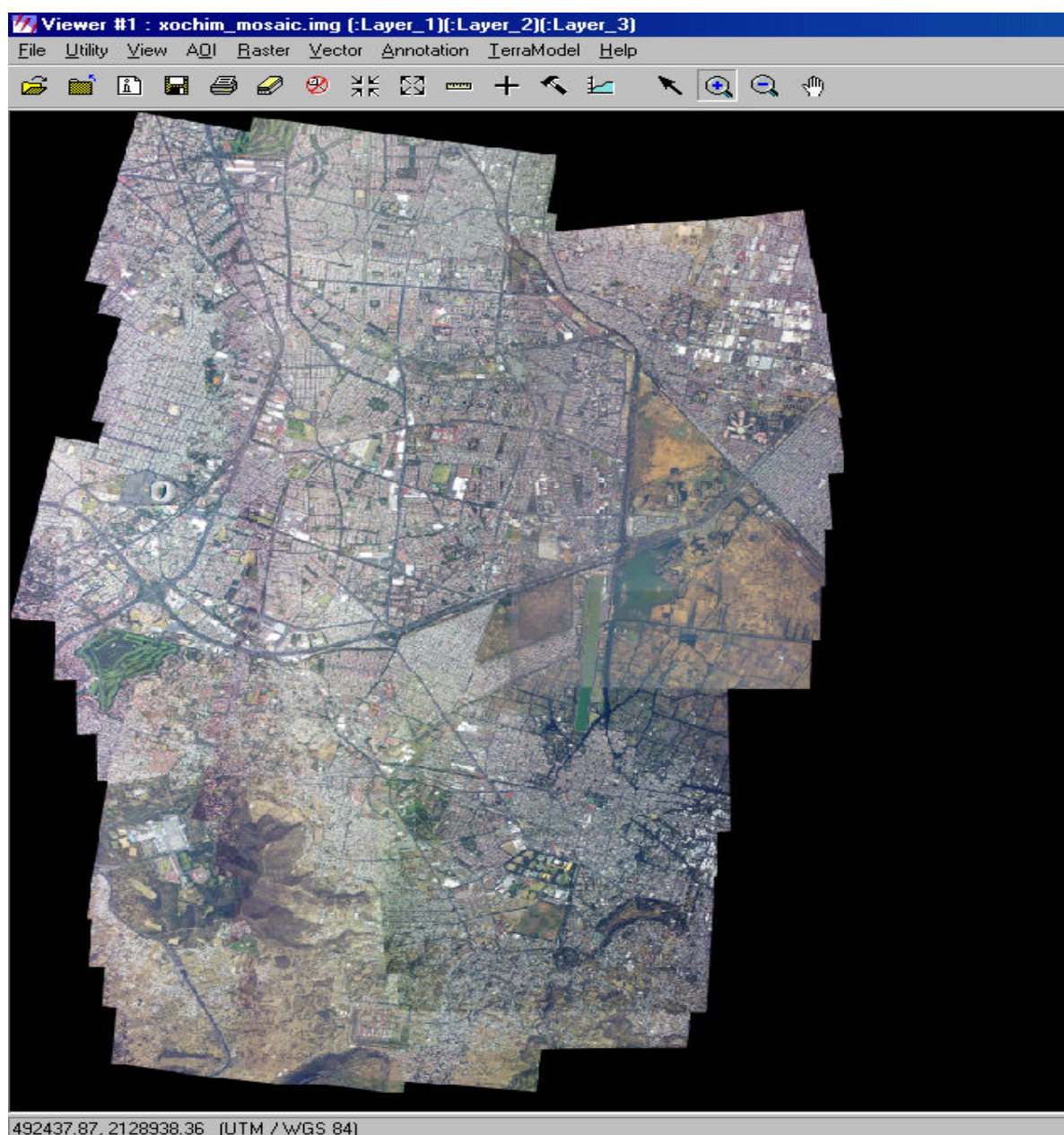


Figura 5.15 mosaico compuesto de un bloque de imágenes. Esta división es necesaria cuando se trabaja con zonas grandes (Laboratorio de SIG Y PR, Inst. Geografía, UNAM)

I) Finalmente se unen los diferentes bloques para formar el mosaico completo. Este es un ejemplo de la unión de fotografías aéreas digitales, ya traslapadas y fusionadas en una sola imagen.

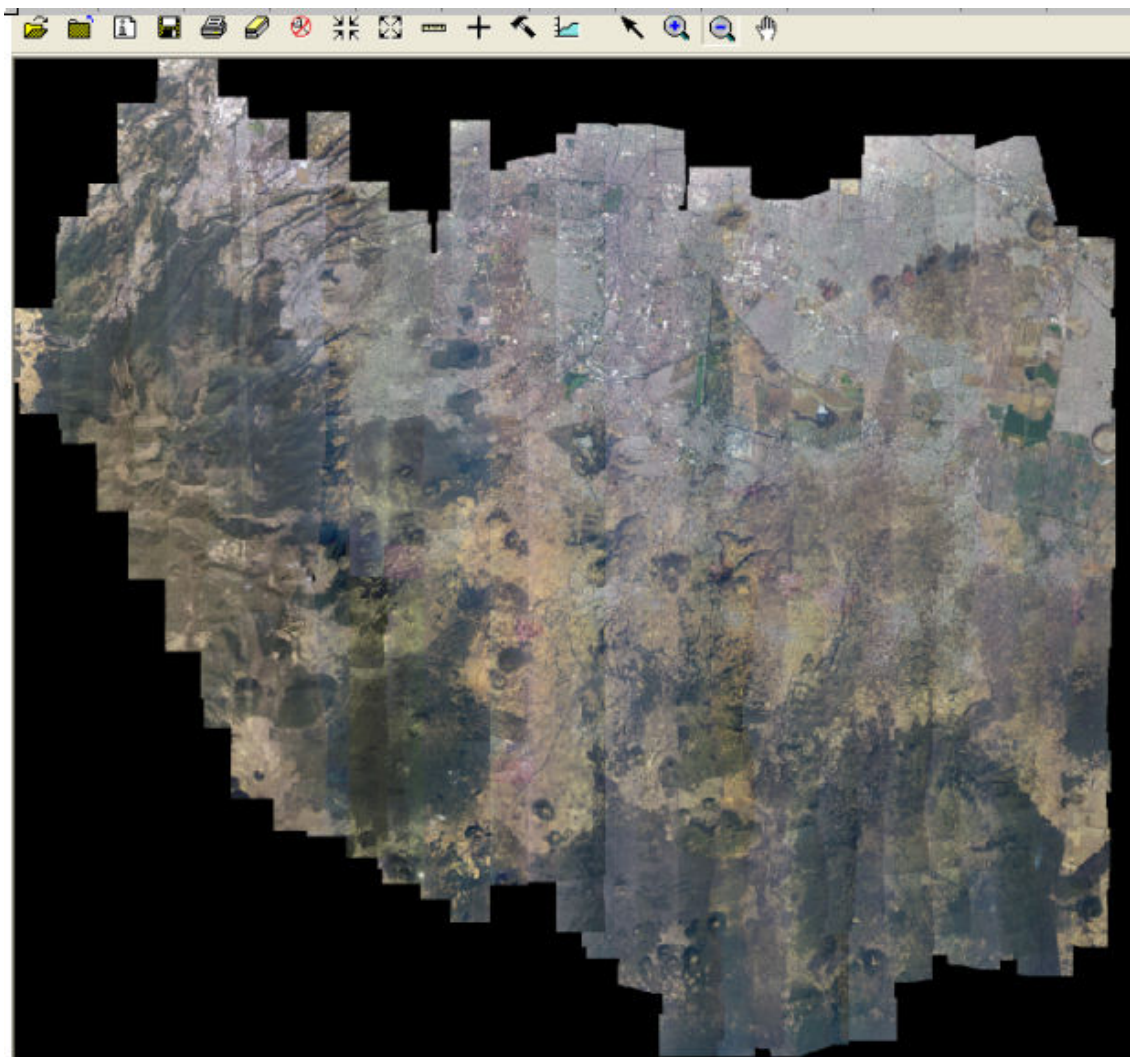


Figura 5.16 Mosaico final compuesto por 1400 fotografías aéreas digitales de pequeño formato, obtenidas sobre el Valle de México en el 2005 (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Resultados y conclusiones

Debido a la gran aplicación que ha tenido en el Laboratorio de SIG y PR la fotografía aérea digital de pequeño formato, para estudiar sobre todo los recursos naturales, y dado que la resolución de las cámaras digitales de pequeño formato se incrementa constantemente, mientras que los costos se reducen, resulta importante evaluar su desempeño en la obtención de productos cartográficos que cumplan con estándares internacionales. La capacidad de estos dispositivos para generar cartografía confiable, incrementa enormemente la disponibilidad de mapas a un costo reducido, para una gran cantidad de usuarios. Al mismo tiempo se prevé que la oferta de este tipo de imágenes aumente, debido a que el costo de inversión inicial para generarlas es relativamente bajo, comparado con los sistemas fotogramétricos convencionales, ya sean analógicos o digitales.

Este trabajo permitió entender los aspectos más relevantes que hay que tomar en consideración, los alcances que se pueden obtener en la generación de mosaicos, utilizando herramientas de bajo costo, para aquellos grupos con relativamente escasos recursos económicos. Aunque algunos autores consideran que es posible la utilización de esta nueva tecnología en el logro de estos objetivos, otros afirman que las cámaras de pequeño formato son sólo herramientas auxiliares que permiten la obtención de información temática y que no poseen en absoluto ninguna utilidad práctica en la generación de ortomosaicos de amplias zonas de estudio.

En la actualidad, los mosaicos ortorrectificados obtenidos a partir de fotografías aéreas digitales de pequeño formato, son ampliamente utilizados en el estudio y manejo de recursos naturales; principalmente porque proveen información temática precisa y presentan claras ventajas económicas comparadas con otras fuentes de imágenes. Sin embargo, algunas aplicaciones exigen de cierta precisión en la posición de los objetos que se encuentran dentro de la imagen, para proporcionar mediciones confiables para el trabajo técnico que se efectúa; como construcción de puentes o carreteras, o la delimitación precisa de parcelas o predios, con las implicaciones sociales que todo esto conlleva.

Entre muchos otros aspectos en la generación de ortomosaicos, se hace énfasis en la obtención de los puntos de control terrestre. Como se vio con anterioridad, los métodos de aerotriangulación automática, permiten la obtención de un gran número de puntos de control terrestre, que cumplen un doble propósito: el de ligar imágenes adyacentes en tiras o bloques de imágenes (puntos de amarre) y el servir como puntos de control, para propósitos de ortocorrección. Sin embargo, no hay que olvidar el valor, en cuanto a la precisión se refiere, que los puntos de control terrestre, obtenidos mediante la utilización de equipos GPS, pueden proporcionar. Un GPS geodésico puede dar una precisión del orden de 1 o 2 cm, sin mayores problemas.

6.1 ALGUNOS ASPECTOS SOBRE LA FORMACIÓN DE MOSAICOS

En el ejemplo de formación de mosaicos mostrado en este trabajo, sobre la parte sur de la cuenca de México, el tamaño de pixel en el terreno varía grandemente, debido a la diferencia de alturas entre el valle y las montañas, que es de aproximadamente 1500 metros, sin embargo, los resultados finales fueron favorables, demostrándose que con un buen modelo de elevación se corrigen las diferencias de escala por relieve con este tipo de imágenes.

Las imágenes visibles y las infrarrojas, tienen diferente cobertura porque se toman con diferentes cámaras, las imágenes registradas deben recortarse al tamaño de la más pequeña para incluir el cubrimiento común de ambas. Esto tiene como consecuencia un cubrimiento menor en la imagen visible, resultando a su vez en un cubrimiento lateral menor y reduciendo el traslape entre líneas; este aspecto es muy importante y hay que tomarlo en cuenta al momento de planear el levantamiento aéreo.

En este mosaico de la cuenca de México, se trató de realizar un manejo semejante al de una imagen de satélite, para extraer información a través de algoritmos estándar de identificación (*figura 6.1*). El resultado fue la resolución y el contenido multiespectral proveyeran de una buena detectabilidad de los asentamientos humanos irregulares. Este método facilita la creación del polígono del área invadida, sin embargo, una variabilidad significativa en la apariencia de las imágenes, fue evidenciada. No obstante, los algoritmos de discriminación produjeron buenos resultados cuando fueron aplicados a imágenes individuales, su eficiencia al aplicarlos al mosaico no fue la óptima. La variabilidad en los resultados se atribuye a la presencia de nubes delgadas y de humedad, lo que produjo diferencias en color y contraste, aún en imágenes adyacentes. La humedad del aire exagera las variaciones, debido a la altura del terreno, principalmente en las montañas. Cuando la zona procesada estaba compuesta por imágenes, que se obtuvieron el mismo día y con las mismas condiciones de iluminación, los resultados fueron mucho mejores.

Por lo anterior se puede afirmar que es necesario que los levantamientos se efectúen en un periodo de tiempo relativamente corto (unos cuantos días); aunque en zonas con alto tráfico aéreo, como es el caso de la cuenca y Ciudad de México, este trabajo a veces resulta sumamente complicado.

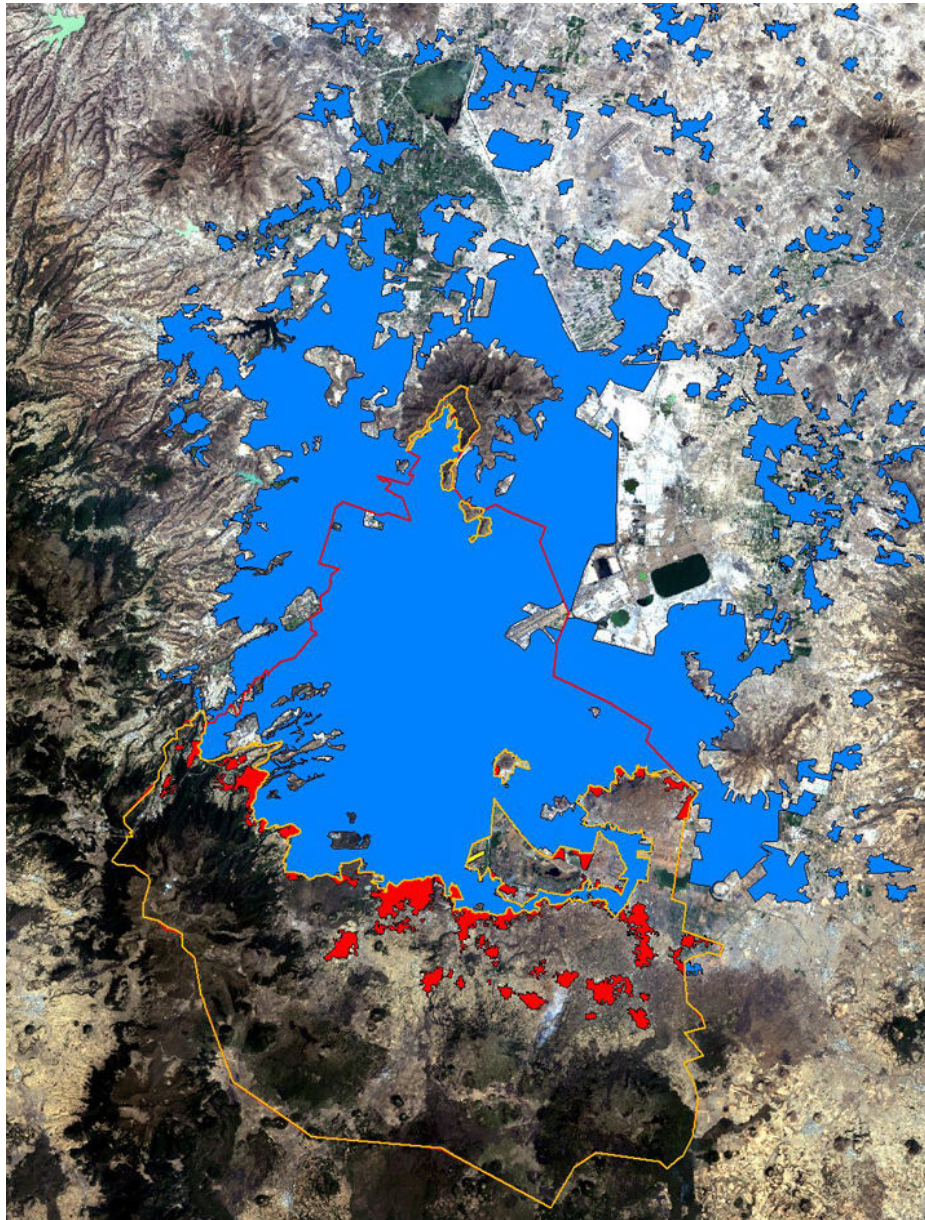


Figura 6.1 Imagen del Valle de México. En azul se observan los asentamientos humanos y en rojo la invasión sobre el suelo de conservación (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

Algunos de los problemas que se detectaron al llevar a cabo la formación de los mosaicos, surgen cuando las formas de relieve son complejas y su grado de declive es muy pronunciado, o la calidad de los puntos de control es pobre, o el modelo de elevación tiene poco detalle. Estos problemas se acentúan en los bordes de las imágenes, llegando a aparecer objetos repetidos en el mosaico. Este problema es muy crítico y puede mejorarse mediante el empleo de gran cantidad de puntos de amarre en el mosaico, los que proporcionan indirectamente, información detallada de la topografía del terreno. También se ha comprobado que con un modelo de elevación consistente, se reducen los errores en el mosaico.

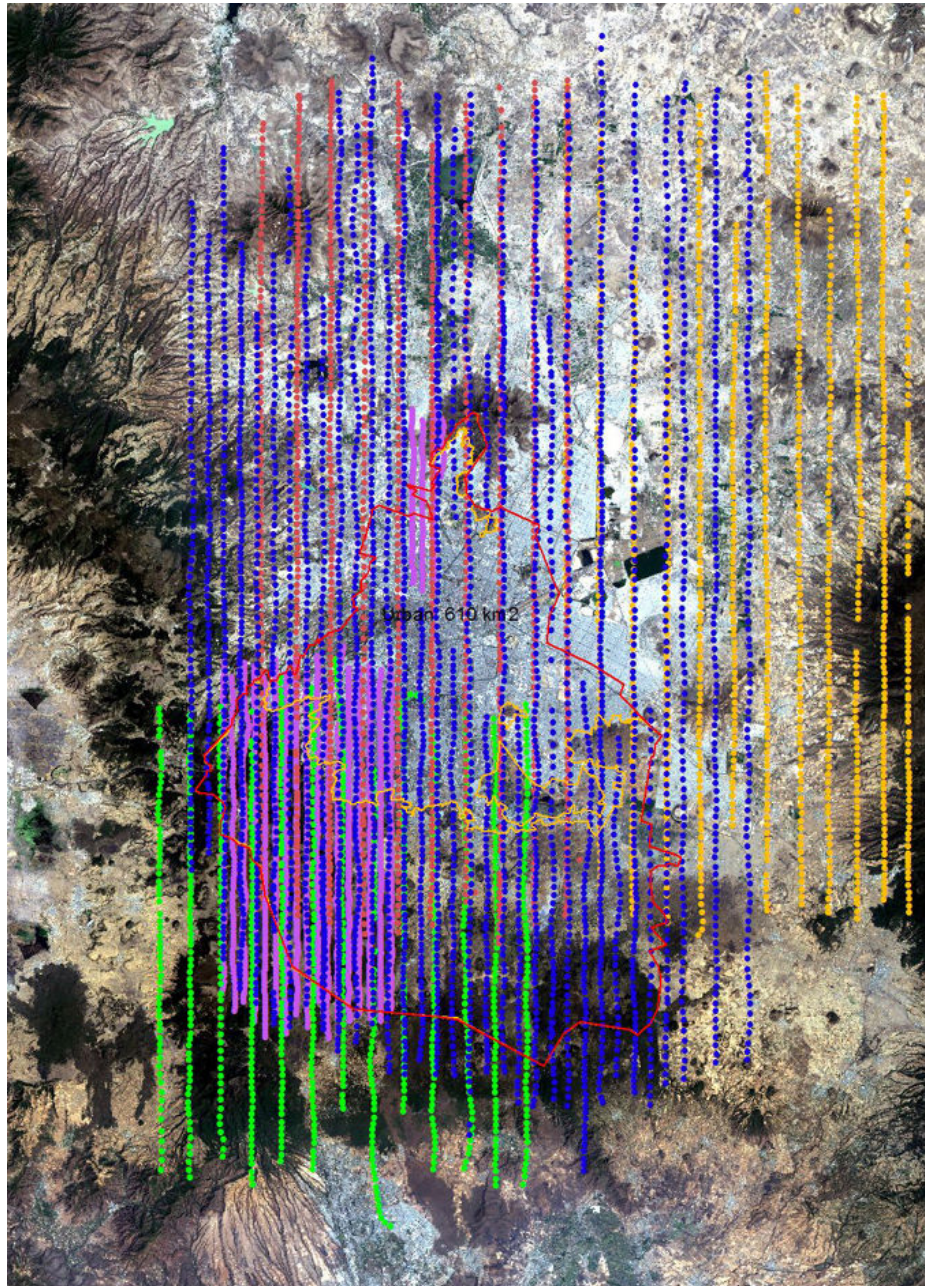


Figura 6.2 Diferentes levantamientos aéreos efectuados entre Enero de 2001 y Marzo de 2005 sobre el Valle de México. Los puntos azules corresponden al 2005 (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM)

El uso del programa *ERDAS® Versión 8.4* mediante una computadora personal, presenta limitaciones al momento de generar ortomosaicos que abarcan grandes extensiones de terreno, como el de la cuenca de México por ejemplo. En este caso el trabajo y el procesamiento, se tuvo que dividir en cuatro bloques para procesar la aerotriangulación.

En lo que respecta al error, se puede decir que éste es muy aceptable. En promedio se obtuvo un error cuadrático medio de 10 píxeles, lo que significa una precisión de

cuatro metros en las zonas altas y de ocho metros en las porciones planas, aunque es pertinente mencionar, el hecho de que en algunas áreas se detectaron errores que oscilan alrededor de los quince metros. Éstas zonas representan un porcentaje mínimo y fueron manejados como bloques separados al momento de la aerotriangulación. En cualquier caso, el nivel de error esta dentro de límites aceptables para un producto de calidad cartográfica, escala 1:20 000 de acuerdo a los lineamientos del INEGI, el USGS (United States Geological survey) (dieciséis metros en menos del 10% de los puntos medidos) y la ASPRS (Clase uno).

La remoción de deformaciones introducidas por la desalineación del lente en la cámara (punto central), la diferencia en la distancia focal nominal del lente o la distancia focal calibrada, y las deformaciones intrínsecas del lente (radial simétrica), se manejaron de diferente manera. Por una parte se aplicaron los programas de calibración para la cámara y de remoción de distorsiones geométricas desarrollados en el Laboratorio. Por otro lado, también se usaron dos paquetes más disponibles; uno de ellos comercialmente: DxO, y el otro accesible de manera gratuita: *PT lens*. Se corrieron algunas pruebas y se encontró que los resultados eran muy similares, no obstante que éstos dos últimos programas, adicionalmente ofrecen corrección contra la aberración cromática y reducen algunos artefactos en las imágenes como franjas y bordes suavizados. Otra ventaja que presentan es el hecho de poder aplicarse a una gran variedad de cámaras y lentes, por lo que resultan muy versátiles.

6.2 CONSIDERACIONES FINALES

La organización y la disponibilidad de la información tienen un papel muy importante en la toma de decisiones.

Es indispensable señalar, que el tratamiento manual de la información geográfica sobre el territorio ha dejado de ser práctico. Un cambio tecnológico en los métodos de tratamiento del enorme volumen de información sobre los múltiples estudios sobre el territorio nacional, es imprescindible. En este aspecto, los sistemas de Información Geográfica, son útiles a los especialistas para ordenar, procesar e interpretar la información existente y también para sugerir nuevos estudios que aporten conocimientos actualizados y de mayor precisión. Hoy en día, estas herramientas constituyen un elemento esencial para compartir la abundante información que ha sido obtenida a través del tiempo y que actualmente se encuentra dispersa.

No obstante, ninguna técnica automatizada de informática, ni ningún método matemático, es capaz de sustituir totalmente la experiencia y el poder cognoscitivo de un especialista experimentado. La tarea consiste, por tanto, en la aplicación combinada, racional y lógica del trabajo científico, mediante las Tecnologías de Información con los métodos tradicionales de investigación y, sobre todo, con las observaciones de campo; que complementan la intuición científica y la capacidad profesional de los investigadores, con el fin de asimilar la información sobre el espacio físico geográfico.

A pesar del esfuerzo realizado, en la formación de mosaicos ortorrectificados a partir de imágenes aéreas digitales de formato pequeño, lo cual constituye el último paso del desarrollo de un sistema completo de adquisición de imágenes aéreas digitales de alta resolución; la utilización de las imágenes digitales de pequeño formato, aún no se ha extendido lo suficiente como se hubiera deseado. Es necesario continuar con la promoción de esta tecnología alternativa, así como profundizar más en su desarrollo; mediante el mejoramiento de los procesos de obtención de imágenes, con lo que se espera obtener una contribución importante en la observación y el monitoreo permanente de los fenómenos del entorno natural de nuestro propio país.

El objetivo final de los estudios y desarrollos sobre la formación de mosaicos ortorrectificados en formato pequeño, es ponerlos a la disposición de la comunidad científica y técnica, también se propone mejorarlos para contribuir a evitar ineficiencias, redundancia e incertidumbres en los trabajos de evaluación de recursos y reordenamiento del territorio nacional, útiles en los programas de exploración, factibilidad de obras públicas y particulares. Con ello se evitará que, por falta de información, ausencia de conocimiento concerniente a las posibilidades del alcance y uso de estas nuevas herramientas, algunos estudios resulten redundantes o con poca precisión, o que simplemente no se lleven a cabo.

6.3 CONCLUSIONES

Con base en el trabajo realizado, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se cumplió con el objetivo planteado para la realización de esta tesis, que es el de desarrollar una metodología para la formación de mosaicos ortorrectificados, a partir de imágenes aéreas digitales de pequeño formato.
- Se demostró la utilidad de las imágenes aéreas digitales multiespectrales obtenidas con cámaras de formato pequeño, en particular, aquellas que cuentan con un número grande de píxeles (12-16 Megapíxeles), ya que proveen información detallada y son útiles para producir mapas de gran escala de extensiones del orden de 2,000 km² o más.
- El error obtenido en los mosaicos cae dentro de estándares nacionales (*INEGI*) e internacionales como los de *la American Society of photogrammetry and remote Sensing* y del *United States Geological Survey*.
- Se comprobó que las imágenes obtenidas en distintas fechas, con diferentes condiciones de iluminación e inclinación y tanto las variaciones atmosféricas locales, debidas principalmente a la contaminación, así como a la humedad, representan un reto, cuando se trata de obtener mosaicos con apariencia uniforme y/o aplicar métodos automatizados de clasificación en las imágenes.
- Los mosaicos de imágenes se pueden seguir empleando con gran éxito para efectuar actualizaciones de mapas de zonas sujetas a un plan de manejo y para evaluar los cambios producidos, durante un periodo de tiempo determinado, en combinación con imágenes de satélite y trabajo de campo.

6.4 SUGERENCIAS

Para las personas que vayan a utilizar este sistema o a continuar con su desarrollo se les recomienda:

1. Los ajustes que se hagan en el proceso metodológico para la corrección y ortorrectificación, así como, en la generación de mosaicos controlados y ortomosaicos; deben aplicarse de una manera cuidadosa y consistente. Esta recomendación se hace, debido a que las imágenes digitales ofrecen una amplia flexibilidad para el proceso de ajuste; por lo cual, existe la posibilidad de sobrepasar los límites de exactitud y generar una información imprecisa y errónea.
2. Se considera pertinente proseguir otros estudios, efectuar pruebas experimentales y comprobaciones de veracidad en lo concerniente a la adquisición de imágenes y efectuar las investigaciones inherentes a los métodos de elaboración de ortomosaicos. La combinación de estos aspectos, permitirá obtener la posibilidad de que el sistema que aquí se da a conocer, sea factible de emplearse; por ejemplo, en la planeación de obras de ingeniería que requieren trabajos fotogramétricos precisos. Otra aplicación posible será en los levantamientos catastrales, ya que se requiere de mayor exactitud con respecto a la que actualmente se obtiene.
3. Explorar y evaluar la posibilidad de utilización de los ángulos de orientación externa, de cada fotografía, obtenidos directamente desde la aeronave por una unidad de medición inercial, para la elaboración de mosaicos ortorrectificados. Algunos autores han obtenido mejores resultados al integrar directamente la orientación externa de cada imagen, logrando disminuir el error RMS en el mosaico final. Estos datos de orientación externa son obtenidos por el programa que genera el mosaico de manera indirecta, por lo que es explicable la diferencia en la exactitud final.

GLOSARIO

ABERRACIÓN: Es el defecto de una lente según el cual los rayos de luz no van dirigidos al punto exacto.

AEROFOTOGRAFÍA: Fotografía tomada desde un vehículo aéreo.

AEROTRIANGULACION: Método para establecer el control planimétrico y altimétrico mediante relaciones geométricas entre imágenes de fotografías aéreas traslapadas.

BANDA DE DATOS: Es una base de datos numéricos los cuales dan un valor de reflectancia con respecto a la cantidad de luz que el cuerpo emite.

BIOMASA: Cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre o por organismos de una especie específica.

CALIBRACIÓN: es simplemente el procedimiento de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que "debería indicar" de acuerdo a un patrón de referencia con valor conocido.

CAMARA DIGITAL: Es un dispositivo para captar imágenes en formato digital; el cual usa un sensor electrónico (CCD o CMOS) para transformar las imágenes en datos electrónicos.

CARTA TOPOGRÁFICA: Es una representación de la superficie terrestre en un documento hecho por medio de puntos, líneas y polígonos.

CCD: (Charge Coupled Device) Dispositivo de cargas eléctricas acopladas para transformar la luz y producir imágenes digitales.

CMOS: (Complementary Metal Oxide Semiconductor) Es la alternativa de los CCD, aunque consumen menos energía e integran circuitos de procesamiento de imágenes en el mismo circuito.

COLIMACIÓN: Es el efecto de concentrar los rayos de luz en un haz.

COLINEALIDAD: Es un fenómeno fundamental de la fotogrametría, donde tres puntos: uno en el terreno, otro en el plano de la imagen y el punto nodal, coinciden en una línea recta.

CONTRASTE: Es el efecto que permite resaltar el peso visual, de uno o más elementos o zonas de una composición mediante la oposición o diferencia apreciable entre ellas por medio de diversos medios: tonos, colores, contornos y escala.

COORDENADAS GEOGRAFICAS: Expresan todas las posiciones sobre la superficie terrestre.

CORRELACION: Los valores de dos variables distintas, con el fin de ver si existe alguna relación entre ellas, es decir, si los cambios en una de ellas influyen en los valores de la otra.

DATUM: Es una red geodésica de puntos, junto con un modelo matemático que representa forma de la Tierra.

DEM: Modelo Digital de Elevación, es una representación de elevaciones del terreno mediante valores numéricos, es una representación en forma simplificada de la geometría de la superficie terrestre.

DIAFRAGMA (fotografía): Esta formado por un conjunto de laminillas que se abren o se cierran determinando que cantidad de luz va a recibir la película.

EMISIÓN: Es un efecto que crea una acción, para emitir un valor de una imagen.

ESFEROIDE: Es la forma irregular de la Tierra y la asemeja a un sólido de revolución obtenido a partir de una elipse de referencia, que es elegida por cada país según la que asemeje a su forma.

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO: Incluye todas las radiaciones electromagnéticas que emite o absorbe un objeto.

FOTOGRAMETRIA: Ciencia desarrollada para obtener medidas reales a partir de imágenes aéreas como terrestres, para realizar mapas topográficos, mediciones y otras aplicaciones geográficas.

GCP: (Ground Control Point) Son puntos localizados de manera precisa sobre la superficie terrestre, usados para rectificar una imagen en la que se pueda establecer exactamente la localización de cada uno de sus puntos.

GPS: (Sistema e Posicionamiento Global) Es un receptor que permite determinar la posición de algún objeto, en cualquier parte del mundo, con una precisión de hasta centímetros.

IMAGEN MULTIESPECTRAL: Es una imagen compuesta de varias bandas tanto visibles como infrarrojas con una resolución variable.

LEY DE SNELL: Es una formula simple utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de índice de refracción distinto.

LONGITUD DE ONDA: Es una distancia medida en la propagación de la onda entre dos puntos cuyo estado de movimiento es idéntico, ejemplo, crestas o valles adyacentes.

LUZ VISIBLE: Es una pequeña región del espectro electromagnético cuyas ondas tienen una longitud que va desde los 780 nanómetros de la luz roja a unos 380 en la violeta.

MAGAZÍN: Es el medio para almacenar la película.

MAPA TEMÁTICO: Es aquel que muestra las características estructurales de la distribución espacial de un fenómeno geográfico particular.

MARCAS FIDUCIALES: Son cada una de las señales que aparecen en los márgenes de las fotografías aéreas realizadas por la misma cámara fotográfica.

MATLAB: Es la abreviatura de Matriz Laboratory. Es un programa de matemáticas creado por *ThemathWorks* en 1984; disponible para plataformas Uníx, Windows y MAC.

MATRIZ: Es un arreglo numérico el cual nos indica el número de pixeles que cuenta una imagen por un determinado conjunto matricial.

MULTICOLIMADOR: Es un arreglo de colimadores usado para calibrar cámaras métricas.

NEGATIVO: Se llama así a la película que se utiliza en la cámara fotográfica.

OBTURADOR: Es el dispositivo que controla el tiempo durante la llegada de luz al elemento sensible; película o sensor.

ONDAS: Son movimientos ondulatorios por los cuales se propaga energía sin transferencia de materia, de un lugar a otro a diferente intensidad.

ORTOCORRECCION: Es un proceso mediante el cual se corrigen las distorsiones y la precisión de la imagen.

ORTOFOTO: Es un documento cartográfico, una imagen rectificada y georeferenciada al sistema de coordenadas y que nos proporciona una visión más real del terreno.

ORTOMOSAICO: Es un conjunto de imágenes resultantes ya rectificadas y corregidas de la superficie terrestre.

ORTOPROYECTOR: Es un dispositivo electrónico que realiza la conversión de una fotografía aérea, sobre la que se puede efectuar mediciones.

ORTORRECTIFICACIÓN: Es una corrección que dispone de un MDE de la zona, la cual corrige las diferencias de posición y escala de los objetos en la fotografía, causadas por el relieve.

PERCEPCIÓN REMOTA (TELEDETECCIÓN): Es una forma de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto directo con dicho objeto.

PÍXEL: (Picture Element) es la menor unidad en la que se descompone una imagen digital.

PLANO FOCAL: Es el plano en el que se forman las imágenes de objetos situados en el infinito.

PROYECCIÓN ORTOGONAL: Es una imagen perpendicular, es igual a una imagen plana del terreno, sin altitud solo medidas en x, y.

PUNTOS DE AMARRE: Son los puntos que enlazan una fotografía con otra; a fin de conformar un mosaico ortorrectificado.

RADIACIÓN: Es un modo de propagación de la energía a través del vacío, de forma análoga a la luz.

RASTER: es lo que se entiende como una imagen digital o mapa de bits.

REFLECTANCIA: Es la cantidad de luz reflejada por una superficie.

REFLEXION: Fenómeno por el cual un rayo de luz que incide sobre una superficie es reflejado.

REFRACCIÓN: Es el cambio de velocidad que experimenta una onda, cuando pasa de un medio a otro.

REMUESTREO: Se basa en el uso de muestras seleccionadas por ventanas o datos variables, para cambiar el valor o generar un pixel que antes no existía.

RESECCION: Es un proceso de obtención de la orientación externa de una fotografía

RESOLUCION ESPACIAL: Es el tamaño del objeto más pequeño que es posible discernir en una imagen, está asociado con el tamaño de pixel

RGB: Son las bandas de las que están compuestas las imágenes visibles: rojo, verde y azul (Red, Green and blue).

SENSOR: Es un dispositivo que detecta manifestaciones o fenómenos físicos de la superficie terrestre.

SISTEMA DE NAVEGACIÓN INERCIAL: Es un conjunto de sensores y programas que determinan con gran precisión la localización geográfica y la orientación de los ejes de referencia de una aeronave.

TRANSECTO DE VUELO: Es el recorrido que realiza una aeronave al realizar la toma de las fotografías aéreas en la superficie terrestre.

TRASLAPE: Es la sobreposición de una imagen con otra,

USGS: United States Geological Survey

BIBLIOGRAFÍA

ASPRS. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.
<http://www.asprs.org/>

Atkinson, John, et al. (2001), ***"Satellite Imagery Rectification"***, GIM International, The Netherlands, E.U.A., Vol 15, N° 11, pp. 72-75.

Bernabé, Rogelio (2003), Aplicación de la Geoinformática a la Geotécnica. Tesis de Licenciatura, Ingeniero Topógrafo y Geodesta, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Hernández, Alfredo (2003), ***"Corrección geométrica de imágenes aéreas digitales con cámaras de formato pequeño"***, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, México, Ingeniero en Sistemas, UNAM.

Corbley, Kevin (2000), ***"Image Processing and Analysis"***, Imaging notes, Vol 15, N°3. British Ecological Society, Massachusetts, pag. 19.

Cramer, Michael (2004), ***"Performance of Medium Format Digital Aerial sensor Systems"***, Proceedings of the ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Cong. 2004, Vol 35, Part B. Istanbul, Turkey, pp. 1-6.

Dial, O. Eugene (2000), ***"Horizontal Accuracy"***, Imaging notes, Vol. 15, N°2, Estados Unidos, pp. 6-7.

Fraser, Clive, et al. (1997), ***"Digital camera self-calibration"***, ISPRS (*Journal of photogrammetric & remote sensing*), New York, pp. 149-159.

Gerlach, Frank (2001), ***"How collection Geometry Affects Image Tonality"***, imaging notes, Vol 16, N°1. University of Missouri, pp. 6-7.

Konecny, Vlastimil, et al. (1979), ***"Methods and possibilities for digital differential rectification"***, Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 45, No. 6, (praha) Geological survey of czechoslovakia in academia, pp. 727-734.

Light, Donald (1992), ***"The new camera calibration system at the u.s. geological survey"***, Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 58, No. 2, Madrid, México, pp. 185-188.

Main, Jackson, et al. (2000), ***"Precise Ground Control Is Essential for Spatial Accuracy"***, Imaging notes, Vol 15, N° 04. Estados Unidos, pp. 06-07.

Mason, Scott, et al. (1997), ***"Investigation of Kodak DCS460 digital camera for small-area mapping"***, ISPRS Journal of photogrammetric & remote sensing, University of North Carolina, pp. 202-214.

Michael, Cramer, (2004), ***"Performance of Medium format Digital Aerial Sensor Systems"***, 2004, pag. 65.

Moravec, Josef, et al. (1988), "**Epipolar Geometry and linear subspace methods: A new approach to weak Calibration**", University of Illinois, pp. 202.

NASA, National Aeronautics and Space Administration.
<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

Novak, Kurt (1992), "**Rectification of digital imagery**", Photogrammetric engineering & remote sensing, Vol. 58, No. 3, Unites States, pp. 339-344.

PCI Geomatics (2000), "**OrthoEngine. Satellite Edition**", User's Guide Version 7.0, Canadá.

Peralta, Armando, et al. (2001), "**Aerial Digital Photography as a Tool for Watershed Management in Central México**", American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Amherst, Massachusetts, pp. 1-6.

Peralta, Armando et al. (2001), "**The use of Digital Aerial Photography in the Study of Overwintering Areas of the Monarch Butterfly in Mexico**", American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Amherst, Massachusetts, pp.1-6.

Peralta, Armando, et al. (2005), "**Quantification of Irregular Settlements over Conservation Land in Southern Mexico City**", Weslaco, Texas, EEUU. ISBN-1-57083-079-7. Trabajo No.63, pp. 1-8.

Peralta, Armando, et al. (2005), "**A Comparison of Small-format Digital vs. Metric Aerial Cameras for Medium to Large-scale Mapping**", Weslaco, Texas, EEUU. ISBN-1-57083-079-7, pp. 1-6.

Prado, Jorge, et al. (2000), "**Sistema de adquisición de imágenes aéreas digitales de alta resolución**", Memorias del XV Congreso Nacional de Instrumentación. Guadalajara, Jalisco. México. Octubre 16-20, pp. 1-6.

Prado Jorge, et al. (2003), "**Small-Format Camera Calibration and Geometric Distortion Removal in Digital Aerial Images**", American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Logan, Utah, EEUU, pp. 1-6.

Prado, Jorge, et al. (2005), "**Diagnosis and Delimitation of a Natural Protected Area Using High-Resolution Multispectral Images**", Weslaco, Texas, EEUU. ISBN-1-57083-079-7. Trabajo No. 65, pp. 1-8.

Prado, Jorge, et al. (2006), "**Airborne High-Resolution Digital Imaging System**", Journal of Applied Research and Technology . Vol. 4 No. 1, Abril 2006, pp 3-23.

Toutin, Thierry, et al. (2000), "**Demystification of IKONOS**", Ottawa, Canada: Canadian Center of Remote Sensing, Natural Resources Canada, pag. 56.

USGS. United States Geological Survey.

Wolf, Paul, et al. (1997), **“Topografía”**, México, Editorial Alfaomega, versión en español, Traducción de: Elementary surveying, ISBN 970-15-0221-3.

Wolf, Paul, et al. (2000), **“Elements of Photogrammetry with applications in gis”**, Unites States, Mc Graw Hill.

Sitios de Internet consultados:

ASPRS, (*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*).
<http://www.asprs.org/>

INEGI (*Instituto Nacional de Geografía e Informática*).
<http://www.inegi.gob.mx/>

Centro Cultural Poveda, Inc. 1999, Calle Pina 210, Ciudad Nueva, Santo Domingo, D.N. <http://www.centropoveda.org/>

Mapping interactivo, Revista internacional de ciencias de la Tierra, junio 2006.
http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1185

Dirección General de sistemas – Centro de procesamiento Arturo Rosembueth (CPAR), Secretaria de Educación Publica, México, DF, 2005.

Dirección General de Acreditación, Incorporación y Revalidación (DGAIR), Secretaria de Educación Publica, México, DF, 2005.

http://sputnik.dpi.inpe.br/spring/usuario_spa/sensorr.htm
<http://www.redfacil.com.uy/teledet/>
<http://www.sci-ctr.edu.sg/ssc/publication/remotesense/>
<http://www.rlc.fao.org/proyecto/gcp/rla/126/jpn/lksperre.htm>
<http://www.imarpe.gob.pe/>
<http://www.hys.com.pe/PAGE/Geomap/>
<http://satellite.rsat.com/rsat/>
<http://www.fotomundo.com/tecnic/camaras/camaras.htm>
<http://www.sony.com>
<http://www.nikon.com>
<http://www.kodak.com>
<http://www.dpreview.com/reviews/>
<http://www.steves-digicams.com/>
<http://www.chez.com/rominfo/>
<http://www.spaceimaging.com/products/catalog/singlePDFs/ikonos.pdf>
<http://www.teledet.com.uy/quees.htm>
<http://www.fisicaysociedad.es/view/default.asp>
<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
<http://recursos.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>
<http://www.Dxo.com/>
<http://www.epaperpress.com/ptlens/>