



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**INFORME ACADÉMICO POR ELABORACIÓN COMENTADA  
DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA APOYAR LA DOCENCIA**

**GUIA GEOMÁTICA: ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA LA  
GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA BÁSICA.**

Que para obtener el título de:  
**LICENCIADO EN GEOGRAFÍA**

Presenta:  
**MARCOS MARTÍNEZ TIRADO**

Director de tesis:  
**LIC. GABRIEL SÁNCHEZ RIVERA.**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F., JULIO 2009.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## **AGRADECIMIENTOS:**

A mis padres, por ser un ejemplo de lucha antes las adversidades que se presentan en la vida y por estar incondicionalmente junto a mí en todo momento.

A mis hermanos, Lidia, Marco Antonio, Miguel y sus familias, les agradezco que siempre hayan cuidado de mí y que gracias a ustedes se hayan logrado muchas de las cosas de mi vida.

A Brenda, que comenzamos a construir nuestras vidas juntos en el tercer semestre de la carrera, desde ese tiempo has sido mi GPS para la ubicación precisa y adecuada de las situaciones vividas.

A mi asesor de tesis Gabriel Sánchez Rivera, que a través de sus conocimientos, me orientó para seguir un adecuado camino en la concepción de este trabajo.

A mis sinodales, Mtro. Pastor Gerardo Gonzáles Ramírez, Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez, Lic. Eduardo Antonio Pérez Torres y Lic. Ana Elsa Domínguez Ceballos, gracias por guiarme con sus observaciones y conocimientos en el desarrollo de este trabajo, por el tiempo que dedicaron a la lectura del mismo y por la ardua, desinteresada y generosa labor en la transmisión del conocimiento.

### **DEDICATORIA:**

Dedico este trabajo a mis dos hijos, Marcos Alfonso y Maya, los cuales son mi razón de ser en esta vida y mi motor para todos mis proyectos. Les pido una disculpa por los momentos robados a alegrías y juegos, pero al final creo que valió la pena el esfuerzo compartido.

## Contenido.

Índice.....	01
Introducción.....	04
Planteamiento del problema.....	05
Justificación del tema.....	06
Objetivos.....	07
Marco de referencia.....	08
Metodología.....	10
Capitulo 1. Descripción de los componentes de la Geomática.....	
1.1. Concepto de Geomática.....	12
1.2. Importancia de un acercamiento sistemático a las áreas de conocimiento que integran a la Geomática .....	13
1.3. Exposición del sistema geomático utilizado para la generación de Cartografía Básica.....	15
Capitulo 2. Levantamientos de información geográfica .....	17
2.1. Levantamientos Geodésicos .....	17
2.1.1. Conceptos de Geodesia .....	18
2.1.2. Geoide, elipsoide y superficie topográfica.....	18
2.1.3. Ángulo radial de la vertical, desviación de la vertical y sistema de coordenadas geodésico .....	20
2.1.4. El Datum, Datum horizontal y Datum vertical.....	22
2.1.5. Sistemas Geodésicos Geocéntricos .....	24
2.1.5.1. Sistemas de Referencia .....	25
2.1.5.2. Marco de Referencia .....	26
2.1.5.3. Materialización del Sistemas de Referencia Terrestres ITRF .....	26
2.1.5.4. Sistema de Referencia Terrestre WGS84.....	27
2.1.6. Explicación de las principales tecnologías de medición utilizadas en los levantamientos geodésicos horizontales .....	28
2.1.6.1. Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler Integrado por Satélite (DORIS).....	29
2.1.6.2. Telemetría Láser sobre satélites (SLR).....	29
2.1.6.3. Interferometría de Bases Muy Largas (VLBI) .....	30
2.1.7. Sistema de Referencia Vertical .....	30
2.1.8. Sistema Geodésico Nacional .....	33
2.1.8.1. Sistema Geodésico Horizontal .....	35
2.1.8.2. Sistema Geodésico Vertical .....	38
2.1.8.3. Sistema Geodésico Gravimétrico .....	39
2.2. Levantamientos Topográficos .....	39
2.2.1. Conceptos de Topografía .....	39
2.2.2. Tipos de mediciones existentes en los levantamientos topográficos .....	40
2.2.2.1. Mediciones en función de ángulos .....	40
2.2.2.2. Mediciones en función de distancias.....	42
2.2.3. Sistemas de representación utilizados en Topografía .....	45
2.2.3.1. Sistema de los Planos Acotados .....	45
2.2.3.2. Sistema de representación en tres dimensiones del terreno .....	46
2.2.4. Generalidades de una Estación Topográfica Total (ETT).....	50
2.3. Sistema de Posicionamiento Global (GPS).....	54
2.3.1. Antecedentes .....	54
2.3.2. Funcionamiento del GPS.....	56
2.3.3. Constitución del GPS .....	59
2.3.3.1. Segmento espacial .....	59
2.3.3.2. Segmento control.....	59
2.3.3.3. Segmento usuario.....	60
2.3.4. Métodos de medición GPS con fines geodésicos .....	61
2.3.4.1. Medición GPS con Corrección Diferencial (DGPS).....	63

2.3.4.2. Medición con el Método Relativo Estático.....	64
2.3.5. Descripción de un receptor GPS .....	65
2.4. Levantamientos Aerofotográficos .....	69
2.4.1. Proyecto de vuelo .....	70
2.4.1.1 Información básica de la zona a trabajar .....	70
2.4.1.2 Determinación de la perspectiva de toma para las fotografías aéreas .....	72
2.4.1.3 Especificaciones técnicas para levantamientos aerofotográficos .....	73
2.4.2. Descripción de las tecnologías utilizadas en los levantamientos aerofotográficos .....	83
2.4.2.1. Descripción de la plataforma de toma .....	85
2.4.2.2. Descripción de los instrumentos de navegación y posicionamiento necesarios para levantamientos aerofotográficos .....	88
2.4.3. Instrumentos utilizados para la adquisición, recepción y almacenamiento de imágenes en los levantamientos aerofotográficos.....	90
2.4.3.1. Cámara fotogramétrica analógica .....	90
2.4.3.2. Cámara fotogramétrica digital .....	100
2.4.3.3. Instrumentos de recepción y almacenamiento .....	109
2.4.4. Ejecución del vuelo aerofotográfico con Apoyo Aéreo Cinemático .....	110
2.4.4.1. Apoyo Aéreo Cinemático.....	110
2.4.5. Especificaciones técnicas de las fotografías aéreas obtenidas como insumo final de los levantamientos aerofotográficos .....	113
2.4.5.1. Evaluación de la información recolectada .....	116
2.4.6. Especificaciones técnicas para la ejecución del apoyo terrestre .....	118
2.4.6.1 Planificación en gabinete de los puntos de control terrestre requeridos para el apoyo de campo fotogramétrico.....	118
2.4.6.2 Ejecución operativa de los trabajos de campo .....	121
2.4.6.3 Post-proceso para las mediciones realizadas en campo .....	125
Capítulo 3. Proceso Fotogramétrico.....	127
3.1. Concepto de Fotogrametría y Fotoidentificación.....	127
3.1.1. Antecedentes de la Fotogrametría .....	128
3.1.2. Divisiones de la Fotogrametría.....	131
3.2. Sistema Fotogramétrico Digital (DPS) .....	133
3.2.1. Sistema de adquisición de imágenes digitales .....	134
3.2.1.1. Determinación del formato de imagen de entrada .....	134
3.2.1.2. Características de los escáneres fotogramétricos .....	138
3.2.1.3. Funcionamiento de los escáneres fotogramétricos.....	141
3.2.1.4. Problemáticas de los escáneres fotogramétricos.....	141
3.2.1.5. Imagen digital .....	143
3.2.1.6. Datos de calibración y archivos vectoriales .....	148
3.2.2. Estaciones de Trabajo Fotogramétricas Digitales (DPWS) .....	153
3.2.2.1. Características de las DPWS. ....	154
3.2.2.2. Sistema Físico (Hardware). ....	155
3.2.2.3. Sistema Lógico (Software). ....	161
3.2.2.4. Sistema de visión estereoscópica. ....	165
3.2.2.4. Sistema de medición estereoscópica. ....	172
3.3. Fundamentos técnicos y teóricos utilizados en un flujo de trabajo fotogramétrico.....	174
3.3.1. Principio de la correlación de imágenes.....	174
3.3.2. Técnicas semiautomáticas de restitución digital. ....	178
3.3.2 1. Orientación Interna .....	180
3.3.2 2. Orientación Relativa .....	184
3.3.2 3. Orientación Absoluta .....	187
3.3.2 4. Aerotriangulación por modelos independientes .....	187
3.3.3. Generación de Modelos Digitales de Elevación.....	191
3.3.3 1. Generación Automática de Modelos Digitales de Elevación.....	192
3.3.3 2. Edición de los Modelos Digitales de Elevación .....	195

3.3.3 3. Estructuras de datos en los Modelos Digitales de Elevación .....	199
3.3.4. Generación automática de Ortofotografías Digitales. ....	203
3.3.4.1. Rectificación de imágenes digitales .....	203
3.3.4.2. Rectificación diferencial .....	204
Capitulo 4. Proceso Cartográfico .....	210
4.1.    Conceptos de Cartografía .....	210
4.1.1. Conceptos de Cartografía automatizada.....	211
4.1.2. Conceptos de Cartografía digital .....	211
4.1.3. Conceptos de Sistemas de Información Geográfica .....	212
4.1.4. Evaluación sobre los conceptos presentados .....	212
4.2.    Divisiones de la Cartografía .....	213
4.2.1. Cartografía Básica.....	214
4.2.2. Cartografía Temática.....	214
4.3.    Descripción del Sistema Cartográfico Digital (SCD) .....	215
4.3.1. Descripción técnica del Sistema Cartográfico Digital.....	215
4.3.1.1. Asignación de una proyección cartográfica y un sistema global de coordenadas .....	216
4.3.1.2. Organización de las estructuras de datos de las entidades geográficas básicas a representar .....	217
4.3.1.3. Representación geométrica de entidades geográficas básicas .....	218
4.3.1.4. Relaciones espaciales entre las entidades geográficas.....	221
4.3.1.5. Vinculación de datos asociados a las diferentes entidades geográficas .	224
4.3.2. Descripción operativa del Sistema Cartográfico Digital .....	226
4.3.2.1. Entidades Orográficas .....	227
4.3.2.2. Entidades Hidrográficas .....	229
4.3.2.3. Entidades de servicios e Instalaciones.....	230
4.3.3. Descripción del proceso de abstracción cartográfica utilizada en este trabajo .....	234
Conclusiones y recomendaciones.....	236
Referencias Bibliográficas.....	239
Referencias de páginas web consultadas.....	241
Glosario de Términos.....	242

## INTRODUCCIÓN.

En Geografía, como en otras ciencias de la Tierra, la Cartografía es una disciplina imprescindible para mostrar la localización<sup>1</sup> de las distribuciones espaciales de los objetos, por esto, el desarrollo de la geografía actual puede elevar el valor de sus análisis, a partir de la riqueza de ilustraciones y construcciones gráficas que incorporen la categoría espacial en los trabajos que realice.

Mediante la incorporación de la tecnología informática a la generación de documentos cartográficos, se comienzan a aportar una serie de posibilidades e instrumentos, que hasta hace pocos años, eran no sólo desconocidos, sino impensables. La revolución tecnológica que han sufrido las sociedades occidentales en las últimas décadas, ha transformado el trabajo y concepción de todas las ciencias, incluida la cartografía. Además, este desarrollo va vinculado con una disminución de los costos tecnológicos que han permitido su introducción en todos los ámbitos del trabajo científico, académico, estudiantil, etc., reduciendo en tiempos algunos elementos como el almacenamiento de datos, el tratamiento y la presentación de resultados. De este modo ha cambiado radicalmente la forma de realizar mapas, esto se convierte, en manos de los geógrafos, en una herramienta con múltiples posibilidades para representar gráficamente los fenómenos espaciales relativos al movimiento, al cambio, y a la transformación en relación con el tiempo. Por lo anterior, este trabajo tiene como premisa fundamental la realización de una guía didáctica en la cual se informa la experiencia profesional del autor sobre las técnicas e instrumentos geomáticos utilizados para generar cartografía básica.

El primer capítulo se ha orientado a brindar un marco conceptual y normativo sobre la Geomática como un conjunto de disciplinas, métodos y tecnologías en las cuales se integran todos los medios (metodológicos e instrumentales) para la adquisición, procesamiento, representación y difusión de información geográfica. En lo que respecta a las disciplinas y tecnologías, los conceptos incorporados son los necesarios para solventar las necesidades propias para la generación de cartografía básica.

En el segundo capítulo se da una explicación de los levantamientos de información geográfica, los cuales incluyen a los levantamientos topográficos, los levantamientos geodésicos, desarrollando principalmente los conceptos básicos del posicionamiento satelital con GPS, así como los procedimientos técnicos y operativos que condicionan la precisión de tales levantamientos, y por último, la descripción técnica y metodológica de los levantamientos aerofotográficos como uno de los principales proveedores de información geográfica detallada en la actualidad.

---

<sup>1</sup> Ellen Churchill en su libro "Geographical Location as a Factor in History", y perteneciente al Boletín de la Sociedad Geográfica Americana, tomo 40, Pág. 65, comenta que la localización cartográfica de un país, pueblo o fenómeno, es el hecho geográfico supremo en su historia.



En el tercer capítulo se describen los principales métodos e instrumentos utilizados en la actualidad para realizar los procesos fotogramétricos necesarios en la generación de cartografía básica. La importancia de realizar una amplia explicación de estos procesos radica en que son la base matemática y por lo tanto determinan la precisión de cualquier proyecto cartográfico, además de que la restitución digital es el proceso más extenso en cualquier trabajo. Esta restitución digital está conformada por las correcciones geométricas (orientaciones fotogramétricas y aerotriangulación) necesarias para la generación de insumos como Modelos Digitales de Elevación (MDE) y ortofotos, los cuales también se encuentran dentro del mismo proceso de restitución digital.

En el cuarto y último capítulo se pretende dar una explicación de las etapas necesarias para incorporar los insumos obtenidos a partir de la compilación fotogramétrica dentro de un Sistema Fotogramétrico Digital (DPS, por sus siglas en inglés, Digital Photogrammetric Systems) a un Sistema Cartográfico Digital que nos permita integrar, editar, administrar y presentar la cartografía básica definitiva de este trabajo. Así mismo se abordan algunas tendencias conceptuales importantes, orientadas al impacto producido por la introducción de las ciencias informáticas y computacionales a los métodos electrónicos para la generación de cartografía, ya que ocasionó que se desarrollaran conceptos como Cartografía Automatizada, Cartografía Digital y los Sistemas de Información Geográfica.

Finalmente se presentan las conclusiones, un glosario de términos que complementa a los apartados conceptuales, así como la bibliografía y páginas electrónicas utilizadas para la fundamentación de este trabajo.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Recientemente la enseñanza superior de la Geografía en la Universidad Nacional Autónoma de México actualizó su plan de estudios en el sistema escolarizado, instituyendo tres líneas de orientación: Geografía Física, Geografía Humana y Cartografía y Geomática, mismas que se definen como preespecializaciones y a partir de las cuales el estudiante podrá decidir sobre su actuación profesional.

Así mismo, La línea de orientación dedicada a la Cartografía y Geomática tiene como objetivo primordial proveer a los alumnos de elementos teórico metodológicos y conocimientos técnicos necesarios para desarrollar el trabajo cartográfico y geomático, con el fin de manejar la información geográfica.

En concordancia con el objetivo anterior, es una realidad que un sector del mercado laboral del geógrafo ha sido impactado considerablemente por la evolución tecnológica en equipos, aparatos de medición y observación y el desarrollo de la informática.

En este contexto es necesario mencionar que actualmente la elaboración de cartografía temática, la generación de grandes sistemas de información geográfica gubernamentales o particulares e inclusive, los modernos servidores de mapas por Internet, se han convertido en herramientas estratégicas con las que se pretende reflejar la potencialidad o las limitaciones de cualquier parte de un territorio, describir los fenómenos que acontecen en el mismo, o bien, atender cualquier tipo de demanda que requiera una gran cantidad de usuarios de información georreferenciada. Cabe mencionar que todos los ejemplos antes mencionados se encuentran sustentados en el manejo de cartografía básica, cuyo proceso de generación depende, en gran medida, del instrumental y las metodologías que se utilicen, ya que estos debe contar con los estándares actuales de calidad y veracidad de la información geográfica a representar, lo cual involucra la utilización de herramientas y tecnologías integradas en la Geomática.

Desde un punto de vista tecnológico, las dependencias gubernamentales dedicadas a la generación de cartografía básica en nuestro país, como lo es el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y algunos institutos geográficos estatales, se han preocupado por mantenerse a la vanguardia mediante la asignación de recursos humanos, materiales y económicos que les permitan contar con tecnologías aptas para dichos propósitos. Pero, desde un punto de vista operacional, la eficiencia y la capacidad de gestión para una adecuada sistematización en la generación de cartografía básica podría verse limitada dos aspectos fundamentales:

1. El primero de ellos es la falta de comunicación por parte de las dependencias encargadas de generar cartografía básica, lo que ocasiona una dispersión de la información existente y duplicidad de esfuerzos por intereses institucionales.
2. El segundo aspecto es la falta de recursos humanos calificados para poder satisfacer las demandas específicas de manipulación de instrumentos de precisión utilizados para la recolección, geoprocésamiento, administración y representación de la información geográfica recolectada, así como la deficiencia en el manejo de los fundamentos teóricos y metodológicos de la cartografía tanto tradicional como moderna.

## **JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.**

La importancia de este trabajo se sustenta en la necesidad que tiene la Geografía en generar materiales didácticos especializados en las nuevas tecnologías, las cuales son nuevas herramientas en el quehacer geográfico. Estas herramientas son una alternativa para obtener resultados más eficaces (rápidos, precisos y de mayor calidad) a partir del uso de la Geomática e instrumentos de precisión utilizados para la adquisición, procesamiento, representación y difusión de información geográfica, tomando como ejemplo la generación de cartografía básica.

Para lograr tal objetivo, se requiere de la adecuada planificación y desarrollo de las distintas etapas involucradas en un proyecto de estas características, ya que el material cartográfico resultante debe cumplir con las siguientes características:

- **Utilidad:** la cartografía básica generada en este trabajo debe cumplir con los estándares nacionales en términos de precisión y exactitud.
- **Costos:** la generación de la cartografía resultante debe considerar un costo razonable en relación con las dimensiones del proyecto y su disminución comparativa con los costos a partir de procesos tradicionales.
- **Tiempo de ejecución:** los tiempos de generación, al igual que los costos, están en relación con las dimensiones del proyecto y de igual forma, deben ser menores en comparación con los procesos tradicionales.

Una realidad a nivel nacional es que la cartografía básica desarrollada por instituciones gubernamentales federales y estatales no satisface las condiciones anteriormente descritas, sobre todo en los costos y tiempos de ejecución, esto no significa que la institución no cumpla con la misión que le fue encomendada; por el contrario, solo se puede comentar que estas fueron superadas por nuevas expectativas y exigencias de usuarios potenciales de cartografía básica que demanda la realización de trabajos específicos y ajustados a sus propias necesidades.

## **OBJETIVO GENERAL.**

Elaborar material de apoyo a la docencia, en el cual se describan y expongan un conjunto de metodologías de procesos y tecnologías necesarios para la recolección, procesamiento, administración y difusión de información geográfica, destacando la importancia del proceso de generación de cartografía básica, en el ámbito de la Geografía.

## **OBJETIVOS PARTICULARES.**

1. Describir el concepto de Geomática y establecer un acercamiento sistemático de las áreas de conocimiento que integran a la Geomática.
2. Integrar los procesos y tecnologías de un sistema geomático en conjunto con sus conceptos, métodos y técnicas necesarias para una adecuada comprensión y para fundamentar que estos son los adecuados a utilizar en un proyecto geográfico con fines de generar Cartografía Básica.
3. Explicar el proceso metodológico de recolección y procesamiento de información geográfica a partir de levantamientos geodésicos, topográficos y aerofotogramétricos, los cuales se encuentran constituidos por un

conjunto de observaciones realizadas directamente sobre el terreno y procesos complementarios en gabinete para la recolección, medición, cálculo y registro de datos.

4. Explicar los apartados teóricos y tecnológicos necesarios para documentar y especificar el proceso fotogramétrico necesario para la extracción de información geométrica y temática de objetos del mundo tridimensional a partir de imágenes digitales bidimensionales de esos objetos, y así poder generar insumos fotogramétricos como MDE, ortofotos y curvas de nivel, indispensables para la generación de cartografía básica.
5. Explicar las etapas necesarias para incorporar los insumos obtenidos a partir del proceso fotogramétrico a un sistema cartográfico digital que nos permita administrar, editar y presentar la cartografía básica definitiva.

## **MARCO DE REFERENCIA.**

En la actualidad, cada vez son más importantes las aplicaciones que se le otorgan a la cartografía básica, incluyendo los métodos y tecnologías utilizados para su generación, por citar algunos ejemplos, en la ejecución de anteproyectos y proyectos ejecutivos de obras como la construcción de acueductos, carreteras, líneas de transmisión eléctricas y de telecomunicaciones, así como la generación de cartografía temática y el desarrollo de Sistemas Información Geográfica (SIG), es indudable e inclusive fundamental la utilización de Cartografía Básica detallada del espacio geográfico que se desea abordar.

Por lo anterior, hoy en día, se requiere de la generación de cartografía básica en el menor tiempo posible y con bajos costos económicos; en este campo de oportunidad, las técnicas geomáticas han adquirido una importancia creciente debido a las ventajas que ofrece el tratamiento digital de información geográfica. En función de la demanda de los especialistas o usuarios de este tipo de Cartografía, instituciones gubernamentales como el INEGI y algunas empresas privadas a nivel nacional han actualizado y homogenizado sus flujos de trabajo a un estándar a nivel nacional que parte de la premisa de que las fuentes cartográficas del espacio geográfico a trabajar solo sirven como información documental y para dar referencia de su ubicación, por lo que para generar cartografía básica que cumpla con sus demandas es necesario ejecutar los siguientes procesos:

- Levantamientos de información geográfica: son la base de la recolección de información a través de mediciones en campo y sus respectivos post-procesos en gabinete, estos engloban a los levantamientos geodésicos y topográficos vía Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y Estaciones Totales Topográficas (ETT), y a los levantamientos aerofotogramétricos apoyados por GPS y Sistemas de Navegación Inercial (INS).

- Procesamiento fotogramétrico: se conforma de los procesos técnicos necesarios para la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) y ortofotos mediante Sistemas Fotogramétricos Digitales (DPS, por sus siglas en inglés, Digital Photogrammetric Systems) y Estaciones Fotogramétricas Digitales (DPWS, por sus siglas en inglés, Digital Photogrammetric Work Station). Actualmente los MDE y las ortofotos son insumos básicos que permiten extraer información para la generación de cartografía básica y temática.
- Procesamiento cartográfico: en este proceso se incorporan los fundamentos teóricos y metodológicos de la cartografía tradicional para una adecuada generación de cartografía básica. A partir de un Sistema Cartográfico Digital (SCD) se realizará la incorporación de insumos fotogramétricos a un Sistema de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por su sigla en inglés, Computer Aided Design) como base para generar cartografía básica.

Otro apartado fundamental en el desarrollo de las técnicas geomáticas se presenta aunado al progreso de la ciencia y la tecnología experimentado en las últimas décadas, ya que incorporó paulatinamente en sus procesos de adquisición, integración y representación de información espacial, diversos métodos y herramientas de disciplinas tales como la geodesia, topografía, fotogrametría y percepción remota, junto a la creciente aplicación en todas las áreas tecnológicas indicadas de los procesos de la electrónica, la informática y las telecomunicaciones.

Una referencia importante para determinar el momento histórico del desarrollo antes mencionado, se da con la conformación de la 4<sup>o</sup> generación informática (1971 y 1981). Esta fase de evolución se caracterizó por la integración de los componentes electrónicos, y esto dió lugar a la aparición del microprocesador, que es la integración de todos los elementos básicos del ordenador en un sólo circuito integrado y da la posibilidad de procesar, archivar, y almacenar datos en computadoras con capacidad para administrar grandes volúmenes de información. Por otra parte, la apertura político-tecnológica ocasionada por el declive de la llamada guerra fría dio lugar a que la tecnología no solo estuviera en manos de grupos científico-militares, prueba de esto se da a principios de los 80s, cuando los dos principales grupos de constelaciones de Sistemas de Geodesia Espacial, GPS-NAVSTAR y GLONASS dan apertura de sus sistemas para aplicaciones civiles, con esto se comienzan a utilizar como la principal tecnología para determinar la posición de puntos o lugares sobre la superficie de la Tierra, tanto en planimetría como en altimetría.

Al mismo tiempo, a nivel mundial, las instituciones gubernamentales y privadas, dedicadas a la elaboración de cartografía básica comenzaron a utilizar un método casi estandarizado, la restitución fotogramétrica para la obtención de información cartográfica, lo anterior aprovechando los sistemas fotogramétricos, para la década de los 90's, la fotogrametría analógica, ha sido paulatinamente sustituida por la analítica, donde únicamente se da una evolución en el modo de trabajar,

apoyada por la aparición de los sistemas informáticos, obteniendo mejores rendimientos y precisiones al sustituir la analogía mecánica por los cálculos matemáticos, para posteriormente dar paso a la digital, lo que supone un cambio radical en cuanto a la instrumentación, al desarrollo de hardware y software específico, proporcionando una serie de insumos que hasta ahora eran difíciles de producir.

En el ámbito nacional, la elaboración de cartografía básica tiene un gran impulso en el año de 1983, cuando comienza la descentralización del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), para quedar estructurado en 32 departamentos de cartografía automatizada, que en sus inicios operaban con recursos y equipo informático limitado. Simultáneamente, la creación de las áreas de Geodesia permitió la densificación de la red geodésica nacional.

En 1992 con la entrada del Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares Urbanos (PROCEDE), se dota de infraestructura informática a las áreas de cartografía y comienza la incorporación de estaciones fotogramétricas digitales a los procesos de producción de insumos para generar cartografía básica. Para el año 2004, cada área de cartografía dentro del INEGI, contaba ya con un departamento de Geodesia, encargado de los levantamientos geodésicos y topográficos para el apoyo terrestre en vuelos aerofotogramétricos, triangulación aérea y densificación de la Red Geodésica Nacional; un área de fotogrametría, responsable de la generación de insumos como MDE, ortofotos y curvas de nivel, un departamento de cartografía automatizada, dedicado a la restitución de planimetría y amanzanamientos en zonas urbanas.

En conjunto con esta reestructuración nacional del INEGI, se realiza la adquisición de una enorme infraestructura de instrumentos para estas áreas, como sistemas GPS bifrecuencia, estaciones totales topográficas, cámaras fotogramétricas analógicas y digitales y estaciones fotogramétricas digitales.

## **METODOLOGÍA.**

La estructura metodológica que se utilizó en el presenta trabajo consiste en:

- a) Investigación documental.** Búsqueda y consulta de fuentes bibliográficas, hemerográficas y páginas WEB especializadas en las técnicas desarrolladas por la geomática, orientadas a la generación de cartografía básica. Estas técnicas geomáticas involucran a los levantamientos de información geográfica (geodésicos, topográficos y aerofotogramétricos), procesamiento fotogramétrico (orientación, aerotriangulación y restitución fotogramétrica) y el procesamiento cartográfico (representación geométrica y relaciones espaciales de entidades geográficas básica a través de un tratamiento alfanumérico y topológico digital).

La estructura de este apartado tiene como fin primordial relacionar los conceptos teóricos con los apartados técnico-operativos utilizados en cada etapa a desarrollar.

- b) Límites espaciales del proyecto.** En este apartado se presenta una descripción del área de estudio utilizada en la estructuración de este trabajo, nos referimos a la parte central de la carta topográfica E14A49, específicamente al cuadrante E14A49B, del cual se realizó la adquisición de fotografías aéreas de archivo escala 1:40,000 con fecha de vuelo de Marzo del 2005, y a partir de las cuales, se realizó el análisis adecuado para determinar las especificaciones técnicas utilizadas en este proyecto de vuelo aerofotográfico, a la vez, estas fotografías aéreas serán la base y fuente primaria de información para los procesos fotogramétricos de generación de ortofotos y MDE, así como para la extracción de información a partir de la utilización de técnicas como la fotointerpretación y restitución.
- c) Recopilación y adquisición de material cartográfico.** Se identifico la información documental disponible del área de estudio, así como la adquisición de insumos como fotografías aéreas y vértices geodésicos que se encuentren a la venta.
- d) Análisis de la Información.** Se considero toda la información recopilada con la finalidad de desarrollar los procesos de campo y gabinete necesarios para la generación de cartografía básica.

# **CAPITULO 1. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA GEOMÁTICA.**

## **1.1. Concepto de Geomática.**

El acelerado desarrollo tecnológico experimentado en las últimas décadas, ha aportado nuevas posibilidades para la obtención, procesamiento e integración de información geográfica basada en los métodos y procesos utilizados por las disciplinas orientadas al estudio de la Tierra, incluidas las encargadas de generar productos cartográficos.

Este proceso de integración de conocimientos condujo a la conformación de un nuevo campo de conocimiento denominado “Geomática”, la cual se encuentra en desarrollo constante a causa de las innovaciones tecnológicas que han incidido en las áreas que la conforman.

La geomática es un campo de actividades que, usando una aproximación sistémica, integra todos los medios para adquirir, manejar y representar datos espaciales requeridos como parte de actividades científicas, administrativas, legales y técnicas que se preocupan de la producción y manejo de información espacial (Instituto Canadiense de Geomática, Canadá. 2000, Fuente: [www.cartesia.org](http://www.cartesia.org)).

Barry F. Kavanagh, en su libro “Geomatics”, (2003<sup>1</sup>), comenta que “la geomática es un término usado para describir la ciencia y tecnología del tratamiento de datos de mediciones terrestres, incluyendo la colección, clasificación, manejo, planeación, diseño, almacenamiento y presentación. Tiene aplicaciones en todas las disciplinas y profesiones que usan datos espacialmente georreferenciados”.

Desde un punto de vista práctico podríamos simplificar que la geomática se compone de un conjunto de procedimientos y tecnologías que se integran para recolectar, procesar y representar información geográfica. Pero, esta información geográfica de carácter espacial procesada a través de medios semi-automatizados presenta ciertas características que deben tomarse en cuenta cuando se manipula, los datos geográficos son objetos o fenómenos del mundo real que tienen una cierta ubicación en la superficie de la tierra y son descritos por uno o más atributos cualitativos o cuantitativos. De este modo, la información espacial recolectada es procesada en términos de la posición del objeto con respecto a un sistema de coordenadas, su temporalidad, los atributos de los objetos físicos asociados con su posición geográfica y las relaciones espaciales de los objetos representados.

Así, la utilización de la geomática como una alternativa tecnológica para generar cartografía básica debe cumplir con los procesos y tecnologías adecuados para el tratamiento de información geográfica y además permitir la reducción de tiempo y costos.

---

<sup>1</sup> Este autor es tomado como referencia de la tesis “Importancia de la aplicación de la Geomática para el ordenamiento territorial en México”, Pág. 99, elaborada por el M. en G. Gilberto Núñez Rodríguez, 2003.



Por otra parte, el impacto ocasionado por la informática en la geografía, ha impulsado el desarrollo de un área de desarrollo denominada “Geoinformática”. Vladimir Tikunov, catedrático de la Universidad de Lomonosov, Moscú; comenta que la geoinformática establece los principios, técnicas y tecnología de la recepción, almacenamiento, transmisión, procesamiento y presentación de datos geográficos obtenidos de diversas fuentes.

De manera oportuna, es conveniente incorporar al concepto anterior, que utiliza métodos propios para la búsqueda de soluciones a problemáticas geográficas a partir del uso de las matemáticas y las técnicas informáticas, creando o utilizando hardware, software y modelos matemáticos o todos a la vez.

Aunque los dos términos presentados con anterioridad pueden presentarse por algunos autores, publicaciones en Internet y libros del tema, como sinónimos, existen grandes diferencias metodológicas y operativas entre ambas.

Por la amplitud de integración de procesos y tecnologías que puede abarcar la geomática, a continuación se presenta un acercamiento sistemático a la conceptualización de esta alternativa tecnológica para generar cartografía básica.

## **1.2. Importancia de un acercamiento sistemático a las áreas de conocimiento que integran a la Geomática.**

La realización de este trabajo de investigación, se sustenta en la necesidad de elaborar un documento que muestre una alternativa tecnológica para obtener resultados más eficaces (rápidos, precisos y de mayor calidad) a partir de los fundamentos teóricos y conceptuales de las herramientas geomáticas e instrumentos de precisión utilizados para la adquisición, procesamiento, representación y difusión de información geográfica, tomando como ejemplo la generación de cartografía básica.

A la vez, se pretende mostrar una estructura apegada lo más posible a la realidad nacional, sin olvidar que este campo de conocimiento se sustenta en teorías desarrolladas en países como Canadá, Estados Unidos y Francia y que tiene como finalidad la generación de conocimiento acerca de sus procesos y tecnologías. Para realizar esta estructura se plantea la propuesta de utilizar un acercamiento sistemático para establecer un esquema idóneo en la adecuada explicación de los procesos y tecnologías que abarca la geomática, reduciendo cada uno de ellos a sus partes más simples.

Bertalanffy, principal desarrollador de la Teoría General de Sistemas (TGS), comenta que las propiedades de los sistemas no pueden describirse significativamente en término de sus elementos separados. La comprensión de los sistemas sólo ocurre cuando se estudian globalmente, involucrando todas las interdependencias de sus partes.

También comenta que la TGS es capaz de trascender los problemas de cada ciencia y que tiene una visión orientada hacia todo, es decir, está más interesada en integrar las cosas que en separarlas.

Asimismo, encontramos que existen sistemas reales, los cuales presentan elementos que existen en determinado tiempo y espacio y cuentan con características propias para ser una entidad observable.

Estos sistemas reales pueden ser abiertos, cerrados o aislados, según que realicen o no intercambios con su entorno. Un sistema abierto es un sistema que recibe flujos ([energía](#) y [materia](#)) de su ambiente, cambiando o ajustando su comportamiento o su estado según las entradas que recibe.

Los sistemas abiertos, por el hecho de recibir energía, pueden realizar el [trabajo](#) de mantener sus propias estructuras e incluso incrementar su contenido de [información](#) (ver figura 1.1).

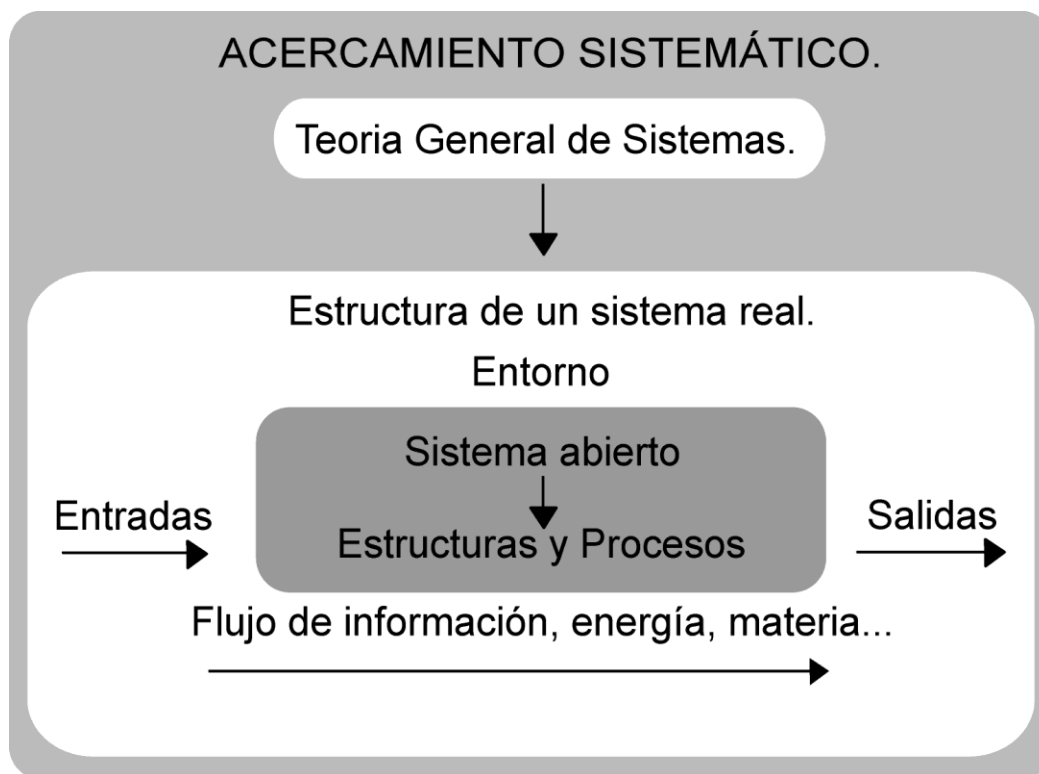


Figura 1.1 Esquema simplificado de un sistema.  
(Adaptado de Gilberto Núñez Rodríguez, 2003).

Adaptando la TGS a las necesidades propias de este trabajo, se considera que la generación de cartografía básica puede sustentarse en la integración de procesos y tecnologías para lograr el procesamiento de información georreferenciada, estructurando adecuadamente todos estos procesos y tecnologías dentro de un sistema denominado "Sistema Geomático".

### **1.3. Exposición del sistema geomático utilizado para la generación de Cartografía Básica.**

Dentro de este sistema geomático se diferencian tres grandes subsistemas concatenados y apoyados en tecnologías concretas para la recolección, medición, cálculo, registro y obtención de insumos determinados y que tienen una utilización dentro del propio sistema geomático (ver figura 1.2). Estos subsistemas son:

1. Levantamientos de información geográfica: este engloba a los levantamientos geodésicos y topográficos vía Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y Estaciones Totales Topográficas (ETT), y a los levantamientos aerofotogramétricos apoyados por GPS y Sistemas de Navegación Inercial (INS). Son la base de la recolección de información.
2. Procesamiento Fotogramétrico: se conforma de los procesos técnicos necesarios para la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) y ortofotos mediante Sistemas Fotogramétricos Digitales (DPS, por su sigla en inglés, Digital Photogrammetric Systems) y Estaciones Fotogramétricas Digitales (DPWS, por su sigla en inglés, Digital Photogrammetric Work Station). Actualmente los MDE y las ortofotos son insumos básicos que permiten extraer información para la generación de cartografía básica y temática.
3. Procesamiento Cartográfico: En este subsistema se incorporan los fundamentos metodológicos de la cartografía para una adecuada generación de cartografía básica. Todos los procesos de este subsistema utilizan la incorporación de insumos fotogramétricos a software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) como base de restitución cartográfica para generar cartografía básica.

En complemento a lo anterior, es fundamental considerar los siguientes aspectos.

- En cuanto a los subsistemas ilustrados en la figura 1.2, es necesaria una adecuada explicación de los conceptos teóricos, procesos y tecnologías que engloba cada subsistema.
- El conocimiento y la experiencia en la selección de los métodos e instrumentos incorporados en este sistema geomático, debe permitir realizar comparaciones con otros métodos e instrumentos, lo cual nos permite evaluar los procedimientos y resultados deseados.
- Mostrar, en un aspecto práctico, que el conocimiento de los procesos y tecnologías geomáticas actuales, son herramientas que complementan la formación profesional de los especialistas en algún campo de conocimiento o de actividad relacionada con el análisis espacial.

A partir de la segmentación en subsistemas del sistema geomático, se estructura la información de los capítulos 2, 3 y 4 de este trabajo.

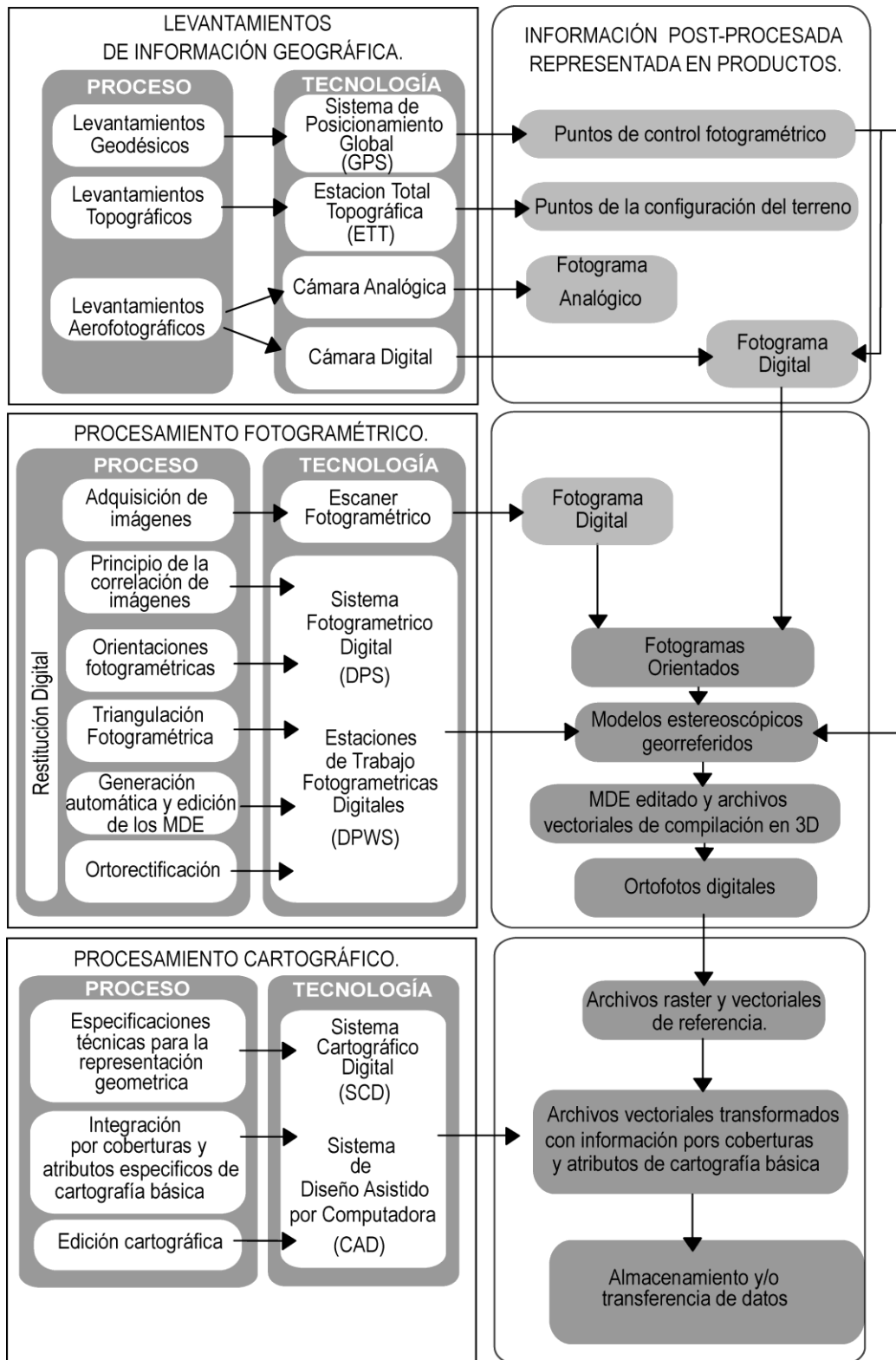


Figura 1.2. Esquema de un Sistema Geomático aplicado a la generación de Cartografía Básica. (Elaboración propia).

## **CAPITULO 2. LEVANTAMIENTOS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.**

Los levantamientos de información geográfica se encuentran constituidos por un conjunto de observaciones recolectadas y medidas directamente en campo y los procesos complementarios en gabinete para el cálculo y registro de los datos. Estos datos pueden ser de muy diverso orden, ya que la recolección puede abarcar desde la ubicación o posicionamiento de puntos hasta la obtención de fotografías aéreas. Para efectos de este trabajo se han determinado tres tipos de levantamientos de información geográfica útiles para generar cartografía básica, y estos son:

- Levantamientos Geodésicos.
- Levantamientos Topográficos
- Levantamientos Aerofotográficos.

La importancia geográfica de sustentar la utilización de estos levantamientos de información geográfica, desde un punto de vista teórico y operativo, radica en el análisis de los cambios tecnológicos experimentados en las dos últimas décadas en nuestro país, ya que este cambio ocasionó una demanda creciente de usuarios cada vez más tecnificados en los campos de estudio de las ciencias de la Tierra, recursos naturales y el medio ambiente, debido a que estos contaban con una necesidad de información territorial georreferenciada espacialmente, precisa y actualizada.

En estas dos últimas décadas se ha presentado un acelerado desarrollo de las nuevas tecnologías GIS y GPS, ocasionando un enorme impacto en los profesionistas dedicados a la georreferenciación de información como los geógrafos, geodestas y topógrafos, ya que la expresión de georreferenciación comenzó a involucrar estándares de precisión cada vez más exactos.

Aunado a lo anterior, en el campo profesional, actualmente es necesario que un geógrafo cuente con los conocimientos teóricos y operativos sobre la utilización de productos generados a partir de estos levantamientos de información geográfica, estos productos se presentan en la figura 1.2.

### **2.1. Levantamientos Geodésicos.**

Los levantamientos geodésicos se realizan con el fin de obtener una superficie de referencia a partir de mediciones y cálculos necesarios para la ubicación o posicionamiento de puntos en grandes extensiones de la superficie terrestre.

Estos levantamientos son el punto inicial en la elaboración de cartografía, ya que mediante la determinación de una superficie real o arbitraria utilizada como sistema de referencia y la materialización de un marco de referencia, se sustenta el establecimiento de una red de puntos distribuidos por toda la Tierra o sobre determinado territorio. Para poder explicar los métodos y tecnologías utilizados en levantamientos geodésicos es necesario exponer y conceptualizar algunos aspectos teóricos pertenecientes a la Geodesia.

### **2.1.1. Concepto de Geodesia.**

La geodesia estudia la forma y dimensiones de la Tierra en trabajos cuya extensión deba considerarse la curvatura terrestre, ya que en la aplicación, es su principal diferencia con la topografía, en la cual no se considera la curvatura de la tierra.

García-Tejero, en su libro de topografía general y aplicada, 1993, define a la geodesia como la ciencia que tiene por objeto el estudio de la forma y dimensiones de la Tierra, y para conseguirlo se eligen en la superficie puntos distribuidos por toda ella, denominados geodésicos, de cuya posición se deduce la forma de un territorio o de todo el globo. Para situar estos puntos es preciso relacionarlos con un sistema general de referencia.

Franco S. Maass y Valdez M. en su libro de “Principios básicos de cartografía automatizada” comenta que la geodesia es la ciencia que se ocupa de las investigaciones para determinar la forma y dimensiones de la Tierra, la localización precisa de puntos sobre la superficie terrestre, así como las variaciones de gravedad.

### **2.1.2. Geoide, elipsoide y superficie topográfica.**

Existen tres figuras de referencia para determinar la forma y dimensiones de la Tierra<sup>1</sup>:

- a) El geoide: Es una superficie equipotencial, física y real nivelada de la Tierra, esta superficie supone a los océanos en reposo y prolonga el nivel medio del mar por debajo de los continentes, esta sería una superficie de equilibrio entre las masas oceánicas sometidas a la acción gravitatoria y a la fuerza centrífuga ocasionada por los movimientos de translación y rotación de la Tierra. El geoide toma en cuenta las anomalías gravimétricas (ocasionadas por la distribución de las masas continentales y la densidad de los componentes de la Tierra) y el achatamiento de los polos, por lo cual es una superficie irregular con protuberancias y depresiones, apartándose de la superficie regular media en desniveles que alcanzan hasta los  $\pm 100$  metros.
- b) El elipsoide: Es un marco de referencia arbitrario, teórico y matemático que permite realizar cálculos para realizar la proyección de los puntos del relieve terrestre sobre la misma y permitir la elaboración de mapas. Esta superficie se encuentra ligeramente achatada en los polos y ensanchada en el Ecuador y se denomina elipsoide de revolución debido al hecho de revolucionar una elipse sobre su eje (ver figura 2.1). La elección del elipsoide de referencia se explica por razones de sencillez en su definición matemática, porque se ajusta con aproximación de primer orden al Geoide y se determina teniendo en cuenta los siguientes condicionantes:

---

<sup>1</sup> Jorge Franco Rey: Nociones de Geodesia y GPS. Pág. 4.

- El centro gravitatorio terrestre debe de coincidir con el centro del Elipsoide.
- El plano definido por el Ecuador terrestre debe coincidir con el del Elipsoide.

En conjunto con las anteriores condicionantes, a todo elipsoide de revolución y las relaciones entre ellos, los definen los siguientes parámetros:

Semieje mayor .....	$a$
Semieje menor .....	$b$
Aplanamiento .....	$\alpha = \frac{a-b}{a}$
Excentricidad .....	$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$
2ª Excentricidad .....	$e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}$

Por la gran dificultad que supone realizar observaciones y cálculos matemáticos para poder concretar un elipsoide general o idóneo para toda la superficie terrestre, las distintas naciones han utilizado elipsoides locales, que constituyen una aproximación válida en zonas geográficas concretas. El adoptar los valores que más convengan para la latitud y longitud geodésicas en un punto de origen y su altura sobre el elipsoide es válido (Bomford, 1980). Posteriormente, mediante las ecuaciones matemáticas necesarias, se buscará mantener el paralelismo entre el eje menor del elipsoide y el eje de rotación de la Tierra.

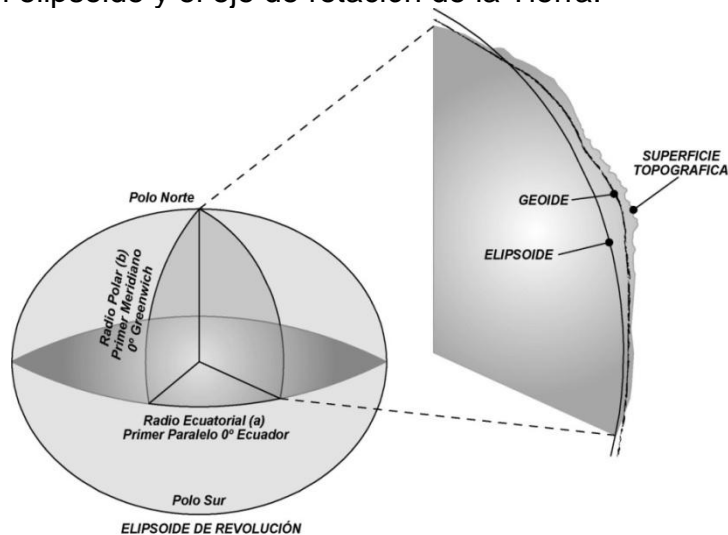


Figura 2.1. Parámetros del Elipsoide y diferencia gráfica entre Geoide, Elipsoide de referencia y superficie topográfica.

(Adaptado de Caire, Lomeli Jorge 2002. Cartografía Básica, pág. 22).

La desigual distribución de la gravedad superficial causa que existan diferencias gravitatorias causadas por la composición terrestre y la presencia de grandes

masas de agua en los océanos, que causa una menor atracción, y por lo general hace que el geoide quede por encima del elipsoide en la zona continental y por debajo en la zona oceánica (ver figura 2.2). Esta problemática se diferencia en cada elipsoide en función de su localización geográfica.

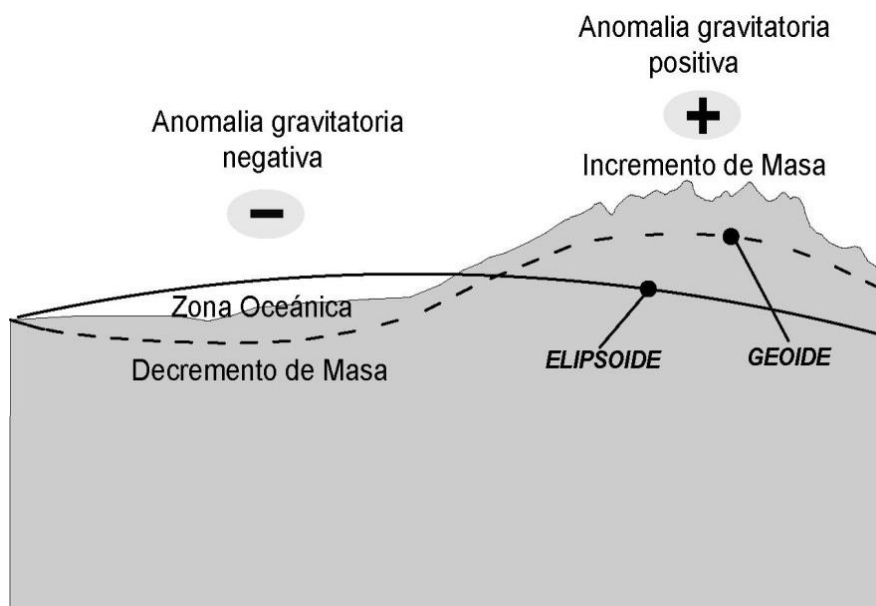


Figura 2.2. Anomalías gravitatorias entre el Geoide y el Elipsoide.  
(Fuente: El Datum, por Ignacio Alonso Fernández Coppel. Madrid, Pág. 69).

Caire Lomeli (2002) comenta que la forma real de la tierra es compleja y no existe expresión matemática que la defina con debida precisión, Sin embargo su conformación periferal denominada geoide tiene una superficie rigurosamente perpendicular a la dirección de la plomada y de más cercana similitud a la configuración de nuestro planeta. Con el objeto de acercarse más a esta ultima figura y su comparación con la Tierra, se dispone de elipsoides; éstos son elipses, con radios ecuatoriales mayores al de los polares, que al rotarlos o girarlos sobre su eje polar producen esta figura elipsoidal.

- c) **Superficie topográfica:** Es la representación de la superficie terrestre y no es la apropiada para realizar cálculos, solamente es útil para levantamientos locales del terreno.

De gran importancia es exponer que el Dr. Caire Lomeli (2002) manifiesta que las medidas que se realizan sobre la superficie terrestre no se efectúan sobre un elipsoide matemático sino en el geoide. Este es la forma de la superficie terrestre en el que el potencial de la gravedad es constante en cada uno de sus puntos. Esta superficie es más lisa que la topográfica pero aún presenta abultamientos y hundimientos.

### 2.1.3. Ángulo radial de la vertical, desviación de la vertical y sistema de coordenadas geodésico.



Una vez descritas las tres figuras de referencia, es necesario comentar que al realizar las mediciones en una superficie topográfica, las lecturas obtenidas deberán ser corregidas y referidas al elipsoide de referencia que mejor se adapte al geoide, en este paso se realiza la conformación de un Datum, para esto se explican los siguientes factores:

- a) En el elipsoide de referencia utilizado, se denominan meridianos a las secciones producidas en ella por cualquier plano que contenga al eje de revolución y se denominan paralelos a las circunferencias producidas por la intersección del elipsoide con planos perpendiculares a su eje, el centro del círculo de cada paralelo será la intersección de su plano con el eje de revolución. Al paralelo mayor, que contiene el centro del elipsoide, se le denomina Ecuador; los extremos del eje constituyen los polos Norte y Sur (ver figura 2.1).
- b) Ángulo radial de la vertical: La forma elíptica de la Tierra se debe al movimiento de rotación, de no existir este movimiento, la superficie media de los mares en calma sería esférica, y la dirección de la plomada coincidiría en todos los puntos con el radio de la Tierra, pero a causa del movimiento de rotación, cada punto está sometido a dos fuerzas principales: una fuerza de atracción, debida a la masa terrestre, dirigida hacia el centro de gravedad de la Tierra, y otra, una fuerza centrífuga, en el sentido del radio del paralelo, ésta es nula en los polos y máxima en el Ecuador, dirigida en este último caso en el sentido del radio, opuesta a la atracción.

La resultante de ambas fuerzas en cada punto es la vertical física o normal al geoide, o dirección de la plomada, y seguirá en el ecuador y en los polos la dirección del radio terrestre, pero a otras latitudes formará un ángulo con él, al que se denomina ángulo radial de la vertical, que es máximo a los  $45^\circ$  de latitud, donde alcanza un valor de 11 minutos. Para el estudio de las variaciones de la vertical física o normal al geoide en función de las variaciones del valor de la gravedad, se utilizan unos aparatos denominados clinómetros.

- c) Desviación de la vertical: se conoce como desviación de la vertical en un punto determinado del terreno, al ángulo que existe entre la vertical física o astronómica (normal al geoide) y la vertical geodésica (normal al elipsoide).
- d) Sistema de coordenadas geodésico: Es un sistema de coordenadas para designar un punto sobre la superficie del elipsoide, sin olvidar que las determinaciones geodésicas se realizan sobre la superficie terrestre, aunque para trabajar, como se comentó con anterioridad, necesitamos hacerlo sobre la superficie del elipsoide utilizando los problemas de reducción. Para resolver estos problemas de reducción es necesario el conocimiento entre las desviaciones de la superficie real terrestre y la del elipsoide de referencia. Para ello, inicialmente, se determina la altura de los puntos que están sobre la superficie terrestre, medir las desviaciones de la

vertical en dichos puntos y calcular la fuerza gravitatoria en los puntos determinados, para lo cual suelen utilizarse gravímetros. Con estos elementos podemos definir:

- Latitud geodésica: Es el ángulo formado por la normal al elipsoide que pasa por un punto determinado y el plano del Ecuador. Se mide en grados sexagesimales, partiendo del Ecuador, siendo al norte (de 0° a 90°) y al sur (de 0° a 90°).
- Longitud geodésica: Es el ángulo formado por el plano del meridiano origen y el del meridiano que pasa por un punto determinado. Se mide en grados sexagesimales, partiendo del meridiano origen, y se divide de 0° a 180° hacia el E y W.

#### 2.1.4. El Datum. Datum horizontal y Datum vertical.

Tradicionalmente el Datum se utilizó como la superficie de referencia para el cálculo y determinación de coordenadas, estableciéndose los datos iniciales para las mediciones adecuadas. El Datum geodésico se encuentra constituido por:

- Una superficie de referencia con definición geométrica exacta, generalmente un elipsoide de revolución.
- Un punto en específico, en el que coinciden la normal al geoide y al elipsoide, con el que también coincidirá el origen de las coordenadas geodésicas.

En Geodesia se emplean dos tipos de Datum, el horizontal y el vertical.

- a) El Datum horizontal permite la determinación de la longitud y la latitud partiendo de la elección de un punto en el cual las superficies del elipsoide de referencia y del geoide sean tangentes. De esta forma, la normal geoidal y elíptica coincidirán, así como las coordenadas geodésicas.
- b) El Datum vertical es la superficie de referencia que permite el cálculo de alturas, por lo general esta superficie es la del Geoide y las altura a él referidas son alturas ortométricas.

Para entender mejor el Datum horizontal, tenemos nuestro punto de referencia situado sobre el elipsoide, pero para el Datum vertical es necesario situarlo sobre la superficie terrestre para poder trabajar con el y dar un valor sobre el nivel medio del mar. La diferencia entre la altura elipsoidal ( $h$ ) y la altura ortométrica ( $H$ ) es la altura geoidal ( $N$ ) u ondulación del geoide, ya que en realidad representa las desviaciones del geoide con respecto al elipsoide. La ecuación que liga las tres alturas definidas en la figura 2.4 es la siguiente:  **$h = H + N$** .

El conocimiento de  $h$  nunca es inmediato, sino que será necesaria la determinación de  $H$  y  $N$ . A continuación se explica de manera muy breve como efectuar dichas determinaciones:

- a) Las cotas ortométricas (H) se determinan mediante la nivelación de alta precisión con respecto a un determinado Datum altimétrico.
- b) La altura geoidal u ondulación del geoide (N), puede determinarse por varios métodos:

- Método de Helmert: se basa en el conocimiento de las coordenadas geodésicas y astronómicas en una serie de puntos, lo cual permitirá calcular las componentes de la desviación de la vertical en los mismos y las ondulaciones del geoide por el método de nivelación astrogeodésica.

M. J. Sevilla y A. Nuñez (1998) comentan que la determinación astrogeodésica del geoide consiste en determinar diferencias de ondulaciones del geoide en función de las desviaciones de la vertical

- Utilización de las anomalías gravimétricas: en este caso se aplican métodos matemáticos para calcular diferencias de ondulación del geoide entre unos puntos y otros. En combinación con el anterior permite obtener determinaciones de N con mayor precisión.
- Utilización de observaciones espaciales, de tipo GPS, en puntos donde se conoce la altura ortométrica (H).

En la figura 2.3 se muestra cómo las alturas que se obtienen con GPS se encuentran en un sistema de alturas diferente al que corresponde a la tradicional nivelación geodésica. Los datos GPS se pueden procesar con facilidad para obtener la altura elipsoidal  $h$ . Esta es la altura sobre o bajo un modelo elipsoidal sencillo de la Tierra.

La nivelación geodésica produce una altura ortométrica  $H$ , también conocida como altura sobre el nivel medio del mar; éstas son las alturas que encontramos en las cartas topográficas, grabadas en los bancos de nivel o almacenadas en archivos de datos digitales y en papel.

Un aspecto importante que se debe de mencionar es que actualmente la utilización de un Datum está referida a la complementación de trabajos locales que fueron planeados bajo esos parámetros y solo se requiere la culminación de dicho trabajo. La utilización de los Datum locales ha sido desplazada por el constante desarrollo e investigación orientados a la implementación de Sistemas Geodésicos Geocéntricos que han superado por mucho la precisión en las mediciones de puntos específicos sobre la superficie de la Tierra.

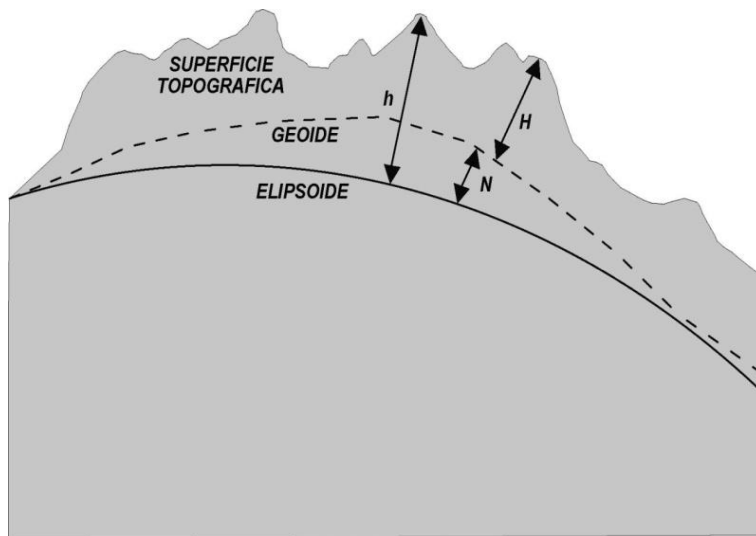


Figura 2.3. Determinaciones altimétricas geodésicas.  
(Elaboración propia).

### 2.1.5. Sistemas Geodésicos Geocéntricos.

Se define como un sistema geocéntrico aquél que especifica una terna de ejes ortogonales cartesianos X, Y, Z ajustado al centro de masas de la tierra. Estos sistemas terrestres (fijados a la Tierra) tienen el eje X asociado al meridiano origen de las longitudes y el eje Z próximo al eje de rotación, por lo tanto este sistema “gira” juntamente con la tierra (ver figura 2.4). Estos sistemas resultan imprescindibles para ubicar puntos ligados en la Tierra.

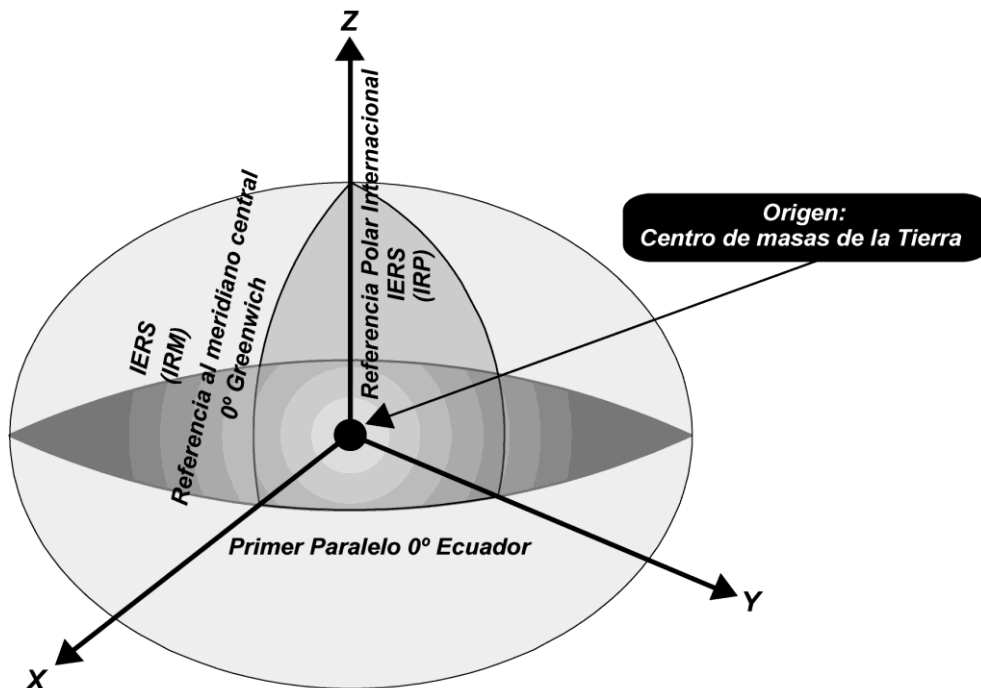


Figura 2.4. Determinaciones altimétricas geodésicas.  
(Elaboración propia).

A diferencia de los sistemas geodésicos locales, los sistemas geocéntricos son tridimensionales y de alcance global, por lo anterior, el concepto y utilización del Datum ha comenzado a desaparecer, y paulatinamente es reemplazado por el origen y orientación de la terna de referencia de los sistemas geocéntricos. Ejemplos de sistemas geocéntricos terrestres son el WGS84 y el ITRF.

La utilización de estos sistemas geocéntricos es parcial hasta que se determina realizar un sistema de referencia materializado en un marco de referencia.

#### **2.1.5.1. Sistemas de Referencia.**

Existen dos tipos de sistemas de referencia, el primero es un Sistema de Referencia Celeste (SRC), donde se consideran los movimientos globales de la Tierra (rotación y traslación). El segundo es un Sistema de Referencia Terrestre (SRT) que debe representar con la mejor aproximación posible la superficie de la Tierra y su corteza deformable.

En este trabajo, es necesario presentar una adecuada explicación de los SRT ya que a estos se encuentran referidas las observaciones realizadas por las tecnologías de medición utilizadas en los levantamientos geodésicos. En ausencia de deformaciones de la corteza, los mismos se definen como ligados a la Tierra sólida en su movimiento diurno. Son en general geocéntricos y perfectamente adaptados para describir la posición de los puntos sobre la superficie de la Tierra.

Su definición es más complicada en presencia de deformaciones, en particular las de largo período o seculares. En este caso los SRT, debe permitir describir cuantitativamente las deformaciones de la corteza terrestre. En los sistemas geocéntricos, esta descripción se lleva a cabo por medio de redes de puntos medidos usualmente con GPS y vinculados en lo posible a puntos de las redes anteriores, siguiendo una serie de precauciones para minimizar los errores sistemáticos y aleatorios que pueden afectar al conjunto.

El IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) es la organización actual encargada de definir, realizar y promover el Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS, por sus siglas en Inglés) así como del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF, por sus siglas en Inglés) de acuerdo a la definición adoptada en Viena en 1991. El ITRS es un SRT que cumple con las siguientes condiciones:

- Es geocéntrico, con el centro de masa definido para toda la Tierra, incluyendo océanos y atmósfera.
- La unidad de longitud es el metro.
- Su orientación fue inicialmente dada por el Bureau International de l'Heure (BIH).

- La evolución de la orientación en el tiempo es asegurada usando una condición de no rotación neta con respecto a los movimientos tectónicos horizontales sobre toda la Tierra.

Ahora, cualquier sistema de referencia definido convencionalmente para poder ser utilizado como tal, necesita de una materialización física. Esta materialización recibe el nombre de Marco de referencia.

#### **2.1.5.2. Marco de Referencia.**

Los marcos de referencia están constituidos por puntos materializados en el terreno y ubicados con gran exactitud y precisión según alguno de los sistemas de referencia.

Mackern Oberti, (2003), comenta que existe una realización del marco de referencia terrestre tridimensional, que utiliza las coordenadas geométricas de un cierto número de instrumentos de medición utilizados por las nuevas técnicas de geodesia espacial. Estas técnicas ofrecen una mejor realización, la más precisa está al nivel del centímetro. Los puntos que constituyen el marco de referencia pueden ser puntos de referencia localizados sobre la superficie de la Tierra (como puntos de una red geodésica o puntos instrumentales), o pueden ser los puntos del recorrido de un objeto en movimiento, como un satélite artificial.

Esta materialización denominada en la actualidad, marco geodésico, ha evolucionado desde la definición de los datum geodésicos locales a los marcos de referencia terrestres internacionales (ITRF). Este cambio ha surgido como consecuencia de los avances geoinformáticos, sumados a la creciente demanda de información georreferenciada en sistemas globales. Dando respuesta a esto se han desarrollado nuevos conceptos en la materialización de sistemas de referencia a partir de técnicas geodésicas logrando realizaciones de alta precisión.

Estas técnicas geodésicas espaciales son capaces de estimar las posiciones de las estaciones con una precisión de unos pocos centímetros. Soluciones combinadas de las distintas técnicas (DORIS, GPS, SLR, VLBI) son usadas para determinar el marco de referencia conocido como marco de referencia terrestre internacional (ITRF).

#### **2.1.5.3. Materialización del Sistema de Referencia Terrestre ITRF.**

La utilización del ITRF se debe a que es el Marco de Referencia oficial para México. Internacionalmente se define el Sistema de Referencia Terrestre (ITRS) y se materializa en el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).

Las materializaciones del ITRS producidas por el IERS consisten en una lista de coordenadas y velocidades para un conjunto de estaciones distribuidas sobre toda la Tierra y válidas para determinada época de referencia. Se denomina ITRFXX en donde XX indica el año de los datos más recientemente incorporados al cálculo.

Las características de cada marco terrestre producido por el IERS se indican en la serie IERS Technical Notes. Los estándares o convenciones que definen los sistemas de referencia del IERS se publican como IERS Conventions y sufren actualizaciones periódicamente.

Uno de los marcos de las series anuales ITRF es, por ejemplo, el ITRF92, con coordenadas dadas en la época 1992,0.

Se realizan mejoramientos anuales de ITRF del orden del cm. en las posiciones y algunos mm por año en velocidades, con un incremento gradual en el número de estaciones que la definen (principalmente de estaciones GPS).

Operativamente el ITRF se realiza mediante la adopción de las coordenadas cartesianas geocéntricas y velocidades de estaciones de rastreo distribuidas globalmente, las cuales se realizan utilizando observaciones de distintas técnicas como:

- Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler Integrado por Satélite (DORIS).
- Sistema de Posicionamiento Global (GPS).
- Telemetría Láser sobre satélites (SLR).
- Interferometría de Bases Muy Largas (VLBI).

Permitiendo relacionar el Sistema de Referencia Terrestre con el Sistema de Referencia extragaláctico o Inercial. La técnica VLBI posee el mayor peso en la definición de la orientación. EL origen y la escala del sistema se determinan mediante el aporte de SLR, GPS y DORIS (estas técnicas se explican con mayor detalle en apartado 2.1.6).

#### **2.1.5.4. Sistema de Referencia Terrestre WGS´84.**

Es el sistema de referencia terrestre adoptado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para el posicionamiento GPS. El WGS84 es un sistema de coordenadas geocéntrico global basado originariamente en observaciones Doppler.

Estas observaciones fueron usadas para dar posición mediante el efecto Doppler, a las coordenadas de las 10 estaciones de monitoreo GPS. Los datos GPS tomados desde estas estaciones se emplearon hasta no hace mucho para generar las órbitas GPS transmitidas, fijando las coordenadas derivadas de Doppler sin considerar el movimiento de placas tectónicas.

El elipsoide de referencia del WGS'84 es esencialmente el del Sistema Geodésico de referencia 1980 (GRS 80), de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional, con cambios menores, sólo en su aplastamiento. Los parámetros del elipsoide WGS'84 son: Semieje mayor  $a = 6.378.137$  m. y aplastamiento  $f = 1/298,257223563$

Este sistema de coordenadas fue establecido por medio de mediciones de un conjunto de coordenadas para una red mundial de estaciones del U.S. Navy Navigation Satellite System. Conjuntamente, la ocupación de los mismos sitios por estaciones Doppler con estaciones VLBI o SLR revelaron que el sistema de coordenadas Doppler tenía un error del orden de 1 metro. Se descubrió también que el origen del sistema de coordenadas estaba alrededor de 4,5 metros sobre el centro de masa. Así las coordenadas de las estaciones Doppler deben ser modificadas en origen, escala y orientación.

En el intento de aproximar el WGS84 con el más preciso ITRF, el Departamento de Defensa recalculó las coordenadas de estas estaciones y un subgrupo de estaciones de rastreo IGS, cuyas coordenadas ITRF91 se mantuvieron fijas en el proceso. Este mejoramiento del marco WGS84 se ha denominado WGS84 (G730). La "G" deriva de GPS y "730" es el número de semana GPS, cuando la DMA implementó esa modificación en el procesamiento de las órbitas (el primer día de esa semana corresponde al 2 de enero de 1994). Además el valor original WGS84 GM fue reemplazado por el valor de los estándares del IERS 1992 de  $3986004,418 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>, para remover un desplazamiento en el ajuste de órbitas del Departamento de Defensa. Malys and Slater, 1994, estiman que el nivel de coincidencia entre ITRF (91 y 92) y el WGS84 (G730) es del orden de 10 cm.

El AFSC (Air Force Space Command) implementó las coordenadas WGS84 (G730) el 29 de junio de 1994, para aplicar el nuevo valor de GM. Por último, en 1996 se agregaron dos estaciones de control al sistema y se recalcularon las coordenadas. Se refirió el ajuste a coordenadas ITRS de varias estaciones teniendo en cuenta los movimientos de las mismas por la deriva continental. Los cambios fueron adoptados en enero de 1997 con el nombre de WGS84 (G873). La consistencia entre WGS84 (G873) e ITRF es del orden de 5 cm.

#### **2.1.6. Explicación de las principales tecnologías de medición utilizadas en los levantamientos geodésicos horizontales.**

Actualmente hay varias tecnologías que a partir de observaciones geodésicas permiten establecer un conjunto de estaciones fijas, con coordenadas precisas a escala global, las cuales son utilizadas en la definición y materialización de los sistemas de referencia actuales.

Estas tecnologías operan con el objetivo de comparar de la manera más objetiva posible, los resultados de diferentes técnicas y bajo el análisis de los mismos modelos o modelos equivalentes. Estas recomendaciones fueron realizadas por el grupo de trabajo para la rotación de la Tierra y fueron objeto de la elaboración de los "estándares Merit" y que actualmente sustentan los estándares del IERS.



El propósito de esta descripción es identificar las características principales de cada una. Estas tecnologías son DORIS, SLR, VLBI y GPS, aunque este último se explica con mayor amplitud en el apartado 2.3.

#### **2.1.6.1. Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler Integrado por Satélite (DORIS)**

Consta de un segmento espacial conformado por receptores montados a bordo de varios satélites artificiales. Estos reciben señales de una red que actualmente consta de 51 balizas instaladas sobre la superficie terrestre. Las estaciones de Tierra emiten señales en dos frecuencias, una para la medición precisa del efecto Doppler y otra para la corrección del retardo por efecto de la ionosfera.

El receptor en el espacio mide el efecto Doppler sufrido por las señales de las balizas a causa del movimiento relativo emisor-receptor, calcula una solución de navegación para la posición del satélite con una exactitud métrica y envía todos los datos a la estación de control de Toulouse, Francia, donde se calculan órbitas precisas para los satélites, coordenadas para las balizas emisoras, parámetros de rotación terrestre, y otros productos.

Por su concepción, el sistema DORIS tiene un funcionamiento muy centralizado. Los receptores y emisores tienen características muy uniformes y la red de rastreo tiene una distribución muy homogénea. Actualmente hay receptores DORIS a bordo de los satélites SPOT2, SPOT3 y TOPEX y se planea incluirlos también en las futuras misiones SPOT4, SPOT5, ENVISAT y los sucesores de TOPEX. Desde fines de 1995, las soluciones DORIS constituyen un aporte relevante a la materialización del ITRS (Boucher et al., 1998b).

#### **2.1.6.2. Telemetría Láser sobre satélites (SLR).**

Esta técnica es uno de los pilares fundamentales para la materialización del ITRS. Desde sus comienzos hasta el presente, la precisión de las observaciones fue mejorando desde varios metros en sus comienzos, a menos que un centímetro actualmente (ILRS, 1999). La SLR mide los intervalos de tiempo transcurridos por pulsos LASER emitidos por un transmisor que viaja hacia un satélite artificial y vuelve al lugar de transmisión.

Los satélites más utilizados en esta técnica son: STARLETTE (Francés, lanzado en 1975), LAGEOS-1 Y LAGEOS-2 (Americanos, lanzados en 1976 y 1992), AJISAN (Japonés, lanzado en 1986), ETALON (Ruso, lanzado en 1989). Se agregaron en 1995, cuatro satélites a la constelación operacional de SLR, quedando un total de 17 satélites activos. Estos incluyen las principales misiones de: GFZ-1 (en Alemania), ERS-2 (ESA), GLONASS 63, GLONASS 67 y RESURS (en Rusia).

A partir del apoyo SLR el marco terrestre se define de la siguiente manera:

- El origen: es el centro de masa de la Tierra, determinado por la anulación del término de primer orden del desarrollo en armónicos esféricos del potencial terrestre.
- La orientación es determinada tanto al fijar los parámetros de rotación de la Tierra para una época dada, como al fijar 3 coordenadas de estaciones, una longitud y dos latitudes.

Las actividades de las estaciones SLR que contribuyen a la materialización del ITRS se encuentran coordinadas hoy por el Servicio Internacional de LASER Ranging o ILRS.

### **2.1.6.3. Interferometría de Bases Muy Largas (VLBI)**

La Interferometría de muy larga base es la parte fundamental del sistema de referencia celeste. Consiste en la recepción simultánea, por dos antenas (radio-telescópicas) de la emisión de una misma fuente de radio extragaláctica. Esta medida determina para cada par de antenas, el retardo de un mismo frente de onda que llega a ambas antenas separadas por miles de kilómetros.

Los registros de ambos observatorios son correlacionados para obtener dos observables posibles: el retardo diferencial de la señal de radio y la diferencia de fase de la señal, para las bandas de recepción elegidas, entre las dos antenas. Las sesiones de observación geodésica duran las 24 hrs. y observan distintas fuentes radiales distribuidas en el cielo. Las estaciones VLBI que contribuyen a la realización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional se encuentran organizadas en el Servicio Internacional de VLBI (IVS). Varios organismos están equipados con material que les permite analizar los datos VLBI. Actualmente las observaciones VLBI son patrocinadas por más de 40 organizaciones distribuidas en 17 países.

El U.S. National Earth Orientation Service (NEOS), opera conjuntamente con el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y el U.S. Naval Observatory (USNO) manejan sesiones de 24 hrs. de observación en intervalos semanales para monitorear la rotación terrestre y el movimiento polar y para establecer y mantener el marco de referencia celeste. La red NEOS está formada por las estaciones: Fairbanks, Green Bank, Richmond y Hawaii (en U.S), Fortaleza (en Brasil) y Weltzell (en Alemania). Las observaciones VLBI constituyen uno de los soportes fundamentales del nuevo sistema IERS, ya que es la única técnica capaz de medir todos los componentes de orientación de la Tierra en forma precisa y simultánea.

### **2.1.7. Sistema de Referencia Vertical.**

Actualmente se realizan a nivel internacional esfuerzos y convenciones para definir y materializar los sistemas de referencia que constituyen una plataforma común de referencia horizontal, como el ITRF. Sin embargo persiste una importante diferencia al comparar posiciones verticales entre países vecinos, incluso entre valores altimétricos de un mismo país. Esta circunstancia obliga a

definir un nuevo sistema vertical, que permita estandarizar las alturas establecidas y que sea compatible con los avances teóricos y técnicos a nivel mundial.

El sistema de referencia vertical debe obedecer a una combinación consistente de las alturas niveladas existentes, los datos de gravedad registrados y las alturas elipsoidales obtenidas mediante levantamientos GPS, sin olvidar el desarrollo de nuevos geoides. Esta plataforma debe satisfacer, no solo las demandas de la representación cartográfica, sino también las exigencias del control geodésico vertical y la homogeneización de este tipo de información a nivel internacional.

Según Mackern Oberti (2003), para la determinación de un sistema de referencia vertical se deben considerar los siguientes aspectos:

- a) Definición del tipo de alturas que conforman su estructura. La altitud de un punto sobre la superficie terrestre es la distancia existente, sobre la línea vertical, entre éste y una superficie de referencia y como se comentó en el apartado 2.1.4, la superficie de referencia que permite el cálculo de alturas, por lo general esta superficie es la del Geoide y las altura a él referidas son alturas ortométricas.
- b) Superficie de referencia para la definición de alturas: Toda nivelación geodésica parte de un punto de referencia (marco de referencia vertical), el cual es determinado mediante la observación del nivel del mar en largos períodos de tiempo y, se asume coincidente con el geoide (materialización del geoide). Sin embargo, debido al dinamismo oceánico del planeta, el mar representa diferentes niveles que dependen de la variación temporal de la superficie del mar (presión atmosférica y temperatura oceánica) y de la posición geográfica del mareógrafo (corrientes oceánicas y densidad del agua), lo que se traduce en diferencias de nivel de hasta dos metros entre mareógrafos instalados bajo condiciones similares.

Por otro lado, al definir un punto determinado, implícitamente se asume que el nivel medio del mar coincide con el geoide. De este modo se ignora que aquél no es una superficie equipotencial y que presenta desviaciones con respecto a éste.

Para superar los inconvenientes en la definición vertical sustentada por los mareógrafos, es necesario encontrar una superficie que represente verdaderamente un nivel de energía del campo de gravedad terrestre (CGT), es decir una equipotencial. El problema fundamental de la Geodesia es determinar la superficie equipotencial del CGT que se aproxima al nivel medio del mar. El comportamiento de dicha superficie depende de la caracterización que le asignan el campo de gravedad y la deformación de éste causada por la existencia de masas internas de diferentes densidades.

Su determinación, está sujeta a ciertas consideraciones teóricas que permiten tener en cuenta dos conceptos:

- Geoide: forma real de la Tierra, requiere de la formulación de hipótesis en la distribución interna de masas y es la superficie de referencia para las alturas ortométricas.
- Cuasi-geoide: es la superficie más cercana al geoide y su determinación no requiere de hipótesis geofísicas.

El geoide y el cuasi-geoide se diferencian en que el primero es la definición estricta de la forma real de la Tierra, mientras que el segundo es la superficie más cercana a aquél que puede ser calculada.

A las alturas ortométricas les corresponde, como superficie de referencia, el geoide, mientras que a las normales, les corresponde el cuasi-geoide. En cuanto a las alturas elipsoidales, éstas están referidas al modelo geométrico terrestre (elipsoide de revolución) considerado, el cual implícitamente está descrito por una superficie equipotencial normal obtenida a partir de formulaciones matemáticas ya establecidas.

- c) Realización del marco de referencia vertical: Una vez definido el tipo de alturas y su plataforma correspondiente, es necesario materializar este sistema mediante el establecimiento de un conjunto de estaciones (red básica) que constituyan el punto de partida para la propagación del control vertical. Dentro de este conjunto deben considerarse los mareógrafos que sirven de base para el sistema altimétrico actual, logrando de esta manera, la vinculación del sistema antiguo al nuevo y manteniendo la vigencia de las alturas definidas con el método clásico.

Las estaciones que conforman la red vertical básica deben ser niveladas geoméricamente, deben tener valor de gravedad conocido y deben estar definidas geodésicamente con posicionamiento GPS. Estas características complementadas con la definición de un modelo geoidal (o cuasi-geoidal) permiten realizar el marco de referencia vertical.

- d) Mantenimiento del sistema de referencia vertical: Al igual que la dinámica terrestre deforma las redes geodésicas horizontales, también altera la precisión de las redes verticales. Los cambios en la posición vertical de la superficie topográfica se deben principalmente a:
- Mutación de la superficie de referencia (geoide o cuasi-geoide) como consecuencia de las modificaciones en la distribución de las masas terrestres internas, generadas por subducción, obducción, desplazamiento o choque de las placas tectónicas.
  - Variación de la magnitud de las alturas niveladas por cambio del nivel medio del mar a través del tiempo, incluyendo deshielo polar y calentamiento de las aguas oceánicas.

- Los movimientos verticales resultantes de deformaciones corticales, de la acomodación de capas sedimentarias y modificaciones en el relieve topográfico.

Estos tres aspectos demandan del seguimiento continuo del marco de referencia vertical, con el propósito de establecer su variación y mantener la vigencia de las alturas definidas. Además para mantener el marco de referencia vertical, es necesario considerar la conservación de los monumentos que surgen de su densificación.

### **2.1.8. Sistema Geodésico Nacional.**

Para poder realizar trabajos geodésicos y cartográficos que cumplan con los estándares de calidad acordes a los requerimientos que demandan los usuarios en la actualidad, mejorando la precisión de soluciones anteriores, a nivel nacional se utiliza convenientemente como referencia para determinar un marco de partida al Sistema Geodésico Nacional, el cual es determinado por el INEGI, institución que se ha dedicado a investigar y desarrollar dicho sistema. Así mismo, a partir de la Norma Técnica NTG016 – 2006, modelo de datos espaciales que establece las especificaciones mínimas que deben cubrir los datos espaciales, se define al Sistema Geodésico Nacional en sus tres vertientes<sup>2</sup>:

- Sistema Geodésico Horizontal.
- Sistema Geodésico Vertical.
- Sistema Geodésico Gravimétrico.

Las cuales invariablemente deben ser adoptadas en todo los trabajos que se hacen dentro de las Dependencias y Entidades de la Administración Pública Federal, ya sea por sí mismas o por contratación, que requieran georreferenciación. Se indica su adopción por las entidades federativas y municipales que tengan necesidad de realizar trabajos similares, así como por las empresas privadas e instituciones académicas relacionadas con el manejo de información geográfica.

Tradicionalmente se define como Red Geodésica Nacional al conjunto de puntos situados sobre el terreno, dentro del ámbito del territorio nacional, establecidos físicamente mediante monumentos o marcas físicas más o menos permanentes, sobre los cuales se han hecho medidas directas y de apoyo de parámetros físicos, que permiten su interconexión y la determinación de su posición y altura, o del campo gravimétrico asociado, con relación al sistema de referencia considerado.

---

<sup>2</sup> Esta información se basa en la publicación: SISTEMA GEODESICO NACIONAL, perteneciente a la DIRECCIÓN GENERAL DE GEOGRAFÍA. INEGI. México. 2006.

Para los efectos del punto anterior, se adopta como Sistema Geodésico Nacional el conceptualizado por la Asociación Internacional de Geodesia a través del Sistema Geodésico de Referencia 1980 (GRS80) definido por los siguientes parámetros (Moritz, 1980):

Semieje mayor	a	6 378 137 m
Velocidad angular	$\omega$	$7\,292\,115 \times 10^{-11}$ rad/seg
Constante gravitacional geocéntrica	GM	$3\,986\,005 \times 10^8$ m <sup>3</sup> /seg <sup>2</sup>
Factor dinámico de forma no normalizado	J <sub>2</sub>	$108\,263 \times 10^{-8}$

Y cuyas principales constantes geométricas y físicas derivadas son:

Semieje menor	b	6 356 752.314 1 m
Excentricidad lineal	E	521 854.009 7 m
Radio polar	c	6 399 593.625 9 m
Primera excentricidad al cuadrado	e <sup>2</sup>	0.006 694 380 022 90
Segunda excentricidad al cuadrado	e' <sup>2</sup>	0.006 739 496 775 48
Achatamiento	f	0.003 352 810 681 18
Recíproco del achatamiento	f-1	298.257 222 101
Cuadrante meridiano	Q	10 001 965.729 3 m
Radio medio	R1	6 371 008.771 4 m
Radio de la esfera de la misma superficie	R2	6 371 007.181 0 m
Radio de la esfera del mismo volumen	R3	6 371 000.790 0 m
Gravedad normal en el ecuador	$\gamma_e$	978 032.677 15 mGals
Relación de la aceleración centrífuga con respecto a la gravedad normal en el ecuador	m	0.003 449 786 003 08

El Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS), el cual fue recomendado para su adopción por todos los países del continente durante la séptima Conferencia Cartográfica Regional de las Naciones Unidas para las Américas, que servirá de base para la construcción de la Infraestructura de Datos Espaciales de las Américas, desde el punto de vista cartográfico, es compatible con el Sistema Geodésico de Referencia adoptado para México; por lo que sólo en aquellos casos en que sea requerida una alta exactitud posicional se deberá realizar la transformación entre los sistemas en cuestión.

### **2.1.8.1. Sistema Geodésico Horizontal.**

Todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico horizontal, deberá estar referido al Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) definido por el IERS para el año 2000, con datos de la época 2004.0 denominado ITRF00 época 2004.0 asociado al GRS80, el cual es el Marco de Referencia oficial para México.

Los levantamientos geodésicos horizontales; son aquellos que comprenden una serie de medidas efectuadas en el campo, cuyo propósito final consiste en determinar las coordenadas geodésicas (geográficas) horizontales de puntos situados sobre la superficie terrestre.

Este sistema se integra por dos redes geodésicas nacionales:

#### **a) La Red Geodésica Nacional Activa (RGNA).**

La Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) está conformada inicialmente por 15 estaciones establecidas en el estándar de exactitud posicional de 5 centímetros, las cuales registran, a intervalos de 15 segundos, durante las 24 horas del día, la información de las dos frecuencias transmitidas por los satélites de la constelación NAVSTAR que forman el sector espacial del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), la localización de dichas estaciones se presenta en la Tabla No. 1.

La RGNA proporciona el marco de referencia fundamental del país para todos los trabajos de posicionamiento geodésico que realizan las dependencias y las entidades de la Administración Pública Federal. Está caracterizada por una exactitud compatible con las tecnologías modernas de posicionamiento y facilita el uso de éstas, compartiendo los datos para georreferenciación espacial entre usuarios de diversos sectores de la actividad geográfica, reduciendo significativamente los costos para la elaboración de trabajos que requieran conocer la ubicación de puntos y las relaciones geométricas que existan entre ellos.

La RGNA constituye una base posicional consistente para el levantamiento de nuevos vértices, proporcionando el estándar de exactitud posicional más alto actualmente disponible en México. Para el establecimiento de la RGNA se contó con la colaboración del National Geodetic Survey de los Estados Unidos de América, realizándose ligas a estaciones de interferometría de bases muy largas a fin de alcanzar la máxima exactitud posible.

Esta red está dirigida a aquellos usuarios que dispongan de equipo GPS para la realización de trabajos de posicionamiento y que deseen efectuar ligas diferenciales al servicio que ofrece el INEGI mediante las estaciones de monitoreo permanente. La utilización de la información que proporciona la RGNA permite a los usuarios internos y externos ahorrarse el desplazamiento al terreno de más de un equipo GPS al efectuar sus levantamientos, ganando en precisión, tiempo y costo.

### Principales aplicaciones:

- Determinación de la posición geodésica de monumentos internacionales que definen las fronteras de México con los países vecinos.
- Apoyo geodésico necesario para trabajos fotogramétricos, ya que la geodesia es el sustento que permite orientar y escalar los modelos estereoscópicos.
- Ejecución de los trabajos geodésicos para la delimitación de las fronteras marítimas y ubicación de monumentos internacionales.
- Ejecución de trabajos geodésicos requeridos por las dependencias de la federación y gobiernos estatales y municipales para el estudio y definición de sus límites político-administrativos.
- Acercamiento de la Red Geodésica a las zonas de alto y mediano desarrollo para el control de las obras de ingeniería y levantamientos que se realicen.
- Acercamiento de líneas de base necesarias para la actualización de cartografía urbana por métodos GPS

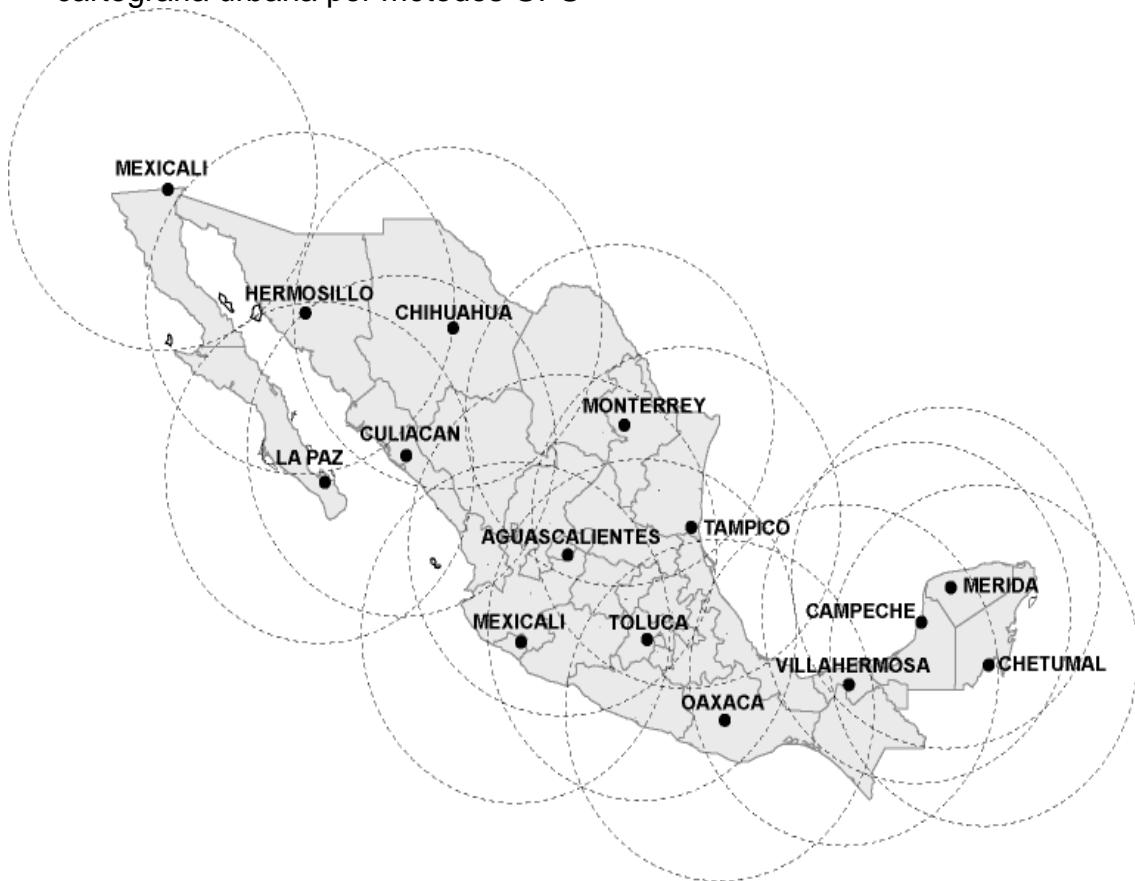


Figura 2.5. Mapa de las 15 estaciones fijas de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA).  
(Fuente: <http://www.inegi.gom.mx>).



LOCALIZACIÓN
Campeche, Camp.
Chetumal, Q.R.
Chihuahua, Chih.
Colima, Col.
Culiacán, Sin.
Hermosillo, Son.
Aguascalientes, Ags.
La Paz, BCS
Mérida, Yuc.
Mexicali, BC.
Monterrey, NL.
Oaxaca, Oax.
Tampico, Tamps.
Toluca, Edo. de Méx.
Villahermosa, Tab.

Tabla 1. Estaciones fijas de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA).  
(Fuente: <http://www.inegi.gom.mx>).

### **b) La Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNP).**

Está constituida por vértices geodésicos distribuidos en la República Mexicana, dichos vértices reciben el nombre de "estaciones GPS" y están materializados sobre el terreno, mediante unas placas empotradas que identifica a los puntos y que integran al sistema nacional de referencia. Las coordenadas que definen su posición han sido generadas a partir de levantamientos utilizando el Sistema de Posicionamiento Global y ligados a la RGNA, lo cual las dota de valores de posición referidas al ITRF00 época 2004.0

Aquellos usuarios que cuenten con equipo tradicional (teodolitos, distanciómetros o estaciones topográficas totales) pueden situarse sobre un vértice de esta Red y efectuar sus mediciones de campo, para lo cual deben introducir las coordenadas del vértice GPS, como referencia o punto de partida con el fin de generar las coordenadas de los nuevos puntos de interés.

### **2.1.8.2. Sistema Geodésico Vertical.**

En lo que respecta a las alturas, todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico vertical, deberá estar referido al nivel de referencia vertical definido por el Datum Vertical Norteamericano de 1988 (NAVD88), debiéndose expresar sus valores en metros en el sistema de alturas ortométricas (H) derivado de los números geopotenciales. Los levantamientos geodésicos verticales comprenderán todas aquellas operaciones de campo dirigidas a determinar la distancia vertical que existe entre puntos situados sobre o cerca de la superficie terrestre y el nivel de referencia definido por el NAVD88.

En el caso de que se cuente con una altura geodésica (h), ésta se deberá de transformar a una altura ortométrica por medio de la generación de la altura geoidal (N) (ver figura 2.3) a través del modelo geoidal vigente.

Así, el posicionamiento geodésico vertical consiste en determinar la elevación de puntos convenientemente elegidos y demarcados en el terreno, sobre una superficie de referencia. Estos puntos se integran, dando lugar a las redes de posicionamiento geodésico vertical.

El establecimiento de la Red se lleva a cabo mediante el posicionamiento de bancos de nivel (marca permanente de altitud conocida) constituyendo así las líneas de nivelación. La Red Geodésica Vertical en el país, cuenta con un inventario de 21 000 bancos de nivel de precisión (BNP) espaciados a cada 2 kilómetros en promedio, y 17 000 bancos de nivel topográficos (BNT) aproximadamente.

El INEGI ha establecido un marco de referencia vertical que sirve de control básico de alturas, el cual permanentemente se densifica y a la vez, se le otorga un constante mantenimiento y/o actualización, ya que la dinámica terrestre genera cambios en la posición vertical de la superficie topográfica a nivel nacional.

Principales aplicaciones:

De acuerdo a las características de precisión y densificación de las líneas de nivelación, existen varios usos de las mismas.

- Determinación aproximada del relieve.
- Origen para las grandes obras públicas.
- Determina los datos de altura en la cartografía nacional a cualquier escala necesaria y para cualquier aplicación.
- Detección de posibles variaciones verticales de la corteza en zonas con previsible fenómenos sísmicos y volcánicos.

### **2.1.8.3. Sistema Geodésico Gravimétrico.**

En lo relativo a la gravedad, todo punto perteneciente a un levantamiento gravimétrico de propósito geodésico deberá estar referido a la Red Internacional de Estandarización de la Gravedad de 1971 (IGSN71), de la cual México forma parte.

Los levantamientos geodésicos gravimétricos; son aquellos que comprenden la medida de valores absolutos o relativos del valor de la gravedad sobre puntos situados en o cerca de la superficie terrestre, cuyo propósito consiste fundamentalmente en determinar el campo gravimétrico existente y su relación e influencia con los levantamientos geodésicos horizontales y verticales.

Finalmente es necesario comentar que los fundamentos teóricos comentados en este apartado se describen a partir de las necesidades de realizar levantamientos geodésicos con instrumentos de medición como lo es el sistema GPS (el cual se explica ampliamente en el apartado 2.3 de este capítulo), sustentando su utilización bajo una perspectiva de medición y tratamiento de datos semi-automatizada y digital (proceso que se explica en el apartado 2.4.6.2. Ejecución operativa de los trabajos de campo). Por lo anterior cualquier necesidad fuera de esta perspectiva debe ser consultada en bibliografía especializada de Geodesia

## **2.2. Levantamientos Topográficos.**

Los levantamientos topográficos se realizan con el objetivo de determinar la configuración de una parte de la superficie terrestre y sin considerar la curvatura de la Tierra. Para lograr tal objetivo se utilizan un conjunto de operaciones necesarias para obtener mediciones específicas y asignar valores a puntos sobre el terreno.

Estos levantamientos son de gran utilidad en la generación de cartografía básica, siempre y cuando cumplan con especificaciones técnicas adecuadas, esto significa que para poder utilizar levantamientos topográficos en la generación de cartografía básica, forzosamente se deben encontrar enlazados a la RGNP.

Tradicionalmente le compete a la Topografía la fundamentación teórica y la práctica de los levantamientos topográficos, por lo que a continuación para tener un mejor entendimiento, es necesario exponer y conceptualizar algunos aspectos teóricos pertenecientes a esta disciplina.

### **2.2.1. Concepto de Topografía.**

García-Tejero (1993), define a la Topografía como el estudio de los métodos necesarios para representar un terreno con todos sus detalles naturales o creados por el hombre, así como el conocimiento y manejo de los instrumentos que se precisan para tal fin.

El INEGI en su Manual de Conceptos Básicos del programa PROCEDE (1994) se refiere a la Topografía como la ciencia que tiene por objeto el estudio del conjunto de procedimientos para determinar la posición de puntos sobre la superficie de la Tierra, por medio de medidas según los tres elementos del espacio que son: elevación, distancia y dirección.

Como se comentó en el apartado anterior, los trabajos geodésicos se diferencian de los topográficos en función de la extensión del terreno donde se realiza las mediciones y la utilización de la curvatura terrestre, lo anterior no significa que exista una separación implícita, sino por el contrario, ambas ciencias se complementan, ya que los levantamientos topográficos se pueden iniciar orientando el equipo que realiza las mediciones a partir de un vértice geodésico.

Debido a la extensión de esta ciencia, para efectos de este trabajo, expondremos los conceptos y el método necesario para la realización de un levantamiento topográfico de control y sustentado en una base geodésica que nos provea información suficiente para generar un Modelo Digital de elevaciones (MDE) a partir de la captura de datos en función de un método directo y que nos sirva como base o complemento de los MDE generados indirectamente en una estación fotogramétrica.

Hoy en día las estaciones totales (a partir de un método de distancimetría electrónica) realizan las operaciones planimétricas y altimétricas simultáneamente, convirtiéndose en la principal herramienta taquimétrica para la aplicación de las técnicas de levantamiento topográfico.

Así un levantamiento topográfico de control consiste en establecer una red de mediciones (horizontales y verticales), que sirven como marco de referencia para obtener una adecuada representación gráfica del terreno.

La base teórica de un levantamiento topográfico radica en dos aspectos fundamentales:

1. Los tipos de mediciones existentes.
2. Los sistemas de representación utilizados.

### **2.2.2. Tipos de mediciones existentes en los levantamientos topográficos.**

Al igual que en los levantamientos geodésicos, es fundamental describir todos los procesos que nos permitan realizar mediciones para obtener información representada en valores cuantitativos de la superficie terrestre.

#### **2.2.2.1. Mediciones en función de ángulos.**

Existen tres elementos básicos que determinan un ángulo, como se ilustra en imagen 2.6, éstos son:

- La línea de referencia.
- Sentido del giro.
- La amplitud o valor del ángulo.

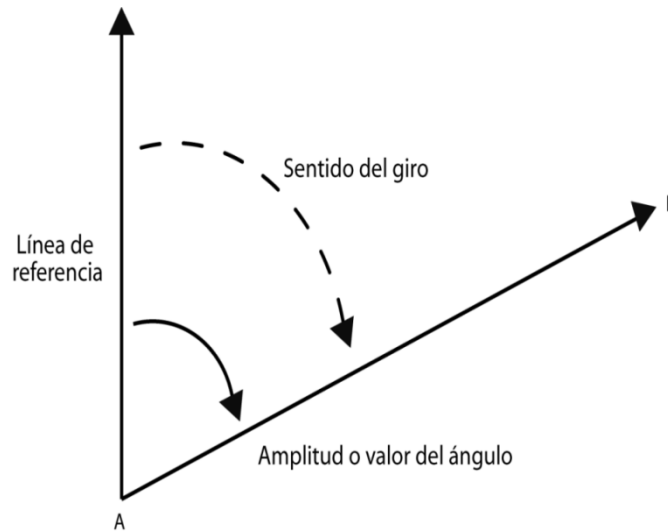


Figura 2.6. Elementos básicos para la determinación de un ángulo.  
(Elaboración propia).

Posteriormente, los ángulos se clasifican en horizontales y verticales.

Los ángulos horizontales son las medidas básicas que se necesitan para determinar los rumbos o acimutes y comúnmente, en un levantamiento, los ángulos horizontales medidos son:

- Los ángulos interiores, son los que quedan dentro del polígono.
- Los ángulos exteriores, que son los que quedan fuera del polígono.
- Los ángulos por deflexiones derechos e izquierdos.

Las medidas de los ángulos interiores, exteriores y por deflexión se presentan en la figura 2.7, las medidas de los ángulos interiores y exteriores se muestran como una poligonal cerrada, solo por tener un ejemplo de representación gráfica, lo importante es el valor de la medición de cada punto.

La deflexión es el ángulo que forma en un vértice, la prolongación del lado anterior con el lado siguiente. De acuerdo al sentido en que se va a recorrer el polígono, habrá deflexiones derechos e izquierdas. Los ángulos de deflexión siempre son menores a  $180^\circ$  y debe especificarse el sentido del giro en que se miden.

La medición de ángulos de deflexión se utiliza en el trazo de caminos y canales. Actualmente este tipo de medición se ha tratado de incorporar para complementar levantamiento de zonas que presentan rasgos naturales del terreno y que conectan directamente con estructuras antropogénicas.

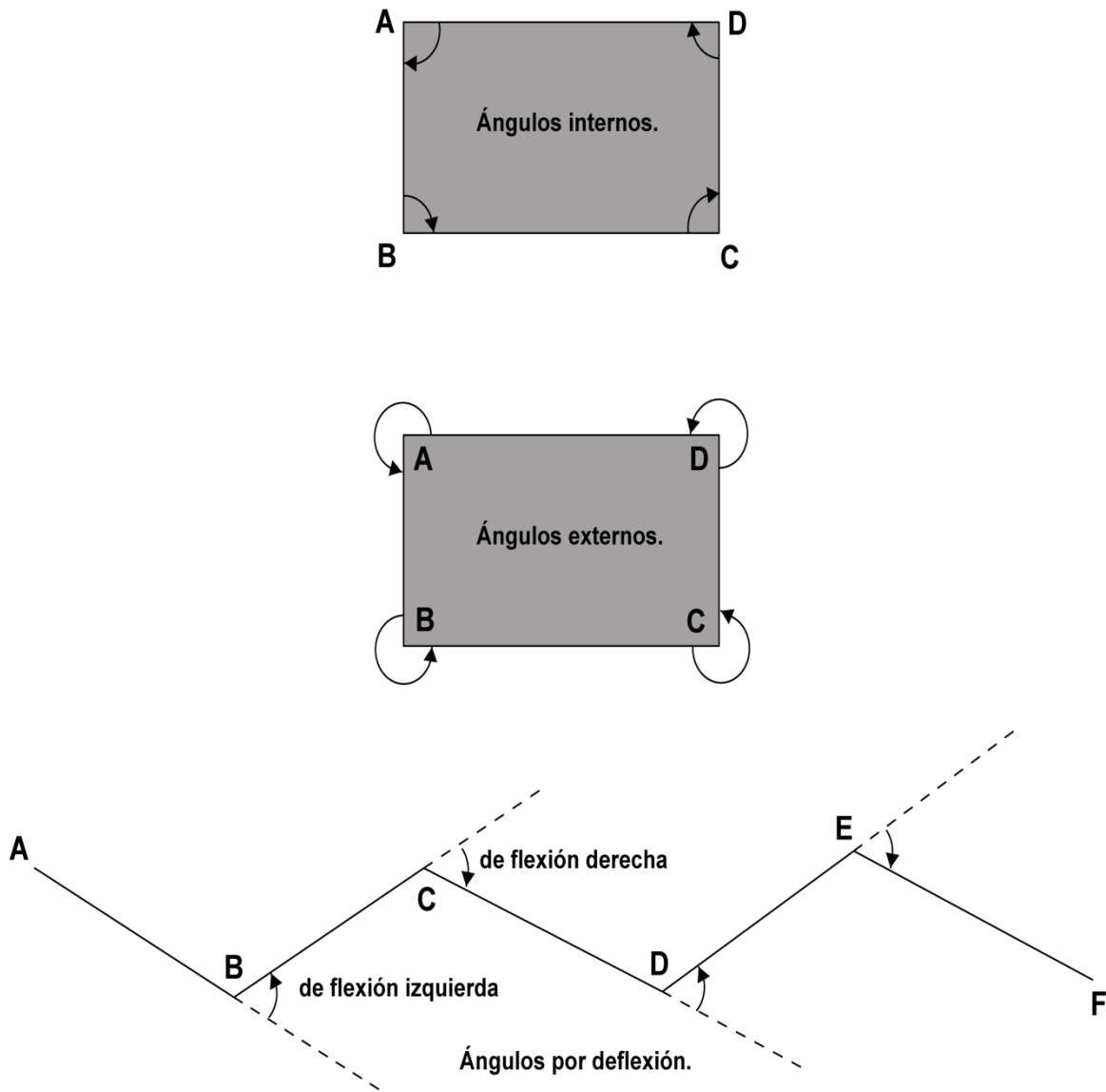


Figura 2.7. Ángulos horizontales medidos comúnmente en un levantamiento topográfico. (Elaboración propia).

Una vez especificados los ángulos horizontales, en el tipo de levantamiento estipulado para este trabajo, es necesario determinar los ángulos verticales.

Actualmente los levantamientos topográficos son realizados a partir de Estaciones Topográficas Totales (ETT), las cuales prestan todas las herramientas para que al momento de realizar la medición de cualquier punto, se lleve un control horizontal y vertical continuo y constante.

#### 2.2.2.2. Mediciones en función de distancias.

En lo que respecta a las distancias, en la figura 2.8, se presenta de manera esquemática el fundamento de cada una de estas magnitudes.

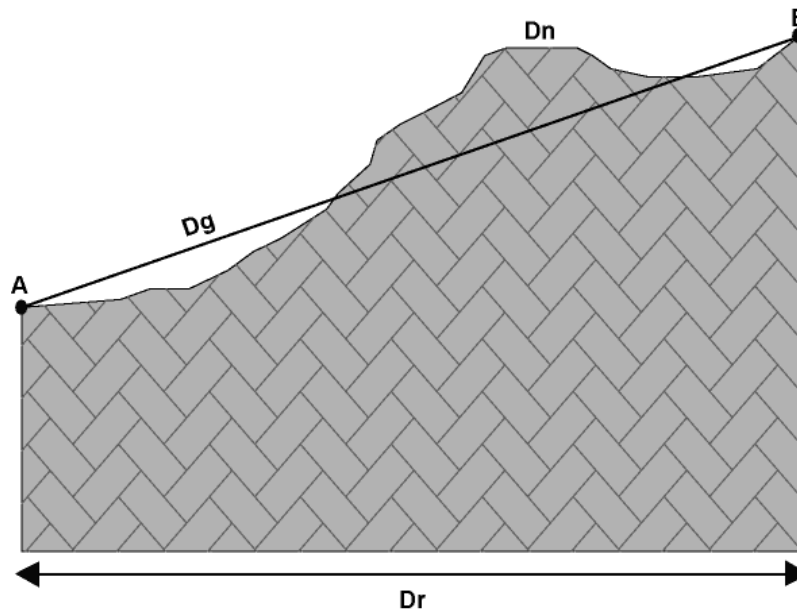


Figura 2.8. Distancias consideradas para levantamientos topográficos.  
(Elaboración propia).

En donde:

- Dn: Distancia natural del terreno: es la distancia entre los puntos A y B siguiendo los detalles de la configuración del relieve.
- Dg: Distancia geométrica: es la longitud del segmento de recta que une los dos puntos.
- Dr: Distancia reducida u horizontal: es la distancia sobre el plano horizontal entre los puntos A y B.

En los levantamientos topográficos los tres datos básicos son los ángulos horizontal y vertical, y la distancia geométrica. Partiendo de estos pueden calcularse los demás, incluyendo la distancia reducida, el desnivel y las coordenadas rectangulares. En estos levantamientos es muy importante mencionar que la determinación de los datos obtenidos se encuentran referidos al sensor de la ETT y a la altura conocida del prisma reflector, no entre los dos puntos del terreno, como se muestra en la figura 2.9.

Con los valores antes mencionados se pueden conocer todas las medidas de cualquier espacio tridimensional según se ilustra en la figura 2.10.

En esta representación el punto origen es el punto base para la medición, la distancia reducida u horizontal se refiere a las mediciones hechas entre los puntos OA y OB y el ángulo horizontal como resultado de la medición OAB. Las distancias verticales estarán dadas por los puntos AC y BD y el ángulo vertical OAC. La distancia geométrica se representa como OC ya que siempre se determina según el plano inclinado con respecto a la horizontal.

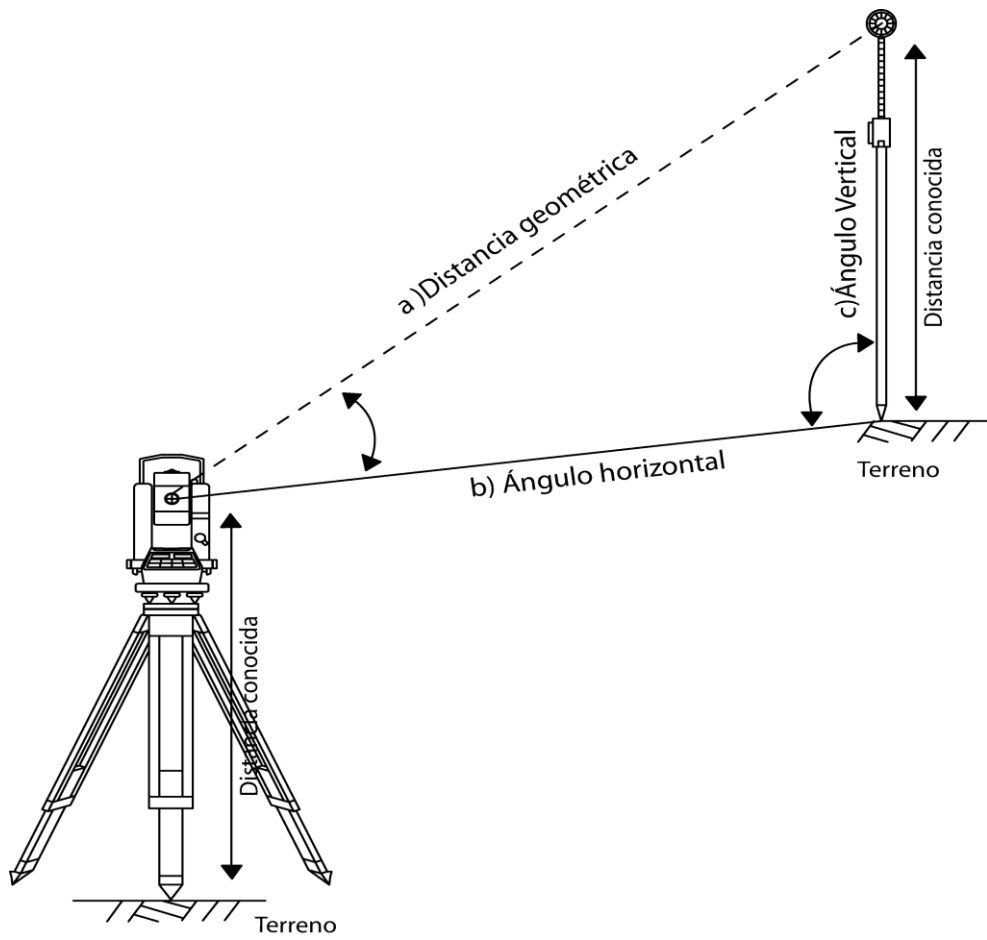


Figura 2.9. Datos básicos y distancias conocidas para el cálculos automáticos en los levantamientos topográficos con ETT. (Elaboración propia).

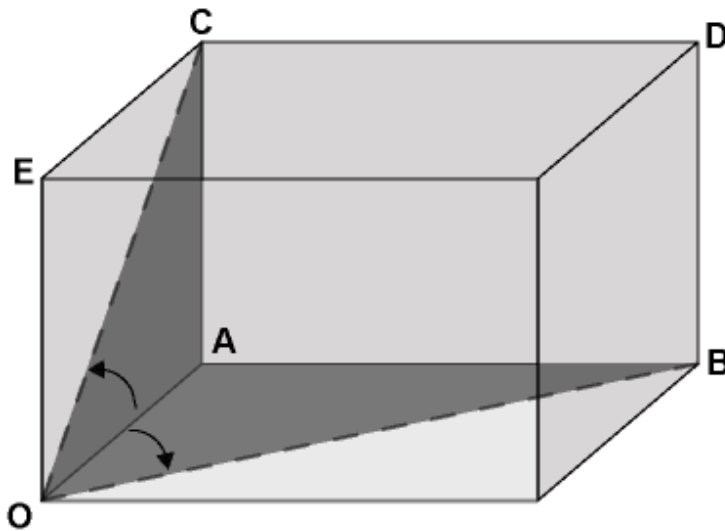


Figura 2.10. Representación de los tipos de mediciones topográficas. (Fuente: INEGI. Manual de conceptos básicos. México, Enero, 2005).



### 2.2.3. Sistemas de representación utilizados en Topografía.

El primer aspecto a señalar, es que a partir de este momento necesitamos una concepción digital de todo el tratamiento de la información obtenida en campo, ya que en los levantamientos con estación total la información queda grabada automáticamente en su dispositivo de almacenamiento y solo basta trasladar la información a un equipo informático para continuar con su tratamiento. Aunado a lo anterior, el enorme desarrollo del software de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés) nos brinda aun más posibilidades de representación gráfica.

#### 2.2.3.1. Sistema de los Planos Acotados.

Este sistema nos permite representar entidades espaciales del terreno (Fig. 2.11a) y en donde un punto ubicado en el espacio queda perfectamente definido mediante su proyección sobre el plano (x, y) y su altura o elevación (z), también denominado como cota.

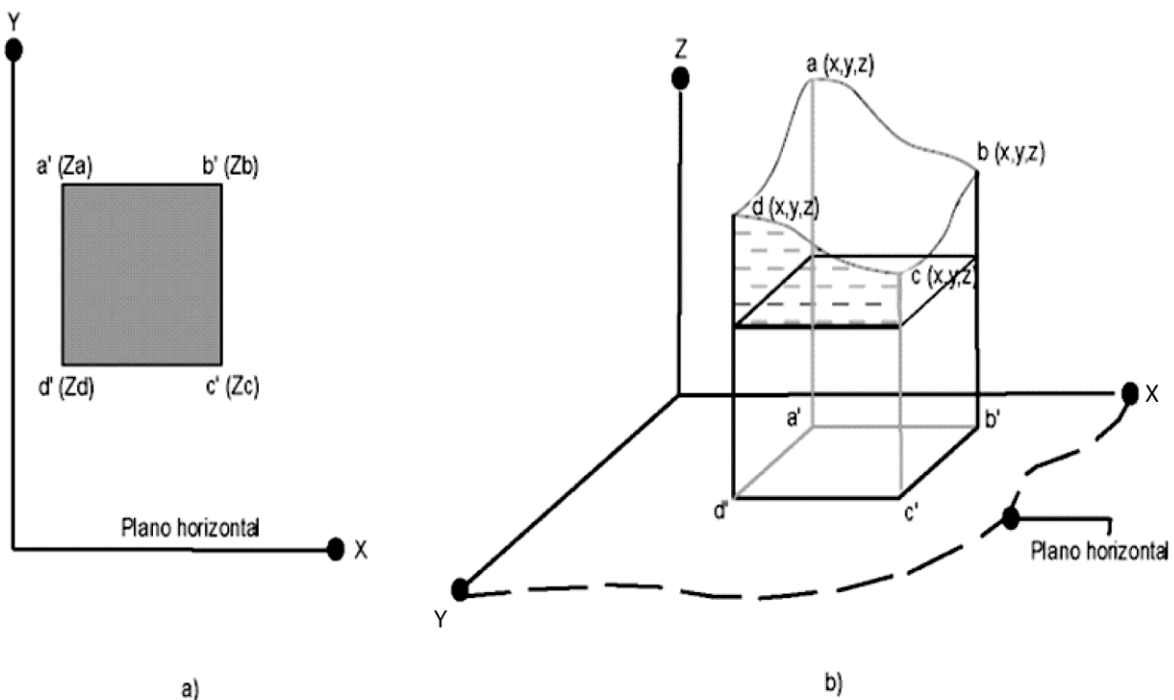


Figura 2.11. a) Representación acotada del terreno. b). Representación en tres dimensiones del terreno. (Fuente: Leonardo Casanova M. Levantamientos topográficos).

### 2.2.3.2. Sistema de representación en tres dimensiones del terreno.

Históricamente las curvas de nivel se constituyeron como el mejor método para representar gráfica y cuantitativamente a las superficies del terreno. En el año de 1958 Miller y Laflamme establecen los primeros principios para el uso de Modelos Digitales de Elevación (MDE) en la resolución de problemáticas tecnológicas, científicas y militares, definiéndolos como “una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas  $x, y, z$  conocidas, en un sistema coordenado arbitrario”.

Posteriormente, en el año de 1967, El Laboratorio de Computación Gráfica y Análisis Espacial de Harvard, presentó un conjunto de programas de manejo de cartografía digital que incluía aplicaciones con algoritmos de interpolación para generar curvas de nivel a partir de puntos acotados distribuidos irregularmente.

En la actualidad existe una gama de aplicaciones informáticas capaces de georreferenciar, manipular y representar adecuadamente a los MDE.

Un MDE es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la superficie del terreno. La unidad básica de información en un MDE es un punto acotado, definido por los valores de  $x, y, z$ , como se muestra en la figura 2.12. La forma de estructurar la representación grafica de estos datos elementales, se da en función de las necesidades del usuario.

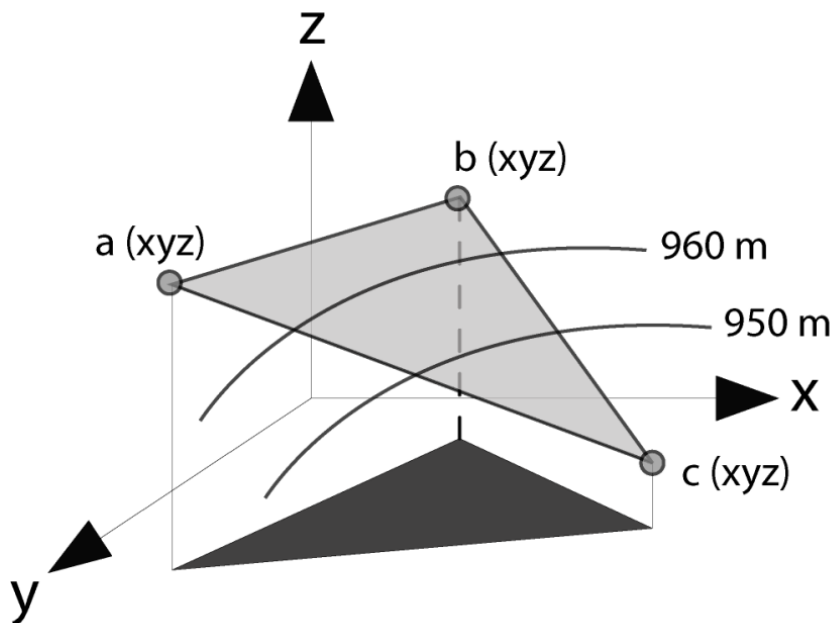


Figura 2.12. Estructura vectorial basada en 3 entidades básicas.  
(Elaboración propia).

La concepción básica de la representación de los datos a partir de un MDE se encuentra sustentada en un modelo de datos vectorial, basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos, los cuales representan a los puntos que concentran la información de las coordenadas  $x, y, z$ .

Cada modelo de datos puede expresarse mediante diferente estructura de datos, inclusive, también puede ser presentado por un modelo de datos raster. Para efectos de este trabajo, utilizamos el fundamento de una estructura vectorial basada en entidades u objetos, la cual, solo tiene tres formas básicas de representación, como se muestra en la figura 2.13:

- Puntual: Nube de puntos con información de coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Esta estructura es la más básica y la más importante, ya que a partir de esta, se derivan todas las representaciones gráficas presentadas.

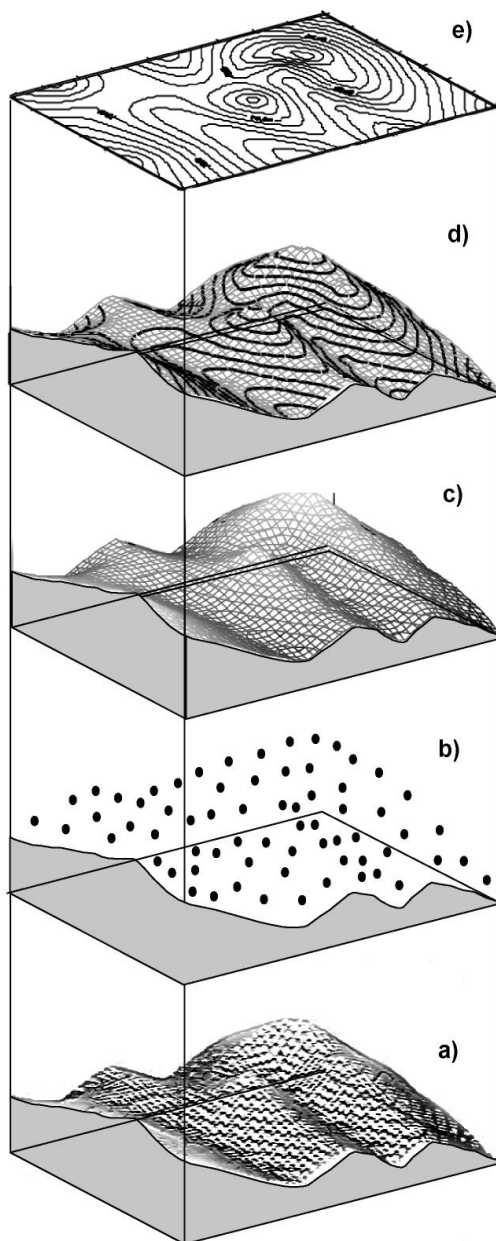


Figura 2.13. Formas de representación de una superficie con estructura vectorial.  
a) Superficie del terreno. b) Nube de puntos. c) Red de triángulos irregulares. d) Red de triángulos irregulares con curvas de nivel. e) Curvas de nivel.  
(Elaboración propia).

- TIN (por sus siglas en inglés: “Triangulated Irregular Network”), red de triángulos irregulares: Esta estructura de datos se compone de un conjunto de triángulos irregulares contiguos, los cuales se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se distribuyen sobre el terreno formando un mosaico que pueda adaptarse a la superficie. En esta estructura el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a un conjunto previo de puntos.
- Contornos: líneas representando curvas de nivel. La estructura básica de un modelo de contornos es una línea definida como un vector, y estas líneas a la vez, representan al terreno segmentado por diferentes planos horizontales basados en la unión de puntos con la misma altitud.

Actualmente, con el apoyo de herramientas informáticas, la posibilidad de generar curvas de nivel, se concreta mediante un proceso informatizado y semiautomático, utilizando un método que actualmente es estandarizado a nivel mundial, se utiliza como base un TIN y con algoritmos de interpolación se logra la representación de las curvas de nivel deseadas.

En un TIN, el conjunto de superficies planas constituidas por los puntos con valores  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , forman un triángulo en el cual, en su interior existe una zona indefinida, ya que no se muestra ninguna información sobre ella; en las curvas de nivel existe una separación vertical entre cada plano horizontal denominada equidistancia en donde al igual que el TIN, existe una zona sin valores determinados, lo anterior ocasiona que se presenten ciertas carencias en la representación de la información.

Cuando existe información de importancia en estas zonas sin valores o cuando debe modificarse algún valor ya determinado, se utilizan líneas que aportan coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , variables en todos sus puntos y en planos horizontales y verticales, estas líneas son denominadas “líneas de ruptura” (breaklines). En la figura 2.14 se muestra la extracción de una parte del terreno, en donde:

- a) Nos muestra una superficie representada por un TIN, del que se derivan dos curvas de nivel con sus valores correspondientes.
- b) La misma información que a), más la representación de un breakline que proporciona información complementaria del terreno.
- c) Utilizando la información del breakline, se modifica la información del TIN y por lo tanto se modifica la configuración de las curvas de nivel.
- d) Explica una forma de representación en planos acotados, en donde d1 muestra las curvas de nivel y un breakline, ambos con información independiente y d2 muestra la nueva configuración de las curvas de nivel, que incluyen la información del breakline post procesado.

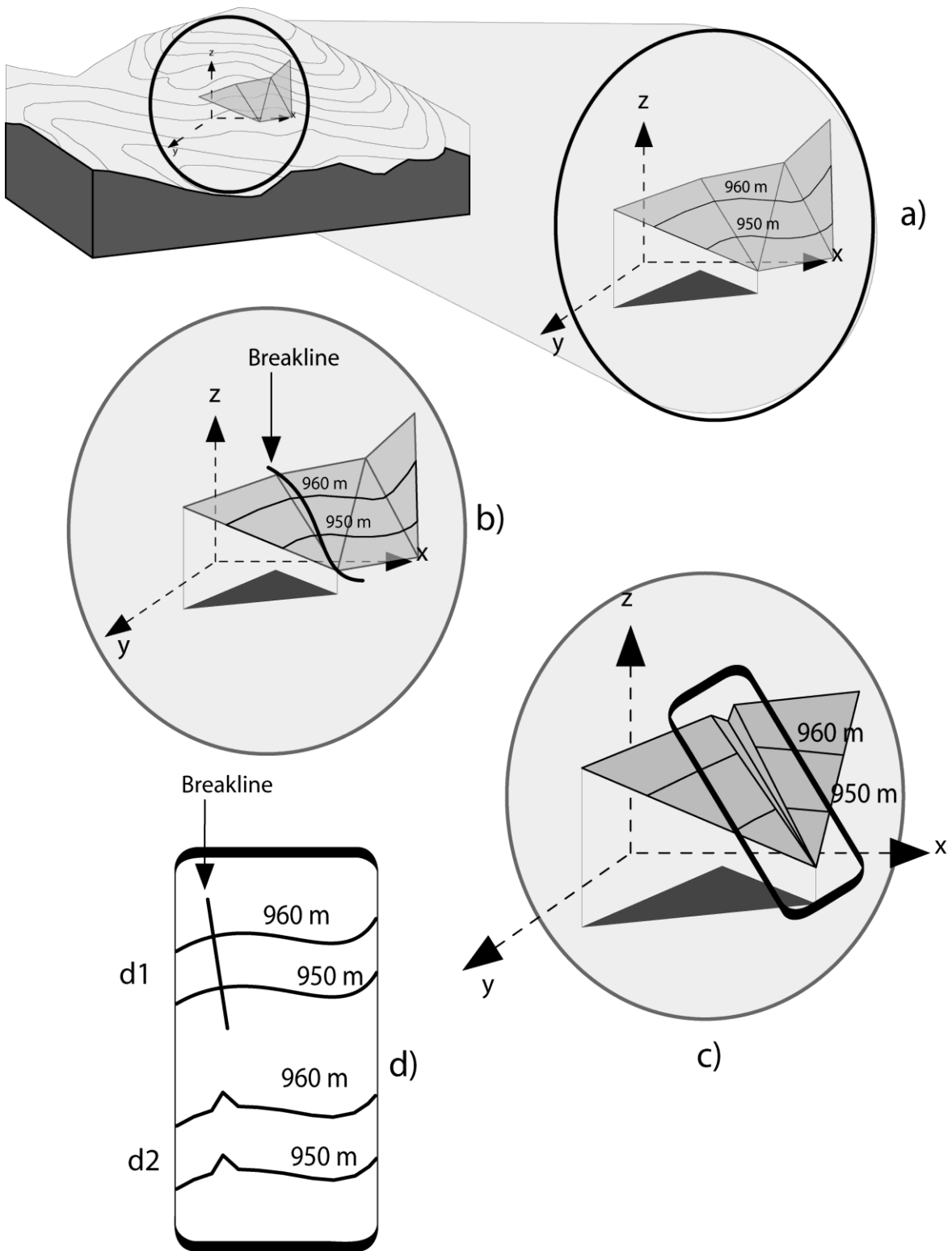


Figura 2.14. Representación gráfica de asignación de valores en función de Breaklines.  
(Elaboración propia).

Lo ideal será obtener estos valores en campo, pero cuando el levantamiento de información ya se realizó, existen programas informáticos de Topografía y Fotogrametría Digital que nos brindan herramientas para realizarlo en gabinete.

#### **2.2.4. Generalidades de una Estación Topográfica Total (ETT).**

En la actualidad, el principal instrumento para realizar mediciones en los levantamientos topográficos son las ETT, ya que este instrumento realiza la toma y registro de datos de forma automática, eliminando los errores de lectura, anotación, transcripción y cálculo, además los cálculos de post-proceso se realizan en programas informáticos incorporados a las mismas ETT.

Dentro del esquema de este trabajo, y como se comentó con anterioridad, la realización de levantamientos topográficos directos se materializa en la obtención de una representación gráfica del terreno a partir de puntos con datos XYZ, los cuales se procesan y se genera un MDE con datos directos del terreno.

El método utilizado para la obtención de estos puntos es muy específico y sencillo, ya que solo bastará un adecuado estacionamiento de la ETT, la referencia de un vértice geodésico para iniciar las mediciones y un amplio conocimiento de las características técnicas, operativas e informáticas de la ETT por parte del operador.

Se denomina ETT a un instrumento electro-óptico que basa su funcionamiento en la tecnología de distanciametría electrónica. Consiste en la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador a un teodolito electrónico.

Algunas de las características que incorpora, y con las cuales no cuentan los teodolitos, son una pantalla alfanumérica de cristal líquido, leds de avisos, iluminación independiente de la luz solar, calculadora, distanciómetro, trackeador (seguidor de trayectoria) y la posibilidad de guardar información en formato electrónico, lo cual permite utilizarla posteriormente en ordenadores personales. Vienen provistas de diversos programas sencillos que permiten, entre otras capacidades, el cálculo de coordenadas en campo, replanteo de puntos de manera sencilla y eficaz y cálculo de acimutes y distancias. Este instrumento realiza la medición de ángulos a partir de marcas realizadas en discos transparentes.

Las lecturas de distancia se realizan mediante una onda electromagnética portadora con distintas frecuencias que rebota en un prisma ubicado en el punto y regresa, tomando el instrumento el desfase entre las ondas. Algunas estaciones totales presentan la capacidad de medir "a sólido", lo que significa que no es necesario un prisma reflectante.

También permite la obtención de coordenadas de puntos respecto a un sistema local o arbitrario. Para la obtención de estas coordenadas el instrumento realiza una serie de lecturas y cálculos sobre ellas y demás datos suministrados por el operador. Las lecturas que se obtienen con este instrumento son las de ángulos verticales, horizontales y distancias. Otra particularidad de este instrumento es la posibilidad de incorporarle datos como coordenadas de puntos, códigos, correcciones de presión y temperatura, etc.

El tratamiento de los resultados obtenidos ya no se realizará de forma tradicional, en donde eran incorporados a una libreta de campo, ya que ésta ha sido sustituida por una libreta electrónica o colector de datos que se encarga de ir almacenando, de forma automática, toda la información necesaria.

A continuación, en la figura 2.15 se presentan las partes fundamentales para el funcionamiento adecuado de una estación total.



Figura 2.15. Partes fundamentales de una estación total.  
(Fuente: Imagen de fondo: [www.trimble.com](http://www.trimble.com). Esquema funcional: Elaboración propia).

1. 1a) Pantalla digital: LCD gráfica (128x64).  
1b) Teclado: 25 teclas, alfanumérico: la utilización de estos elementos en conjunto permiten acceder a funciones predeterminadas, especificar los cálculos a realizar y visualizar la información correspondiente.
2. Espaciamiento para plomada óptica o láser: a partir de este espaciamiento se proyecta el rayo láser o se visualiza el terreno para un adecuado estacionamiento. En el ejemplo presentado se trata de una plomada óptica erecta, en el caso del rayo láser, este es perfectamente visible a la luz del día.
3. Base o plataforma de nivelación: aditamento que soporta la estructura electrónica de la estación, en el ejemplo presentado, tiene un peso de 0.7 Kg (1.54 lb) y es removible.
4. Conexión colector de datos a ordenador personal: es una unidad de respaldo de la información obtenida, estos colectores pueden ser externos o internos.

Anteriormente, se utilizaban colectores externos como sistemas de almacenamiento, actualmente y en función del ejemplo que se presenta, las estaciones incluyen un sistema de almacenamiento interno al que podríamos comparar con un pequeño disco duro, este sistema tiene la capacidad de administrar un software específico para las operaciones realizadas por la estación; su capacidad esta en función de las líneas de datos que puede almacenar, en este caso es de 10,000 líneas de datos.

Presenta también la compatibilidad de entrada/salida de datos a partir de un registro externo vía RS232, el cual consiste en la adaptación de un cable conector de la estación a un ordenador personal. Esto es utilizado para transferir la información para su almacenamiento y/o reproducción.

5. Niveles: nos referimos a un nivel esférico en placa de 30"/ 2 mm. y otro nivel esférico circular de 10"/ 2 mm. Estos niveles son utilizados para el estacionamiento de la estación total.
6. Tornillos de nivelación: se utilizan para equilibrar uno de los niveles mencionados con anterioridad en el estacionamiento de la estación.
7. Mira de puntería: utilizada para realizar la observación en el momento de realizar el disparo de luz.
8. Telescopio y distanciómetro: permite realizar las acciones de apertura, aumento, campo visual y distancia de enfoque más corta, debe tener una óptica nítida y por lo menos de 20 aumentos y un enfoque mínimo que suele oscilar en torno a 1.5 m. aunque existen instrumentos de enfoque mínimo 0.1 hasta 1.7 m. con campos de visión que estén en el entorno de 1° 30' oscilando entre 1° 20' y 1° 53'.



También conviene que el eje óptico sea coaxial con el del rayo del distanciómetro y que permita la completa vuelta de campana.

Casi todos los fabricantes distinguen en este apartado entre el alcance con uno o con tres prismas y en condiciones atmosféricas buenas, normales y malas, en función de la radiación solar, reverberación, etc.

El rango de distancia en el mercado oscila desde los 500 m. con un prisma, hasta los 11 km. con 3 prismas y buenas condiciones atmosféricas.

Existen también distanciómetros de láser, es decir no infrarrojos (electro-ópticos) capaces para mayores distancias, pero normalmente tan solo son distanciómetros, debiendo acoplar al aparato un teodolito para efectuar las medidas angulares, escapando ya del concepto de estación total integrada que incorpora la emisión de rayo infrarrojo y teodolito como un único conjunto compacto no modular.

9. Tornillos de movimiento acimutal y cenital: utilizados para calibrar la toma de mediciones angulares.
10. Baterías: Algunos modelos incorporan una (o incluso dos) prácticas y manejables baterías de asa o de costado, estas baterías son casi siempre de Níquel Cadmio y la duración usando el distanciómetro de forma continua es entre 2 y 8 horas dependiendo del modelo y fabricante, o bien de 1000 o 2000 mediciones, el inconveniente de su posible corta duración se puede solventar con baterías externas de mayor duración.

Los cargadores pueden ser rápidos (de una o dos horas) hasta el más lento de quince horas. Es en ocasiones inevitable el uso de baterías externa no incorporada a la estación total de duraciones que oscilan entre tres o doce horas con cargadores rápidos y/o lentos. Estos datos son para el funcionamiento simultáneo de teodolito y distanciómetro.

También pueden ser útiles los transformadores para poder utilizar directamente un batería de coche.

No se debe olvidar que otra tecnología para determinar mediciones topográficas es el GPS, ya que actualmente se realizan levantamientos de información con el uso combinado de mediciones obtenidas con Estación Total y GPS, lo que ha reducido los costos de los levantamientos topográficos y aumentado su precisión. Así mismo este uso combinado de tecnologías ha trascendido a otras áreas de aplicación, como los levantamientos aerofotográficos con GPS aerotransportado.

A continuación, por su importancia tecnológica y operacional en los levantamientos geodésicos y topográficos se describe ampliamente el sistema GPS.

### **2.3. Sistema de Posicionamiento Global (GPS).**

El GPS se ha convertido en la herramienta de posicionamiento más utilizada a nivel mundial por su versatilidad y bajo costo. El objetivo primordial del Departamento de Defensa de los Estados Unidos fue desarrollar un sistema de navegación global, que permitiera la adquisición de resultados en tiempo real, que fuera independiente de las condiciones atmosféricas y tuviera una exactitud de pocos metros. Desde los inicios del proyecto NAVSTAR GPS, éste mostró cualidades sin precedentes para aplicaciones comerciales y científicas.

A partir de la perspectiva que interesa a este trabajo, el GPS provee un sistema de referencia global y al mismo tiempo una metodología para vincularse a la utilización en más procesos aplicados para generar cartografía básica. Según la modalidad de trabajo que se utilice, el GPS permite calcular posiciones de objetos respecto al ITRS con una exactitud desde decenas de metros hasta uno o dos centímetros. El posicionamiento de alta precisión con GPS ha contribuido a establecer el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), de exactitud centimétrica y fácilmente accesible en todo el mundo.

#### **2.3.1. Antecedentes.**

Durante siglos, la única forma de orientarse era observando la posición del sol y las estrellas y realizando una estimación. Incluso después del desarrollo de los relojes modernos, que permitían averiguar la longitud, los instrumentos más precisos podían obtener una posición con una exactitud muy relativa. Sin embargo, hasta el momento en que la Unión Soviética lanzó el satélite Sputnik el 4 de octubre de 1957, se supo que era posible utilizar esta "estrella artificial" como una herramienta de navegación.

Posteriormente, los investigadores del laboratorio Lincoln del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) pudieron determinar con precisión la órbita del satélite, al observar cómo la frecuencia aparente de la señal de radio aumentaba al acercarse y disminuía al alejarse, efecto que se conoce como efecto Doppler. Al probar que es posible determinar con precisión la órbita de un satélite desde la Tierra, se dio el primer paso para establecer la posibilidad de determinar las posiciones en la Tierra mediante la localización de señales emitidas por satélites.

En los años siguientes, la marina estadounidense realizó experimentos con una serie de sistemas de navegación por satélite, que comenzó en 1965 con el sistema Transit, desarrollado para satisfacer las necesidades de navegación de los submarinos que transportaban misiles nucleares. Estos submarinos debían permanecer ocultos y sumergidos durante varios meses, pero el sistema de navegación basada en giroscopio, conocido como navegación inercial, no podría mantener su precisión durante períodos tan largos. El sistema Transit estaba formado por media docena de satélites que girarían alrededor de la Tierra continuamente en órbitas polares. Al analizar las señales de radio transmitidas por los satélites; es decir, al medir el efecto Doppler de las señales, un submarino podía determinar su ubicación con precisión en un período de 10 ó 15 minutos. En

1973, el Pentágono desarrolló el concepto de GPS, basado en la experiencia del Departamento de Defensa de EUA con todos los satélites anteriores.

Los componentes esenciales del GPS son los 24 satélites NAVSTAR fabricados por Rockwell International. Cada uno de estos satélites tiene el tamaño de un vehículo de gran tamaño y pesa alrededor de 1.900 libras (900 kilogramos). Todos los satélites giran alrededor de la Tierra cada 12 horas en una formación tal que cada punto del planeta siempre se encontrará en contacto por radio con 4 satélites que cumplen una órbita como mínimo. El Ejército aprobó la arquitectura básica en 1973, lanzó el primer satélite en 1978, y declaró el GPS operacional en 1995.

El GPS se conformó como un sistema de navegación satelital, cuyo principal objetivo de desarrollo fue proporcionar al ejército norteamericano un sistema de estimación exacta de posiciones, velocidad y tiempo. Las estimaciones se harían disponibles a los usuarios de receptores GPS en cualquier parte del mundo, de manera ininterrumpida y prácticamente instantánea. El beneficio del servicio exacto se negaría a los adversarios mediante la encriptación en dos servicios: SPS (Standard Positioning Service), y PPS (Precision Positioning Service). Los receptores de uso civil utilizan el SPS y los de uso militar el PPS. En Mayo 1, 2000, el presidente Bill Clinton anunció la eliminación de la encriptación en el servicio PPS. Los receptores civiles ahora tienen un margen de error aproximado de 10 metros en posición horizontal, 0.1 m/s en velocidad, y 10 ns. en tiempo.



Figura 2.16. Esquema de la constelación NAVSTAR.  
(Fuente: Peter H. Dana, Departamento de Geografía, Universidad de Texas).

Este sistema permite conocer la ubicación de un punto sobre la superficie terrestre, mediante la transmisión-recepción de señales electromagnéticas vía satelital, por lo que se ha constituido en la herramienta más completa para el registro de la localización de rasgos o elementos sobre la superficie del planeta, por tanto, la aplicación de este sistema ha progresado más en los levantamientos geodésicos y topográficos los cuales son indispensables para la realización de cartografía en diferentes temáticas. El GPS es, entonces, un sistema de recepción para posicionamiento y navegación.

Los satélites transmiten información a los usuarios en Tierra pero no reciben información proveniente de los usuarios; esto significa que los satélites no funcionan como enlace de comunicación entre el usuario y alguna estación base. Aunque se originó con objetivos bélicos, el GPS ha pasado paulatinamente a constituir una poderosa herramienta de aplicaciones civiles como la transportación terrestre, aviación civil, comercio marítimo, topografía, construcción, minería, agricultura, ciencias geológicas, energía eléctrica, telecomunicaciones, etc.

### **2.3.2. Funcionamiento del GPS.**

Para dar una explicación sencilla, tomamos el siguiente ejemplo; si sabemos que nos encontramos a determinada distancia y conocemos la posición de un satélite determinado, sabremos de nuestra posición en un área que es geométricamente una esfera (ver figura 2.17 a).

Si disponemos de las distancias a dos satélites y conocemos sus posiciones, podremos determinar nuestra posición dentro del área de intersección entre las dos esferas, cada una de las circunferencias tienen su centro en cada uno de los satélites, y de radio las distancias a cada uno de ellos respectivamente (ver figura 2.17 b).

Si conseguimos contar con otro satélite más podremos determinar nuestra posición en uno de los dos puntos en que se cortan las tres esferas. Para poder determinar nuestra posición real podríamos realizar una medición a un cuarto satélite, pero en realidad lo más común es descartar uno por conocimiento del lugar en donde nos encontramos y por el conocimiento de la altitud en que nos encontramos (ver figura 2.17 c).

Para obtener la distancia a que se encuentra un satélite, nos basamos en que estos emiten señales en forma de ondas de radio, las cuales viajan aproximadamente a la velocidad de la luz (300,000 Km/seg.). Cuando un satélite emite una señal y registramos el momento en el que se recibe en el receptor, el cálculo de la distancia se puede realizar a partir de los intervalos de tiempo en la recepción.

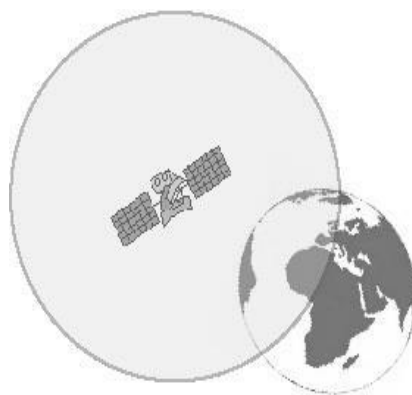


Figura 2.17 a. Si tenemos los valores de un solo satélite, la posición del usuario se encuentra dentro de la circunferencia de la esfera. (Elaboración propia).

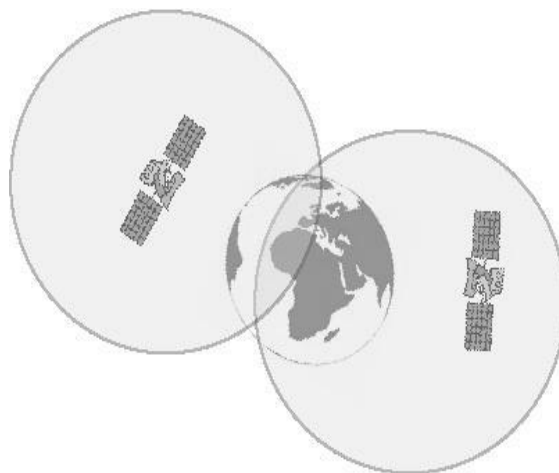


Figura 2.17 b. Con los valores de dos satélites, la posición del usuario se encuentra dentro de la intersección de las circunferencias. (Elaboración propia).

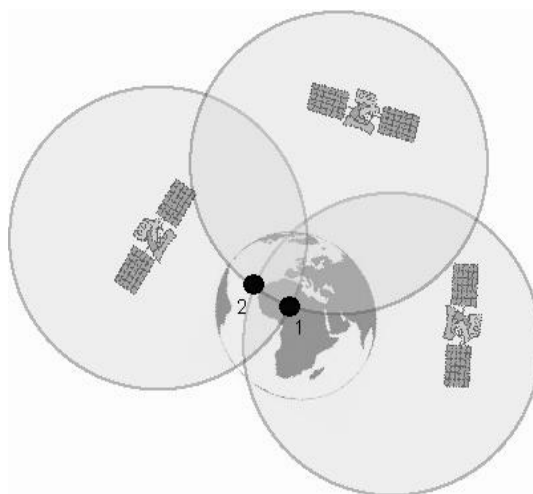


Figura 2.17 c. Con los valores de tres satélites, solo existen dos puntos del espacio donde se puede ubicar al usuario. (Elaboración propia).

Lo esencial en la obtención de distancias radica en disponer de la tecnología suficiente para poder medir con exactitud los breves intervalos de tiempo, que tarda la señal emitida por el satélite en llegar al receptor.

Por lo anterior, para poder medir el tiempo, son necesarios relojes de gran precisión, tanto en los satélites como en los receptores.

Los satélites y los receptores cuentan con relojes atómicos de gran precisión, pero el problema es que la precisión de los receptores fuera del rango antes mencionado, depende en extremo de la calidad de los relojes empleados para medir el tiempo. Los factores que afectan a la medida de la distancia son:

- El desfase en el reloj del receptor (que suele ser de calidad media) puede provocar un apreciable error de distancia.
- Los errores en el reloj del satélite suelen ser mínimos, pero también hay que considerarlos.
- La propagación a través de la ionosfera produce un retraso variable.

La solución a esta problemática se basa en el conocimiento de que el retraso de las señales es inversamente proporcional al cuadrado de las frecuencias de las mismas, es decir, cuanto menor sea la frecuencia (y por tanto mayor la longitud de onda), mayor será el retraso.

Teniendo en cuenta lo anterior, si se emiten desde el satélite dos señales con frecuencias distintas en un instante determinado, podemos examinar una vez que lleguen estas señales al receptor, el desfase existente entre dos partes de dichas señales que, teóricamente, deberían haber llegado al mismo tiempo. De esta forma puede calcularse con bastante aproximación el retraso ionosférico (partiendo de las frecuencias de ambas señales y del desfase medio entre ambas en la recepción).

Por esta razón, se diseñó el sistema con las portadoras L1 y L2 que se explican a continuación.

Tanto los satélites como los receptores GPS están diseñados de tal manera que el oscilador genere en ambos el mismo código a la misma hora. El código del satélite tardará algún tiempo en llegar hasta el receptor, así que si lo comparamos con el código generado por nuestro receptor, podremos determinar el desfase existente entre ambos.

Los osciladores de los satélites generan un código en una frecuencia fundamental de 10,23 MHz. De esta se derivan el resto de frecuencias utilizadas, en concreto las dos frecuencias portadoras L1 y L2, obtenidas de la siguiente forma:

*Fundamental* (10,23 MHz) x 154 = portadora L1 (1575,42 MHz).

*Fundamental* (10,23 MHz) x 120 = portadora L2 (1227,60 MHz).

Estas dos frecuencias portadoras (L1 y L2) se denominan con la letra L por que pertenecen a dicha banda de radiofrecuencia, la cual esta comprendida entre 1 GHz y 2 GHz. Sobre estas dos frecuencias portadoras se transmiten dos códigos:

1. El código C/A (Coarse/Acquisition) o también denominado S (standard), es el de menor frecuencia, ya que utiliza solo la fundamental dividida por 10, es decir, 1,023 MHz. En principio es el que ofrece menos precisión y se utiliza en el llamado SPS (Standard Positioning Service), para uso civil, Se transmite sobre la portadora L1.
2. El código P (Precise), se transmite directamente a la frecuencia fundamental, ofrece mayor precisión y se utiliza en el denominado posicionamiento preciso (PPS). Se transmite sobre la portadora L1 y L2.

### **2.3.3. Constitución del GPS.**

El sistema NAVSTAR-GPS, está conformado por tres segmentos específicos:

#### **2.3.3.1. Segmento Espacial.**

Está constituido por los 27 satélites de la constelación NAVSTAR (ver figura 2.6), en donde 3 satélites son de reserva y los otros 24 se sitúan en 6 planos circulares, con una semisincronía de 11 horas 58 minutos, con 4 satélites en cada órbita separados por 90°. Cada órbita está a una altitud de 20.169 Km sobre la Tierra con una inclinación de 55° respecto del ecuador. Esos planos orbitales están separados entre sí 60°. La constelación permite que sobre el horizonte de cualquier lugar de la Tierra puedan verse simultáneamente entre 6 y 11 satélites, lo cual asegura la continuidad de las observaciones durante las 24 hrs. del día.

#### **2.3.3.2. Segmento de Control.**

La constelación NAVSTAR se encuentra controlada desde la Tierra a través de una serie de cinco estaciones oficiales de seguimiento repartidas por todo el planeta (ver figura 2.19). Existe una estación central en Colorado Springs (EE.UU.) que reúne la información de las estaciones de monitoreo repartidas por todo el mundo. Realiza los cálculos correspondientes para que todo se desarrolle según la planificación y que todos los parámetros estén dentro de las tolerancias. Genera el mensaje de navegación y lo retransmite a los satélites para que éstos los difundan a los usuarios.

Las estaciones de seguimiento o monitoreo, tal como se observa en la figura 2.18, se encuentran separadas regularmente en longitud y sus coordenadas están determinadas con gran precisión.

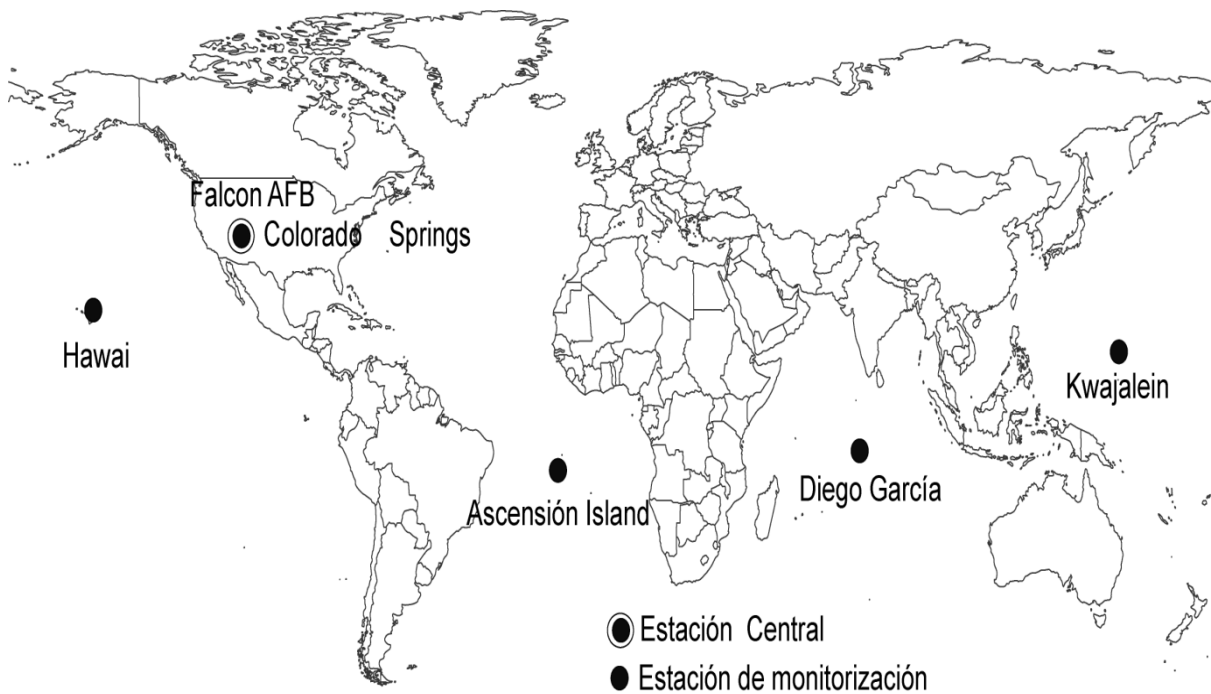


Figura 2.18. Segmento Control del GPS. Estaciones de seguimiento.  
 (Fuente: Peter H. Dana, Departamento de Geografía, Universidad de Texas).

Su función específica es la de estar en constante comunicación con la constelación satelital, recibiendo las señales emitidas por estos, para así determinar sus orbitas con la mayor exactitud.

Los datos recogidos por las estaciones de seguimiento son enviados a la estación central, donde son debidamente procesados, y se calculan las efemérides, parte esencial para la utilización de este sistema por parte de un gran grupo de usuarios.

### 2.3.3.3. Segmento de Usuario.

El segmento se integra por los usuarios de las señales del sistema GPS. El adecuado funcionamiento de este segmento radica en la calidad del receptor utilizado y la forma de obtener la señal de la constelación satelital.

La razón para el uso de dos frecuencias es que esto permite la eliminación del retardo producido por la ionosfera. Ambas portadoras están moduladas por varios códigos binarios que proveen las mediciones de pseudodistancia al satélite y su posición. La modulación utilizada es en fase, de modo que cada transición en el código produce un cambio en la fase de la señal modulada de 180 grados.

La portadora L1 está modulada por el mensaje de navegación, sucesión de dígitos binarios, que principalmente indican al receptor la posición extrapolada del satélite y el estado de su reloj para el instante de medición (Van Dierendonck et al, 1978).



Tanto L1 como L2 se encuentran además moduladas por otros dos códigos. Esta segunda codificación tiene múltiples propósitos: identificar, desde el receptor, al satélite en que se originó la señal recibida y separarla de las señales de los demás, medir la pseudodistancia satélite-receptor, proteger las señales contra posibles interferencias casuales y/o deliberadas e impedir el uso de algunas capacidades del sistema a usuarios no autorizados por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Los códigos utilizados son del tipo pseudo aleatorio. La asignación de un código diferente a cada satélite permite al receptor identificarlos aunque lleguen señales de varios satélites simultáneamente a la misma antena y sobre la misma frecuencia portadora.

El receptor busca el máximo de la autocorrelación del código recibido desde el satélite respecto de una copia del mismo código generada localmente en sincronización con el tiempo del satélite a menos de un error en el reloj local. Esto le permite medir el desfase causado por la propagación y por la falta de sincronización del reloj local con respecto al patrón del satélite. Este desfase, multiplicado por la velocidad de la luz es lo que se llama pseudodistancia o distancia afectada de errores de sincronización entre los relojes del satélite y del receptor. Si se dispone de las pseudo distancias a cuatro satélites simultáneamente, se puede calcular la posición de la antena y el error del reloj local respecto del tiempo patrón del sistema.

La precisión de la medición de pseudo distancia depende de la duración mínima de un estado del código C/A. Este es una secuencia con una duración de 1 ms, de frecuencia 1.023 MHz, de acceso público y que modula sólo a L1. Además el código P se presenta como una secuencia de dígitos de 266 días de duración, de frecuencia 10.23 MHz, de acceso restringido y que modula a L1 y a L2.

Un equipo de recepción se encuentra integrado por varios elementos, los cuales se utilizan de manera opcional de acuerdo con las necesidades del trabajo a realizar, un ejemplo de este segmento se presenta en la figura 2.22.

Cada uno de los segmentos antes mencionados, tienen objetivos y funciones distintas. El segmento más costoso es el segmento espacial, mientras que el responsable de que todo se ajuste a lo planificado es el segmento de control. Al final el segmento de usuario es el que aglomera a los "clientes" que son el objetivo final de todo el sistema. El sistema GPS tiene como base de su funcionamiento la determinación de las distancias entre los usuarios y los satélites.

#### **2.3.4. Métodos de medición GPS con fines geodésicos.**

El bajo costo relativo de los receptores respecto de las demás técnicas y el gran número de aplicaciones que se sirven de la tecnología GPS han contribuido a que en menos de una década se desarrollara una red mundial de estaciones de rastreo integradas en el Servicio Internacional de GPS (IGS). Esta organización, patrocinada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), produce órbitas GPS precisas, parámetros de rotación terrestre, coordenadas y velocidades de las estaciones de rastreo con exactitudes del orden de las que se obtienen con las

demás tecnologías descritas con anterioridad. El servicio prestado por el IGS (International GPS Service) contribuye en forma decisiva a la disponibilidad actual del posicionamiento con GPS de exactitud centimétrica.

La contribución del GPS en la realización de sistemas de referencia puede considerarse en dos partes:

- En la definición de su propio sistema de referencia, mediante la instalación de antenas GPS fijas sobre puntos bien distribuidos de la superficie terrestre, formando una red mundial que sirva de base al marco de referencia propio de esta tecnología.
- Además, el GPS da la posibilidad de posicionamiento geodésico ultra-preciso, lo cual puede servir para la vinculación entre puntos de distintos marcos de referencia, vinculación de redes regionales a la red permanente, etc. Además abre grandes posibilidades de interconectar distintos sistemas de referencia.

Para poder trabajar con fines geodésicos es necesario contar con receptores que trabajan con la onda portadora L1, acumulando información que con post-procesado en gabinete permite obtener precisiones relativas centimétricas en el mejor de los casos para distancias de hasta 25 ó 30 km y submétricas para distancias de hasta 50 km. Este tipo de receptores suelen ser usados con métodos relativos estáticos y diferenciales. Su precio suele estar en torno a los 10,000 Euros (sin incluir estación base de referencia ni otro tipo de suscripciones para el acceso a la corrección diferencial DGPS vía satélite).

Los receptores geodésicos de doble frecuencia trabajan con la portadora L1 y también con la L2, lo cual permite disminuir los errores derivados de la propagación desigual de la señal a través de las distintas capas atmosféricas y resolver un gran número de ambigüedades. Con este tipo de equipos se pueden llegar a precisiones por debajo del centímetro con post-procesado para distancias de hasta 10 km, y por debajo del metro para distancias de hasta 500 km. Algunos de ellos son compatibles con sistemas DGPS vía satélite; los servicios de corrección de última generación vía satélite junto con lectores de doble frecuencia permiten llegar hasta precisiones decimétricas en tiempo real.

El precio de un receptor bifrecuencia de última generación está alrededor de 30.000 Euros (incluyendo un receptor adicional para operar como estación base, un emisor de radio para enviar la corrección de la señal).

Los posicionamientos geodésicos se clasifican de la siguiente manera:

1.- Por su método de levantamiento de información y referencia.

- a) Absoluto. Este método consiste en medir puntos aislados, sin ningún tipo de apoyo con otros receptores base u origen de referencia.

- b) Relativo. En este método se involucran en el proceso de trabajo por lo menos dos receptores, lo cuales trabajan simultáneamente. Este método también es conocido como posicionamiento Diferencial.

2.- Por el movimiento del receptor.

- a) Estático. Es cuando el receptor no es desplazado durante un lapso de tiempo, y es cuando se obtienen las observaciones y coordenadas de determinado punto.
- b) Dinámico. Se realizan las observaciones y toma de coordenadas según varía el tiempo y la situación del receptor en movimiento.
- c) Cinemático. En este proceso se utilizan dos receptores durante el levantamiento, uno se encuentra estacionado en determinado punto de referencia (Estático) y otro se encuentra en movimiento (Relativo).

En la práctica, los métodos más utilizados con fines geodésicos son:

#### **2.3.4.1. Medición GPS con corrección diferencial (DGPS).**

Consiste en la utilización de un receptor móvil y una estación (o estaciones) de referencia sobre coordenadas conocidas. La idea básica para comprender el fundamento de este método es la utilización de receptores sobre puntos de coordenadas muy bien conocidas; estos receptores (llamados estaciones de referencia), leen en todo momento las posiciones reportadas por sus observaciones GPS y las comparan con las posiciones teóricas de sus coordenadas conocidas.

En tiempo real, las estaciones de referencia transmiten las correcciones a realizar a los receptores del usuario, que también están leyendo directamente la señal GPS y que al vuelo obtienen dichas correcciones y las aplican a sus medidas, con lo cual se mejora notablemente la precisión del sistema.

La manera de obtener las mediciones diferenciales depende del lugar del mundo donde estemos. En los Estados Unidos, es fácil adquirir correcciones DGPS vía radio y con bastante calidad de forma gratuita. Otra manera de conseguir correcciones diferenciales es a través de la suscripción a un servicio de pago vía satélite. En este caso las correcciones vienen proporcionadas por satélites geostacionarios cuya señal cubren casi todo el planeta. Servicios de este tipo son OmniStar o LandStar y dan servicio a casi cualquier país (salvo las zonas de latitudes muy altas).

Las precisiones obtenidas vía satélite nos dan una resolución sobre el metro y tienen la enorme ventaja de que las podemos recibir en cualquier sitio, sin necesidad de tener que cargar con una estación de referencia.

### **2.3.4.2. Medición con el Método Relativo Estático.**

Consiste en la utilización de un receptor base sobre un punto de coordenadas conocidas y otro receptor sobre el punto a medir. Ninguno de los dos receptores se mueve durante los prolongados tiempos de medición. Es un método utilizado en geodesia para medir a largas distancias y es hoy por hoy la manera más precisa de obtener coordenadas por GPS.

Su precisión depende de los tiempos de medición y sobre todo el tipo de receptor empleado. Recordamos que este método se puede aplicar con receptores de fase de portadora L1 o con receptores de fase de portadoras en bifrecuencia (L1+L2). En el caso de receptores de doble frecuencia la precisión del sistema viene a ser de 5 mm + 1 ppm.

Las coordenadas medidas no son obtenidas por el usuario en el campo, sino que son calculadas en gabinete utilizando el software apropiado. Dicho software pone en relación las series de la estación (o estaciones de referencia) con las series de los receptores de medida. Como la estación de referencia ha estado ubicada en un punto de coordenadas conocidas, se puede saber en cada momento de la medición qué error aproximado estaban induciendo los satélites; dicho error es compensado sobre la serie del receptor medidor.

La idea principal de este método es que las señales que han llegado hasta la estación base han recorrido prácticamente la misma región atmosférica que las señales que han llegado hasta el receptor medidor, con lo cual ambas señales han estado sometidas al mismo tipo de degradaciones (sobre todo por efecto de la ionosfera).

Los receptores de dos portadoras (L1 y L2) al utilizar dos frecuencias distintas permiten resolver mayor número de ambigüedades y dar mayor precisión; ello es así porque los retardos atmosféricos son función de la frecuencia de la señal, luego si utilizamos dos frecuencias distintas podemos tener más información acerca de qué retardos y degradaciones ha tenido la señal en su camino hasta nuestro receptor.

Se analiza seguidamente el impacto de los errores de las efemérides GPS en el posicionamiento relativo para el caso de áreas de cientos de miles de km de extensión. Se estima que las efemérides transmitidas tienen errores menores que cuatro metros respecto de ITRF. Un análisis de propagación de errores análogo al realizado más arriba indica que la incidencia de los mencionados errores de las efemérides transmitidas no es relevante para áreas de hasta pocas decenas de kilómetros de extensión. Sin embargo, para vectores de 50 km se pueden esperar errores de alrededor de 1 cm y para 500 km el efecto puede alcanzar los 10 cm.

De lo anterior resulta evidente que si se busca calcular vectores de cientos o miles de kilómetros de longitud con exactitudes centimétricas o mejores, se requerirá el empleo de efemérides precisas y coordenadas de partida provenientes de un marco de referencia geocéntrico y preciso. Esto equivale a decir que la

información de posicionamiento absoluto contenida en las simples o dobles diferencias es más significativa a medida que la distancia entre receptores aumenta y requiere cada vez mayor compatibilidad entre efemérides y coordenadas de control.

Las efemérides precisas calculadas y diseminadas por el IGS aproximan en la actualidad las órbitas GPS con una exactitud decimétrica o mejor y son de acceso público. Esto implica que el problema de disponer de órbitas precisas en ITRF queda resuelto hasta para las aplicaciones más exigentes. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, a fin de no desaprovechar la calidad de las órbitas, se debe trabajar con programas de procesamiento adecuados a las convenciones del IERS, para la materialización del sistema de referencia. Desde el punto de vista del usuario esto implica, por ejemplo, que si fuera necesario transformar entre los sistemas de referencia celeste y terrestre durante el procesamiento, se deberá asegurar su máxima exactitud.

Esto significa que se deberán utilizar parámetros de rotación terrestre (EOP) compatibles con las efemérides utilizadas. Como ejemplo, los EOP combinados por el IERS y distribuidos junto con las órbitas del IGS permiten calcular la orientación de la Tierra para el instante de las observaciones con un error equivalente a 3 mm en la superficie de la Tierra (IGS, 1999). Además, las coordenadas de partida a utilizar deben estar expresadas respecto del ITRS para la época central de la campaña de medición a procesar para asegurar la máxima compatibilidad con las efemérides precisas.

### **2.3.5. Descripción de un receptor GPS.**

Aunque existen varios tipos de receptores, a continuación se describen a manera de ejemplo las características de un equipo GPS ProXRS System, en donde se muestra un equipo completo de recepción, en conjunto con la Figura 2.21, y cada uno de sus accesorios<sup>3</sup>:

1. Colector TSC1: (Trimble System Controller). Consiste en una computadora de campo portátil con teclado alfanumérico completo, una pantalla de cristal líquido de resolución de 200 por 240 píxeles y 2 puertos de comunicación en serie, cuenta con una memoria RAM de 2 Mb así, como 2 Mb de memoria para almacenamiento de datos, equivalente al almacenamiento de más de 60 000 posiciones GPS y adicionalmente cuenta con un dispositivo de almacenamiento denominado "PC card" que tiene una capacidad de 4 MB.

Una porción de la memoria del disco se asigna al espacio del software Asset Surveyor y es aquí donde residen los archivos de programa, los archivos de idioma y los archivos de ayuda del Asset Surveyor.

---

<sup>3</sup> Esta información se encuentra estipulada en el Manual de Normas para la Actualización de la Cartografía, Vía Sistema de Posicionamiento Global (GPS). MARCO TEÓRICO DIRECCIÓN GENERAL DE GEOGRAFÍA. INEGI. México, Pág. 39-44.

2. Receptor PRO XRS: Es un receptor de tipo cartográfico que combina las características de un receptor GPS, un receptor diferencial radiofaro MSK y un receptor diferencial de satélites en una caja única. Ofrece una flexibilidad insuperable para elegir la fuente de las correcciones en tiempo real, únicamente se requiere una suscripción a un servicio de corrección diferencial y una tecnología de estación de referencia/base Virtual (VRS/VBS) integrada, permitiendo que las correcciones del satélite sean uniformemente precisas sobre toda la zona de cobertura del mismo, sin degradación en la precisión asociada con el evento de la distancia desde las estaciones de referencia fijas.



Figura 2.19. Receptor Pro XRS.

(Fuente: Manual de Normas para la Actualización de la Cartografía, Vía Sistema de Posicionamiento Global (GPS). INEGI. México, Pág. 40).

El receptor GPS presenta 12 canales de seguimiento de satélites constante. Usando el GPS diferencial, los receptores producen posiciones de código C/A corregidas diferencialmente en precisión submétrica sobre una base de segundo a segundo y se enciende automáticamente cuando es activado el software Asset Surveyor.

3. Antena: El equipo cuenta con una antena externa tipo combinado L1 GPS/Beacon/Satélite diferencial (integrada), la cual es sustentada por una baliza con bípode para su operación en modo móvil (rover) y en tribrack montado en tripié para su operación en modo base. Su función principal es la de captar la señal GPS para transmitirla por el cable de la antena al receptor Pro XRS; cuenta con un accesorio magnético que permite fijarla en vehículos para su utilización en levantamientos dinámicos.

Esta antena presenta dos componentes principales:

- Antena L1 GPS/Satélite Diferencial. Está diseñada para filtrar señales indeseables y amplificar la señal GPS L1 y Satélite diferencial.

- Antena Radiofaro MSK campo-Hloop. Presenta un preamplificador para filtrar interferencias en las señales como emisiones de radio AM y ruido al cambiar suministros de alimentación, una vez filtrada y amplificada la señal es transmitida por el cable de la antena al receptor radiofaro.



Figura 2.20. Sensor GPS con antena integrada.  
(Fuente: <http://www.leica.com>).

4. Baterías: El colector de datos TSC1 cuenta con una batería de litio-Ion recargable de 7.4 Voltios y 1.2 Amper-hora, esta batería interna suministra la fuente de alimentación para el TSC1 y deja de proporcionar energía cuando el colector está conectado a una fuente de suministro del receptor o cualquier otra fuente de alimentación externa. El receptor cuenta con dos baterías de ácido de plomo selladas de 12 V. y 2.3 Amper-hora del tipo recargable.

El estado de carga de las baterías del colector TSC1 y de cualquier otra fuente de alimentación externa se muestra en la línea de estado que se despliega en pantalla. Los campos batería interna y batería externa muestran el porcentaje de energía disponible y además indican si la fuente que alimenta al colector TSC1 es interna o externa.

5. Cable de la antena: Permite transmitir la información al receptor, para procesar los datos obtenidos mediante la recepción de la señal GPS emitida por los satélites. Este cable es del tipo coaxial y también conduce alimentación de energía al preamplificador de la antena por el conductor central del cable.

6. Cable para operación en tiempo real (Radiofaro): Este cable permite transmitir información obtenida durante la ejecución de operaciones en tiempo real (señales transmitidas que permiten efectuar correcciones diferenciales en tiempo real).

7. Cables de alimentación de energía eléctrica y transmisión de datos: Estos cables permiten transmitir información entre el colector TSC1 y el receptor GPS.

8. Cable dúplex de baterías: Permite transmitir la energía eléctrica almacenada en las baterías al equipo GPS para su funcionamiento.



Figura 2.21. Elementos de un equipo receptor del GPS. (Segmento Usuario).  
 (Fuente: Manual de Normas para la Actualización de la Cartografía, Vía Sistema de Posicionamiento Global (GPS). INEGI. México, Pág. 41).

9. Computadora portátil o de escritorio: Este equipo permite registrar, procesar y almacenar la información obtenida con el equipo GPS, asimismo en ella se efectuarán los procesos de corrección diferencial que permiten obtener posicionamientos con precisión submétrica, planeación para los levantamientos con GPS, conversión de formatos de archivos (.DBF, .DXF y .CAD), exportación de datos a diferentes sistemas CAD mediante la operación del software Pathfinder Office, edición de reportes y la impresión a escala de planos.

10. Maletín portátil: Los modernos receptores GPS son muy ligeros, ya que todo el equipo puede transportarse en un maletín, a excepción de otros elementos como el trípode.



## 2.4. Levantamientos Aerofotográficos.

Los levantamientos aerofotográficos se realizan con el objetivo de recolectar información geográfica, la cual queda representada en fotografías aéreas como producto o resultado final de la ejecución de dicho levantamiento.

En la estructuración de este trabajo y tomando un ejemplo práctico, se realizó la adquisición de fotografías aéreas de archivo escala 1:40,000 con fecha de vuelo de Marzo del 2005, correspondientes a la parte central de la carta topográfica E14A49 (ver figura 2.22), a partir de las cuales, se realizó el análisis adecuado para determinar las especificaciones técnicas utilizadas en este proyecto de vuelo aerofotográfico. A la vez, estas fotografías aéreas serán la base y fuente primaria de información para los procesos fotogramétricos de generación de ortofotos y MDE, así como para la extracción de información a partir de la utilización de técnicas como la fotointerpretación y restitución. Por lo anterior, la base de un levantamiento aerofotográfico se inicia con una adecuada planeación de la información que debe guiar tal levantamiento, la cual consiste en:

- a) El uso u objetivo que se dará a las fotografías, que para fines de este trabajo, se contempla que sea un trabajo fotogramétrico dirigido a la generación de cartografía básica.
- b) La escala y perspectiva a la cual se presentará el producto final, ya sea para trabajos fotogramétricos o de fotointerpretación y la precisión requerida para el trabajo.

A partir de lo anterior, un levantamiento aerofotográfico se puede segmentar (para brindar una mejor explicación) en seis fases esenciales:

- Un proyecto de vuelo que detalle la información básica de la zona a trabajar, determine el tipo de perspectiva deseada para la fotografía aérea y las especificaciones técnica necesarias para la realización de un vuelo aerofotográfico.
- Descripción de los instrumentos requeridos para los procesos de navegación y posicionamiento de la plataforma de toma
- Instrumentos para la adquisición, procesamiento y almacenamiento de las fotografías aéreas.
- Ejecución del vuelo aerofotográfico.
- Especificaciones técnicas, evaluación y presentación de las fotografías aéreas obtenidas como insumo final de los levantamientos aerofotográficos.
- Planificación y ejecución operativa del control terrestre a utilizar, el cual se refiere a los trabajos geodésicos y/o topográficos que permitan la precisión requerida para el trabajo.

### 2.4.1. Proyecto de vuelo.

Se denomina proyecto de vuelo al conjunto de información recopilada previamente a la realización de un vuelo aerofotográfico, esta información permite analizar el panorama geográfico detallado de la zona a trabajar y definir la perspectiva de toma, para así realizar las especificaciones técnicas que permitirán realizar las adecuaciones necesarias según el objetivo y la precisión que requiera el trabajo.

#### 2.4.1.1. Información básica de la zona a trabajar.

Esta información permite dar una referencia geográfica de la zona y se determina en función de los siguientes aspectos:

##### a) Delimitación geográfica.

Cuando se realiza un proyecto de vuelo, es necesario referenciar el espacio geográfico que abarca la zona que requiere ser fotografiada. Esta referencia se realiza a partir de la asignación de cuadrantes con un sistema de coordenadas a los puntos extremos de la zona a trabajar.

En lo que corresponde al ejemplo de la carta topográfica “Milpa Alta”, clave E14A49, el cubrimiento de las fotografías aéreas corresponde al cuadrante E14A49B, cuya obtención parte del fraccionamiento de dicha carta en 6 cuadrantes como se muestra en la siguiente figura:

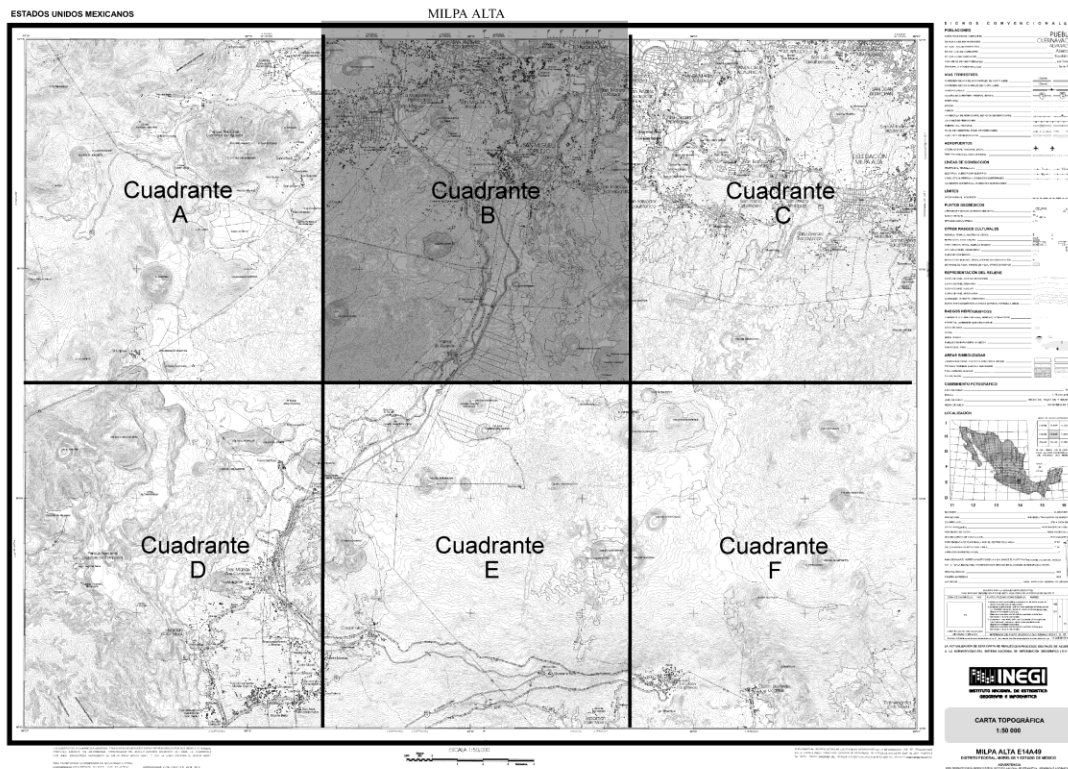


Figura 2.22. Delimitación de la zona de estudio.  
(Elaboración propia).

El hecho de realizar una adecuada delimitación de la zona a fotografiar, en función de la escala de la fotografía, nos permite determinar el número de líneas y de fotografías por línea que son requeridas para el cubrimiento total de esta zona.

### b) Recopilación de información.

La recopilación de materiales como cartas topográficas, vuelos aerofotográficos anteriores de la zona, imágenes de satélite, reportes meteorológicos, etc., brindan herramientas de análisis para poder discernir ciertas problemáticas que pueden presentarse durante la planeación del proyecto de vuelo e inclusive, durante la ejecución del mismo.

### c) Características topográficas del terreno.

Estas características determinan la altura de vuelo, ya que no se requieren las mismas especificaciones al realizar un levantamiento en zonas planas, que al realizar el levantamiento en terrenos montañosos, por lo que esta situación debe plasmarse en documentos y/o mapas para poder determinar con mayor precisión la altura del vuelo (ver figura 2.23), la altura de vuelo se explica con mayor detalle en el apartado 2.4.1.3. b).

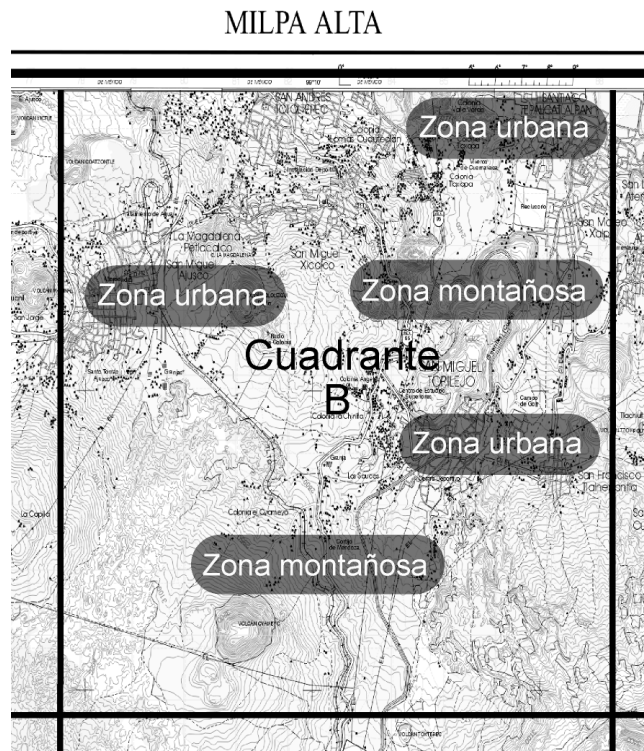


Figura 2.23. Características topográficas de la zona de estudio.  
(Elaboración propia).

#### d) Características climáticas y meteorológicas.

El tipo de clima que se ha establecido para todas las regiones del país, permite determinar una época del año probable o adecuada para la realización del levantamiento, pero, las condiciones del estado del tiempo meteorológico son de mayor importancia en un vuelo.

El requisito primordial es que el cielo esté completamente despejado y sin nubes debajo de la aeronave, para el momento de la toma aerofotográfica. Se da el caso que en algunas localidades o regiones, el cielo está despejado solo en algunas horas del día, mientras que otras, en alguna estación del año.

#### 2.4.1.2. Determinación de la perspectiva de toma para las fotografías aéreas.

Para satisfacer necesidades propias de este trabajo, se requieren fotografías aéreas verticales, ya que esta perspectiva adapta nuestra fotografía a un formato específico que cumple con las características geométricas y elementos adecuados para su posterior tratamiento fotogramétrico.

En la toma de fotografías aéreas verticales el eje óptico de la cámara coincide con la vertical del lugar del campo fotografiado, en donde solo se permite una tolerancia hasta de  $3^{\circ}$  para cualquier dirección (ver figura 2.24).

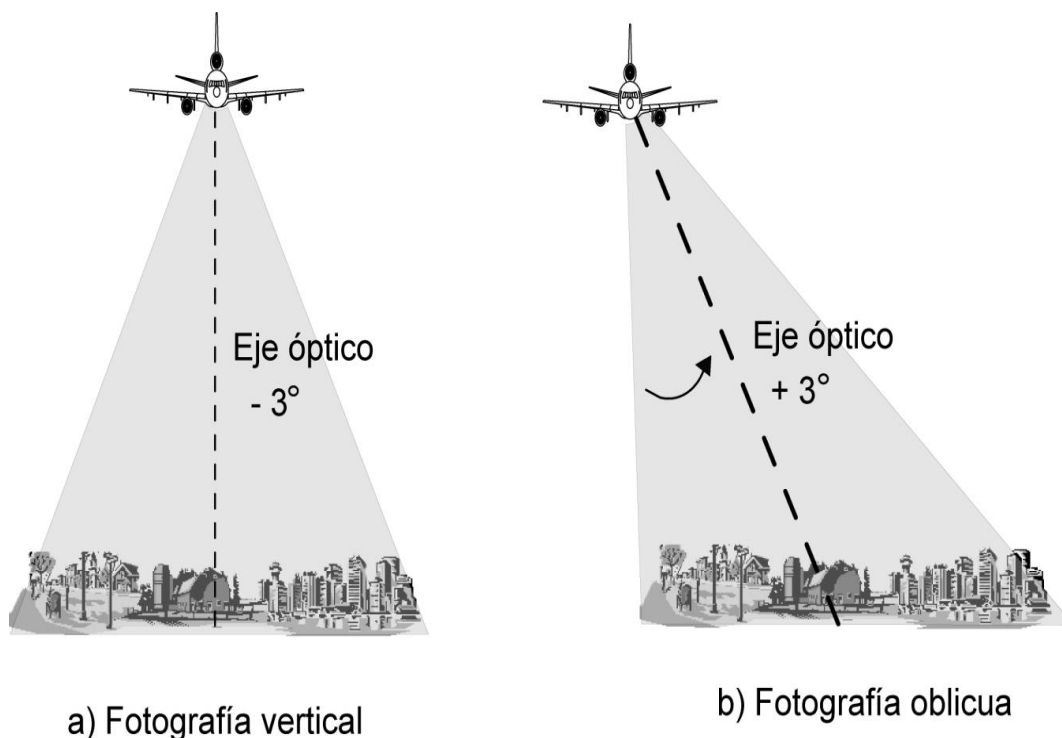


Figura 2.24. Representación grafica de:  
a) Toma de una fotografía con eje óptico vertical.  
b) Toma de una fotografía con eje óptico oblicuo.  
(Elaboración propia).

### **2.4.1.3. Especificaciones técnicas para levantamientos aerofotográficos.**

Aunque estas especificaciones se encuentran determinadas por el INEGI, se respeta el orden cronológico estipulado en su normatividad para levantamientos aerofotográficos, la cual también sirve como referencia nacional para la elaboración de este trabajo, pero en este apartado se propone un contenido teórico y tecnológico más actualizado y apegado a un flujo de trabajo local, ya que se establece que para una adecuada generación de cartografía básica, es necesario contar con fotografías aéreas que permitan apreciar detalles adecuados para realizar una restitución fotogramétrica y cartográfica de calidad.

Las fotografías aéreas adquiridas para la realización de este trabajo pertenecen al Sistema Nacional de Fotografía Aérea (SINFA), el cual cuenta con un cubrimiento nacional 1:40,000. A continuación se determinan las especificaciones técnicas necesarias para los fines de este trabajo:

#### **a) Permisos.**

Se refiere al trámite que debe realizar la dependencia, entidad o el tercero contratado por éstas, así como los particulares que ejecuten vuelos fotográficos, para cada proyecto, para obtener los permisos oficiales de vuelo fotográfico que expide el Instituto Nacional de Estadística y Geografía y los que correspondan a otras instancias.

#### **b) Cobertura de sobreposiciones longitudinales y laterales.**

En un levantamiento aerofotográfico se debe de garantizar que todo elemento del terreno figure por lo menos en dos fotografías consecutivas, lo cual asegura su utilidad para la observación estereoscópica, por lo que deberán existir en el sentido de la línea de vuelo una sobreposición longitudinal, que en lo general, deberá tener un promedio entre fotografías sucesivas y de acuerdo a las necesidades del proyecto, una sobreposición ideal no menor al 60%, como se observa en la figura 2.25 y en donde las abreviaturas utilizadas son las siguientes:

Ct = Cubrimiento en el terreno.

D = Distancia ente disparos de toma o base en el aire.

Dv = Dirección de vuelo.

S = Formato de la fotografía.

Generalmente la zona delimitada para el levantamiento aerofotográfico no puede cubrirse con una sola línea de vuelo, por lo que es preciso efectuar más de dos líneas de vuelo paralelas y equidistantes, y así evitar que quede algún espacio sin fotografiar. Para garantizar este cubrimiento, la sobreposición lateral entre líneas de vuelo adyacentes deberá estar comprendida dentro de un 30% +/- 10 (20-40%), solamente en caso de extremo relieve las sobreposiciones podrán ser más bajas, pero no menores de 10% (ver figura 2.26).

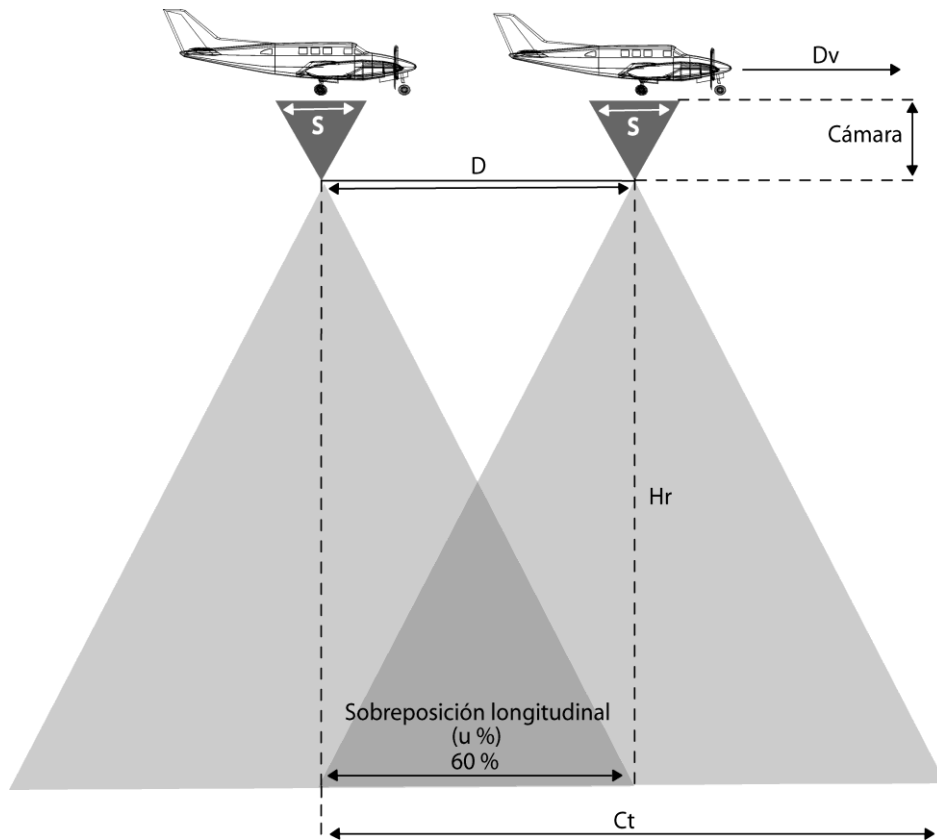


Figura 2.25. Representación gráfica de la sobreposición longitudinal (u %).  
(Elaboración propia).

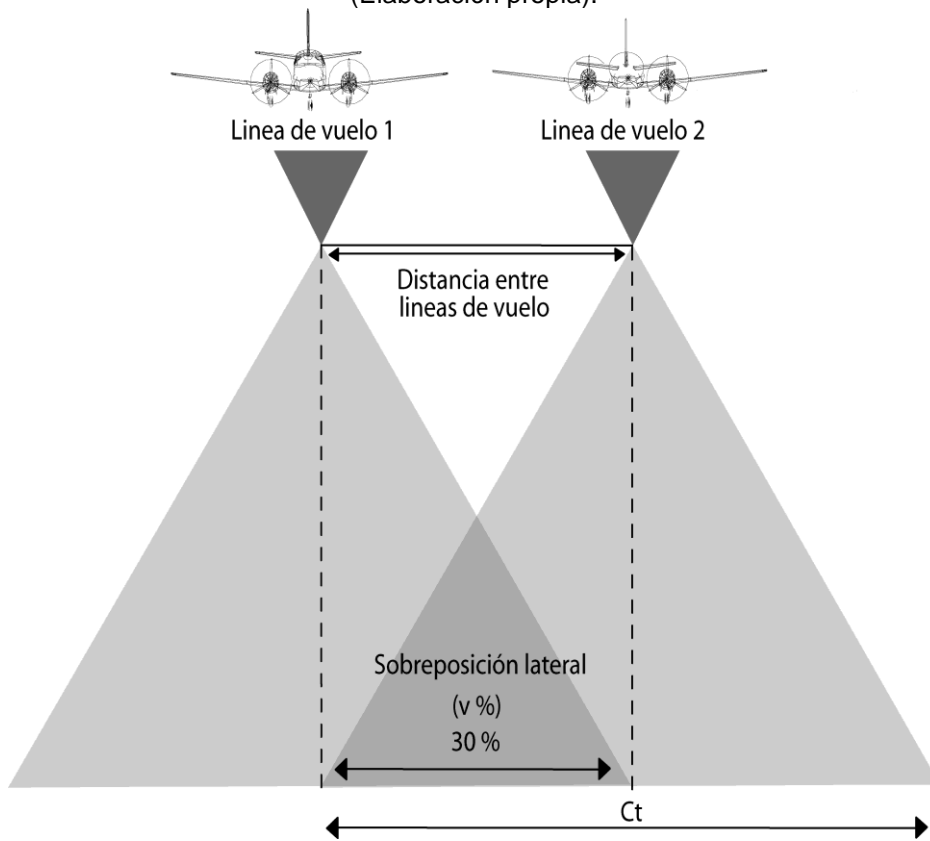


Figura 2.26. Representación gráfica de la sobreposición lateral (v %).  
(Elaboración propia).

Para ejemplificar la relación entre  $u\%$  y la superficie topográfica, en la figura 2.27 a), el plano de referencia B representa el punto mínimo de altitud y cumple con un 60% de sobreposición longitudinal y se representa gráficamente por el triángulo abc, pero en la figura 2.27 b) el mismo triángulo abc muestra como debido a la superficie topográfica, el plano A ya no cumple con el 60% de sobreposición longitudinal, aunque los disparos de toma o la base en el aire (D) tengan la misma distancia en ambos casos, aún así, es válido realizar el vuelo a esa altura media del terreno, no obstante que implicará la necesidad de realizar un mayor número de líneas de vuelo.

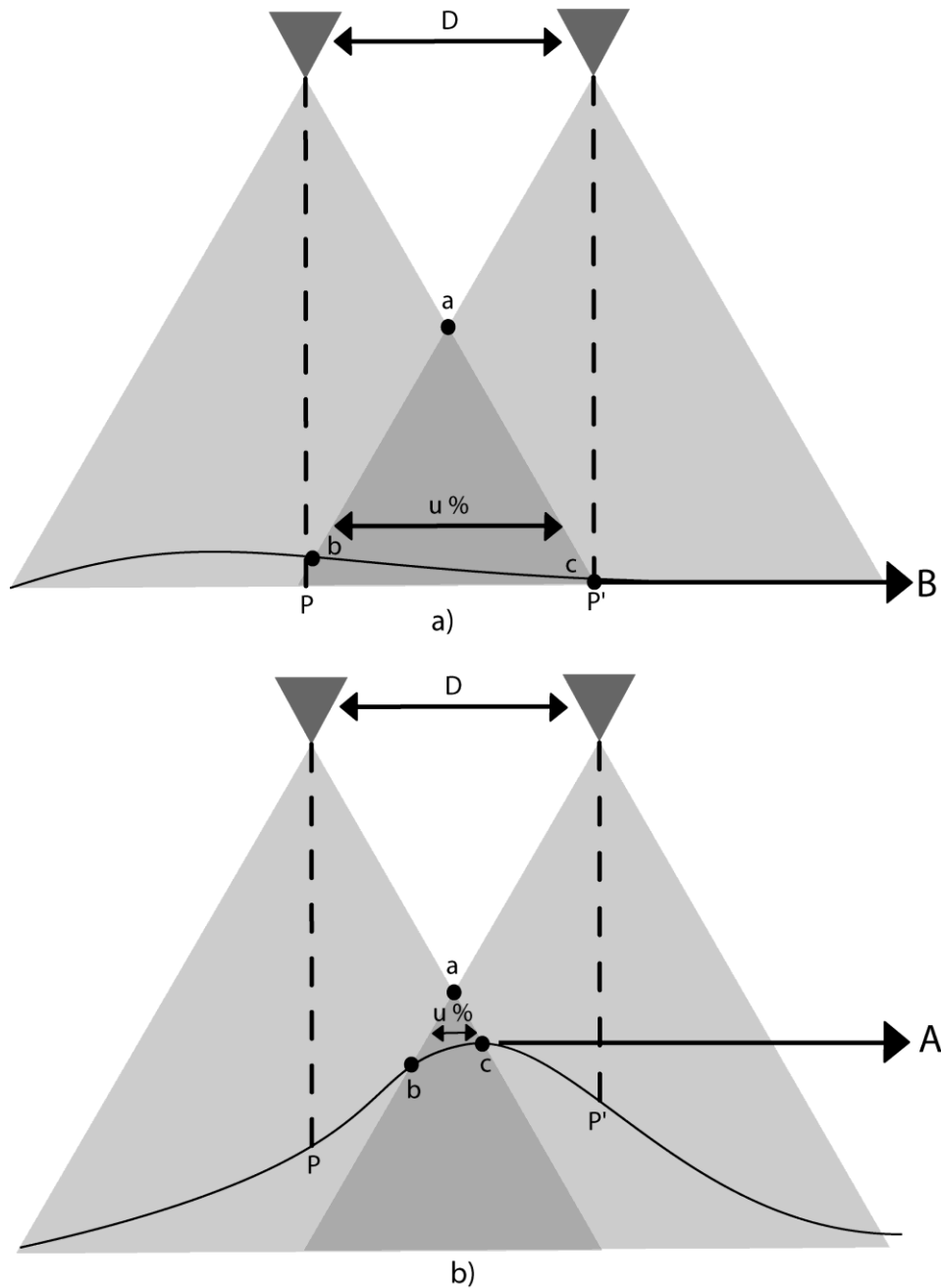


Figura 2.27. Diferencias de sobreposición longitudinal a causa de la superficie topográfica. (Elaboración propia).

**c) Relación entre la escala deseada y la distancia focal para la obtención de la altura de vuelo.**

La escala conveniente para las fotografías aéreas depende directamente del fin a que sea destinado el producto, pero generalmente, es necesario que todos los elementos representados puedan identificarse fácilmente sobre la fotografía, ya que esto permite que algunos procesos de fotointerpretación y principalmente procesos automatizados fotogramétricos se realicen con mayor facilidad y rapidez.

Para efectos de realizar cartografía básica con una precisión adecuada, un elemento puede identificarse fácilmente si cuenta con una magnitud de por lo menos 2.5 mm. sobre la imagen, esto permite realizar acercamientos digitales (zoom) y poder obtener todavía más información sin presentar deformaciones en las áreas representadas.

Inicialmente se determina que la altura de vuelo puede ser absoluta o relativa. Se entiende por altura de vuelo absoluta ( $H_a$ ) aquella que se considera desde el nivel del mar hasta el avión (plataforma aérea) en el preciso momento de las tomas. La altura relativa ( $H_r$ ), en cambio, es la altura considerada desde el terreno fotografiado a la plataforma que realiza la toma aerofotográfica.

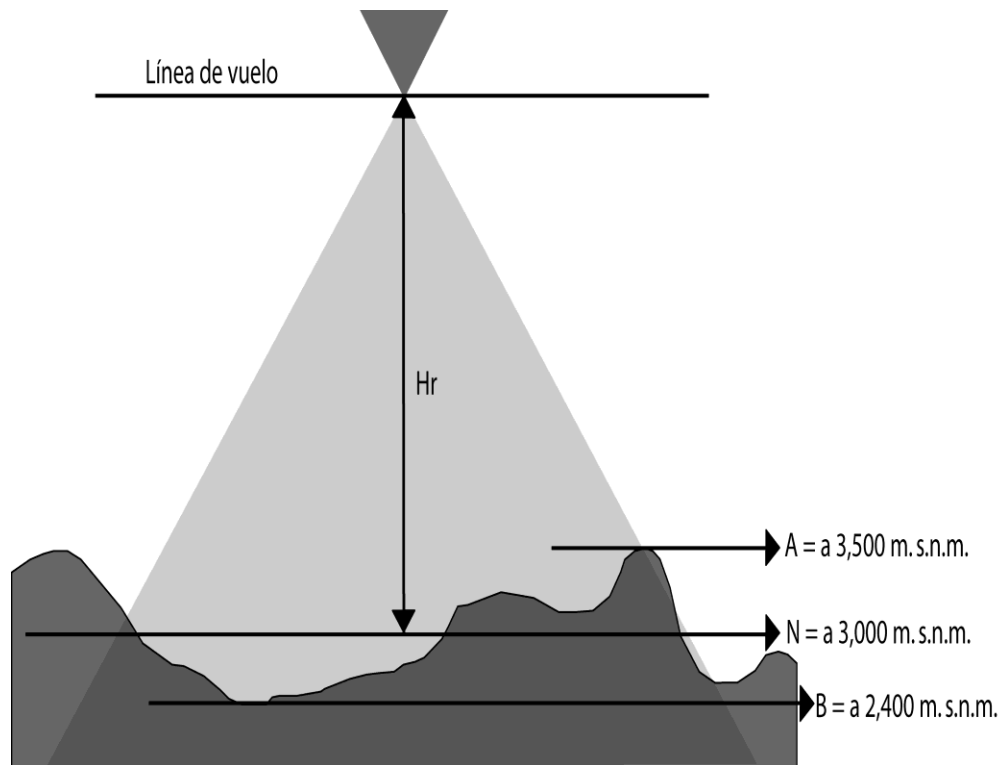


Figura 2.28. Planos de referencia en la determinación de la altura media del terreno. (Elaboración propia).



Operativamente existe una problemática, cuando en la planeación del vuelo se encuentran diferencias considerables en la superficie topográfica, en estos casos la escala de la fotografía no es la misma para todas las tomas, ni constante dentro de una misma línea, por lo que la relación base altura tendrá variaciones de una línea de vuelo a otra.

Para resolver esta problemática se determina un plano de referencia N como el nivel medio del terreno, intermedio a un plano A correspondiente al punto máximo de altitud del terreno y un plano B correspondiente a la punto mínimo de altitud del terreno, como se muestra esquemáticamente en la figura 2.28, en donde las altura especificadas se basan en la información del apartado 2.4.1.1 c).

Entonces todos los cálculos necesarios se pueden determinar sobre el plano de referencia del nivel medio del terreno N, siempre y cuando se garantice que para los planos A y B se realicen los cubrimientos necesarios de sobreposición longitudinal (u%) y lateral (v%).

En lo que respecta a la distancia focal (Df) de la cámara, se refiere a la distancia entre el lente de la cámara y la placa fotográfica o negativo de la cámara o película. Ahora, considerando que a nivel nacional e internacional existe un formato para la fotografía aérea de 23 x 23 cm. la distancia focal utilizada será de 152 mm en cámaras con apertura de ángulo Gran Angular, como se observa en la figura 2.29. Es oportuno aclarar que puede haber variaciones para utilizar otra distancia focal con otras cámaras de apertura de ángulo como Normal o Súper Gran Angular.

A partir de estos datos, la altura de vuelo relativa (Hr), es igual al producto de multiplicar el módulo por la distancia focal de la cámara:

$$Hr = E \times Df$$

Incorporando los datos del ejemplo obtendríamos la siguiente fórmula:

$$Hr = 40,000 \text{ m} \times 152 \text{ mm}$$

Despejando los valores, inicialmente debemos igualar los sistemas de medición, ya que la escala se estipula en metros y la Df en milímetros, entonces se obtienen los siguientes valores:

$$Hr = 40,000 \text{ m} \times 0.152 \text{ m} = 6,080 \text{ m.}$$

La altura de vuelo absoluta (Ha), es igual al producto de multiplicar el denominador de la escala por la distancia focal de la cámara más la altura del nivel medio del terreno sobre el nivel del mar (s.n.m.):

$$Ha = 40,000 \text{ m} \times 0.152 \text{ m} = 6,080 \text{ m.} + 3000 \text{ m.} = 9,080 \text{ m. s.n.m.}$$

Por lo que la altura de vuelo en nuestro proyecto es de 9,080 m. s.n.m. y esta se representa en la figura 2.30.

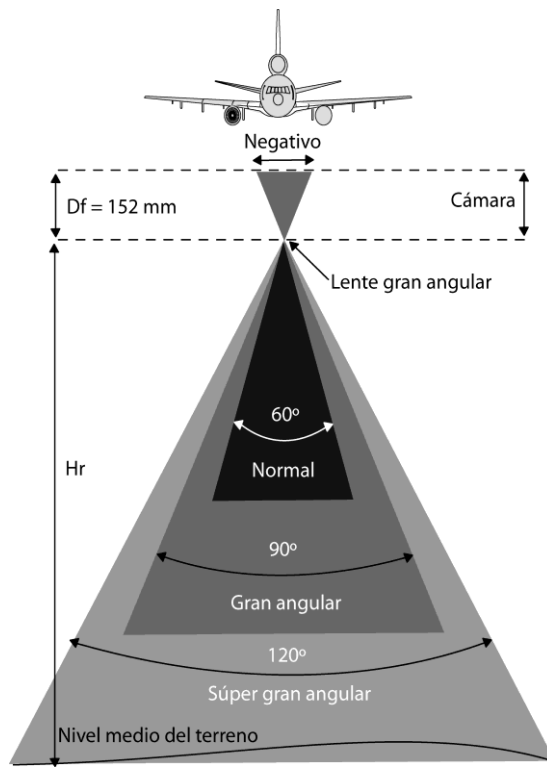


Figura 2.29. Representación gráfica de la distancia focal y de la apertura de los ángulos en cámaras aéreas métricas. (Elaboración propia).

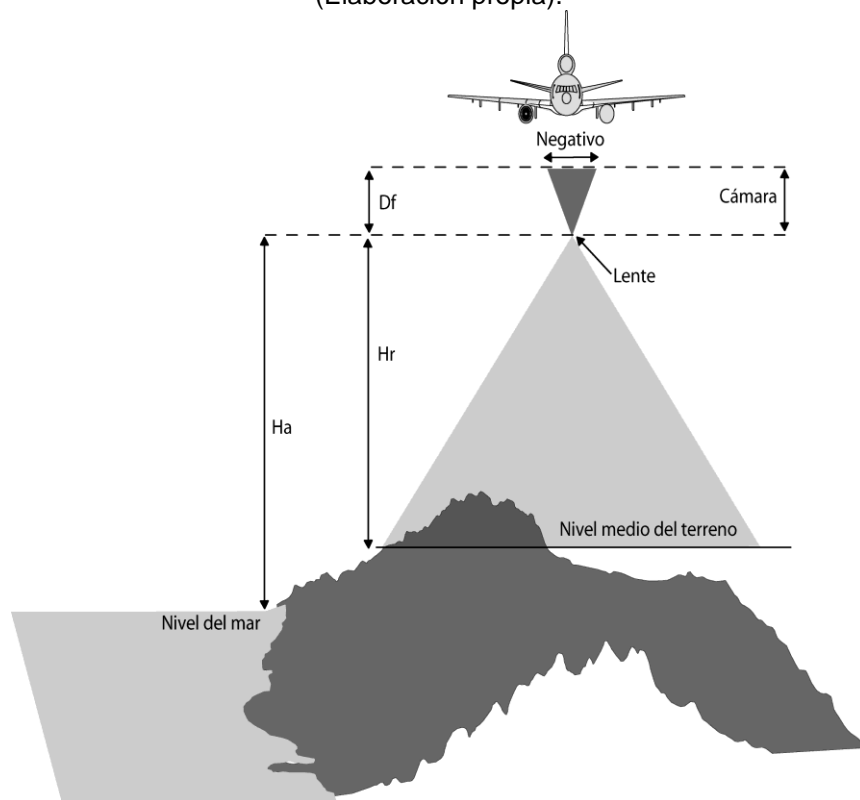


Figura 2.30. Representación gráfica de la altura relativa ( $H_r$ ) y absoluta ( $H_a$ ). (Elaboración propia).

#### d) Cubrimiento del área.

Por lo comentado con anterioridad, el vuelo fotográfico deberá extenderse más allá de la delimitación geográfica del proyecto, a fin de garantizar un cubrimiento estereoscópico completo.

Para determinar con claridad este cubrimiento, se definen rutas que debe seguir la aeronave en una misma dirección al tomar las fotografías, denominadas “Líneas de vuelo”, las cuales constituirán un conjunto continuo y ordenado con el traslape apropiado para su proceso y análisis posterior. Con el objeto de cubrir fotográficamente un área determinada, es necesario que la aeronave tome varias líneas de fotografías.

Ahora, las fotografías de archivo obtenidas para cubrir este cuadrante forman parte de un vuelo realizado en Marzo del 2005, con las fotografías 01, 02, 03, 04 y 05 de la línea de vuelo 327 y las fotografías 05, 06, 07, 08 y 09 de la línea de vuelo 328 (figura 2.31).

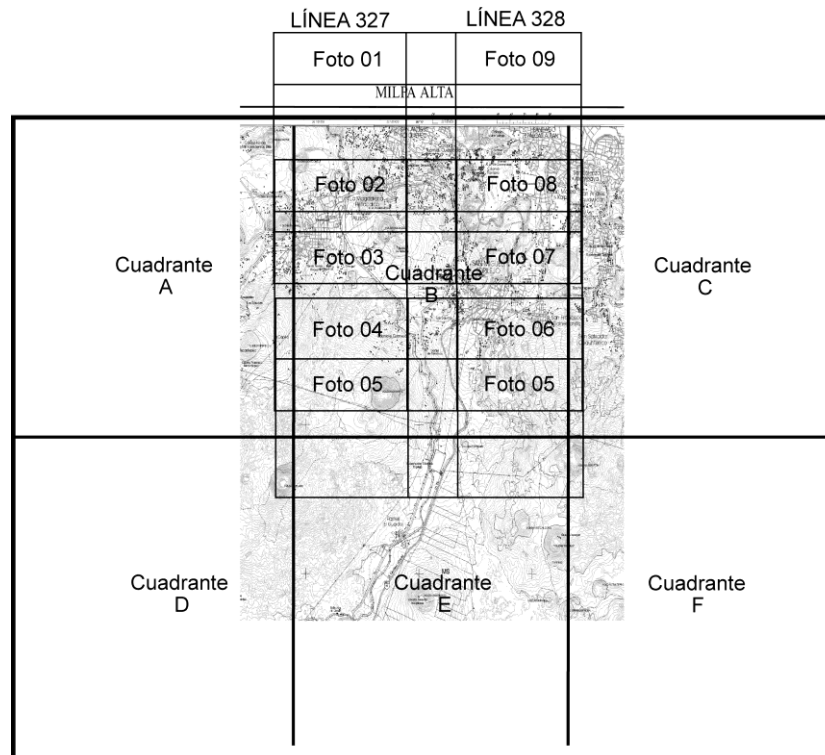


Figura 2.31. Representación gráfica del cubrimiento de fotografía aérea del cuadrante “B” de la carta topográfica escala 1:50,000 E14A49. (Elaboración propia).

Este tipo de levantamientos realizados por el INEGI tiene por objeto cubrir homogéneamente las zonas deseadas, por lo que las líneas generalmente se determinan de N-S y S-N, como se muestra en la figura 2.36, la cual se refiere al plan de vuelo definitivo.

En concordancia con lo anterior, se adopta la estructura del INEGI para este trabajo, ya que las fotografías aéreas obtenidas pertenecen a este tipo de vuelos y en realidad, estas determinaciones no afectan en la generación de cartografía básica, por el contrario, va referida a un ejemplo práctico y homogéneo sobre determinado espacio geográfico. No obstante, existen levantamientos aerofotográficos con líneas de vuelo muy específicas, como ejemplo, podemos citar los trabajos realizados para la construcción de acueductos, carreteras, ductos de diferentes tipos de líquidos o gases o líneas eléctricas, actualmente la planificación de este tipo de obras inicia con la realización de vuelos aerofotográficos que por su forma irregular, no resulta económico volar en las direcciones N-S o E-W, sino paralelamente a los límites de la zona especificada, como se muestra en la figura 2.32.

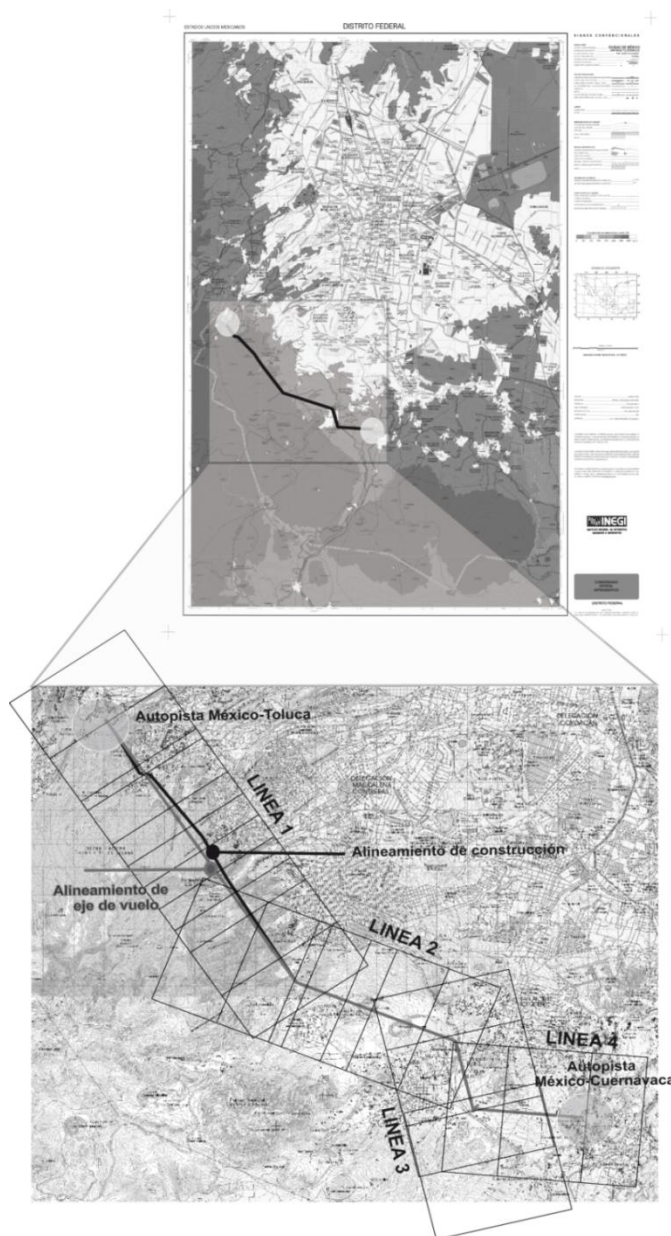


Figura 2.32. Representación gráfica de la dirección de líneas de vuelo sobre un alineamiento específico. (Elaboración propia).

### e) Intervalo de toma entre exposiciones de fotografías aéreas.

Este intervalo se refiere a la magnitud en tiempo que debe de transcurrir entre una toma y la siguiente para que se realice la sobreposición longitudinal ( $u\%$ ) y teniendo en cuenta las distancias en el terreno, la velocidad determinada de la plataforma de toma (VP) y el tiempo (ver figura 2.33).

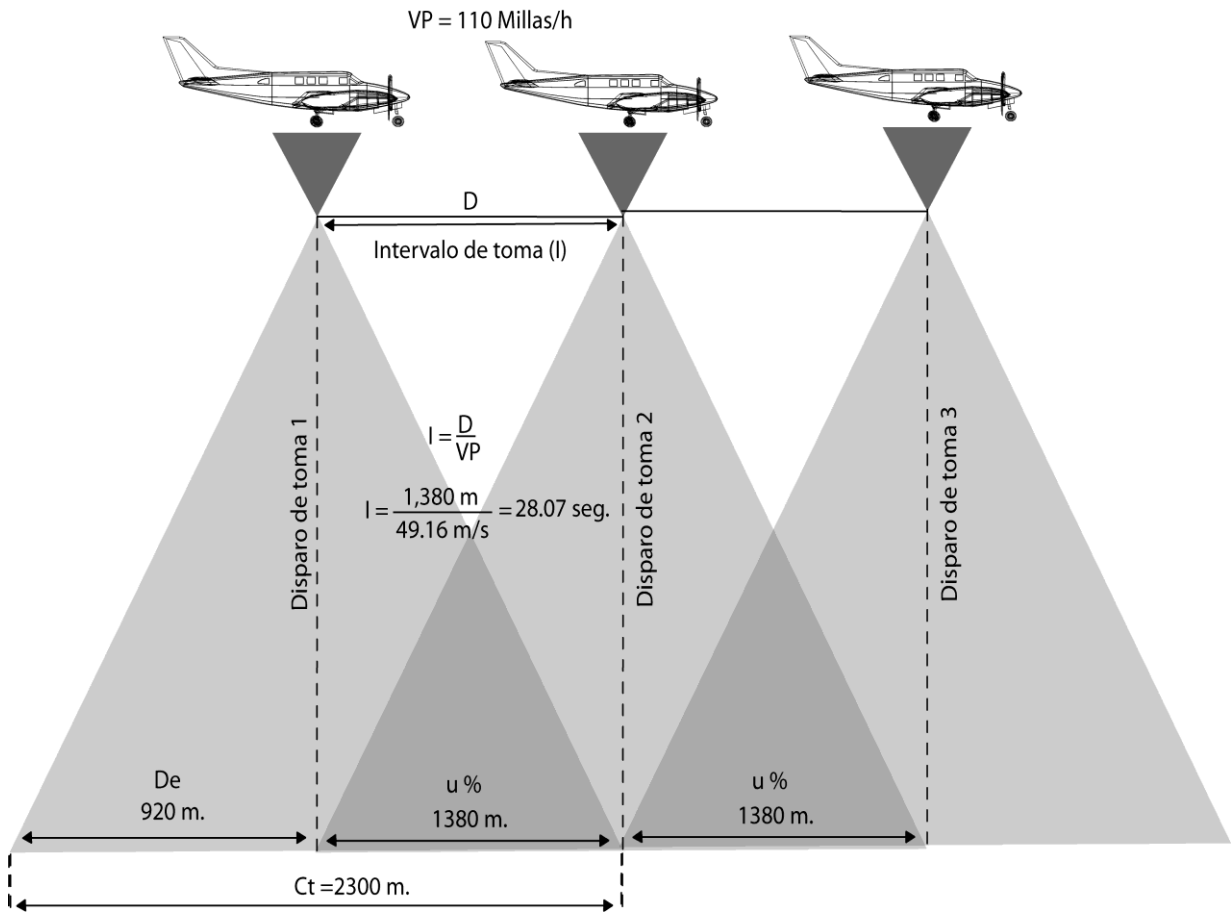


Figura 2.33. Ejemplificación del intervalo de exposición en un vuelo escala 1:10,000. (Elaboración propia).

En la figura 2.33 se observan las relaciones matemáticas para obtener el intervalo de toma (I), solo se debe aclarar que la fórmula utilizada comienza a tener aplicación a partir de las siguientes consideraciones:

- Una vez que se ha superado la distancia inicial sin exposición (De).
- Establecer la homogeneidad entre la velocidad mínima de desplome y la velocidad de crucero a partir de una marcha homogénea que debe ser compatible con el tiempo de toma del obturador, con el GPS aerotransportado y con el Sistema de Navegación Inercial (INS) conectados a la cámara instalada, esto se explica con más amplitud en los apartados 2.4.2. y 2.4.3.

El tiempo de vuelo sobre el objetivo (t) o zona a cubrir se calcula a partir del intervalo de exposiciones (l) y el número total de fotografías (NTF):

$$t = l \times \text{NTF}$$

El tiempo de vuelo total (T) se calcula a partir de la suma del tiempo de vuelo sobre el objetivo (t), el tiempo empleado para ir y volver a la base o aeropuerto y el tiempo utilizado en los giros entre cada línea de vuelo.

**f) Elaboración de un plan de vuelo.**

El producto final de las especificaciones antes mencionadas es el plan de vuelo y su correspondiente ficha técnica, este plan de vuelo está conformado por una carta topográfica escala 1:50,000 que incluye el análisis previo e ideal de la zona geográfica a volar, además incorpora los siguientes valores:

- Número de líneas de vuelo.
- Número de fotografías por línea.
- Número de modelos estereoscópicos resultantes.

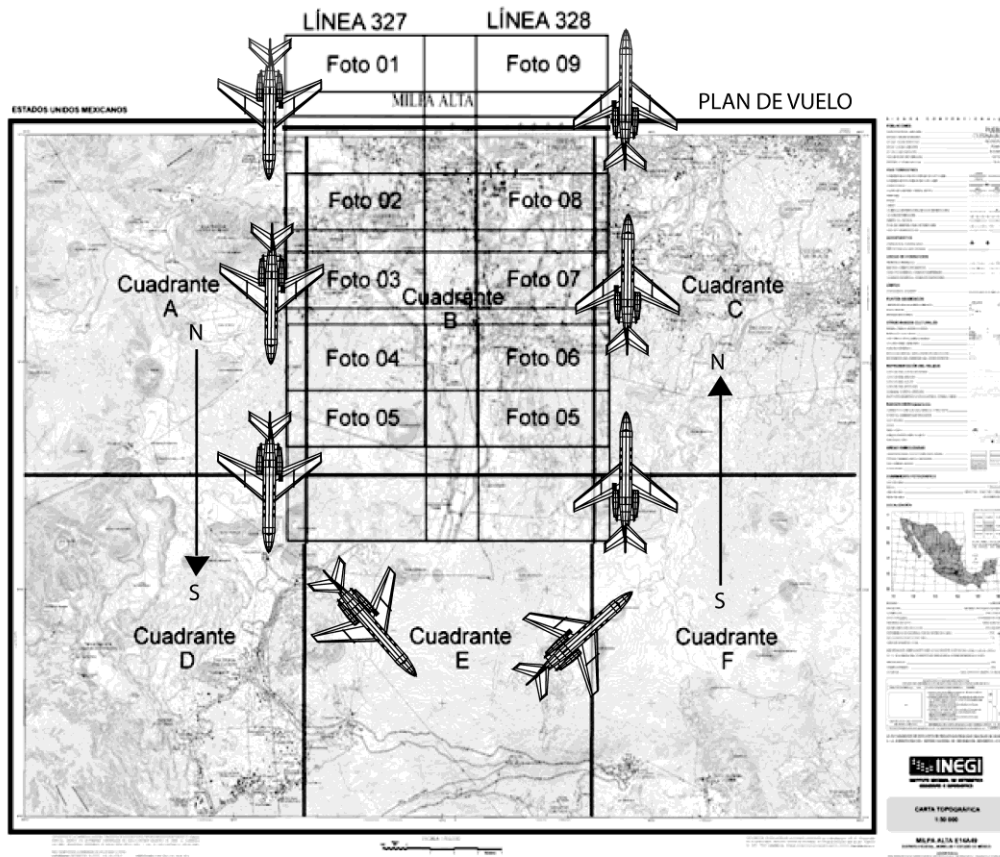


Figura 2.34. Ejemplificación del plan de vuelo necesario para el cubrimiento del cuadrante E14A49B. (Elaboración propia).

De gran importancia es la construcción de una ficha técnica correspondiente al plan de vuelo, ya que en esta se estipulan las características propias de la plataforma a utilizar y se aseguran las alturas de vuelo en función de las diferentes elevaciones que presente el terreno.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	<b>PLAN DE VUELO TESIS MARCOS MARTINEZ TIRADO</b>											
2									Hoja no.:	1	de	1
3	Nombre del proyecto			Anteproyecto de Tesis de Marcos Marínez Tirado				Fecha de vuelo		Marzo del 2005		
4	Número de proyecto							Líneas de vuelo :		2		
6	LÍNEA	ESCALA MEDIA Ef	ALTURA DE VUELO (pies)		LONGITUD (KM)	HORA DE TOMA	SOBREPOSICION LONGITUDINAL %	NUMERO DE TOMAS	CÁMARA	FILTRO	PELICULA	
7			ST	SNM								
8	1	1:40000	20000	16000	14		60%	5	W-RC8	AMBAR	Kodak 2405 B/N	
9	2	1:40000	20000	15300	14		60%	5	W-RC8	AMBAR	Kodak 2405 B/N	
10												
12	Longitud aproximada necesaria de película aérea Lp: 30.51 m (Lp: 100.07 pies)											
15	Notas:											
16	1) Las líneas de vuelo serán rectas y verticales											
17	2) Las tolerancias máximas para la toma de fotografías aéreas serán deriva: 4°, cabeceo 3°, alabeo 3°											

Figura 2.35. Ejemplificación de la ficha técnica para el plan de vuelo necesario en el cubrimiento del cuadrante E14A49B. (Elaboración propia).

Teóricamente, se realiza pensando en las especificaciones técnicas ideales, pero en la práctica, no siempre se puede seguir este plan de vuelo en un 100%.

Actualmente existe software específico para la realización del plan de vuelo y los reportes técnicos de alturas, los cuales requieren para su funcionamiento un MDE o curvas de nivel en formato digital de la zona a volar, a partir del ingreso de estos datos estos software garantizan el cálculo de la planificación del vuelo, además forman parte modular de los robustos sistemas de restitución fotogramétrica.

#### 2.4.2. Descripción de las tecnologías utilizadas en los levantamientos aerofotográficos.

Con el fin de explicar adecuadamente los aspectos teóricos y técnicos de las tecnologías e instrumentos requeridos en este tipo de levantamientos de información geográfica, se incorpora la utilización conceptual de un Sistema Sensor de Teledetección Aérea<sup>4</sup> (SSTA), como se muestra en la figura 2.36.

<sup>4</sup> La conceptualización de un sistema de teledetección aérea se recopila de la tesis “Importancia de la aplicación de la Geomática para el ordenamiento territorial en México”, Pág. 133, elaborada por el M. en G. Gilberto Núñez Rodríguez, 2003.

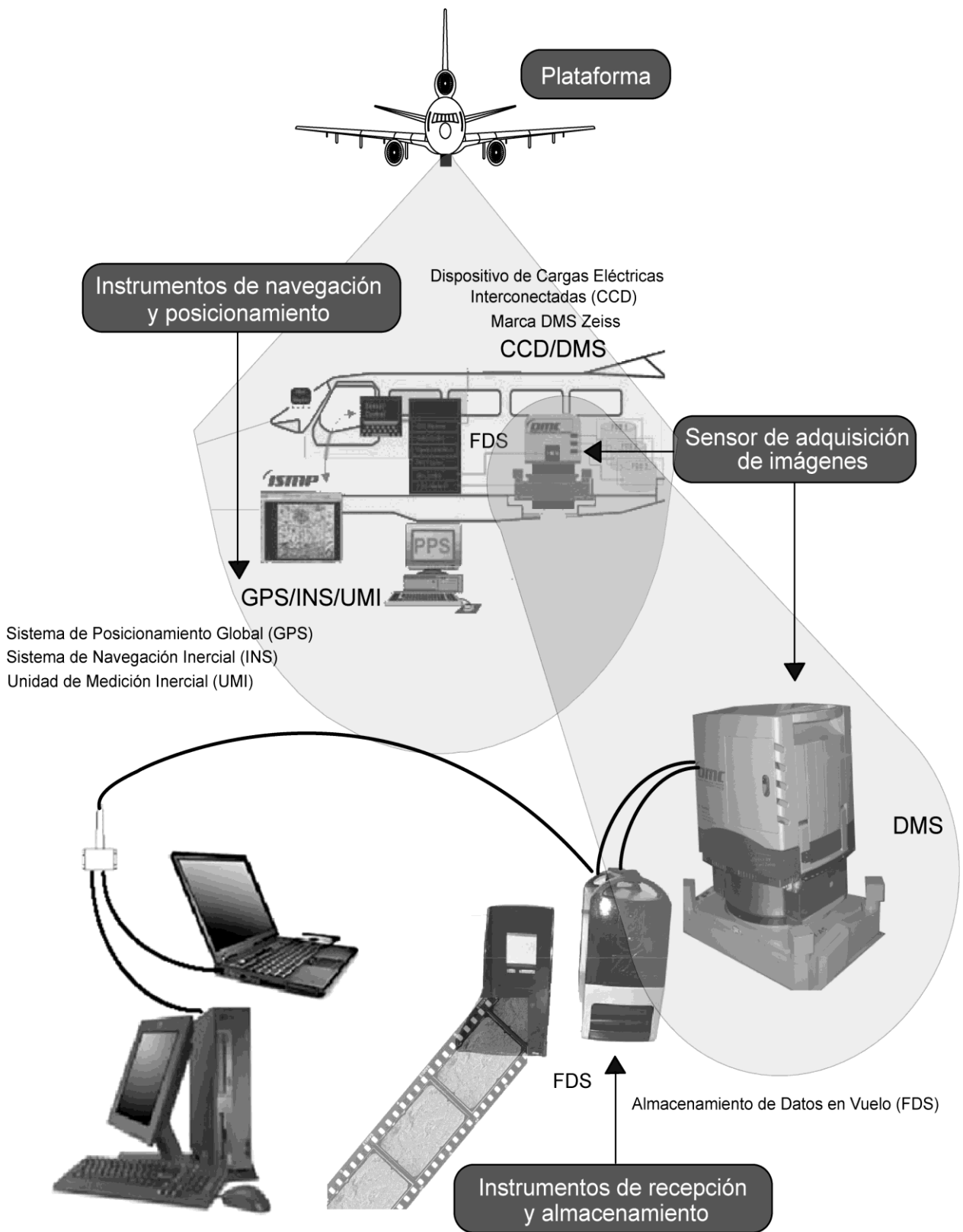


Figura 2.36. Componentes de un Sistema Sensor de Teledetección Aérea. (Elaboración propia).



Los componentes del SSTA son los siguientes:

- Plataforma.
- Descripción de los instrumentos de navegación y posicionamiento necesarios para levantamientos aerofotográficos.
- Sensor de adquisición de imágenes.
- Instrumentos de recepción y almacenamiento.

#### **2.4.2.1. Descripción de la plataforma de toma.**

Este término se refiere a los vehículos en los que se instala el sensor a utilizar para obtener información. La utilización del vehículo está en función de la disciplina de estudio, la planificación del trabajo a realizar y la disponibilidad de los recursos.

En nuestro caso específico, la plataforma a utilizar es un avión, el cual es el vehículo idóneo para realizar vuelos aerofotogramétricos. Prácticamente es posible utilizar todo tipo de avión para este proceso, pero con los avances tecnológicos, se han diseñado y acoplado, modelos específicos para fines aerofotogramétricos, los cuales satisfacen las siguientes características técnicas en su utilización:

- a) Coste de operación: Nos referimos a que estos vehículos deben ser de tipo económico en su costo de adquisición, mantenimiento en general y refacciones y bajo consumo de turbosina.
- b) Estabilidad: Con este término nos referimos al adecuado balanceo para asegurar las mínimas vibraciones en la cámara aérea que se encuentra en el piso del avión, aunque las cámaras aéreas que se instalan en estos aviones cuentan con un giro estabilizador, este vehículo debe tener una ausencia de vibraciones para garantizar la calidad de las tomas.
- c) Marcha homogénea: Se debe de garantizar que la velocidad crucero, que es la velocidad normal del avión en condiciones ambientales óptimas, sea constante y homogénea durante todo el levantamiento de información, ya que de esto depende que el traslape o sobreposición sea adecuado a los fines del proyecto.
- d) Techo y altura de vuelo: El techo es la capacidad que soporta funcional y adecuadamente el avión y su instrumental digital para alcanzar la máxima altitud sobre el nivel del mar, por lo general, en la misión aerofotográfica debe planearse que la altura del vuelo no sobrepase este parámetro.

- e) Velocidad mínima: Esta velocidad mínima o de desplome debe ser compatible con el tiempo del obturador o con el GPS/INS de la cámara instalada.

La operación y el mantenimiento de los aviones utilizados para la toma de fotografía aérea, deberán sujetarse a lo que establece la Ley de Vías Generales de Comunicación y sus Reglamentos en México.

En nuestro país, los aviones más utilizados por el INEGI son:

- Cessna Super Skymaster: Es un bimotor de turbo-propulsión de ala alta con los motores instalados en tándem. Utilizados para la toma de fotografías a escala media (1:10,000 a 1:50,000).
- Learjet Gates: Avión de propulsión a chorro bimotor. Utilizado para la toma de fotografías de vuelo alto (1:50,000 a 1:75,000).



Figura 2.37. Aviones utilizados por el INEGI para sus vuelos aerofotogramétricos.  
(Fuente: [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)).

En este apartado es propio comentar, que en la práctica, existen algunos movimientos que realiza el avión y repercuten en el ángulo de toma de la cámara, lo cual impide una nivelación adecuada en las fotografías aéreas, estos movimientos son:

- Movimiento de cabeceo: Este se produce cuando el avión rota su eje transversal haciendo que el avión ascienda o descienda ligeramente. A la alteración del ángulo por este movimiento se denomina  $\phi$  (phi).
- Movimiento de banqueo: Este se produce cuando el eje longitudinal del avión asciende o desciende. A la alteración del ángulo por este movimiento se denomina  $\omega$  (omega).
- Movimiento de Deriva: Es el desplazamiento horizontal con respecto al rumbo que debería tener una aeronave para el momento de la toma aerofotográfica y el cual es provocado por la acción del viento, esta desviación angular del eje longitudinal del avión con respecto a la línea de vuelo se denomina  $K$  (kappa).

La solución a estas problemáticas se realiza a través de correcciones geométricas en la orientación interna, la cual se comenta con amplitud en el capítulo 3 de este trabajo. Estos movimientos se representan gráficamente en la figura 2.38.

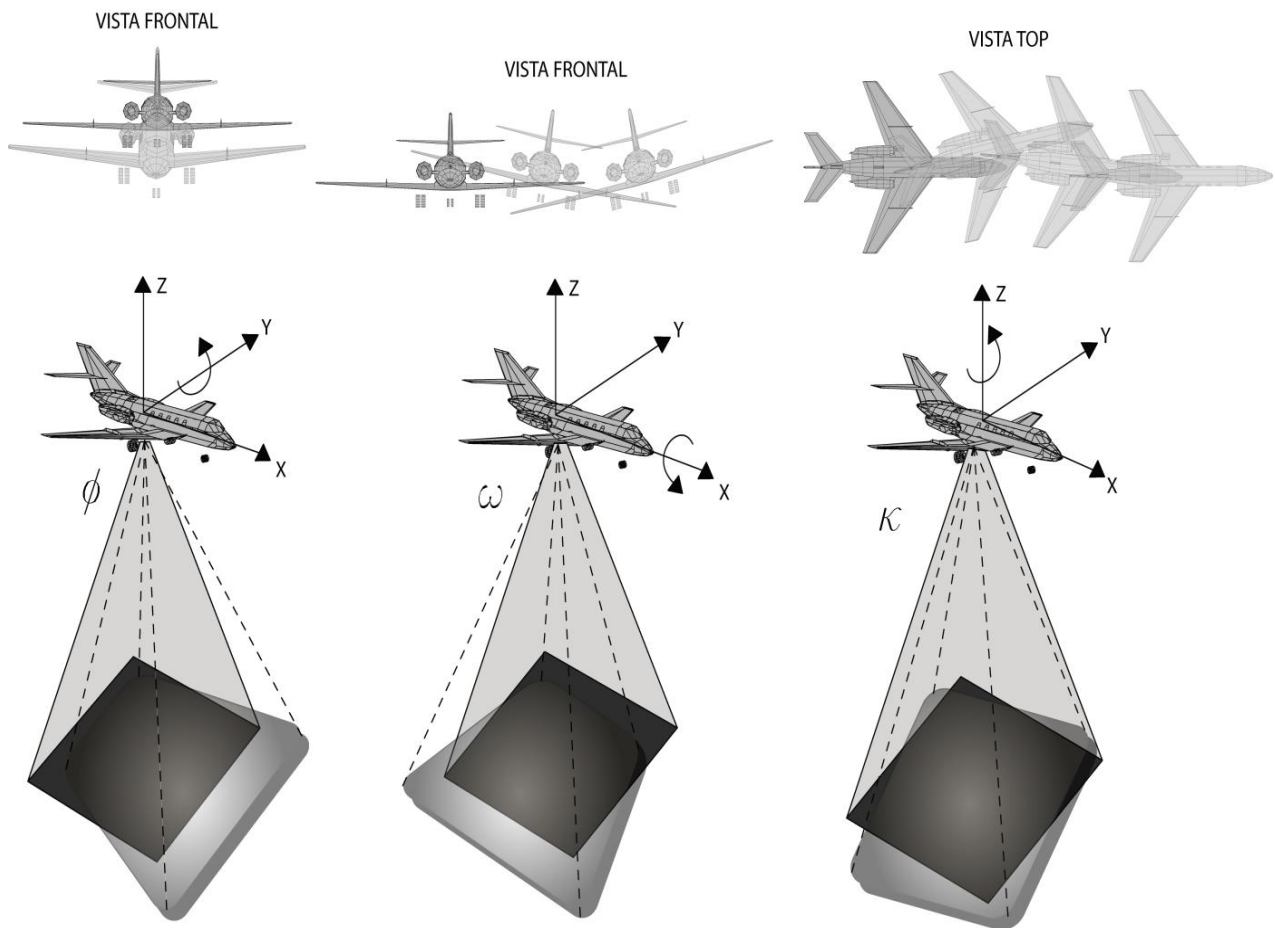


Figura 2.38. Representación de los movimientos del avión al realizar el vuelo aerofotográfico. (Elaboración propia).

#### **2.4.2.2. Descripción de los instrumentos de navegación y posicionamiento necesarios para levantamientos aerofotográficos.**

Un procedimiento de navegación tiene por objeto guiar al avión entre un punto de partida y uno de llegada, conociendo su posición en todo momento. Generalmente las trayectorias vienen impuestas por las especificaciones técnicas del proyecto de vuelo, de forma que la plataforma de toma no puede alejarse de su trayectoria planeada, para asegurar las sobreposiciones y el cubrimiento total de la zona de trabajo.

Anteriormente el principal método de navegación era a simple vista con cartografía disponible sobre los mapas de vuelo o mapa índice de vuelo, en donde se trataba de guiar a la plataforma sobre los ejes de vuelo con el menor error posible. El máximo apoyo de instrumental estaba dado por altímetros del avión y un telescopio de navegación, que permitía obtener referencias hacia adelante y hacia atrás.

Posteriormente aparecieron los sistemas electrónicos de navegación que están basados en el conocimiento de las coordenadas del avión respecto al terreno en cada momento del desarrollo del vuelo, con el fin de conducir automáticamente al vehículo a los puntos de exposición aérea, previamente establecidos en el proyecto de vuelo.

Dentro de estos sistemas destacan los siguientes:

- VLF/Omega: El usuario introduce la posición exacta del avión en coordenadas geográficas antes del despegue y los sistemas calculan los movimientos XY relativos a partir del despegue, presentando al usuario la posición y velocidad con respecto a la Tierra y los errores de trayectoria, incluyendo la deriva.
- Doppler: Basado en el radar Doppler y con el mismo principio que el anterior, este sistema controlado por el navegante mide la distancia y rumbo desde una posición de partida conocida.
- INS (Sistema de navegación inercial): Este sistema hace uso de los cambios relativos de dirección medidos dentro del avión, para estimar las coordenadas X e Y desde un punto de partida conocido.
- GPS (Global Position System): En la actualidad es uno de los sistemas más utilizado en vuelos fotogramétricos, ya que permite obtener en modo cinemático posiciones en coordenadas X, Y, Z del orden del 0.5 m, permitiendo ser utilizado tanto en labores de navegación, como en labores de obtención de ciertos elementos de la orientación externa, coordenadas de los centros de proyección (X0, Y0, Z0), permite la generación automática de los gráficos de vuelo.

De los anteriores sistemas, el INS (por sus siglas en inglés) es el encargado de determinar la navegación inercial, el principio de funcionamiento de este sistema se encuentra en las leyes de la inercia y la mecánica, siendo capaz de calcular la velocidad de la aeronave, su posición y su altitud (posición del avión como sólido rígido, con relación a la superficie terrestre). En esencia, el funcionamiento se basa en la utilización de unos medidores llamados acelerómetros que, cuando se acoplan a un vehículo, miden la aceleración de éste en una dirección. De acuerdo con las leyes de la física, la aceleración se transforma en velocidad, y ésta en posición.

Su principio de funcionamiento se basa en la detección a bordo, de las aceleraciones que sufre la aeronave, mediante una plataforma estabilizada giroscópicamente, en dos ejes orientados permanentemente hacia el norte y el este. Si la aceleración detectada se integra a lo largo del tiempo, se obtiene la velocidad de la aeronave respecto al suelo según esos ejes. El vector velocidad se obtendrá sumando vectorialmente las componentes según los ejes mencionados. De forma análoga, si se integran las componentes del vector velocidad según los ejes indicados a lo largo del tiempo, se obtendrá la distancia recorrida según esas direcciones en el tiempo de integración.

Sumando a la coordenada inicial el incremento de posición obtenido de esa integración, se obtendrá la nueva posición. Es importante indicar la necesidad de conocer las coordenadas del punto inicial del vuelo, que debe introducir el piloto previamente a comenzar su utilización. El sistema de navegación comprende actualmente una UMI (Inertial Measurement Unit), y un POS.

- Según Mohamed Mostafa (2001) la UMI (Unidad de Medición Inercial): Un UMI comprende un conjunto de acelerómetros y giroscopios, circuitos de digitalización y un CPU registra la condición-recepción de las señales y la compensación de la temperatura de vuelo.
- Ordenador POS: Es un sistema computarizado que contiene una amplia capacidad de almacenaje de información y la compatibilidad para registrar y/o almacenar esta información en varios periféricos. La importancia del POS radica en el software que almacena y ejecuta, ya que este permite correr e integrar en tiempo real la información de navegación.

Un receptor GPS bifrecuencia (L1/L2)

- Receptor GPS: El sistema GPS comprende la utilización de la constelación de satélites y un receptor remoto que utiliza rangos de medición con una elevada precisión en coordinación con una antena receptora, por lo que debe de ser un receptor bifrecuencia. El método de medición debe de ser diferencial (DGPS) con el fin de eliminar al máximo los errores producidos por otros métodos, a la vez de ejecutar las mediciones con una apertura satelital, con no menos de 5 satélites. Finalmente este receptor debe tener una conexión física al INS y POS.

### **2.4.3. Instrumentos utilizados para la adquisición, recepción y almacenamiento de imágenes en los levantamientos aerofotográficos.**

Actualmente se encuentra en desarrollo el proceso de sustitución de las cámaras aéreas analógicas por digitales, las cuales reemplazan a las cámaras aéreas de película tradicional debido fundamentalmente a las mejoras en calidad en la resolución geométrica y radiométrica, así como por la posibilidad de apreciar detalles en zonas de sombras oscuras, para registrar simultáneamente en pancromático, verdadero color y falso color infrarrojo o para incrementar el recubrimiento sin costes extras de película y el hecho de ya no tener la necesidad de manejar rollos de película y por tanto sustituir el revelado y escaneo fotogramétrico.

El planteamiento anterior concuerda con la realidad a nivel nacional en el medio gubernamental, ya que el INEGI desarrolla metodologías de trabajo en este sentido. En síntesis, el problema se reduce a una sustitución de formato en la obtención de las imágenes, ya que con una cámara analógica obtenemos un negativo, que se escanea a formato digital y con las actuales cámaras CCD lo obtenemos directamente, aunque la forma de recolectar la información por ambos instrumentos es diferente, el producto final en ambos casos es un formato digital listo para integrarse a un sistema de Fotogrametría Digital. Por lo anterior, en este caso específico, atenderemos al funcionamiento de las cámaras fotogramétricas debido a que estas garantizan una orientación interna conocida, medida en forma exacta mediante cálculos matemáticos y que debe permanecer invariable por tiempo prolongado, y ya sean estas analógicas o digitales.

#### **2.4.3.1. Cámara fotogramétrica analógica.**

Teóricamente su funcionamiento se basa en la impresión de un objeto sobre películas fotosensibles, mediante un sistema óptico que permite controlar las condiciones de exposición.

Los principales componentes y funcionamiento de este tipo de cámara se pueden observar en la figura 2.39 y 2.40 y son:

- 1) Sistema de ensamble de lente u objetivo: Se constituye por el lente de la cámara, el obturador, el diafragma y el filtro.
  - a) El lente forma la imagen del terreno en el plano focal, por lo que debe tener una resolución de alta calidad, ya que esto influye en el resultado final de la imagen, además debe poseer la adaptabilidad a los tres diferentes tipos de conos objetivos, que son: normal, gran angular y súper gran angular.

El lente capta cualquier objetivo, cuando se reduce suficientemente su abertura, y se usa en campo muy restringido y con un solo color de luz, tiende a comportarse como un objetivo perfecto. Sin embargo, a medida de que la abertura y el campo de un objetivo se ensanchan y se da paso a otros colores de luz, van apareciendo aberraciones, las cuales son el

defecto de una lente según el cual los rayos de luz no van dirigidos hacia un punto exacto. Las aberraciones no son producidas por defectos de construcción de la lente, sino que son consecuencias de las leyes de refracción y reflexión de las superficies esféricas. Las diferentes clases de aberraciones de las lentes son: aberración esférica, coma, curvatura de campo, astigmatismo, aberración cromática y distorsión.

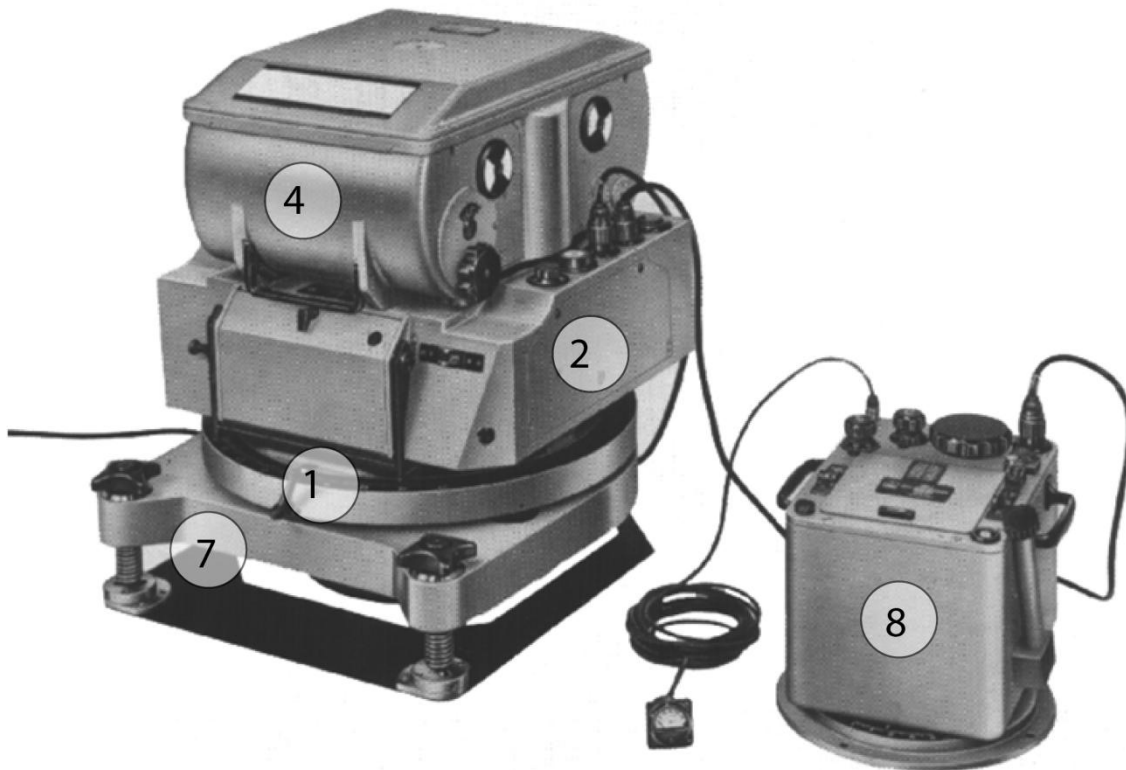


Figura 2.39. Cámara Fotogramétrica Analógica. (Fuente: Zeiss).

- b) El obturador es un dispositivo mecánico que deja pasar la luz al interior de la cámara durante el intervalo de exposición. Este dispositivo está fabricado con un conjunto de laminas delgadas que pueden girar para incrementar o disminuir el tamaño de la apertura del diafragma.
- c) El diafragma es un disco que permite limitar la entrada de la luz en sincronía con el obturador. Existe una relación diafragma-obturador en su funcionamiento, ambos permiten llegar a la película la cantidad de luz que necesita para ser expuesta correctamente. Para ello, el flujo de luz es limitado en su área por el diafragma y en el tiempo que pasa a través del objetivo por el obturador. De esta manera, cuando se aumenta la velocidad de obturación, con respecto a una condición inicial, el diámetro del diafragma debe aumentarse para que el flujo de luz que pasa por el objetivo sea constante con respecto a las condiciones luminosas existentes. En el caso contrario, si la velocidad de obturación disminuye, el área del diafragma deberá reducirse, reduciendo su diámetro.

La relación establecida es que el área y la velocidad disminuyen la mitad o aumenta el doble. Puesto que el área es función del diámetro del diafragma, se ha establecido una forma estándar para relacionar el área de apertura y la velocidad de obturación, para cualquier tipo de distancia focal, independientemente del formato que utilice la cámara. Al relacionar el diámetro con la distancia focal, se obtiene el denominado f/stop. Esta relación presenta la siguiente fórmula:

$$\text{Número f/stop} = \frac{\text{Distancia focal del objetivo}}{\text{Diámetro efectivo del diafragma}}$$

El diámetro efectivo del diafragma es el diámetro del haz de luz cuando pasa a través del mismo. Cuando este diámetro es igual a la distancia focal del objetivo, el número de f/stop es igual a la unidad.

La distancia focal de la cámara es la distancia entre el lente de la cámara y la placa fotográfica o negativo de la cámara, también podría denominarse como la distancia entre el punto nodal anterior en el sistema de lentes y el plano focal de la cámara.

- d) El filtro se encuentra al frente del objetivo y tiene la función de disminuir el efecto del velo atmosférico, ayuda a proveer una distribución uniforme de la luz en todo el formato y protege al lente de daños y suciedad.
- 2) Cono interior: Este cono soporta el ensamble del lente y el plano focal en una posición relativa, lo cual fija los elementos de orientación interna de la cámara. Estos elementos son determinados cuidadosamente mediante la calibración de la cámara, de tal manera que puedan ser usados en cálculos fotogramétricos. El cono interior está elaborado de un metal de bajo coeficiente de dilatación térmica, esto ayuda a que en los cambios de temperatura por operación no afecten la previa calibración.
- 3) Plano focal: Es el plano en el cual todos los rayos de luz incidente llegan a foco y es la superficie contra la cual es aplanada la película cuando se hace la exposición. Este plano coincide con el plano de las marcas fiduciales. El marco que representa físicamente el plano focal contiene además:
  - a) Marcas fiduciales: Las marcas fiduciales generalmente son cuatro y están localizadas en las esquinas o a la mitad del cuadro del plano focal. Estas marcas son registradas en el negativo cuando se toma la fotografía. Las líneas que unen las marcas fiduciales opuestas deberían intersectarse en el punto principal de la fotografía, y se pone todo el cuidado necesario en la fabricación de la cámara para que se de esta condición.



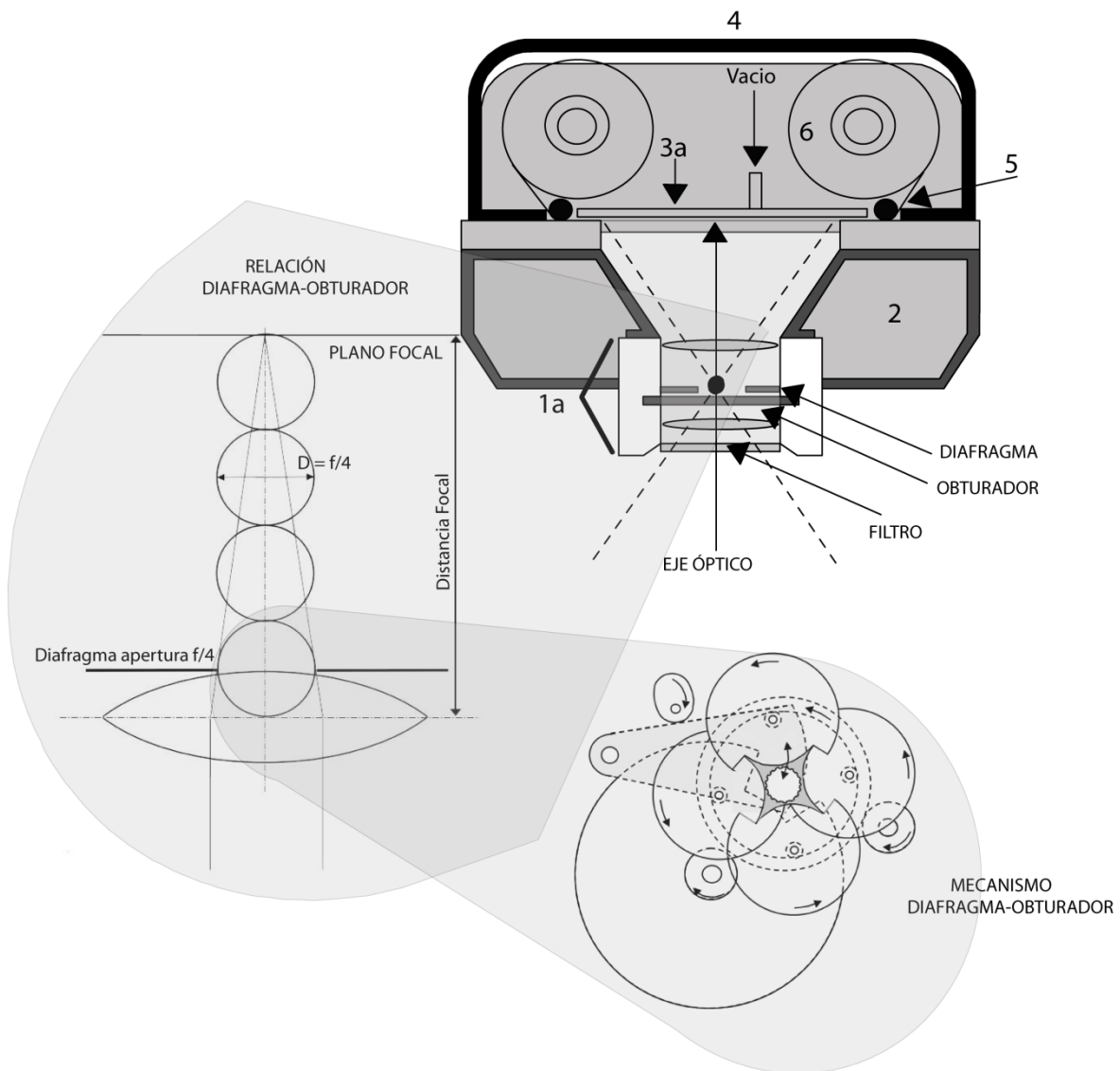


Figura 2.40. Esquema de funcionamiento de una Cámara Fotogramétrica Analógica.  
(Adaptado de Lillesand, 1987).

El punto principal se define como el punto en el plano focal donde una línea que pasa por el punto nodal posterior del objetivo de la cámara, y que es perpendicular al plano focal, intersecta al plano focal.

- b) Información marginal: Esta área de información se encuentra siempre sobre uno de los lados del marco. Tiene un sistema independiente de iluminación eléctrica y es registrado al mismo tiempo que se hace la exposición (ver figura 2.58).
- 4) Cuerpo de la cámara: El cuerpo de la cámara es una carcasa de una sola pieza que usualmente alberga el mecanismo de operación, soporta al cono interior y proporciona un soporte para el almacén de la película.

5) Mecanismo de operación: Este mecanismo provee la fuerza para operar la cámara a través de todo un ciclo que consiste en:

- Avance de la película.
- Aplanamiento de la película.
- Armado del obturador.
- Disparo del obturador.

La fuerza para el mecanismo de operación puede ser suministrada manualmente o mediante energía eléctrica. El cuerpo de la cámara también contiene asas para su transporte y conectores para fuentes externas.

6) Almacén: El almacén de la cámara alberga los rieles que contienen la película expuesta y sin exponer. La capacidad del almacén es de 120 metros de película, lo que representa una capacidad cercana a las 480 fotografías.

También contiene los mecanismos de avance y aplanamiento de la película. El aplanamiento es muy importante en las cámaras aéreas, ya que si el negativo se abultara durante la exposición, la geometría de la imagen en las fotografías resultantes puede ser incorrecta. Generalmente el aplanado de la película se realiza sosteniendo esta misma, mediante un plato de vacío cuya superficie interior está en el plano focal.

7) Compensación del movimiento frontal de la imagen (FMC, por sus siglas en inglés, Forward Movement Compensation), este da una compensación por desplazamiento de la imagen en el momento de la exposición.

En el momento del disparo hay unas décimas de segundo en el que el obturador está abierto y que el avión lógicamente está en movimiento. Esto produce un desplazamiento de la imagen del terreno en la fotografía de su posición teórica. Habitualmente este efecto se reduce combinando tiempo de exposición y velocidad del avión, para limitarlo dentro de unos valores admisibles. Mediante este sistema la película durante la exposición se desplaza en dirección contraria al sentido de vuelo, corrigiendo el efecto anterior. Es muy interesante para escalas grandes de fotografía (1/8.000, 1/5.000, 1/3.500). Esta compensación actúa en conjunto con otra denominada AMC (Angular Motion Control), compensación de movimientos angulares por estabilizadores de giros.

Las nuevas cámaras fotogramétricas tienen un mecanismo para la compensación del movimiento de la imagen durante el tiempo de la exposición, que se denomina instrumento de compensación del movimiento frontal de la imagen, este permite a la película moverse en la misma proporción que la imagen durante la exposición. Esto permite un tiempo de exposición mayor y, por lo tanto, se puede usar película lenta de alta resolución.

Los aspectos relativos a la exactitud geométrica del uso combinado del FMC y las películas de alta resolución, establecen mejoras considerables, tanto en la precisión de las mediciones estereoscópicas, como en las monoculars.

El INEGI, en su Manual de conceptos básicos del 2005, en su apartado de Fotogrametría, pág. 98 comenta que también se realiza una mejora en la calidad de la imagen a través de una inspección visual, comparando las fotografías tomadas con FMC y películas de alta resolución con fotografías tomadas sin la compensación del FMC y con película de grano medio de alta velocidad.

- 8) Accesorios: Los accesorios para la operación propia de una cámara aérea en vuelo incluyen el montaje de la cámara, una mira de navegación, una línea de energía e instrumentos auxiliares como un sistema de suspensión.



Figura 2.41. Accesorios complementarios, en ambas imágenes se observa una mira de navegación instalada en el avión.

(Fuente: [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)).

Un aspecto de gran importancia es la calibración de la cámara. Después de la manufactura y antes de utilizarse, las cámaras métricas son cuidadosamente calibradas, para determinar de manera precisa los valores de las constantes de la cámara. Generalmente, los métodos de calibración de la cámara pueden clasificarse dentro de tres métodos básicos (Wolf, 1974):

- Métodos de laboratorio.
- Métodos de campo.
- Métodos estelares.

De todos estos, los métodos de laboratorio son los usados con mayor frecuencia. El principio de los métodos de calibración es básicamente el mismo, y consiste en fotografiar un arreglo de blancos cuyas posiciones relativas son conocidas con exactitud. Los elementos de orientación interior son determinados mediante mediciones precisas de las imágenes de los blancos, y comparando sus posiciones actuales con las posiciones que ellas habrían ocupado si la cámara hubiese producido una proyección central perfecta. Normalmente en la calibración de la cámara son determinadas las siguientes especificaciones de orientación interior, como mínimo:

- Distancia focal equivalente: la distancia focal efectiva cerca del centro del objetivo de la cámara.
- Distancia focal calibrada (también denominada constante de la cámara): Es la longitud focal que produce una distribución promedio de la distorsión radial del objetivo.
- Distorsión radial promedio del objetivo: distorsión de la posición de la imagen, a lo largo de líneas radiales, a partir del punto principal.
- Las coordenadas  $X'$  y  $Y'$  del punto principal, dadas con respecto a la  $X$  y a la  $Y$  de los ejes fiduciales (a pesar de que existe el intento en la fabricación de las cámaras de colocar las marcas fiduciales de tal manera que las líneas trazadas entre pares opuestos se intersecten en el punto principal, ocurre casi siempre una pequeña desviación de esta condición ideal.
- Distancias entre marcas fiduciales opuestas.
- Planaridad del plano focal: no debe desviarse más de 10 micrones (una centésima de milímetro) del plano focal teórico.

Los cuatro primeros procesos de determinación pueden diferir ligeramente, dependiendo de que el método sea de laboratorio, de campo o estelar. En cualquier caso las matemáticas usadas en esta fase de calibración se vuelven complicadas. Los dos últimos procesos son obtenidos de mediciones directas de una placa de vidrio en la cual las marcas fiduciales son proyectadas.

El método del multicolimador y el método del goniómetro son los dos tipos de procedimientos para la calibración de la cámara. El método del multicolimador emplea un número de colimadores colocados según un arreglo angular conocido. Un colimador consiste en un lente con una cruz montada en su plano de foco infinito en donde los rayos de luz que atraviesan la cruz son proyectados a través del lente, emergiendo paralelos. Si estos rayos de luz son dirigidos hacia el objetivo de una cámara, la cruz debe ser proyectada nítidamente en el plano focal de la cámara ya que las cámaras aéreas están enfocadas para rayos de luz paralelos (aquellos que tienen distancias objeto infinitas).

Un colimador de cámara consiste en varios colimadores individuales, montados en dos planos perpendiculares. Un plano de colimadores es ilustrado en la figura 2.42. Los colimadores individuales son rígidamente fijados, de tal manera que los ejes ópticos de los colimadores adyacentes se intersecten en ángulos conocidos.

La cámara a ser calibrada es colocada de manera que su plano focal sea perpendicular al eje del colimador central y que el punto nodal central del objetivo quede en la intersección de todos los ejes de los colimadores. En esta orientación, la imagen "g" del colimador central ocurre muy cerca del punto principal y de la intersección de los ejes fiduciales.

La cámara es también orientada de manera que cuando la foto es tomada, las cruces del colimador se proyectarán a lo largo de las diagonales del formato de la cámara, como se muestra en la figura 2.44. Las cruces "A" hasta "M" de la figura 2.44 son proyectadas desde "a" hasta "m", según la figura 2.45. Las cruces del plano perpendicular de colimadores son proyectadas desde "n" hasta "y", en la figura 2.45. Las distancias en la placa expuesta entre las cruces son medidas con precisión.

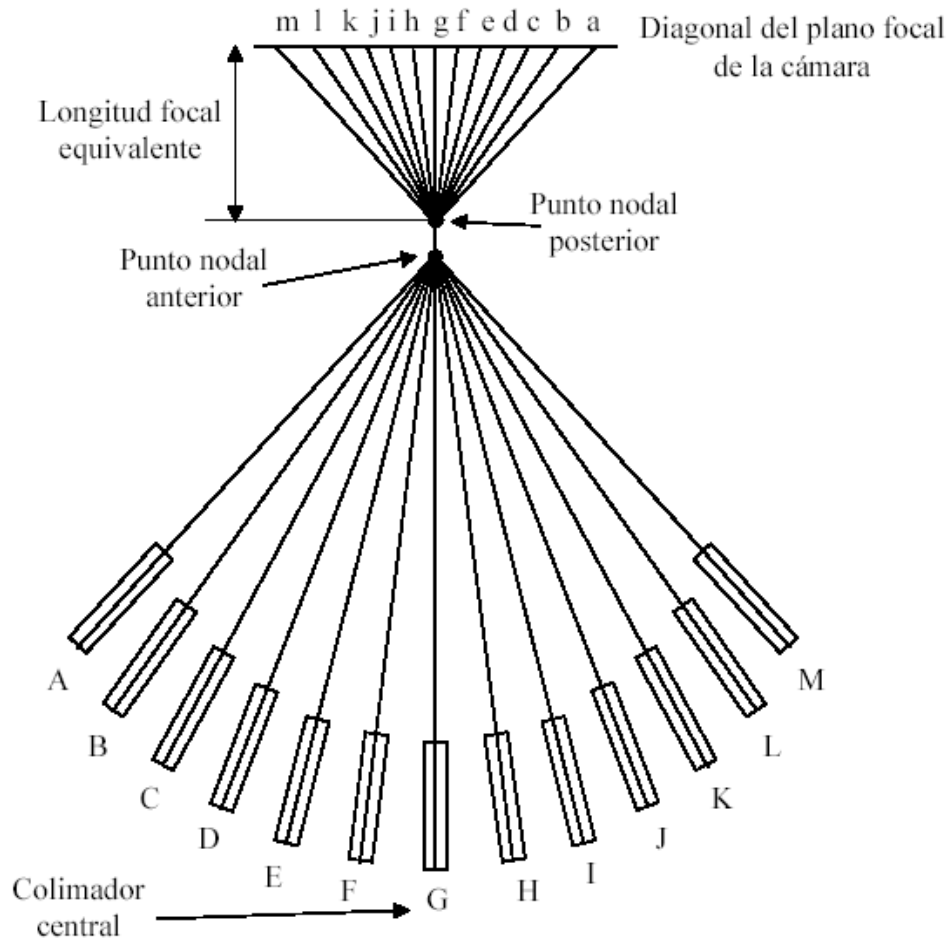


Figura 2.42. Colimadores individuales (Tomado de Wolf, 1974).

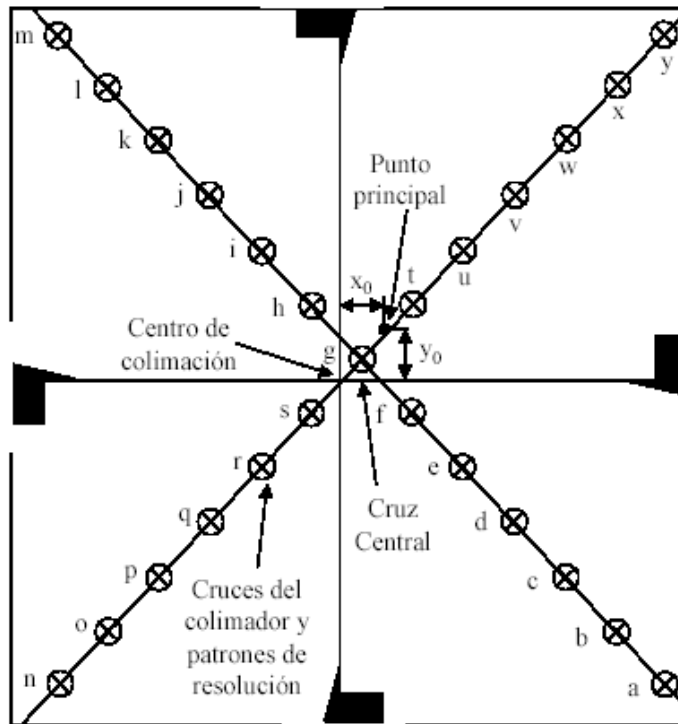


Figura 2.43. Posición de las imágenes de los colimadores en el plano focal.  
(Tomado de Wolf, 1974).

La Longitud Focal Equivalente (LFE) es aquella que es efectiva en el área libre de distorsión del centro del objetivo de la cámara. En el plano de la imagen, esta área se considera dentro del círculo cuyo centro está en la imagen del colimador central g, y cuyo radio es la distancia hasta las imágenes de los colimadores f, t, h y s. La Longitud Focal Equivalente es obtenida dividiendo el promedio de las cuatro distancias medidas gf, gt, gh y gs entre la tangente del ángulo.

$$\text{LFE} = \frac{gf + gt + gh + gs}{4 \tan \text{ang.}}$$

Basándose en la longitud focal equivalente, las distancias teóricas desde la imagen del colimador central g hasta las otras imágenes de los colimadores se pueden conseguir; por ejemplo, las distancias ge, gi, gu y gr teóricamente son iguales a  $\text{LFE} \times \tan 2\phi$ . Estas cuatro distancias son medidas y la distorsión radial a  $2\phi$  es obtenida restando la distancia teórica calculada al promedio de las cuatro distancias medidas. Utilizando esta aproximación, la distorsión radial puede ser calculada para cada incremento de  $\phi$ .

Una curva de distorsión radial puede ser dibujada graficando la distorsión radial en la abscisa, a partir de la imagen del colimador central. Esta curva indica la naturaleza de la distorsión radial de un objetivo y muestra también los valores máximos positivos y negativos (ver figura 2.44).

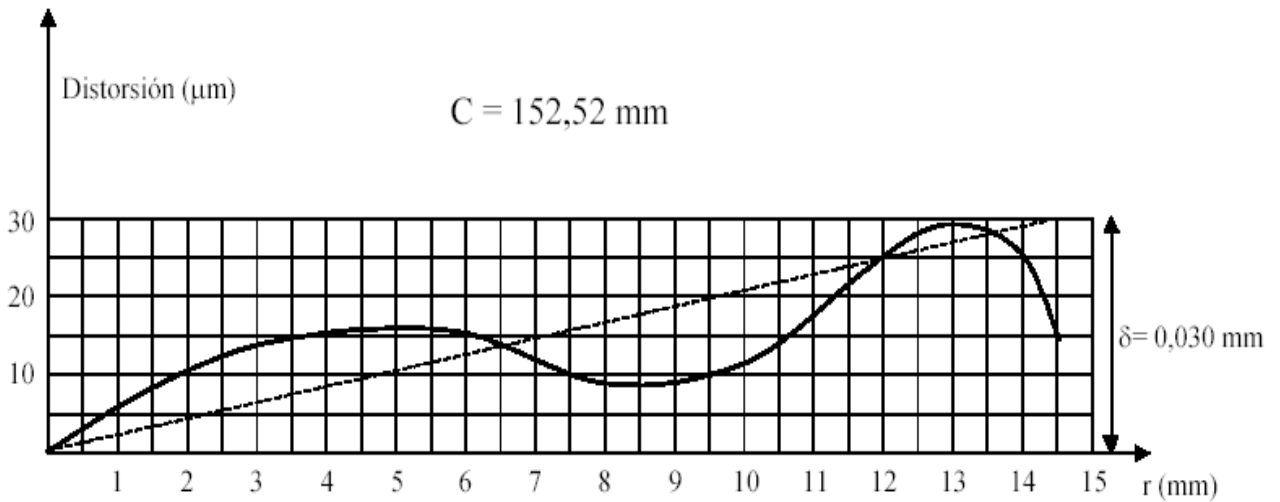


Figura 2.44. Determinación de la línea de simetría en la curva de distorsión.  
(Tomado de Deagostini, 1974).

De lo anterior concluimos que una longitud focal que no sea la LFE puede ser utilizada para calcular la distorsión radial y que una longitud focal diferente produce una curva diferente de distorsión radial.

La Longitud Focal Calibrada (LFC), llamada también constante focal de la cámara o distancia principal de un objetivo, es una distancia focal que produce una distribución promedio de la distorsión radial. Esta distorsión generalmente es seleccionada de manera que el máximo positivo sea igual al máximo negativo.

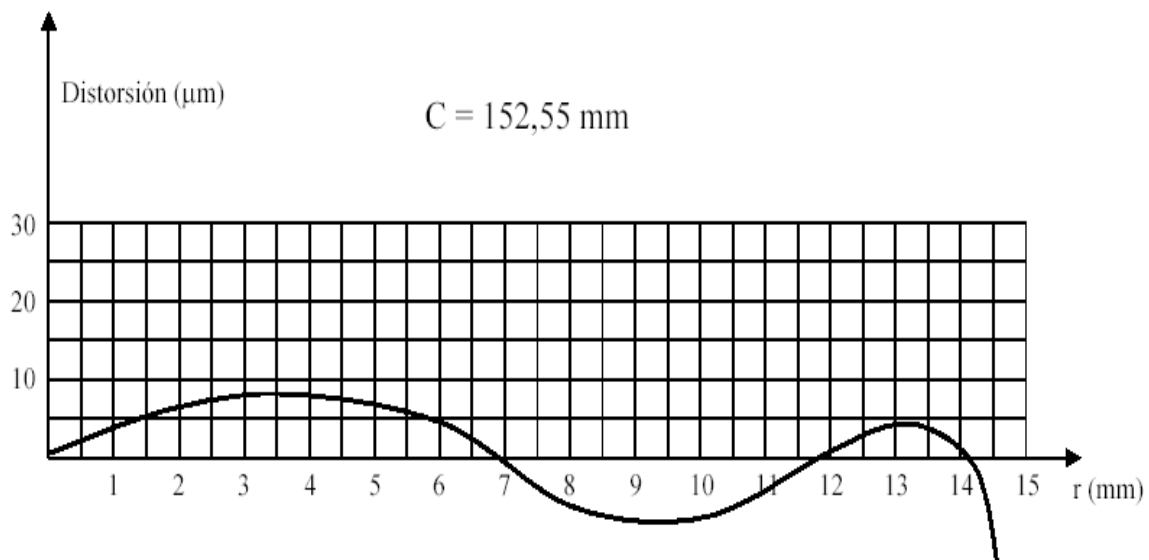


Figura 2.45. Compensación de la Distorsión mediante rebatimiento de la Línea de Simetría.  
(Adaptado de Deagostini, 1984).

La LFC es el valor utilizado en los cálculos fotogramétricos. Es decir, corresponde a la distancia principal.

El procedimiento de laboratorio del goniómetro es muy similar al método de colimación y consiste en centrar una placa cuadrículada en el plano focal de la cámara. La placa es iluminada por detrás y proyectada a través del objetivo. Los ángulos con los cuales salen los rayos de la cuadrícula son medidos con un goniómetro. La LFC y distorsiones radiales son determinadas comparando los ángulos medidos con los ángulos teóricos.

Como producto final de esta calibración, e insumo necesario para iniciar los procesos de orientación interna y restitución fotogramétrica, obtenemos un **Certificado de Calibración de la Cámara Métrica** usada, que contiene los parámetros básicos de la geometría de la cámara que son: Identificación de la cámara, fecha de calibración, focal de toma, punto principal de autocolimación (PPA), punto principal de Simetría (PPS), distancia entre marcas fiduciales y distorsión radial de la lente.

#### **2.4.3.2. Cámara Fotogramétrica Digital.**

Su funcionamiento es similar al de una cámara analógica, la diferencia se observa en los componentes y algunos aditamentos técnicos.

Según López-Cuervo (2006), las cámaras digitales se diferencian de las analógicas en que las primeras no necesitan revelado fotográfico para hacer visible la imagen latente, sino que ésta se forma al incidir la luz reflejada por el objeto en sensores fotoeléctricos formando así la imagen impresionada.

Inicialmente comentamos que estas incluyen un sensor CCD (por sus siglas en inglés Charged Coupled Device, dispositivo de cargas eléctricas interconectadas), el cual convierte los fotones que llegan a la superficie en electrones, y un convertidor los transforma a formato digital y se registran en un colector.

Su funcionamiento se presenta en la figura 2.46, y sus componentes en la figura 2.47. En donde el diodo es un dispositivo que deja pasar corriente eléctrica en una dirección y no en la contraria, de forma que si se ilumina dejará pasar corriente en ese sentido. Son, por tanto, rectificadores de corriente, pasan de corriente alterna a continua. Se llamará fotodiodo si es sensible al paso de una señal luminosa. El circuito llevará un amplificador de señal y un convertidor para pasarla de analógica a digital.

Por tanto el sensor o fotodiodo de una cámara digital será del tipo CCD de doble carga, que será el responsable de formar la imagen. Los fotodetectores del tipo CCD (lo llevan las cámaras de video y de fotografía caseras) se sitúan formado “arrays” (matrices) en un número que indicará el tamaño final de la imagen. Estos dispositivos se pueden colocar en forma lineal (y por tanto barren la zona sensible para formar la imagen) o en forma superficial (matricial o en dos dimensiones, fijos).



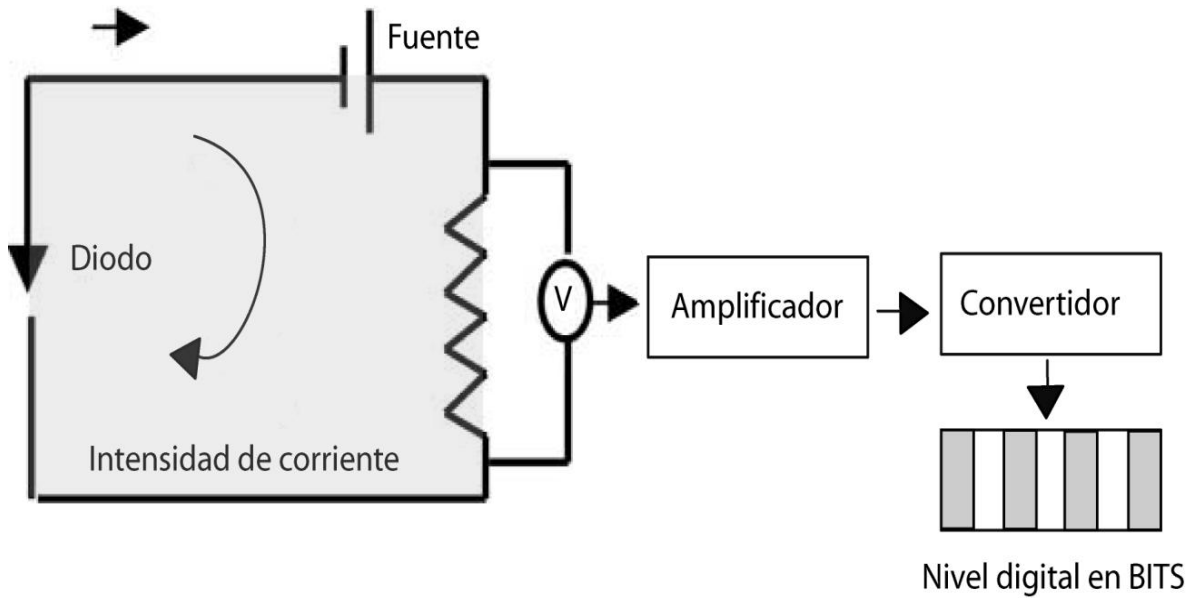


Figura 2.46. Esquema electrónico de una cámara digital.  
 (Fuente: Santos Pérez, Luis Julián Cámaras fotogramétricas aéreas digitales: ventajas e inconvenientes. Influencias en la ejecución de cartografía catastral, pág. 57).

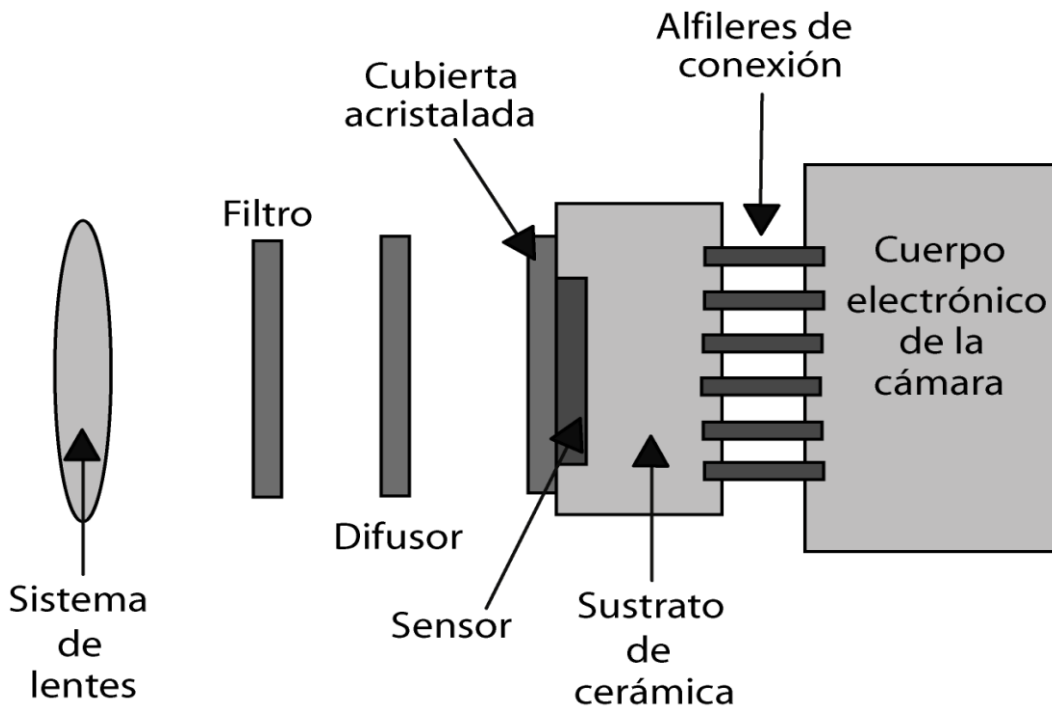


Figura 2.47. Componentes de la cámara digital.  
 (Adaptado de Santos Pérez, Luis Julián, 2006).

A partir de este esquema general, las cámaras aéreas digitales ofrecen dos diferentes soluciones (ver figura 2.48), la matricial y la lineal.

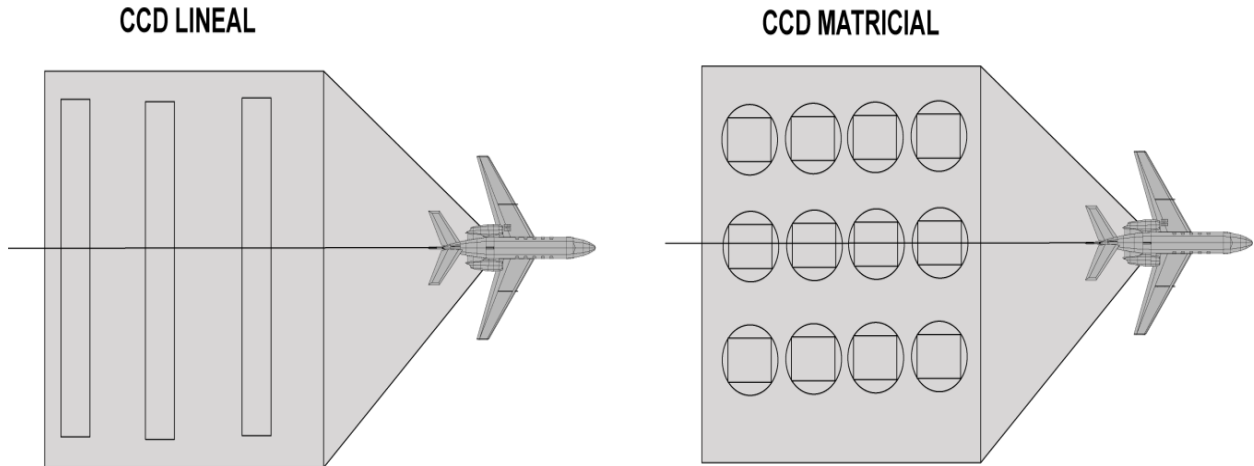


Figura 2.48. Representación de la toma de CCD Lineales y Matriciales.  
(Elaboración propia).

Las cámaras aéreas digitales de línea barren el terreno de forma simultánea al avance del avión con 3 líneas pancromáticas. Tienen una única lente y un plano focal.

Entre sus características cabe señalar que cuentan con 8 sensores lineales CCD, todos situados en el plano focal, diseñados para requerimientos fotogramétricos y para teledetección a baja altura:

- 3 CCD pancromático.
- 3 CCD RGB, (Rojo + verde + azul).
- 1 CCD en el infrarrojo medio.
- 1 CCD en el infrarrojo térmico.

Cada uno de los CCD (figura 2.49) tiene 12.000 píxeles (X2), el tamaño de cada píxel es de 6,5 micras. Tiene una focal de 62,5 mm. y un ángulo de campo de vista (FOV) de 52 °. La estructura electrónica del sensor está formada por dos arrays escalonados desfasados medio píxel. Estos sensores están sustentados en el plano focal.

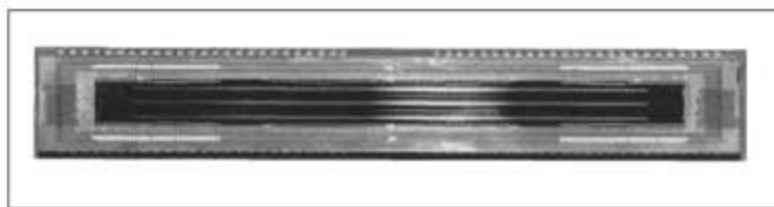


Figura 2.49. Esquema electrónico de una cámara digital.  
(Fuente: Santos Pérez, Luis Julián Cámaras fotogramétricas aéreas digitales: ventajas e inconvenientes. Influencias en la ejecución de cartografía catastral, pág. 60).

La toma de la imagen se realiza por barrido simultáneo en tres posiciones de la línea de toma (figura 2.50).

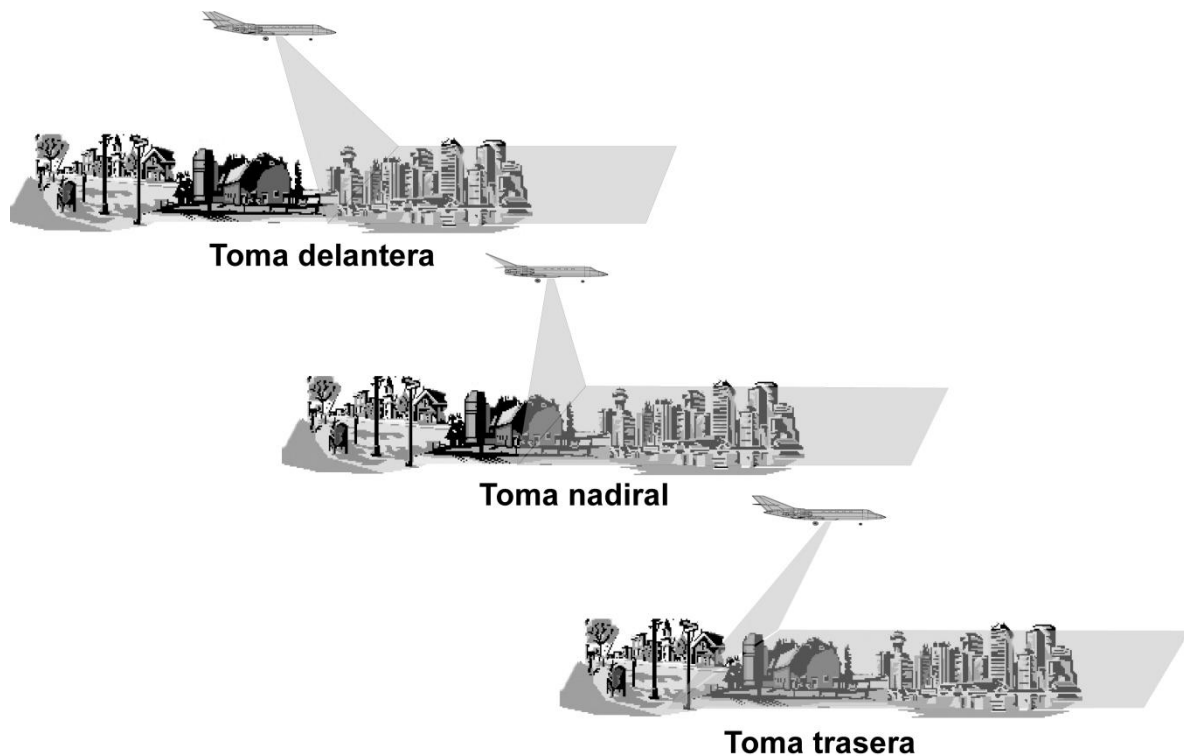


Figura 2.50. Esquema gráfico del principio de toma con tres líneas de una cámara digital.  
(Elaboración propia).

El principio en el que se basa el sistema de imagen estéreo con tres líneas consiste en que la cámara en el avión que sigue una trayectoria recta va tomando tres imágenes, una hacia delante, otra nadiral (vertical hacia abajo) y la última hacia atrás, por tanto para una única posición del sensor existen tres imágenes. Esas imágenes se combinan en post-proceso para dar una imagen continua. También se puede apreciar que la misma zona aparece en tres diferentes localizaciones del sensor.

En la figura 2.51 se describe gráficamente el efecto que produce la perspectiva central en el sensor digital CCD lineal y en la cámara analógica. En el primer caso, tenemos varios fotogramas con zonas en común representando el traslape de las imágenes obtenidas con cámara analógica. En el segundo caso tenemos tres diferentes pasadas con zonas en común para hacer posible su correlación y pertenece al sensor digital CCD.

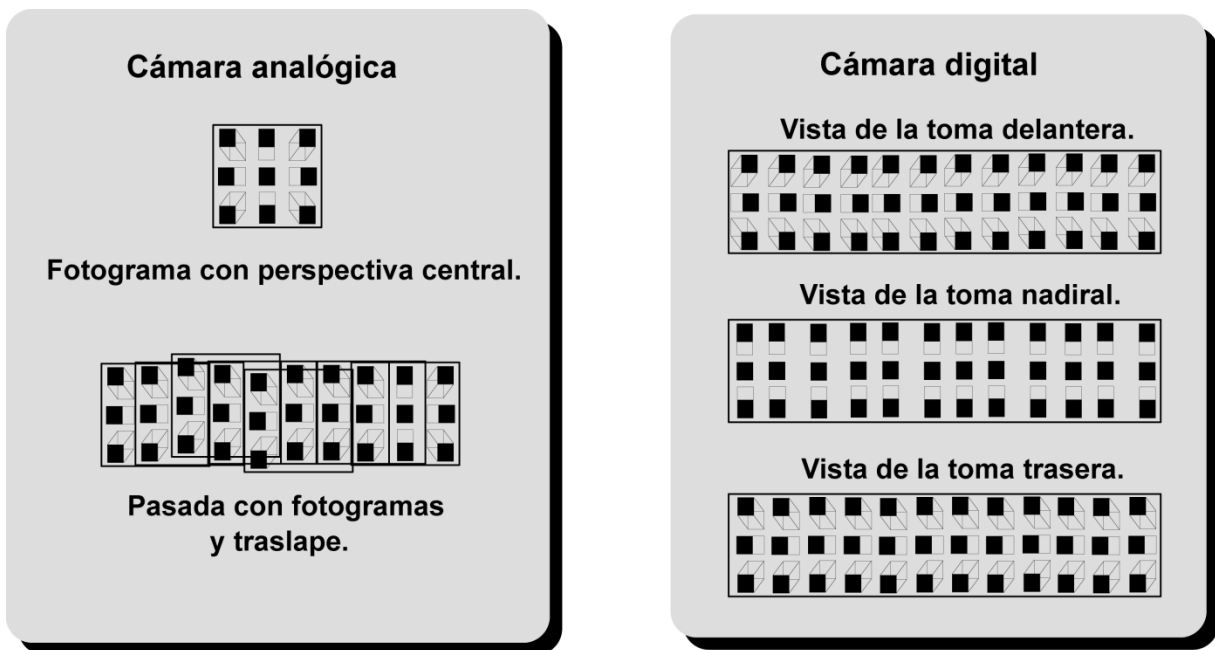


Figura 2.51. Perspectivas de toma de una cámara analógica y una cámara digital.  
(Adaptado de Santos Pérez, Luis Julián, 2006).

La imagen se adquiere durante el movimiento de avance del avión sobre el terreno, formando una pasada continua, por lo que la frecuencia de la cámara se ha de ajustar a la velocidad y altitud del mismo, por tanto ha de tomar cada línea de la imagen cada 0.00125 segundos. La imagen tiene deformaciones por los movimientos del avión, por lo que habrá que rectificarla en post-proceso.

Para que sea eficiente el sensor, ha de utilizar un Sistema de Navegación Inercia asistido por GPS que dé posición y orientación a cada línea en cada instante. Este sistema estará formado por una Unidad de Medida Inercial (IMU), por un receptor GPS bifrecuencia y por un ordenador (POS) que procese On-line toda esa información. El IMU graba cambios instantáneos en la posición y orientación de la cámara 200 veces/segundo y sirve para definir la trayectoria entre dos orientaciones GPS.

Después de procesar todos los datos de orientación, esos ficheros se utilizan para rectificar las imágenes. Estas se proyectan sobre un plano terrestre a una cota determinada, obteniendo una imagen estándar, georreferenciada y preparada para el procesamiento en fotogrametría y/o de teledetección.

Por otro lado, en las cámaras aéreas digitales matriciales las imágenes no se obtienen de forma continua sino en sensores modulares matriciales simultáneamente.

Estas cámaras combinan varios objetivos en su plano focal, produciendo imágenes matriciales parciales que se unifican en una imagen completa en post-proceso. Está conformada por 4 objetivos pancromáticos (B/N) compuesto cada uno por 11.500 x 7.500 píxeles y por otros 4 objetivos matriciales multispectrales

RGB IR (rojo, verde, azul e infrarrojo) de 4000 x 2672 píxeles cada uno. La distancia focal de los objetivos es de 100 mm y su luminosidad de  $f: 1,56$ . Cada uno de los píxeles (fotodetectores) tiene un tamaño de 9 x 9 micras y la amplitud (ancho por largo) de su campo de visión (FOV) es de  $55^\circ \times 37^\circ$ . Los 4 módulos pancromáticos se encuentran dispuestos formando haces convergentes de forma que adquieren cuatro imágenes del terreno distintas pero con unas zonas comunes para unir todas en una imagen global.

La formación de las imágenes se realiza formando un mosaico de las imágenes a partir de los citados módulos pancromáticos, a partir de ahí se forman las combinaciones a color natural o falso color, mediante los otros cuatro objetivos color. Es decir, se combinan las imágenes en color (RGB) con las imágenes en B/N (pancromáticas) mediante puntos comunes, añadiendo una más de Infrarrojo. Todas las imágenes se producen en un “disparo simultáneo” tal y como se aprecia en la figura 2.52. Los pasos que llevan a la formación de la imagen completa se presentan en la figura 2.53.

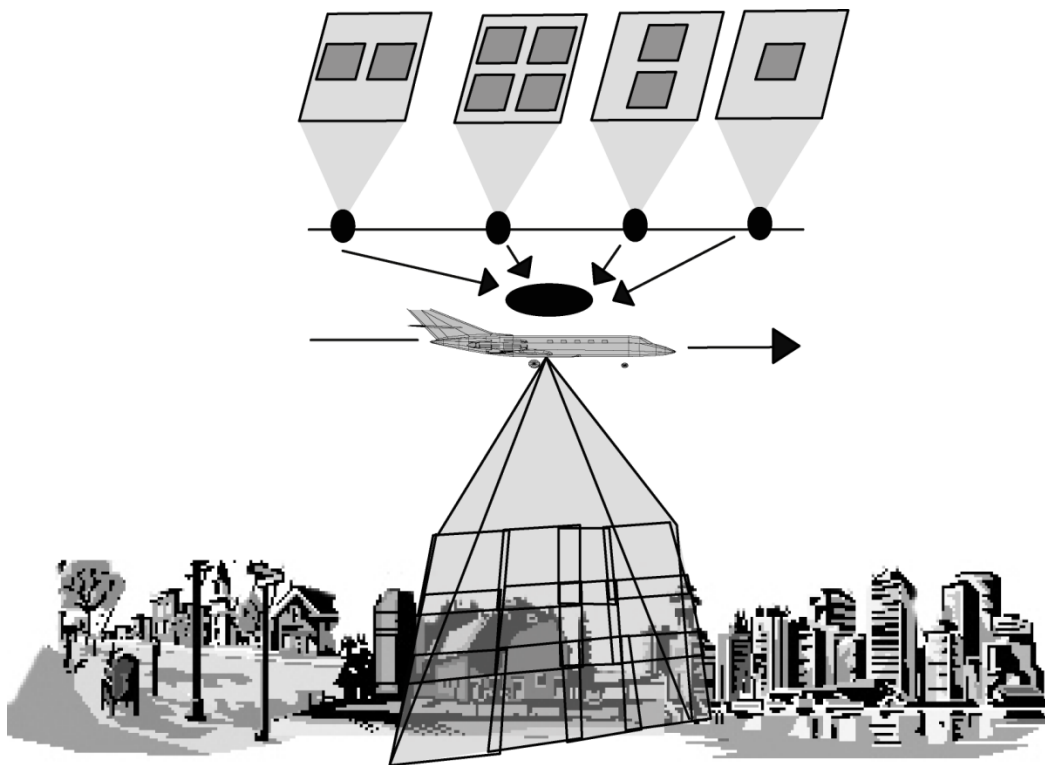


Figura 2.52. Disparo de toma en cámara digital matricial.  
(Adaptado de Santos Pérez, Luis Julián, 2006).

En primer lugar entra en funcionamiento el cono principal ó maestro con 4 matrices de imagen (figura 2.53a). En el segundo paso el primer cono “esclavo” introduce dos imágenes de forma vertical en el centro de las primeras, creando cuatro áreas de solape (figura 2.53b). En el tercer paso, el segundo cono “esclavo” coloca otras dos imágenes en horizontal creando nuevas áreas de solape (figura 2.53c) y por último el tercer cono “esclavo” coloca una nueva y última imagen uniendo y solapando todas las anteriores (figura 2.53d).

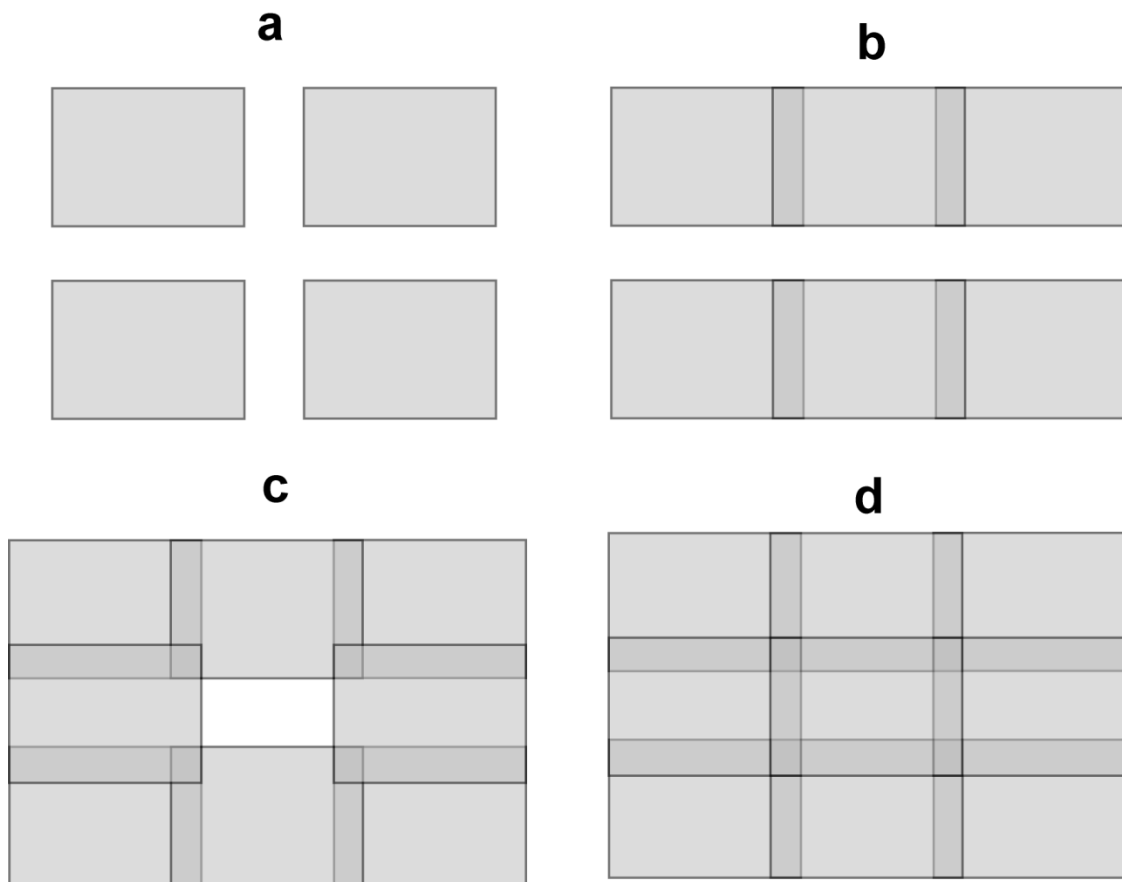


Figura 2.53. Proceso de la conformación de imagen en una cámara digital matricial.  
(Adaptado de Santos Pérez, Luis Julián, 2006).

La imagen final cuenta con 9 matrices de imagen superpuestas con zonas de recubrimiento. En esas zonas los puntos comunes sirven para crear en post-proceso una imagen única en la que se combina información pancromática con color e infrarrojo.

A continuación se presenta una cámara matricial DMC (Zeiss/Intergraph), la cual es de la más utilizadas en este tipo de trabajos por sus características técnicas.

La cámara se sitúa en la ubicación tradicional, en una perforación del fuselaje, conectada a diferentes elementos que componen el equipo global (figura 2.56), estos son:

- Centro de control del sistema IMU (Inertial Measure Unit)
- Discos de almacenamiento masivo
- Interface del navegador



Figura 2.54. Cámara matricial DMC Zeiss/Intergraph.  
(Fuente: [www.intergraph.com](http://www.intergraph.com)).

Formato de imagen	13.824 x 7.680 píxeles
Tamaño de CCD	12 micras
Distancia focal	120 mm
Sistema GPS/INS	Integrado en el sistema
Resolución radiométrica	12-bit / Canal
Canales espectrales	Pancromático, Rojo, Azul, Verde, IR Cercano
Compensación FMC	Electrónica TDI (Time Delay Integrated)
Almacenamiento en vuelo	2.200 imágenes
Ángulo de campo	69.3° en sentido transversal a la traza 42° en el sentido de la traza
Disparador, apertura	variable de 1/50 a 1/300 seg. f/4 – f/22

Tabla 2. Características técnicas de la cámara matricial DMC (Zeiss/Intergraph).  
(Fuente: Santos Pérez, Luis Julián. Cámaras fotogramétricas aéreas digitales: ventajas e inconvenientes. Influencias en la ejecución de cartografía catastral, pág. 65).

La cámara digital DMC es una nueva cámara aérea de gran formato y de matriz diseñada para diferentes aplicaciones a gran escala y de alta precisión, así como para proyectos cartográficos a mediana escala (máximo 1:40,000). DMC utiliza un sensor de matriz CCD de 12 micras como tamaño de píxel, lo que significa 144 micras cuadradas de área sensible a la luz.

Es una propiedad de CCD que la sensibilidad a la luz aumente de forma lineal con el área de sensibilidad a la luz, lo que significa que un CCD de 12 micras es aproximadamente 3,5 veces más sensible en comparación con un CCD de 6,5 micras. Debido a su diseño multiespectral de múltiples sensores, la cámara también se ajusta perfectamente a una aplicación de sensores remotos, al igual que ocurre en análisis forestales o control agrícola. DMC es una cámara de ángulo ancho con una longitud focal y un campo de visión similar a una cámara analógica. El mayor beneficio de la nueva tecnología de cámaras digitales es un aumento de las horas de vuelo por día y por año debido a su mayor calidad radiométrica en comparación con las cámaras analógicas. Se podrá volar en peores condiciones de luz o en menores ángulos del sol y continuar cumpliendo los requisitos de calidad de los estándares cartográficos.

Desde mediados de los años 80, se utiliza una compensación del movimiento frontal (FMC, por sus siglas en inglés) en cámaras analógicas aéreas para mejorar la calidad de la imagen y evitar una visión borrosa de la imagen.

El esquema de funcionamiento del sistema FMC consiste en que el sistema va capturando las imágenes en RGB y en vez de situarlas directamente donde les correspondería, van saltando a la siguiente posición hasta que mediante el retraso correspondiente son situadas en la última línea de la matriz imagen ya compensadas

Actualmente, todos los proyectos de vuelos de exploración aéreos necesitan un sistema de cámara con FMC. Debido a la tecnología de sensores de matriz, DMC ha puesto en práctica una FMC electrónica, lo que supone una gran ventaja, pero que no es posible con sensores de líneas CCD. Se utiliza una integración a tiempo retardada (TDI) para generar la FMC. En proyectos cartográficos a gran escala o en vuelos fotográficos con un tiempo de exposición amplio (malas condiciones de luz), se necesita una FMC.

A su vez el piloto mediante el "Plot display" puede ir siguiendo todo el trabajo que se realiza y la ruta de navegación. El sistema GPS mediante el control del sensor interconecta al piloto con la cámara y permite detectar posibles variaciones de la trayectoria. Es necesaria una perfecta ubicación de la cámara con respecto al receptor GPS, conociendo todos los vectores de situación para así poder calcular las coordenadas de los puntos de toma de forma continua.

Finalmente comentamos que las cámaras analógicas y digitales son muy diferentes entre sí, pero tienen cuatro componentes básicos que las caracterizan y son la óptica, el sensor, el procesador y el soporte de salida. Las diferencias fundamentales están en el sensor y el procesador como vemos en la siguiente tabla:



Componentes	Cámaras analógicas	Cámaras digitales
<b>OPTICA</b>	Lentes y/o espejos	Lentes y/o espejos
<b>SENSOR</b>	Emulsión fotográfica	Detectores de estado sólido (CCD,CMOS..)
<b>PROCESADOR</b>	Químico(revelado, fijado, lavado secado).	Ordenador (cálculo matemático)
<b>SOPORTE</b>	Película	Disco óptico y/o magnético.

Tabla 3. Diferencias entre los componentes básicos de cámaras analógicas y digitales.  
(Fuente: Santos Pérez, Luis Julián Cámaras fotogramétricas aéreas digitales: ventajas e inconvenientes. pág. 53).

#### 2.4.3.3. Instrumentos de recepción y almacenamiento.

En las cámaras analógicas nos referimos específicamente al almacén, cuyas especificaciones técnicas se presentaron con anterioridad en la pág. 93.

El almacenamiento de datos en las cámaras digitales se realiza en función de un FDS (Flight Data Storage, por sus siglas en inglés). Para almacenar los datos brutos de imagen durante el vuelo fotográfico, debemos contar con un dispositivo de almacenamiento masivo que sea potente y seguro. Para procesar más datos, el manejo de este dispositivo tiene que ser muy fácil de usar. Si el sistema de la cámara DMC utiliza la unidad de almacenamiento de datos del vuelo FDS, se necesitan tres unidades en un sistema; cada FDS puede almacenar 250 GB de datos, lo que significa un total de 750 GB, equivalente a 2200 imágenes aéreas. FDS utiliza una tecnología de interfaz de canal de fibra de alta velocidad y estándar y se instala en el avión (figura 2.36) con una placa base que normalmente se monta en los carriles de los asientos del avión. El tamaño de un FDS es el mismo que el de un ordenador personal de torre pequeña, el peso es de aproximadamente 20 kg y el consumo de energía es de 60 W. Se puede instalar y extraer FDS sin desconectar cables y sin utilizar herramientas. Se conectará y desconectará automáticamente con el módulo de la cámara DMC. Si están disponibles varios FDS, es posible un intercambio en el aire durante el vuelo, para ampliar la capacidad de almacenamiento.

La unidad FDS tiene un diseño muy seguro y reforzado y contiene dos discos duros SCSI en un recinto endurecido y presurizado. Puede funcionar hasta 5000 metros de altura de vuelo (8000 metros también es una opción disponible), en un avión sin presurizar. La unidad FDS es extremadamente robusta y a prueba de choques, por lo que se puede garantizar la seguridad de los datos. Para el procesamiento posterior de datos de imagen, se puede conectar directamente FDS a una estación de trabajo en la oficina a través de una interfaz de canal de fibra estándar. FDS es un sistema de almacenamiento de datos flexible y versátil que está diseñado para las operaciones en el aire.

#### **2.4.4. Ejecución del vuelo aerofotográfico con apoyo aéreo cinemático.**

Una vez explicada la planeación del proyecto de vuelo, la descripción de los instrumentos requeridos para los procesos de navegación y posicionamiento de la plataforma de toma y los instrumentos para la adquisición, procesamiento y almacenamiento de las fotografías aéreas, solo resta realizar el vuelo aerofotogramétrico.

En el apartado correspondiente a la explicación de las cámaras fotogramétricas se señaló que la utilización de cámaras analógicas y digitales solo determina una mejora en la identificación automática de imágenes y una sustitución de formato, en este apartado se pretende mostrar la interconexión de la cámara a un GPS aerotransportado para reducir tiempos y semi-automatizar algunos procesos en la aerotriangulación.

##### **2.4.4.1. Apoyo aéreo cinemático.**

A la determinación de las coordenadas de los centros de proyección de la cámara en el momento de la toma de exposición en pleno vuelo se le denomina apoyo aéreo cinemático, el cual se representa en una reducción de las necesidades de puntos de apoyo terrestre para la realización de la aerotriangulación, por lo que se reduce la dependencia de extensos trabajos geodésicos y topográfico, pero además permite una semi-automatización de los procesos posteriores, debido a que en aerotriangulación digital la única fase manual es la medición manual de los puntos de apoyo sobre los modelos o fotogramas individuales.

Para la realización del apoyo aéreo cinemático en el vuelo aerofotográfico se requieren las siguientes condicionantes:

- Cámara fotogramétrica con conexión a una antena GPS que envía un impulso al receptor, y almacena la hora de exposición.
- Receptor en el avión con una frecuencia L1 y observación portadora de fase con recepción de datos entre 0,5 a 1 segundos (ver figura 2.56).
- Receptor GPS estación de referencia estática en el terreno y compatible con receptor de vuelo, este debe contar con una recepción de datos entre 0,5 a 1 segundos y situado a 500 Km de zona de vuelo (ver figura 2.56).
- Contar con el conocimiento de la distribución de vértices geodésicos de la RGNP del INEGI materializados sobre el terreno, los cuales servirán de apoyo en los extremos de los bloques formados por las líneas de vuelo planificadas. Es necesario que se cuente por lo menos con 1 punto en cada esquina del bloque (ver figura 2.55). A partir del cubrimiento del cuadrante E14a49B, la distancia entre el receptor instalado en el avión y la base de referencia en todo momento será inferior a 500 Km.

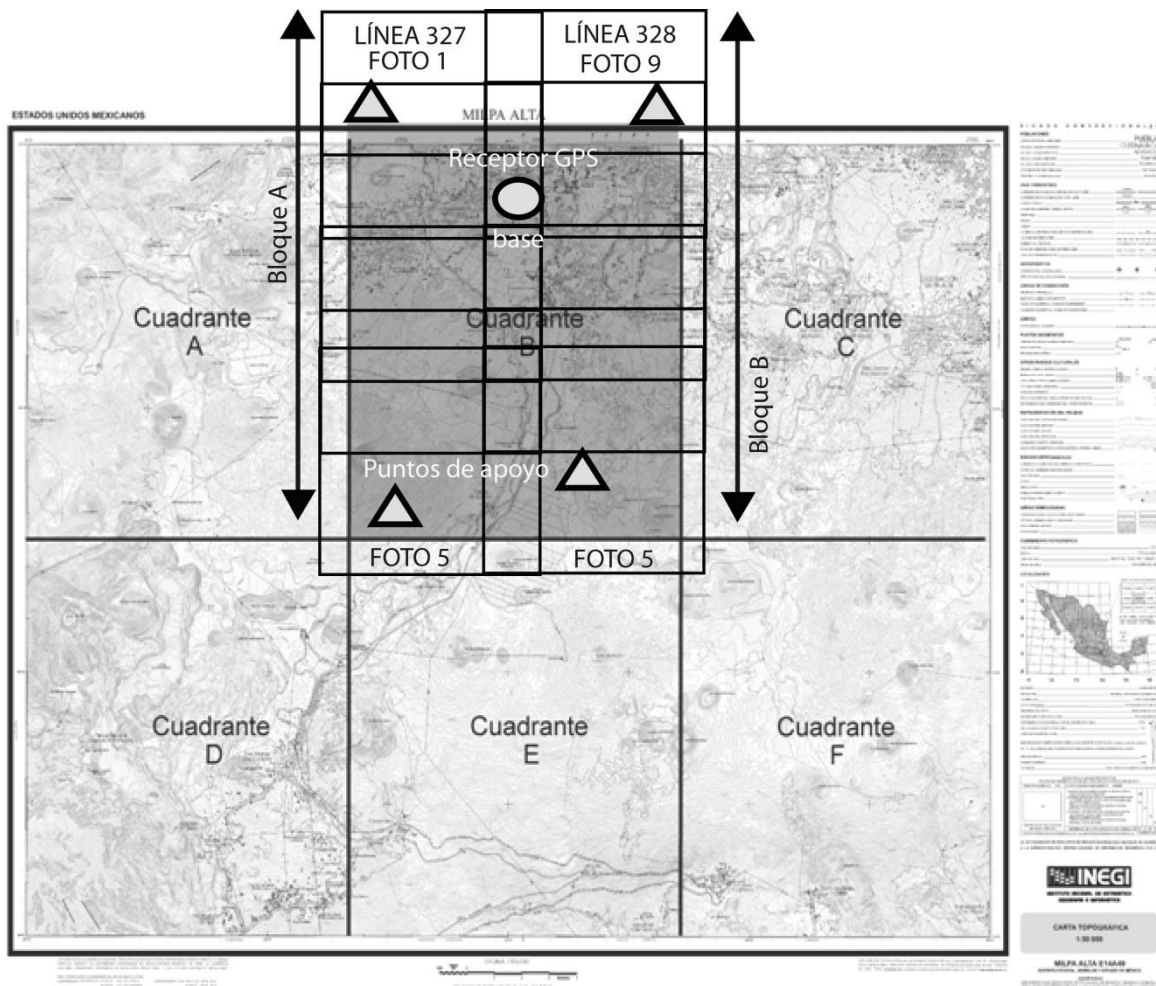


Figura 2.55. Formación de bloques a partir de líneas de vuelo y determinación de puntos de apoyo cinemático.  
(Elaboración propia).

En caso de no existir algún dato de la RGNA o RGNP del INEGI, podrán extraerse valores XYZ de las cartas topográficas de INEGI escala 1:50,000, específicamente para orientar los bloques que corresponden al cubrimiento de la zona de estudio. Posteriormente estos valores deberán ser excluidos de cualquier post-proceso y no podrán ser válidos para efectos de los procesos de aerotriangulación.

En el proceso de interacción, el receptor GPS y la cámara funcionan independientemente, de manera que las observaciones de los receptores GPS se hacen a intervalos de tiempo constantes, y las exposiciones de la cámara se realizan en tiempos diferentes. Como resultado de la interpolación de datos GPS en post-proceso, se obtiene una posición para cada momento de la observación, es decir la trayectoria del avión y se determinan las coordenadas de los centros de cada fotografía.

Para poder interpolar las posiciones de exposición de la cámara de las posiciones GPS, los momentos de exposición de la cámara y los momentos de observaciones de GPS se deberán tomar en una escala de tiempo similar. Con este fin, las

cámaras modernas han adaptado circuitos que producen un impulso eléctrico justo en el momento de la exposición de la cámara.

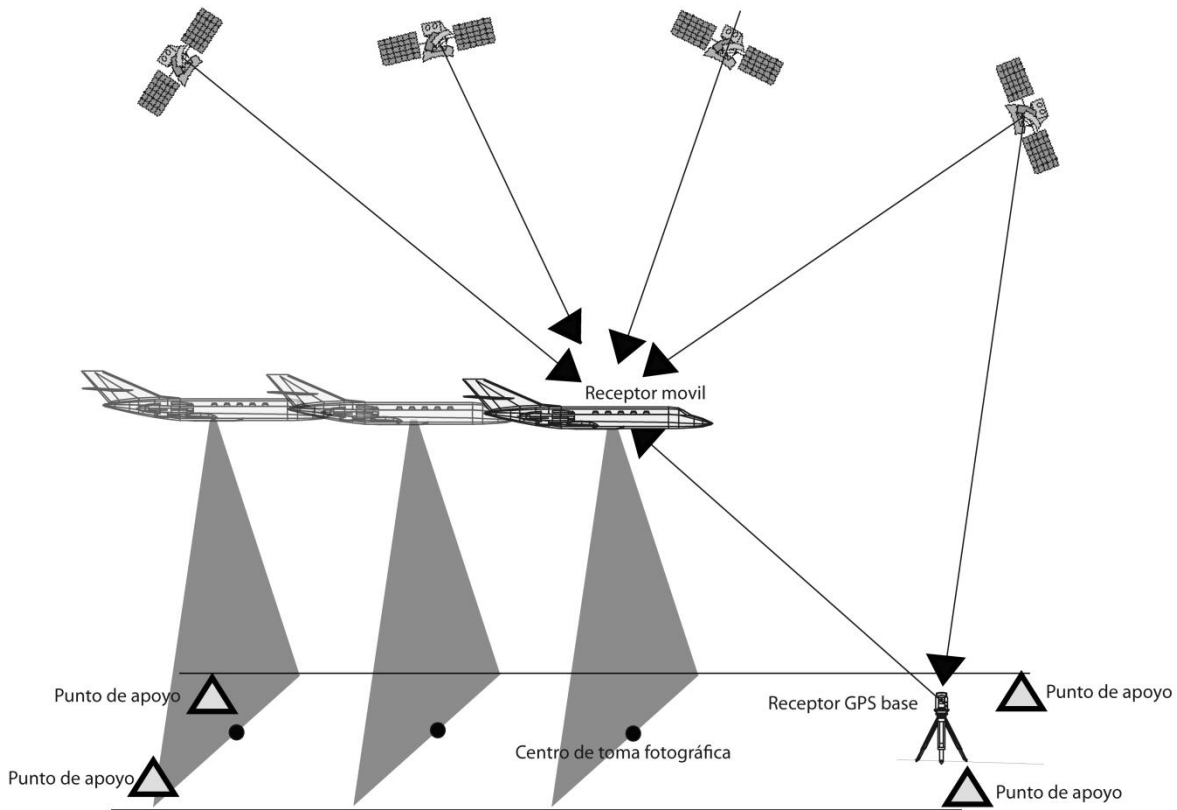


Figura 2.56. Representación gráfica del apoyo aéreo cinemático.  
(Elaboración propia).

Por su parte, los receptores GPS de diversos fabricantes (Sercel, Asteen, Trimble) pueden procesar este impulso. Cuando llega al receptor, libera el registro/grabación del tiempo de recepción. De esta manera los tiempos de exposición de la cámara y los de observación de GPS se producen en una misma escala de tiempo, por lo que las posiciones pueden ser interpoladas para los momentos de exposición de la cámara. El receptor GPS deberá tener una alta capacidad de procesamiento de datos para la posterior interpolación de las funciones de los disparos, registrando cada época para intervalos inferiores a 1 segundo.

Ya sea realizado el vuelo con cámara analógica o digital, nuestro producto final de vuelo, son las fotografías aéreas y los valores de los puntos centrales de las mismas.

#### **2.4.5. Especificaciones técnicas de las fotografías aéreas obtenidas como insumo final de los levantamientos aerofotográficos.**

Cuando hablamos de la fotografía aérea, sea esta panorámica, vertical u oblicua, nos referimos a una imagen fotográfica que representa el registro del haz perspectivo de rayos generados por el objeto de la toma, registrado por un sensor, que en este caso es una cámara métrica y que contiene información, cualitativa y cuantitativa, levantada al momento de la toma para su posterior estudio.

Para satisfacer necesidades propias de este trabajo, utilizaremos fotografías aéreas verticales, a las que denominaremos Fotogramas, ya que este concepto adapta nuestra fotografía a un formato específico que cumple con las características geométricas (ver figura 2.58) y elementos adecuados para su posterior tratamiento fotogramétrico.

Finalmente el producto obtenido es un Fotograma, independientemente del tipo de cámara utilizado, el formato debe contener las siguientes características y elementos:

- a) Proporcionar las condiciones que definen la perspectiva u orientación interna de la fotografía, en función de las características propias de la cámara métrica calibrada a utilizar.
- b) El eje óptico de la cámara coincide con la vertical del lugar del campo fotografiado, por lo que cuando hablemos de Fotogramas, nos referimos a fotografías aéreas con un eje de toma vertical, en donde solo se permite una tolerancia hasta de  $3^{\circ}$  para cualquier dirección.
- c) Está determinado por una proyección cónica o central (ver figura 2.57).
- d) Contiene los principios geométricos de una proyección fotográfica. De gran importancia es este apartado, ya que el elemento sustancial en la utilización de fotografías aéreas en Fotogrametría, radica en la geometría de la fotografía.

Este formato cuenta con una proyección cónica que se determina desde un centro de proyección  $O$  que es el centro de proyección. El negativo es la imagen inversa del objeto del espacio, representado tanto en tono como en geometría, y está situado a una distancia  $c$  igual a la distancia focal también denominada distancia principal.

El positivo se obtiene a partir del negativo y también está situado a la distancia principal del centro de proyección.

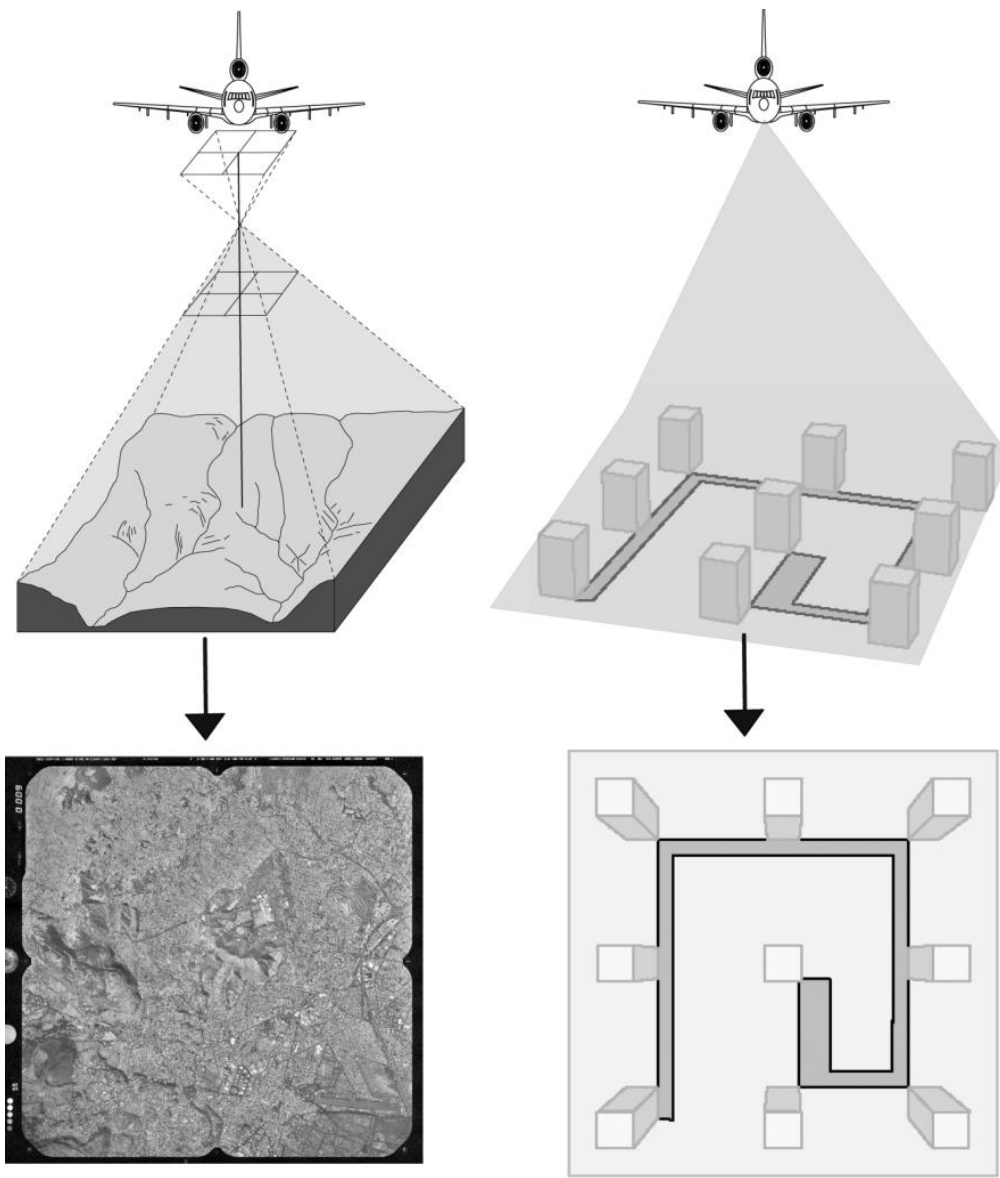


Figura 2.57. Representación gráfica de la proyección central o cónica.  
(Elaboración propia).

La geometría inversa entre el objeto y el negativo puede apreciarse comparando las posiciones de los puntos objeto A, B, C, D con sus correspondientes en el negativo a', b', c' y d', en la figura 2.58.

- e) Existe un área de información al margen de la fotografía (figura 2.59), en la que aparecen datos importantes para identificar el lugar de la toma y detalles técnicos de vuelo y toma. En Fotogramas nacionales, realizados por el INEGI, los datos requeridos son:

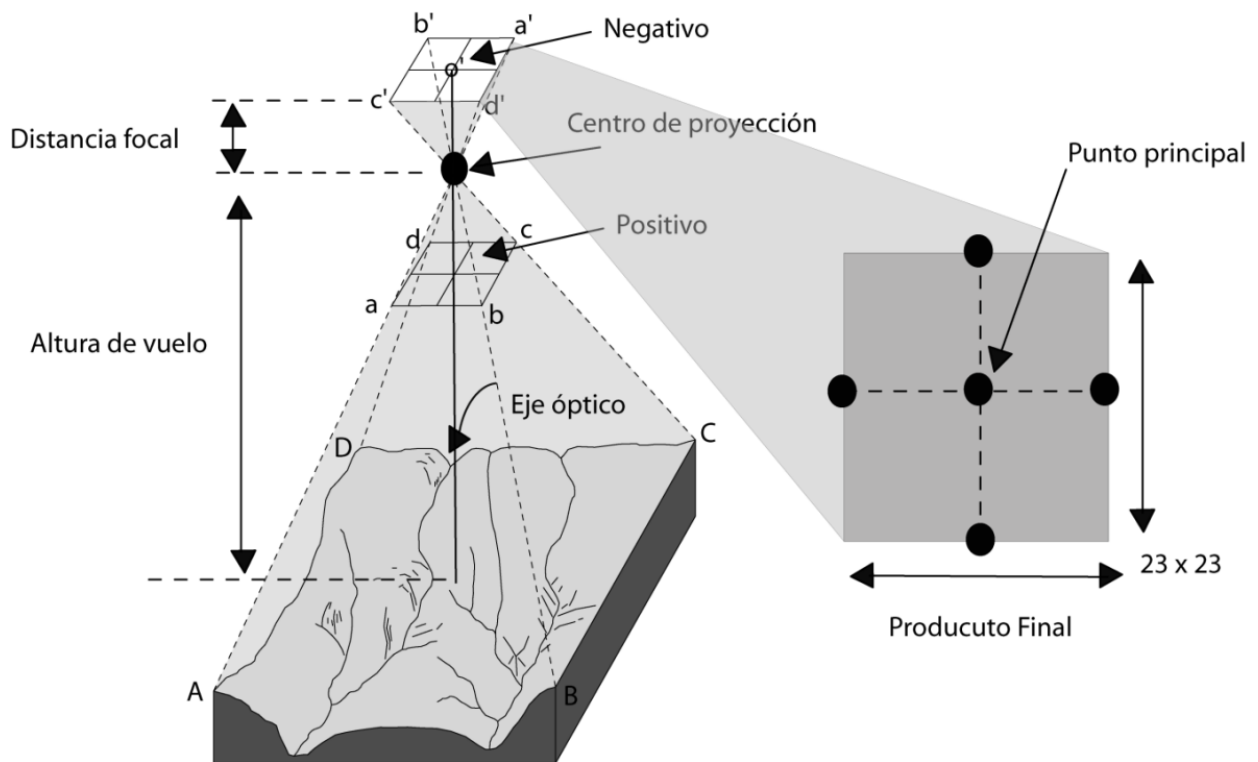


Figura 2.58. Representación de las características geométricas de una fotografía aérea.  
(Elaboración propia).

1. Institución.
2. Proyecto institucional.
3. Escala del levantamiento.
4. Fecha de vuelo.
5. Clave de la carta topográfica escala 1:50,000.
6. Número de línea de vuelo.
7. Número provisional de la fotografía.
8. Datos del FMC.
9. Identificación de la cámara utilizada.
10. Coordenadas n y w.
11. Número de fotografía para armado de fajas o bloques.
12. Altimetro: registra la altura absoluta de vuelo sobre el nivel del mar.
13. Reloj: la indicación de la hora puede ser útil para calcular altura de objetos verticales, como por ejemplo árboles edificios etc., por el método de la sombra.
14. Nivel esférico: se usa para conocer la inclinación de cada fotografía.
15. Marcas fiduciales.

f) Este formato tiene una dimensión específica de 23 x23 (figura 2.57).

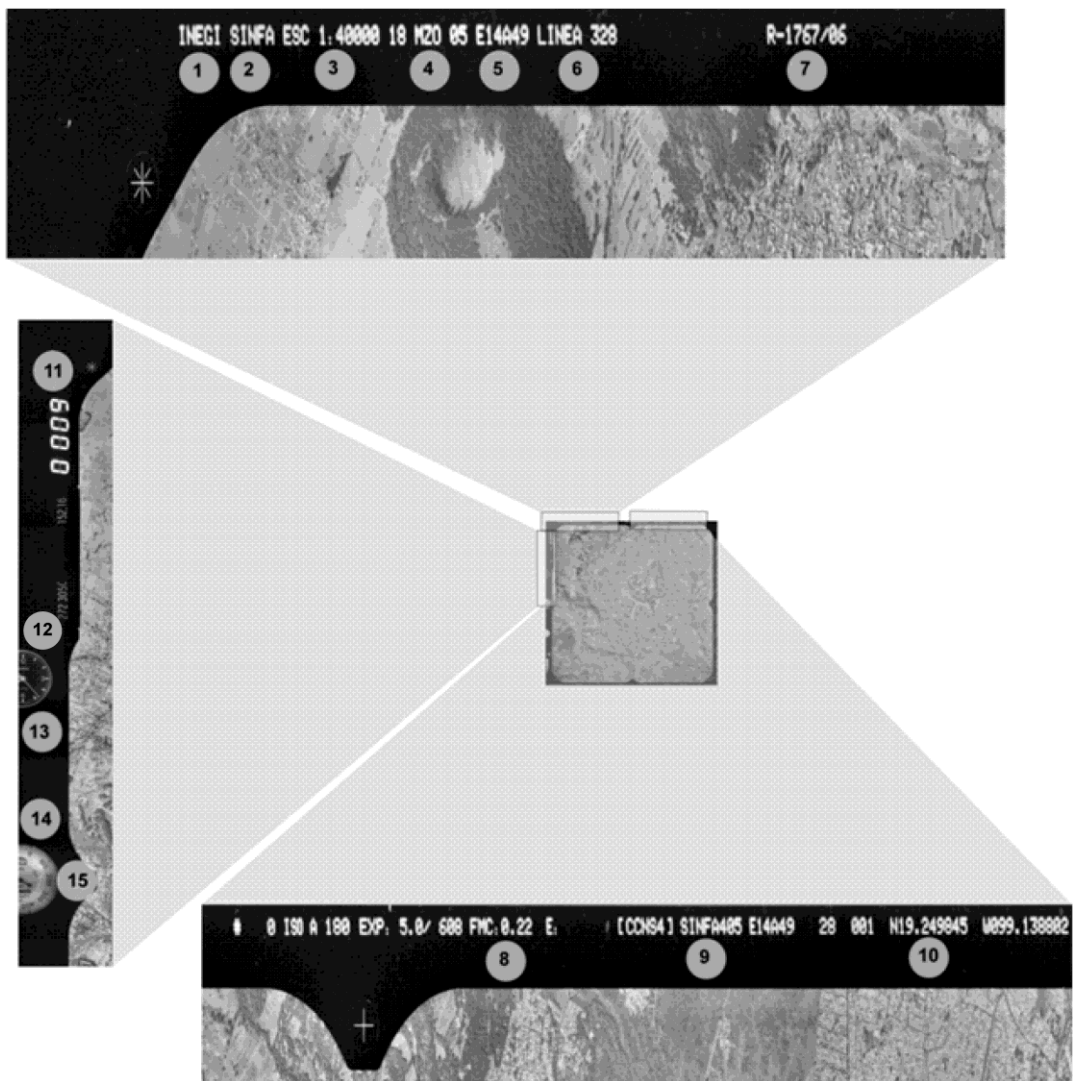


Figura 2.59. Elementos de información pertenecientes al margen del formato de Fotograma.  
(Elaboración propia).

#### 2.4.5.1 Evaluación de la información recolectada.

Como proceso final de este apartado, se requiere hacer una revisión de control de calidad de los fotogramas obtenidos en los siguientes aspectos:

##### a) Especificaciones de procesamiento

Procesamiento de negativos: Los rollos de película deberán procesarse preferentemente en una máquina de procesamiento continuo en forma tal que se asegure un revelado uniforme. Para asegurar los contrastes adecuados en todos los detalles, en ningún lugar del negativo la densidad deberá ser menor o igual a 0.3m por encima de la densidad de la base excepto en el caso de imágenes de puntos extremadamente brillantes, tales como los debidos a reflexiones especulares del sol. La máxima densidad no debe exceder de 1.6 m por encima de la base.



Cada rollo de película aérea debe ser procesado tan pronto como sea posible después que ha sido expuesto, para verificar que las especificaciones de navegación de las líneas de vuelo y la calidad de la imagen cumplen con las presentes normas, como resultado de lo anterior, los negativos deberán ser nítidos y con detalles bien definidos y tener el grado adecuado de contraste para todos los detalles, para permitir observar con claridad tanto las áreas sombreadas como las iluminadas.

Deberán cumplir con las presentes normas, referentes a procesamiento, nubes, sombras, y otro tipo de obstrucciones, rayas de revelado, nieve, marcas estáticas, roturas, raspaduras y otras manchas que pudieran interferir con el adecuado procesamiento.

El procedimiento empleado para procesar la película no deberá tener un efecto dañino sobre las características dimensionales o geométricas de la imagen fotográfica. En ningún momento durante el revelado, fijado, lavado o secado, deberá la película estar sujeta a una tensión y/o temperatura que cause cambios dimensionales diferenciales superiores a 0.02% +/- 15 micrómetros.

Las copias de contacto o fotogramas se harán en papel fotográfico y se someterán a las mismas especificaciones descritas para el procesamiento y calidad de negativos.

#### **b) Arrastre de la imagen sobre la película:**

El arrastre de la imagen sobre la película se detecta como una pérdida de la nitidez en ésta. Al tomar fotografías y encontrarse la cámara en movimiento, será preciso regular el tiempo de exposición en combinación con la velocidad del avión, para que el arrastre que se origine se encuentre dentro de unos límites que se consideren tolerables, dentro del concepto de nitidez fotográfica.

Las causas que pueden motivar el arrastre de la imagen son:

- Desplazamiento de la cámara en la dirección del vuelo.
- Vibraciones de la cámara transmitidas por el avión.
- Balanceo del avión.

#### **c) Deriva:**

Se denomina así, al desplazamiento horizontal con respecto al azimut que debería tener una aeronave para el momento de la toma aerofotográfica y el cual es provocado por la acción del viento.

#### **d) Nubosidad.**

El área total de una fotografía no debe estar cubierta en más de un 7% por nubes o sombras de nubes, y ninguna nube individual deberá cubrir más del 3% del área fotográfica. Las nubes o sombras de nubes no deberán cubrir los puntos

principales ni sus homólogos. Para el conjunto de una línea o bloque, la nubosidad y las sombras promedio no deberán exceder del 7% del área y deberá estar exenta de marcas estáticas, humo, bruma y nieve. En casos de áreas urbanas, no deberán existir nubes o sombras sobre las mismas.

#### **2.4.6. Especificaciones técnicas para la ejecución del apoyo terrestre.**

El objetivo fundamental para la ejecución del apoyo terrestre se dirige al proceso de aerotriangulación fotogramétrica, en donde se requiere conocer las coordenadas terrestres de una serie de puntos referidos a la delimitación de los modelos estereoscópicos generados a partir de la adecuada representación de las fotografías aéreas utilizadas para determinado proyecto.

Para la ejecución de este apoyo terrestre es necesario realizar trabajos de planificación en gabinete y operativos en campo.

##### **2.4.6.1. Planificación en gabinete de los puntos de control terrestre requeridos para el apoyo de campo fotogramétrico.**

Al levantamiento para obtener estas coordenadas horizontales (XY) y verticales (Z) necesarias para determinar la posición de estos puntos se conoce con el nombre de apoyo de terrestre fotogramétrico.

El número mínimo teórico de puntos para poder efectuar estas operaciones es de tres, dos puntos en XYZ para poder llevar a cabo el ajuste de la escala del modelo y un tercero en Z al centro, el cual es proporcionado por el GPS aerotransportado o la reconstrucción matemática de la aerotriangulación, de manera que sumados a los dos anteriores, hacen un total de tres puntos de coordenadas conocidas y necesarios para poder efectuar la nivelación del modelo, pero en la práctica se pueden añadir otros puntos para tener un adecuado control del modelo.

Para densificar el cubrimiento, se pueden incluir dos puntos más, como se observa en la distribución de la figura 2.61, donde aparecen conjuntamente cuatro puntos con coordenadas XYZ, dos puntos de control para cada límite del modelo estereoscópico que aseguran la continuidad y el ligue con el modelo antecedente o precedente, permitiendo de este modo verificar los movimientos del modelo y las deformaciones post-proceso de la imagen resultante. Esta distribución es la más adecuada o ideal para posteriores procesos fotogramétricos.

La elección de los puntos de apoyo (PA) fotogramétricos se realiza de forma aproximada en gabinete, donde con ayuda de la cartografía existente y las fotografías aéreas obtenidas del vuelo, se van examinando los entornos donde pueden elegirse en campo.

Inicialmente se debe determinar las características y ubicación de los puntos de apoyo de campo para el control terrestre.

Los puntos de apoyo deben estar ubicados en una zona próxima a las esquinas del modelo, siendo la mejor ubicación aquella que minimice la distancia a las esquinas del modelo. La razón es bastante sencilla, la determinación de las coordenadas de los puntos del terreno a partir de puntos del modelo se puede realizar con mucha precisión en el interior del polígono formado, aumentando progresivamente la imprecisión en su determinación conforme nos alejamos al exterior de dicho polígono.

A partir de lo anterior, podemos especificar algunos parámetros básicos para determinar los puntos del terreno que han de servir para el apoyo fotogramétrico, y son los siguientes:

- Los puntos deben ser fácilmente identificables en los fotogramas en los que sirvan de apoyo.
- El punto debe, de ser posible, el cruce de dos alineaciones rectas (cruce de caminos, veredas, terracerías, líneas eléctricas, etc.).
- Preferentemente deben ser detalles artificiales permanentes (edificaciones, postes de comunicaciones, detalles de infraestructuras).
- Los puntos de apoyo deben situarse en zonas llanas y despejadas (para poder realizar con mayor exactitud procesos fotogramétricos) y de fácil accesibilidad y comunicación (para minimizar los costes del levantamiento).

De acuerdo con estas especificaciones y criterios de ubicación antes expuestos, se procede a elegir los puntos a levantar. Dando continuidad al ejemplo de la carta topográfica E14A49B, el primer trabajo en gabinete es realizar el marcado en todas las fotografías aéreas de las zonas ideales para realizar la toma de valores XYZ en campo y asignando una clave que identifique a cada medición, como se muestra en la imagen 2.60.

En caso de existir varios posibles puntos a escoger, tomaremos aquellos que puedan servirnos con mayor practicidad para poder ser utilizados en varios modelos y así economizar el apoyo de campo.

Un aspecto que no se debe omitir en ningún trabajo de apoyo terrestre y previo a la hora de efectuarlo, es conocer la existencia de redes geodésicas, su densificación, actualización y el estado de materialización en el terreno. En aquellas zonas donde estas redes son escasas o no existen, o bien en zonas con una gran vegetación y terreno accidentado, lo ideal es incrementar los trabajos de control terrestre.

Con esta planificación previa, se pretende diseñar una red básica por medio de triangulaciones o poligonales de precisión, asociada a la red geodésica nacional determinada por el INEGI, lo cual permite iniciar con una red confiable y de adecuada actualización.

La red básica tiene el objetivo de servir de enlace con la Red Geodésica Nacional Activa y Pasiva del INEGI, y los puntos de apoyo fotogramétrico, que van a constituir el apoyo de campo.

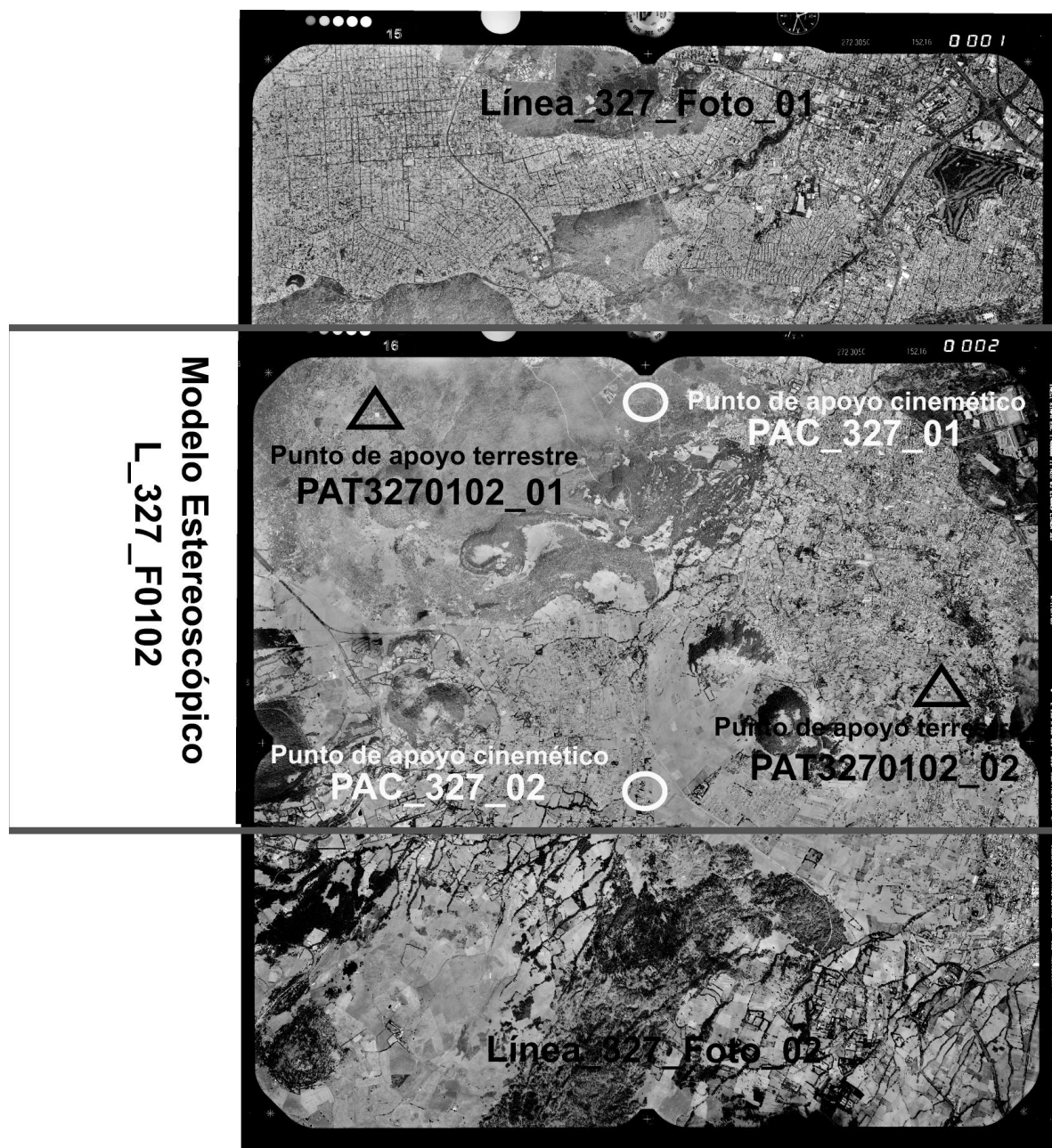


Figura 2.60. Fotografías aéreas con puntos de apoyo fotogramétricos.  
(Elaboración propia).

Finalmente cabe mencionar que en esta etapa se realiza la recopilación de efemérides precisas correspondientes a los días de medición u observación para las comparaciones realizadas en el post-proceso.

#### **2.4.6.2. Ejecución operativa de los trabajos de campo.**

El objetivo de este operativo es obtener puntos de apoyo terrestre necesarios para garantizar la exactitud y precisión cartográfica requerida en la escala del proyecto. En referencia a que el vuelo fotogramétrico se realizó con apoyo aéreo cinemático, los puntos de apoyo necesarios se reducen sustancialmente, este sistema permite hasta un mínimo de cuatro puntos distribuidos en las esquinas del bloque, pero es mucho riesgo realizarlo con esta mínima densificación, ya que en la aerotriangulación pueden ser discriminados algunos de estos puntos y no habría suficiente control o apoyo terrestre para solventar tal situación.

Dentro de los insumos necesarios para el inicio del trabajo de campo se encuentran los siguientes:

- a) Material cartográfico de diversas escalas y fuentes de elaboración, que tiene el objetivo de brindar un panorama de ubicación al personal de campo de la zona a trabajar.
- b) 1 juego de fotografías aéreas de contacto de todo el cubrimiento de la zona a trabajar, con los puntos de apoyo terrestre marcados.
- c) Equipo fotográfico digital para el registro de las cédulas técnicas.
- d) Equipo de medición con receptor GPS con recepción mínima de la portadora L1.

Para el inicio de las mediciones, se deben de seguir estrictamente las siguientes condicionantes:

- a) Las mediciones GPS realizadas para este levantamiento estarán ligadas a la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI. La información deberá estar referenciada al sistema de coordenadas UTM y al datum ITRF-92, elipsoide GRS 80, así como bancos de nivel de orden apropiado referidos a nivel medio del mar. Por lo anterior el levantamiento en ningún momento deberá ser autónomo y debe cumplir con todos los requerimientos para estar determinado de modo relativo-estático y estas características están estipuladas en el apartado 2.3.4.2., así como contar en post-proceso con las correcciones diferenciales (DGPS) señaladas en el apartado 2.3.4.1.
- b) La nivelación física del tripié que soporta a la base nivelante, donde se monta la antena receptora (ver figura 2.61), debe realizarse adecuadamente a partir del método clásico de la burbuja nivelante en cada medición.
- c) La toma de las mediciones GPS iniciará al momento de haber conectado el colector de datos a la antena receptora, ya que muchos colectores pueden funcionar autónomos en modo de navegación y no medición, y se debe de garantizar el montaje del colector sobre la abrazadera mecánica de terreno empotrada al trípode (ver figura 2.62).

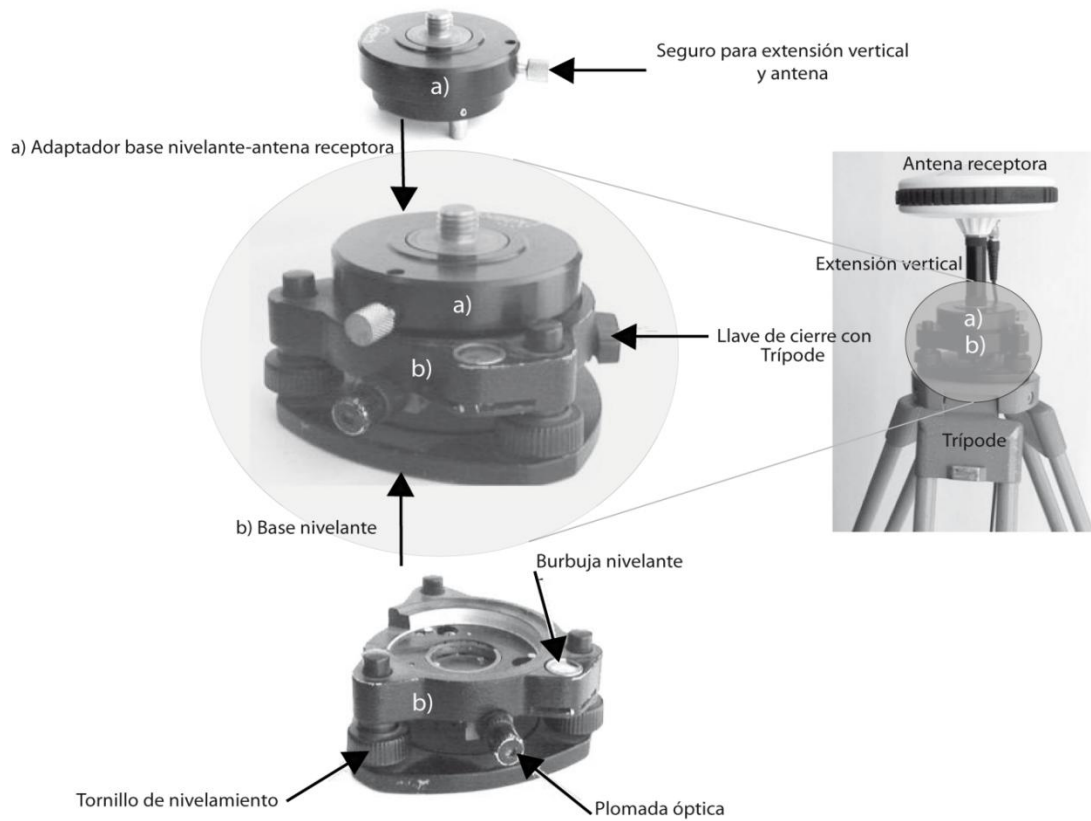


Figura 2.61. Componentes necesarios para la nivelación en la toma de mediciones GPS. (Elaboración propia).



Figura 2.62. Componentes necesarios en la conexión y empotramiento del colector de datos. (Elaboración propia).

Como proceso complementario de las mediciones GPS es necesario realizar una serie de registros fotográficos panorámicos del lugar donde fue realizada la toma (ver figura 2.63), esto con el fin de otorgar una mejor visión de las características del terreno en la determinación de posiciones de puntos medidos en el proceso de aerotriangulación (ver figura 2.64).



Figura 2.63. Registros fotográficos panorámicos  
A) Registro fotográfico del instrumento con la rotulación de la clave del punto.  
B) Registro fotográfico panorámico del mismo punto.  
(Elaboración propia).

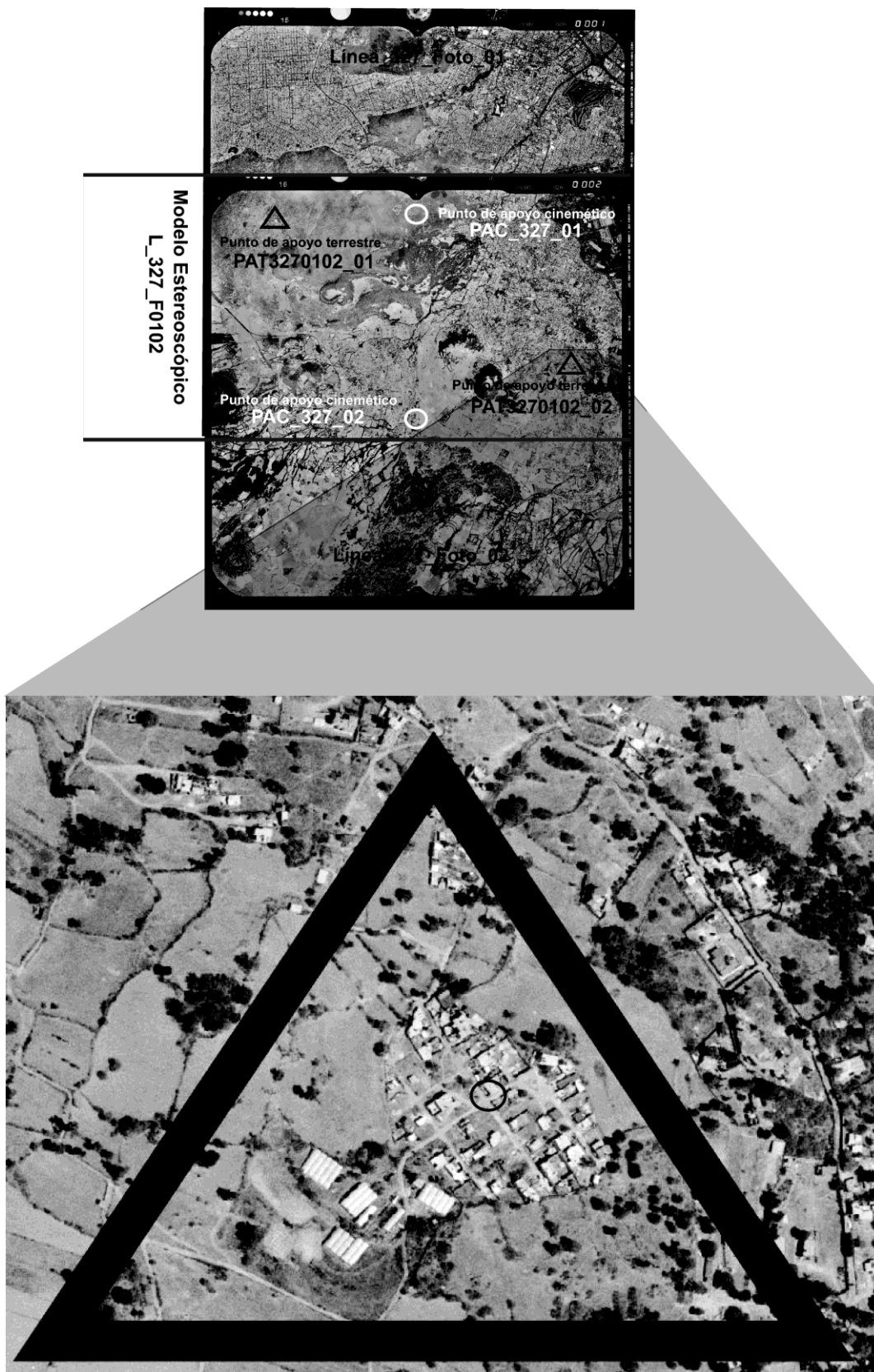


Figura 2.64. Amplificación de la fotografías aéreas con puntos de apoyo fotogramétricos. (Elaboración propia).



Actualmente existe software cartográfico y fotogramétrico que permite realizar ampliaciones (zoom) de imágenes con muy buen detalle, por lo que en el proceso de la determinación de posiciones de los puntos medidos son indispensables los registros fotográficos panorámicos, habiendo sustituido el método de pinchar con un alfiler el punto medido en las fotografías aéreas.

#### **2.4.6.3. Post-proceso para las mediciones realizadas en campo.**

Inicialmente este trabajo consiste en controlar la reciprocidad entre los nombres de las estaciones ingresadas en campo con los nombre de los archivos almacenados en el colector de datos. A partir de esto se asegura que no exista algún error en la lectura del encabezado de los archivos y poder convertir adecuadamente del formato propietario o nativo, el cual está condicionado a los receptores por la marca del instrumento utilizado, como puede ser Ashtech, Trimble, etc., a un formato estándar como lo es el RINEX (Receiver INdependent Exchange).

Una perspectiva teórica que se aplica adecuadamente a la descripción del post-proceso, la presenta Virginia Mackern en su tesis doctoral, donde comenta que existen dos enfoques básicos en el procesamiento de datos GPS:

- a) Procesar las mediciones sin diferenciar.
- b) Construir dobles diferencias de fase.

Si se es muy específico en la definición y en la aplicación de los modelos matemáticos involucrados para la lectura de las mediciones tomadas en campo, y en ausencia de una sincronización precisa y adecuada entre los relojes de los satélites y receptores, no hay una diferencia conceptual entre uno u otro enfoque, sino los valores de posicionamiento absoluto que contienen.

Operativamente, los valores de posicionamiento entre los enfoques mencionados oscilan entre los 20 cm. de diferencia. Por lo que si se trabaja en la construcción de redes geodésicas o sistemas de referencia a nivel nacional o mundial requiere la precisión de dobles diferencias de fase.

Para efectos prácticos en el post-procesamiento de las mediciones y tomando en cuenta que la escala de las fotografías aéreas tomadas es de 1:40,000, podríamos omitir el post-procesamiento, siempre y cuando se garanticen que las mediciones fueron tomadas con las especificaciones del apartado 2.4.6.2, pero compensando que al momento de realizar la lectura de estos valores en el proceso de aerotriangulación, se efectúa una pérdida de precisión por errores de visión humana, como se explica en el apartado propio de aerotriangulación, debemos valorar si el error es tolerable en el insumo final.

En realidad, la mayoría del software de procesamiento de datos modela las dobles diferencias de fase y habiendo realizado la recopilación de efemérides precisas correspondientes a los días de medición u observación para las comparaciones, el post-proceso se realiza solo ingresando los datos apropiados al software, pero es

indispensable que todas las mediciones sean procesadas en conjunto y no aisladas, esto garantiza que los cálculos de los ajustes y correcciones sean compensados en general a todas las mediciones. Entre las marcas de software que dominan el mercado comercial encontramos Trimble Geomatics Office o Ashtech Solutions Software.

Finalmente y como producto definitivo de esta etapa se deben integrar memorias electrónicas de cálculo y cédulas técnicas con expediente fotográfico (ver figura 2.65) conteniendo la información de ubicación, coordenadas, croquis, fotografías de los puntos levantados y un juego de fotografías de contacto con los puntos del apoyo terrestre marcado.

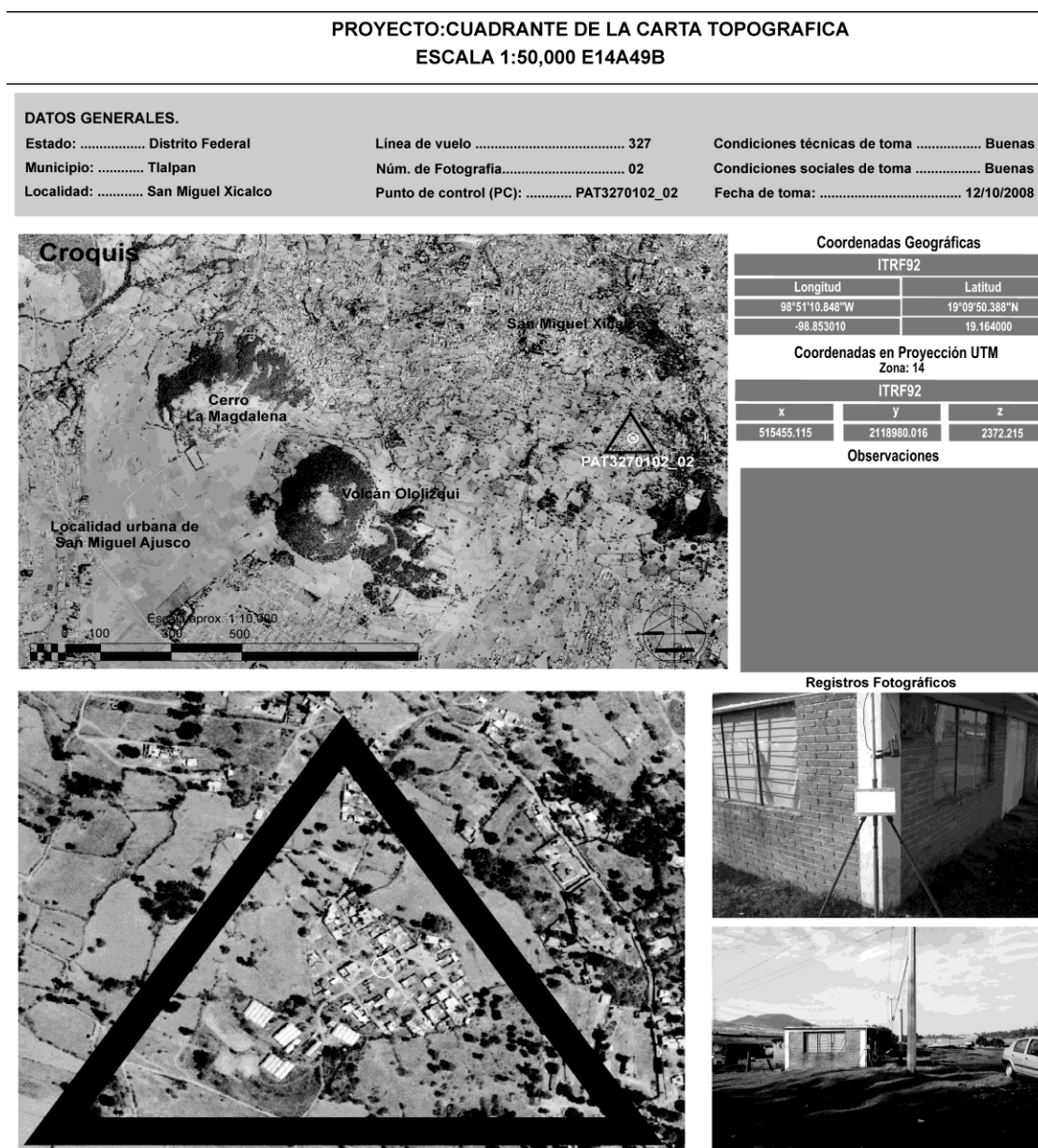


Figura 2.65. Cedula técnica correspondiente al punto PAT3270102\_02.  
(Elaboración propia).

## **CAPITULO 3. PROCESO FOTOGRAMÉTRICO.**

Este proceso se encuentra organizado por los apartados teóricos y tecnológicos necesarios para documentar y especificar lo necesario para realizar el proceso de extracción de información geométrica y temática de objetos del mundo tridimensional a partir de imágenes digitales bidimensionales de esos objetos, y así poder generar insumos fotogramétricos como MDE, ortofotos y curvas de nivel automáticas, indispensables para la generación de cartografía básica. Por lo anterior, este capítulo se dedica a la explicación de los siguientes apartados:

- La explicación teórica de la relación existente entre la Fotogrametría y la Fotoidentificación, así como de los principales modelos teóricos y divisiones de la Fotogrametría, vigentes en la actual Fotogrametría Digital.
- A partir de la división de la Fotogrametría por un flujo de trabajo y la semi-automatización de sus procesos, se presentará los componentes de un Sistema Fotogramétrico Digital (DPS), el cual permite el tratamiento de datos e imágenes digitales a partir de un Sistema de Adquisición de Imágenes Digitales y una Estación Fotogramétrica Digital.
- Estipular que para el adecuado funcionamiento de una Estación Fotogramétrica Digital se realiza la utilización de un Sistema Físico (Hardware), un Sistema Lógico (Software) y un Sistema de Visión Artificial que permite la posibilidad de realizar descripciones y mediciones de objetos sobre la imagen digital.
- Ampliar la explicación teórica de los procesos de orientación y aerotriangulación como la base matemática y fundamental para la adecuada proyección espacial en la generación de modelos digitales de elevación (MDE) y a partir de ellos, la formación de ortofotos y la extracción de información altimétrica del terreno (curvas de nivel).

### **3.1 Concepto de Fotogrametría y Fotoidentificación.**

Antes de la invención de la Fotogrametría, y hasta nuestros días, la realización de estudios geográficos ha utilizado como fuente de información a la fotografía aérea, además ha basado gran parte de su análisis en una estructura cartográfica sustentada en las mismas. Por lo anterior, la Fotogrametría y la Fotoidentificación han abordado el estudio y utilización de la fotografía aérea en forma conjunta, pero con un diferente enfoque.

La Fotogrametría se define como la ciencia y el arte de determinar el tamaño y la forma de los objetos a partir del análisis de imágenes registradas en una película o medio electrónico<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Jorge Delgado García. Fotogrametría Digital, instrumentos, métodos, productos y aplicaciones. Pág. 2.

La Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos (ASPRS) la define como: “El arte, la ciencia y la tecnología para obtener información confiable acerca de los objetos físicos y del medio ambiente a través de procesos de grabación, medición e interpretación de imágenes fotográficas y patrones de grabación de energía electromagnética radiante y otros fenómenos”.

La Fotointerpretación más que una ciencia o una disciplina formal, se considera como el arte o técnica dedicada a examinar las imágenes fotográficas con el propósito de identificar los diferentes componentes del paisaje a partir de tres elementos esenciales:

- a) Una observación directa, en la que la fotografía solo es utilizada como un mapa base detallado, el cual es simplemente observado, diferenciando sus elementos principales.
- b) Un proceso de segmentación y análisis de las partes que componen un todo y establecer su interrelación con el fin de identificar el elemento estudiado en base a las características de sus componentes individuales.
- c) Un estudio detallado de los elementos que aparecen en la fotografía, con el fin de obtener una correcta evaluación de los mismos, esto mediante un elevado nivel de conocimientos teóricos, elementos para el análisis (tamaño, forma, tono y color, textura y patrones de interpretación) y experiencias profesionales por parte del profesionalista dedicado a este análisis.

En resumen, la Fotogrametría basa su objeto de estudio en hacer mediciones precisas en fotografías para determinar distancias, ángulos, áreas, volúmenes, elevaciones, tamaños y formas de objetos, por lo que se ha desarrollado en un enfoque cuantitativo, que abarca desde la planificación de un proyecto aerofotogramétrico, hasta la elaboración de insumos básicos como ortofotos y MDE utilizados en la generación de cartografía.

La Fotoidentificación trata principalmente del reconocimiento e identificación de objetos, señalando su significado a través de sistemáticos análisis desde una perspectiva cualitativa. Esta técnica complementa el proceso fotogramétrico en la obtención de los insumos antes mencionados.

Entre Fotogrametría y Fotointerpretación no existe una separación estricta, por el contrario, ambas están estrechamente ligadas y no puede hablarse de una sin incluir conceptos de la otra.

### **3.1.1. Antecedentes de la Fotogrametría.**

En los años de 1850 a 1900, la fotografía fue vista como una fuente muy importante de información sobre los objetos, que no dependía de lo que un observador pudiera captar, interpretar, transcribir o dibujar de sus características, sino que esta era la representación fiel de los objetos en el momento de la toma.

Pero a pesar de no tener un gran avance tecnológico, en esta época se establecen los principales fundamentos teóricos de la fotogrametría, vigentes en la actual fotogrametría digital.

El método de Laussedat se conoce con el nombre de fotogrametría terrestre ordinaria, esta utiliza fotografías de eje óptico horizontal, esto significa que dicho eje es perpendicular a la dirección del hilo de una plomada, estuvo en vigor durante casi medio siglo. El fundamento científico que utilizó Laussedat fue el de realizar impresiones en una placa de una cámaras fotográficas de la época, para obtener proyecciones perspectivas; en donde el centro del objetivo a fotografiar coincide con el punto principal de la toma **O** y las placas ocuparían la posición exterior **Q** (figura 3.1).

La placa revelada es un negativo.

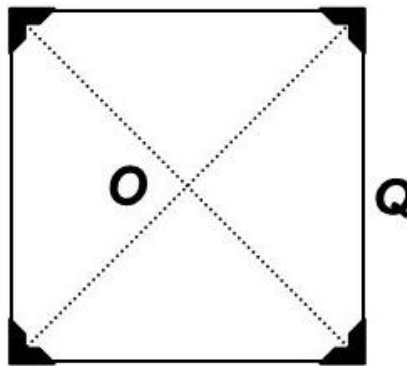


Figura 3.1. Esquema de un negativo.  
(Elaboración propia).

La representación de la perspectiva se explica en la figura 3.2, en donde:

- **O**: Representa el objeto fotografiado (A).
- **P**: Es el plano de la fotografía (Positivo), es el plano perpendicular al eje de la cámara, situado frente al lente, a la distancia focal.
- **N**: Placa de la cámara (Negativo).
- **E**: Eje de la cámara, es la línea que pasa por el centro del lente de la cámara y es perpendicular tanto al plano de la imagen en la cámara (negativo) como al plano de la fotografía (positivo).
- **F**: Distancia focal, es la distancia perpendicular desde el centro del lente de la cámara hasta el plano de la fotografía.
- **PP**: Punto principal, es el punto de intersección del eje de la cámara con el plano de la fotografía (positivo) o con la placa de la cámara (negativo).
- **LH**: Línea horizontal, línea que representa el eje óptico.

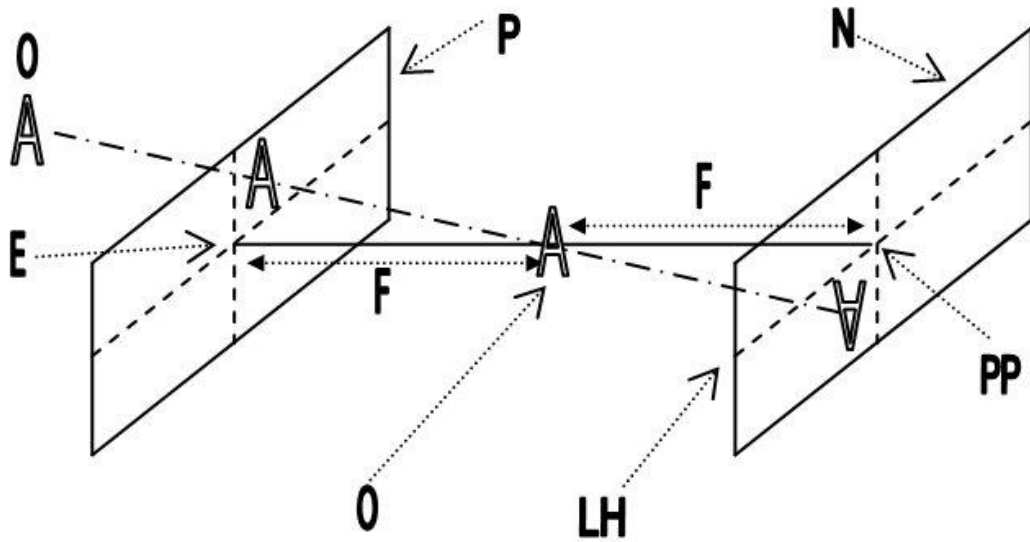


Figura 3.2. Fundamento de la fotogrametría terrestre ordinaria.  
(Adaptado de Domínguez García Tejero 1993).

El principal problema del método de Laussedat fue la dificultad de identificación de un mismo punto en fotografías obtenidas desde emplazamientos distintos (Domínguez García, 1993). Este inconveniente disminuyó con el descubrimiento de los planos nucleares, conocido con el nombre del teorema de Terreno-Hauck, que aun sigue siendo el fundamento de los más modernos y perfeccionados aparatos de restitución. Este teorema de Terreno-Hauck consiste en dos placas enumeradas (1 y 2 respectivamente), cuyos planos se prolongan hasta su intersección según la recta  $a-b$ , como se muestra en la Figura 3.3.

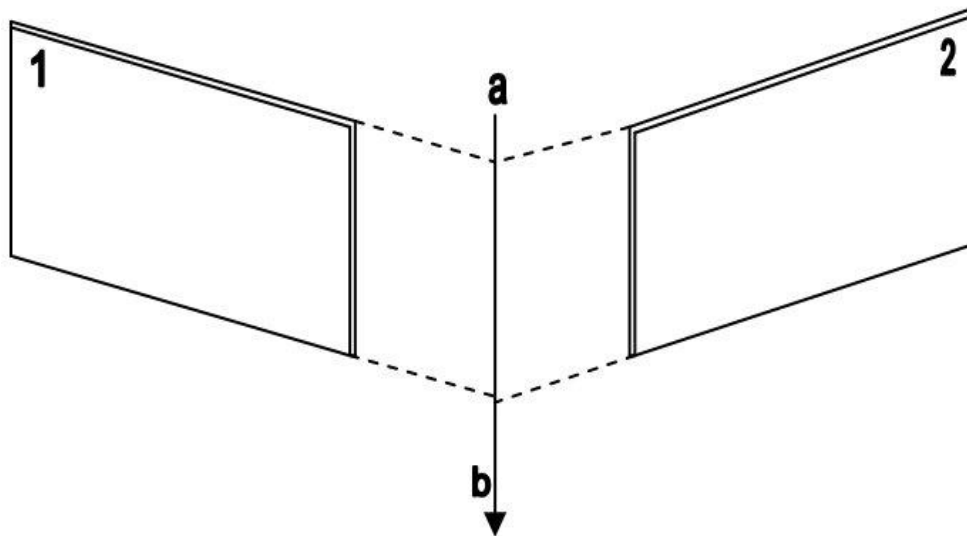


Figura 3.3. Representación gráfica del teorema de Terreno-Hauck.  
(Elaboración propia).

En la placa 1 aparecerá la toma  $r'$  del punto de vista  $R'$  de la placa 2, ahora en esta quedara proyectado el punto  $r$  que pertenece a la toma  $R$ ; en donde los puntos  $r$  y  $r'$  denominados puntos nucleares, no son otra cosa que la intersección de los planos de las placas con la base  $R R'$ , que en el teorema recibe el nombre de eje nuclear (figura 3.4).

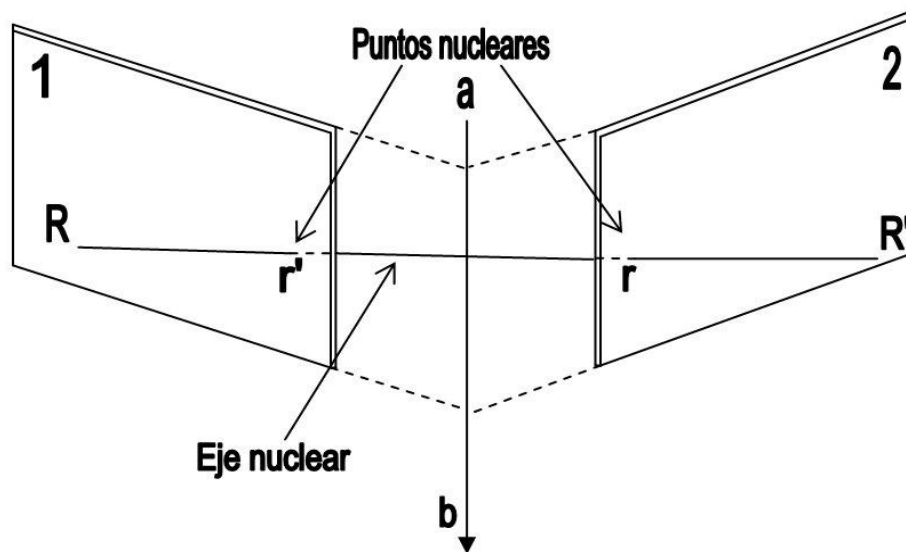


Figura 3.4. Representación gráfica de los puntos nucleares.  
(Elaboración propia).

Posterior al desarrollo de esta base teórica, comienza el perfeccionamiento del instrumental tecnológico empleado, segmentando a la Fotogrametría en analógica, analítica y digital.

### 3.1.2. Divisiones de la Fotogrametría.

El rápido progreso tecnológico de la fotogrametría y sus múltiples aplicaciones ha hecho necesario dividirla para una mejor comprensión. Existen muchas divisiones teóricas que han evolucionado a partir de la incorporación de la informática a sus procesos, pero una división práctica en el desarrollo de este trabajo se presenta a partir de su método en el flujo de trabajo y la posibilidad de semi-automatizar sus procesos.

Así se puede distinguir entre Fotogrametría analógica, basada en analogías mecánicas y Fotogrametría electrónica en la que los sistemas óptico-mecánicos se sustituyen por un sistema informático encargado de la realización de los cálculos. La Fotogrametría electrónica consigue una importante mejora en cuanto a la precisión de los resultados y la flexibilidad del equipo, utilizando sistemas óptico-electrónicos, fotografías de diferente origen (desde fotogramas obtenidos a partir de escaneos o directamente digitales) y diferentes características de toma.

Dentro de los métodos fotogramétricos electrónicos se pueden distinguir la Fotogrametría analítica y la Fotogrametría digital:

- a) La Fotogrametría Analítica aborda la resolución informatizada de los cálculos fotogramétricos, utilizando como información de entrada las medidas realizadas sobre la fotografía (en formato analógico). La utilización del apoyo informático permite la rápida obtención de las relaciones existentes entre los puntos del objeto y sus correspondientes imágenes así como los errores del sistema (Gosh, 1988).
- b) La Fotogrametría Digital se caracteriza por utilizar información (imágenes) en formato digital. Este aspecto va a determinar muchas de las ventajas e inconvenientes que tienen estas técnicas, definidos por los importantes cambios conceptuales y metodológicos que serán analizados en los sucesivos capítulos. Así Ackermann (1991) indica que " con las cámaras digitales y el procesamiento de imágenes digitales, la Fotogrametría trabajará en un entorno completamente diferente, caracterizado por diferentes equipos, técnicas, oportunidades y por una forma distinta de pensar".

Para efectos de este trabajo, trataremos los fundamentos y conceptos de la fotogrametría digital, ya que el avance científico y el desarrollo tecnológico alcanzado, ha reducido los costos para este tipo de tecnología, con esto, las instituciones nacionales gubernamentales y privadas dedicadas a esta actividad, pudieron realizar el cambio tecnológico de equipos analíticos a digitales desde la década pasada.

Ackermann (1992) describe el poder de las herramientas, que han posibilitado la rápida ascensión de la Fotogrametría Digital. El avance en la tecnología informática ha sido un factor determinante. Ackermann indica la necesidad de crear un sistema basándose en la precisión, la eficiencia, la fiabilidad y la universalidad, también hace hincapié en la fuerte convergencia entre la Fotogrametría y la Teledetección.

La evaluación del estado actual y del desarrollo de la Fotogrametría Digital debe tener en cuenta diversos aspectos y consideraciones de diferentes naturaleza (Ackermann, 1996):

- a) Como mínimo, la Fotogrametría Digital debe proporcionar el nivel de rendimiento de la Fotogrametría Analógica y Analítica. Las estaciones de trabajo digitales deben tener al menos las prestaciones de los restituidores analíticos de imágenes digitales. Alcanzar estos mínimos no supone ninguna ventaja por parte de la Fotogrametría Digital con respecto a los anteriores métodos, debido a la inercia de los sistemas productivos, salvo que sean considerablemente más rápidos y más baratos.
- b) La base esencial de las nuevas tecnologías radica en la posibilidad de alcanzar mayor rendimiento en la generación de productos que las técnicas preexistentes. La Fotogrametría Digital se centra en la automatización de los procesos fotogramétricos. Los primeros ejemplos de tareas susceptibles de ser automatizados son la aerotriangulación digital, la generación de modelos digitales de terreno mediante la aplicación de técnicas de



correlación de imágenes, la generación de ortofotos, sin olvidar diversas medidas y funciones de orientación. Esta automatización será la que supondrá el auge o no de la Fotogrametría Digital con respecto a la Fotogrametría Analítica. La calidad y economía de los productos obtenidos será decisiva para marcar la aceptación de las nuevas técnicas por los usuarios.

- c) La cartografía digital y la extracción de objetos a partir de las imágenes: digitales necesitará la intervención humana durante algún tiempo. Por lo que en una primera aproximación no parece que presente ninguna ventaja particular con respecto a las técnicas analíticas, sin embargo, es necesario tener en cuenta que aunque los procesos no sean completamente automáticos si lo son muchas de las tareas que junto con las herramientas de procesamiento de la imagen y edición (que son una gran ayuda), contribuyen a acelerar el proceso.
- d) Otra ventaja importante en favor de los sistemas digitales es su concepción como sistemas totales, lo que permite el tratamiento de imágenes de muy diversa procedencia en un sólo equipo, desde imágenes de rango cercano (cámaras digitales) hasta imágenes aisladas en plataformas espaciales (imágenes de satélite).
- e) Como se ha indicado en el punto 2, la aceptación de la Fotogrametría Digital pasa por el rendimiento técnico y cualitativo de los productos que de ella se derivan, no obstante, existe un factor que es de gran importancia, siendo un valor añadido, los sistemas digitales pueden integrar, fusionar y comparar conjuntos de datos de diferentes procedencias, dando lugar a un abanico muy amplio de operaciones dentro y fuera del contexto cartográfico. Así el sistema fotogramétrico se puede considerar como un elemento básico en los sistemas de información geográfica tridimensional.

A partir de lo anterior determinaremos un Sistema Fotogramétrico Digital, que en base a los fundamentos metodológicos, un sistema de adquisición de imágenes y una estación fotogramétrica digital, se utiliza para la obtención de información espacial de objetos a partir de imágenes en formato digital.

### **3.2. Sistema Fotogramétrico Digital (DPS).**

La Asociación Internacional de Fotogrametría y Teledetección (ISPRS) establece la siguiente definición para los Sistemas de Fotogrametría Digital (DPS, por sus siglas en inglés, Digital Photogrammetric Systems): "un sistema de Fotogrametría Digital se define como un conjunto de software y hardware cuyo objetivo es la generación de productos fotogramétricos a partir de imágenes digitales mediante técnicas manuales y automatizadas". Todos los componentes y la estructura de operación en el flujo de trabajo de este sistema, se especifican a partir de los siguientes procesos:

1. Entrada de datos mediante un sistema de adquisición de imágenes digitales, a partir de un escáner fotogramétrico o por método directo y compatibilidad en la importación de ficheros o archivos vectoriales.
2. Estaciones de Trabajo Fotogramétricas Digitales (DPWS), descripción de hardware, software y el sistema de visión estereoscópica.

### 3.2.1. Sistema de adquisición de imágenes digitales.

El proceso inicial consiste en determinar los datos de entrada de información espacial (figura 3.5), por lo que es necesario contar con dos elementos fundamentales para iniciar cualquier trabajo bajo este esquema, y son los siguientes:

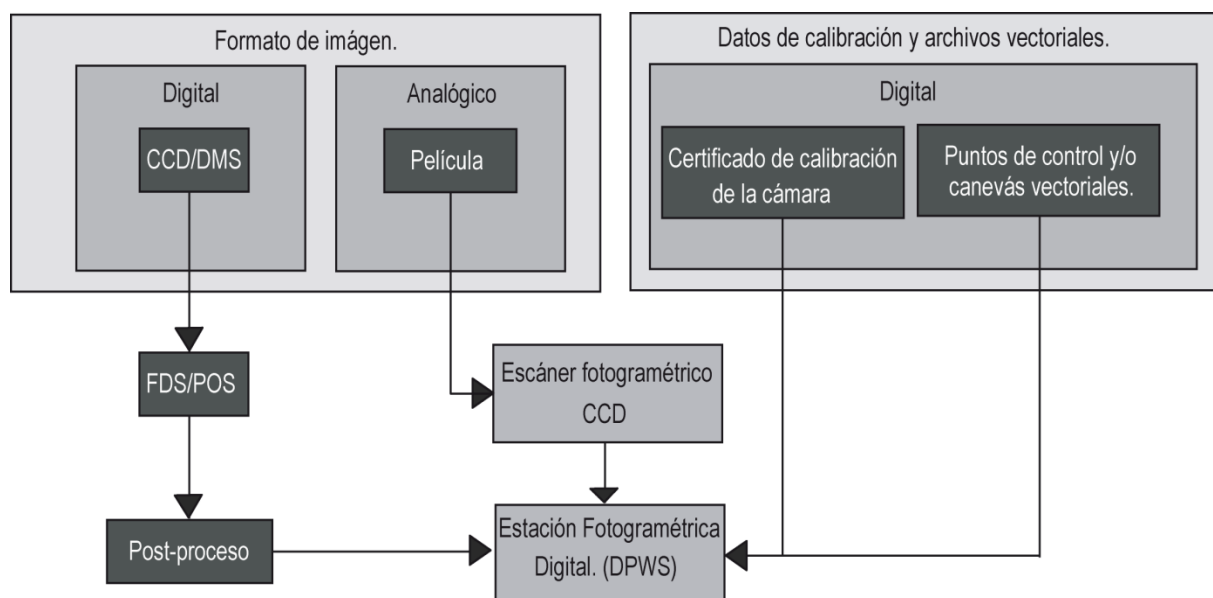


Figura 3.5. Datos de entrada para iniciar el flujo de trabajo fotogramétrico. (Elaboración propia).

#### 3.2.1.1. Determinación del formato de imagen de entrada.

Si en la planificación del proyecto fotogramétrico se determinó la utilización de una cámara fotogramétrica analógica, el producto es una imagen que tiene una distancia focal de 152 mm y un formato de 230mm x 230mm, registrada de forma instantánea y almacenada en la película fotográfica. Por lo que será necesaria la digitalización de las imágenes analógicas mediante un escáner fotogramétrico (ver figura 3.10), el cual garantiza la conservación de la calidad geométrica y radiométrica de las imágenes analógicas, exigibles para cualquier trabajo fotogramétrico.

El escáner fotogramétrico basa su funcionamiento en el tipo de sensor electro-óptico (fotodetector) utilizado. Los tipos de fotodetectores utilizados para actividades fotogramétrica son los basados en el principio CCD y estos escáneres son denominados FBS (Flat Bed Scanner) o planos. En estos escáneres la película se coloca entre dos cristales para asegurar su mantenimiento lo más plana y mejor protegida posible. Los dos cristales se encuentran montados en una plataforma

móvil, que se acciona por motores al iniciar el escaneo, desplazándose con respecto al sensor y la iluminación. Estos escáneres con fotodetectores CCD tienen, al igual que las cámaras aéreas digitales, la opción de operar en forma lineal o matricial (ver figura 3.6).

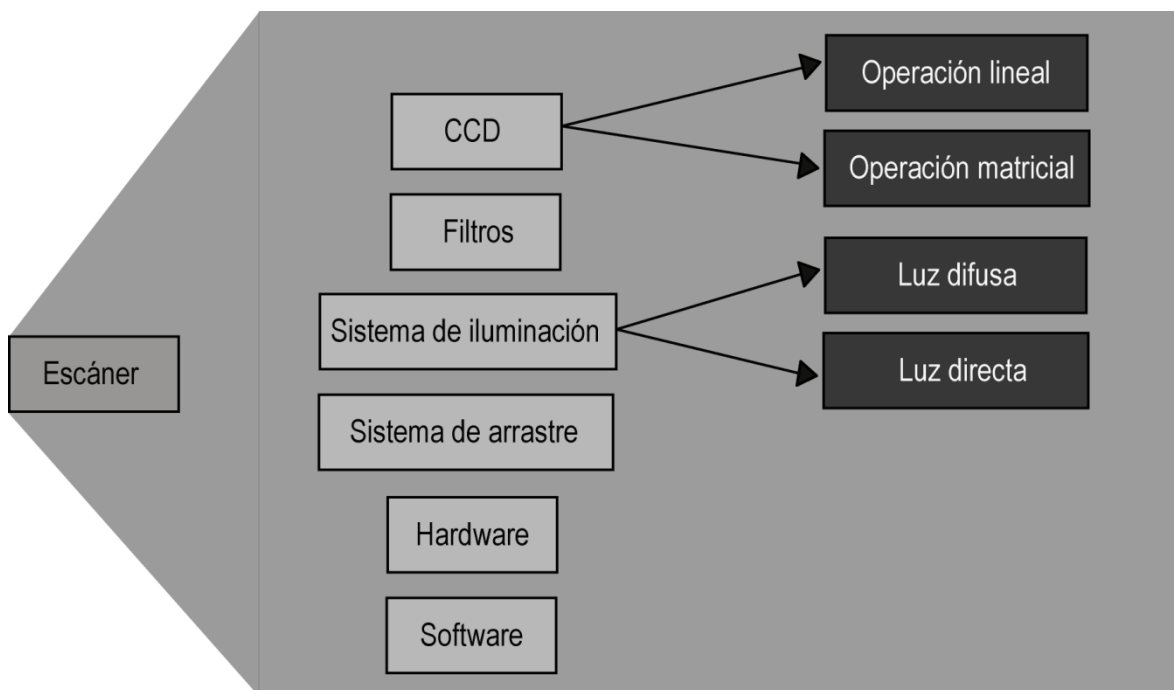


Figura 3.6. Elementos de un sistema de adquisición de imágenes, a partir de un escáner fotogramétrico. (Elaboración propia).

Los CCD lineales barren al negativo en bandas paralelas, se moverán por la imagen de un modo continuo formando una línea de imagen y pasando a una nueva posición para la formación de la siguiente línea o tira.

Los sensores o CCD de matriz cuadrada digitalizan zonas del negativo y posteriormente las unen numéricamente, para ello requiere un caneavá de cruces de coordenadas conocidas. Este sensor recorre el negativo, formando la imagen con la unión de diferentes sub-imágenes recogidas por la matriz. Este tipo de trabajo que realizan se denomina “de captura y avance”. La matriz avanza hasta una posición predeterminada, recoge la información para conseguir una imagen fragmentada y así a la siguiente posición.

Los escáneres suelen tener cuatro filtros, tres de ellos para las bandas de color (RGB) y una cuarta que nos permite la obtención de escala de grises. Además, muchos sistemas incorporan filtros de eliminación de infrarrojos, ya que los componentes electrónicos son sensibles a éstos y afectan de una manera muy importante a la resolución radiométrica.

El sistema de iluminación es un elemento de gran importancia, ya que debe proporcionar una cantidad adecuada de luz RGB. La iluminación debe ser independiente del tiempo de funcionamiento del escáner y conseguir uniformidad

en la cantidad de luz generada por la lámpara, para esto se ha implementado un circuito de control.

Existen dos tipos de sistemas de iluminación en los escáneres fotogramétricos, de luz directa y de luz difusa.

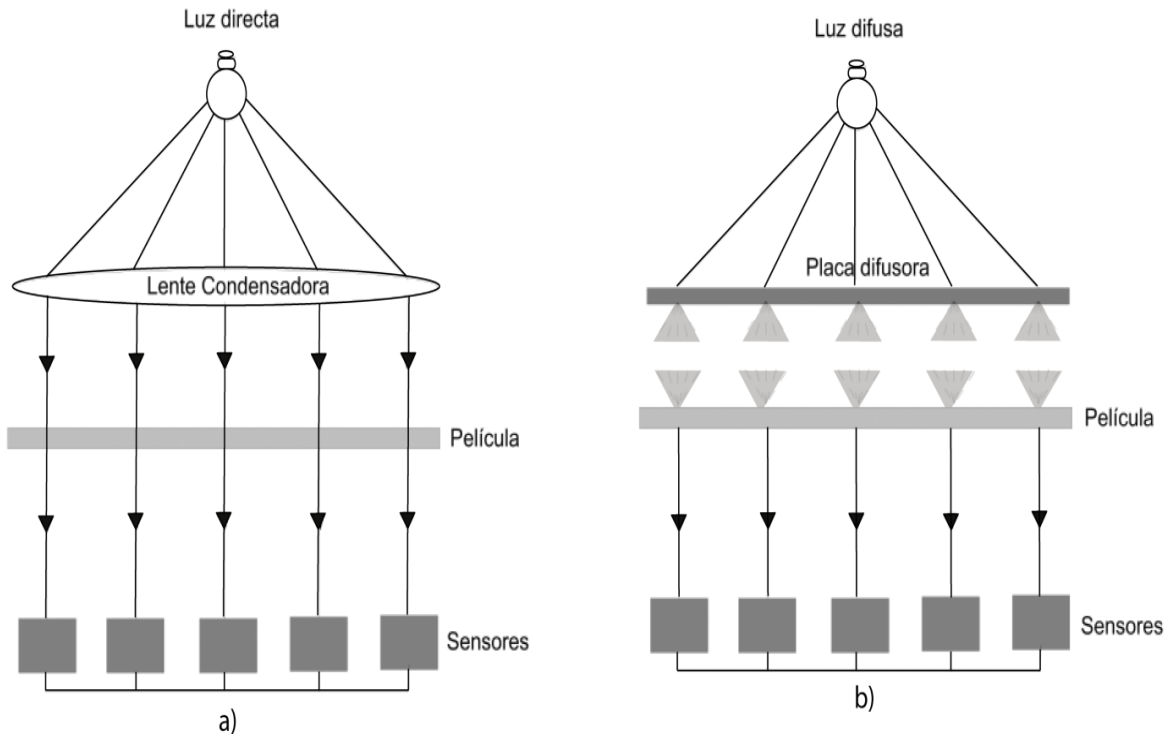


Figura 3.7. Sistemas de iluminación.  
(Adaptado de Pérez Álvarez, Juan Antonio. Apuntes de Fotogrametría II, pág. 138).

En la luz directa (figura 3.7a) se utiliza un condensador para ampliar más o menos la fuente de luz antes de que incida en la lente de proyección. Una ventaja de este tipo de iluminación es que es bastante económica, no obstante, produce una difusión de calor bastante importante, pudiéndose producir deformaciones en el insumo final. Para poder reducir este efecto se utilizan fibras ópticas para transmitir la luz desde una lámpara ajena. La fuente de luz directa genera un haz de luz con una apertura muy pequeña, de esta manera se obtiene una gran profundidad de campo, lo cual hace que este sistema sea poco sensible a los problemas de desenfoque.

El sistema más utilizado es el de luz difusa (figura 3.7b), ya que permite que los rayos lleguen de forma más homogénea y repartida al sensor, esto se obtiene a base de placas de vidrio difusoras, utilizando un luz fluorescente, la cual tiene un efecto difusor.

Para la automatización del proceso de digitalización, se incorpora un sistema de arrastre o alimentador (figura 3.9), tanto automático como manual, que permite la digitalización a partir de un rollo.



Figura 3.8. Lámpara de luz difusa.  
(Fuente: [www.cartesia.org](http://www.cartesia.org)).

Normalmente este sistema es utilizado en grandes proyectos y permite un ahorro importante tanto de tiempo como económico. De la misma manera, la digitalización directamente desde un rollo supondrá un aumento en la calidad de la imagen final obtenida. Se habrá evitado en la película un gran número de ralladuras, polvo y manchas de grasa que se suelen transferir tanto en el proceso de cortado como en el de obtención de la diapositiva.

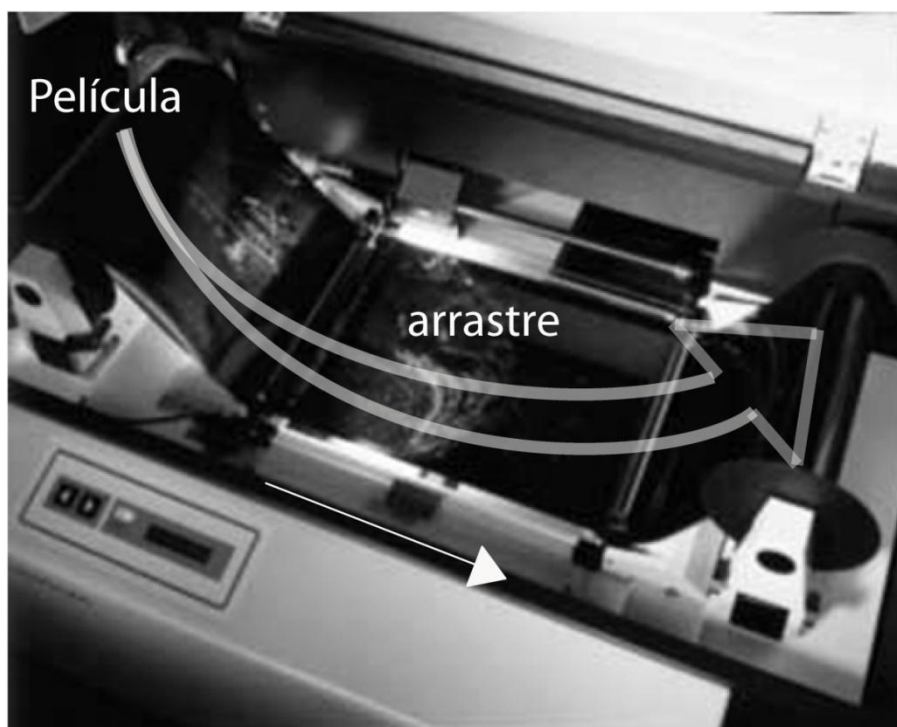


Figura 3.9. Sistemas de arrastre en escáneres planos.  
(Fuente de imagen: [www.cartesia.org](http://www.cartesia.org), esquema de elaboración propia).

Esto incide en el ahorro considerable de posibles problemas en la aerotriangulación semi-automática posterior, elaboración de MDE semi-automáticos o posibles retoques o ediciones de las ortofotos, antes de su entrega final.

En lo que respecta al Hardware, los equipos informáticos que acompañan a los escáneres fotogramétricos deben ser de última generación, ya que las imágenes digitales obtenidas tienen gran cantidad de información que se traduce en archivos de gran tamaño, y su tratamiento, procesamiento, transmisión y almacenamiento podrían suponer un grave problema (figura 3.10).

La totalidad de los equipos montados, además de poseer la capacidad de almacenar y gestionar una gran cantidad de información, deben contar con una adecuada compatibilidad con las tarjetas gráficas y monitores que utilizan.

Estos equipos, además de llevar programas propios de escaneo, están dotados de la posibilidad de ecualizar y corregir histogramas de datos radiométricos, convertir a diferentes formatos de imágenes digitales o hacer balances de color.

También permitirán la transformación de película negativa a imagen digital positiva tanto en Color como en Blanco/Negro.

#### **3.2.1.2. Características de los escáneres fotogramétricos:**

Los escáneres tienen una serie de características que son definitorias para poder determinar su condición de fotogramétricos, estas son:

- a) Características generales de fabricación: Será de especial importancia la estabilidad en todo el sistema. Por ello, como característica de fabricación se pide estabilidad en la energía y estabilidad mecánica en los desplazamientos del sensor. Se espera uniformidad en el sistema de iluminación (estabilidad energética) ya que la cantidad de luz deberá de ser constante durante el proceso de digitalización y esa falta de estabilidad produciría serios defectos radiométricos. Esta se consigue mediante el control de la temperatura en diferentes partes del escáner.
- b) Los sistemas de refrigeración del sensor permiten que no se produzca un aumento de ruido en la imagen. La estabilidad geométrica es fundamental para obtener las precisiones requeridas en estos tipos de trabajos. Los desplazamientos del sensor pueden perder calidad geométrica influenciada por el polvo, por falta de calibración mecánica o defectos de engrase, los cuáles producirán defectos geométricos graves sobre las imágenes digitales.

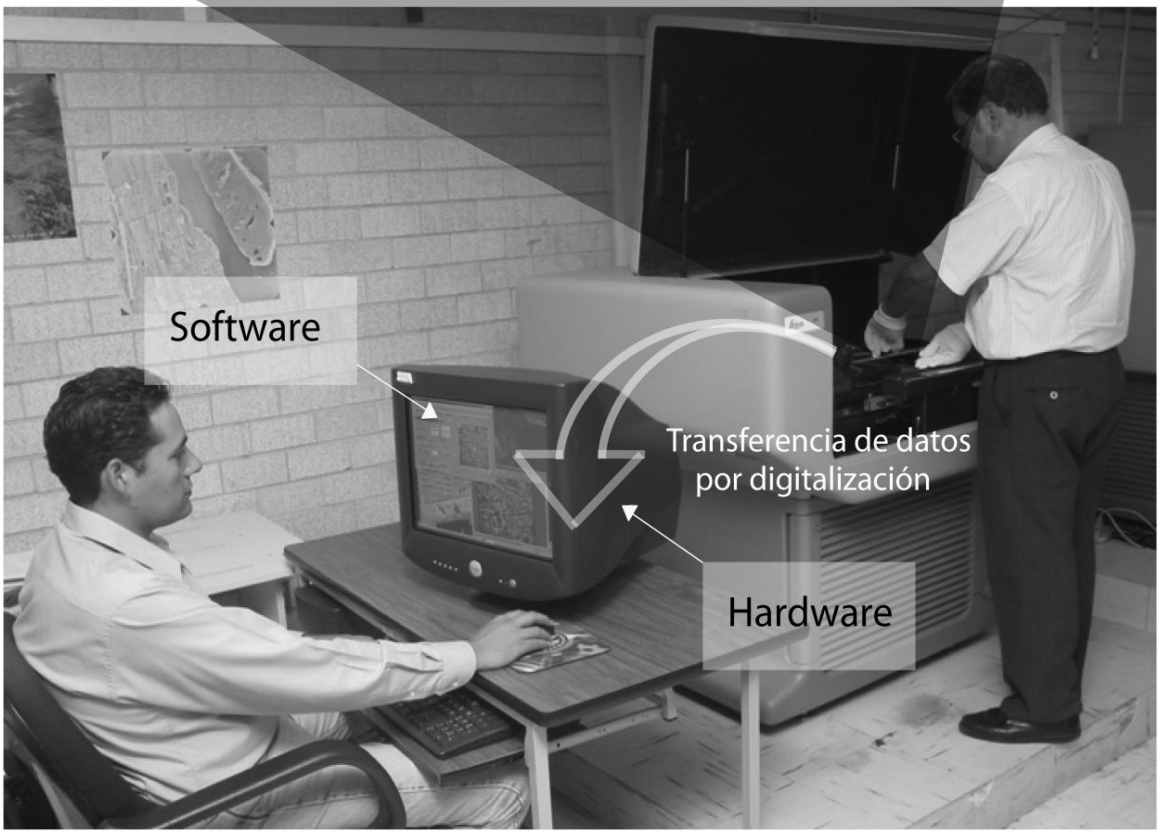


Figura 3.10. Sistemas de adquisición de imágenes, a partir de un escáner DSW 300. (Fuente de imágenes: Manual de fotogrametría Digital, INEGI 2003, esquema de elaboración propia).

- c) Resolución geométrica: Con esta resolución se determina la precisión de las imágenes digitales y por tanto la precisión del escáner. Dicha característica viene dada por la resolución y la geometría. La resolución constituye la explotación métrica de las imágenes por parte del escáner, es decir la resolución máxima que alcanza el escáner. Una mayor resolución significa un menor tamaño de píxel, siendo éste la unidad elemental de información gráfica. Con la geometría se determina la precisión con la cuál el escáner coloca o posiciona cualquier elemento, punto o píxel dentro de la imagen. La resolución geométrica del escáner va a depender fundamentalmente de la gama a la que pertenezca el escáner así como del trabajo que se pretenda realizar.
- d) Resolución radiométrica: Para evaluar la calidad radiométrica de una imagen digital será necesario evaluar un parámetro denominado "bit number" el cuál es la unidad básica de información digital y se expresa de la siguiente manera:

$$bit = \log_2 I$$

Donde I es la cantidad de intensidad luminosa que llega al film expresada en lux. El número de niveles de grises o de niveles de información se expresa como:

$$G = 2^m$$

Donde m es el bit, y se acepta comúnmente que m=8 debido a que de esta manera se hace corresponder la unidad de información gráfica el píxel con la unidad de almacenamiento informático el byte, y además porque el ojo humano solo es capaz de distinguir hasta 200 niveles de grises y la mejor correspondencia son los 256 que se obtienen de esta manera. La resolución o calidad radiométrica es un factor fundamental ya que para los siguientes procesos en los que intervendrán las imágenes digitales, sobre todo procesos automáticos, pueden producir falta de precisión geométrica. La definición o ruidos de estos valores pueden influenciar en la precisión de la medición.

Una de las propiedades que establece la calidad radiométrica de una imagen digital es el rango dinámico, a mayor rango dinámico mejor reparto dentro del histograma de frecuencias y por tanto mejor contraste en las imágenes. Los rangos de los escáneres oscilan entre 0.1-2.5D para escalas de grises y 0.2-3.5D para el color, los cuales son suficientemente altos asegurando una correcta calidad radiométrica. Otra propiedad es la función de transferencia de modulación, que busca referenciar el contraste de un píxel con sus vecinos. Se indica la reducción de contraste de una onda sinusoidal patrón para varias frecuencias de muestro.

- e) El ruido es la última propiedad a tratar, el cual se define como el error en la determinación de los píxeles sea cual sea su fuente. Se conoce que a mayor nivel de señal mayor ruido. Los escáneres de luz difusa producen un 20% menos de ruido que los que utilizan luz directa.



### **3.2.1.3. Funcionamiento de los escáneres fotogramétricos.**

Los escáneres fotogramétricos utilizan un sistema de iluminación superior, normalmente luz difusa, la cual incide sobre la película a digitalizar. Dicha luz sufre una transformación al pasar a través de la película la cual es recogida por un fotosensor denominado CCD.

El CCD es un conjunto de elementos fotoeléctricos que detectan la luz y cuyo número y disposición depende del tipo de escáner. Los sensores fotoeléctricos producen un voltaje proporcional a la cantidad de luz que reciben. La luz que pasa a través de la película es entonces recibida por estos sensores que interpretan la cantidad de luz que la película les manda.

Un punto blanco en la película permite que pase la mayor parte de la luz que recibe y por lo tanto produce una respuesta de alto voltaje de salida, mientras que un punto negro, lo que hace es absorber la mayor parte de la luz, al fotosensor la cantidad de luz que le llega es mínima y por lo tanto produce una respuesta de bajo voltaje de salida. Los dos extremos de la escala de grises originan voltajes iguales pero con signo diferente.

El siguiente paso consiste en la transformación de estos voltajes de salida analógicos del CCD en valores digitales. En el escáner fotogramétrico un transformador analógico digital convierte el voltaje de salida de cada elemento del CCD en una combinación de bits por píxel que representa la cantidad de luz reflejada. En nuestro caso, con 256 niveles de gris, se tiene una gama entre el negro (00000000) y el blanco (11111111). Cada lectura de los elementos del CCD representa una exploración completa de una fila de píxeles.

### **3.2.1.4. Problemáticas de los escáneres fotogramétricos.**

Los principales problemas para conseguir imágenes con una adecuada calidad geométrica y radiométrica para trabajos fotogramétricos digitales son:

- a) Iluminación: Debe haber una uniformidad, estabilidad y estricto requerimiento en generar luz blanca. Todo el sistema está diseñado para que la iluminación sea la mínima posible, fundamentalmente en transparencias. Se debe tomar en cuenta el control sobre el calentamiento en partes sensibles.
  
- b) Resolución radiométrica: El problema se enfoca en el aumento de la escala de grises en la captura y posterior reducción mediante software apropiado a la escala estándar de 256 valores. Esta mejora de la resolución radiométrica se realiza ampliando el número de bits a 10 - 12 (1024-4096) y posteriormente con el tratamiento se reduce a 8 bits (256). La finalidad de aumentar la resolución radiométrica es ampliar el rango dinámico a intervalos: 0,1 - 2,5 D (B y N) y 0,2 - 3,5 D (Color).

- c) Velocidad: la velocidad definida por el usuario según la calidad y requerimientos de la imagen debe presentar alta sensibilidad. La presencia de polvo, defectos de engrase y el mal funcionamiento mecánico deben ser controlados por test periódicos. Dentro de este apartado tienen gran importancia las vibraciones.
- d) Calibración: Procedimientos de calibración tanto para la mejora de la calidad geométrica como radiométrica de la imagen son imprescindibles con el fin de conseguir que estas calibraciones se incorporen a la unidad de barrido.

Los test de calibración se realizan mediante placas cuadrículadas (grid plate). Generalmente se miden dos placas, según muestra la figura 3.11. Las placas contienen dos columnas en los bordes y se aplican a todos los fotogramas, su calibración permite controlar los errores debidos a la variación de frecuencias (posición mecánica).

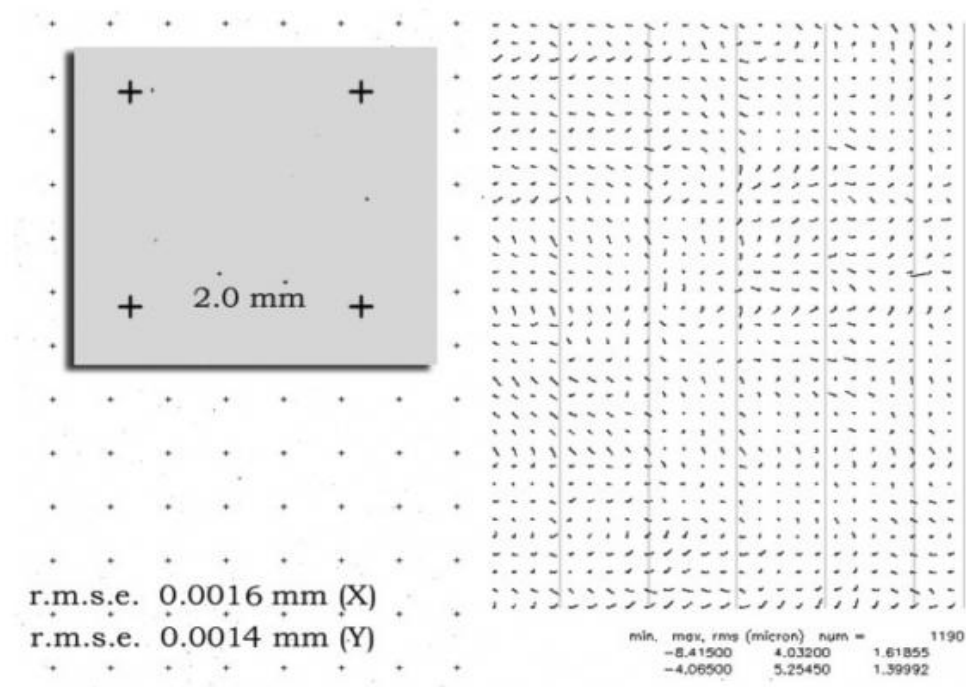


Figura 3.11. Test de calibración geométrica en escáneres fotogramétricos.  
(Fuente: Sistemas de adquisición de imágenes digitales, Aurora Cuartero, 2001).

Estas placas, en su versión más difundida, presentan una cuadrícula de 25 x 25 cm, con un espaciado de 1 cm, mientras que la precisión exigida a la definición de su malla es del orden de 2-3 micras ( $\mu\text{m}$ ). En el caso de realizar una calibración radiométrica, debemos saber que en el escaneo interviene muchos elementos que afectan al sistema de iluminación, tales como fuente de luz, sensores, lentes ópticas, portaplacas y cubreplacas. Cada uno de estos elementos tiene una influencia específica en la calidad e intensidad de la luz.

La calibración radiométrica es el proceso encargado de medir la influencia de estos elementos y compensar sus efectos adversos en los datos resultantes de la imagen digital escaneada.

Un comentario final en este apartado, corresponde a la adquisición de imagen por medio de un escaneo fotogramétrico, es de gran importancia saber que los tamaños del píxel evidentemente dependen de la calidad de la imagen al ser digitalizada, por lo que, entre más pequeño el tamaño del píxel, más se deteriora la calidad de la imagen, lo cual pertenece a los defectos propios del escáner. Para el tipo de trabajos de la aerotriangulación, generación de MDE y ortorectificación, se ha determinado que el emplear un tamaño de píxel de 30 micras, resulta apropiado. Si se emplean tamaños de píxel menores (por ejemplo 15 micras), la ganancia en precisión es frecuentemente modesto, pero con un alto costo en términos de complicaciones computacionales.

Así, obtener parámetros de relación entre los valores como escala del Fotograma, con valores de las resoluciones obtenidas, determina con más exactitud los valores que deseamos para productos finales. Por ejemplo si:

$$\text{Escala de la Fotograma.} = 1:75,000$$

Entonces:

$$\text{Resolución del escaneo en píxel.} = 18 \mu\text{m}$$

$$\text{Resolución del terreno en píxeles.} = 18 \mu\text{m} \times 75,000 = 1.5 \text{ m}$$

En otro caso, si en la planificación del proyecto fotogramétrico se determinó la utilización de una cámara fotogramétrica digital o ya se realizó el escaneo fotogramétrico, el producto será una imagen digital.

### 3.2.1.5. Imagen Digital.

Una imagen digital es una función  $F(X, Y)$ , donde  $X$  y  $Y$  representan unas coordenadas y el valor  $F(X, Y)$ , es proporcional a los valores transmitidos por reflectividad de la luz, que se reconoce visualmente por el nivel de color o gris de la misma en el punto considerado  $(X, Y)$ .

Al proceso de obtención de imágenes digitales se le denomina digitalización y consiste en la descomposición de la imagen real en una matriz discreta de puntos de un determinado tamaño, donde cada uno tiene un valor proporcional a su nivel de color.

Por tanto puede decirse que una imagen digital se puede asimilar a una matriz compuesta por un determinado número de filas y columnas. A cada celda de la matriz se le denomina píxel (picture x element) y ésta, representa una superficie que es función de su tamaño  $(\Delta X, \Delta Y)$ , como se muestra en la figura 3.12. A cada píxel le corresponde un valor digital (número digital o valor digital "ND"), como se muestra en la figura 3.13.

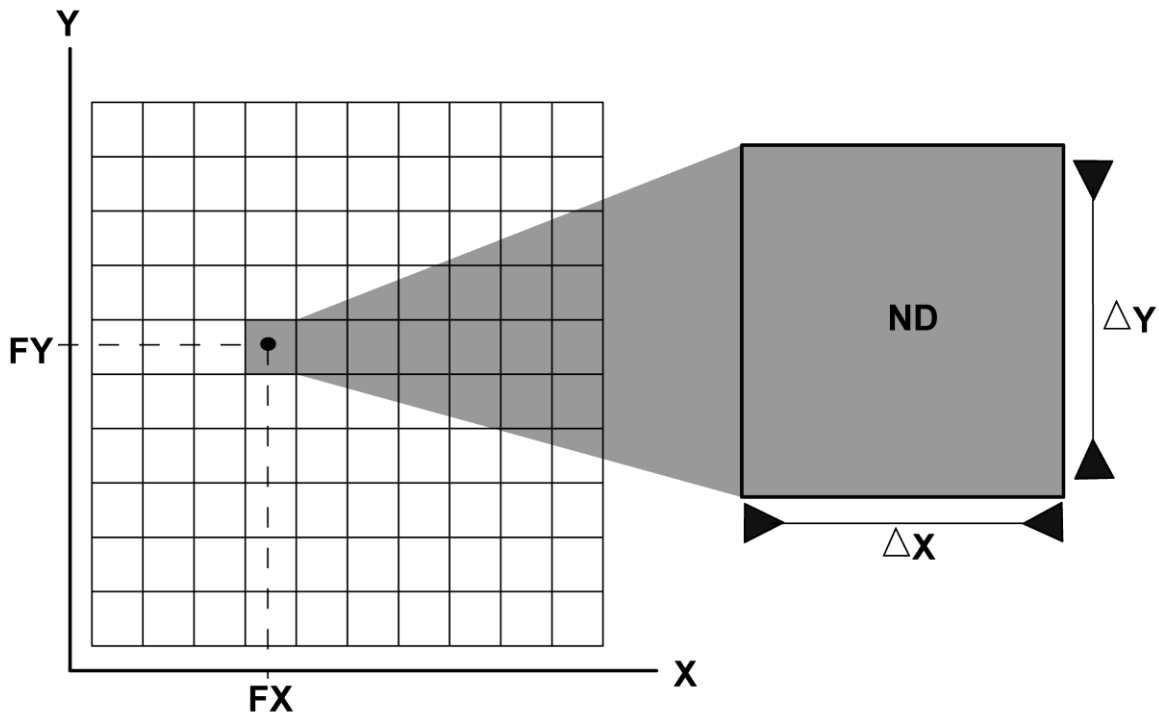


Figura 3.12. Representación gráfica de una imagen digital.  
(Elaboración propia).

El número digital puede representar información de diversa naturaleza, así puede ser proporcional a las características físicas del área (radiancia, reflectividad, transmisividad, emisividad) o bien representar los valores resultantes de la manipulación de la información original mediante técnicas de análisis de imágenes.

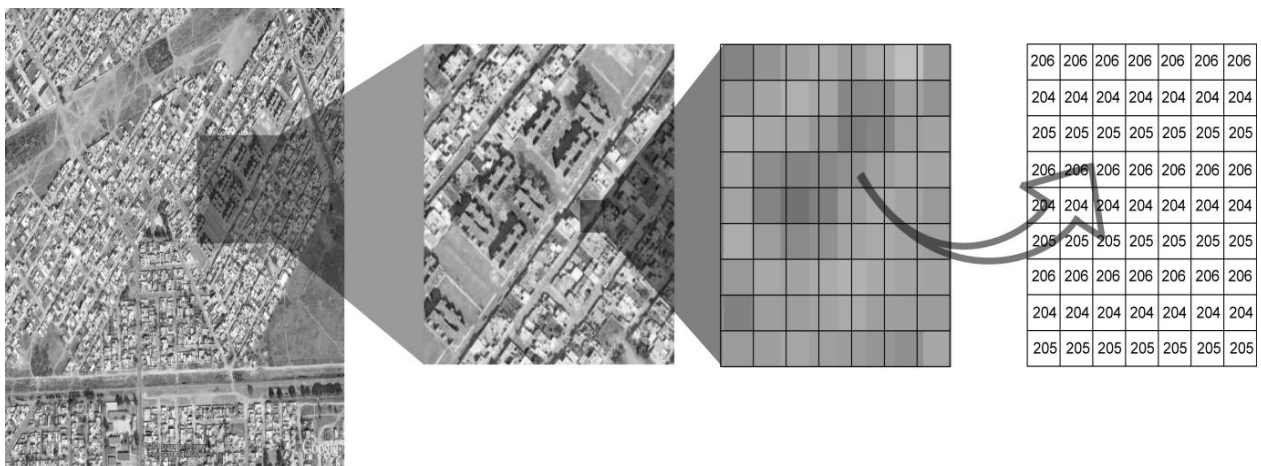


Figura 3.13. Representación de un acercamiento visual y numérico de una imagen digital.  
(Elaboración propia).

La matriz definida por los números digitales tiene carácter multidimensional en función de las capas de información almacenadas (bandas o canales). Entre las imágenes más frecuentemente empleadas en procesos fotogramétricos se encuentran las imágenes pancromáticas o monocromáticas (escala de grises).

En las imágenes pancromáticas el tono de la señal está representado por 8 bits (1 byte). Con esta dimensión se tiene la posibilidad de codificar 256 tonos (0 a 255). Generalmente la correspondencia que se aplica entre el valor digital y el tono es negro (0) y blanco (255). En las imágenes en color el esquema de almacenamiento es similar, utilizando cada pixel tres números enteros de 8 bits para su codificación (uno para cada canal), por lo que se requiere tres veces más espacio para su almacenamiento.

La calidad de una imagen digital depende de la finura del retículo es decir del tamaño de pixel (resolución espacial) empleada para la codificación, en donde:

- Elementos de gran tamaño producen pérdida de información.
- Elementos demasiado pequeños requieren disponer de un gran espacio de almacenamiento.

Es importante tener en cuenta que la calidad de la imagen va a depender del sistema disponible, tanto en lo referente a posibilidades gráficas (número de colores que es capaz de presentar), como del almacenamiento disponible por lo que se puede considerar un problema de tipo económico.

Si una imagen equivale a una matriz de “n” filas por “m” columnas, el tamaño de ésta tendrá una relación casi directa entre el formato de la imagen y la superficie de cada una de esas celdas. Así pues, un fichero que contenga una imagen digitalizada tendrá ocupada el 98 ó 99% de éste por los valores que definen la matriz, el resto (1 ó 2 %) corresponden a datos que permiten localizar la matriz (imagen) en el fichero (cabecera). Luego si cuantificamos estos valores, podremos conocer el tamaño aproximado de los ficheros que vamos a manejar.

El primer dato a tener en cuenta es la equivalencia entre puntos por pulgadas (ppp), y micras ( $\mu\text{m}$ ), ya que son las micras la unidad que nos interesa para evaluar el tamaño de pixel. En este caso, si disponemos de fotogramas que tienen un formato estándar de 230 x 230mm. y se quiere digitalizar a 1200 ppp, para obtener un archivo con una calidad adecuada, la relación comienza cuando determinamos que 25.4 mm. (1 pulgada) se ha dividido en 1200 partes iguales (tamaño del pixel), por tanto este será de:

$$\frac{1 \text{ pulgada}}{\text{Resolución digitalización(ppp)}} = \frac{25.4 \text{ mm.}}{1200} \approx 21.2 \mu\text{m.}$$

El archivo digital de la imagen tendría los siguientes valores:

$$\frac{1200 \text{ ppp}}{2.54 \text{ cm.}} = 472 \text{ puntos por cm.} \Rightarrow 472 \text{ puntos por cm} \times 23 \text{ cm} = 10856 \text{ puntos (pixels)}$$

Este resultado parcial, se multiplica por sí mismo, ya que recordemos que nuestro formato tiene 23 cm x 23 cm.

$10856 \times 10856 = 117852736$  puntos (pixel)

*Tamaño de la imagen en B/N: 118 Mb*

*Tamaño de la imagen en color: 354 Mb*

Conocida la resolución o tamaño de pixel de una imagen, se pueden asignar coordenadas (x, y) al centro de cada celda. Por tanto, la precisión de las coordenadas obtenidas de un objeto imagen dependen del tamaño del pixel, en cuanto que el objeto sufre una generalización importante que influye en su correcta definición geométrica.

El posterior tratamiento informático que se le otorga a la imagen se refiere a los procesos de almacenamiento y compresión digital.

a) Formatos gráficos de almacenamiento de imágenes digitales.

Utilizando convenciones tipográficas propias de la informática, generalmente una imagen digital se organiza en una serie de ficheros (files), cada uno de los cuales se descomponen en registros (records) y un fichero de cabecera (header file), en donde se almacena el formato con el que están grabados los ND que la componen.

En este apartado se describirán los formatos disponibles y utilizados para un adecuado tratamiento fotogramétrico, basando esta utilización, en dos sistemas operativos comerciales a nivel mundial:

- Windows 2000 y XP profesional elaborado por la empresa norteamericana Microsoft
- Red Hat Linux Enterprise AS.

Formato PCX: Es el formato original de los programas Paintbrush. Puede tener hasta 24 bits de profundidad de color, aunque también hay versiones de 8 y 4 bits.

Formato BMP: Puede usar un máximo de 24 bits de profundidad de color. Su cabecera describe las dimensiones y los colores, y el resto del fichero contiene los bytes que definen propiamente la imagen. Acabada esta cabecera comienza la tabla de definición de colores. Estos colores se definen por medio de intensidades relativas de cada uno de los colores fundamentales (RGB), utilizando un byte para cada uno de ellos y otro que queda reservado.

Formato GIF (Graphic Interchange Format): Es el formato propuesto por CompuServe para el intercambio y transmisión de información gráfica. Tras la cabecera comienza la tabla global de colores, que es donde se almacenan los valores de los colores que se usarán en la imagen, cada uno de los cuales vendrá definido por una combinación *RGB* de 3 bytes. A continuación viene la descripción de la imagen, que a su vez contiene la propia descripción, una tabla de color global (opcional) y los datos propiamente dichos.

Formato TIFF (Tag Image File Format): nació como una mejora de los PCX ya existentes, y se caracteriza principalmente por estar orientado al intercambio de ficheros entre diferentes entornos. Es un fichero bitmap (Raster). La lectura general de un fichero TIFF se puede dividir en tres partes bien diferenciadas:

- La cabecera.
- La IFD (*Image File Directory*).
- La imagen propiamente dicha.

Es uno de los formatos gráficos más usuales en fotogrametría debido a su carácter compacto y al mismo tiempo abierto para añadir información.

#### b) Compresión de imágenes digitales.

La compresión de las imágenes digitales es una necesidad para la mayoría de las aplicaciones, en las que un número considerable de imágenes de gran tamaño deben de ser almacenadas en un espacio limitado o bien cuando éstas deben de ser transmitidas desde un sistema a otro. La idea básica de la compresión es la eliminación de la redundancia de la imagen original. Esto se realiza mediante la transformación de la imagen en una serie de coeficientes que serán posteriormente codificados.

En la actualidad los métodos más utilizados para la compresión de imágenes están basados en una transformación de coseno discreto, en la cuantización del vector y en el uso de pirámides de imágenes.

El objetivo final de la compresión es la reducción del número de bits requeridos para representar una imagen, eliminando las redundancias existentes en la misma. La tasa de compresión se define como la relación entre el número de bits de la imagen original dividido por el número de bits de la imagen comprimida.

En las imágenes digitales nos podemos encontrar con tres tipos básicos de redundancias:

1. Redundancia espacial, debida a la correlación entre el nivel de gris de un pixel y el correspondiente de los vecinos próximos, la principal en procesos fotogramétricos que utilicen fotografías aéreas pancromáticas.
2. Redundancia espectral, debida a la correlación entre el nivel digital correspondientes a las diferentes bandas (imágenes multiespectrales).
3. Redundancia temporal, debida a la correlación entre imágenes tomadas en distintos momentos (imágenes de vídeo).

Los formatos más utilizados para solventar necesidades fotogramétricas son: TIFF, JPEG y MrSID, por lo que a continuación se presentan sus características de compresión:

Formato TIFF. Se basa en cambiar la definición de cada uno de los valores de la celda por una suma de valores iguales. El inconveniente de esta compresión es que llega a un máximo de 1/3 de tamaño original (tasa de compresión máxima 3:1). La ventaja reside en la nula pérdida de información.

Formato JPEG: Es el formato de compresión más extendido y debido a la cada vez mayor necesidad de comprimir las imágenes puede convertirse en otro estándar, junto con el TIFF, dentro de Fotogrametría. Se basa en dividir la imagen en bloques de 8x8 (pixel) donde toman un valor mediante una transformación bidimensional discreta de cosenos, produciendo 64 coeficientes de salida. La media de los valores se registra y los otros 63 se expresan relativamente respecto al valor base. Esto hace reducir la magnitud de los valores e incrementan el número de ceros en los coeficientes. Con este tipo de se puede llegar a una reducción de entre 10 y 15 veces (tasa de compresión 1:10, 1:15) sin causar significantes cambios en la geometría de la imagen.

Formato MrSID: Este tipo de compresión se basa en la utilización de una transformación local, de manera que tiene una resolución uniforme y una calidad superior en toda la imagen. Otra ventaja de este tipo de formato es que lleva a cabo una transformación multiresolución, esto significa que se pueden generar múltiples resoluciones en un archivo digital, de forma que cuando se realiza un zoom en la pantalla de nuestra PC, la imagen aumenta en visión y calidad.

Esta característica hace que la visualización sea mucho mejor a todas las escalas de trabajo, especialmente las pequeñas y medianas así como favorece una velocidad de transmisión de datos superior. La descompresión que realiza es selectiva, es decir, únicamente descomprime la porción de la imagen visualizada, cosa que, junto con la multiresolución, permite visualizar y trabajar con imágenes de gran tamaño con gran agilidad.

Este tipo de formato mantiene una perfecta calidad de la imagen hasta tasas de compresión de 20:1 para imágenes a color (RGB) y de 12:1 para escala de grises (B/N).

### **3.2.1.6. Datos de calibración y archivos vectoriales.**

Otros insumos de los datos de entrada a comentar, es la compatibilidad que ofrece el sistema operativo utilizado por las estaciones de trabajo fotogramétricas para la adaptación y/o importación de ficheros de texto y archivos vectoriales necesarios para el inicio del trabajo. Dentro de los ficheros de texto a utilizar son:

- a) Certificado de calibración del instrumento restituidor a ocupar: Este certificado indica si el instrumento está en condiciones geométricas para trabajar, o sea la perpendicularidad generada por los planos xy, zx y zy , además del ajuste inicial en 0° de los movimientos angulares de Kappa, Phi y Omega, que representan los movimientos del avión en el instrumento.



b) Certificado de calibración de la cámara usada (figura 3.14), como se comentó en el apartado de calibración de la cámara, contiene los parámetros básicos de la geometría de la cámara que son: Identificación de la cámara, fecha de calibración, focal de toma, punto principal de autocolimación (PPA), punto principal de simetría (PPS), distancia entre marcas fiduciales (en foto-coordenadas con origen en el fotocentro) y distorsión radial de la lente. La lectura adecuada de este archivo corresponde a un siguiente reporte (figura 3.15), en donde:

1.- El primer apartado nos reporta el número de serie de la cámara, el cual sirve para identificarla e incorpora los siguientes datos:

Número de serie de la cámara: 272311C  
 Tipo de cámara: Jena LMK2000  
 Número de serie de la lente: 7390596D  
 Tipo de lente: Jena Lamegon PI/D  
 Apertura máxima: f/4  
 Prueba de apertura: f/4  
 Fecha: Octubre 6, 1998

```

camera - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

begin camera_parameters 272311C
focal_length:          152.152
ppac:                  0 0
ppbs:                  -0.005 -0.004
film_format:          230 230
fiducial:              1 -110.004 -110.021
fiducial:              2 109.997 109.98
fiducial:              3 -110.001 109.984
fiducial:              4 109.998 -110.021
fiducial:              5 -112.005 -0.02
fiducial:              6 111.996 -0.019
fiducial:              7 -0.003 111.988
fiducial:              8 -0.008 -112.024
lens_distortion_flag: on
input_mode:            angular
distortion_spacing:    7.5 15 22.7 30 35 40
distortion_deltas:    0 0 0 1 1 -1
distortions:           0 0 0 1 1 -1
io_required:           yes
camera_type:           frame
media_type:            film
focal_length_calibration_flag: off
calibrated_focal_length_stddev: 0.03
ppac_calibration_flag: off
calibrated_ppac_stddevs: 0.003 0.003
self_calibration_enabled_params: 0
antenna_offsets:      0 0 0
end camera_parameters
  
```

Figura 3.14. Ejemplo de un certificado de calibración de cámara.  
 (Elaboración propia).

1.- begin camera\_parameters 272311C

```

camera - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

begin camera_parameters 272311C
focal_length: 152.152
ppac: 0 0
ppbs: -0.005 -0.004
film_format: 230 230
fiducial: 1 -110.004 -110.021
fiducial: 2 109.997 109.98
fiducial: 3 -110.001 109.984
fiducial: 4 109.998 -110.021
fiducial: 5 -112.005 -0.02
fiducial: 6 111.996 -0.019
fiducial: 7 -0.003 111.988
fiducial: 8 -0.008 -112.024
lens_distortion_flag: on
input_mode: angular
distortion_spacing: 7.5 15 22.7 30 35 40
distortion_deltas: 0 0 0 1 1 -1
distortions: 0 0 0 1 1 -1
io_required: yes
camera_type: frame
media_type: film
focal_length_calibration_flag: off
calibrated_focal_length_stddev: 0.03
ppac_calibration_flag: off
calibrated_ppac_stddevs: 0.003 0.003
self_calibration_enabled_params: 0
antenna_offsets: 0 0 0
end camera_parameters

```

Figura 3.15. Segmentación de un certificado de calibración de cámara para un mejor entendimiento. (Elaboración propia).

2.- Longitud focal calibrada: 152.152.

3.- En la figura 3.15 apartado 3, se muestran los Parámetros del Punto Principal de Autocolimación (PPAC) se conforman por la distorsión radial simétrica ( $K_0, K_1, K_2, K_3, K_4$ ) y la distorsión de descentrado ( $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4$ ), y los Parámetros del Punto de Mejor Simetría (PPBS) se conforma por el punto principal calibrado ( $x_p, y_p$ ), y todas estas relaciones se determinan a través de un ajuste por mínimos cuadrados mediante una solución de calibración analítica multiframe simultánea (SMAC) respecto a las marcas fiduciales. Las mediciones de las coordenadas de x, y usadas en el ajuste de los parámetros anteriores, tienen una desviación estándar de  $\pm 3$  micras.

Parámetros de distorsión radial simétrica	Parámetros de distorsión de descentrado	Punto principal calibrado
$K_0 = 0.2918 \times 10^{-4}$	$P_1 = -0.2165 \times 10^{-6}$	$X_p = -0.005 \text{ mm}$
$K_1 = -0.1004 \times 10^{-7}$	$P_2 = -0.6283 \times 10^{-7}$	$Y_p = -0.004 \text{ mm}$
$K_2 = 0.5512 \times 10^{-12}$	$P_3 = 0.0000$	
$K_3 = 0.0000$	$P_4 = 0.0000$	
$K_4 = 0.0000$		

4.- Coordenadas del punto principal y de las marcas fiduciales. Las posiciones de todos los puntos están referidas al punto principal de autocolimación (PPA) como origen.

1	-110.004	-110.021
2	109.977	109.98
3	-110.001	109.984
4	109.998	-110.021
5	-112.005	-0.02
6	111.996	-0.019
7	-0.003	111.998
8	-0.008	-112.0024

5.- Distorsión de las lentes. En este apartado se especifica inicialmente el estatus de la distorsión de la lente (lens\_distortion\_flag:) y si se activó durante la calibración, en este caso, se presenta activado o encendido (on). Como un segundo aspecto se encuentra el gasto o modo de entrada (input\_mode:), y posteriormente se muestra el espaciamiento de distorsión (distortion\_spacing:) o ángulo de campo y su radial simétrico y descentrado.

Angulo de campo	7.5°	15°	22.7°	30°	35°	40°
Radial simétrico	0	0	0	1	1	-1
Descentrado	0	0	0	1	1	-1

6.- Por último se determina que el método de medición de estas distancias se considera con una exactitud de 0.003 mm.

En segundo aspecto, los archivos vectoriales necesarios son:

- a) Archivo semilla o base. Un archivo semilla, es aquél en el cual se han especificado los parámetros y configuraciones de visualización, las unidades de trabajo, el sistema de referencia geodésico y proyección cartográfica a utilizar durante todo el proceso fotogramétrico y productos finales.

En este archivo también se determinan los parámetros específicos del diseño y estructura digital de la información que va a contener y así poder segmentar de manera lógica su diseño y desarrollar una serie de acciones selectivas sobre porciones individuales. En primer aspecto nos referimos a la facilidad que tiene los sistemas CAD a segmentar la información en niveles o capas (layers) y personalizar la información que contiene cada capa.

- b) Archivo vectorial con canevas: Este archivo nos permite segmentar el espacio geográfico correspondiente al proyecto fotogramétrico. Tomando el ejemplo práctico del apartado 2.4.1.1, podemos especificar que el proyecto requiere realizar un cubrimiento total de la carta topográfica 1:50,000 con clave E14A49, por lo que se segmenta en seis cuadrantes (ver figura 3.16) que aseguran el cubrimiento del área.

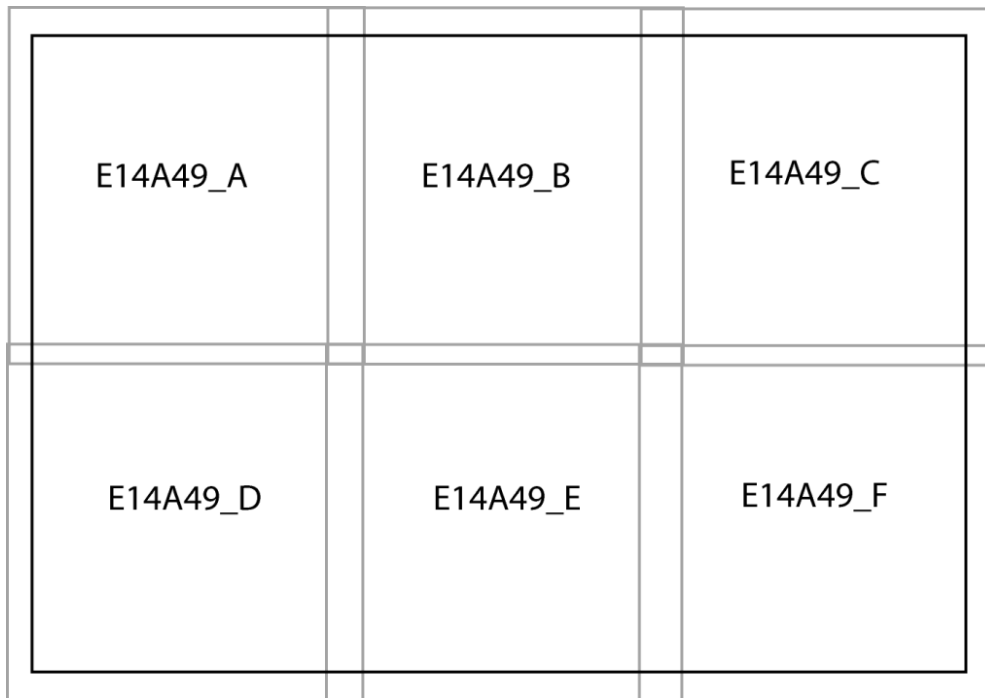


Figura 3.16. Esquema de los archivos vectoriales con canevas.  
(Elaboración propia).

Este archivo tiene los mismos parámetros que el archivo base o semilla, en realidad, al iniciar el proyecto fotogramétrico se realiza una adición entre ambos para dar como resultado un archivo vectorial definitivo que tiene las características de ambos.

### 3.2.2. Estaciones de Trabajo Fotogramétricas Digitales (DPWS).

El segundo aspecto a explicar en la organización de un sistema fotogramétrico digital, es la estructura de un sistema físico (hardware), un sistema lógico (software) y la generación digital de un sistema de visión estereoscópica artificial en las Estaciones de Trabajo Fotogramétricas Digitales (DPWS).

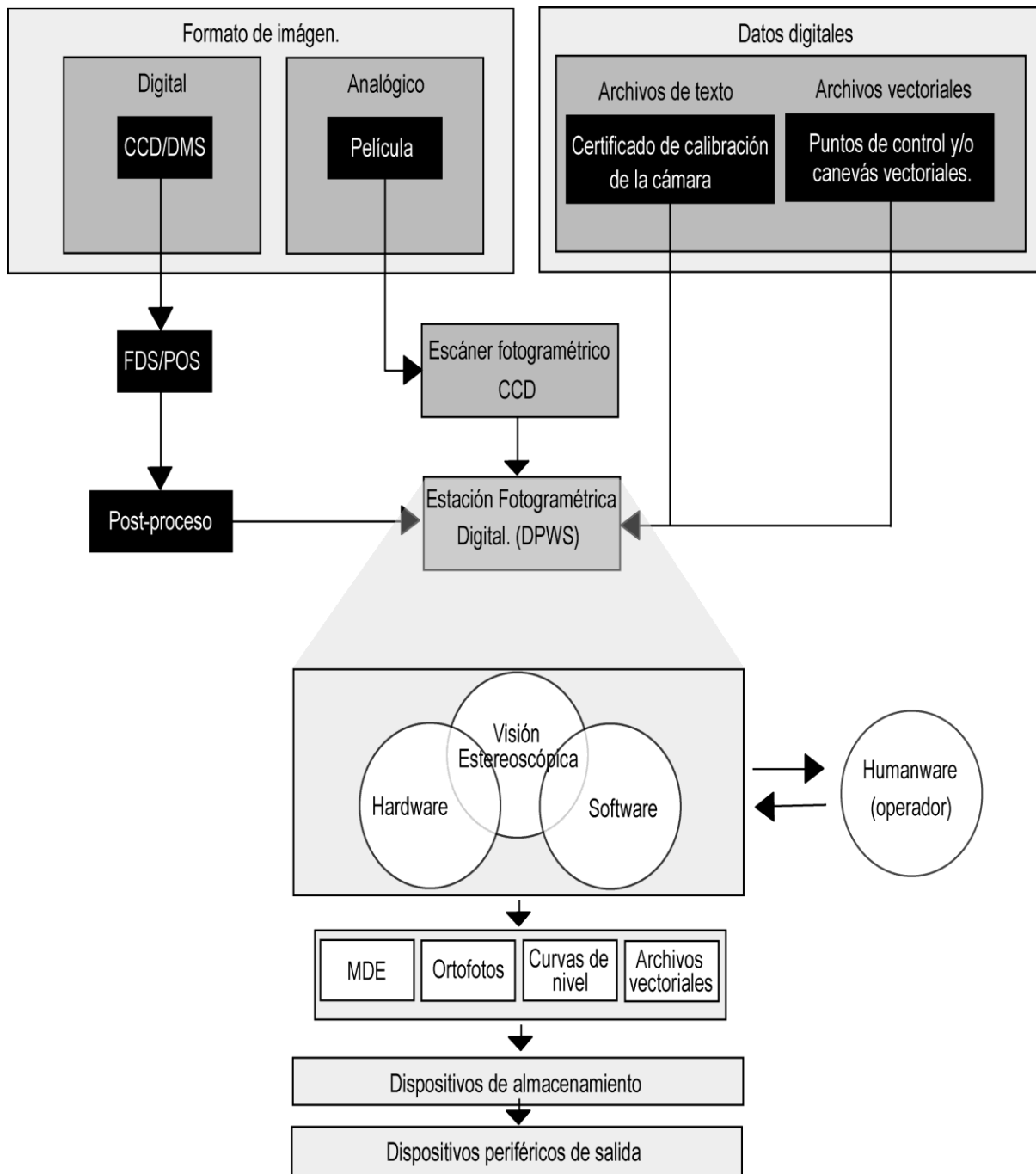


Figura 3.17. Esquema de los datos de entrada y flujo operativo de una DPWS. (Elaboración propia).

### **3.2.2.1 Características de las Estaciones de Trabajo Fotogramétricas Digitales.**

Un sistema fotogramétrico digital incluye todos los elementos necesarios tanto a nivel de software como de hardware, para obtener los productos fotogramétricos a partir de las imágenes digitales, incluyendo también sistemas de captura de imágenes (interfaces de conexión con cámaras digitales o sistemas digitalización de imágenes en formato analógico, como lo es un escáner).

El elemento fundamental del sistema fotogramétrico digital es la estación de trabajo fotogramétrica digital (DPWS), conocido también como restituidor digital o estación fotogramétrica digital, si bien este nombre no es adecuado puesto que sólo hace referencia a una de las tareas de la estación, el proceso de restitución.

El avance tecnológico desarrollado en las últimas décadas, permitió la evolución de estas estaciones, permitiendo las siguientes características esenciales:

- La entrada de datos es siempre en forma digital con lo que la información es estable y siempre se puede editar.
- El entorno de trabajo es semi-automático e interactivo.
- La base matemática es la misma que en los restituidores analógicos pero con la ventaja de que no existen problemas de desgaste, calibración y ajuste, al carecer de elementos ópticos o mecánicos, siendo siempre el proceso de medida constante en cuanto a precisión y fiabilidad.
- La universalidad es total, pudiéndose utilizar todo tipo de escalas de imagen con independencia de fotos terrestres o aéreas e inclusive imágenes satelitales.
- El empleo es más ergonómico para el operador y al poder realizar procesos semi-automatización es más fácil su manejo, requiriéndose menor experiencia, en cuanto a la manipulación física de los restituidores analíticos, más no en la experiencia de identificar e interpretar el terreno.
- Permiten desde el mismo entorno de trabajo la realización de distintas tareas fotogramétricas y cartográficas, lo que aumenta la producción y eficacia en los flujos de trabajo, que a veces sobrepasan los estrictamente fotogramétricos.
- Admite la posibilidad de que varios usuarios puedan acceder simultáneamente a la observación estereoscópica de los modelos, pudiendo contrastar criterios (ver figura 3.27).
- El principio de superposición, más efectivo que en los restituidores analíticos, haciéndolos muy interesantes en los trabajos de actualización y control de calidad.

### 3.2.2.2. Sistema Físico (Hardware).

Una DPWS debe contener un conjunto de circuitos, elementos y equipos electrónicos que conforman al sistema físico (ver figura 3.18), desglosados de la siguiente manera:

1. Un sistema de digitalización de imágenes analógicas (escáner), el cual se describió ampliamente en el apartado de sistemas de adquisición de imágenes.

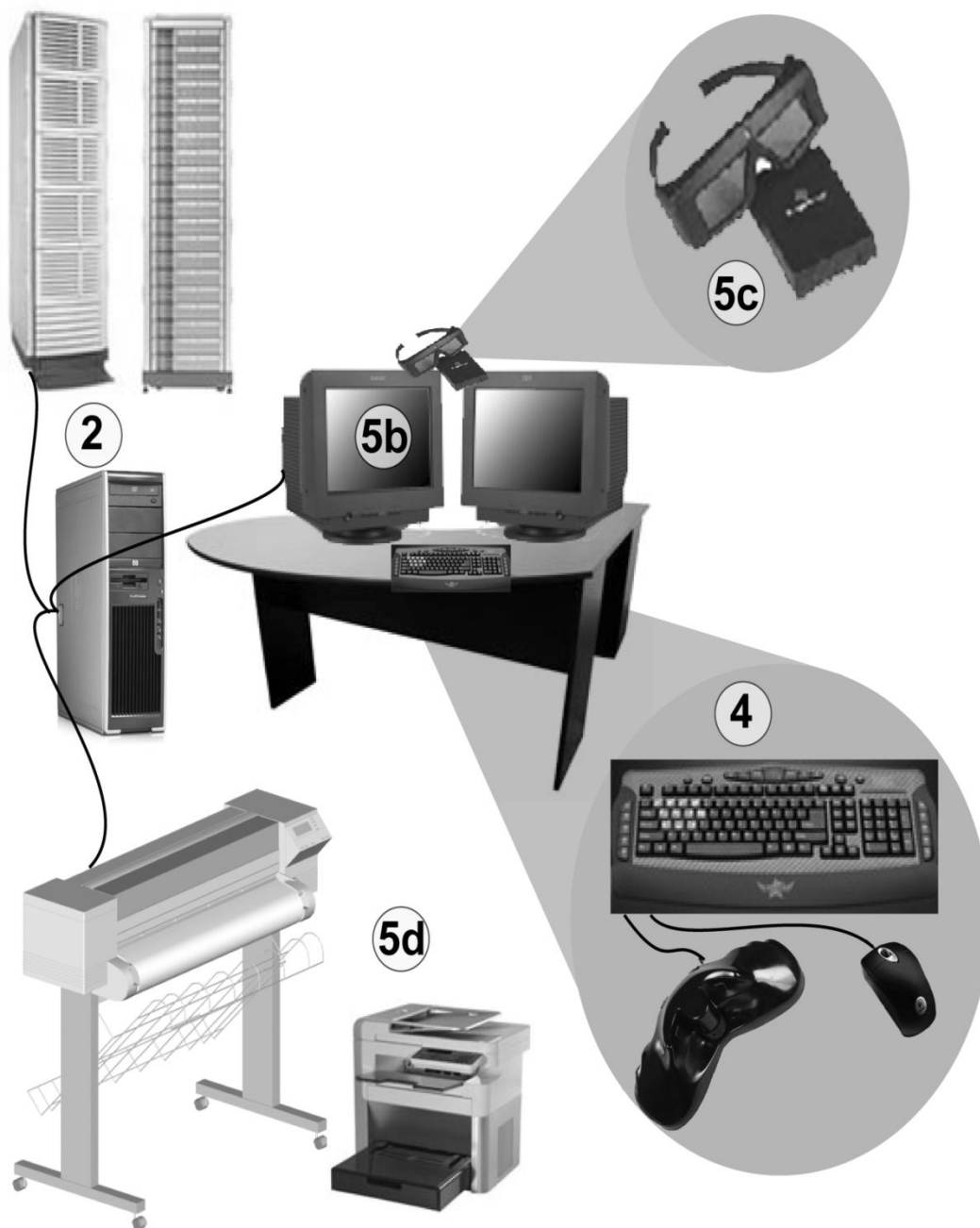


Figura 3.18. Sistema Físico (Hardware) de una DPWS.  
(Elaboración propia).

2. Un CPU (Unidad Central de Procesamiento, ver figura 3.18) o servidor dotado de memoria suficiente y cuyo procesador en tiempo real ha de ejecutar dos tareas: el procesamiento de la imagen (zoom, movimientos de la imagen en pantalla o paneo) y correlación automática de las imágenes que formen el modelo estereoscópico. Este contendrá un subsistema para el almacenamiento de información a partir de un disco duro y acceso a una red local y grupo de trabajo para la transferencia de información. A continuación se especifican los componentes del CPU (ver figura 3.19):

2a) Disco duro: Este término se refiere a un sistema de grabación magnética digital. Este disco se encuentra dentro del CPU y está constituido por una serie de platos metálicos apilados girando a gran velocidad. Sobre estos platos se sitúan los cabezales encargados de leer o escribir los impulsos magnéticos.

Hay distintos estándares a la hora de comunicar un disco duro con la computadora. Existen distintos tipos de interfaces las más comunes son: Integrated Drive Electronics (IDE, también llamado PATA) y FC exclusivo para servidores. La estructura del disco es la siguiente:

Cabezal de lectura/escritura: Dentro de un disco duro hay varios platos (entre 2 y 4), que son discos de aluminio o cristal concéntricos y que giran todos a la vez. El cabezal es un conjunto de brazos alineados verticalmente que se mueven hacia dentro o fuera según convenga, todos a la vez. En la punta de dichos brazos están las cabezas de lectura/escritura, que gracias al movimiento del cabezal pueden leer tanto zonas interiores como exteriores del disco.

Cada plato tiene dos caras, y es necesaria una cabeza de lectura/escritura para cada cara (no es una cabeza por plato, sino una por cara). Si se observa la figura 3.19, el esquema Cilindro-Cabeza-Sector, se ven 4 brazos, uno para cada plato. En realidad, cada uno de los brazos es doble, y contiene 2 cabezas: una para leer la cara superior del plato, y otra para leer la cara inferior, por tanto, hay 8 cabezas para leer 4 platos. Las cabezas de lectura/escritura nunca tocan el disco, sino que pasan muy cerca (hasta 3 nanómetros) ó 3 millonésimas de milímetro. Si alguna llega a tocarlo, causaría muchos daños en el disco, rayándolo gravemente, debido a lo rápido que giran los platos (uno de 7.200 revoluciones por minuto se mueve a 120 km/h en el borde). Actualmente existe en el mercado, discos duros con capacidades de almacenamiento mínimo de 100 Gb y un máximo de 1 a 5 Tb.

2b) DSP (Procesador digital de señales). Un DSP es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un juego de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Debido a esto es especialmente útil para el procesado y representación de señales analógicas en tiempo real.



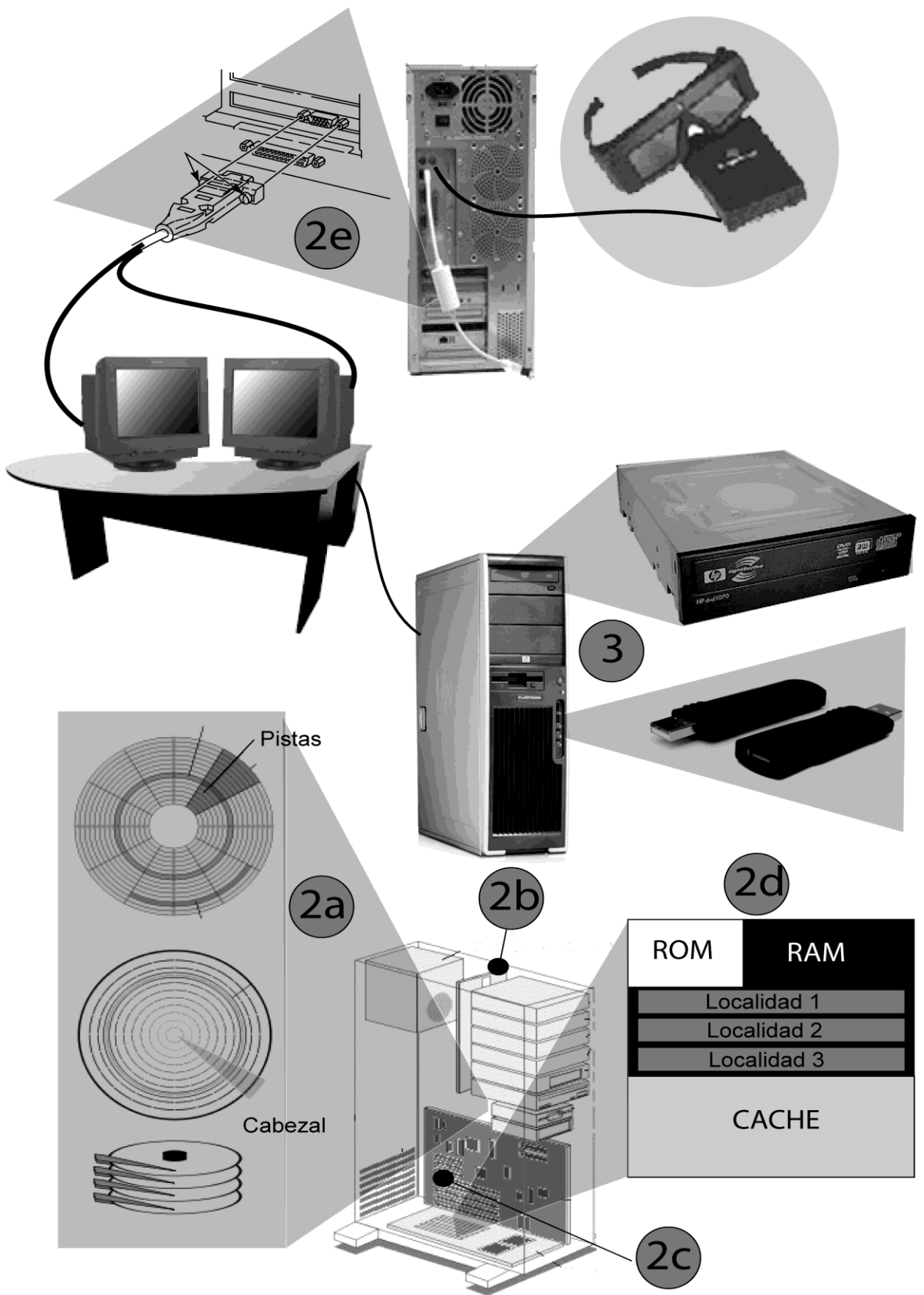


Figura 3.19. Componentes y puertos de un CPU de una DPWS.  
(Elaboración propia).

Este procesador trabaja con señales analógicas, pero es un sistema digital, por lo tanto necesitará un convertidor analógico/digital a su entrada y digital/analógico en la salida. Como todo sistema basado en un procesador programable necesita una memoria donde almacenar los datos con los que trabajará y el programa que ejecuta. Si se tiene en cuenta que un DSP puede trabajar con varios datos en paralelo y un diseño e instrucciones específicas para el procesamiento digital, se puede dar una idea de su enorme potencia para aplicaciones cartográficas y fotogramétricas. Estas características constituyen la principal diferencia de un DSP y otros tipos de procesadores. Actualmente las DPWS trabajan con equipos que cuenta con una tecnología de doble procesador, trabajando ambos en tiempo real.

- 2c) La tarjeta gráfica: Es la que se encarga de procesar la información que el procesador le envía a esta y, a su vez de enviarla al monitor, a través de una conexión de salida para el monitor, para que este visualice la información que está procesando. Hoy en día se complementan con aceleradores gráficos que se encargan de despejar casi todo el procesamiento de los gráficos de la CPU (Unidad de Procesamiento Central). Estos hacen que opere más rápidamente el computador al descargar trabajo del procesador.

Las tarjetas gráficas y los aceleradores traen normalmente memoria RAM para guardar la información de las imágenes que se muestran en el monitor. Una mayor cantidad de esta memoria, que va sobre la tarjeta, permite mayores resoluciones y mayores cantidades de colores en la pantalla. Hay tarjetas gráficas que tienen memorias más veloces que otras haciéndolas a su vez más rápidas, y unas que trabajan en 32, 64 y 128 bits. La memoria mínima para una tarjeta de 64 bits es de 2 Mb, y para una de 128 bits es de 4 Mb. Si se utiliza menos memoria, se pierde rendimiento. El estándar de hoy en día es de 2Mb de memoria para una tarjeta gráfica común y corriente y hasta de 24Mb para los aceleradores 3D más especializados.

- 2d) Memoria: La memoria es un conjunto de registros direccionales en donde residen instrucciones y datos. La memoria RAM significa Memoria de Acceso Aleatorio (Random Access Memory), es una memoria de almacenamiento primario en la que el procesador segmenta al chip de RAM en varias localidades de igual tamaño. Estas localidades tiene una dirección única que el procesador detecta al azar para almacenar o recuperar información, por esta razón se le denomina memoria de acceso aleatorio.

La RAM solo ofrece un almacenamiento temporal para programas y datos por ser una memoria volátil, ya que la información que contiene no se conserva de forma permanente. Si se interrumpe la energía, dicha información se pierde.

La memoria ROM (Read Only Memory, memoria de solo lectura) Es una memoria no volátil, ya que el procesador puede leer información de ella pero nunca sobrescribir información nueva.

Todas las computadoras cuentan con un dispositivo de ROM que contiene las instrucciones de arranque y otra información crítica.

En una DPWS con frecuencia se incluyen memorias PROM (Programmable Read Only Memory, memoria de solo lectura programable), esta es una variación de la ROM en la que el usuario puede cargar programas y datos de solo lectura que una vez cargados rara vez o nunca se cargan. También se utiliza una memoria caché para facilitar una transferencia más rápida de instrucciones y datos al procesador, esto es esencial en los trabajos fotogramétricos en tiempo real.

- 2e) Como complemento, el CPU del servidor deberá tener conexiones expandibles y/o adaptables para la interface del sistema interactivo de visualización estereoscópica (ver figura 3.19).
3. Puertos propios del CPU para contar con la posibilidad de entrada y salida directa de datos en formato digital, para la realización de aplicaciones fotogramétricas en tiempo real y para un adecuado almacenamiento de información (ver figura 3.19).
4. Un sistema de control para la captura de datos, medición y control de la marca flotante tridimensional sobre imágenes digitales de diferentes fuentes y geometría (ver figura 3.18).

Este sistema de control interactivo de medición estereoscópica (3D) utilizado en los trabajos de producción ha de ser lo más estable posible (por razones de precisión) y fácil de utilizar. La ergonomía y facilidad del control afecta de una forma importante al rendimiento del sistema.

La opción preferible por razones de precisión, estabilidad y facilidad de utilización es la posibilidad de interactuar, a través de instrucciones determinada al software fotogramétrico utilizado, con la combinación de un mouse estándar para la ejecución de instrucciones básicas en modo normal, como cualquier software CAD, y un "Topomouse" para la ejecución de instrucciones de digitalización, realizar movimientos en XYZ y control de la marca flotante sobre el modelo estereoscópico digital en 3D (ver figura 3.20). Este sistema de control ha sustituido el esquema clásico de manivelas para el movimiento en XY y pedal de Z (ver figura 3.21).

5. Un subsistema gráfico que incluya (ver figura 3.18 y 3.20):

- 5a) Memoria de imagen (tarjeta de video) en verdadero color (24 bits) que permita la visualización de las imágenes estereoscópicas en color real.

- 5b) Uno o dos monitores estereoscópicos en color de gran resolución.

- 5c) Sistema interactivo de visualización estereoscópica.

5d) Impresoras de imágenes y trazadores gráficos para la impresión analógica de los resultados (ver figura 3.18).

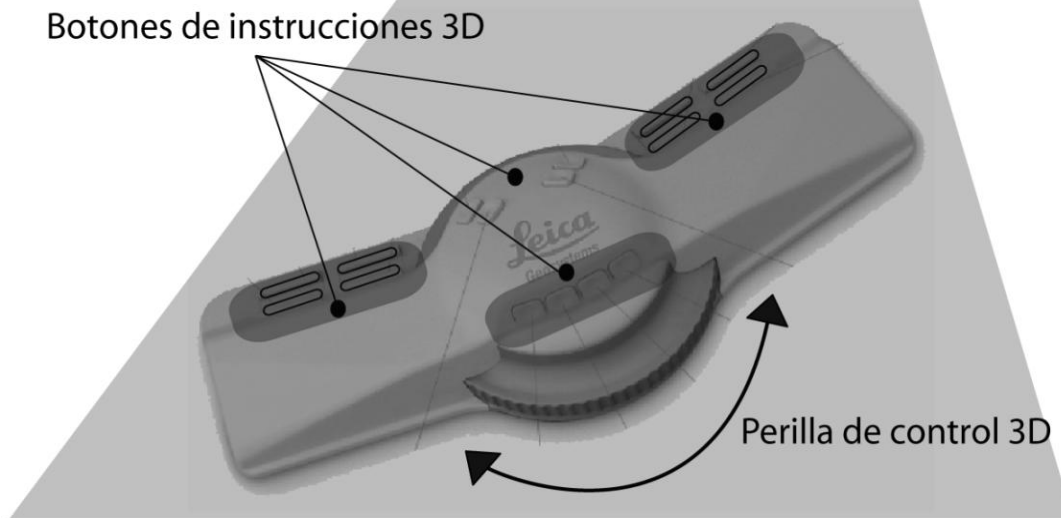


Figura 3.20. Topomouse de una DPWS.  
(Fuente: "Digital Photogrammetry Free-Hand Controller", Leica Geosystems)

### 3.2.2.3. Sistema lógico (Software):

Actualmente existe una tendencia generalizada por las empresas dedicadas al ensamble o programación de software fotogramétrico hacia una concepción modular, ofreciendo grandes posibilidades para la expansión del sistema tanto a nivel de software como de hardware. Inicialmente comentamos la necesidad de contar con un sistema operativo que cuente con una gran facilidad de uso en los siguientes aspectos:

- a. Gestión de la información: Nos referimos a la disposición que presta el sistema operativo para que los usuarios accedan a las diferentes aplicaciones y herramientas de forma rápida y efectiva. Un ejemplo de esto, es la facilidad que prestan los sistemas operativos estructurados en entornos gráficos de “ventanas” (Windows y algunas modalidades de Linux como Red Hat).
- b. Gestión de personalización: Esta gestión se refiere a la facilidad que debe de tener un usuario para disponer de varios perfiles de configuración encaminados a personalizar estas aplicaciones a su conveniencia y necesidades.

En este apartado es adecuado comentar que un factor principal en el flujo fotogramétrico, en cuestión de la personalización de aplicaciones del sistema operativo y por mencionar solo un ejemplo, es la opción de gestionar la memoria dinámica como un recurso que permite que varios procesos puedan estar en ejecución, y sobre todo el usuario administrador puede dimensionar los tamaños en función del uso que se requiere.

- c. Gestión de comunicación: Nos referimos al soporte nativo del protocolo TCP/IP, incorporado actualmente a la mayoría de los sistemas operativos como el principal sistema de comunicación hacia cualquier servidor o grupo de red que permite la comunicación de forma remota (HTTP, FTP) con sistemas de almacenamiento, sistemas de impresión y sistemas multiusuario.

El segundo aspecto a mencionar es la necesidad de un software con una interface gráfica empleado para la captura de datos y su utilidad como base de la estructura modular. Generalmente se utiliza un software con estructura CAD que utilice sistemas de coordenadas globales, permita la importación y exportación de archivos de diseño y que tenga una conexión interactiva con el sistema operativo para realizar las siguientes actividades:

- Permitir la amplitud de zooms y paneos (movimientos en la pantalla).
- Abrir archivos de diseño.
- Copiar archivos de un directorio a otro.
- Borrar archivos.
- Renombrar archivos.

Algunos software que cumplen las características anteriores son Microstation de la empresa Bentley y Autocad Map de Autodesk Inc.

Una posterior organización modular nos permite realizar aplicaciones específicas, mismas que concatenadas, conforman el flujo del procesamiento fotogramétrico (ver figura 3.21).

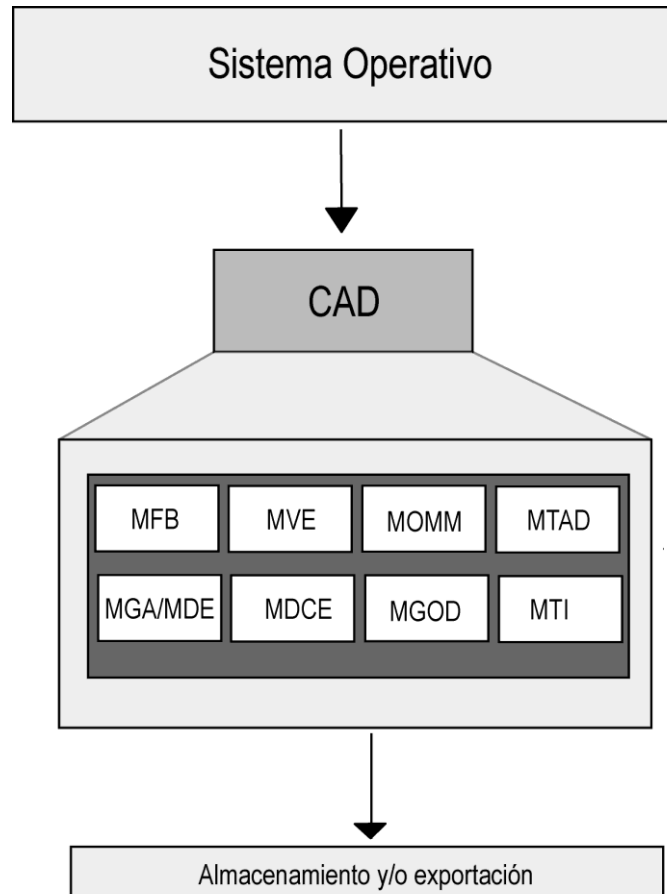


Figura 3.21. Componentes modulares del sistema lógico de una DPWS.  
(Elaboración propia).

A continuación se da una breve descripción de los módulos necesarios para un adecuado procesamiento y las funciones específicas que realiza cada uno de ellos, cabe mencionar que la nomenclatura de cada uno de estos módulos, fue ideada por el autor para lograr una adecuada concepción en función de su utilidad:

- 1.- Módulo Fotogramétrico Básico (MFB). Este módulo permite la gestión del proyecto a realizar y la entrada de datos. Proporciona las herramientas de manejo de datos fotogramétricos para un flujo de trabajo productivo. Los usuarios se benefician del administrador central de datos fotogramétricos y del almacén central de datos, permitiendo la configuración y el manejo de datos de los proyectos fotogramétricos en una estación. Permite la generación del proyecto fotogramétrico.

Integra los archivos de calibración de cámara y DPWS, exportar e importar datos del proyecto en pantalla, ingresa los archivos de control, archivos de los fotogramas y de los modelos estereoscópicos que se utilicen en la proyecto.

- 2.- Módulo para la Visualización Estereoscópica (MVE). Este modulo permite al operador acceder a las herramientas de visualización y manipulación de los modelos estereoscópicos de manera estéreo y precisión fotogramétrica.

Este modulo tiene el control de las operaciones “roam estéreo” realizadas por el Topomause y todo lo relacionado con la marca flotante.

Permite la sobreposición de vectores estéreo y ajustes de brillo y contraste de la imagen dentro del CAD.

- 3.- Módulo de Orientación y Medición de Modelos (MOMM): Es un modulo que permite la medición fotogramétrica y movimientos panorámicos para la orientación de la imagen (interior, relativa y absoluta). Los puntos de control (ubicaciones Von Gruber) definidos en el modulo MFB se visualizan en cualquier ventana. Una vez que se ha procedido con la medición, se visualizarán los puntos de imágenes que corresponden al tipo de punto que se está midiendo.

- 4.- Módulo de Triangulación Automática Digital (MTAD). Provee un ambiente multi-imagen poderoso de trasferencia y medición de puntos para un flujo de trabajo de triangulación fotogramétrica. Los puntos de coordenadas en levantamientos de control pueden ser ingresados directamente para la triangulación. Permite visualizar imágenes en ventanas modelo, así las imágenes proporcionan una eficiente transferencia y medición de puntos en varias regiones traslapadas.

El uso de auto-correlación y control de integridad en línea mejora la exactitud, incrementa la productividad e incrementa la fiabilidad. El acceso al realce de la imagen y las funciones de la manipulación de la imagen ayuda considerablemente al operador en la ejecución de la tarea de medición.

Este módulo de triangulación y extracción automática de puntos de imágenes debe ofrecer las mejores combinaciones de puntos multi-rayos enlazados usando un robusto ajuste construido durante todas las fases de la operación de combinación de imágenes. También debe ofrecer la posibilidad de seleccionar contornos de imágenes que le permite al operador seleccionar datos GPS/INS, calibración de cámara, selección automática de parámetros, análisis para auto-calibración y análisis de vectores gráficos, con el fin de que la triangulación aérea sea completamente automatizada desde una orientación interior para la determinación de puntos de enlace hasta el análisis de ajuste del bloque final con la entrega de parámetros de orientación.

- 5.- Módulo de Generación Automática de MDE (MGA/MDE). Este módulo debe contar con la capacidad de generar automáticamente modelos de elevación desde imágenes estéreo aéreas o satelitales. Caracterizado por un alto grado de automatización que se logra a través del uso de estructuras de datos de imágenes jerarquizadas y métodos de procesamientos de imágenes. Debe realizar las siguientes funciones:
- Producir puntos MDE extremadamente definidos a través de una alta redundancia.
  - Crear herramientas de detección de errores por casas y árboles.
  - Permitir una interfaz de usuario flexible con el MVE para determinar parámetros y digitalizar puntos y entidades lineales, si fuera necesario.

- 6.- Módulo de Digitalización y Colección de Elementos (MDCE). Es un módulo que proporciona herramientas para recopilar interactivamente los atributos y la geometría de las entidades deseadas, desde un modelo estereoscópico.

También brindan herramientas que permiten a los usuarios personalizar las definiciones sobre las entidades del modelo y definir los métodos de recopilación de entidades, con el propósito de poder adaptarse mejor a las necesidades de producción.

Otra característica que debe cumplir esta módulo es la de proporcionar un método interactivo para recolectar y/o corregir datos del modelo digital de terreno (MDE), puntos de elevación, líneas de quiebre y otras entidades geomorfológicas en modelos estéreo.

- 7.- Módulo para la Generación de Ortofotos Digitales (MGOD). Es un módulo con herramientas de orto-rectificación integradas que se refiere al flujo completo de trabajo de producción de ortofotos , incluyendo planificación de proyectos de ortofotos, rectificación, emparejamiento (dodging), ortofotos verdaderas (true-orto), balanceo de tonos, generación de líneas de adición (seamline) automáticas y permitir una evaluación de calidad. También debe incluir la posibilidad de introducir datos automáticamente desde diferentes proyecciones y datums e integrarlo en un proyecto cartográfico.

- 8.- Módulo de Tratamiento de Imágenes (MTI). Debe otorgar opciones para la composición y salida de imagen raster combinada con información vectorial, márgenes, etc.

Este módulo también debe proveer herramientas para importación y exportación de ortofotos e imágenes de satélite en los formatos adecuados.



#### **3.2.2.4. Sistema de visión estereoscópica.**

Se denomina visión estereoscópica a la habilidad de concebir objetos en tres dimensiones, así como la capacidad de juzgar profundidades en un espacio tridimensional.

Para poseer esta capacidad, el observador ha de disponer de visión simultánea en un mismo plano de una determinada imagen con sus dos ojos (visión binocular). El ojo humano, ópticamente, puede ser considerado como una lente de curvatura variable (cristalino) que proyecta imágenes a una capa de material sensible (la retina y dentro de esta la mancha fóvea), que está unida al cerebro humano a través del nervio óptico, lo que nos permite percibir imágenes tridimensionales.

El ojo humano puede percibir con nitidez y sin esfuerzo (no se precisa cambio en la curvatura del cristalino) desde imágenes de objetos lejanos situados sobre el horizonte, hasta objetos cercanos, ubicados a unos 20 metros (distancia hiperfocal del ojo). A partir de esa distancia, para poder percibir con nitidez las imágenes de los objetos, el cristalino ha de modificar su curvatura, para que sean enfocadas correctamente dichas imágenes en la retina. A ese proceso de cambio de curvatura del cristalino se le conoce como acomodación.

Este proceso de acomodación se produce desde la distancia hiperfocal (20 m) hasta una distancia en la que las limitaciones fisiológicas del cristalino, no le permiten curvarse más.

La distancia de la visión distinta es para el ojo humano de 20 a 25 cm según el observador. A partir de esa distancia límite, a causa de la incapacidad del cristalino de producir imágenes enfocadas en la retina, las imágenes son borrosas y los objetos no pueden ser percibidos con nitidez.

Aunado a la acomodación, existe el proceso de convergencia, el cual se realiza cuando se hace una observación simultánea con ambos ojos de un determinado objeto. La acomodación y la convergencia las realiza el ojo de forma natural y de forma simultánea, ya que a la vez que el cristalino modifica su curvatura (se acomoda) los dos ojos dirigen sus visuales hacia el objeto deseado (convergen).

La visión estereoscópica artificial parte de la premisa de dos proyecciones centrales de una misma realidad (de una misma zona), tomadas bajo centros perspectivos distintos, por ejemplo dos fotogramas de un mismo objeto y zona tomados desde puntos de vista distintos, podemos formar una imagen tridimensional, formando un modelo estereoscópico de ese objeto o zona, y a partir de las siguientes condiciones:

- a) Cada ojo debe ver sólo la imagen que le corresponda (es decir el ojo derecho debe observar solamente la imagen fotográfica tomada desde la derecha del objeto y el ojo izquierdo la de la izquierda).
- b) La visión de ambas imágenes del objeto debe ser observada según planos epipolares. Se denomina eje epipolar a la recta que une los centros de

proyección de ambas imágenes o los centros ópticos de observación de ambas imágenes (ojos derecho e izquierdo) según nos estemos refiriendo.

Por otro lado, se denominan rayos epipolares a las rectas que unen los centros de observación (o proyección según corresponda) con las dos imágenes de un determinado punto en el espacio. Si estas rectas se cortan (determinan un plano llamado epipolar) se puede producir visión estereoscópica. Si no, si se cruzan, entonces no se formará el plano epipolar y por lo tanto no existirá visión tridimensional (estereoscópica) de esa realidad.

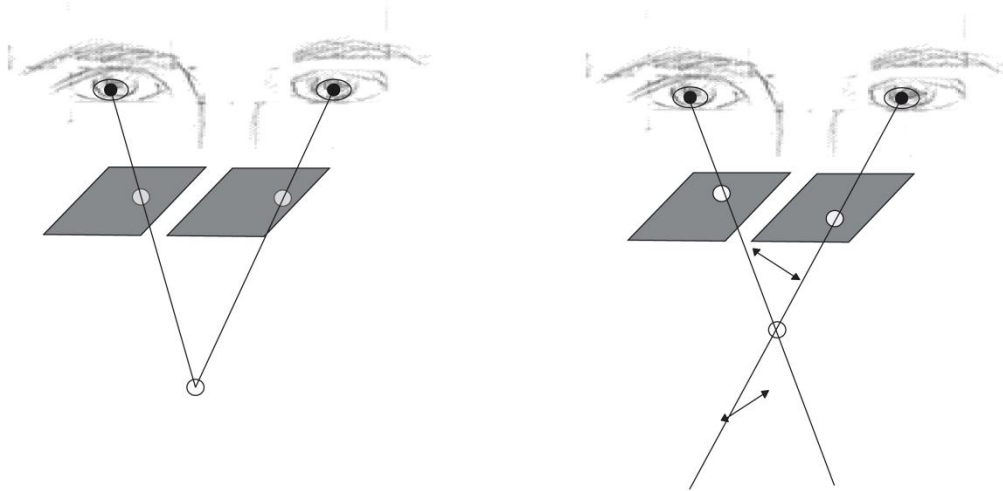


Figura 3.22a. Ausencia de paralaje vertical. Figura 3.22b. Presencia de paralaje vertical.

Figura 3.22. Paralaje en la visión estereoscópica.  
(Elaboración propia).

En la figura 3.22a, los rayos epipolares que unen los centros ópticos de ambos ojos, con las dos proyecciones fotográficas de un mismo punto (rayos epipolares homólogos), se interceptan en el espacio, por lo tanto se puede producir visión estereoscópica.

En la figura 3.22b, los rayos epipolares homólogos se cruzan y es por lo tanto imposible que se produzca visión estereoscópica.

La visión estereoscópica puede conseguirse sin ayuda de ningún instrumento (visión estereoscópica natural), pero dado que el ojo humano realiza la acomodación y la convergencia de manera simultánea, resulta extraordinariamente cansado y se necesita tener bastante entrenamiento.

Para conseguir visión estereoscópica de forma que precise menos esfuerzo, se han desarrollado instrumentos que al facilitar el cumplimiento de las dos condiciones antes señaladas, simplifican esta tarea. El tipo de visión estereoscópica conseguida se llama artificial y se realiza sobre un modelo estereoscópico.

El modelo estereoscópico, es definido como el modelo espacial que se observa al mirar un par de fotografías (par estereoscópico). Cualquier par fotográfico a lo largo de la línea de vuelo debe cumplir las siguientes condiciones, a fin de reproducir un modelo estereoscópico (ver figura 3.23):

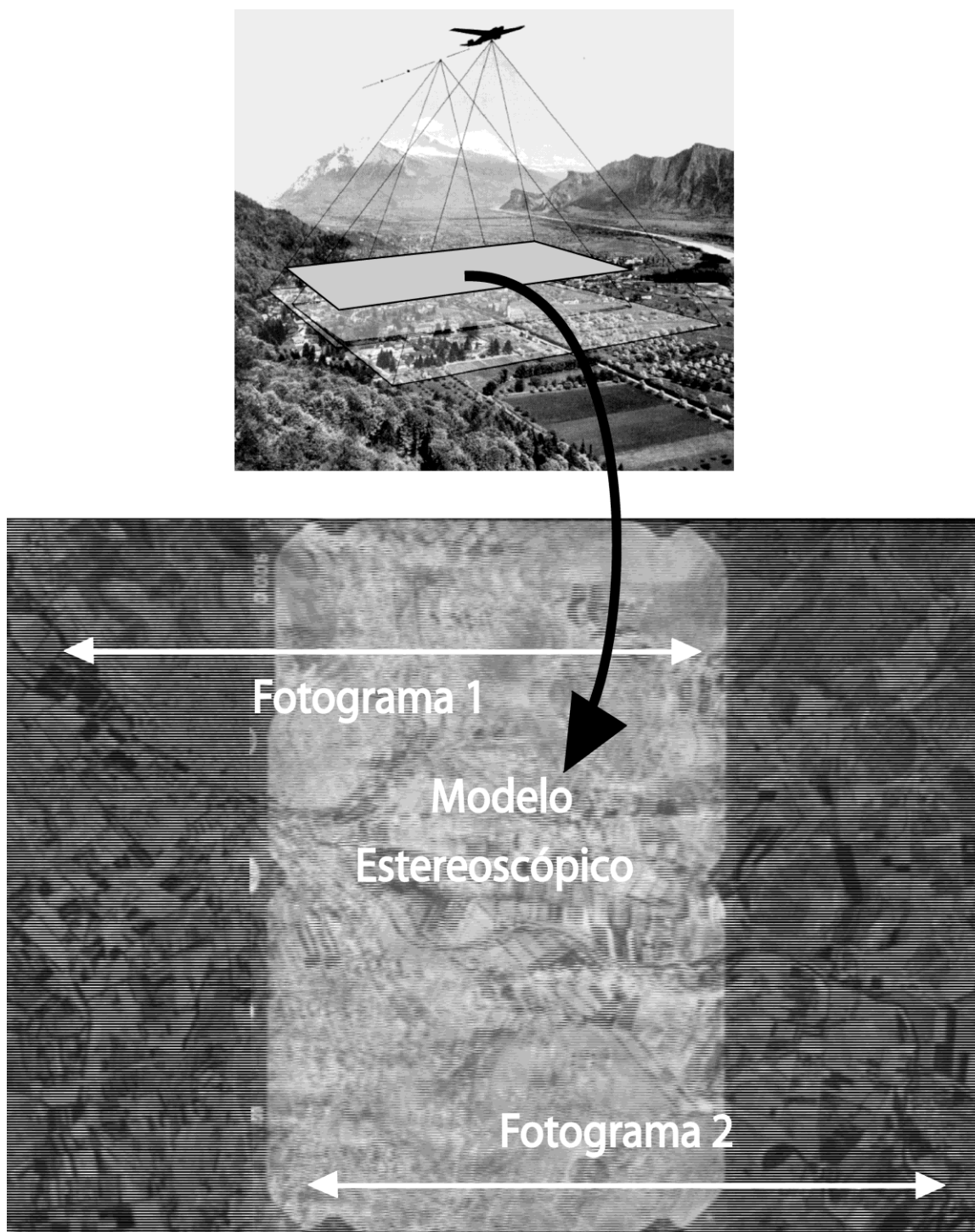


Figura 3.23. Modelo estereoscópico.  
(Elaboración propia).

- Debe corresponder a fotografías sucesivas con un área común (sobreposición). Cada fotografía del área se toma desde diferente estación.
- Debe existir un recubrimiento necesario entre ambas fotografías.
- La observación se debe realizar a una misma zona u objeto.
- Los ejes ópticos de la cámara en el momento de la exposición, deben estar aproximadamente en un mismo plano.
- La relación entre la altura de vuelo y la distancia entre las estaciones de toma o exposición, debe tener un valor relacional. Fuera de esto la visión estereoscópica se complica.
- La escala de las fotografías debe ser aproximadamente la misma, se aceptan diferencias no mayores al 5%.

Se denomina par estereoscópico a la pareja de aerofotos consecutivas y en serie que permiten observar el terreno en tercera dimensión mediante cualquier sistema de visión estereoscópica.

A partir de la anterior explicación, en donde se fundamenta la importancia de los modelos estereoscópicos, los procedimientos de observación estereoscópica artificial se clasifican en dos tipos:

- a) Procedimientos de observación por líneas de visión paralela: Este grupo de métodos busca la separación de las imágenes en cada uno de los ojos basándose en el principio de que los ojos convergen de manera natural hacia el objeto observado, y si este está en el infinito, las líneas de visión correspondientes a cada ojo son paralelas (forman un ángulo cero).

Dado que la acomodación y convergencia se producen de forma natural simultáneamente, resulta extremadamente cansado y dificultoso que cada ojo observe el fotograma que le corresponde. Para solventar esta problemática, existen los estereoscopios de refracción (de bolsillo) y reflexión (de espejos).

- b) Procedimientos de observación por líneas de visión convergente: Este sistema se basa en la separación de las imágenes y es aplicable a las DWPS.

El sistema de visión estereoscópica es indispensable para la mayoría de los trabajos fotogramétricos, el cual requiere la separación de las dos imágenes del par estereoscópico y dicha separación se puede realizar de dos formas:

- a) Separación espacial: consiste en partir la pantalla y utilizar un estereoscopio mecánico (ver figura 3.24).



Figura 3.24. Sistema de visión estereoscópica con separación espacial.  
(Elaboración propia).

El método consiste en montar un estereoscopio de espejo enfrente de la pantalla y editar cada imagen (izquierda y derecha) en media pantalla. Las dos imágenes que integra el modelo se visualizan de una forma simultánea en el monitor (o monitores).

Tiene el inconveniente de que al partir el monitor se reduce el área observable del modelo, pero en cambio tiene la ventaja de que se crea un entorno de trabajo muy similar al de los restituidores analíticos.

Pueden utilizarse monitores y adaptadores gráficos más simples. Una solución a este método es la utilización de dos monitores, uno para cada imagen, incrementando de esta manera el área observable.

El modelo estereoscópico solamente puede ser observado por un operador y no por varios operadores simultáneamente.

- b) Separación temporal y radiométrica: se basa en la presentación alternativa de ambas imágenes con la utilización de polarización pasiva o activa.

En la polarización con gafas pasivas (figura 3.25), las imágenes se muestran de una forma alternativa en la pantalla. Consiste en superponer al monitor un modulador de cristal líquido que actúa como filtro de células polarizantes de manera que cada 1/120 de segundo cambia la polarización, proporcionando diferente polarización para la imagen izquierda que para la derecha. De esta manera el operador ve alternativamente la imagen izquierda y derecha, y se produce el efecto de visión estereoscópica.

La polarización es circular y el refresco de la pantalla es de 60 Hz. La modulación del cristal líquido se sincroniza con el procesador gráfico, de manera que cambia la polarización con la misma frecuencia y al mismo tiempo que las imágenes son representadas en la pantalla. Las gafas están polarizadas en sentido vertical y horizontal.

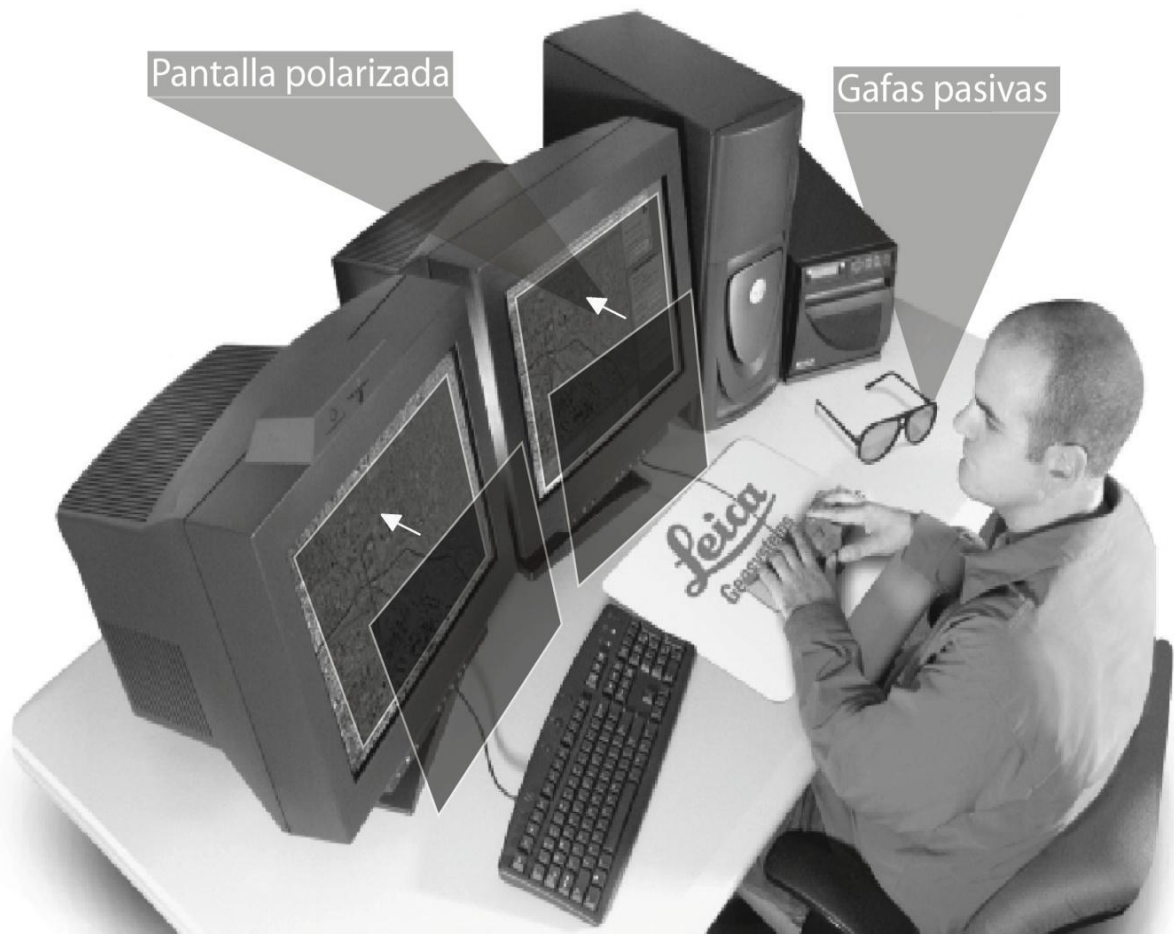


Figura 3.25. Sistema de visión estereoscópica con separación temporal y radiométrica con polarización a través de gafas pasivas.  
(Fuente: Imagen extraída de "Digital Photogrammetry Free-Hand Controller", Leica Geosystems, esquema de elaboración propio).

En la polarización con gafas activas (figura 3.26), las imágenes se editan en la pantalla de una manera alternativa y secuencialmente con una frecuencia de 120 Hz. Las gafas (activas) en este caso usan unos cristales con un obturador (LCS-Liquid crystal Shutter) que separan las imágenes ofreciendo alternativamente al operador la imagen izquierda y derecha (incluyendo la marca flotante) a tal velocidad que se produce la fusión de imágenes y por tanto el efecto estereoscópico.

La pantalla y el obturador están separados mediante un emisor de rayos infrarrojos que se suele colocar encima del monitor.



Figura 3.26. Sistema de visión estereoscópica con separación temporal y radiométrica con sistema emisor de rayos infrarrojos y gafas activas.

(Fuente: Imagen extraída de “Curso de operación de DWPS bajo Windows 2000” INEGI, esquema de elaboración propio).

Los dos métodos anteriores tienen las siguientes ventajas:

- Permiten la visión de imágenes en color.
- Permiten el principio de superposición.
- Permiten que varios técnicos puedan ver el modelo simultáneamente (ver figura 3.27).
- Permiten a los operadores la libertad en los movimientos de la cabeza.

En cuanto al principal inconveniente es que hay una reducción del brillo en comparación con un monitor normal debido a la doble frecuencia y a la absorción de la luz por la polarización de la pantalla (caso de gafas pasivas) o por el obturador en el de gafas activas.

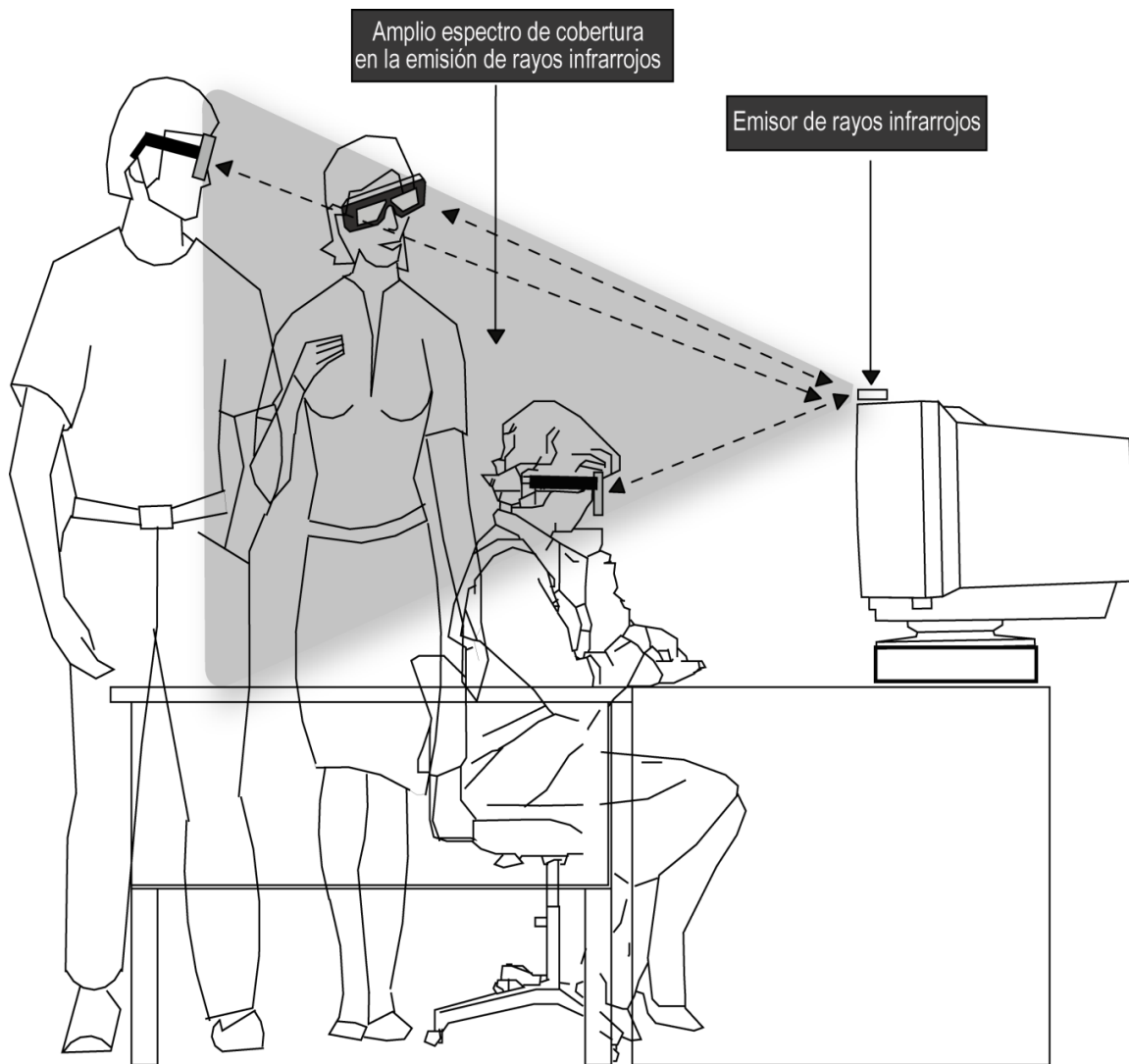


Figura 3.27. Sistema de visión estereoscópica con separación temporal y radiométrica, con sistema emisor de rayos infrarrojos y un amplio espectro de cobertura, lo que permite la visualización a varios operadores al mismo tiempo. (Elaboración propia).

### 3.2.2.5. Sistema de medición estereoscópica.

Finalmente es importante comentar que dentro de un sistema de visión estereoscópica y en estrecha relación con la manipulación de modelos estereoscópicos digitales, se encuentra el principio de la marca flotante, ya que esta es usada para medir alturas en el modelo, si las dos marcas están en puntos correspondientes en un modelo estereoscópico, ellas son vistas como una marca "sobre el terreno".



Si esta marca es entonces desplazada hacia adentro o hacia afuera, la marca espacial es vista flotando sobre o bajo el terreno, respectivamente. Esta marca tiene movimientos en todo el modelo estereoscópico y su principal función es proporcionar en todo momento valores XYZ y en varios procesos del flujo fotogramétrico, citando algunos ejemplos, en la corrección de MDE y el proceso de digitalización de rasgos del terreno (ver figura 3.28).

Las mediciones otorgadas por la marca flotante dependen directamente de la precisión en los procesos de orientación interna y aerotriangulación.

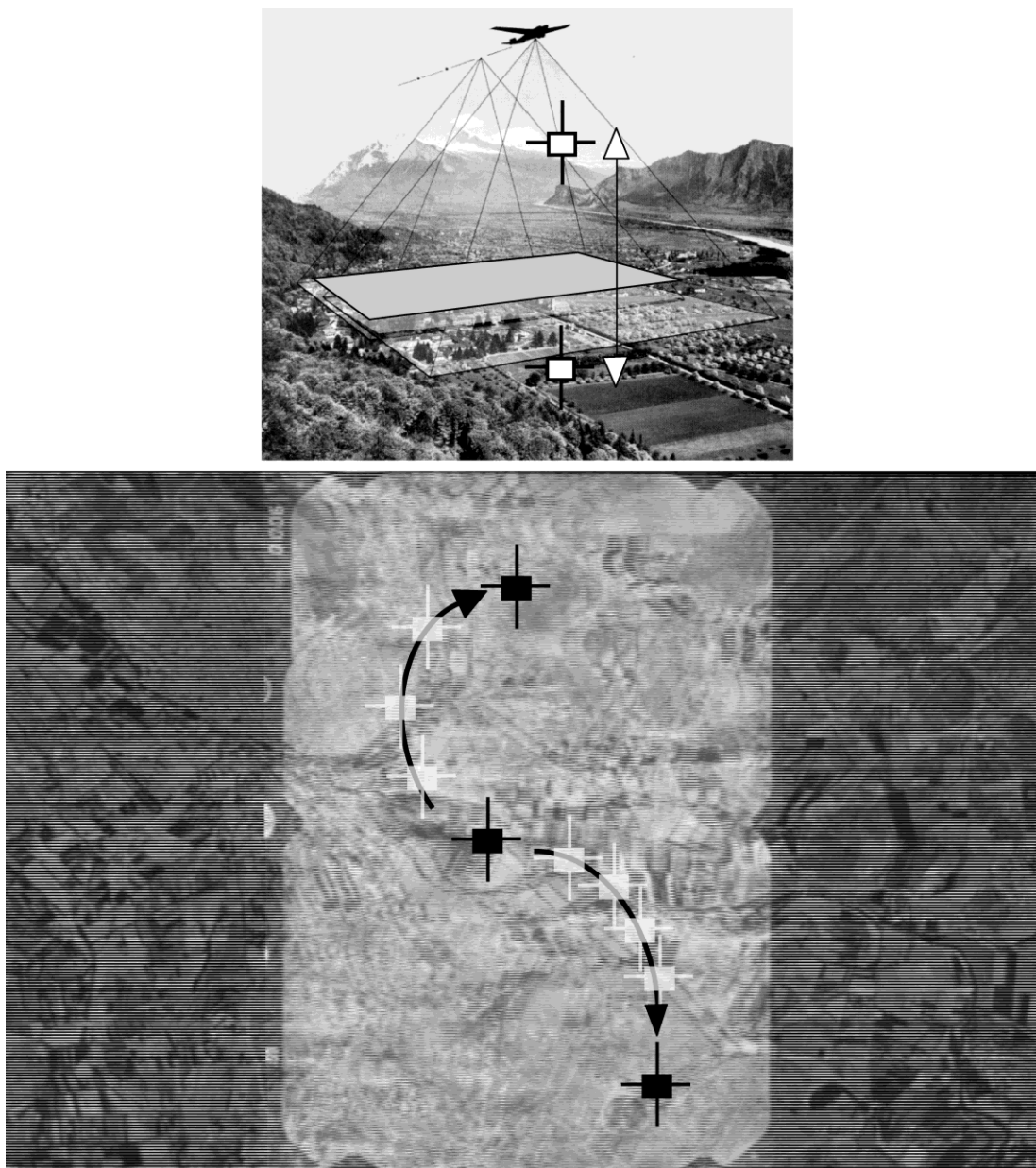


Figura 3.28. Movimientos en XYZ de la marca o punto flotante.  
(Elaboración propia).

### **3.3. Fundamentos técnicos y teóricos utilizados en un flujo de trabajo fotogramétrico.**

El tercer y último aspecto a explicar en este apartado son los fundamentos teóricos utilizados en flujo de trabajo fotogramétrico de una DPWS.

Dentro del flujo de trabajo fotogramétrico, una vez obtenidas las imágenes digitales, el proceso inicial es la restitución fotogramétrica, proceso que se basa en las técnicas de correlación (matching) de imágenes digitales, las cuales consisten en el establecimiento automático de correspondencias entre elementos extraídos de dos o más imágenes digitales con un recubrimiento común. El término matching se ha impuesto en la literatura especializada como la expresión más adecuada para determinar la correlación entre imágenes digitales en fotogrametría.

En Fotogrametría y Teledetección el término matching puede ser traducido como el establecimiento de correspondencia entre diversos conjuntos de datos, los cuales pueden ser imágenes, mapas, objetos o elementos de un SIG. En Fotogrametría existen diversos procesos que pueden ser considerarse como un matching, por ejemplo:

- La orientación interna es un proceso de matching en el que la imagen de una marca fiducial se correlaciona con un modelo bidimensional teórico de la fiducial.
- La orientación relativa y la transferencia de puntos en aerotriangulación, consistente en la identificación de puntos homólogos en los fotogramas que forman el modelo.
- La orientación absoluta, que pretende la identificación de los puntos de apoyo en el modelo;
- La generación de modelos digitales de elevaciones, mediante identificación de puntos homólogos una vez orientado el par, pretende la obtención de la información tridimensional derivada del modelo estereoscópico en base del reconocimiento de formas y objetos.

A partir de estos ejemplos, la correlación (matching) cubre prácticamente todos los procesos relacionados con la metodología fotogramétrica, siendo en la actualidad una de las líneas de investigación de mayor importancia e interés.

#### **3.3.1. Principio de la correlación de imágenes.**

La correlación de imágenes tiene como objeto la localización de forma automática de un punto objeto en una imagen. La correlación explica el proceso de identificación automática de los puntos homólogos en imágenes digitales. Con objeto de simplificar el problema, supongamos que partimos de que se conoce de forma aproximada la ubicación del objeto en la imagen y por tanto es factible hacer una preselección del área de búsqueda. Esta área preseleccionada se conoce

como matriz de búsqueda o área de búsqueda (search target o search area) y dentro de ella vamos a localizar unas determinadas formas que definan un objeto concreto a las cuales llamaremos matriz patrón (target matrix o target area); en otros casos suele llamarse como ventana de búsqueda. Un ejemplo que aclare lo dicho anteriormente es el que se muestra en la figura 3.29a y 3.29b.

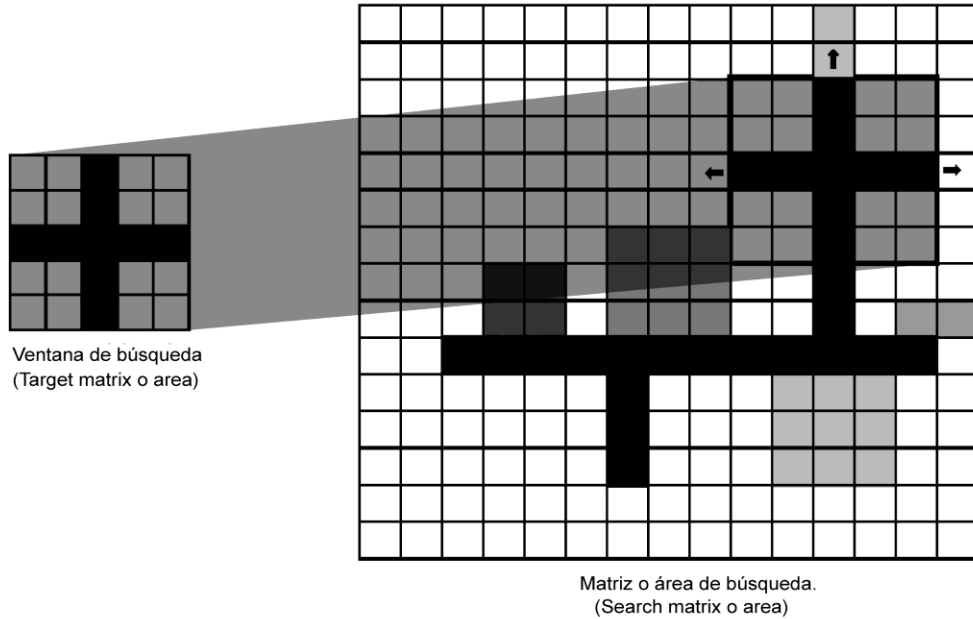


Figura 3.29a. Matrices o áreas de busqueda y patrón.

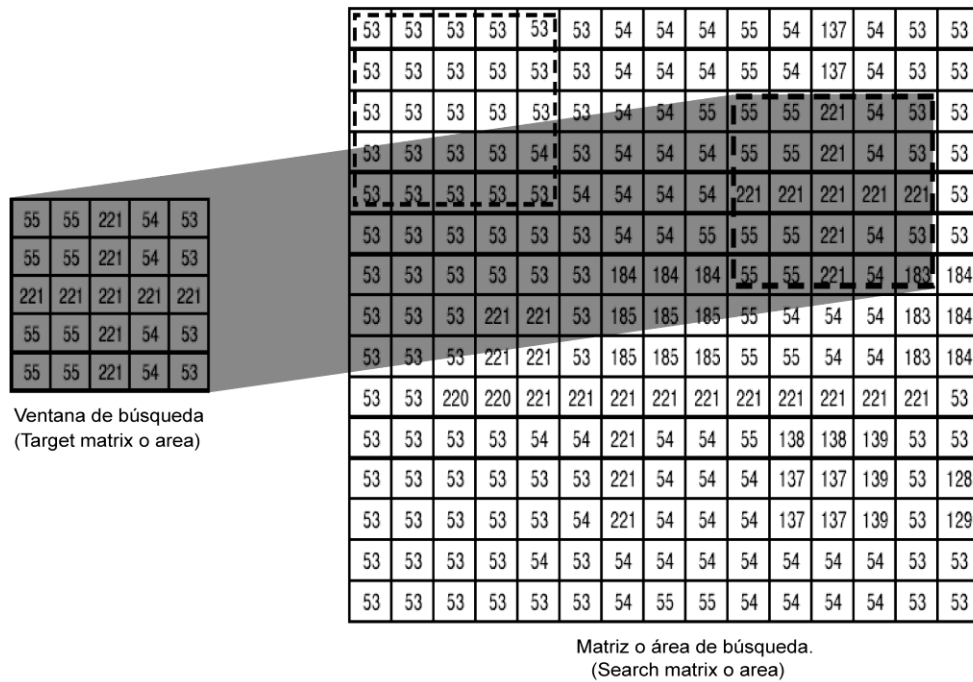


Figura 3.29b. Matrices o áreas de busqueda y patrón anteriores con sus respectivos niveles digitales

Figura 3.29. Principio de la correlación de imágenes.  
(Adaptado de Pérez Álvarez, Juan Antonio. Apuntes de Fotogrametría II, pág. 149).

En donde se ha tomado un objeto fácilmente identificable como es el caso de una marca fiducial. Cuando el área de búsqueda es demasiado grande en las dos direcciones (XY), se utiliza lo que se denomina correlación bidimensional. En cualquier método de correlación que se utilice, el primer paso es comparar dentro del área de búsqueda los componentes que tengan un tamaño similar procurando buscar fuera de esta área los puntos que se corresponden con los que hay dentro del área que se representa.

Puesto que una imagen fotográfica está grabada en dos dimensiones, la correlación de imágenes es esencialmente un trabajo en dos dimensiones. Sin embargo, la correlación de la imagen estereoscópica se puede reducir a una sola dirección, a la de la línea epipolar, y así el trabajo se reduce de forma considerable.

Los métodos de correlación utilizados en el software fotogramétrico parten de la generación de algoritmos de visión y ajuste computarizado muy específicos y con un gran nivel de matemáticas aplicadas, pero todos ellos utilizan una base en su método de correlacionar, determinan que el par de imágenes estereoscópicas se ha tomado según una geometría epipolar. Es decir, que las líneas de barrido del par son líneas epipolares. Esta condición se cumple cuando los dos ejes de la cámara de un sistema estereoscópico son paralelos entre sí y perpendiculares a la base (caso ideal de toma fotográfica).

Si observamos la figura 3.30, encontramos dos imágenes con un recubrimiento común tomadas desde  $O_1$  y  $O_2$ ; la base  $O_1-O_2$  se llama eje epipolar.

El plano que pasa por los centros de proyección izquierda ( $O_1$ ) y derecha ( $O_2$ ) y el punto arbitrario  $P$ , es llamado plano epipolar que pasa por el punto  $P$  (ver figura 3.30). El plano epipolar que pasa por el punto principal es llamado plano epipolar principal. En un modelo fotogramétrico cada una de las imágenes izquierda y derecha tienen sus respectivos planos epipolares principales. La línea de intersección de un plano epipolar y el plano de la fotografía se denomina rayo o línea epipolar. Todos los rayos epipolares de una misma fotografía intersectan en un punto llamado punto epipolar  $K$ , que es la intersección de la recta que pasa a través de los dos centros de proyección (eje epipolar) con el plano de la fotografía.

Si elegimos un punto imagen  $p'$  en la fotografía izquierda, este punto y el punto epipolar  $K_1$  definen el rayo epipolar  $p'K_1$  el cual corta en un punto  $D$  a la recta intersección de los planos prolongados de las imágenes izquierda y derecha. Uniendo este punto  $D$  con el punto epipolar de la imagen derecha  $K_2$ , la recta  $DK_2$  será el rayo epipolar de la imagen derecha y dará el lugar geométrico del punto imagen  $p''$ .

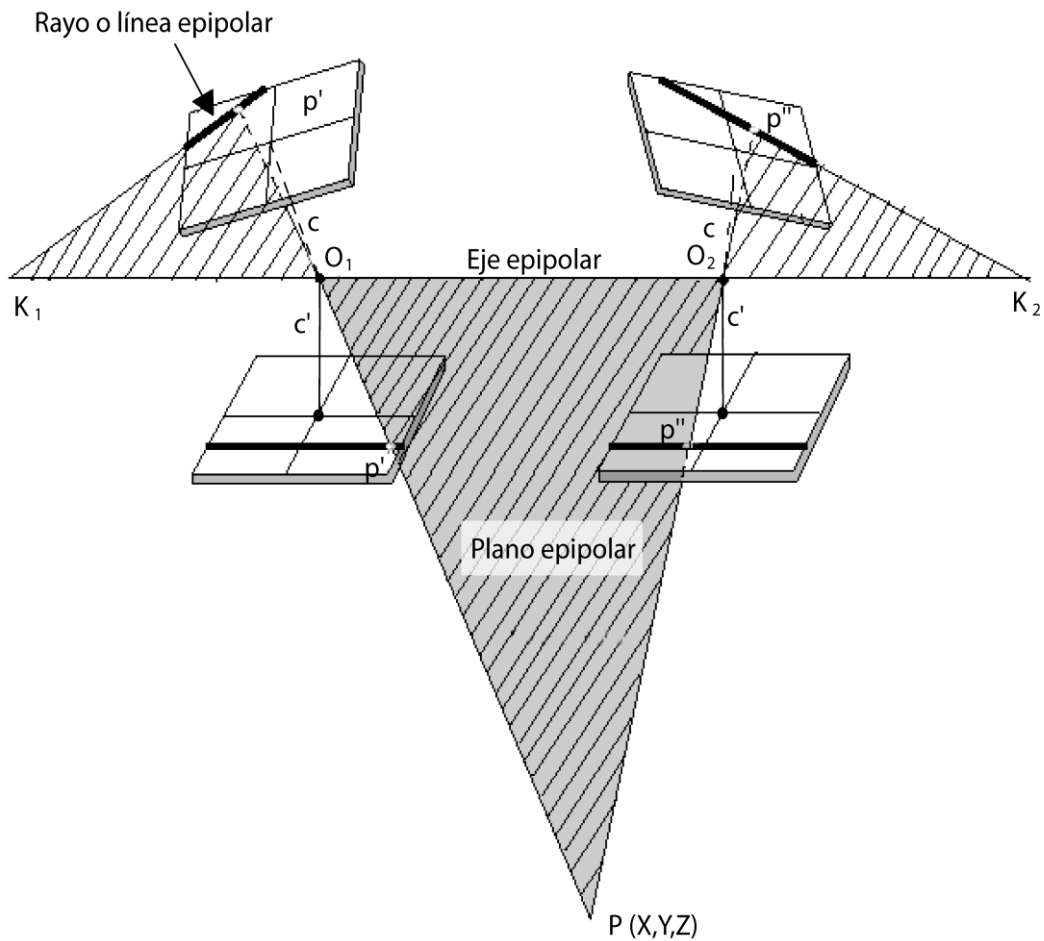


Figura 3.30. Geometría Epipolar.  
 (Adaptado de Pérez Álvarez, Juan Antonio. Apuntes de Fotogrametría II, pág. 157).

Este proceso tiene el objetivo de obtener una imagen normalizada (ver figura 3.31) a partir de aplicar los procesos de orientación y construida con geometría epipolar en el espacio objeto, frente al concepto de imagen real que será aquella tomada en el momento de la exposición. La imagen que es paralela al plano XY del espacio objeto recibe el nombre de imagen verdaderamente vertical (imagen ideal). En una imagen normalizada las líneas epipolares son paralelas y los puntos epipolares se encuentran en el infinito.

En resumen, cuando un modelo fotogramétrico está orientado absolutamente en un instrumento, cualquier punto del modelo puede ser seleccionado por la marca de medición del instrumento, por lo que sus coordenadas pueden registrarse en un archivo digital.

La técnica de correlación de imágenes (también llamada correlación cruzada), se fundamenta en la comparación de imágenes digitales a partir de pares estereoscópicos de fotografías aéreas. En este método se extraen sub-imágenes homólogas digitales de ambas fotografías, izquierda y derecha, que subsecuentemente se correlacionan por medio de su información radiométrica (los valores de la escala de grises).

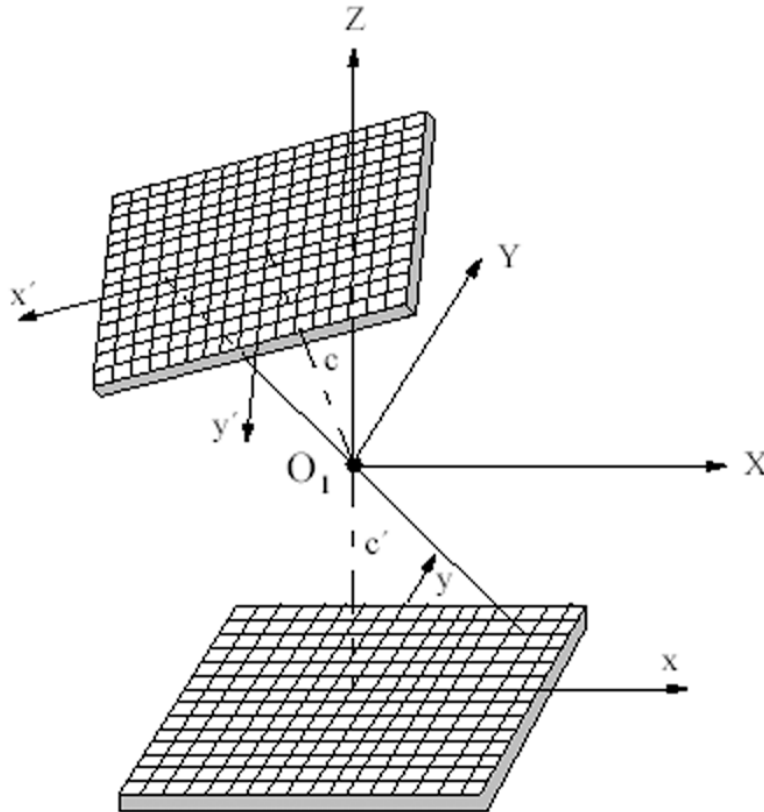


Figura 3.31. Imagen original e imagen normalizada.  
 (Fuente: Pérez Álvarez, Juan Antonio. Apuntes de Fotogrametría II, pág. 157).

### 3.3.2. Técnicas semiautomáticas de restitución digital.

La restitución digital busca la semi-automatización de todos los procesos fotogramétricos, ya que algunos sistemas lógicos cuentan con la correlación como procedimiento de corrección, hay que distinguir claramente dos posibilidades dentro de estos sistemas:

- a) Cuando la correlación supone la automatización del proceso.
- b) Cuando la correlación es un apoyo a la orientación.

La diferencia es muy importante, en la primera posibilidad determina que, algunos procesos fotogramétricos se realicen en automático, mientras que la segunda posibilidad hace que sea el operador el que realice los procesos y que solamente en la materialización del punto sobre el terreno se considere la correlación, la eliminación del paralaje en cada punto es automática.

Así mismo, la correlación puede ser transformada a las necesidades propias, al alterar los sistemas de coordenadas utilizados. Los sistemas de coordenadas usados en fotogrametría son cartesianos y responden al conjunto de coordenadas que se pueden obtener de un mismo punto del terreno a lo largo de todo el proceso fotogramétrico de restitución.

Por lo tanto, estos serán utilizados siempre y cuando realicemos dos tomas fotográficas de un objeto y son los siguientes:

- **Coordenadas comparador:** Son coordenadas planas referidas a cualquier sistema cartesiano plano de la imagen. Para cualquier punto del objeto fotografiado tendremos dos pares de coordenadas, en el fotograma izquierdo:  $(X'k, Y'k)$  y en el fotograma derecho:  $(X''k, Y''k)$ .
- **Coordenadas imagen:** Son coordenadas de la imagen de un punto respecto al sistema definido por las marcas fiduciales del fotograma y el eje principal, correspondiendo  $(x', y')$  al fotograma izquierdo y  $(x'', y'')$  al fotograma derecho.
- **Coordenadas modelo  $(X, Y, Z)$ .** Coordenadas de un punto en el modelo métrico, obtenido tras realizar la orientación relativa.
- **Coordenadas terreno  $(X, Y, Z)$ .** Coordenadas de un punto restituído en el sistema definido por los puntos de apoyos, es decir sistema absoluto de coordenadas.

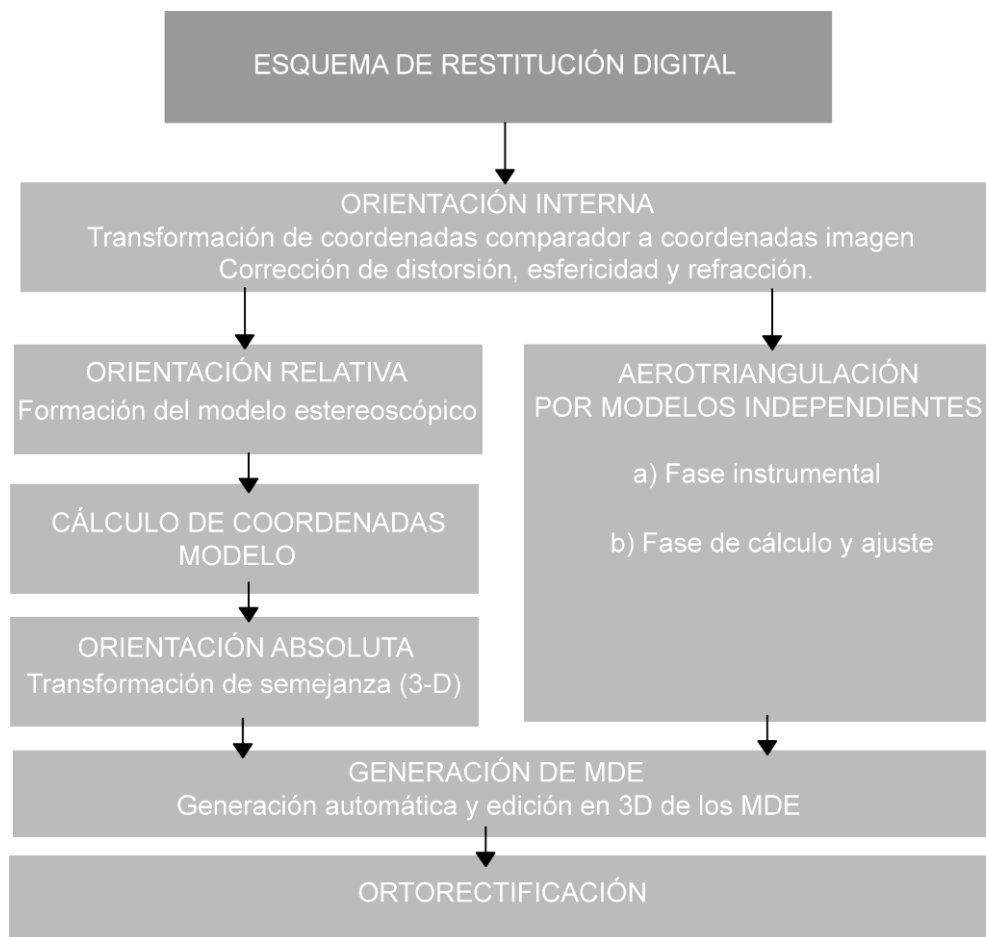


Figura 3.32. Esquema del flujo de trabajo en la restitución digital.  
(Elaboración propia).

Aunque existen varios procesos de corrección (analíticos y digitales), para efectos de este trabajo, se expondrá el proceso de restitución digital por fases (orientación interna, relativa, absoluta) y aerotriangulación por modelos independientes para la corrección espacial de nuestras imágenes y poder generar los insumos básicos de este apartado, que son MDE y ortofotos (ver figura 3.32) del ejemplo práctico propuesto, en donde el cubrimiento de las fotografías aéreas corresponde al cuadrante E14A49B, el cual forma parte de un vuelo realizado en Marzo del 2005, escala 1:40,000 con las fotografías 01, 02, 03, 04 y 05 de la línea de vuelo 327 y las fotografías 05, 06, 07, 08 y 09 de la línea de vuelo 328.

### 3.3.2.1 Orientación Interna.

Teóricamente, en la orientación interna se realiza una reconstrucción de la posición de los ejes perspectivos para modelar la geometría de la toma aerofotográfica. Para realizar esta reconstrucción matemática, son calculados los parámetros que relacionan un sistema de coordenadas de imagen digital, representado en píxeles, y un sistema de medición coordinado, determinado por la posición de la cámara fotogramétrica utilizada, representado por los parámetros numéricos del certificado de calibración de la cámara, determinado en micrones, y en donde el origen de este sistema coordinado se encuentra en el punto principal de la fotografía aérea (ver figura 3.33).

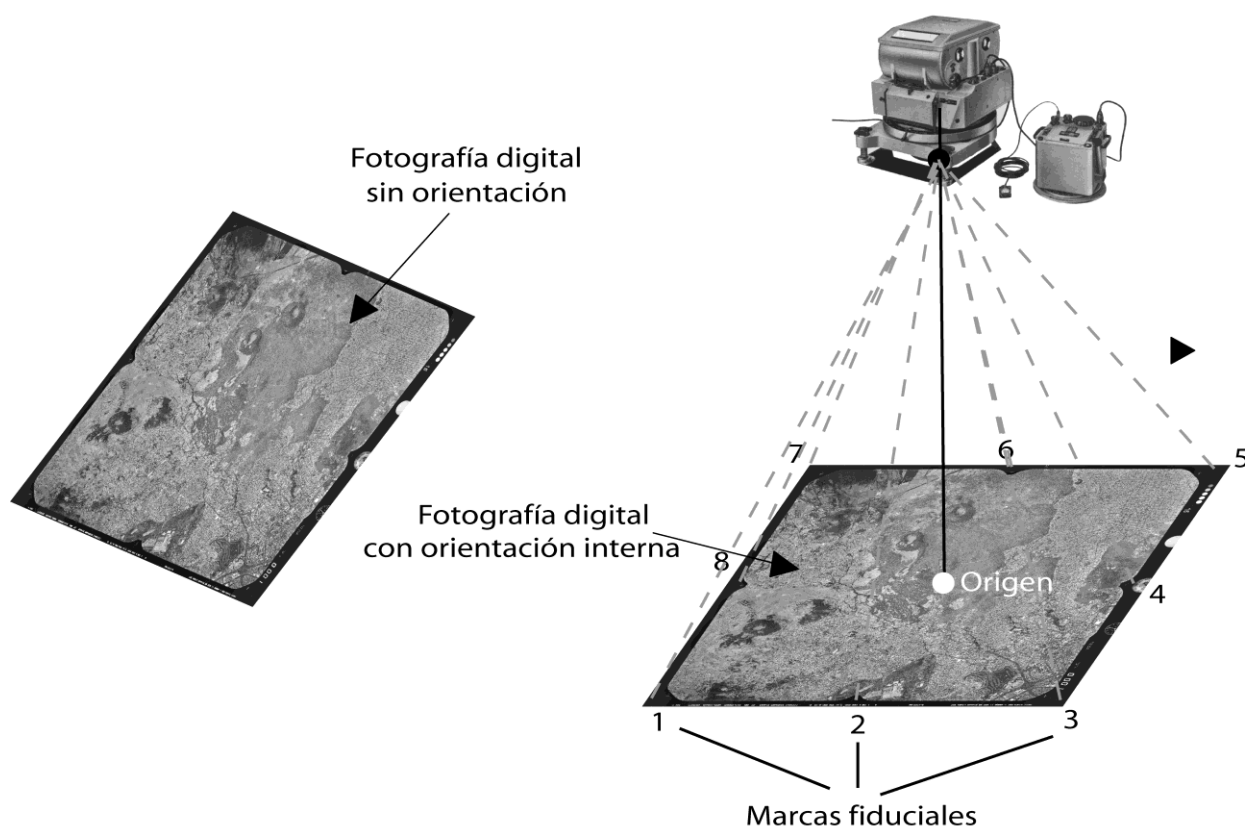


Figura 3.33. Representación gráfica de la orientación interior.  
(Elaboración propia).



A partir de la imagen anterior podemos simplificar que en este proceso, a una imagen digital que se encuentra sin ningún parámetro de ubicación espacial, le fueron asignados los parámetros de posición de las marcas fiduciales que existían dentro de la cámara al momento de la toma. Cabe aclarar que esto no significa que la imagen ya se encuentre georreferida y se puedan considerar como tal.

En la práctica, los actuales Sistemas de Fotogrametría Digital (DPS) se basan en potentes sistemas lógicos para realizar los procesos de orientación interna, por esta razón realizamos una liga al apartado 3.2.2.3 referente al sistema lógico (Software) de una DPWS, donde se especifica que la estructura modular del software utilizado cuenta con un módulo fotogramétrico básico (MFB), por lo que para otorgar un mejor entendimiento de este apartado, se incorporan ejemplos gráficos de la utilización del software Erdas LPS (Leica Photogrammetry Suite), ya que dicho software es uno de los principales proveedores de soluciones fotogramétricas hoy en día y es utilizado en varias instituciones gubernamentales y privadas a nivel nacional.

Una vez obtenido digitalmente el fotograma, en nuestro modulo MFB iniciamos la generación de un proyecto fotogramétrico, como se muestra en la figura 3.34.a, en donde incluiremos el sensor que fue utilizado para la obtención de las fotografía aéreas (ver figura 3.34.b) y el sistema de referencia geodésico con la proyección cartográfica a utilizar (ver figura 3.34.c).

A partir de los valores anteriores, es necesario asignar los datos obtenidos en la planificación del vuelo aerofotográfico como la altura a la que se realizó el vuelo (ver figura 3.34.d) y los parámetros del certificado de calibración de la cámara usada, comentados en el apartado 3.2.1.6, como distancia focal (ver figura 3.34.e) y los datos de coordenadas de las marcas fiduciales (ver figura 3.34.f).

Posteriormente se adjuntan las imágenes digitales al proyecto fotogramétrico (ver figura 3.35.a), a partir de las cuales tenemos ocho posibilidades dentro de las zonas donde se encuentran las marcas fiduciales.

Dentro del módulo de orientación y medición de modelos (MOMM), se realiza la medición fotogramétrica y movimientos panorámicos para la orientación de la imagen (interior y relativa), así el técnico u operador del software debe hacer una verificación de la lectura de las marcas fiduciales y se asigna un valor visual a las marcas de medición de referencia (ver figura 3.35.b). Pueden ser medidas un mínimo de dos fiduciales pero es recomendable leer las ocho de cada imagen y de todas las líneas de vuelo obtenidas, si están disponibles, lo anterior para incrementar la redundancia y otorgar un valor de error menor a 1  $\mu\text{m}$  en el residual (ver figura 3.35.c).

La disponibilidad de las marcas fiduciales depende de la cámara fotogramétrica utilizada, ya que el número de marcas fiduciales varía de 4 a 8 según la cámara.

Este planteamiento se basa en la localización de estas marcas, en su medición y en el conocimiento de las marcas instrumentales de la cámara, representadas en valores numéricos.

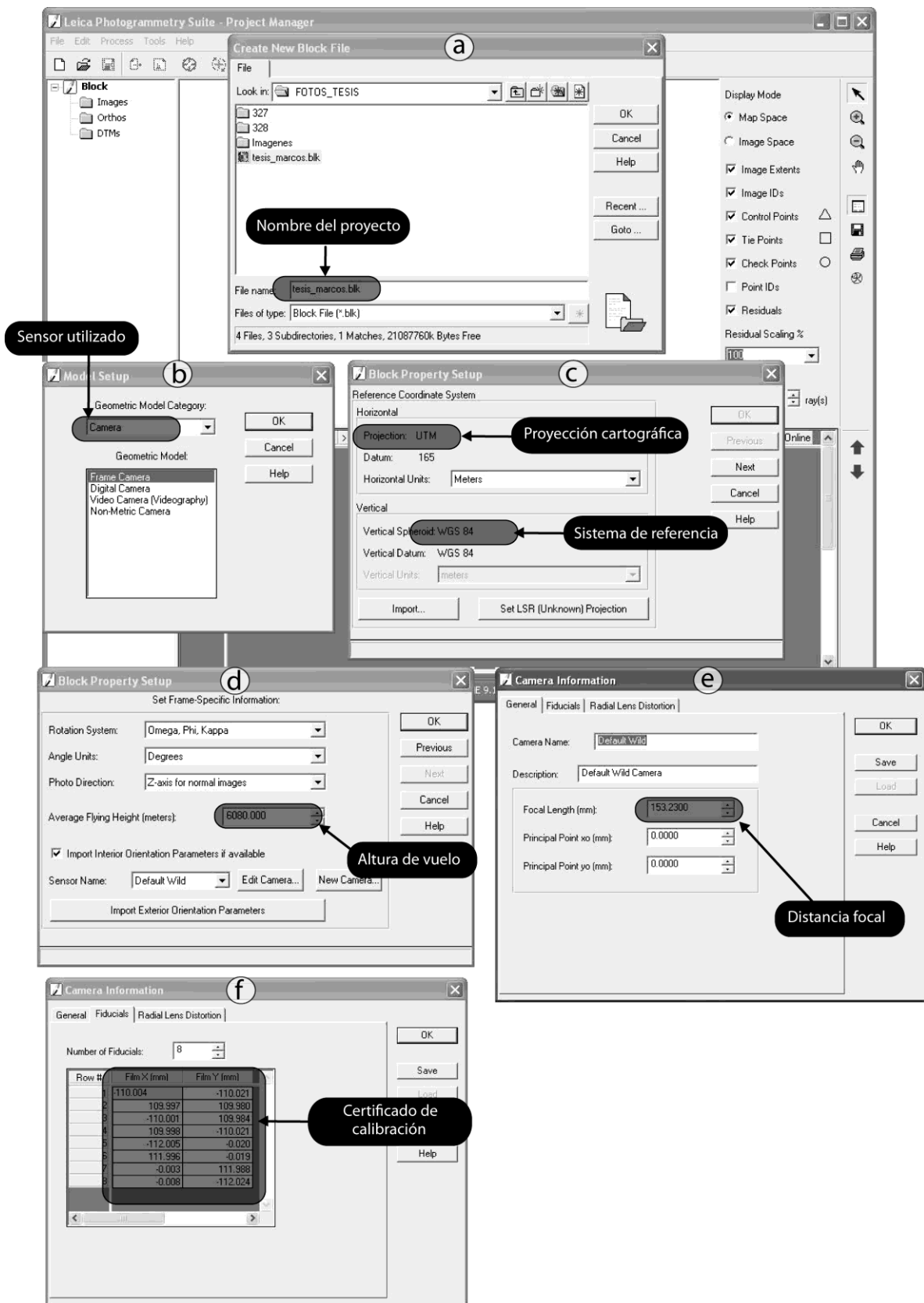


Figura 3.34. Representación gráfica de la generación de un proyecto fotogramétrico. (Fuente de imágenes: Erdas LPS 9.1 versión demo, esquema de elaboración propia).

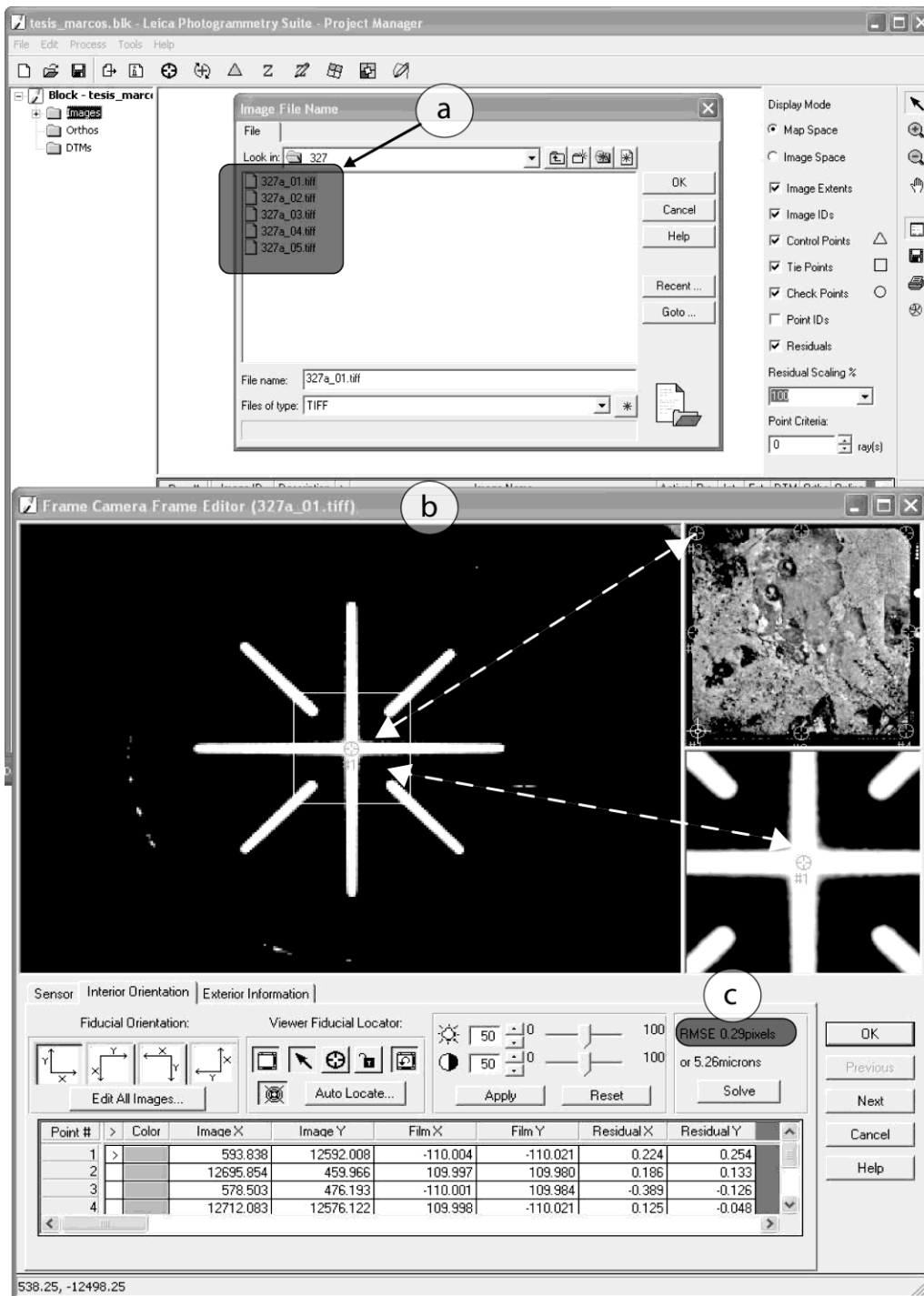


Figura 3.35. Representación gráfica del proceso de orientación interna.  
(Fuente de imágenes: Erdas LPS 9.1 versión demo, esquema de elaboración propia).

Un error que podría suscitarse en esta etapa, es el acomodo de las marcas fiduciales a partir de una mala posición de la fotografía en el momento del escaneo, teniendo en cuenta que dentro de la misma línea de vuelo, las fotografías están dispuestas en la misma dirección. Por tanto existe la posibilidad de necesitar una rotación previa a la orientación interna para corregir este error.

A partir de los valores introducidos, el sistema lógico resuelve una transformación de coordenadas usando mínimos cuadrados, para ubicar el punto principal de los fotogramas y determinar la relación entre el sistema de coordenadas de la imagen con respecto al sistema de medición de coordenadas instrumental de la cámara.

Simultáneamente se realizan correcciones para contracción o expansión de la imagen en la transformación. Para esta solución los residuales serán desplegados y el operador puede aceptar o corregir las fiduciales. Cuando la solución es aceptada, los parámetros de la orientación interior son almacenados en la computadora. Se puede introducir en la computadora información para la corrección de distorsión de las lentes, refracción atmosférica y curvatura terrestre.

### 3.3.2.2. Orientación Relativa.

En la orientación relativa, a partir del método de correlación de imágenes, son medidas las coordenadas instrumentales de imagen  $(x,y)$  y  $(x',y')$  de un mínimo de 5 puntos (se recomienda usar 6) localizados de acuerdo a la distribución de Grubber (ver figura 3.36), con el objetivo de formar modelos estereoscópicos libres de paralaje.

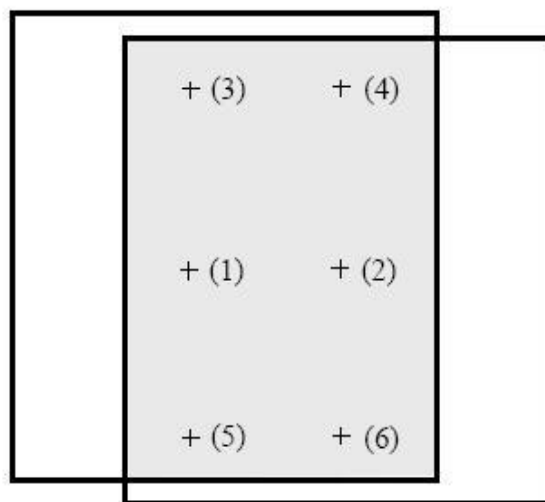


Figura 3.36. Distribución de Von Grubber sobre un par fotogramétrico.  
(Fuente: Pérez Álvarez, Juan Antonio. Apuntes de Fotogrametría II, pág. 84).

Según José Luis Lerma García (2004), la orientación relativa semi-automática digital se viene implementando de diferentes modos desde hace una década. No obstante, la mayoría sigue procedimientos y estrategias comunes como la correspondencia híbrida (basada en entidades e intensidades de área) y el uso de pirámides de imagen.

La correspondencia basada en entidades se utiliza fundamentalmente por ser más invariante a los cambios radiométricos que la correspondencia basada en intensidades y por ser generalmente más rápida. No obstante, cuando la correspondencia basada en entidades no proporciona precisión suficiente se

recurre a la correspondencia basada en intensidades, tomando como base los datos obtenidos a partir de la correspondencia basada en entidades. En general, en los niveles piramidales superiores se aplica la correspondencia basada en entidades, hasta alcanzar un nivel intermedio prefijado o el nivel inferior. La precisión alcanzada establece, si procede, continuar el proceso con la correspondencia basada en intensidades o en entidades.

En cuanto a qué tipo de entidad escoger (puntual, lineal o superficial), la mayoría de paquetes informáticos se basan en entidades puntuales, a pesar de proporcionar menor información descriptiva: los puntos son (teóricamente) invariantes a la proyección central, y fáciles de describir y extraer (puntos de interés). De este modo el modelo matemático es idéntico al requerido en la orientación relativa numérica.

Para poder medir un punto en las dos imágenes el software tendrá que comparar dos matrices de valores, una en la imagen izquierda y otra en la derecha y calcular que tan iguales son. Si repitiéramos la misma imagen a la derecha y a la izquierda el proceso se reduciría a seleccionar una matriz de un determinado tamaño, por ejemplo de 4 x 4 píxeles y buscar en la otra imagen exactamente los mismos valores y en la mismas posiciones dentro de otra matriz de 4 x 4. Pero las dos imágenes no son exactamente iguales, y además los objetos con altura no tienen imágenes iguales en una foto y en la otra debido al distinto punto de perspectiva de las tomas, por tanto el método de buscar la igualdad exacta no es factible. Actualmente hay muchos métodos de correlación de imágenes, estos nos dan un factor de cuánto se parecen dos matrices.

Parece entonces que, utilizando alguno de estos métodos, no tendremos más que seleccionar una matriz en la foto izquierda y buscar el factor más alto en alguna matriz en la foto derecha, para medir un punto, pudiendo por tanto realizarse la orientación relativa analítica de forma automática sin intervención del operador. Si esto se consigue no sólo se podría hacer la orientación relativa sino muchos de los procesos del sistema fotogramétrico, la aerotriangulación automática, la extracción automática de miles de puntos para la obtención del modelo digital del terreno, etc. Pero en aspectos de calidad, es recomendable que el operador realice una revisión minuciosa de los valores que se están obteniendo, por lo que no es posible determinar que estos procesos sean por completo automáticos.

A partir de la correspondencia, se realiza la medición independiente, la cual consiste en la determinación de coordenadas imagen a un número mínimo de puntos de dos tomas consecutivas denominados como puntos de paso y enlace (ver figura 3.37), representada por el plano epipolar o nuclear, con lo cual los dos rayos homólogos intersectan en un punto común del espacio modelo  $P(X, Y, Z)$  (ver figura 3.30). Simultáneamente se realiza solo la identificación de los puntos de control del proyecto. Para esto, el sistema lógico maneja la marca de medición para una localización aproximada, y el operador hace una ubicación precisa. Son recomendados más de 6 puntos para incrementar la redundancia, prácticamente, los sistemas lógicos pueden acomodar arriba de 20 puntos o más para esta fase de la orientación.

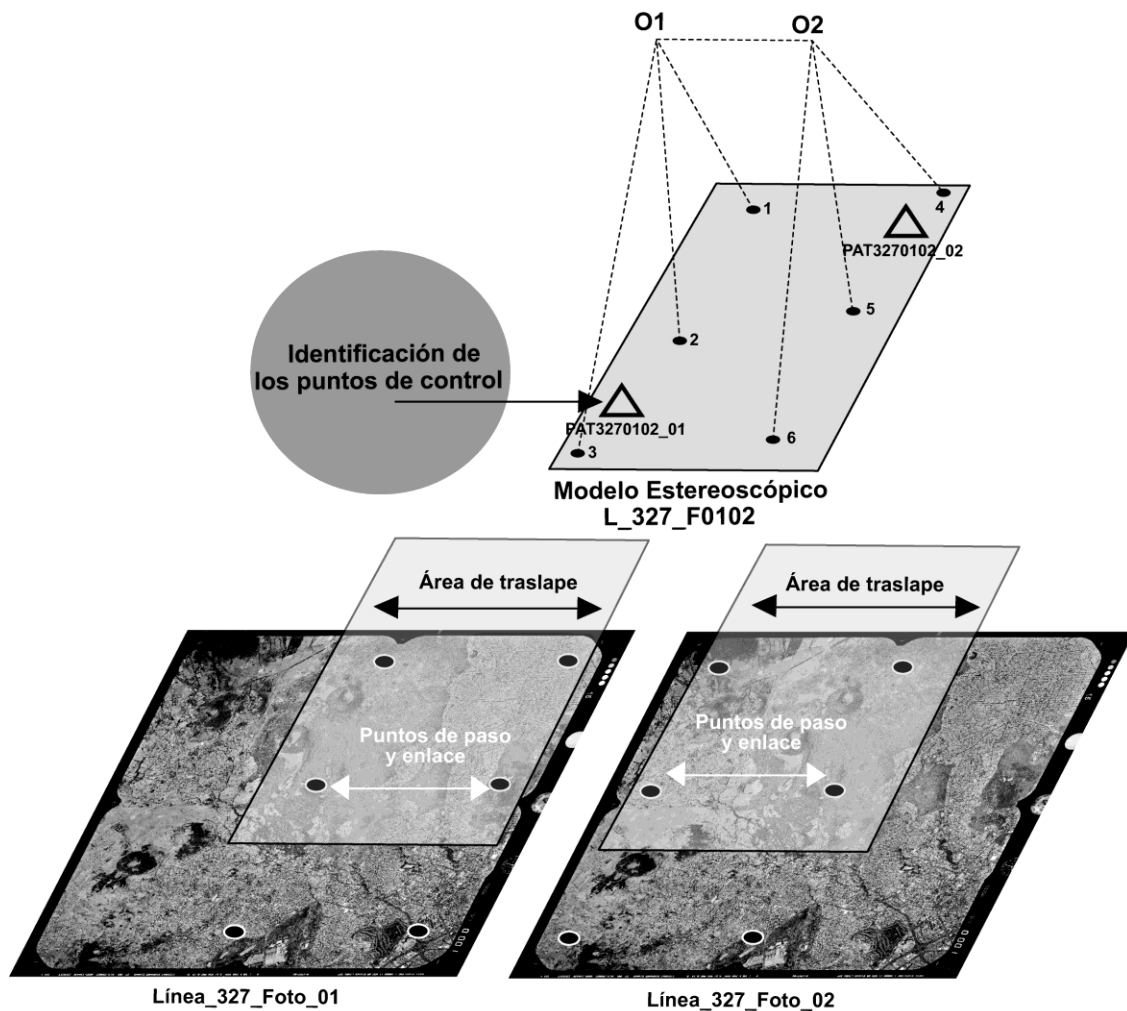


Figura 3.37. Representación gráfica de la medición independiente a partir de la distribución de Von Gruber sobre un par fotogramétrico del proyecto E14A49B. (Elaboración propia).

Los datos de entrada necesarios para la orientación relativa son: el par de imágenes digitales y los datos de definición del proyecto (información adicional proporcionada por el operador). Entre los datos del proyecto encontramos:

- Los elementos de orientación interna.
- Los parámetros de transformación entre los sistemas de coordenadas pixel e imagen; la orientación interna realizada.
- La escala aproximada de las imágenes fotográficas, rotaciones y recubrimientos.
- El orden adecuado de las imágenes (izquierda y derecha).

Desde el punto de vista fotogramétrico no hay diferencia en el cálculo de la orientación relativa analítica en un aparato analítico y en uno digital, pero las ventajas que aportan los restituidores digitales es la capacidad de identificar imágenes homólogas por métodos estadísticos.

### **3.3.2.3 Orientación absoluta.**

Una vez realizada la orientación interna, relativa y calculadas las coordenadas modelo, la siguiente operación a realizar sería la nivelación del modelo y trasladarlo a su verdadera posición en el espacio.

Teóricamente, en la orientación absoluta, las coordenadas de terreno de todos los puntos de control deberán ser ingresadas a los modelos estereoscópicos que les corresponda, entonces el operador coloca estereoscópicamente la marca de referencia sobre los puntos de control terrestre de las imágenes correspondientes.

Para la orientación absoluta son requeridos un mínimo de 2 puntos horizontales y 3 verticales, bien distribuidos. Sin embargo ya que una solución por mínimos cuadrados puede ser hecha es recomendable usar más del mínimo. Cuando las mediciones han sido tomadas el sistema lógico resuelve una transformación de coordenadas tridimensional, para determinar los parámetros que relacionan el sistema de coordenadas de imagen del modelo con el sistema de coordenadas terrestre. Como antes se produce un despliegue de residuales, el operador puede borrar, agregar puntos o aceptar la solución. Cuando la solución es aceptada la computadora almacena los parámetros de la orientación absoluta.

En la práctica, esta orientación se realiza dentro de la aerotriangulación, específicamente, cuando se realiza por el método de modelos independientes.

### **3.3.2.4 Aerotriangulación por modelos independientes.**

El proceso de triangulación aérea es la densificación del control geométrico de un modelo estereoscópico individual, mediante la identificación de las coordenadas terrestres con los puntos de enlace, según la red de datos conocidos en el levantamiento y a partir de esto, configurar los cálculos y compensaciones para el ajuste en bloque de toda una línea de vuelo.

Este proceso calcula una red de control del conjunto y confirma la integridad de los puntos de control terrestres, además de obtener las coordenadas del mayor número posible de puntos del terreno mediante operaciones fotogramétricas de gabinete, reduciendo por tanto los trabajos a realizar en campo.

Así mismo, la aerotriangulación digital es el proceso con mayor potencial de semi-automatización dentro del flujo de trabajo de fotogrametría digital, ya que este método tiene un desarrollo paralelo al avance de los medios de cálculo informático. Este método cuenta con dos fases bien delimitadas:

- a) La fase instrumental.
- b) La fase de cálculo y compensación-ajuste.

En la fase instrumental se realiza la orientación relativa de cada uno de los modelos objeto de la aerotriangulación y la medición independiente de las coordenadas de los puntos seleccionados y señalizados en las diapositivas como puntos de apoyo terrestre, también denominados como puntos de control, y puntos de paso y enlace.

Una vez finalizada la fase instrumental se tendrá cada uno de los modelos con sistemas de coordenadas diferentes, ya que hay puntos de control con coordenadas X,Y,Z y puntos de paso y enlace con coordenadas de imagen.

La fase de cálculo y ajuste consistirá en unir cada uno de los modelos mediante transformaciones tridimensionales sucesivas de coordenadas, de forma que todos los puntos estén referidos a un sistema de coordenadas único y poder generar así un bloque fotogramétrico completo.

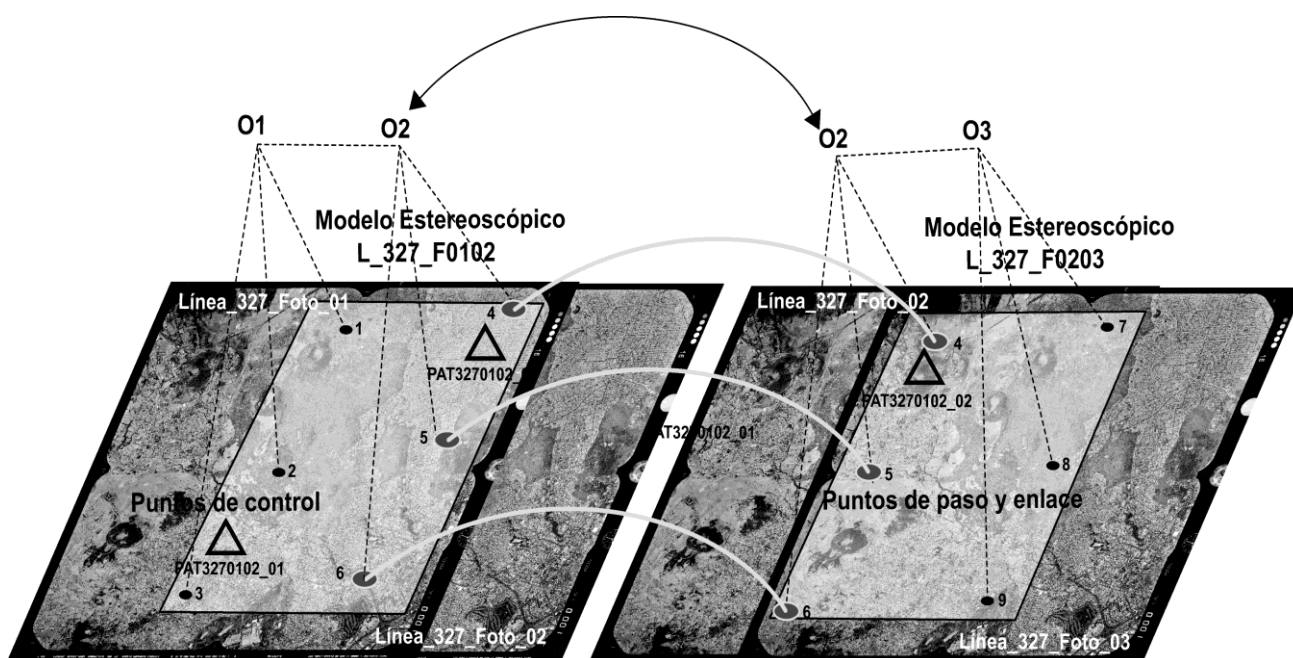


Figura 3.37. Representación gráfica de la fase de cálculo y ajuste en dos modelos estereoscópicos. (Elaboración propia).

Por lo general, no existen diferencias entre la fase de cálculo y la de ajuste-compensación ya que ambas se hacen en el ordenador de forma simultánea.

En el método de compensación en bloque, el ajuste consiste en someter cada modelo a una transformación espacial de semejanza. Así, los siete parámetros de transformación (3 giros alrededor de los ejes, 3 translaciones y un factor de escala), se determinan en una compensación común, de manera que se enlacen perfectamente los modelos aislados, orientándose al mismo tiempo todo el conjunto con la mayor precisión posible respecto a los puntos de apoyo.



Además de tener todos los puntos de enlace y apoyo en un sistema de coordenadas propio para cada uno de los modelos, es necesario disponer de las coordenadas de los centros de proyección (también llamados centros de perspectiva), pues representan una considerable mejora en la geometría de la transformación. Estos centros de proyección serán deducidos en el cálculo de la orientación relativa de cada uno de los modelos. Al no ser directamente medidos, su tratamiento en las ecuaciones de error será diferente al de los puntos de apoyo y enlace. Es de resaltar, que el método de modelos independientes es el más universalmente utilizado para aplicaciones cartográficas.

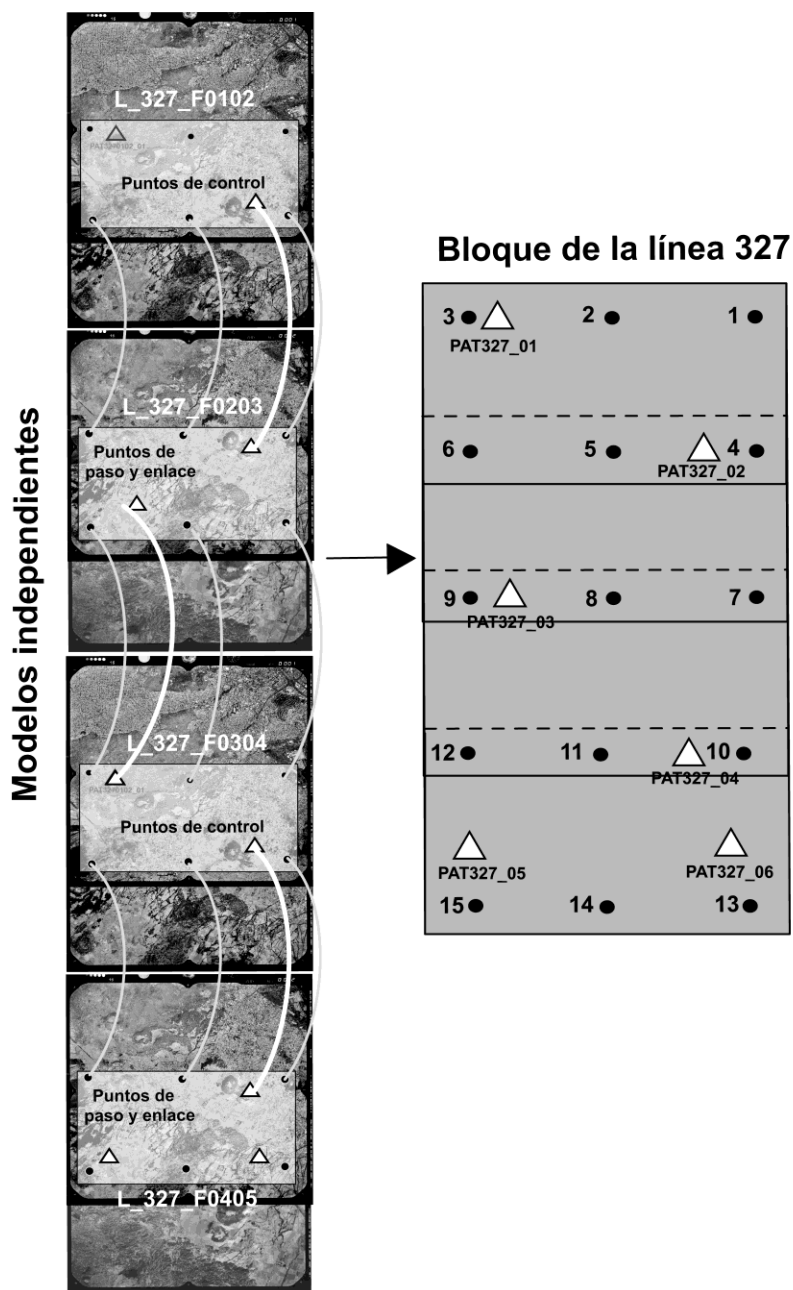


Figura 3.38. Representación gráfica de la fase de cálculo y ajuste en dos modelos estereoscópicos. (Elaboración propia).

En la práctica, dentro del Módulo de Triangulación Automática Digital (MTAD), se realiza la transferencia y medición de los procesos de triangulación. En la figura 3.39 a se muestra la transferencia de los puntos homólogos y en la figura 3.39 b el listado de los puntos de control introducidos.

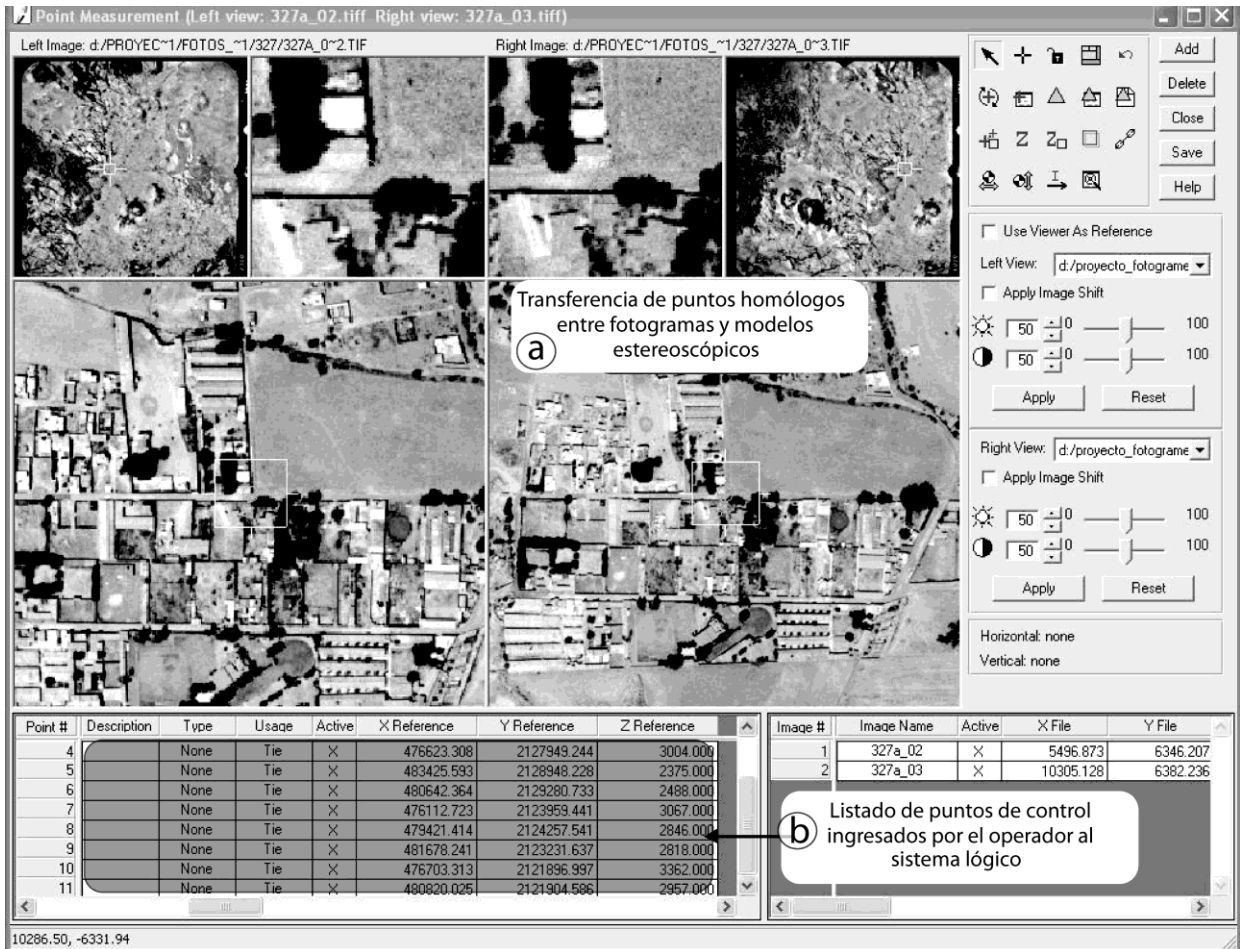


Figura 3.39. Representación gráfica de la fase de transferencia y medición de puntos de pase o enlace y control terrestre.

(Fuente de imágenes: Erdas LPS 9.1 versión demo, esquema de elaboración propia).

Los puntos de coordenadas obtenidos en los levantamientos de control pueden ser ingresados directamente a través de un archivo de texto y automatizar aún más el proceso de triangulación.

Cabe mencionar que este proceso se realiza a todos los modelos estereoscópicos que conforman la línea de vuelo, para posteriormente juntarlos y definir el bloque de la línea o líneas de vuelo.

Según Juan Antonio Pérez Álvarez (2003), en la actualidad existen técnicas de aerocontrol para reducir aún más los tiempos de la restitución fotogramétrica digital y el apoyo terrestre.

Se entiende por "aerocontrol" la determinación de los parámetros de orientación directamente en el avión, en el momento de la toma fotográfica. En un primer paso podría ser un nuevo tipo de ajuste combinado de triangulación aérea, pero en la actualidad la determinación de los parámetros se pueden realizar con tal precisión por sistemas inerciales, que la aerotriangulación puede ser sustituida para cámaras métricas convencionales.

El inconveniente entre los métodos de determinación directa de los parámetros de orientación, mediante sistemas inerciales, e indirecta, mediante aerotriangulación, especialmente en su vertiente digital, se centra sólo en el caso de las cámaras aéreas analógicas, ya que los sensores aerotransportados y las cámaras digitales necesitan el sistema INS/GPS para su posterior orientación. Estas cámaras seguirán operativas por varios años y habría que considerar el método más efectivo para la orientación.

Las dos técnicas utilizan datos GPS diferencial aerotransportado y por lo tanto, están afectados por las limitaciones que se han expuesto anteriormente.

La aerotriangulación digital, a pesar de su alto grado de automatización, tiene el problema de que los datos finales para ser aceptados necesitan mucho tiempo de revisión y validación. Estas tareas se realizan de manera manual por personal calificado, aunque en parte pueden ser sustituidas por rutinas automáticas (lo cual no es recomendado).

Los sistemas inerciales (orientación directa) tienen el problema de la corrección de errores sistemáticos y del alto costo de los equipos. En cambio, ofrecen ventajas considerables, como una alta productividad y una reducción en los plazos, lo que finalmente se traduce en la reducción del costo del proyecto.

Como conclusiones puede decirse que el apoyo aéreo cinemático y su combinación con la aerotriangulación es una técnica muy depurada y que está siendo utilizada masivamente en proyectos fotogramétricos. En nuestro país no está muy extendido su uso debido a que hay pocas cámaras de última generación en el sector privado.

### **3.3.3. Generación de Modelos Digitales de Elevación.**

En concordancia con el apartado 2.2.3.2 de este trabajo, en donde se comentan los sistemas de representación en tres dimensiones del terreno, un modelo digital de elevación es una representación numérica de datos que muestra la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Esta variable por lo general representa las características topográficas de éste y expresadas mediante las coordenadas X, Y, Z de los puntos que las definen.

Así los datos de este son codificados y almacenados digitalmente en un soporte digital, esto permite que en procesos posteriores se conozca configuración espacial, cuantificando y cualificando cada elemento, puntual, lineal, superficial y volumétrico, en cualquier orden o estructura geométrica.

Para los efectos de este trabajo, esta definición tan genérica, comprende específicamente los detalles planimétricos y altimétricos del relieve, excluyendo algunos elementos naturales como la vegetación y otros elementos artificiales del terreno como los asentamientos humanos, infraestructura carretera, etc., en donde estos elementos representan continuos errores en su generación.

Además se pretende señalar que la generación de MDE, mediante un matching, (identificación de puntos homólogos una vez orientado el modelo), supone tan solo un esfuerzo informático y automático, pero que independientemente a la tecnología utilizada, este MDE contiene una gran cantidad de errores en su estructura y por consecuencia en los valores que simula representar en el terreno.

### **3.3.3.1. Generación Automática de Modelos Digitales de Elevación.**

Es posible generar automáticamente un MDE a partir de diferentes fuentes de datos o procesos.

La generación de un MDE a partir de la digitalización de curvas de nivel ha sido uno de los métodos más utilizados para la representación de terreno en formato digital y aprovechar la cartografía existente. Las principales desventajas que ofrece este método son las siguientes:

- La lentitud del proceso de digitalización y elevado costo del proceso, especialmente si se trata de cartografía con gran cantidad de información.
- La pérdida de precisión a causa de la misma digitalización y si fuese necesario obtener valores internos a partir de las cotas de las curvas de nivel, la interpolación automática también genera error o falsedad en los datos.
- Generalmente se desconoce por completo si la cartografía utilizada para la generación del MDE fue elaborada con parámetros de control terrestre, procesos fotogramétricos, etc., lo anterior disminuye la veracidad de la información.

Aunque el método para la obtención de estas curvas de nivel haya sido un levantamiento topográfico, lo cual representa un elevado costo, el hecho de realizar una interpolación para obtener valores internos a partir de las cotas con una interpolación, continúa generando error.

Continuando con los parámetros de precisión involucrados para la realización de este trabajo y el ejemplo práctico del cuadrante E14A49B, la solución más idónea y confiable para generar MDE son los métodos fotogramétricos, los cuales desarrollan los procesos necesarios para generar una adecuada representación de la superficie del terreno con la menor cantidad posible de puntos.

Los DPS permiten la generación de MDE por técnicas automáticas, en donde la medición de las elevaciones de los puntos arbitrarios de las imágenes estereoscópicas para la generación automática del MDE se basa en técnicas de matching o análisis de correspondencia entre imágenes.

El término matching se ha impuesto en la literatura especializada como la expresión más adecuada para señalar la correlación entre imágenes digitales en fotogrametría, y expresa el establecimiento automático de la correspondencia entre escenas homólogas de dos o más imágenes digitales. Por tanto, aplicando técnicas "*image matching*" en dos imágenes podremos obtener un MDE, es decir, reconstruir modelos tridimensionales.

La correspondencia entre imágenes se estructura a partir de las siguientes variantes, comúnmente llamadas estrategias:

- Matching a nivel de elementos (LSM, por sus siglas en inglés, Least Squares Matching) o método de mínimos cuadrados, el cual es altamente preciso, ya que su error es de 0.1 pixel
- Matching por ventanas definidas por niveles de grises (ABM Area Based Matching),
- Matching por formas extraídas de las imágenes por segmentación (FBM, Feature Based Matching), es el menos preciso (errores en el rango 0,3-0.4 pixel) pero más rápido y robusto.

Además existen técnicas combinadas donde se emplean diferentes tipos de matching para la obtención de las coordenadas de las imágenes de los puntos medidos.

En función de las características presentadas por el relieve en la zona de estudio, se determina la definición de la estrategia a utilizar, por lo que en cualquier proyecto, es necesario analizar cuidadosamente y a través de cualquier sistema de visión estereoscópica las características del relieve en todos los modelos, de todas las líneas de vuelo involucradas y realizar una bitácora que muestre los registros de todos los modelos a utilizar.

Posteriormente y como se comentó en el apartado 2.2.3.2, un MDE es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la superficie del terreno en donde la unidad básica de información en un MDE es un punto acotado, definido por los valores de x, y, z, a partir de esto la generación automática del MDE se materializa por la generación de una enorme cantidad de puntos que simulan a la superficie del terreno. Analógicamente esta nube de puntos es representada por un archivo digital denominado TIN (por sus siglas en inglés, "Triangulated Irregular Network").

A partir de la selección de la estrategia a utilizar en la generación del MDE, también se debe considerar la problemática que se presenta cuando el terreno está cubierto por vegetación, ya que existen partes del modelo estereoscópico que

no son visibles y, por tanto, no se pueden medir valores de una forma automática y directa. Este problema que es común, tanto para los métodos manuales como para los métodos automáticos, tiene mayor afectación cuando generamos los MDE de forma automática, inclusive muchas veces puede generarse un MDE donde la afectación de las zonas con vegetación presenta las dos siguientes posibilidades (ver figura 3.40):

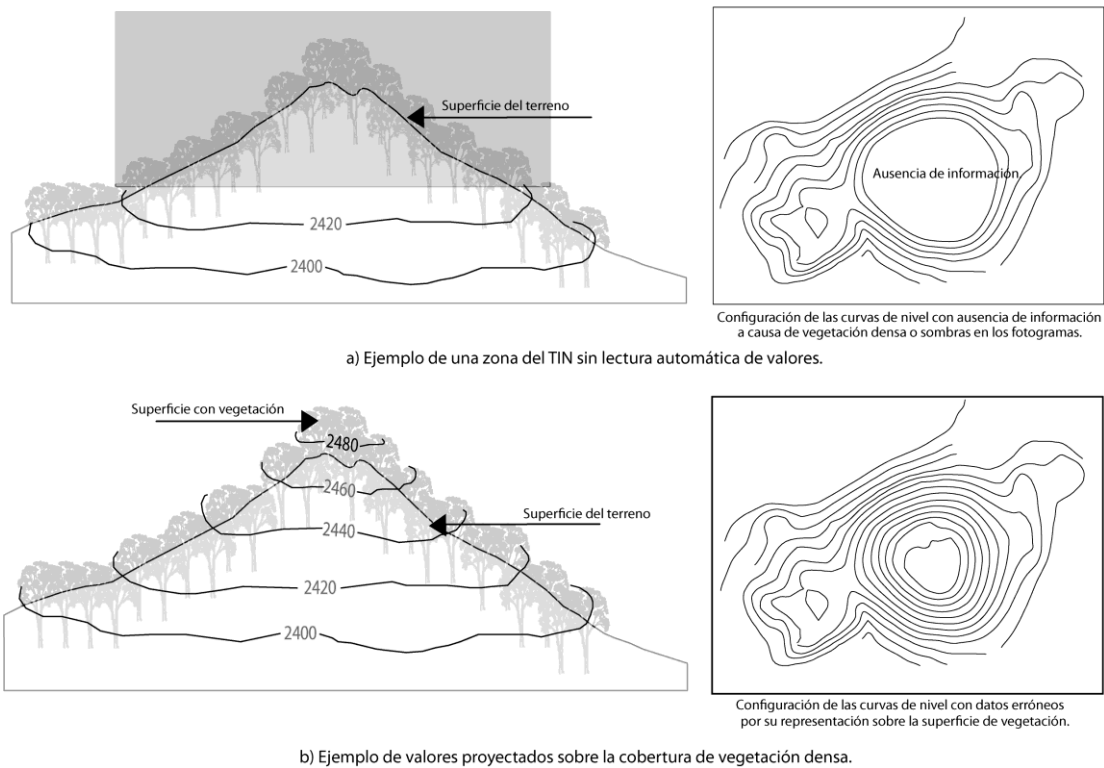


Figura 3.40. Representación gráfica que se presenta en la generación automática de MDE cuando el terreno está cubierto por vegetación (Elaboración propia).

- a) En algunas zonas el MDE generado automáticamente no presenta lectura de valores y se puede omitir información del relieve, debido a que existen zonas que presentan vegetación muy densa o zonas de sombras en los fotogramas (ver figura 3.40 a).
- b) Un aspecto contrario se presenta cuando la estrategia determina valores falsos en las zonas con vegetación, lo que implica que los valores de las curvas de nivel se proyecten en la vegetación. De gran importancia es detectar esta problemática durante el proceso fotogramétrico, ya que en los procesos cartográficos la configuración de las curvas de nivel presenta un acomodo normal y es muy difícil detectar las zonas que presentan esta falsa información (ver figura 3.40 b).

Otra problemática muy similar se presenta en las zonas planas con construcciones y arboles aislados, ya que se proporcionan valores de altura falsos y consecuentemente se generan valores erróneos en Z para el MDE (ver figura 3.41).

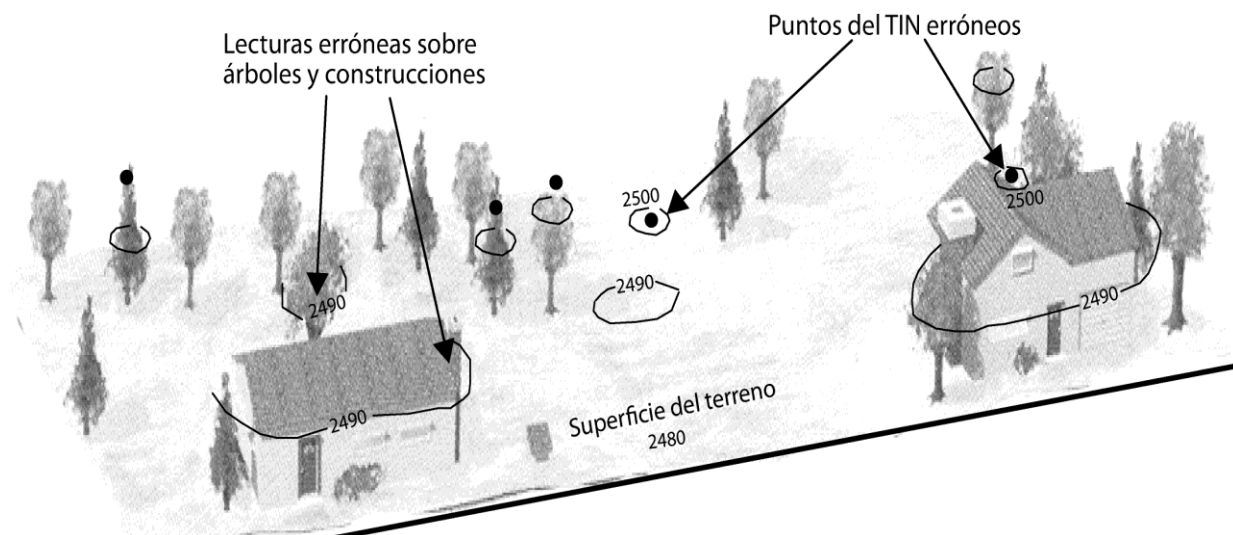


Figura 3.41. Representación gráfica que se presenta en la generación automática de MDE con construcciones y arboles en zonas planas (Elaboración propia).

Las problemáticas presentadas con anterioridad, refuerzan la propuesta presentada en el apartado 3.3.2 referido a las técnicas semiautomáticas de restitución digital, en donde se comenta que la correlación de imágenes o *"image matching"*, solo supone un apoyo a la construcción del MDE que representa al terreno y no debe suponer que el proceso es automático y definitivo.

### 3.3.3.2. Edición de los Modelos Digitales de Elevación.

Una vez generado el MDE automáticamente y detectada la problemática que puede presentarse, se continúa con la edición del mismo a partir de las opciones que nos permita el sistema lógico utilizado y la experiencia del técnico u operador de la DPWS, factor fundamental en este proceso fotogramétrico.

Asociados a los ejemplos de las problemáticas presentadas en el apartado anterior, se presentan los siguientes métodos para realizar la edición del MDE:

- a) Anterior a la generación automática del MDE, a través de la marca flotante y sobre el modelo estereoscópico, es necesaria la captura manual de líneas de ruptura (breaklines) asociada a elementos morfológicos que presenta el relieve. Estos breaklines permitirán asignar valores en X,Y,Z a zonas que presentan vegetación densa, elementos hidrográficos (escurrimientos, arroyos, ríos, cuerpos de agua, etc.), zonas de sombra o en laderas muy abruptas, ya que estos en la generación automática del MDE son muy susceptibles a presentar valores falsos (ver figura 3.42).

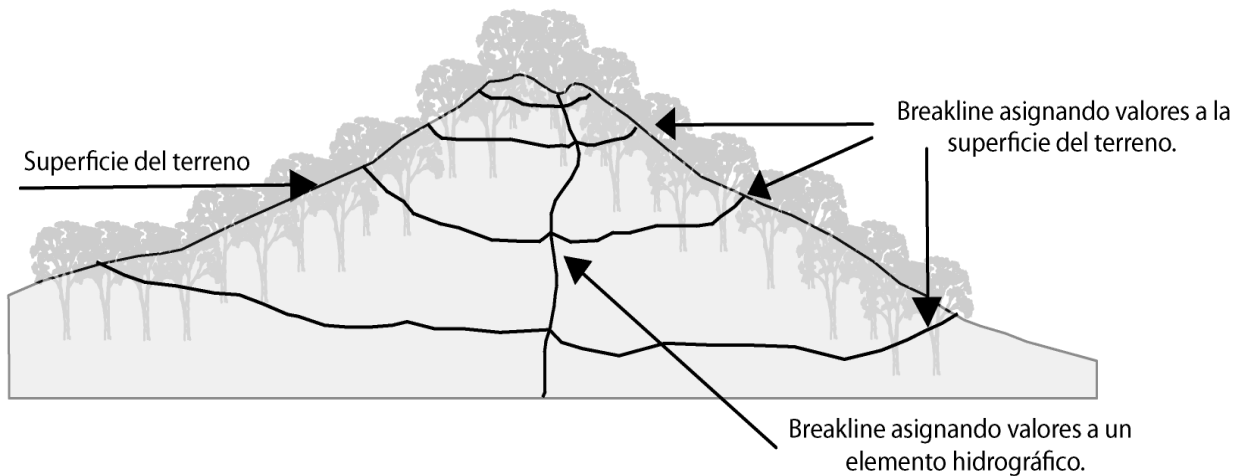


Figura 3.42. Asignación de valores en X,Y,Z a elementos morfológicos del terreno a través de breaklines. (Elaboración propia).

Con este proceso se asegura que en todo el modelo estereoscópico se encuentre representada la información del relieve y no haya zonas con valores falsos, como se muestra en la figura 3.40 a.

- b) Una vez realizada la primera edición con breaklines, se puede generar un MDE preliminar a través de la estrategia adecuada para el tipo de terreno presentado, pero de gran importancia es incluir como soporte o base los breaklines capturados manualmente.

Con este MDE podemos comenzar a valorar el comportamiento de las curvas de nivel con respecto al terreno, generalmente la representación grafica de las curvas de nivel con el terreno son adecuados, pero se genera una segunda problemática con los puntos que conforman el TIN, ya que estos continúan representando valores falsos, como se muestra en la figura 3.43.

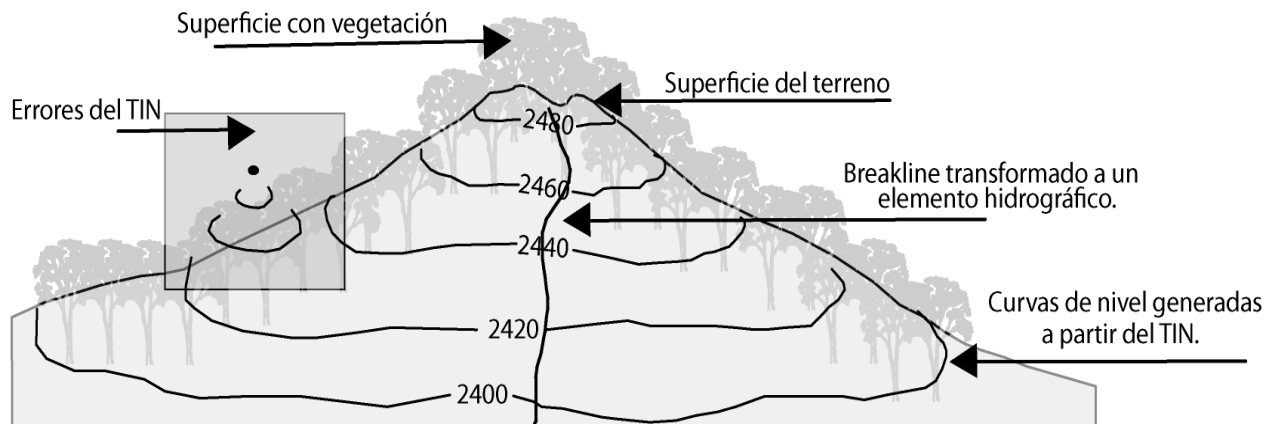


Figura 3.43. Representación de curvas de nivel acopladas al terreno, generadas a partir del MDE basado en Breaklines, se observan algunos errores en los puntos X, Y, Z del TIN. (Elaboración propia).



- c) Se debe realizar una segunda edición, pero ahora se editan directamente los puntos con coordenadas X,Y,Z que conforman al TIN, en donde nuevamente las opciones del sistema lógico utilizado y la experiencia del técnico determinan las nuevas posiciones asignadas a estos puntos.

En esta edición solo existen dos posibilidades, la primera se refiere a que algunos puntos del TIN se encuentren “flotando” y generan curvas de nivel sobre el terreno y la segunda se refiere a que se encuentren puntos “enterrados” generando, de la misma forma, curvas de nivel pero con valor negativo a la superficie del terreno, como se muestra en la figuras 3.44 y 3.45.

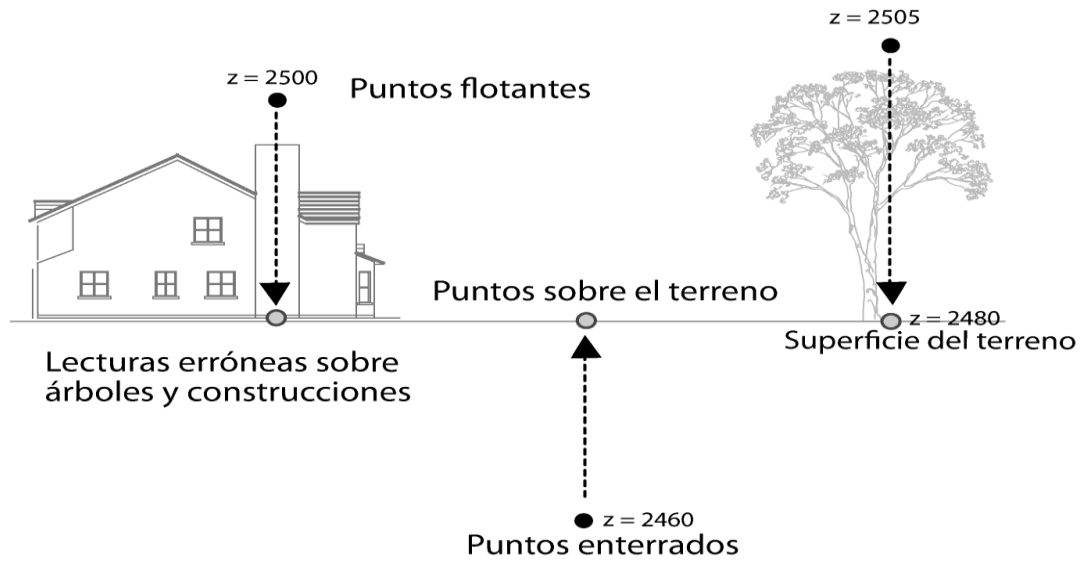


Figura 3.44. Representación grafica de la edición en los puntos X, Y, Z del TIN. (Elaboración propia).

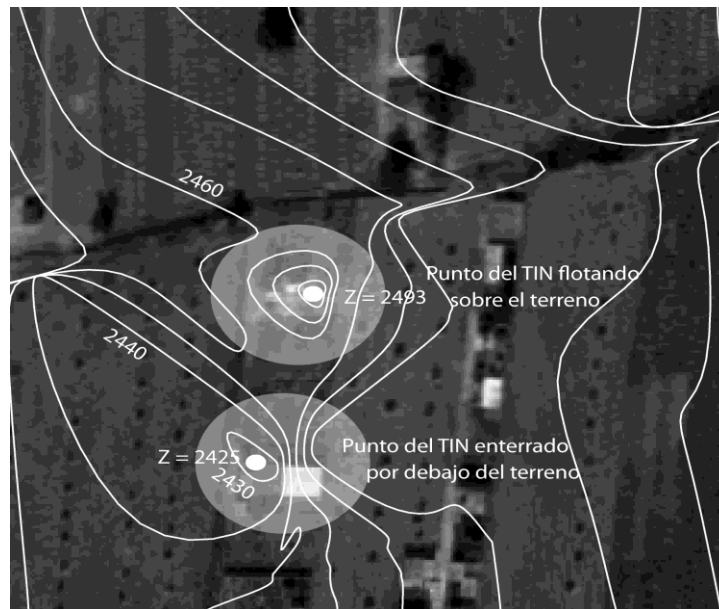


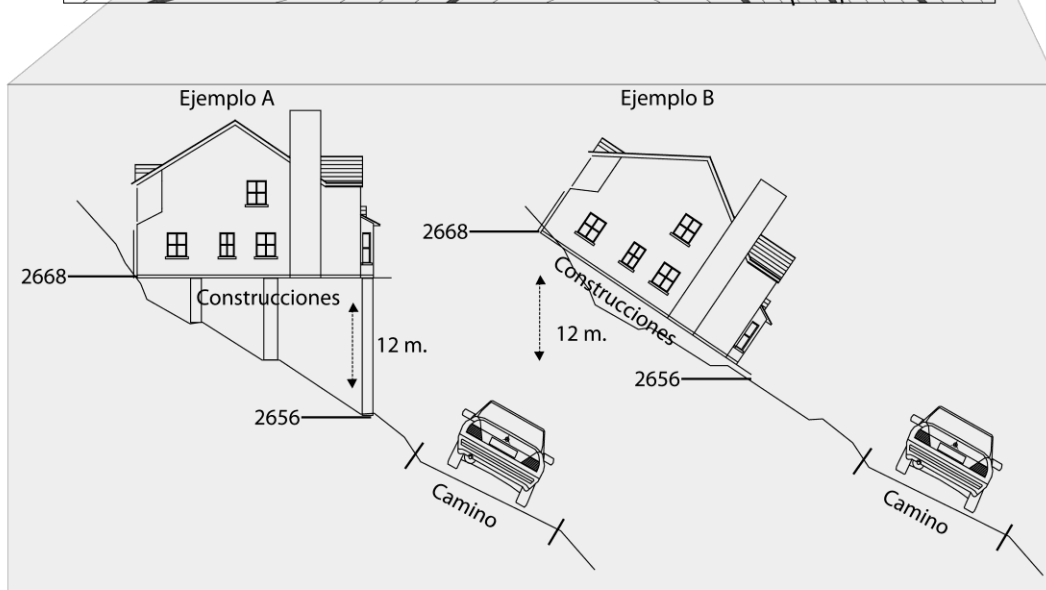
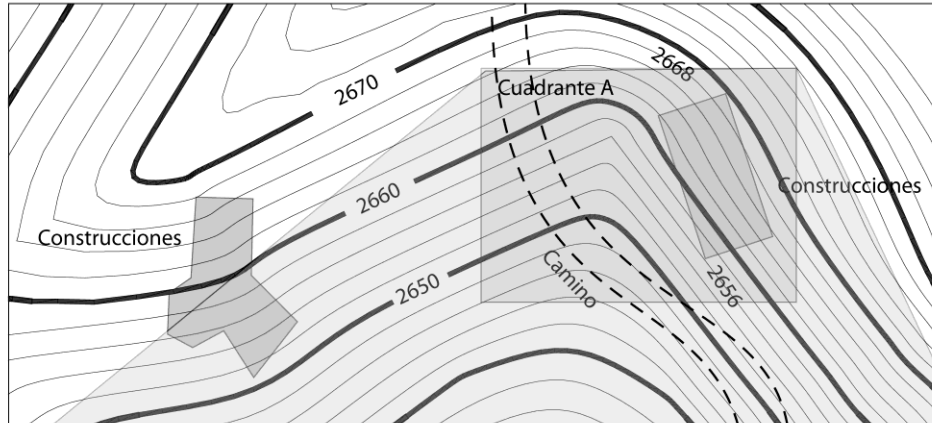
Figura 3.45. Vista de la problemática causada por los puntos X, Y, Z del TIN en la configuración de las curvas de nivel sobre el mapa topográfico.

(Elaboración propia).

En estos casos el operador, a partir de la marca flotante, asignará nuevos valores a los puntos flotantes y enterrados para situarlos sobre la superficie del terreno. Esta actividad supone un trabajo sencillo pero muchas veces la cantidad de puntos que hay que editar es considerable.

- d) Finalmente se debe realizar un control de calidad sobre todos los elementos representados en la edición del MDE, con el objetivo de evitar que existan errores como los que se presentan en la figura 3.46.

Mapa topográfico con la representación de curvas de nivel, caminos y construcciones



Perfil de los elementos representados en el mapa topográfico.

Figura 3.46. Representación gráfica de la fase de control de calidad de la información en la detección de factores que influyen en la exactitud de los MDE.  
(Elaboración propia).

En el recuadro del Cuadrante A se observa la configuración de las curvas de nivel y algunas construcciones, en donde visualmente se determina que existe un error en la elaboración del MDE ya que una construcción no puede presentar esas características en el terreno, independientemente que existan posibilidades tecnológicas en la construcción (Ejemplo A), no se

puede determinar una cimentación de 12 metros (lo que equivale a un edificio de 6 pisos) o una construcción sobre una pendiente tan inclinada (Ejemplo B).

Para solventar esta problemáticas es necesario incorporar breaklines a la cimentación de las construcciones, caminos, y elementos de infraestructura que puedan presentarse como autopistas, torres de alta tensión, vías férreas, etc. Aunque este proceso puede alargar la ejecución del trabajo, son factores que sustentan la exactitud del MDE.

Generalmente este tipo de errores son ignorados y la extracción de este tipo de elementos se realiza en base a ortofotografías y en procesos netamente cartográficos.

### **3.3.3.3. Estructuras de datos en los Modelos Digitales de Elevación.**

En correlación con el apartado 2.2.3.2 de este trabajo y correspondiente al sistema de representación en tres dimensiones del terreno, se comentó que la unidad básica de información en un MDE es un punto acotado, definido por los valores de X,Y,Z, pero existen variantes de estructuras de datos para representar las relaciones de valores del MDE en función de las necesidades propias de los usuarios.

A partir de las necesidades se hace referencia a una división adecuada para las necesidades de este trabajo, Ángel Manuel Felicísimo (2000), en donde comenta que en función de la concepción básica de las estructuras de datos se dividen en dos grupos: vectorial y raster.

En el modelo vectorial los atributos del terreno se representan mediante puntos, líneas o polígonos con sus respectivos atributos. Los puntos se definen mediante un par de valores de coordenadas (X,Y) y con un atributo de altitud (Z), las líneas mediante un vector de puntos y los polígonos mediante una agrupación de líneas. Tradicionalmente la estructura vectorial más utilizada es la de contornos o curvas de nivel representadas por polilíneas que describen la trayectoria del terreno. En la figura 3.47 se presenta la estructura de datos vectorial representada por curvas de nivel del ejemplo práctico del cuadrante E14A49B, las cuales forman parte del insumo cartográfico básico y final que se pretende desarrollar en este trabajo.

Otra forma de representación de una estructura de datos vectorial es un TIN, el cual se conforma por triángulos irregulares basados en puntos con coordenadas X, Y, Z (ver figura 2.13), y los cuales sirven como base para la generación de sombreados analíticos (como se muestra en la figura 3.48) y principalmente para su utilización en la transformación diferencial de imágenes en ortofotografías, proceso que se comenta en el apartado 3.3.4.

Actualmente, la generación de estos sombreados se puede realizar en un número considerable de programas especializados, pero lo importante a considerar en su generación, es la veracidad en la fuente de datos utilizada para su construcción.

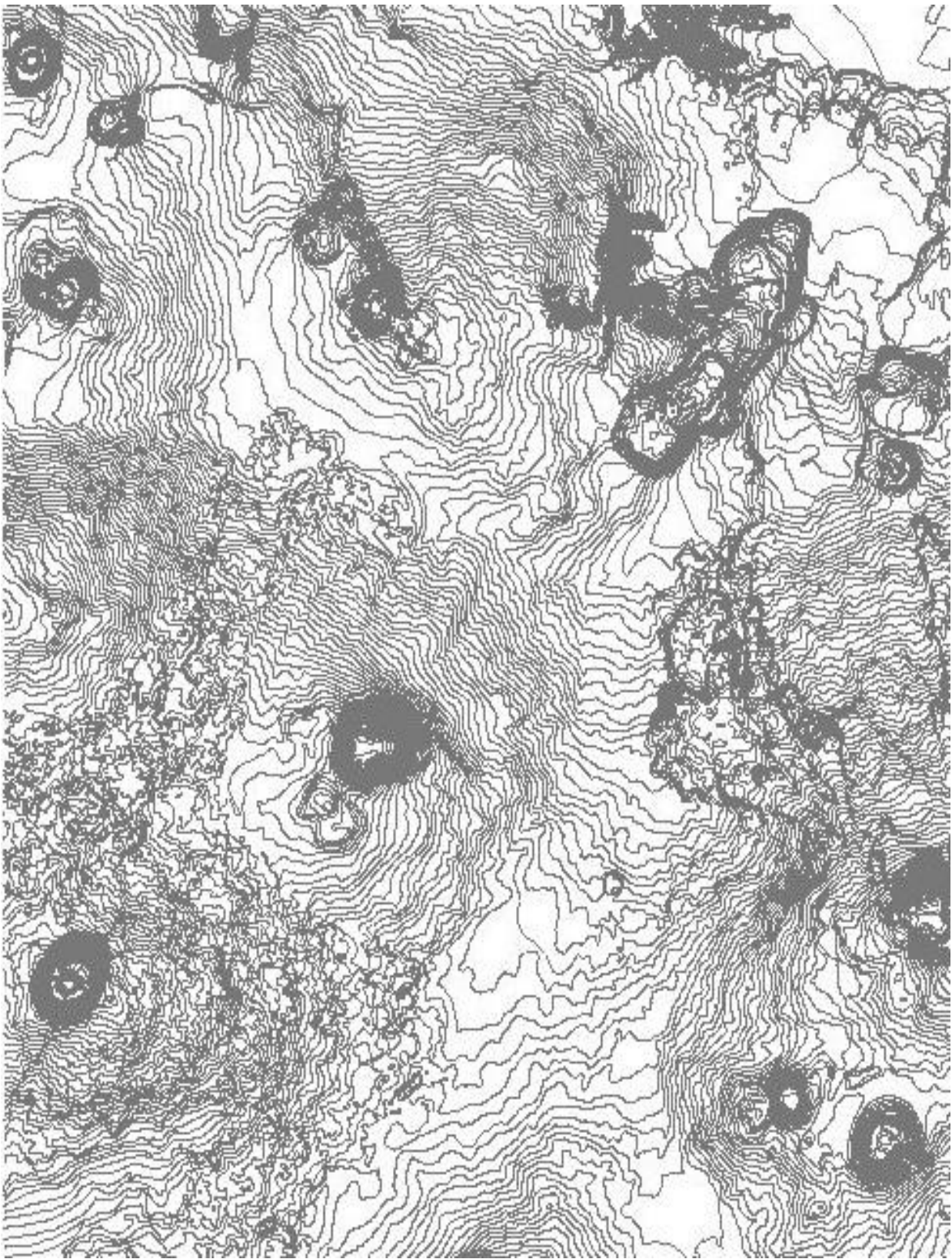


Figura 3.47. Estructura de datos vectorial representada por contornos o curvas de nivel del cuadrante E14A49B. (Elaboración propia).

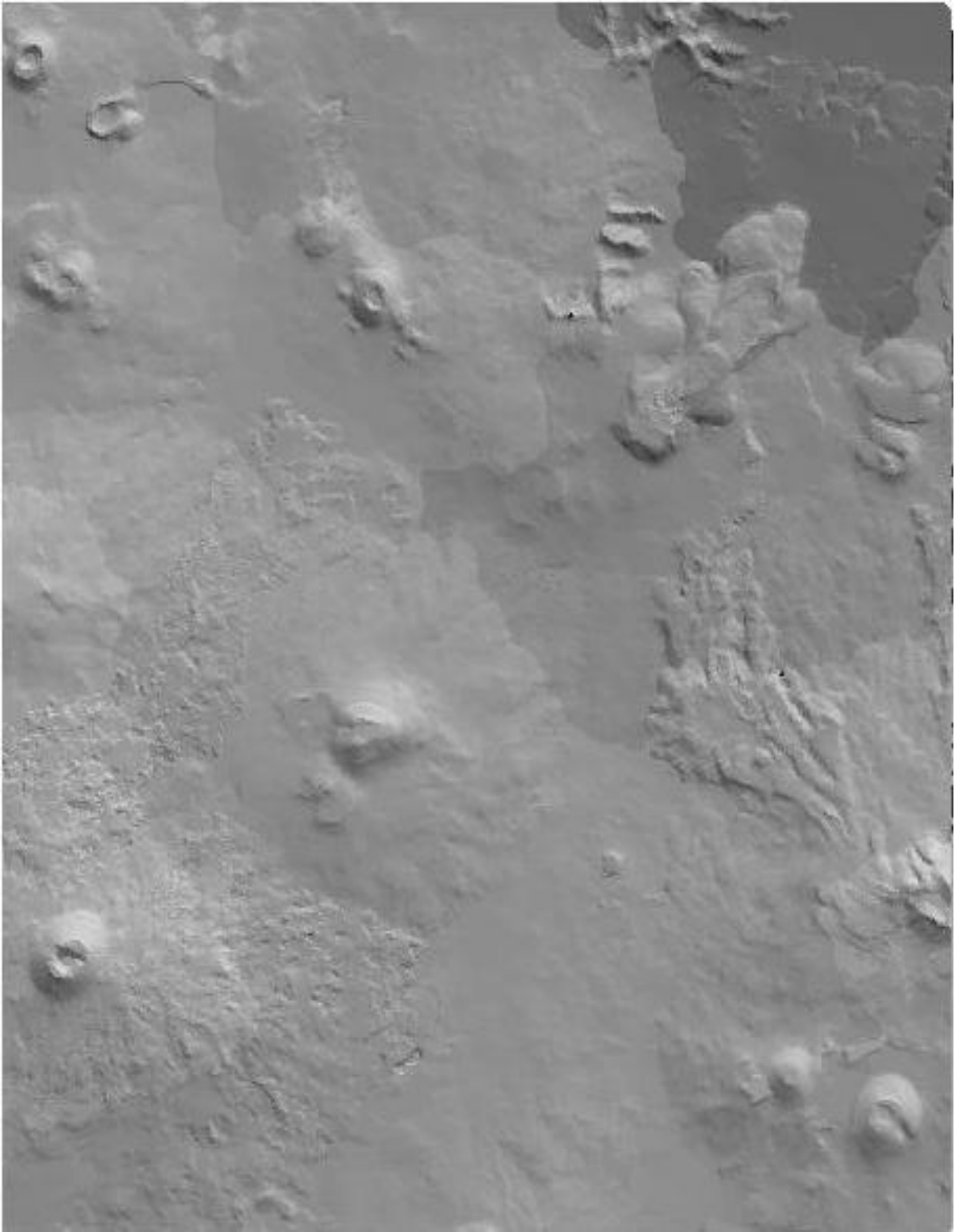


Figura 3.48. Estructura de datos vectorial representada por un TIN y un sombreado analítico correspondiente al cuadrante E14A49B.  
(Elaboración propia).

En el modelo raster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie que simulan el terreno con una distribución regular sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada, estas unidades se llaman celdas y se asocia a la analogía de términos usados en procesos de imágenes, por lo que también se denomina pixel.

Esta estructura de datos también es conocida como matricial regular y se puede explicar como una matriz compuesta por un determinado número de filas y columnas. A cada celda de la matriz se le denomina pixel (picture x element) y esta, representa una superficie que es función de su tamaño ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ), como se muestra en la figura 3.12. A partir de esta estructura existen formatos propios para ser utilizados en procesos fotogramétricos y cartográficos.

Uno de los formatos más utilizados es el GRID o GRD, el cual se caracteriza por ser una malla regular de celdas rectangulares (ver figura 3.49).



Figura 3.49. Estructura de datos raster representada por un GRID correspondiente al cuadrante E14A49B.  
(Elaboración propia).

### **3.3.4 Generación automática de Ortofotografías Digitales.**

El proceso general de transferir una imagen digital a una proyección ortogonal es sencillo en su concepción por ser presentado como automático, pero requiere de una serie de condiciones técnicas y operativas para la adquisición y el procesamiento de los insumos adecuados para su desarrollo. La idea básicamente consiste en realizar el remuestreo o rectificación diferencial de una imagen digital a partir de una intersección del haz perspectivo con un MDE.

La representación fotográfica del terreno debido a su mayor riqueza informativa resulta ventajosa en numerosas aplicaciones respecto a los mapas gráficos. La ortofotografía es un documento fotográfico que permite aprovechar el contenido informativo de la fotografía aérea y realizar las mismas medidas que en un plano gráfico.

Juan Antonio Pérez (2003), comenta que en el caso ideal y teórico que se presentan el eje de la toma rigurosamente vertical y el terreno llano y horizontal, la fotografía aérea coincidirá con la ortofotografía. Si el terreno es llano y horizontal y el eje de la toma forma un pequeño ángulo con la vertical, se corrigen las deformaciones de la imagen original a través de la rectificación fotográfica convencional. En el caso general de disponer de una imagen correspondiente a una zona de terreno con relieve y tomada con el eje inclinado, para obtener una ortofotografía es preciso aplicar la técnica de la rectificación diferencial.

Esta técnica corrige las deformaciones de la imagen, causadas, tanto por los desniveles del terreno como por la falta de verticalidad del eje óptico de la cámara en el momento de la toma, transformando geoméricamente zonas elementales de la fotografía aérea en ortofotografía.

#### **3.3.4.1 Rectificación de imágenes digitales.**

Por rectificación se conoce el proceso fotogramétrico mediante el cual se puede transformar una imagen en una proyección del terreno, por medio del enderezamiento del eje del fotograma. La rectificación corrige los desplazamientos existentes en la imagen fotográfica original producidos por la inclinación del eje óptico.

Su desarrollo se ha debido principalmente a las aplicaciones en las fotografías aéreas como un método muy rápido para actualizar los mapas. En la actualidad puede aplicarse a un gran número de imágenes digitales (radar, multiespectrales, etc.). Es una técnica que permite obtener fotomapas de zonas en las que la fotografía clásica no puede hacerlo.

La rectificación digital diferencial de la fotografía consiste en enderezar y poner en escala, pequeñas unidades geométricas del terreno, que perfectamente ensambladas dan una imagen fotográfica del terreno. Este nuevo documento fotográfico se denomina ortofotografía digital, y es tan preciso como un mapa.

La ortofotografía digital se basa en imágenes generadas en forma digital o imágenes fotográficas que previamente se han escaneado. Estas imágenes están divididas en elementos rectangulares denominados píxeles. La corrección de los errores debidos al relieve y a la falta de verticalidad del eje de toma, hasta obtener una nueva imagen digital se realizan analíticamente. El resultado es una nueva imagen digital corregida, que puede ser reproducida fotográficamente.

Para que la transformación de la proyección central de la fotografía a la ortogonal del terreno, sea teóricamente exacta, sería necesario que las unidades geométricas a rectificar fuesen un punto. Esto en la práctica es imposible, utilizándose unidades geométricas de reducido tamaño (pequeñas zonas de la imagen, que en el caso digital será el píxel).

#### **3.3.4.2 Rectificación diferencial.**

Para explicar este proceso, inicialmente se determina que la imagen digital se compone de una matriz de elementos rectangulares de pequeño tamaño, denominados píxel. De cada uno de estos píxel conocemos su tamaño, su posición en la imagen y el valor en la escala de grises asociado. En imágenes digitales está claro que el elemento diferencial a rectificar es el píxel, puesto que es la unidad mínima de que se compone.

El proceso se realiza en modo diferido, obteniendo en primer lugar una estructura de datos que representa al MDE, el cual fue obtenido con los parámetros de exactitud desarrollados en este trabajo y como parte final de los siguientes procesos:

- Apoyo terrestre.
- Orientación interna.
- Orientación externa.
- Aerotriangulación por modelos independientes.
- Generación automática y edición del MDE.

Para la realización de un proceso de rectificación diferencial es necesario disponer de un MDE almacenado de la misma forma que la imagen, es decir, con estructura raster de una matriz de elevaciones (ver figura 3.49). Este modelo debe estar referido a un sistema de proyección de coordenadas, ya que será el mismo que se obtenga en la imagen rectificada.

Se parte de la premisa de disponer de los datos vistos en los apartados anteriores (imagen digital, certificado de calibración, MDE, etc.). En la figura 3.50 se muestran los pasos a seguir en la generación de una ortofotografía digital. Se inicia con una imagen “vacía”, formada por un conjunto de píxeles sin asignación de valor de tonalidad ( $N_d$ ), caracterizados por estar referidos al sistema de referencia del terreno y por poseer un cierto tamaño físico, que constituye la resolución de la ortofotografía a realizar.



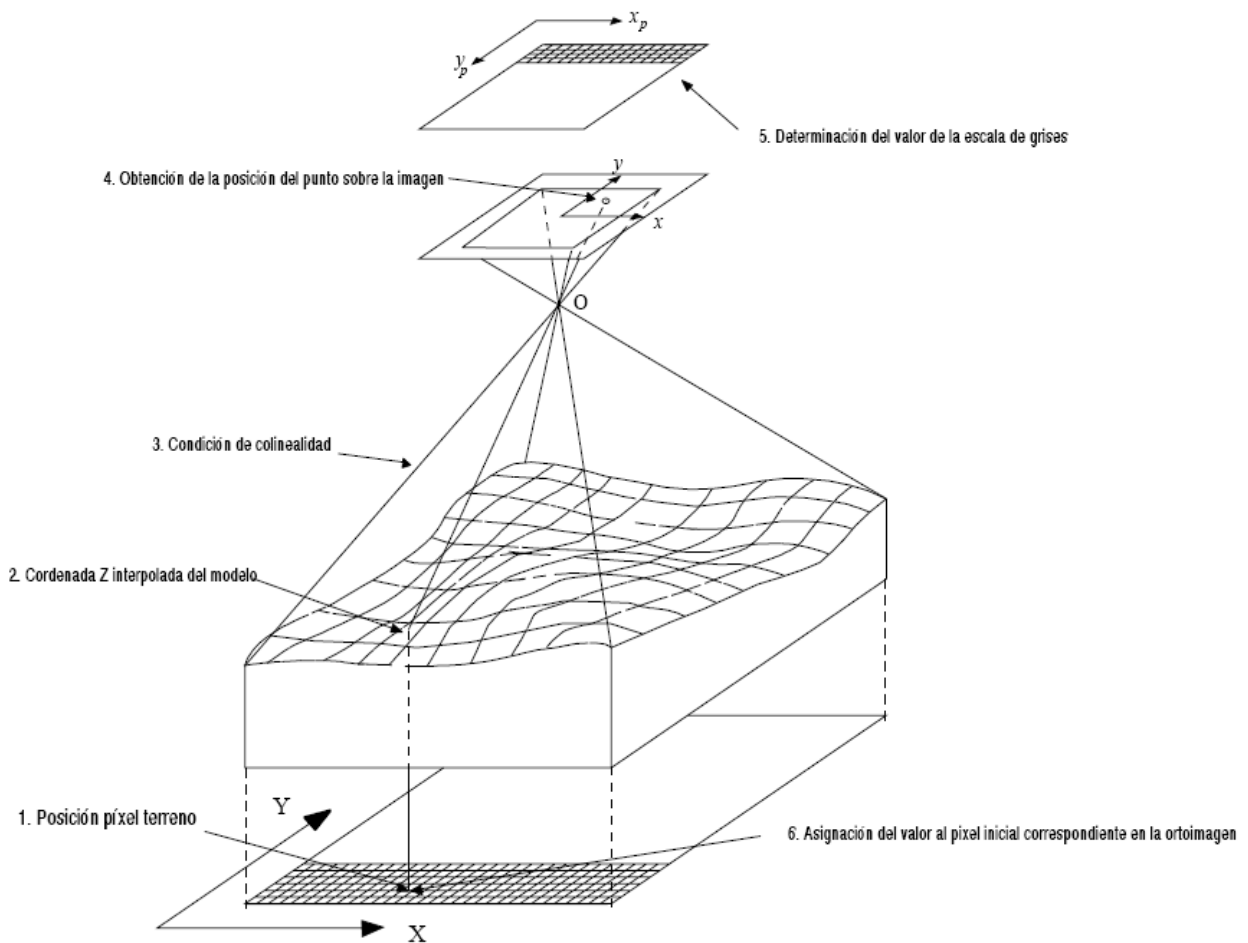


Figura 3.50. Generación de una ortofotografía digital.  
(Fuente: Juan Antonio Pérez, "Apuntes de Fotogrametría III", página 189).

Posteriormente a partir de la posición de cualquier punto sobre el terreno (píxel) de coordenadas  $X$ ,  $Y$  conocidas; por interpolación del MDE podremos obtener la coordenada  $Z$  de dicho punto. Con estas coordenadas, los parámetros de orientación externa y las ecuaciones de colinealidad podrá obtenerse analíticamente la posición del punto sobre la imagen  $(x, y)$ , como si realmente se reconstruyera el rayo luminoso que lo impresionó. A partir de la orientación interna efectuada se identifica dicha posición en la imagen y su correspondiente tonalidad, bien en modo de escala de grises, o bien en modo color ( $RGB$ ); este valor se asignará a la posición  $(X, Y)$  de partida de la ortofotografía.

Está claro que en el proceso de rectificación que se lleva a cabo, las posiciones de los píxeles proyectados no coinciden con la posición de los píxeles originales, siendo necesario combinar de alguna forma la información espectral de los píxeles vecinos para obtener el valor final deseado de la tonalidad, empleándose habitualmente las técnicas de remuestreo digital, asegurando así que todos los píxeles de la ortofotografía resultante, tengan su nivel de gris.

El hecho de determinar el nivel de gris que le corresponde a cada píxel, debido a que la posición proyectada no tiene porqué coincidir con la posición original del mismo ni con su valor entero. Al realizar la transformación espacial se tiene que los valores de las coordenadas de la imagen no coincidirán con los de la imagen original de forma que habrá puntos que no quedarán definidos por sus niveles digitales (ver figura 3.51). Por tanto, es necesario interpolar el valor de gris conociéndose esta operación con el nombre de remuestreo (*resampling*).

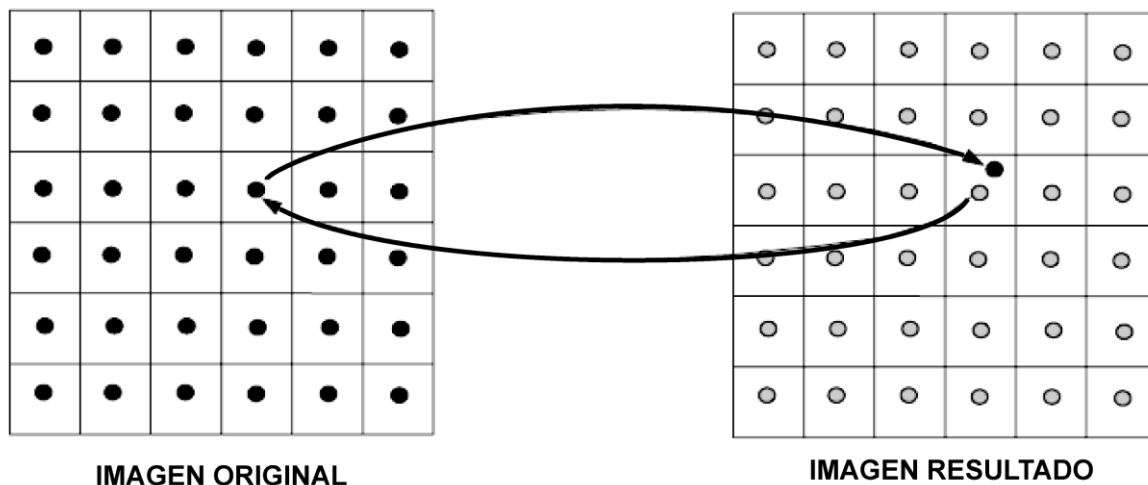


Figura 3.51. Remuestreo de imágenes.

(Fuente: Juan Antonio Pérez, "Apuntes de Fotogrametría III", página 190).

Por medio de este método de remuestreo hacemos varios muestreos sobre la imagen inicial. Cada vez que se efectúan cambios geométricos en la imagen digital, surgen varios errores de forma inevitable.

Los tres métodos de remuestreo más frecuentemente usados son:

- a) Vecino más próximo.
- b) Interpolación bilineal.
- c) Convolución bicúbica.

a) Método del vecino o píxel más cercano: Este método se llama así por situar en cada cuadrado de la malla de la ortofotografía el valor de gris del píxel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida y su principal inconveniente está en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen como carreteras, caminos, etc.

b) Método de interpolación bilineal: Este método supone promediar los niveles de gris de los cuatro píxeles más próximos de la imagen original. Este promedio se pondera según la distancia del píxel original al corregido; teniendo mayor influencia los píxeles más cercanos de la imagen original. Reduce el efecto de distorsión en los rasgos lineales, pero tiende a difuminar un tanto los contrastes espaciales de la imagen original.

- c) Método de convolución bicúbica: Considera los niveles de gris de los 16 píxeles más próximos. El efecto visual es más correcto que los anteriores pero supone un volumen de cálculo mucho mayor.

De los tres métodos de remuestreo mencionados, el método del vecino más próximo es el más simple. Se distingue por su rápida ejecución en cuanto a cálculo se refiere, pero geoméricamente es el menos adecuado, con una precisión de  $\pm 0.5$  píxel. Los otros dos métodos restantes tienen una mayor precisión geométrica pero se requiere mayor trabajo en el cálculo. El método de convolución cúbica es el que absorbe mayor tiempo. En casos generales, el más utilizado es el método de interpolación bilineal. La elección del método más idóneo dependerá de la finalidad del proceso y de los recursos disponibles. El más preciso de todos es el método de la convolución que tiene un 0,3 % de error de interpolación. La interpolación bilineal tiene un valor de error del 3,7 % y el procedimiento del vecino más próximo del 15,7 %.

Una vez obtenida la imagen ortorectificada es fundamental la supervisión de la calidad de la misma, tratando de detectar las posibles problemáticas que pueden generarse, así podemos mencionar las siguientes:

- Comprobación de que la imagen esté completa. Si el área que cubre la imagen no está cubierta adecuadamente por el MDE se pueden producir errores en la ortofotografía final.
- Presencia de arrastres en la imagen. Las causas más frecuentes de aparición de arrastres es la presencia de errores en el MDE (puntos anómalos) o bien la presencia de valores de desplazamiento debido al relieve muy elevados al encontrarnos en el borde de la imagen. Esta última causa es muy frecuente cuando se intenta la rectificación de una cumbre montañosa, en la que la cara orientada hacia la cámara aparece adecuadamente rectificada pero en la cara contraria existen arrastres debido a que una pequeña porción de la imagen original debe "estirarse" para cubrir el área correspondiente.
- Aparición de dobles imágenes. Este problema era especialmente importante en los primeros sistemas fotogramétricos digitales que trabajaban a nivel de modelo en el que los errores debidos a la orientación de las imágenes (los parámetros de la orientación externa de la imagen derecha del primer modelo presenta ligeras diferencias con respecto a los calculados con la misma imagen cuando hace de imagen izquierda del segundo modelo) o bien falta de continuidad en el MDE.
- Aparición de porciones no cubiertas. Este hecho tiene el mismo origen que la aparición de dobles imágenes pero con el resultado contrario, no existe continuidad en la ortofotografía final por un problema de orientación o del MDE empleado en la ortorectificación.

- Errores planimétricos. Se comprueban mediante la medida directa de puntos sobre el terreno que sean perfectamente distinguibles en la imagen, comparando posteriormente sus coordenadas planimétricas.

Los principales problemas que afectan a la calidad de las ortofotografías generadas mediante rectificación diferencial son los debidos a los errores o falta de precisión del MDE, dejando a un lado los problemas de ajuste radiométrico que se compensan mediante correcciones.

Una vez considerados los parámetros anteriores, se puede dar como concluida nuestra ortofotografía, como se muestra en la figura 3.52, además se comentan las siguientes propiedades:

- Las ortofotografías digitales están geocodificadas y ofrecen la misma precisión que los mapas de línea. Cada píxel tiene una posición claramente determinada en el sistema de referencia empleado (UTM, Lambert, etc.).
- Las ortofotografías digitales pueden adoptar escalas variables; a partir de una escala de consistencia se pueden formar ortofotos a distintas escalas (menores).
- Las ortofotos digitales son multiespectrales. Al ser imágenes de tipo raster se pueden aplicar técnicas de clasificación a las fotos ya sean en color o en infrarrojo color. Las propiedades de multiescala y multiespectral son exclusivas de las ortofotos digitales, y no existen en los documentos analógicos.
- Debido a sus propiedades multiespectrales y multiescalares pueden compararse con datos provenientes de imágenes de satélite con objeto de completar el proceso de interpretación con otras bandas espectrales.
- Permiten la sobreimpresión de mapas de línea o temáticos para la formación de documentos más claros y precisos.
- Debido a su carácter multidisciplinario, constituyen una fuente de datos muy útil para usuarios de GIS; por esta razón las ortofotos constituyen un complemento esencial de cualquier tipo de aplicación GIS al ofrecer información temática específica en formato vectorial y raster.

Finalmente cabe mencionar que los insumos pertenecientes al ejemplo práctico del cuadrante E14A49B generados en este apartado sirven de base a los procesos cartográficos estipulados en el siguiente capítulo, y son los siguientes:

- 1) MDE con estructura de datos vectorial representado por curvas de nivel.
- 2) MDE con estructura de datos vectorial representado por un TIN y un sombreado analítico.

3) MDE con estructura de datos raster representado por un GRID.

4) Ortofotografía.

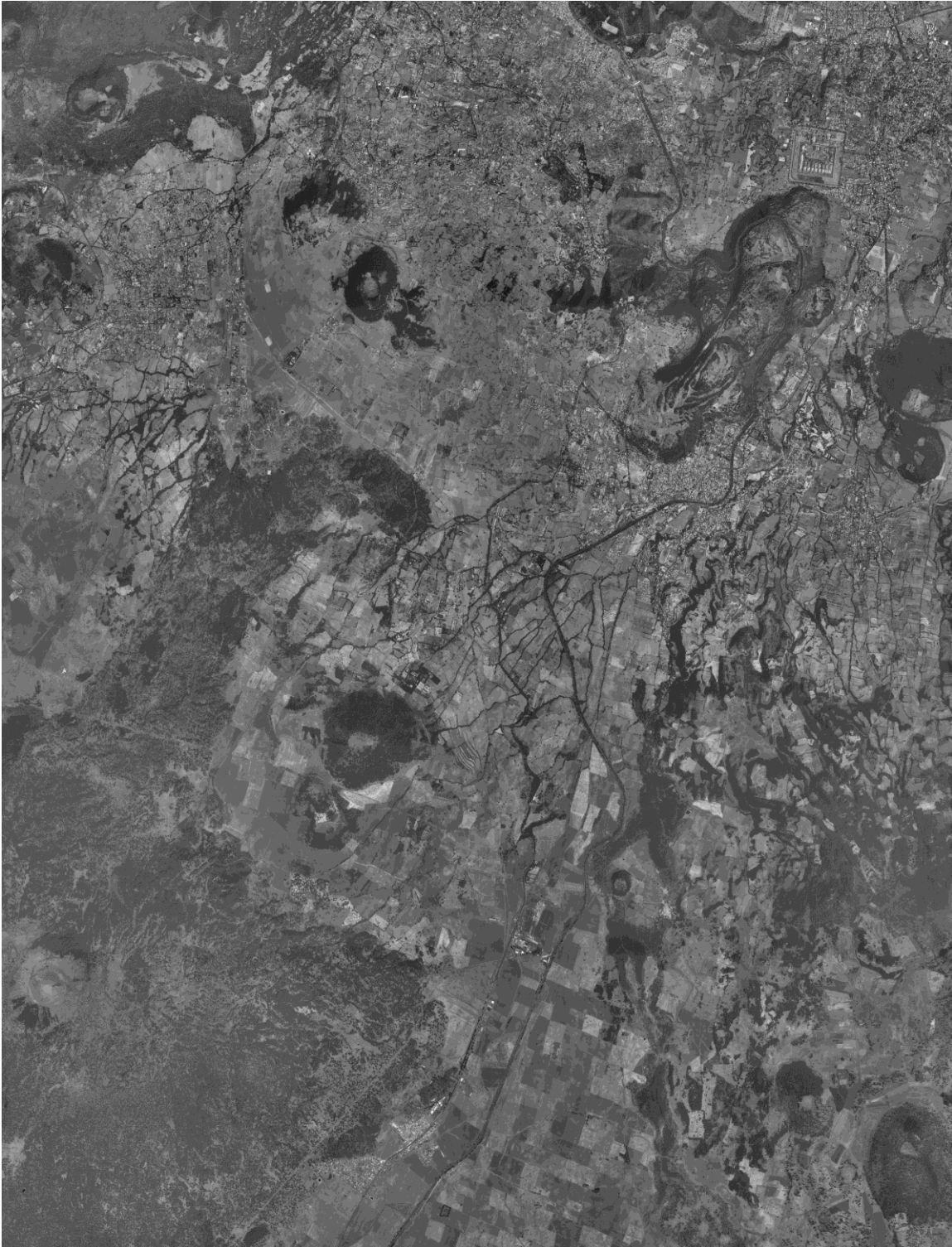


Figura 3.52. Ortofotografía correspondiente al cuadrante E14A49B.

## **CAPITULO 4. PROCESO CARTOGRÁFICO.**

En este capítulo se pretende dar una explicación de las etapas necesarias para incorporar los insumos obtenidos a partir de la compilación fotogramétrica dentro de un sistema fotogramétrico digital (DPS) a un Sistema Cartográfico Digital que nos permita integrar, editar, administrar y presentar la cartografía básica definitiva de este trabajo.

Inicialmente es necesario abordar una adecuada explicación sobre el concepto de cartografía y lo correspondiente a su progresión tecnológica y entorno digital, ya que los conceptos de cartografía automatizada y cartografía digital varían a partir de las diferentes orientaciones a nivel internacional que han impulsado su desarrollo, con metodologías completamente diferentes, basadas en principios conceptuales totalmente contrapuestos e inclusive, en algunos casos, son presentados como términos con el mismo objeto de estudio o sinónimos. En otras circunstancias y bajo algunas especificaciones comerciales, la cartografía y su entorno digital queda incluida como un proceso especializado dentro de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En segundo aspecto es necesario realizar una explicación referente a las divisiones de la Cartografía, para así poder determinar los alcances de la cartografía básica que se pretende generar en este trabajo.

Ante la problemática comentada con anterioridad, se presenta la concepción de un Sistema Cartográfico Digital, que por su utilidad en un flujo de trabajo operativo y para efectos de este documento, satisface las necesidades de integración, procesamiento, edición y representación gráfica de la cartografía básica que se pretende generar como propósito general de este trabajo.

### **4.1 Conceptos de Cartografía.**

De acuerdo con la Asociación Cartográfica Internacional (ICA) la cartografía es el conjunto de estudios y operaciones científicas y técnicas que intervienen en la conformación de mapas, modelos en relieve o globos que representan la tierra o parte de ella (Campos, 1990).

Otra definición de Cartografía establece que es el conjunto de procedimientos que permite reunir, analizar, generalizar y sintetizar datos de la superficie terrestre para presentarlos en una escala reducida (INEGI 1994).

A la vez, en las tres últimas décadas, el impacto producido por la introducción de las ciencias informáticas y computacionales a los métodos electrónicos para la generación de cartografía, ocasionó que se desarrollaran conceptos determinados por el uso de información en formato digital o por incorporar cadenas de procesos digitales a la generación de cartografía, por lo que se presentan los siguientes conceptos teóricos:

- Cartografía automatizada.
- Cartografía digital.
- Sistemas de información Geográfica (SIG).

Cabe mencionar que al final de este apartado se presenta una evaluación sobre estos conceptos y su referente utilización para ser incorporados al Sistema Cartográfico Digital como soporte teórico de este trabajo.

#### **4.1.1 Conceptos de Cartografía Automatizada.**

Sergio Franco Maass y Ma. Eugenia Valdez (2003) comentan que la Cartografía automatizada constituye la principal vertiente de la cartografía contemporánea. Se trata de un conjunto de técnicas para el diseño y producción de mapas mediante el auxilio de computadoras. Estrictamente hablando la cartografía automatizada se refiere a la creación y aplicación de paquetes y programas para el manejo de cartografía digital.

Roberto Franco Plata (2003), la define como una de las tecnologías disponibles para el geoprocesamiento complejo de los datos geográficos, en estrecha relación con los Sistemas de Información Geográfica y con los nuevos procesos de producción cartográfica.

Además utiliza el conceptos sobre un Sistema de Cartografía Automática, el cual posibilitan la elaboración dinámica y oportuna de mapas, a partir del manejo de la información alfanumérica (atributos) y gráfica (mapa base), almacenada en bases de datos. Estos sistemas cuentan con funciones específicas para generar simbología convencional y temática; mediciones de longitudes y áreas y comunicación con tablas de atributos. Permite obtener mapas a través de varias opciones de recuperación de datos, de tal manera que el mapa mostrará la información seleccionada; lo que da al mapa una nueva dinámica y lo convierte en un conjunto de imágenes cartográficas ajustadas a las necesidades del usuario.

#### **4.1.2 Conceptos de Cartografía Digital.**

Tomando como referencia al Manual de Sistemas de Información Geográfica y Cartografía Digital, publicado por la ONU, Estudios de Métodos. Serie F No. 79. Nueva York 2000. (Inglés - Español). Es el procedimiento que transforma la información geográfica de los mapas de papel a coordenadas digitales. Gracias a que la información geográfica se organiza como capas de datos es posible realizar mediciones, consultas, modelizaciones y otros tipos de análisis que aprovechan datos provenientes de muchas disciplinas diferentes.

Mena, J. (1992), realiza una interesante asociación técnica de este concepto a los sistemas CAD (Diseño asistido por computadora), comenta que son editores gráficos, los cuales cuentan con una gran variedad de opciones para dibujar en forma interactiva, organizar la información en capas (layer) o niveles de

información, cuentan con un motor de edición, posibilitando que el usuario pueda gestionar y mantener información vectorial y raster.

#### **4.1.3 Conceptos de Sistemas de Información Geográfica (SIG).**

Un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para soportar la captura, administración, manipulación, análisis, modelamiento y graficación de datos u objetos referenciados espacialmente, para resolver problemas complejos de planeación y administración. Una definición más sencilla es: Un sistema de computador capaz de mantener y usar datos con localizaciones exactas en una superficie terrestre.

Un sistema de información geográfica, es una herramienta de análisis de información. La información debe tener una referencia espacial y debe conservar una inteligencia propia sobre la topología y representación, así como el soporte para obtener soluciones más rápidas y eficientes (ESRI-2003)

Wise, S. (2002) comenta que son una herramienta informática que sirve para ingresar, almacenar, gestionar, recuperar, actualizar, analizar y producir información y sus datos están relacionados con las características de los lugares o zonas geográficas, permitiendo conocer qué cosas se encuentran en una ubicación dada.

#### **4.1.4 Evaluación sobre los conceptos presentados.**

A partir de los conceptos presentados con anterioridad, y homologando los mismos criterios utilizados en el proceso fotogramétrico, se debe realizar una conceptualización práctica en el desarrollo de este trabajo, por lo que bajo una perspectiva operativa en la manipulación de información digital, el método en el flujo de trabajo y la posibilidad de semi-automatizar los procesos en la generación de cartografía, se derivan las siguientes conclusiones:

- a) En función de los conceptos presentados sobre cartografía automatizada, en primer aspecto, si analizamos este término desde una perspectiva informática y orientada al desarrollo de software cartográfico, esto involucra los conocimientos de un grupo o grupos interdisciplinarios dedicados a la programación, diseño y funcionalidad de software, así como lo correspondiente a los tiempos de desarrollo y evaluación. Definitivamente estos aspectos no corresponden a los alcances previstos en este trabajo.

En segundo aspecto, siguiendo la premisa de un sistema de cartografía automática y apegándonos a una realidad técnica y operativa en México, no existe proceso automático alguno, si acaso, aprovechando la experiencia de empresas dedicadas al desarrollo de software cartográfico, se han desarrollado algunas rutinas semi-automáticas y concatenadas para la detección de errores topológicos dentro de los archivos de información geográfica, estos apartados se explicación dentro de este mismo capítulo.



- b) La cartografía digital involucra todas las cuestiones operativas, técnicas o cualquier dispositivo destinado a la generación, transmisión, procesamiento o almacenamiento de información geográfica mediante señales digitales. También involucra cualquier combinación de dispositivos diseñados para manipular cantidades físicas o información que estén representadas en forma digital; es decir, que sólo puedan tomar valores discretos. La mayoría de las veces estos dispositivos son electrónicos, pero también pueden ser mecánicos.
- c) En lo respecta a los Sistemas de Información Geográfica, la concepción de estos se orienta a sistemas que proporcionan información partiendo de la superposición y/o combinación de información geográfica para otorgar un análisis temático según las necesidades que se requieran o la esencia con que fue construido. Por lo que en este trabajo no se contempla la elaboración de dicho sistema.

Como complemento a un mejor entendimiento, se presentan las siguientes diferencias entre un CAD y un SIG.

- Los sistemas CAD se basan en la computación gráfica, que se concentra en la representación y el manejo de información visual (líneas y puntos). Los SIG requieren de un buen nivel de computación gráfica, pero un paquete exclusivo para manejo gráfico no es suficiente para ejecutar las tareas que requiere un SIG y no necesariamente un paquete gráfico constituye una buena base para desarrollar un SIG.
- El manejo de la información espacial requiere una estructura diferente de la base de datos, mayor volumen de almacenamiento y tecnología de soporte lógico (software) que supere las capacidades funcionales gráficas ofrecidas por las soluciones CAD.
- Los SIG y los CAD tienen mucho en común, dado que ambos manejan los contextos de referencia espacial y topológico. Las diferencias consisten en el volumen y la diversidad de información, y la naturaleza especializada de los métodos de análisis presentes en un SIG. Estas diferencias pueden ser tan grandes, que un sistema eficiente para CAD puede no ser el apropiado para un SIG y viceversa.

#### **4.2 Divisiones de la Cartografía.**

Por la información esencial contenida en una publicación cartográfica, una división tradicional muy adecuada para los fines de este trabajo la presenta Joly (1982), comenta que las clases de mapas son tan numerosas que resulta muy difícil realizar una clasificación racional de todos los productos cartográficos existentes.

El único apartado que parece incuestionable en su conceptualización, es que existen dos vertientes de la cartografía:

- Cartografía básica: destinada a la representación de los rasgos esenciales de la superficie terrestre.
- Cartografía temática dirigida a la representación de cualquier otro tipo de fenómeno que ocurre en dicha superficie.

#### **4.2.1 Cartografía Básica.**

Tradicionalmente la referencia técnica más aproximada a un concepto claro de cartografía básica se encuentra referida al concepto de mapa topográfico o básico, a partir de esta comparativa y según Joly (1982), se refiere a una representación exacta y detallada de la superficie terrestre, referente a la posición, forma, dimensiones e identificación de los accidentes del terreno, así como de los objetos concretos que se encuentren permanente sobre él.

Un concepto muy práctico establece que el objetivo de la cartografía básica es describir con precisión y riguroso detalle los accidentes topográficos del terreno (INEGI-PROCEDE 1994).

A partir de las anteriores definiciones en el apartado 4.3 se presentan los alcances de este trabajo en lo referente a los rasgos básicos que se deben considerar en la generación de cartografía básica, así como la estructura de datos digital y representación geométrica que se requiere para su tratamiento dentro del Sistema Cartográfico Digital.

#### **4.2.2 Cartografía Temática.**

Sergio Franco Maass y Ma. Eugenia Valdez (2003), comentan que la Cartografía temática comprende todas aquellas representaciones cartográficas que se realizan con algún propósito específico. En cierto sentido pueden considerarse como suplementarios a la información contenida en los mapas topográficos, y frecuentemente, dada la necesidad de incluir referencias de localización para la ubicación de los fenómenos, llegan a contener información básica o topográfica.

Carles Carreras y Assumpta Ariño (2006) comentan que la cartografía temática es aquella que representa temas (elementos, ideas, conceptos, relaciones, etc.) monográficamente, en tanto que se dan en un tiempo o en distintos tiempos y en un territorio o territorios determinados. La cartografía temática se origina, pues, especializada con la intención de representar alguna o varias de estas variables, a diferencia de la cartografía general (topográfica o físico-política, según la escala), que intenta representar todo el territorio visible y cuyo resultado final ha de ser un mapa analítico. Sin embargo, y a pesar de esta diferenciación tradicional, debe pensarse que no deja de ser muy formal y algo artificial, dado que, por ejemplo, los signos convencionales usados en la cartografía general no dejan de ser contenidos temáticos y casi nunca pueden ser representados proporcionalmente.

### **4.3 Descripción del Sistema Cartográfico Digital (SCD).**

Adams Consulting (2008) presenta un Modelo de Entidad Relación (MER) determinado a garantiza la organización de todas las entidades con sus relaciones en un solo esquema de representación de las cosas como son en la realidad. Con este modelo se obtiene un medio efectivo para mostrar los requerimientos de información, organización y documentación necesarios para desarrollar un sistema CAD o un SIG y las clases de datos que se estarán manipulando.

En la conceptualización del SCD, se aplica el MER, ya que permite la integración de objetos de la superficie de la Tierra (entidades) con sus relaciones espaciales y características (atributos) que se representan en un sistema describiendo los fenómenos del mundo real. Para obtener el MER, el primer paso es la adecuada incorporación de la información y los datos a usar; el siguiente paso es la determinación de las entidades y los atributos con las relaciones que aquellas guardan con todos los aspectos digitales y tecnológicos. Así y en total complemento con el proceso fotogramétrico, la estructura del Sistema Cartográfico Digital se encuentra segmentada en dos propósitos bien definidos.

1. Técnicamente el Sistema Cartográfico Digital se encuentra sustentado en un sistema CAD, el cual se describe como un sistema lógico que permite gestionar una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, áreas) con la que se puede interactuar y operar a través de una pantalla gráfica denominada editor de dibujo. Además este sistema lógico permite organizar los objetos por medio de *capas* o niveles, ordenando el dibujo en partes independientes con diferente características (color, gráficos, etc.).
2. Bajo una estructura operacional, se deben determinar los alcances de este trabajo en lo referente a la estipulación de los alcances del proceso de abstracción cartográfica, a partir del cual se incorporaran los rasgos básicos o entidades geográficas básicas que se deben considerar en la generación de cartografía básica.

#### **4.3.1 Descripción técnica del Sistema Cartográfico Digital.**

El objetivo tecnológico en la utilización de un sistema CAD es posibilitar el manejo de grandes volúmenes de información geográfica demasiado complejos para su procesamiento manual, así su operación debe permitir la gestión directa de los procedimientos que fueron presentados en el apartado 3.2.2.3 de este trabajo, en el cual se hace referencia al Sistema lógico de las estaciones de trabajo fotogramétricas, los cuales se comentan a continuación:

- a. Gestión de la información.
- b. Gestión de personalización.
- c. Gestión de comunicación.

Ahora, como se trata de manipular en el sistema CAD los elementos del terreno extraídos fotogramétricamente en el apartado anterior se tienen que codificar esta información para poder almacenarlos en el computador y luego manipularlos en forma digital.

A la vez, en ese mismo apartado se comentó que existe software que cumplen con los procedimientos de gestión comentados con anterioridad, como Microstation de la empresa Bentley y Autodesk Map de Autodesk, por lo que como apoyo a una mejor comprensión se incorporan ejemplos gráficos y prácticos de la manipulación del software Autodesk Map Desktop de la empresa Autodesk, ya que actualmente es uno de los sistemas CAD más empleados a nivel mundial y utilizado en varias instituciones gubernamentales y privadas a nivel nacional.

Aparte de los procedimientos de gestión, técnicamente este sistema CAD debe proveer herramientas para los siguientes apartados:

- Asignación de una proyección cartográfica y un sistema global de coordenadas.
- Organización de las estructuras de datos de las entidades geográficas básicas a representar.
- Representación geométrica de entidades geográficas básicas.
- Relaciones espaciales entre las entidades geográficas básicas.
- Vinculación de datos asociados a las diferentes entidades geográficas.

#### **4.3.1.1 Asignación de una proyección cartográfica y un sistema global de coordenadas.**

Las proyecciones cartográficas se refieren a las técnicas diseñadas por cartógrafos y matemáticos para representar total o parcialmente una superficie tridimensional, prácticamente esférica (como la superficie terrestre), en forma de una superficie plana bidimensional.

Un sistema global de coordenadas es la descripción de un origen determinado para la información geográfica a representar, el sistema de proyección utilizado y las unidades de medida que se utilizan.

Por tanto, el primer parámetro cartográfico dentro del sistema CAD es asignar un sistema global de coordenadas a la sesión de trabajo que utilizaremos. El término de “sesión de trabajo, (Work Session)” es referido a la ejecución del núcleo central de las posibilidades de gestión de proyectos del software (compuestas a su vez por múltiples dibujos). Esta funcionalidad permite incluir el conjunto de dibujos con las características específicas que el usuario desea, los vínculos a Bases de Datos y las consultas predefinidas para usuarios en un entorno de proyecto.

De gran importancia es continuar con los parámetros del sistema global de coordenadas determinado en los levantamientos geodésicos y en el proceso fotogramétrico, el cual está referido al sistema geocéntrico WGS\_84, con una proyección cartográfica UTM, zona horaria 14 norte y utilizando el sistema métrico de medida (ver figura 4.1).

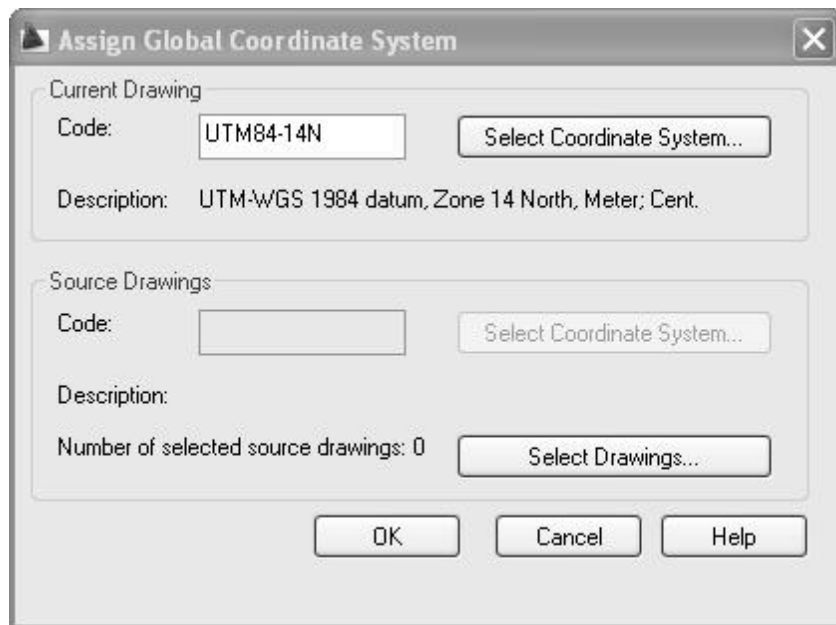


Figura 4.1. Asignación de una proyección cartográfica y un sistema global de coordenadas.  
(Fuente de imágenes: Autodesk Map Desktop versión demo).

#### **4.3.1.2 Organización de las estructuras de datos de las entidades geográficas básicas a representar.**

A partir de lo comentado en el apartado 3.3.3.3 de este trabajo, en donde se hace referencia a las estructuras de datos en los MDE, se especificó que las estructuras de datos se dividen en dos grupos: raster y vectorial, por lo que rigurosamente el sistema CAD debe estar diseñado para soportar ambas estructuras de datos.

La estructura raster se obtiene cuando se "digitaliza" un mapa o una fotografía, o cuando se obtienen imágenes digitales capturadas por satélites. En ambos casos se obtiene un archivo digital de esa información. La captura de la información en este formato se hace por los siguientes medios: escaneo o producción fotogramétrica, imágenes de satélite, fotografía aérea, cámaras de video, etc.

La estructura vectorial se representa por medio de segmentos orientados de rectas o vectores. De este modo la información geográfica queda simplificada a una serie de pares ordenados de coordenadas, utilizados para representar elementos geométricos: puntos, líneas y superficies.

En lo que respecta a la organización, es indispensable que desde el inicio de la sesión de trabajo la información cartográfica sea almacenada en capas (layers),

las cuales pueden ser operadas en dependencia de las necesidades concretas de los usuarios, es decir, pueden ser apagadas, encendidas, congeladas y también protegidas contra edición (ver figura 4.2 a). Un aspecto importante en este apartado es que a partir de este manejador de capas se puede modificar los elementos característicos de los datos como color, tipo de línea, grosor de la línea, etc., (ver figura 4.2 b).

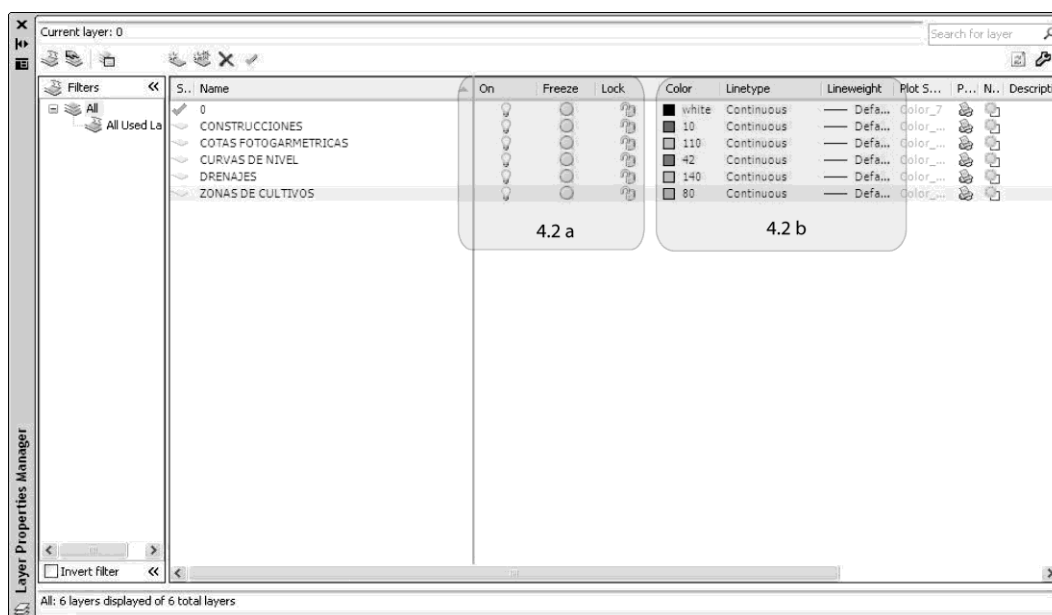


Figura 4.2. Representación gráfica de un manejador de capas o layers.  
(Fuente de imágenes: Autodesk Land 2009 versión demo).

#### 4.3.1.3 Representación geométrica de entidades geográficas básicas.

Existen representaciones geométricas que determinan la forma de las dimensiones espaciales de información geográfica, esta forma puede ser un punto, una línea o un área, a esto se le conoce como implantación, que es la representación grafica de cualquier objeto geográfico (Flórez, A. y Thomas, J.E., 1992).

1. Implantación puntual: Un punto es una posición sin longitud ni superficie, está asociado a la dimensión y constitución de lo que representa. Un punto puede variar en tamaño, color, orientación y forma, pero jamás podrá ser una línea o un área (Quijada, 1990).

Un punto es definido por toda entidad geográfica que puede ser localizada por un par de coordenadas XY y algunas veces puede poseer un atributo Z, que puede ser la cota altimétrica, cuando la implementación puntual es generada por medios fotogramétricos, rigurosamente contendrá dentro de sus propiedades nativas las coordenadas X,Y,Z y no como atributos (ver figura 4.3).

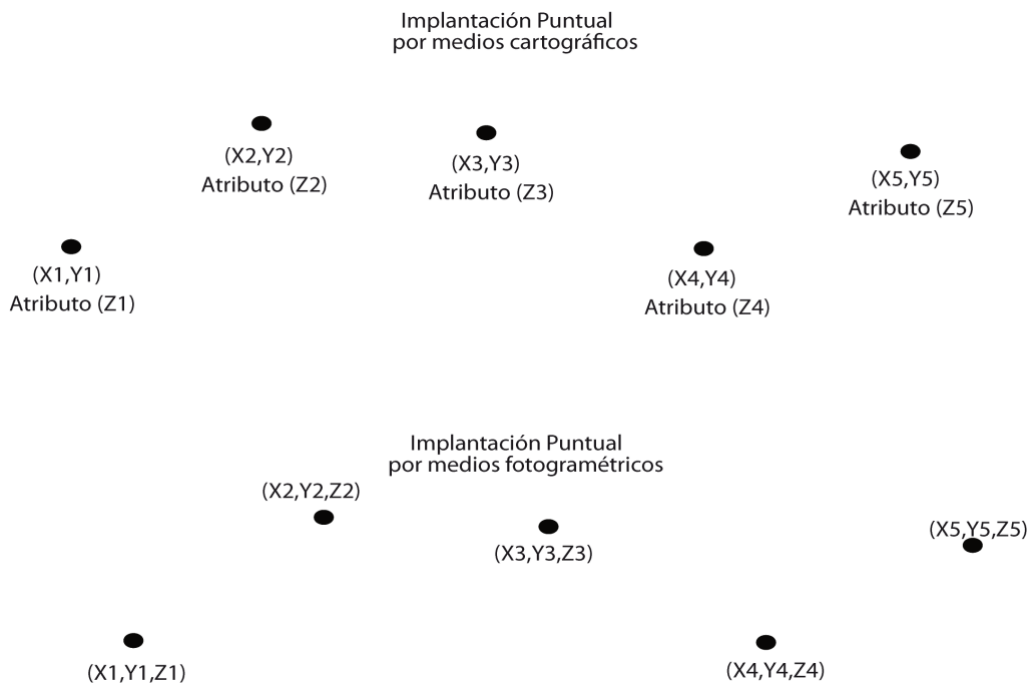


Figura 4.3. Implantación puntual por medios cartográficos y fotogramétricos.  
(Elaboración propia).

2. Implantación lineal: Es la representación geométrica constituida por una serie de dos o más pares distintos de coordenadas (vértices) ligados secuencialmente. Una línea es una entidad definida por un mínimo de dos pares de coordenadas (XY), o sea, dos puntos. Es importante mencionar que para codificar líneas curvas se necesita un mayor número de coordenadas que para las líneas rectas.

Cuando la implementación lineal es generada por medios fotogramétricos, el valor altimétrico varía en función de su continuidad y de la entidad geográfica a representar, por lo que se divide en:

- Implementación lineal continua: Se aplica cuando el valor altimétrico es continuo, por ejemplo, las curvas de nivel son líneas unidad por un valor altimétrico constante y continuo (ver figura 4.4).
- Implementación lineal discontinua: Se aplica cuando el valor altimétrico no es continuo, por ejemplo, los breaklines utilizados para editar el MDE (pág. 194 de este trabajo), se incorporan a este proceso cartográfico representando entidades que esencialmente son escurrimientos que modelan el terreno (ver figura 4.4).

Junto con sus coordenadas, la línea puede requerir un sentido al cual está asociada una característica del rasgo geográfico, sin embargo, este sentido estaría considerado en la entidad como un atributo.

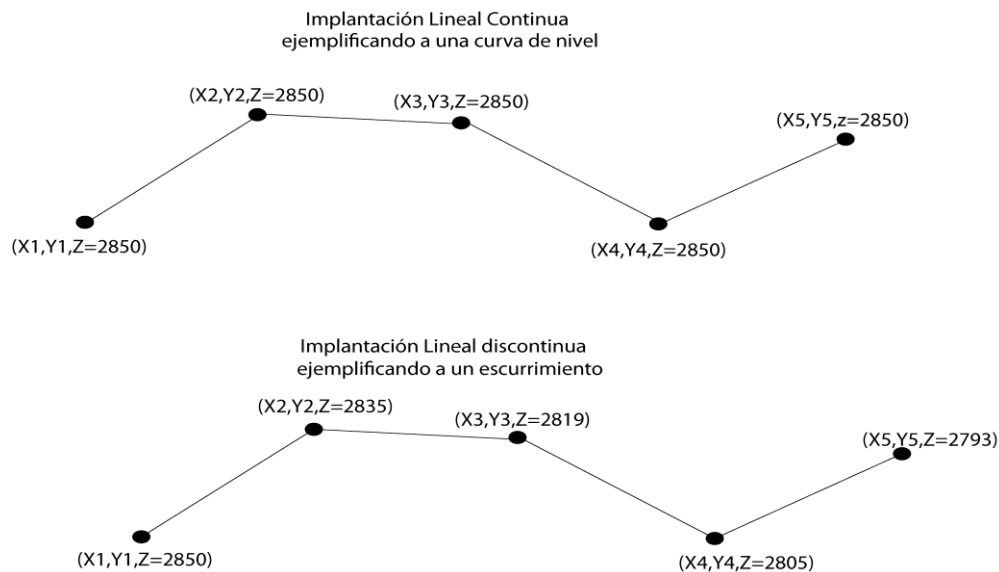


Figura 4.4. Implantación lineal continua y discontinua.  
(Elaboración propia).

Un concepto fundamental en la representación de entidades lineales es el término “poli-líneas”, estas son entidades gráficas complejas compuestas por una sucesión de entidades lineales simples, que en un sistema topológico conectan "nodos", los cuales son puntos virtuales de "enlace" y los extremos de cada línea, definidos por sus coordenadas y no son considerados como una entidad geográfica, conforme a lo anterior, dentro del SCD implementado en este trabajo todas las entidades lineales quedarán definidas por poli-líneas.

3. Implantación areal: Es la representación geométrica delimitada por una línea cerrada o serie de líneas que cierran. Un área se usa para describir geoméricamente un rasgo geográfico considerado como una extensión o superficie. Una implantación areal siempre estará constituida digitalmente por un polígono, el cual es una poli-línea cerrada o un conjunto de líneas cerradas que definen un área homogénea.

Un área puede ser simple o compleja cuando hablamos de aéreas simples nos podemos referir a una representación geométrica delimitada por una sola línea o polígono, por ejemplo, en las zonas urbanas es muy común representar a las manzanas urbanas por un simple polígono (ver fig. 4.5 a).

Un área es compleja cuando está constituida en conjunto con otra área, por ejemplo, continuando el ejemplo de las manzanas urbanas, en la fig. 4.5 b, se observa que estas comparte un costado lo cual implica un error topológico en su relación espacial, la solución a estas relaciones se presenta en el siguiente apartado. Otro ejemplo de un área compleja se presenta cuando en su interior contiene a otra área (ver figura 4.5 c), cuando se presenta esta relación espacial se determina dar una solución topológica para determinar digitalmente que no exista conflicto alguno en la relación espacial.



El ejemplo presentado en la misma figura corresponde a un polígono que representa al Distrito Federal, este presenta en su interior a polígonos islas que corresponden a las delegaciones políticas de Cuauhtémoc y Xochimilco.

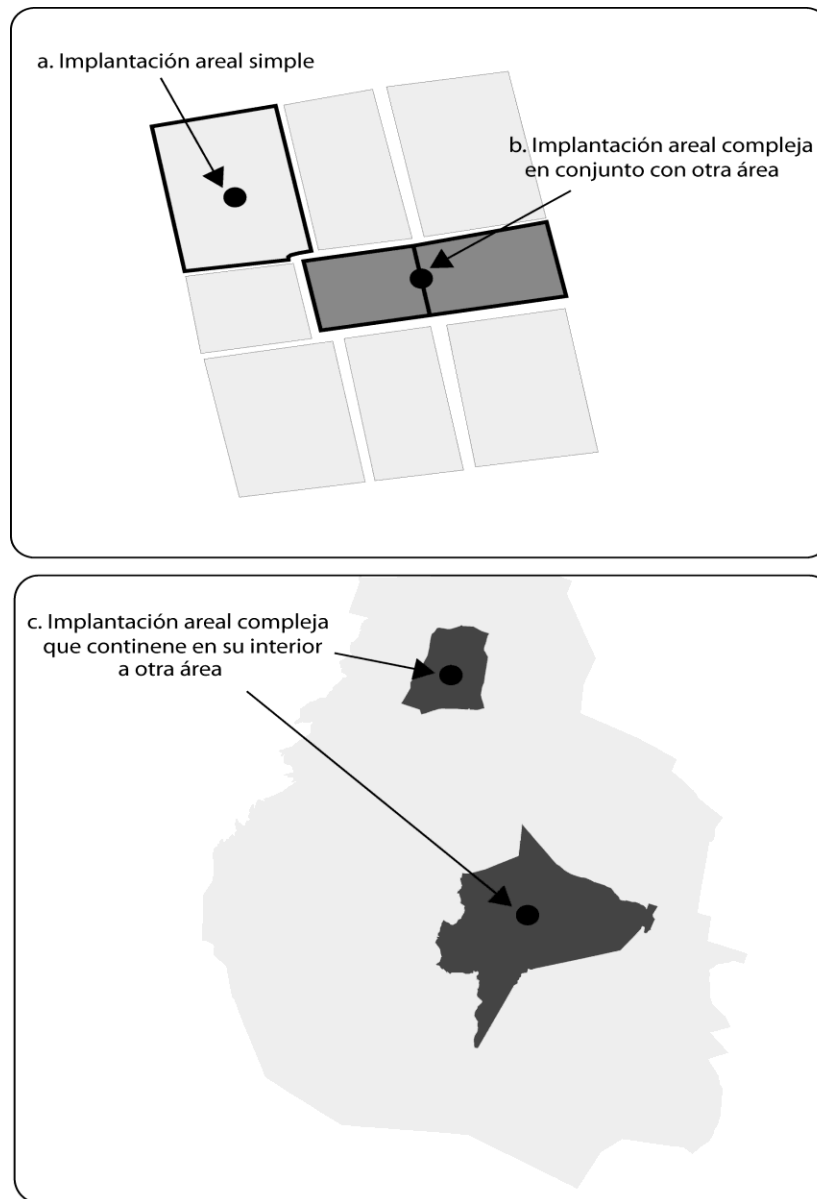


Figura 4.5. Implantación areal simple y compleja.  
(Elaboración propia).

#### 4.3.1.4 Relaciones espaciales entre las entidades geográficas.

Sergio Franco Maass y Ma. Eugenia Valdez (2003) comentan que el método más utilizado para detectar las relaciones espaciales entre entidades geográficas es el registro explícito de la información de adyacencia que es conocido como el modelo de datos topológicos. Cada modelo contiene un identificador y este es registrado para retener las relaciones espaciales elementales.

Entonces, las relaciones espaciales entre las entidades geográficas se definen usando las reglas de topología, las cuales garantizan que estas relaciones o asociaciones entre entidades estén aseguradas conforme a la continuidad espacial.

La topología o geometría de la localización es la rama de las matemáticas que se encarga del estudio de la posición relativa de los objetos, independientemente de su forma exacta, de su localización espacial y de su tamaño. Esto conduce necesariamente a la resolución de problemas de conectividad y de adyacencia.

En las entidades geográficas, se usan procedimientos semi-automáticos (matemáticos y topológicos) para definir sus conexiones, identificar los polígonos adyacentes y definir a un elemento como un conjunto de otros elementos, por ejemplo un polígono esta hecho de una poli-línea cerrada y a la vez esta de líneas conectadas (ESRI 1990).

Según el INEGI en su Sistema Nacional de Información Geográfica (SNIG) y su Base de Datos Geográficas (BDG) definen dos tipos de relaciones espaciales: conectar (conectividad) y compartir (adyacencia).

- Conectar: Se da una relación de conectar entre ocurrencias de entidades, cuando existe una intersección planimétrica entre dos entidades geográficas. Esta relación requiere que las ocurrencias de las entidades involucradas en la relación de conectar, tengan las mismas coordenadas de sus ocurrencias de representación geométrica en el punto de conexión.

Una relación de conectar implica una terminación de las ocurrencias de representación geométrica de todas las ocurrencias de entidades presentes en el punto de conexión (ver figura 4.6 b).

- Compartir: Se da una relación de compartir entre ocurrencias de entidades cuando los rasgos geográficos percibidos como líneas o áreas sean parcial o totalmente contiguos o coincidentes. Esta relación requiere que las ocurrencias de las entidades involucradas en la relación de compartir, tengan las mismas coordenadas en sus ocurrencias de representación geométrica lineal.

Una relación de compartir implica conexión para todas las líneas que terminen en los extremos de la línea compartida (ver figura 4.6 c).

La existencia de una combinación de valores de los atributos establecidos para una entidad y que describe un rasgo geográfico particular, constituye una ocurrencia de la entidad.

Continuando con el ejemplo de las implantaciones areales complejas, en la figura 4.6 se muestra la sucesión topológica que deben tener los datos de partida en el

flujo operativo ideal para determinar las relaciones espaciales entre entidades geográficas básicas.

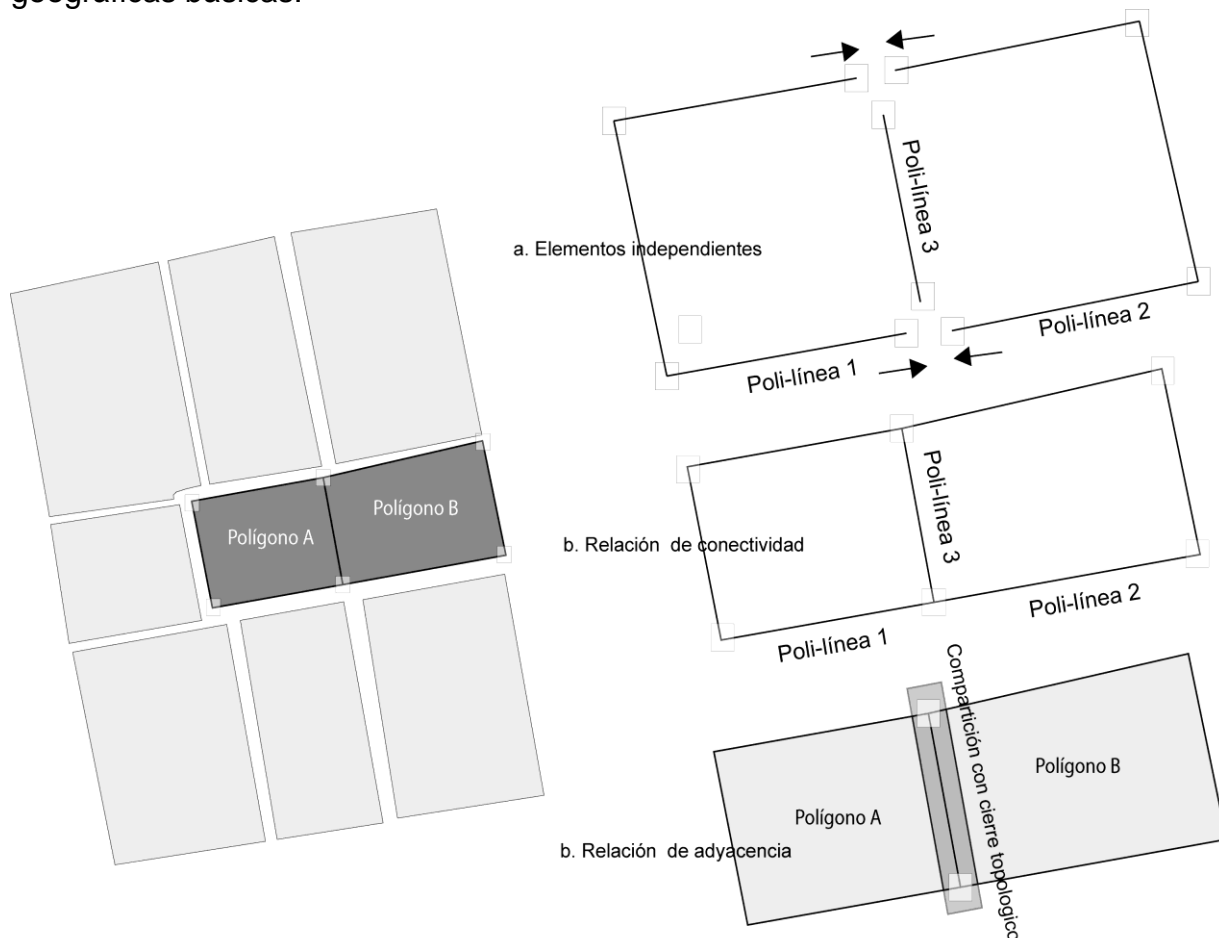


Figura 4.6. Determinaciones topológicas en un flujo operativo ideal para determinar las relaciones espaciales entre entidades geográficas básicas. (Elaboración propia).

En la figura 4.6 a se presentan tres polilíneas que rigurosamente deben ser implantaciones lineales independientes. En la figura 4.6 b se observa que estos elementos independientes presentan la relación de conectividad entre sí, sin perder sus características, la relación espacial de conectar se permite a partir de los nodos iniciales y finales. En la figura 4.6 c se realiza la generación semi-automática de los polígonos a partir de las polilíneas y se muestra la relación de adyacencia que se establece entre ellos.

A partir de estas relaciones, las funciones topológicas del sistema proveen las bases para muchos tipos de análisis geográfico, ya que es posible organizar la información gráfica y los datos correspondientes a cada entidad geográfica en forma de topologías de nodo, de red y de polígonos:

1. Topología de nodos: una topología de nodos define la relación mutua de los nodos (objetos punto). Las topologías de nodo se utilizan con frecuencia junto con otras topologías del análisis.

2. Topologías de red: una topología de red estudia la interconexión de vínculos (líneas) que forman una red lineal. Los vínculos pueden conectar nodos entre sí. Un ejemplo de red es una aplicación de distribución de agua en la que se traza el flujo de agua desde una estación de bombeo a las viviendas. Otro ejemplo es una red de ejes de calles.
3. Topologías de polígonos: una topología de polígonos define polígonos que representan áreas delimitadas. Un único vínculo define el contorno común existente entre dos áreas adyacentes.

Además, unas de las ventajas del manejo de las estructuras topológicamente definidas es la posibilidad de efectuar también el análisis cartográfico como:

- Detección y corrección de las anomalías topológicas con procesos semi-automáticos.
- Identificación y manipulación de elementos gráficos. Cada elemento puede ser aislado y analizado de acuerdo con sus características.
- Establecimiento de zonas de proximidad.
- Realización de operaciones booleanas sobre las entidades geográficas. Múltiples operaciones son posibles tales como la intersección, unión, suma o sustracción de información (consultas).

#### **4.3.1.5 Vinculación de datos asociados a las diferentes entidades geográficas.**

Este es uno de los apartados esenciales en la generación de cartografía básica, ya que a partir de los atributos y bases de datos relacionales asociados a las entidades geográficas básicas, depende su posterior utilización e incorporación a proyectos de cartografía temática y sistemas de información geográfica.

La mayor parte de bases de datos actuales son relacionales, una base de datos relacional es un conjunto de información organizada en tablas y una tabla es una estructura de datos compuesta por filas horizontales o registros y columnas verticales o campos. La intersección de una fila y de una columna es un valor de dato único o campo.

Las bases de datos relacionales pueden suministrar conexiones extensivas de información geográfica. También son utilizadas como depósito de información para los atributos que describen los componentes en todos los otros tipos de datos y pueden estar ligadas a partir de dos formas:

1. La primera de ellas es la vinculación de estas tablas a las entidades geográficas a partir de un Objeto de Base de Datos Relacionales (OBDR), este objeto base de datos está hecho totalmente de instrucciones

informáticas propio del software CAD utilizado, que permiten asociar o vincular registros hechos de campos de datos. Si una de las tablas contiene algún tipo de información espacial, entonces esto puede ser un objeto espacial independiente. Cualquier clase de información puede ser almacenado en un campo de datos (por ejemplo: números, caracteres, comentarios, etc.).

2. La segunda es cuando esta información se almacena en un OBDR externo y posteriormente a través de una consulta con un Lenguaje de Consulta Estructurado (SQL, por sus siglas en inglés, Structured Query Language), y una condición homóloga para acceder a los registros de las entidades geográficas, generalmente esta condición se realizar a través de un identificador (ID), que forma parte de un atributo en las entidad geográfica y un campo en una OBDR externa.

En la figura 4.7 se muestra la configuración de las curvas de nivel de un sector del cuadrante E14A49B seleccionado arbitrariamente, el cual nos sirve para ejemplificar la asociación de datos a partir de un OBDR, en la figura 4.7 a, se muestran los atributos de una curva de nivel que presenta una altura de 3310 m.

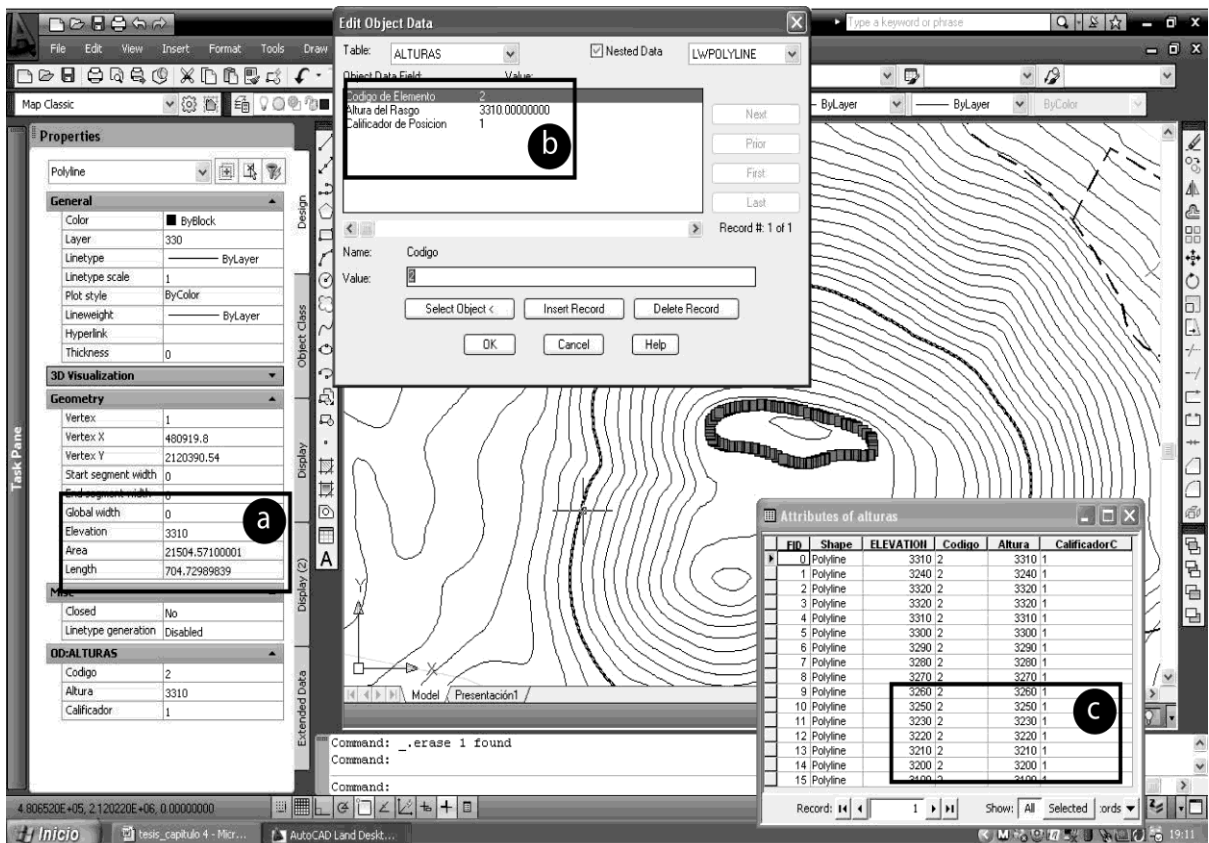


Figura 4.7. Datos asociados a entidades geográficas. (Elaboración propia).

En la figura 4.7 b se muestran el OBDR propio del software utilizado y de la misma curva de nivel y en la figura 4.7 c se muestra la misma información, pero en una OBDR externa.

#### **4.3.2 Descripción operativa del Sistema Cartográfico Digital.**

Partiendo de los productos que se obtuvieron en la compilación fotogramétrica, se cuenta con información vectorial y raster de los rasgos extraídos del modelo estereoscópico mediante implantaciones puntuales, lineales o areales.

La organización operativa consta de la descripción de tres grandes grupos de entidades que predominan en la constitución básica del terreno:

1. Entidades orográficas.
2. Entidades hidrográficas.
3. Entidades de servicios e instalaciones.

Además dentro de cada grupo se determinan los criterios básicos para clasificar a las entidades geográficas que lo conforman, esto estructurando un catálogo de datos que describe las propiedades de cada entidad geográfica.

Cabe mencionar que la generación de este tipo de catálogos es una metodología utilizada por varias instituciones gubernamentales a nivel nacional, pero la realidad es que el principal precursor en México es el INEGI, el cual ha elaborado catálogos o diccionarios de datos para homologar, regular y normar las propiedades de la información geográfica en su generación, conversión y actualización a nivel nacional.

Por esto, para la generación del catálogo de datos de este trabajo se utilizó como fuente primaria de información el Modelo de Datos Vectoriales elaborado por el INEGI en 1993; el cual incorpora todos los elementos necesarios para describir las características de las entidades geográficas que se encuentran dentro del cuadrante E14A49B.

Este catálogo de datos es un insumo que brinda información adicional de la cartografía básica generada y es muy útil para los usuarios potenciales de la misma. Los componentes de este catálogo son los siguientes:

- a) Denominación de la entidad geográfica: corresponde con el nombre de un fenómeno espacial representado mediante una representación geométrica, tablas de datos o descripciones.
- b) Clase o familia: se refiere a los grupos de entidades geográficas con propiedades similares.

- c) Representación geométrica: determinan la forma de las dimensiones espaciales de información geográfica, esta forma puede ser un punto, una línea o un área.
- d) Relación espacial: son las especificaciones de existencia de una adyacencia o conectividad entre entidades geográficas. Muchas entidades geográficas no necesariamente deben tener estas relaciones, como por ejemplo una cota fotogramétrica o una curva de nivel; pero otras sí requieren determinar rigurosamente su relación espacial, por ejemplo una corriente de agua muchas veces conecta con un cuerpo de agua.
- e) Atributos asociados: se refiere a la descripción de uno o más atributos de la entidad geográfica a través de una tabla relacional.
- f) Fuente de extracción: está determinada por el método de recopilación de la información. Solo puede tener cuatro valores, extracción fotogramétrica, extracción cartográfica, recopilación documental o medición en campo.
  - La extracción fotogramétrica es el proceso de compilación de los rasgos del terreno durante el proceso fotogramétrico.
  - La extracción cartográfica es el proceso de compilar rasgos a partir de fotoidentificación, o bien, utilizando insumos fotogramétricos como las ortofotografías (ver figura 4.10).
  - La recopilación documental es el proceso de incorporar insumos cartográficos digitales, que según las necesidades propias de cada proyecto, para dar referencia o sustituir información geográfica.
  - La medición en campo es el proceso de recolectar información geográfica directamente en el terreno.

#### **4.3.2.1 Entidades Orográficas.**

La representación del relieve se encuentra constituida principalmente por un elemento básico que simboliza todas las características y formas que presenta el terreno, estas son las curvas de nivel; y en complemento a estas, existe un elemento que representa puntos de elevación para referenciar los valores que presenta el terreno, estos puntos se denominan cotas altimétricas.

1. Los contornos o curvas de nivel son la estructura básica de un modelo digital o tradicional del terreno, se encuentran estructurados por una sucesión de líneas definidas como un vector, y estas líneas a la vez, representan al terreno segmentado por diferentes planos horizontales basados en la unión de puntos con la misma altitud. Por su tratamiento digital, la estructura de datos que debe presentar es la siguiente:
  - a. Contornos con estructura de datos vectorial representado por líneas (ver figura 3.47).

- b. MDE con estructura de datos vectorial representado por un TIN y un sombreado analítico (ver figura 3.48).
  - c. MDE con estructura de datos raster representado por GRID (ver figura 3.49).
2. Las cotas altimétricas están referidas a la ubicación precisa de los elementos del terreno mediante la obtención de la coordenada Z. Existen dos formas de obtener este valor y son las siguientes:
- a. Obtención directa. Se refiere a la obtención directa en campo mediante un levantamiento geodésico a partir de métodos diferenciales, generalmente en cualquier proyecto fotogramétrico con fines cartográficos, estos puntos son el control terrestre para todos los procesos fotogramétricos.
  - b. Obtención indirecta. Se refiere a la obtención por medio fotogramétricos de las alturas del terreno, generalmente son conocidas como cotas fotogramétricas.

En ambos casos la representación geométrica es puntual, su atributo de valor en Z se encuentra asociado digitalmente y cuando esta cota altimétrica está colocada para referenciar la altura de un cerro, monte o montaña se le asocia el nombre propio o toponimia de ese elemento (ver figura 4.8).

La información incorporada al catalogo de datos para todos los elementos orográficos es la siguiente:

Entidad geográfica	Clase	Representación geométrica	Relación espacial	Atributos asociados	Fuente de extracción
Cota fotogramétrica	Entidades Orográficas	Puntual	No necesaria	Valor de Z	Extracción fotogramétrica
Curvas de Nivel	Entidades Orográficas	Lineal	No necesaria	Valor de Z	Extracción fotogramétrica
MDE (GRID)	Entidades Orográficas	Raster-Matricial	No necesaria	Valor de Z	Extracción fotogramétrica
MDE (TIN)	Entidades Orográficas	Puntual	No necesaria	Valor de Z	Extracción fotogramétrica
Vértice Geodésico	Entidades Orográficas	Puntual	No necesaria	Valor de Z	Medición en campo

Tabla 4. Estructura relacional correspondiente a entidades orográficas. (Elaboración propia).





Figura 4.8. Extracción cartográfica de entidades orográficas.  
(Elaboración propia).

#### 4.3.2.2 Entidades Hidrográficas.

Se refieren a la representación de las entidades de masas o escorrentías de agua que se encuentran en la superficie terrestre.

La importancia de representar estas entidades radica en que son el principal agente del modelamiento de la superficie terrestre. Las entidades hidrográficas incluidas en este trabajo son las siguientes:

1. Corriente de agua: Flujo de agua que depende de la precipitación pluvial y/o afloramiento de aguas subterráneas, dentro de sus relaciones espaciales, generalmente conecta con cuerpos de agua.
2. Cuerpos de agua: Extensión de agua limitada por tierra, dentro de sus relaciones espaciales, generalmente conecta con corrientes de agua.

La información incorporada al catalogo de datos para todos los elementos hidrográficos es la siguiente:

Entidad geográfica	Clase	Representación geométrica	Relación espacial	Atributos asociados	Fuente de extracción
Corriente de agua	Entidades Hidrográficas	Lineal	Conecta	Nombre propio y longitud	Extracción fotogramétrica
Cuerpo de agua	Entidades Hidrográficas	Areal	Conecta	Nombre propio y longitud	Extracción fotogramétrica

Tabla 5. Estructura relacional correspondiente a entidades hidrográficas.  
(Elaboración propia).

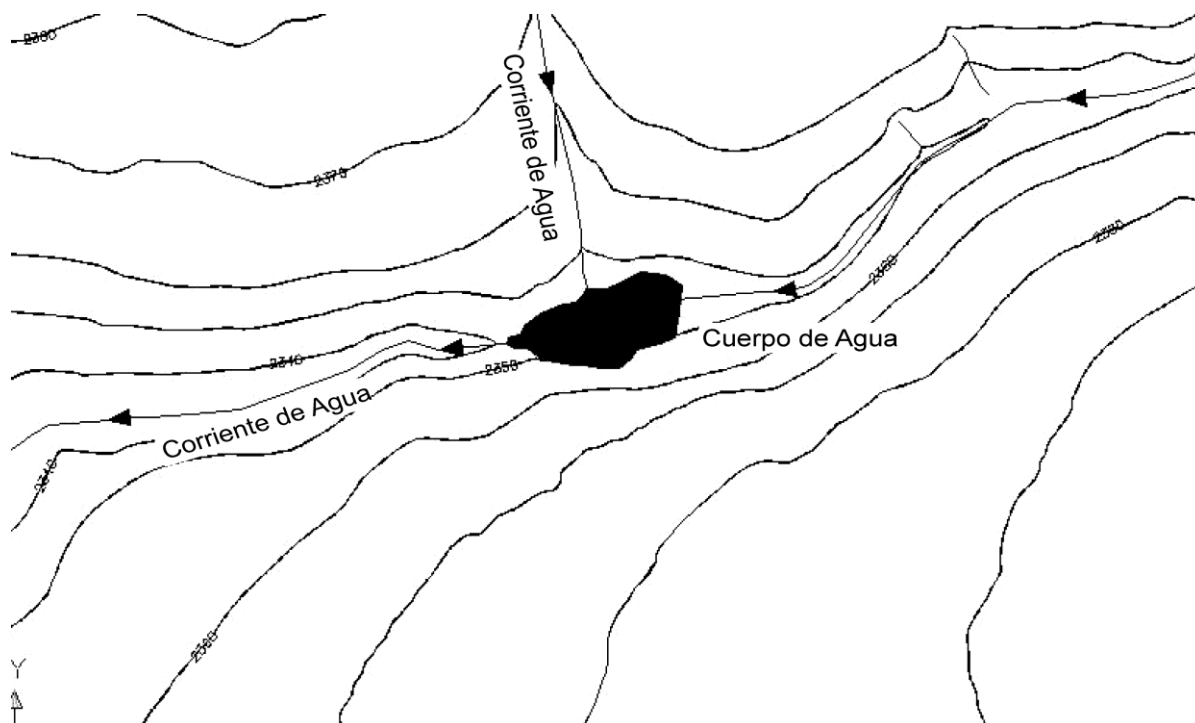


Figura 4.9. Extracción cartográfica de entidades hidrográficas.  
(Elaboración propia).

#### 4.3.2.3 Entidades de servicios e instalaciones.

Generalmente la representación de las entidades geográficas de instalaciones y servicios están referidas a todas aquellas obras de infraestructura en el terreno construidos por el hombre. En términos generales se subdividen de la siguiente forma:

##### 1. Infraestructura urbana:

- Calle: Vialidad definida para el tránsito vehicular o peatonal, en cartografía digital, este término se encuentra representado por una implantación lineal conocida como eje de calle.
- Edificación: Construcción permanente, que sirve para vivienda, usos culturales, de servicios, etc.

- Instalación de comunicación: Instalaciones empleadas en los medios de comunicación para la transmisión y/o recepción de ondas electromagnéticas.
- Instalación industrial: Área que contiene edificaciones e instalaciones destinadas para la actividad industrial.
- Lindero: Línea empleada para indicar las principales delimitaciones visibles en el terreno y que pueden coincidir, sin ningún carácter legal, con líneas que conforman propiedades, parcelas, instalaciones, manzanas, etc.
- Manzana: Área perfectamente delimitada que agrupa bienes raíces de acuerdo a la traza urbana.
- Puente: Estructura que permite el paso de una vía de comunicación terrestre o un canal sobre un obstáculo natural o artificial.
- Subestación eléctrica: Instalación para regular o modificar el voltaje en una red de suministro eléctrico.
- Túnel: Excavación subterránea, abierta artificialmente a través de un obstáculo, para dar paso a una vía de comunicación terrestre o a un acueducto.

La información incorporada al catalogo de datos para todos los elementos de infraestructura urbana, perteneciente a las entidades de servicios e instalaciones es la siguiente:

Entidad geográfica	Clase	Representación geométrica	Relación espacial	Atributos asociados	Fuente de extracción
Eje de calle	Servicios e instalaciones	Lineal	Conecta	Nombre propio y longitud	Extracción cartográfica
Edificación	Servicios e instalaciones	Areal	No necesaria	Identificador	Extracción cartográfica
Instalación de comunicación	Servicios e instalaciones	Areal	No necesaria	Identificador	Extracción cartográfica
Instalación industrial	Servicios e instalaciones	Areal	No necesaria	Identificador	Extracción cartográfica
Lindero	Servicios e instalaciones	Lineal	No necesaria	Identificador	Extracción cartográfica
Manzana	Servicios e instalaciones	Areal	No necesaria	Identificador	Extracción cartográfica
Puente	Servicios e instalaciones	Lineal	No necesaria	Identificador	Extracción cartográfica
Subestación eléctrica	Servicios e instalaciones	Areal	No necesaria	Identificador	Extracción cartográfica
Túnel	Servicios e instalaciones	Lineal	No necesaria	Identificador	Recopilación documental

Tabla 6. Estructura relacional correspondiente a entidades de infraestructura urbana, perteneciente a las entidades de servicios e instalaciones.  
(Elaboración propia).



Figura 4.10. Extracción cartográfica de entidades de infraestructura urbana, perteneciente a las entidades de servicios e instalaciones.  
(Elaboración propia).

## 2. Líneas de conducción.

- **Acueducto:** Conducto artificial empleado para transportar agua, dentro de sus relaciones espaciales, generalmente conecta con cuerpos de agua. En lo que respecta a su fuente de extracción, está estrechamente ligada a la escala del vuelo aerofotogramétricos, generalmente su extracción parte de recopilación cartográfica documental o medición en campo.
- **Canal:** Cauce artificial abierto empleado para irrigación, transporte de aguas residuales o conducción en sistemas de abastecimiento o en sistemas de generación de energía eléctrica.
- **Línea de comunicación:** Cable o cables empleados para la comunicación telefónica o telegráfica.
- **Línea de transmisión:** Conjunto de cables, generalmente aéreos, empleados para conducción de energía eléctrica.

La información incorporada al catalogo de datos para todos los elementos de líneas de conducción, perteneciente a las entidades de servicios e instalaciones es la siguiente:

Entidad geográfica	Clase	Representación geométrica	Relación espacial	Atributos asociados	Fuente de extracción
Acueducto	Servicios e instalaciones	Lineal	No necesaria	Identificador	Extracción cartográfica
Canal	Servicios e instalaciones	Lineal	No necesaria	Identificador	Extracción cartográfica
Línea de comunicación	Servicios e instalaciones	Lineal	No necesaria	Identificador	Extracción cartográfica
Línea de transmisión	Servicios e instalaciones	Lineal	No necesaria	Identificador	Extracción cartográfica

Tabla 7. Estructura relacional correspondiente a entidades lineales de conducción, perteneciente a las entidades de servicios e instalaciones.  
(Elaboración propia).

### 3. Vías de comunicación.

- Camino: Vía de comunicación terrestre a nivel del suelo, generada a base de desmonte o tránsito continuo.
- Carretera: Vía de comunicación terrestre cuya estructura consta de un terraplén, obre de arte y revestimiento, para tránsito de vehículos.
- Vía Férrea: Vía de comunicación terrestre, cuya estructura consta de un terraplén y dos rieles paralelos fijados mediante durmientes, para el tránsito de trenes.

La información incorporada al catalogo de datos para todos los elementos de pertenecientes a vías de comunicación, perteneciente a las entidades de servicios e instalaciones es la siguiente:

Entidad geográfica	Clase	Representación geométrica	Relación espacial	Atributos asociados	Fuente de extracción
Camino	Servicios e instalaciones	Lineal	No necesaria	Identificador	Extracción fotogramétrica
Carretera	Servicios e instalaciones	Lineal	No necesaria	Identificador y nombre propio	Extracción fotogramétrica
Vía Férrea	Servicios e instalaciones	Lineal	No necesaria	Identificador	Extracción fotogramétrica

Tabla 8. Estructura relacional correspondiente a entidades de vías de comunicación, perteneciente a las entidades de servicios e instalaciones.  
(Elaboración propia).

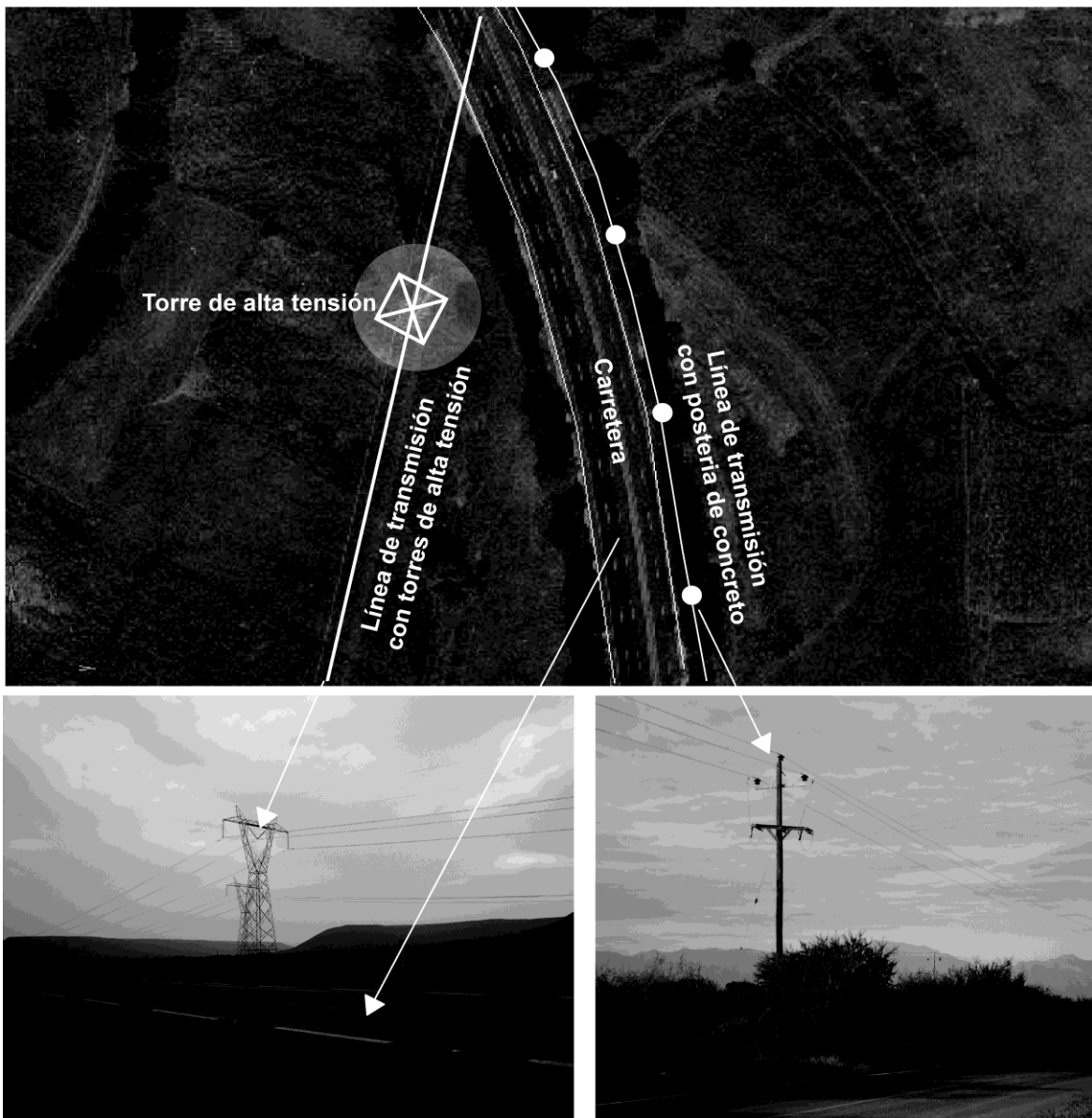


Figura 4.11. Extracción cartográfica de entidades lineales de conducción y vías de comunicación, perteneciente a las entidades de servicios e instalaciones.  
(Elaboración propia).

### 4.3.3 Descripción del proceso de abstracción cartográfica utilizada en este trabajo.

A lo largo de este trabajo se ha determinado que la cartografía desarrollada es una abstracción de la realidad a escala, que contiene información referida espacialmente, la cual se ve delimitada por los procesos de representación gráfica (comentado en el apartado 4.3.1.3) y clasificación de los elementos que la integran (comentado en el apartado 4.3.2), a este proceso de abstracción se denomina generalización cartográfica. Tradicionalmente el objetivo de la generalización es la producción de una imagen cartográfica legible y expresiva desarrollada a partir de fines específicos de un mapa.

Sergio Franco Maass y Ma. Eugenia Valdez (2003) comentan que la generalización cartográfica es el conjunto de operaciones de ajuste del contenido del mapa y su simbolización, como resultado de la competencia de espacio definido por el tamaño de papel y la escala. La generalización cartográfica depende de tres factores fundamentales:

1. Escala: esta responde a las preguntas ¿qué quiero representar? (superficie terrestre), ¿qué tamaño de papel? (mapa).
2. Sistema de símbolos: colores, tamaño y tipo de símbolos, legibilidad de la información representada.
3. Características del fenómeno: fenómenos físico-geográficos, socio-demográficos, medio ambientales, de observación, etcétera.

La generalización cartográfica está estrechamente relacionada con la legibilidad del mapa y ésta a su vez, varía con los cambios de escala, es decir, cuando la variación de los objetivos del mapa obliga al investigador a utilizar una escala diferente a la original, lo cual implica un cambio en las formas de representación, puesto que a una escala mayor o menor, no podría mantenerse la calidad y la legibilidad de la información (Montoya, J. W. y Florez, A. 1992).

El grado de generalización depende en gran medida de la experiencia y juicio del cartógrafo que permite la discriminación y combinación de las diversas formas de representación cartográfica que emplee, debido a esto, difícilmente se pueden establecer estándares de generalización.

Por lo anterior, la generalización en la representación geométrica y la clasificación de las entidades geográficas quedaron definidas en el desarrollo de la cartografía generada en este trabajo, pero no compete determinar algunos apartados como la determinación de una escala asociada a un tamaño de papel y una simbolización específica, ya que esto implica la impresión de la misma.

Dentro del planteamiento del problema de este trabajo para la generación de cartografía básica, se afirma que, puede ser utilizada como base para la elaboración de cartografía temática, la generación de sistemas de información geográfica e inclusive, para los modernos servidores de mapas por Internet.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

En términos generales, es importante enfatizar que la evolución tecnológica ha permitido alcanzar mejores resultados en la elaboración de cartografía básica digital y ha transformado los métodos técnicos operacionales, sin embargo, los fundamentos teóricos tradicionales y principalmente el intelecto humano, siguen siendo la base para saber representar las ideas cartográficas y brindar un buen entendimiento a los usuarios finales.

El proceso de generación cartográfica básica ha experimentado un mejoramiento permanente gracias a la utilización y optimización de los procedimientos y las tecnologías de la geomática. Por este motivo, habrá que valorar el uso de algunos procedimientos, tanto tradicionales como modernos que no permitan asegurar el mismo rendimiento en términos de calidad y cantidad, ya que pueden constituirse en elementos que limiten la eficacia para la generación de cartografía básica.

### **1. Levantamientos de información geográfica.**

En el capítulo 2 se presentó la descripción de los levantamientos de información geográfica, en donde se determinó la importancia de la adecuada medición de puntos de control frente a la era de la georreferenciación.

Independientemente de la actual precisión brindada por los levantamientos geodésicos diferenciales, existen ciertas unidades productoras de cartografía o sectores minoritarios que han mantenido su postura convencional, inclusive desconociendo el marco de referencia oficial para la República Mexicana, lo anterior limita las posibilidades de cotejar o integrar la información generada por estas unidades productoras a los sistemas cartográficos elaborados por algunos institutos geográficos estatales y el INEGI.

Por otra parte, son innumerables los casos de desconocimiento técnico acerca de los levantamientos diferenciales, una realidad nacional es que en sectores académicos y gubernamentales se piensa que el posicionamiento de información geográfica se puede obtener en forma autónoma con los comúnmente llamados navegadores y que nos se requiere de profesionales, ni técnicos especializados en los conceptos de materialización de sistemas de referencia precisos, tan solo se requiere la comprensión del manejo de coordenadas ya sea espaciales o bien, de una proyección cartográfica.

En lo que respecta a los levantamientos aerofotogramétricos muchos de los trabajos de planificación de los vuelos están restringidos a un reducido número de empresas privadas, que se encargan de la realización de los vuelos y que suelen abastecer a un elevado número de organismos y empresas clientes de sus servicios. El primer trabajo que deben realizar dichos organismos y empresas, debe ser el aplicar un control de calidad a los vuelos suministrados, de manera que se puedan detectar posibles deficiencias que afecten a posteriori a la cadena de procesos basados en las fotografías aéreas obtenidas del vuelo.



Por lo anterior, en estas empresas deben existir recursos humanos especializados para detectar estas problemáticas, ya que un problema habitual es que lo reducido de los propios plazos de ejecución de los proyectos, circunscribe esta etapa fundamental del control de calidad a un mero inventario de la información suministrada, sin entrar en los detalles técnicos de la ejecución del proyecto.

## **2. Procesos fotogramétricos.**

La Fotogrametría Digital se fundamenta a partir de una cadena de procesos que han homologado el rendimiento y precisión de la Fotogrametría Analítica, solo que, al igual que en muchos procesos alternos para generar cartografía, los tiempos de ejecución de los proyectos son muy cortos, lo que propicia una mayor ocurrencia de errores tolerables.

Esto ha abierto una ventana de discusión en donde algunos grupos conservadores comentan que nunca va ser igualado el método fotogramétrico tradicional, pero teóricamente es importante tener en cuenta que el cambio de la fotogrametría clásica analógica a la fotogrametría analítica no supuso ningún tipo de modificación en cuanto a principios ni resultados, consistiendo en una lógica evolución de los aspectos relacionados con la precisión y la productividad de los métodos fotogramétricos. La transición entre la Fotogrametría Analítica y la Fotogrametría Digital se presenta como la aplicación de unos procedimientos clásicos a una plataforma nueva, así todos los procesos fotogramétricos convencionales continúan aplicándose y se producen los mismos productos.

Lo que sí es un hecho incuestionable es, que la aparición de los sistemas enteramente digitales en fotogrametría, ha permitido rebajar los costos, los tiempos de ejecución y muchas veces la calidad de productos como MDE y ortofotografías, por lo que operativamente y bajo un mercado globalizado, no se justifica la utilización de alternativas tradicionales que modifiquen dichos costos y tiempo. Cabe recordar que el costo y tiempo de ejecución muchas veces son factores imprescindibles que determinan la ejecución de proyectos cartográficos.

## **3. Procesos cartográficos.**

Este proceso busca encontrar métodos sencillos en el procesamiento de información geográfica obtenida en los levantamientos de información geográfica y el procesamiento fotogramétrico, lo anterior solo es posible a partir de estándares bien definidos para la estructuración de la información (no estaría por demás la generación de manuales de procedimientos) y referidos exclusivamente a las situaciones más características en la detección y corrección de errores en la información geográfica para la generación de cartografía básica digital de calidad.

A nivel nacional, existe un órgano rector como el INEGI, el cual precisa las normas técnicas que estructuran y regulan la producción cartográfica tanto a pequeñas como a grandes escalas. En esta dirección, los organismos tanto públicos como

privados deben emitir junto a sus productos cartográficos los certificados que acrediten la calidad del material elaborado, con estimadores estadísticos definidos, de modo que todos los usuarios puedan corroborar lo establecido por los emisores y acreditar la calidad de sus levantamientos. A la vez, es necesario considerar que durante los últimos años esta estructuración ha permitido mantener una producción de cartografía básica digital eficiente e importante, cabe mencionar que en algunos años será obsoleta, ya que todavía se continúa trabajando en la búsqueda de metodologías de programación informática que permitan mejorar los actuales procedimientos técnicos.

La anterior postura se encuentra aunada al creciente desarrollo y profesionalización de las áreas de producción cartográfica en Ayuntamientos Municipales, Gobiernos Estatales y Secretarías de Gobierno a nivel nacional, que en apariencia pretenden dar herramientas cartográficas para la mitigación o toma de decisiones de sus problemáticas esenciales (catastro, seguridad pública, obras públicas, etc.) pero que algunas de ellas solo sirven a fines políticos, los cuales no necesariamente coinciden con las necesidades del área cartográfica.

Finalmente se comenta que es indispensable pensar que se requiere de recursos humanos altamente capacitados en los aspectos antes mencionados. Para satisfacer esta demanda de profesionales, las universidades nacionales que imparten carreras de Geografía y Geomática, deben de encontrarse a la vanguardia e incluir en sus planes de estudio un equilibrio teórico-práctico de este tema, como una alternativa para que sus egresados puedan incorporarse satisfactoriamente o exitosamente (elige uno solo de estos términos) al mercado laboral en este sector. Lo anterior, sin perder su esencia filosófica formativa y su universalidad geográfica, esto quiere decir que no se debe transformar al geógrafo en un técnico especializado en cartografía automatizada o en un especialista en la manipulación de programas computacionales gráficos, sino por el contrario, en un profesional que conoce los métodos, procesos y técnicas de la geomática, aplicados a la producción cartográfica y el análisis espacial.

Por otro lado, se considera que, se ha conseguido uno de los objetivos principales de este trabajo, el de divulgar algunas de las metodologías y técnicas empleadas dentro de los procesos cartográficos actuales, herramienta que muchos de nosotros utilizamos pero que, en pocas ocasiones somos conscientes de cuál es su importancia, sus problemas, ventajas y desventajas.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS.

### 1. Términos teóricos.

**ACERCAMIENTO SISTEMÁTICO:** Un acercamiento sistemático significa que un problema complejo es dividido en subproblemas más pequeños hasta que seamos capaces de resolver todos los subproblemas. Para implementar esta estrategia, los sistemas reales son abstraídos a sistemas modelos que son divididos en subsistemas. Si para cada subsistema la relación entre la entrada y la salida es conocida, habremos hallado la relación entre la entrada y la salida para el sistema completo.

**PRODUCTO:** Se refiere a los insumos generados a partir del procesamiento de información y que se pone a disposición para su utilización por cualquier proceso y/o usuario dentro de un sistema o flujo de trabajo.

**SISTEMA:** Un sistema es un conjunto ordenado de elementos cuyas propiedades se interrelacionan e interactúan de forma armónica entre sí. Estos conjuntos se denominan módulos. A su vez cada módulo puede ser un subsistema, dependiendo si sus propiedades son abiertas o cerradas.

**SISTEMA REAL:** Un sistema real es una entidad material formada por partes organizadas (componentes) que interactúan entre sí. Los sistemas reales intercambian con su entorno energía, información y, en la mayor parte de los casos, también materia. Una célula, un ser vivo, la Biosfera o la Tierra entera son ejemplos de sistemas naturales. El concepto se aplica también a sistemas humanos o sociales, como una sociedad entera, la administración de un estado, un ejército o una empresa.

Encontrar lo común a entidades muy diferentes. El esfuerzo por encontrar leyes generales del comportamiento de los sistemas reales es el que funda la Teoría de sistemas y, más en general, aquella tendencia de la investigación a la que se alude como pensamiento sistémico o Sistémica, en cuyo marco se encuentran campos de conocimiento, disciplinas y teorías.

Los sistemas reales pueden ser abiertos, cerrados o aislados, según que realicen o no intercambios con su entorno. Un sistema abierto es un sistema que recibe flujos (energía y materia) de su ambiente, cambiando o ajustando su comportamiento o su estado según las entradas que recibe. Los sistemas abiertos, por el hecho de recibir energía, pueden realizar el trabajo de mantener sus propias estructuras e incluso incrementar su contenido de información (mejorar su organización interna).

## 2. Términos para levantamientos de información geográfica.

**ACIMUT:** Es el ángulo que forma una línea con la dirección norte-sur medido de 0° a 360° a partir del norte en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj.

**BASE EN EL AIRE:** Distancia entre dos exposiciones o puntos de toma de dos fotografías consecutivas que corresponden a la relación de sobreposición u % del vuelo.

**CIGNET (Cooperative International GPS Network):** Red de estaciones permanentes, cuyo objetivo es el control de los satélites de la constelación NAVSTAR, bajo la dirección del National Geodetic Survey (EEUU). Encargado de proporcionar efemérides precisas a los usuarios civiles.

**CÓDIGO C/A O S:** Código C/A (Course/Acquisition) o también denominado S (standard), de fácil acceso o de clara adquisición, es el de menor frecuencia, ya que utiliza solo la fundamental dividida por 10, es decir, 1,023 MHz. En principio es el que ofrece menos precisiones y se utiliza en el llamado SPS (Standard Positioning Service), para uso civil, Se transmite sobre la portadora L1.

**CÓDIGO P:** El código P (Precise), genera un código P único y se transmite directamente a la frecuencia fundamental, ofrece mayor precisión y se utiliza en el denominado posicionamiento preciso (PPS). Se transmite sobre la portadora L1 y L2.

**COTA:** Cifra que representa la altitud de un punto con respecto a la superficie de nivel de referencia.

**EFEECTO DOPPLER:** Este efecto consiste en un desplazamiento de las longitudes de onda hacia la banda roja del espectro electromagnético cuando el objeto se aleja, y hacia la banda azul cuando se acerca. Es decir que la frecuencia aumenta si el objeto se aleja y disminuye si se acerca, para un observador esto se traduce en que la frecuencia transmitida por el satélite, no es la recibida por el receptor.

**EFEMERIDES:** Las efemérides son el conjunto de posiciones de los cuerpos celestes calculadas para diferentes instantes separados uniformemente en el tiempo. En la aplicación es la base informativa con que debe de ser alimentado nuestro receptor para cualquier trabajo que contenga los estándares nacionales de exactitud.

**LÍNEA DE VUELO:** Es la línea que sigue la aeronave en el momento de la toma aerofotográfica y teóricamente viene dado por un rumbo fijo, que debe seguir la nave. En la práctica esta línea se determina uniendo el punto principal y el punto principal transferido en una sola aerofoto.

L1: Portadora situada en la banda L de emisiones electromagnéticas, es la señal primaria radiada desde los satélites de la constelación NAVSTAR, con una frecuencia de 1575,42 Mhz. Sobre ella se modulan los códigos C/A y P, además del mensaje de navegación. Los receptores capaces de captar solamente esta frecuencia se denominan monofrecuencia.

L2: Portadora situada en la banda L de emisiones electromagnéticas, es la señal secundaria radiada desde los satélites de la constelación NAVSTAR, con una frecuencia de 1227,60 MHz. Sobre ella se modula el código P, La portadora L2 permite eliminar el retardo ionosférico producido en la señal. Los receptores capaces de captar esta frecuencia, más la L1 se denominan bifrecuencia.

POSICIONAMIENTO AUTONOMO: Modalidad por medio de la cual un receptor GPS calcula puntos fijos de posición únicamente a partir de información de los satélites.

PORTADORA: Frecuencia que puede variarse de una referencia conocida mediante modulación.

POST-PROCESO: Se refiere a los trabajos realizados en gabinete, tales como la recopilación e incorporación de datos anteriores (efemérides) de los puntos a trabajar, así como los cálculos y correcciones necesarias.

PSEUDODISTANCIAS: El método de las pseudodistancias es exclusivo de la técnica G.P.S. Se trata de una multilateralización tridimensional que sitúa la estación en la intersección de unas esferas con centro en el satélite y radio de la distancia correspondiente. Este sistema se emplea en navegación y permite el posicionamiento continuo en tiempo real. La pseudodistancia es el resultado de multiplicar la velocidad de la luz por el desplazamiento temporal necesario para alinear una réplica del código G.P.S. generado en el receptor, con la señal procedente del satélite G.P.S.

TAQUIMETRIA. Levantamiento topográfico que determina de forma simultánea las coordenadas X, Y, Z de puntos sobre la superficie del terreno.

### **3. Términos para los procesos cartográficos y fotogramétricos.**

ACOMODACIÓN-CONVERGENCIA: A la acción de transmitir los puntos de un objeto muy lejano o cercano, nítidamente sobre la retina, se conoce con el nombre de acomodación. A la acción de dirigir la visual de cada ojo hacia un mismo punto, se le llama convergencia. La acomodación convergencia se puede ejecutar desde una distancia del ojo al objeto de 25 cm., hasta el infinito.

ATRIBUTO: Es una característica que califica y describe un aspecto de una entidad. El número de atributos asociados con cada entidad es variable. Los diccionarios relacionan los atributos de cada entidad. Por ejemplo, los atributos para un punto de altura sería el valor en Z que representa.

**CONSULTAS SQL:** Es una herramienta informática desarrollada para extraer información de archivos digitales y bases de datos. En software cartográfico estas consultas son posibles a través de la geometría de las entidades geográficas o sus datos asociados.

**EJE ÓPTICO:** Se llama así, a la línea recta que pasa a través de los centros de curvas de las superficies de los lentes o sistemas de lentes.

**ENTIDAD GEOGRÁFICA BÁSICA:** Una entidad geográfica básica es un elemento perteneciente al terreno natural o artificial distinguible de lo que le rodea, acerca de la cual se requiere información. Para propósitos específicos, una entidad es la representación digital del componente descriptivo de un rasgo geográfico. Se le asocia un nombre con el fin de distinguirla de otras entidades (ejemplos: carretera, construcción, línea de transmisión, eje estructural, área agrícola, etc.). Además cada entidad presenta varias características como: atributo, valor de atributo, ocurrencia de la entidad e identificador (atributo que permite distinguir las diferentes ocurrencias)

**ESTRUCTURA DE DATOS PARA MDE:** Se refiere a la unidad básica de información en un modelo digital de elevaciones es un punto acotado, definido por una terna compuesta por un valor de la altitud (Z) al que acompañan los correspondientes valores de X,Y. Las variantes a parecen cuando estos datos elementales se organizan en estructuras que representan las relaciones espaciales y topológicas. Las estructura de datos en los MDE se han dividido históricamente en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: raster y vectorial.

**ESTRUCTURA RASTER:** Las estructuras raster se basan en la representación del terreno por medio de estructuras matriciales regulares y constantes. Dentro de este grupo se pueden distinguir las matrices regulares y las matrices de resolución variable.

La estructura matricial regular es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda, asociando dicho valor al punto medio de la misma. La retícula adopta normalmente la forma de una red regular de malla cuadrada. En esta estructura la localización espacial de cada dato está determinada de forma implícita por su situación en la matriz, una vez definido el origen y el valor del intervalo entre filas y columnas. Las matrices irregulares intentan solucionar uno de los principales problemas que tienen las matrices vistas anteriormente. Las matrices regulares emplean una cantidad de información constante por unidad de superficie, independientemente de la complejidad de la superficie a describir. En las matrices irregulares se intenta el agrupamiento jerárquico de las unidades elementales con el objeto de disminuir el número de elementos en las zonas de menor complejidad (aumentando el tamaño de los elementos) y aumentar el número de elementos en las zonas más complejas. El resultado final son matrices imbricadas jerárquicamente que permiten variar la resolución espacial, conocidas bajo el nombre de quadtree.

**ESTRUCTURA VECTORIAL:** Se basa en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos, los cuales representan a los puntos que concentran la información de las coordenadas x,y, z.

**FOCO:** Se entiende por foco, al punto de convergencia de los rayos luminosos que forman la imagen después de atravesar el sistema de lente, tiene la propiedad de que cualquier rayo que en él se origine o que hacia él se dirige se propaga paralelo al eje después de refractarse. Algunos autores le denominan como foco objeto.

**FOTODETECTOR:** Se refiere a un sensor que realiza una medición del valor proporcional a la transparencia o a la reflectancia de la fotografía. La señal electrónica es posteriormente convertida a un valor numérico por un circuito electrónico, que generalmente proporcione una señal de 8 bits. Por lo tanto, la transparencia de una diapositiva se mide en 256 tonos de gris, cifre que puede parecer muy fina, aunque el problema es que el ojo humano no es sensible a la transparencia, sino a la densidad.

**F/STOP:** Es una medida de la apertura de la lente. Un cambio en “un f-stop” implica doblar o dividir por la mitad la exposición. El número “f/8” significa distancia focal /8. Cuanto mayor es el número f-stop, menor es la apertura. También se aplica como medida del rango dinámico de una imagen. En este caso los f-stop hacen referencia a la capacidad de la imagen de diferenciar tonos desde el blanco hasta el negro. Cada nivel de f-stop representa un aumento en la densidad de la imagen de 0,3.

**MODELO DE DATOS VECTORIAL:** se refiere a un modelo de datos basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos, estos se pueden representar mediante puntos, líneas y polígonos con sus respectivos atributos.

**MODELO DE DATOS RASTER:** se refiere a un modelo de datos basado en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se les asigna el valor de la variable por la unidad elemental de superficie del terreno, con una distribución regular, sin solapamiento o traslape y con recubrimiento total del área representada. A estas unidades se les denomina “celdas”, y en términos utilizados en el procesamiento de imágenes digitales “píxeles”.

**ORTOPROYECCIÓN:** Se conoce así al método fotogramétrico de obtener fotomapas precisos, corregidos de las deformaciones producidas en la imagen fotográfica por el relieve y la inclinación de la fotografía, mediante la rectificación diferencial de la fotografía original.

**RESTITUCIÓN FOTOGAMÉTRICA:** Se denomina como restitución fotogramétrica al proceso de obtención de información métrica (por medios estereoscópicos) de puntos del terreno mediante los desplazamientos y posterior registro, de los movimientos de un índice móvil o marca flotante, en un determinado modelo estereoscópico, formado mediante fotogramas que contienen ambas las proyecciones de puntos del terreno a levantar.

ROAM ESTEREO: Es la posibilidad de gestión que tiene un DPWS para interactuar de forma 2D y 3D a través de instrucciones informáticas.

SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS DIGITALES: Las primeras definiciones de Sistemas Fotogramétricos Digitales (*Digital Photogrammetric Systems -DPS-*) y de Estaciones Fotogramétricas Digitales (*Digital Photogrammetric Workstation -DPWS-*) datan de principios de la década de los 80 (Sarjakoski, 1981; Case, 1982). En 1988, el grupo de trabajo II/III (Sistemas para el Procesamiento y Análisis de Datos) de la Asociación Internacional de Fotogrametría y Teledetección (ISPRS) define un Sistema Fotogramétrico Digital como *el conjunto de hardware y software cuyo objetivo es la generación de productos fotogramétricos a partir de imágenes digitales mediante técnicas manuales y automatizadas.*

El sistema fotogramétrico digital incluye todos los elementos necesarios tanto a nivel de software como de hardware para obtener los productos fotogramétricos a partir de las imágenes digitales, incluyendo también sistemas de captura de imágenes (interfaces de conexión con cámaras digitales o sistemas digitalización de imágenes en formato analógico -escáner-) así como sistemas de impresión final (filmadoras, trazadores gráficos, impresoras de imágenes, <). El elemento fundamental del sistema fotogramétrico digital es la estación fotogramétrica digital -*Digital Photogrammetric Workstation*- (conocido también como restituidor digital, si bien este nombre no es adecuado puesto que sólo hace referencia a una de las tareas de la estación, el proceso de restitución).

VÉRTICES: Los puntos que definen una línea son los vértices. Un vértice o una sucesión de vértices definen un elemento o entidad, tales como los extremos de un segmento de línea, o el nodo de un polígono donde el segmento de línea cambia de dirección.

#### **4. Términos de Percepción Remota.**

DISTANCIOMETRÍA ELECTRÓNICA: Método por el cual, un levantamiento de datos del terreno, se ejecuta por medio de instrumentos electrónicos y se basa en el tiempo que requiere la energía electromagnética para viajar de sensor a un reflector.

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO: Podemos definir totalmente cualquier tipo de energía dando su longitud de onda (o frecuencia). El espectro electromagnético es la sucesión continua de esos valores de frecuencia, aunque conceptualmente se divide en bandas, en las que la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar.

Desde el punto de vista de la teledetección destacan una serie de bandas como las más utilizadas dada la tecnología actual. Estas bandas se resumen a continuación:



- Espectro visible (0.4 - 0.7 mm.). Es la única radiación electromagnética perceptible por el ojo humano (de ahí su nombre). Coincide con la longitud de onda donde es máxima la radiación solar. Podemos localizar los distintos colores en las longitudes: Azul: 0.4 - 0.5 mm., Verde: 0.5 - 0.6 mm., Rojo: 0.6 - 0.7 mm.
- Infrarrojo próximo (0.7 - 1.3 mm.). Banda importante para diferenciar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1.3 - 8 mm.). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie terrestre, por lo que hay muchas dificultades.
- Infrarrojo lejano o térmico (8 - 14 mm.). Es la región del espectro en la que emiten energía todos los cuerpos de la superficie terrestre.
- Microondas (desde 1 mm.). Tiene la propiedad de ser transparente a la cubierta nubosa, pero también de llevar asociada muy poca energía. Por eso, si se quiere usar esta banda tendrá que ser haciendo teledetección activa.

LUX: Es la [unidad derivada del Sistema Internacional](#) de Unidades, para medir rangos de incidencia de la luz sobre una superficie o nivel de [iluminación](#).

NIVEL DIGITAL (ND): Se refiere al valor numérico, no visual, que se integra a un pixel, el cual puede asimilar los valores de información para lo que fue constituido, por ejemplo: determinado valor en un nivel de escala de grises, etc.

PIXEL: Unidad mínima elemental percibida en una imagen digital, sobre la que se registra la radiación procedente del área del campo de visión instantánea. También se denomina así a la unidad mínima de información que se puede identificar en una imagen Raster.

RESOLUCIÓN ESPECTRAL: Se refiere al número de bandas y a la anchura espectral de esas bandas que un sensor puede detectar. P.ej. la banda 1 del TM recoge la energía entre 0.45 y 0.52 mm. Es una resolución espectral más fina que la de la banda pancromática del SPOT, que está entre 0.51 y 0.73 mm.

RESOLUCIÓN ESPACIAL: Es una medida del objeto más pequeño que puede ser resuelto por el sensor, o el área en la superficie que recoge cada píxel.

RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA: Se refiere al rango dinámico, o número de posibles valores que puede tomar cada dato. P.ej. con 8 bits, el rango de valores va de 0 a 255.

RESOLUCIÓN TEMPORAL: Se refiere a cada cuanto tiempo recoge el sensor una imagen de un área particular. P.ej. el satélite Landsat puede ver la misma área del globo cada 16 días.

**TELEDETECCIÓN:** El término teledetección es una traducción del inglés 'remote sensing', y se refiere no sólo a la captación de datos desde el aire o desde el espacio sino también a su posterior tratamiento. Una definición más formal la describe como la técnica de adquisición y posterior tratamiento de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, en virtud de la interacción electromagnética existente entre la tierra y el sensor, siendo la fuente de radiación bien proveniente del sol (teledetección pasiva) o del propio sensor (teledetección activa).

## 5. Términos Informáticos.

**AUTOMÁTICO:** Es aquello perteneciente o relativo al autómeta. Este término proviene del griego *automatos* que significa "con movimiento propio" o "espontáneo". Por lo tanto, la noción de automático puede hacer referencia a distintas cuestiones. Un mecanismo automático funciona por sí solo, y en toda su totalidad.

**BIT:** Dígito en el sistema binario de numeración, proviene de la contracción de binary digit. Al tratarse de un dígito en el sistema binario sólo puede tener dos valores: 0 y 1.

**BYTE:** Conjunto de 8 bits en el sistema binario de numeración, un *byte* puede almacenar un número entero entre 0 (00000000) y 256 (28: 11111111); el término es equivalente a octeto (ocasionalmente se habla de *byte* para un número diferente de bits).

**SISTEMA OPERATIVO:** Un Sistema Operativo es el [software](#) encargado de ejercer el [control](#) y coordinar el uso del hardware entre diferentes [programas](#) de aplicación y los diferentes usuarios. Es un [administrador](#) de los recursos de hardware y software del sistema. Un Sistema Operativo es una parte importante de cualquier sistema de computación. Un sistema de computación puede dividirse en cuatro componentes: el hardware, el Sistema Operativo, los programas (software) de aplicación y los usuarios.

El hardware (Unidad Central de Procesamiento (UCP), memoria y [dispositivos de entrada/salida](#) (E/S)) proporciona los recursos de computación básicos. Los programas de aplicación (compiladores, sistemas de [bases de datos](#), [juegos](#) de vídeo y programas para [negocios](#)) definen la forma en que estos recursos se emplean para resolver los problemas de computación de los usuarios.

**TCP/IP:** Se refiere a un conjunto de [protocolos de red](#) en la que se basa [Internet](#) y que permiten la transmisión de datos entre redes de [computadoras](#). En ocasiones se le denomina conjunto de protocolos TCP/IP, en referencia a los dos protocolos más importantes que la componen: [Protocolo de Control de Transmisión](#) (TCP) y [Protocolo de Internet](#) (IP), que fueron los dos primeros en definirse, y que son los más utilizados. Existen tantos protocolos en este conjunto que llegan a ser más de 100 diferentes, entre ellos se encuentra el popular [HTTP](#) (HyperText Transfer Protocol), que es el que se utiliza para acceder a las páginas web, además de

otros como el [ARP](#) (Address Resolution Protocol) para la resolución de direcciones, el [FTP](#) (File Transfer Protocol) para transferencia de archivos, y el [SMTP](#) (Simple Mail Transfer Protocol) y el [POP](#) (Post Office Protocol) para [correo electrónico](#), [TELNET](#) para acceder a equipos remotos, entre otros.

El TCP/IP es la base de Internet, y sirve para enlazar [computadoras](#) que utilizan diferentes [sistemas operativos](#), incluyendo PC, minicomputadoras y computadoras centrales sobre redes de área local (LAN) y área extensa (WAN). TCP/IP fue desarrollado y demostrado por primera vez en [1972](#) por el [Departamento de Defensa](#) de los [Estados Unidos](#), ejecutándolo en [ARPANET](#), una red de área extensa de dicho departamento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Bomford, Guy . Geodesy . 4th edición. USA. Clarendon Press, 1980

Caire, Lomeli Jorge 2002. Cartografía Básica. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México.

Chuvienco, Emilio. 1995. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp. Madrid.

Delgado García, Jorge. Fotogrametría Digital, instrumentos, métodos, productos y aplicaciones, Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén, España. 2002.

Domínguez, Bravo Javier. 2000. Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid.

Domínguez García Tejero, Francisco. Topografía general y aplicada, Madrid, 1993.

Franco Rey, Jorge. Nociones de Geodesia y GPS, España, 2001.

Franco Maass, Sergio y Valdez, Ma. Eugenia. Principios básicos de Cartografía y Cartografía Automatizada. Universidad Autónoma del Estado de México. 2003.

INEGI. Cartografía, Fotografía Aérea, Topografía y Geodesia. Desarrollada para el apoyo bibliográfico del PROCEDE (1994),

INEGI. Estándares de exactitud posicional (Versión 3.0). Dirección General de Geografía. Coordinación de Geodesia. México, 2007.

INEGI. Manual de actualización para los elementos geográficos de la carta topográfica escala 1:50,000. Dirección General de Geografía. México, Marzo, 2002.

INEGI. Manual de conceptos básicos. Dirección General de Geografía. México, Enero, 2005.

INEGI. Modelo Geoidal en México y sus aplicaciones. Dirección General de Geografía. México, Marzo, 2006.

INEGI. Sistema Geodésico Nacional (Versión 1.4), Dirección General de Geografía. México, 2007.

Intergraph (España), Manuales de Operación de los módulos de Z/I imaging (2004).

Jáuregui, Ernesto. 1968. Mapas y planos contemporáneos de México. Instituto de Investigaciones Sociales. UNAM.

Langley, Richard. 1996. GLONASS: Revisión y actualización. Revista cartográfica No. 65, julio-diciembre 1996.

Lerch, Federico Alonso 1986. Apuntes de Cartografía. División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica. UNAM. Págs. 1-6.

Mackern, Oberti María Virginia. "Materialización de un Sistema de Referencia Geocéntrico de alta precisión mediante observaciones GPS". Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Catamarca; Argentina. 2003.

MENA, J. 1992. "Cartografía Digital". Desarrollo de un software interno. Madrid.

Mohamed Mostafa, Joe Hutton y Blake Reid. 2001. GPS/IMU products-the Applanix approach. Heidelberg 2001.

Núñez Rodríguez, Gilberto. Importancia de la aplicación de la Geomática para el ordenamiento territorial en México. Tesis para obtener el grado de Maestro en Geografía; México, 2003.

Núñez A. y M. J. Sevilla 1998. Ajuste y análisis estadístico de ondulaciones del geoide obtenidas por métodos astrogeodésicos. Instituto de Astronomía y Geodesia. Facultad de Ciencias Matemáticas. Universidad Complutense, Madrid.

Ortiz, G. (2003): Un algoritmo para la creación de polígonos a partir de estructuras de líneas sin topología. Mapping. Nº 89. pp 28-36

Pérez Álvarez, Juan Antonio. Apuntes de Fotogrametría II. Universidad de Extremadura. España. Septiembre de 2001.

Pérez López, César. Domine Microsoft Windows 2000 Profesional, Madrid, España, 2001.

Robinson, Arthur / Randall, Sale. 1975. Elements of Cartography. Department of Geography, University of Wisconsin. Madison Wisconsin.

Santos Pérez, Luis Julián Cámaras fotogramétricas aéreas digitales: ventajas e inconvenientes. Influencias en la ejecución de cartografía catastral Ingeniero Técnico en Topografía, Ingeniero en Geodesia y Cartografía. Dirección General del Catastro, julio 2006.

Soler, Tomas. 1996. Redes Geodésicas de Gran exactitud en México. Revista cartográfica No. 65, julio-diciembre 1996.

## REFERENCIAS DE PÁGINAS WEB ELECTRÓNICAS CONSULTADAS.

Adams Consulting, Sistemas de Información Geográficos. Conceptos Básicos, aplicación petrolera, rasterización y vectorización.

URL: <http://www.adams-consulting.net/info.html>

ESRI: GIS & MAPPING SOFTWARE. Productos y software para SIG.

URL: [www.esri.com](http://www.esri.com)

Geotecnologías s.a. La tecnología ESRI en SIG para diferentes aplicaciones.

URL: [www.geotecnologias.com/esri/index.htm](http://www.geotecnologias.com/esri/index.htm)

Autodesk. Solución SIG y publicación en el WEB.

URL: [www.autodesk.es/sitos.nsf/alldoc/productos?OpenDocument](http://www.autodesk.es/sitos.nsf/alldoc/productos?OpenDocument)

[www.intergaph.com/spain](http://www.intergaph.com/spain).

[www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)

[www.mapserver.inegi.gob.mx](http://www.mapserver.inegi.gob.mx)

[www.sokkia.com](http://www.sokkia.com).

[www.trimble.com](http://www.trimble.com)

[www.ziimaging.com](http://www.ziimaging.com)