

FOTOGRAMETRIA DIGITAL

Técnica que permite determinar la forma, dimensiones y posición de un objeto en el espacio

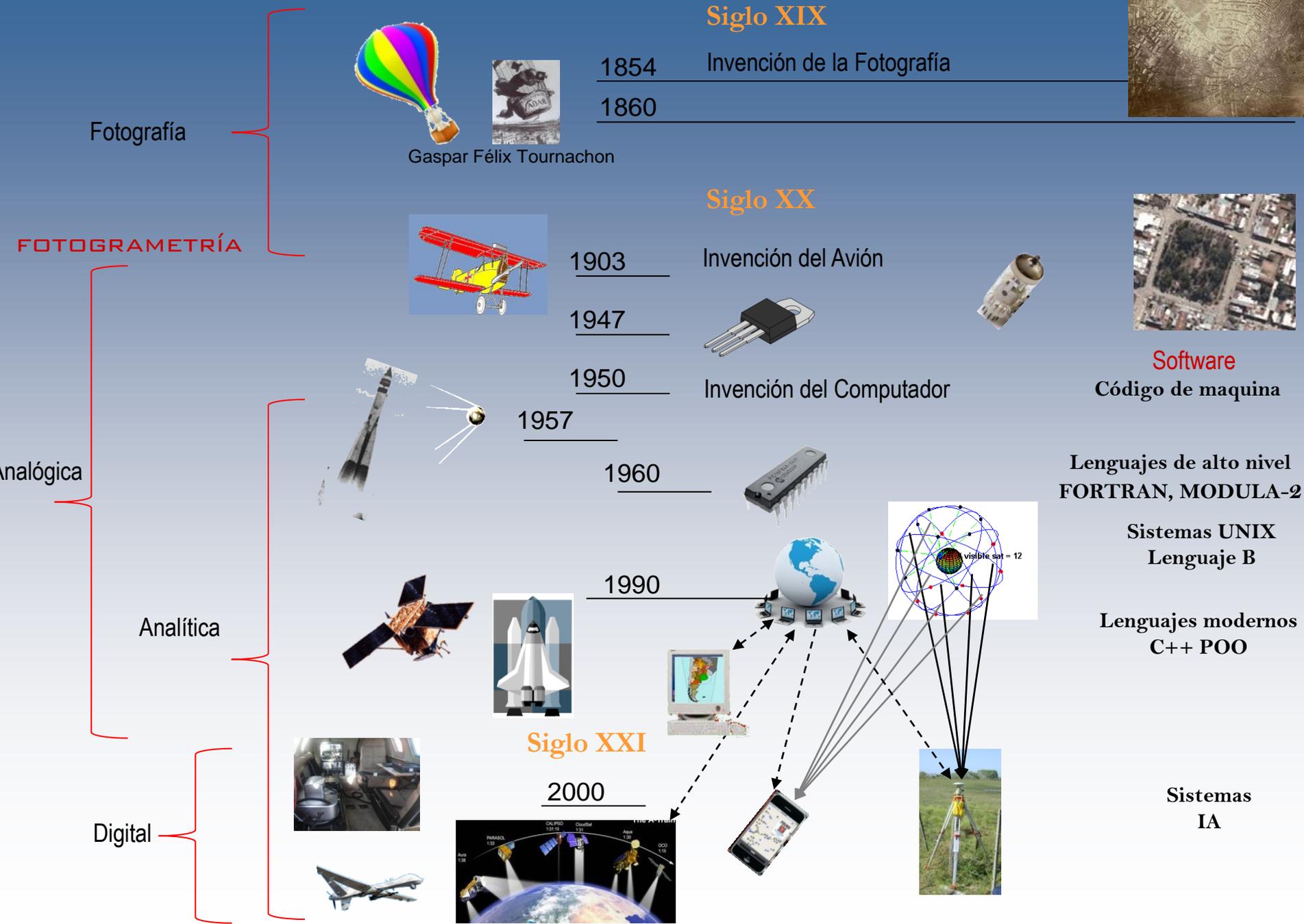
FUNDAMENTOS

GEOMETRÍA DE LA PROYECCIÓN CENTRAL

UTILIZACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE FOTOINTERPRETACIÓN

RESTITUCIÓN A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS DIGITALES DE CARACTERÍSTICAS MÉTRICAS

LOS ADELANTOS TECNOLOGICOS y LA FOTOGRAMETRIA



Objeto principal de la fotogrametría digital

GENERACIÓN DE MODELOS TRIDIMENSIONALES DEL TERRENO O DE UN OBJETO

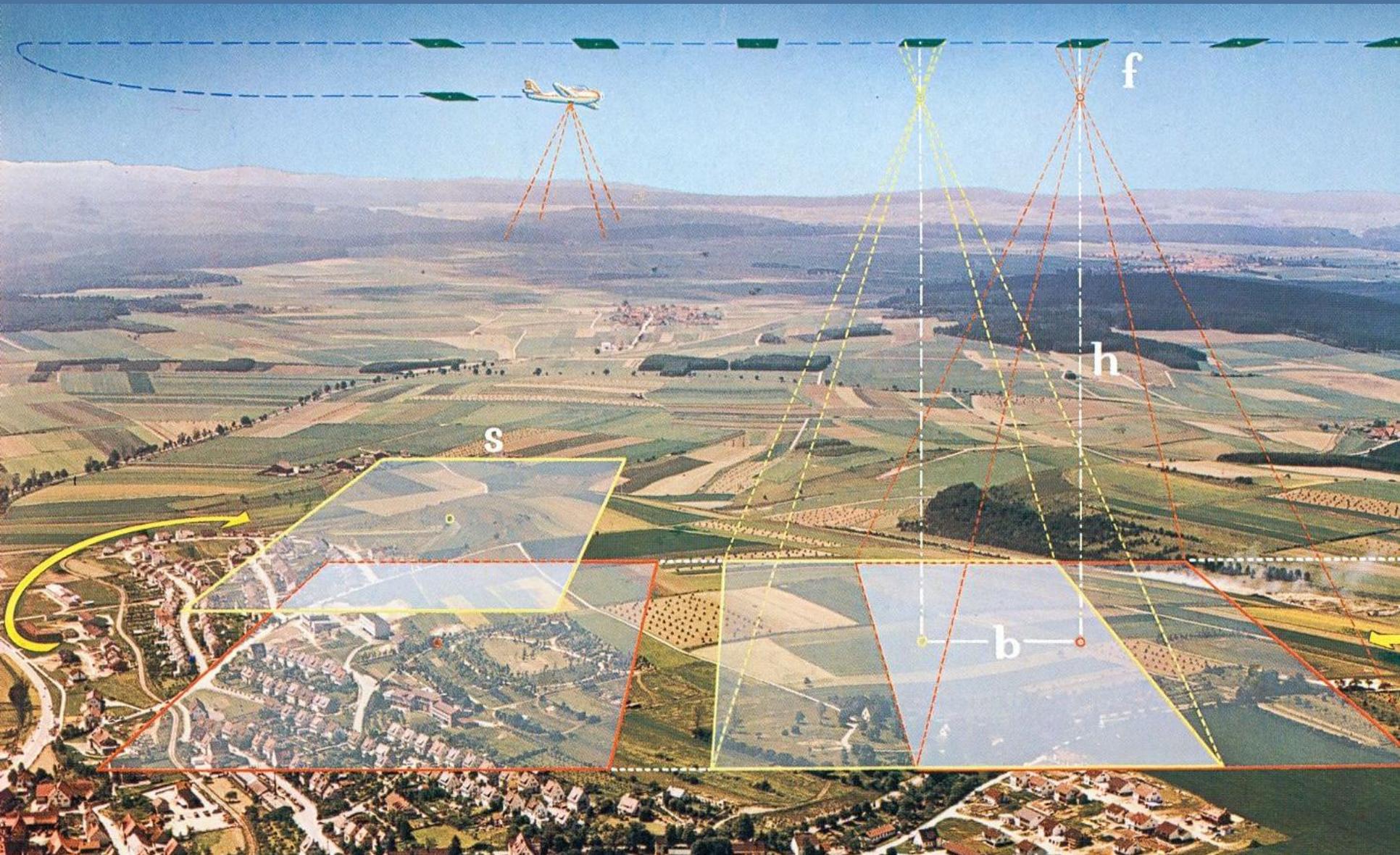
Este procedimiento consta de tres fases similares a la fotogrametría analógica

Sobre el objeto a representar se determinan puntos de control

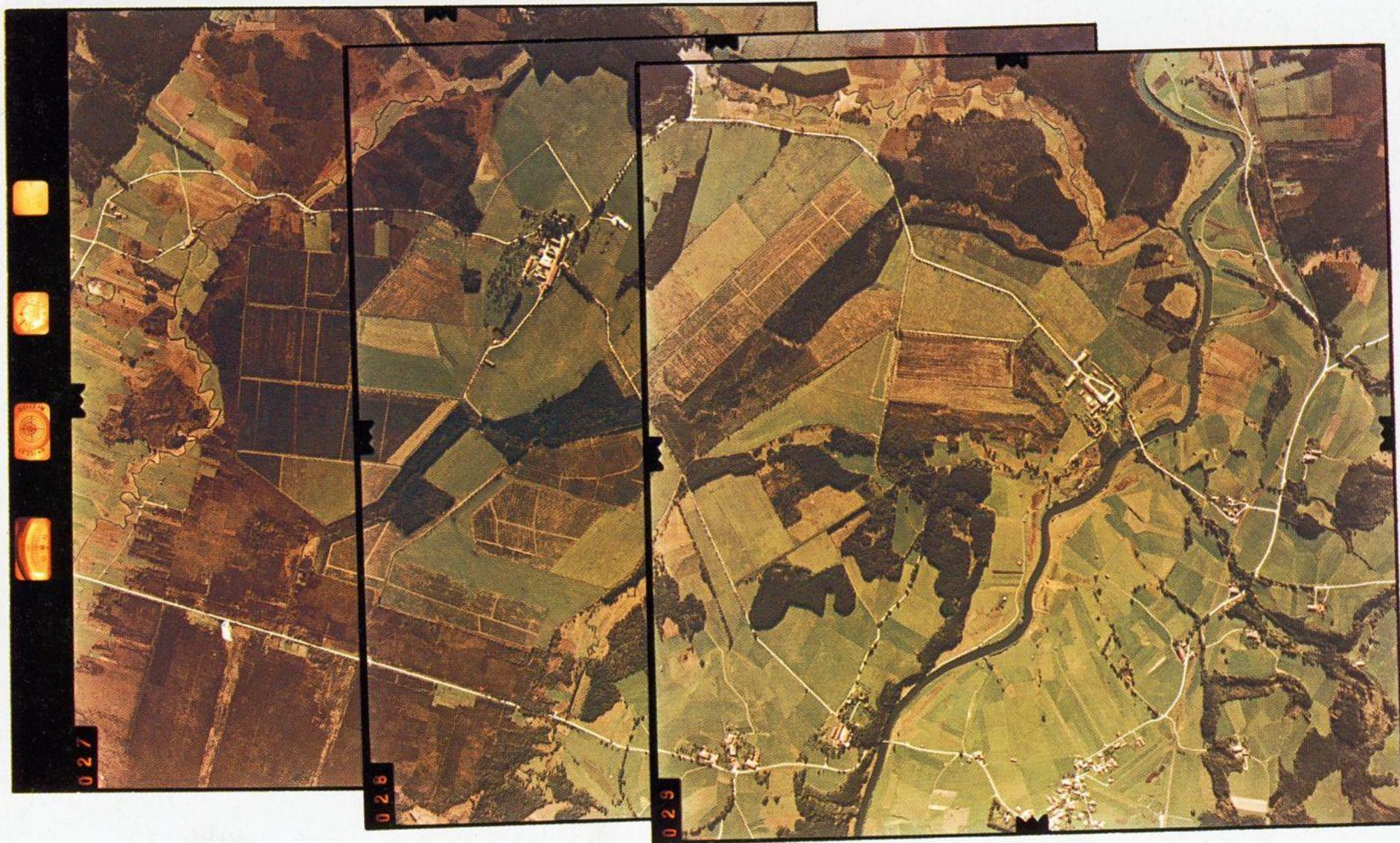
Medición de coordenadas imagen

Transformación de las coordenadas Modelo a un sistema de coordenadas espacial arbitrario o geoespacial (terreno)

Vuelo fotogramétrico



A partir de una serie de imágenes de un objeto estacionario referido a un sistema de coordenadas, la visión de las imágenes desde distintos puntos de vista posibilita *la construcción de un Modelo Espacial*, y *la determinación de sus propiedades tridimensionales*.



Restitución fotogramétrica

Método para obtener y registrar las coordenadas de un determinado objeto a través de mediciones realizadas sobre fotografías

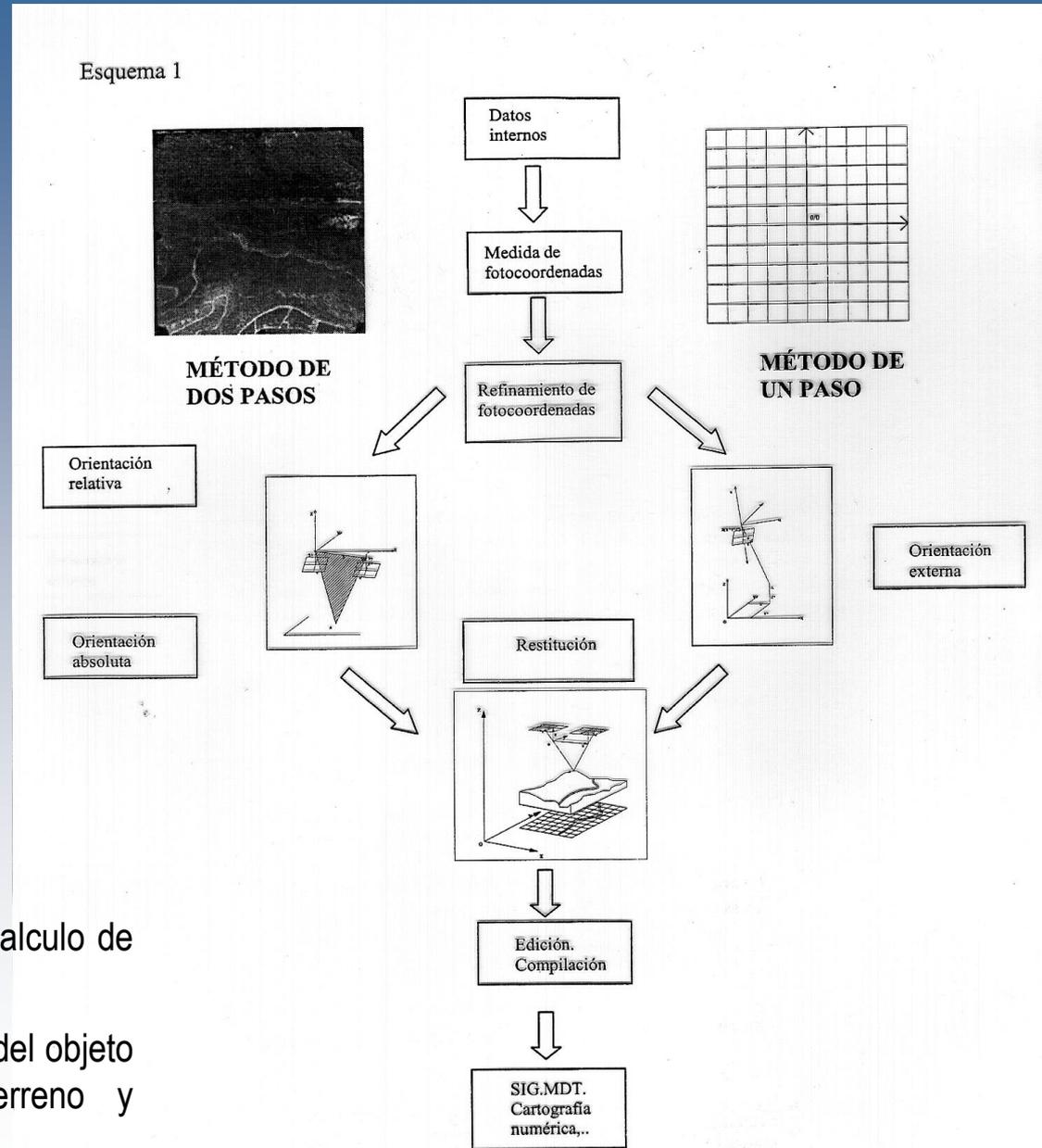
Fundamento: intersección de haces perspectivos y las relaciones espaciales entre puntos del Modelo reconstruido

Restitución analógica: reconstrucción de la forma y posición en el espacio de los haces perspectivos, los rayos homólogos forman el Modelo.

Restitución analítica: procedimientos matemáticos reproducen el Modelo sin materializarlo físicamente mediante una analogía mecánica óptica

Método de dos pasos: Orientación Relativa, cálculo de coordenadas Modelo, Orientación Absoluta

Método de un paso: obtiene las coordenadas del objeto relacionando directamente coordenadas terreno y fotocoordenadas



Geometría del Modelo espacial

La posición relativa de los fotogramas depende en principio de 9 parámetros: b_x , b_y , b_z , ω_1 , ϕ_1 , κ_1 , ω_2 , ϕ_2 , κ_2

La orientación relativa se puede realizar analógicamente mediante una serie de movimientos para lograr la intersección de los rayos homólogos o analíticamente fijando cuatro de los nueve parámetros y calculando los cinco parámetros variables mediante el método de los mínimos cuadrados

Puntos homólogos 5

Parámetros fijos: $\omega_1 = 0$, $\phi_1 = 0$, $\kappa_1 = 0$, $b_x = 100$ (valor arbitrario)

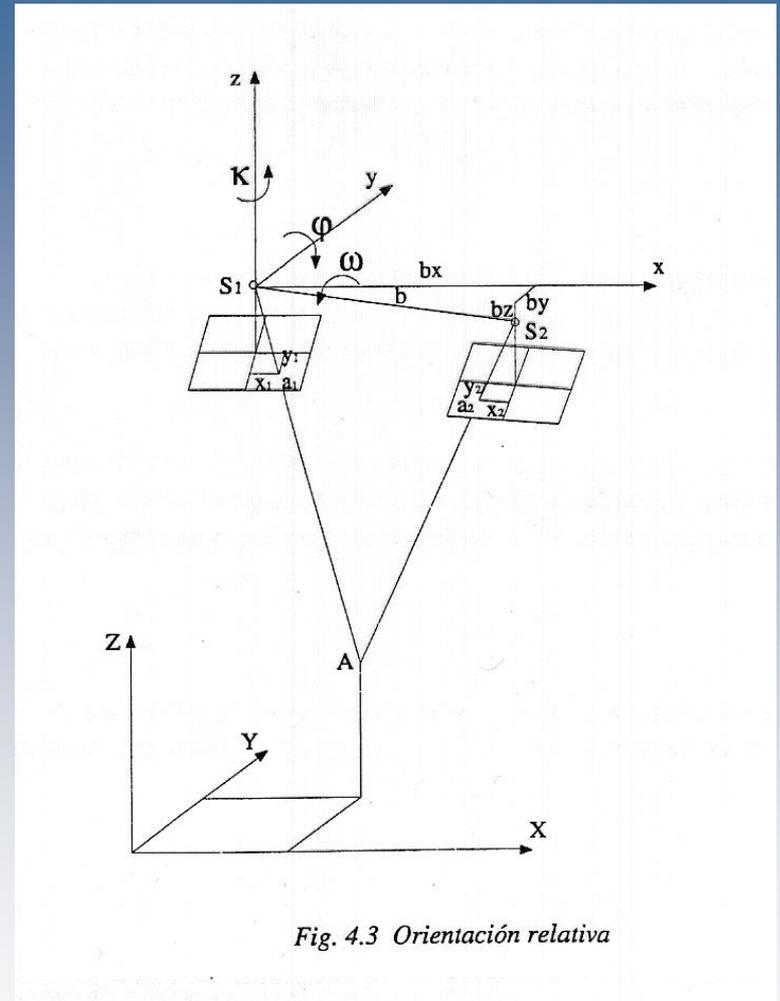
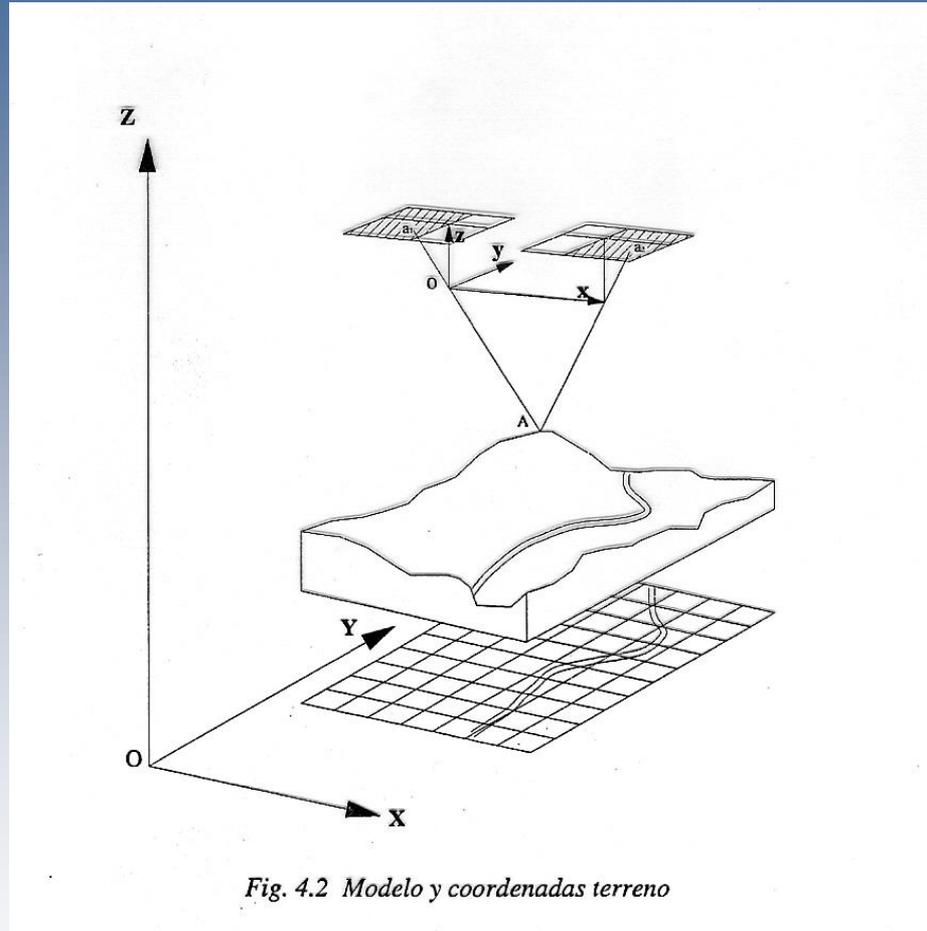


Fig. 4.3 Orientación relativa

Modelo en un sistema de coordenadas externo

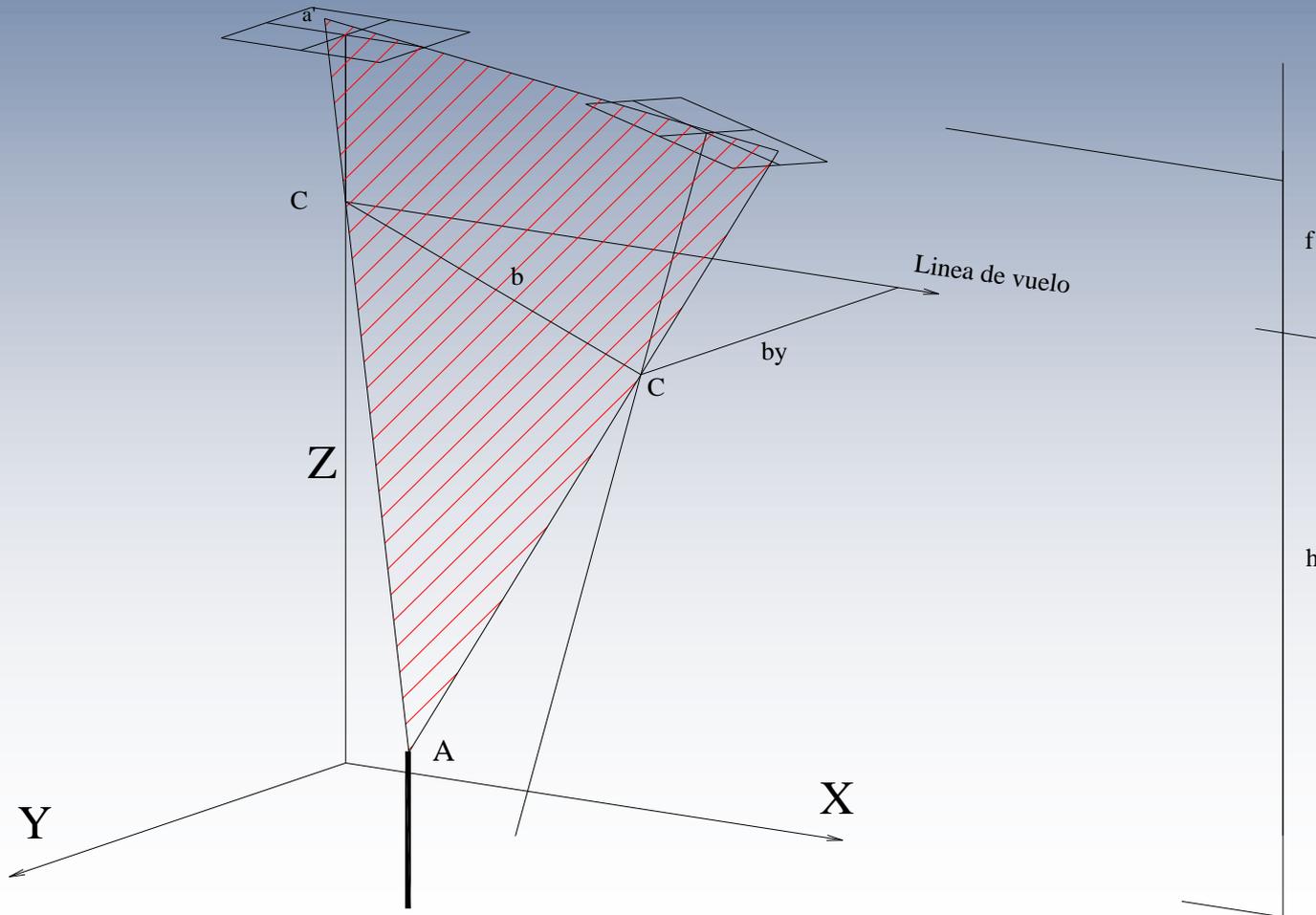


Relación del sistema de coordenadas Modelo y el sistema de coordenadas de referencia (terreno)

Modelo Estereoscópico

La Orientación Relativa debe satisfacer las propiedades de colinealidad y coplanaridad. Estas propiedades se pueden resolver mediante procedimientos físicos o a través de la resolución de un sistema de ecuaciones paramétricas

Colinealidad - Coplanaridad



La condición de colinealidad se produce cuando se encuentran en la misma recta el centro de proyección, el punto imagen y el punto del objeto proyectado. Si se cumple esta condición en las dos imágenes (fotogramas) para este mismo punto, queda asegurada la intersección de los dos rayos homólogos en el punto del terreno establecido.

Las ecuaciones son las siguientes:

$$\begin{aligned} x' &= -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y' &= -f \cdot \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ z' &= -f \cdot \frac{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

Siendo:

x' e y' : Coordenadas imagen del punto (fotocordenadas).

f : Distancia principal o focal de la cámara.

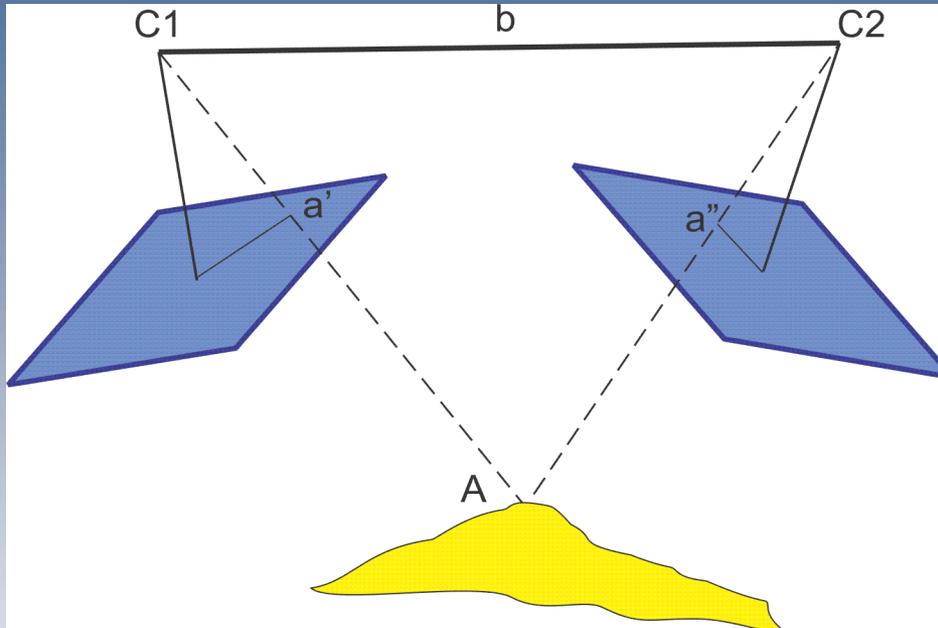
X_0, Y_0, Z_0 : Coordenadas del punto de proyección o del punto de vista.

X, Y, Z : Coordenadas del punto.

$m_{11} \dots m_{33}$ Elementos de la matriz de rotación M , giros: ω, ϕ, κ .

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones definen un punto en función de la orientación externa C (posición del centro de proyección de la cámara) y R (M) matriz de rotación tridimensional (ω, φ, κ), λ factor de escala. El vector imagen a' tiene tres componentes $[x', y', -f]$.



$$C1 C2 - \lambda C1 a' + \lambda C2 a'' = 0$$

los vectores $C1 C2, C1 a'$ y $C2 a''$ están en el mismo plano

$$\begin{bmatrix} bx \\ by \\ bz \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} a'_x \\ a'_y \\ a'_z \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} a''_x \\ a''_y \\ a''_z \end{bmatrix} = 0$$

La condición de coplanaridad expresa que los puntos de vista de dos fotogramas (centros de toma), C1, C2, dos puntos homólogos contenidos en los mismos fotogramas, a', a'', y el punto correspondiente en el terreno, A, pertenecen al mismo plano. Para eliminar el factor de escala λ , la primera y segunda ecuación se dividen por la tercera (1).

$$\begin{bmatrix} a'_x \\ a'_y \\ a'_z \end{bmatrix} = R1 \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -f \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a''_x \\ a''_y \\ a''_z \end{bmatrix} = R2 \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ -f \end{bmatrix}$$

De esta manera pasamos de un sistema vectorial a uno de fotocoordenadas asociado a matrices de rotación R1 y R2.

La Orientación Relativa esta relacionada a la condición de Coplanaridad. Geométricamente, consiste en orientar las imágenes entre sí (una respecto a la otra) sin necesidad de orientarlas respecto de un sistema de referencia externo o absoluto. Por lo tanto, cumpliendo la condición de coplanaridad el modelo estereoscópico es una entidad tridimensional que permite pasar de Fotocoordenadas a Coordenadas Modelo

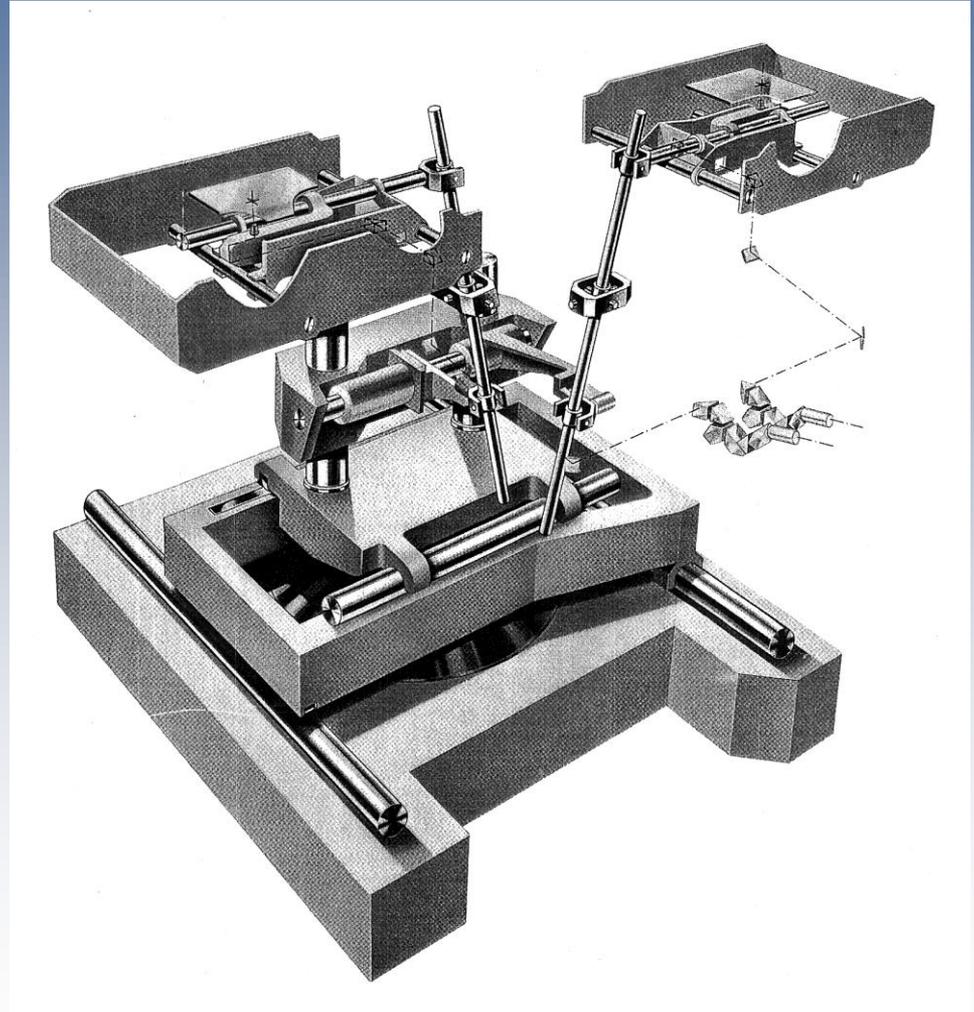
La Orientación Relativa funda sus principios en el concepto de rectas y planos epipolares que pasaron a ser elementos centrales de la fotogrametría digital ya que la recta epipolar establece el lugar geométrico de los puntos homólogos, es decir, establece el espacio de búsqueda.

Tecnología de los Instrumentos de Restitución

Restituidores Analógicos

- Ópticos Mecánicos
- Contadores conectados a husillos
- Codificadores incrementales X Y Z
- Sistema de dibujo mediante mesa trazadora

Los restituidores analógicos se pueden utilizar como pseudo digitales mediante el agregado de un sistema de registro de coordenadas que utiliza detectores de códigos de barras, esto permite una salida grafica a través de plotters



Restituidor Analítico

- Procesos de cálculo a través de programas
- Soportes de imagen: película (film), negativos – diapositivas
- Salida grafica a la pantalla: revisión del mapa digital, pantalla interactiva
- Trazadoras de tambor
- Precisión de medición $2 \mu\text{m}$
- Superposición de imágenes raster
- Orientación semiautomática del Modelo
- Medición automática de altitudes: modelos altimétricos digitales (sistema de Correlador)
- Ortofotos digitales
- Orientación del Modelo para imágenes de satélite SPOT
- Aerotriangulación: ajuste de bloques (PATH-M)



SISTEMAS PARA OBTENER IMÁGENES DIGITALES

La primera etapa en el procedimiento fotogramétrico digital es la obtención de las imágenes digitales de características métricas. Una metodología consiste en escanear las fotografías aéreas obtenidas con cámaras analógicas (el 100% de los vuelos fotogramétricos en la Republica Argentina hasta el año 2010 se realizaron con cámaras analógicas), el otro método es obtener directamente aero-fotogramas digitales mediante el empleo de cámaras fotogramétricas digitales.

Scanner Fotogramétrico

Cámara Digital

Principio de Funcionamiento

Generar una señal eléctrica

SCANNER FOTOGRAMETRICO

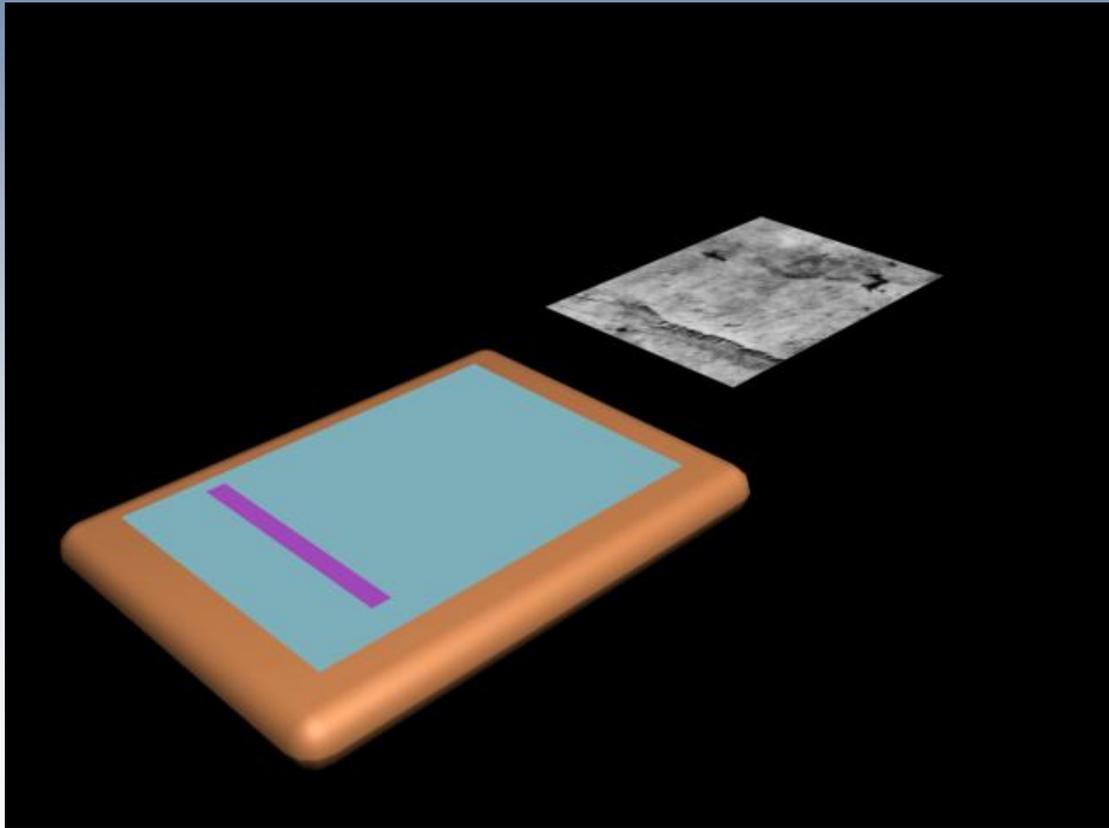
Características

- Digitalizar imágenes con una superficie de 24 x 24 cm
- Rango de resolución desde los 10 μm hasta los 320 μm
- Film con densidades de 0.1 D a 2.4 D
- Utiliza positivos y negativos blanco y negro y positivos color
- Precisión geométrica relativa +/- 3 μm
- Rango dinámico es de 1 Byte a 3 Byte y salida formato TIF

Resolución μm	Color	B/W
10	1.728 GB	576 MB
20	432 MB	144 MB
30	192 MB	64 MB
40	108 MB	36 MB

Scanner Plano

Los scanner más utilizados son los planos, donde la película se coloca en un portaplaques y se ilumina desde arriba. Unos sensores de estado sólido detectan la cantidad de energía transmitida a través de la emulsión. El portaplaques generalmente se mueve junto con la película mientras el sensor se encuentra fijo, la fuente de luz debe iluminar uniformemente para que la energía que atraviesa el film sea función de la densidad.



Sensor CCD tri-lineal con óptica de precisión mediante un sistema de lentes reflectivos e iluminación “fría” que escanea el fotograma con precisión geométrica de $2\mu\text{m}$ a 8, 12 o 24 bits.

Cámara Digital

Elementos

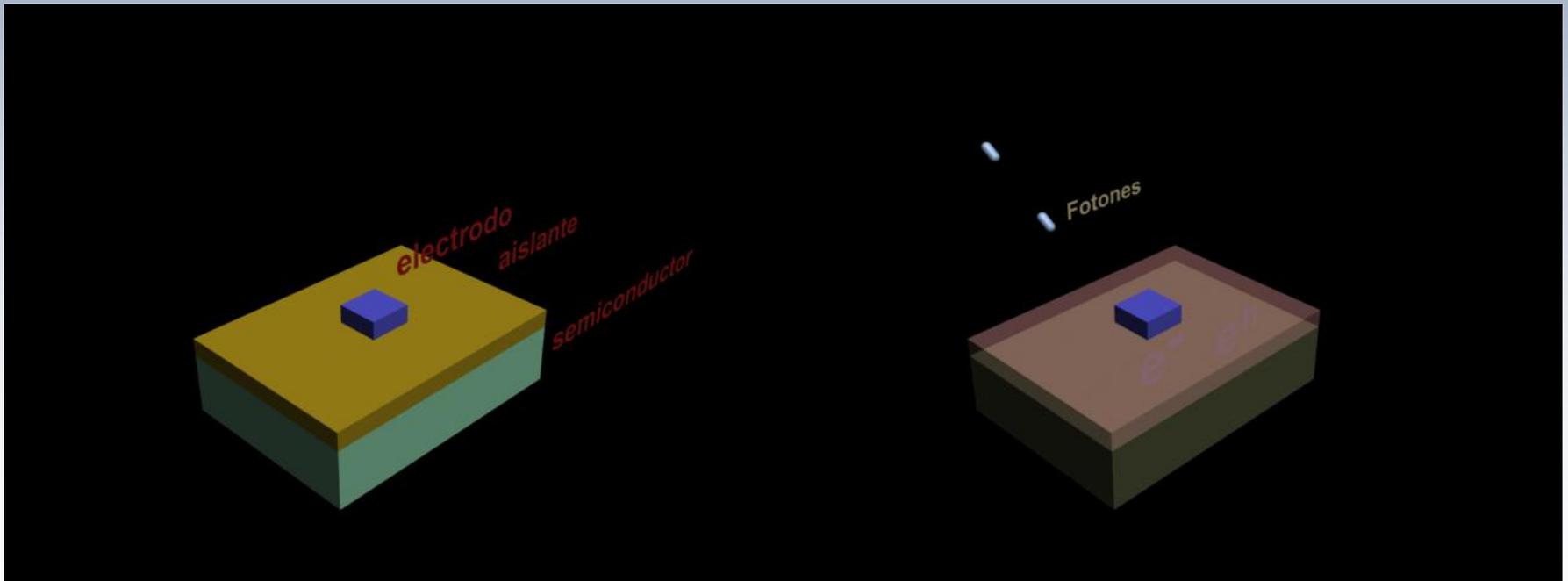


Sensor

Los sensores tipo “solid-state” se fundamentan en la captación de imágenes por la conversión de los fotones en cargas eléctricas. Están compuestos por un array de elementos o detectores (celdas), sensibles a la luz. sustrato semiconductor que puede almacenar y transmitir cargas eléctricas.

Tipos de sensores

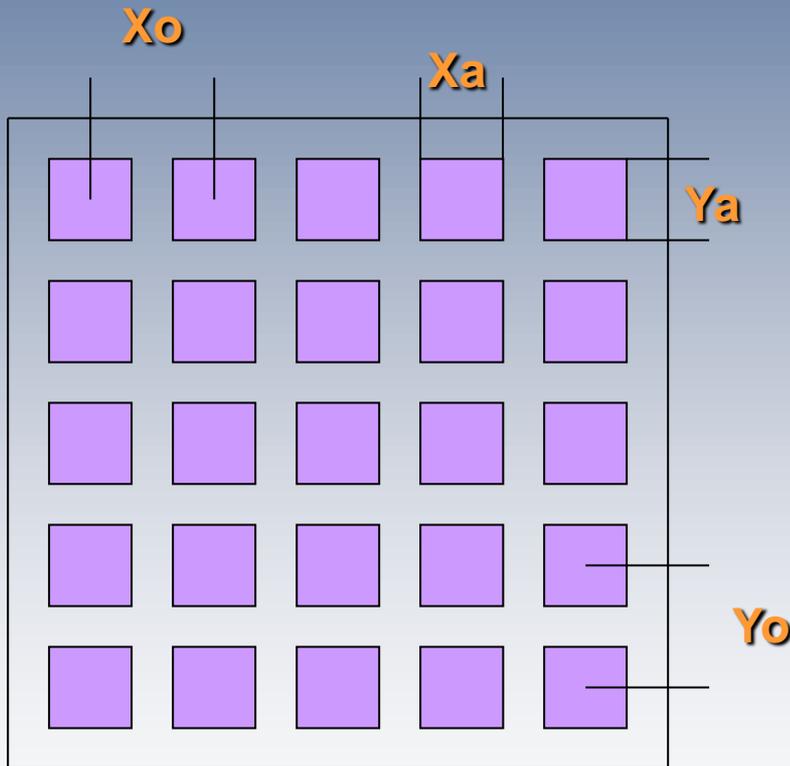
- CCD: charge-coupled device
- CMOS: complementary metal oxide on silicon



Cuando impacta un Fotón se producen pares electrón-hueco que se desplazan por el semiconductor y son dirigidos hacia el conversor analógico-digital.

Dimensiones del Sensor

Los sensores de mayores dimensiones pueden coleccionar mas luz en un intervalo de tiempo pero son complejos de construir. Chip grandes requieren lentes de mayor diámetro y por tanto más caros

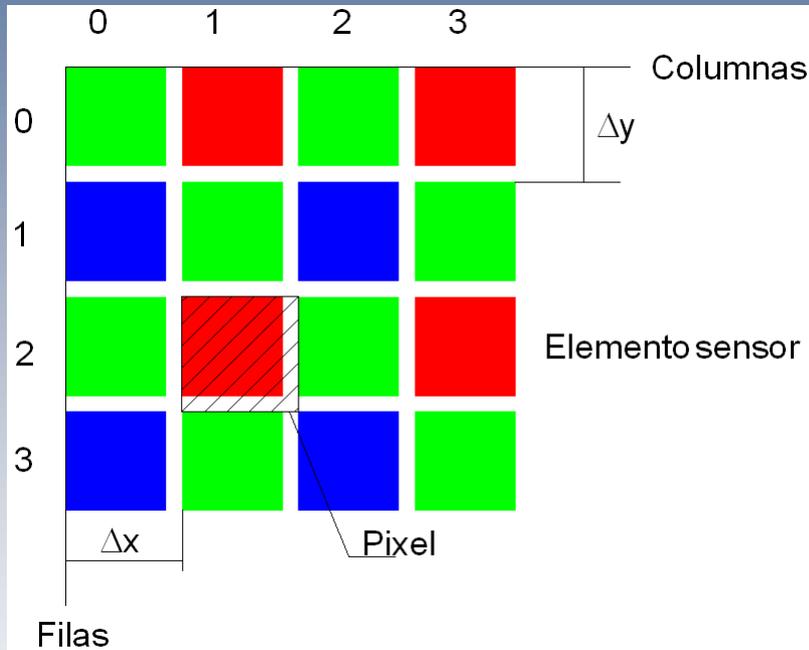


Las distancias X_o , Y_o , son el espacio físico entre el centro de cada sensor (pixel). Los parámetros X_a , Y_a , son las dimensiones de los elementos sensores. Los sensores generalmente tienen un formato $X_o = Y_o$ pero también pueden ser marcos $X_o/Y_o = 1.1$

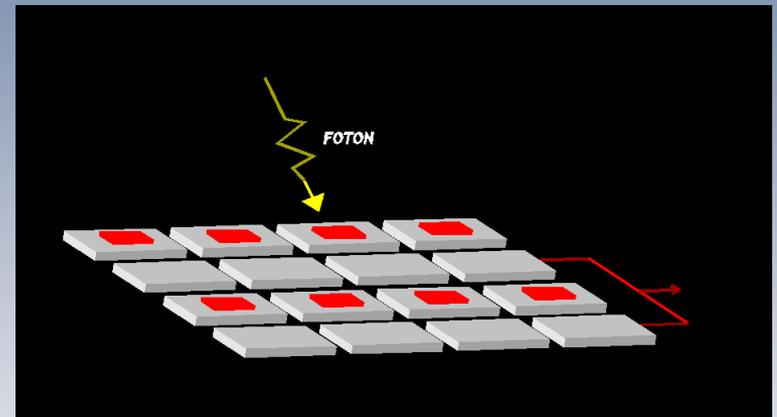
Un pequeño valor de X_o , Y_o provee una alta resolución de pixel. También significa un área mas pequeña por pixel donde se acumulan menos fotones

Fill Factor: el área de detección de los elementos es una fracción de la superficie teóricamente disponible. Si este valor es alto mas energía luminosa es capturada y menos aliasing

SENSOR CCD



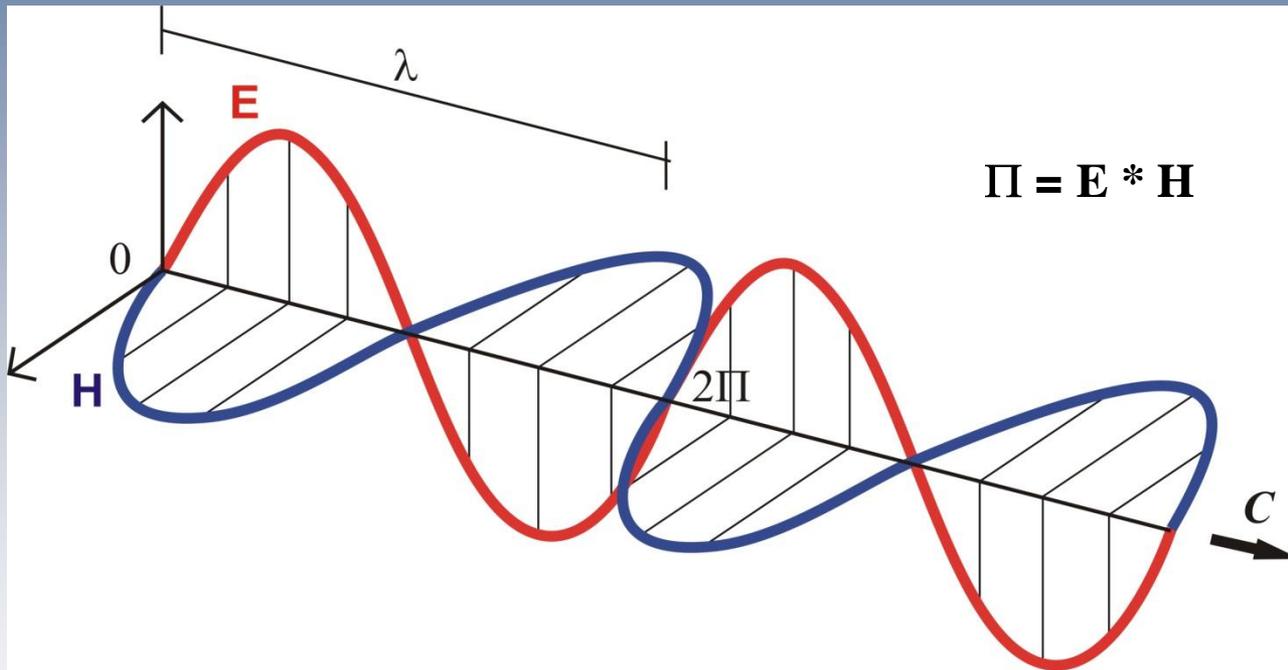
Matriz bilineal



La señal eléctrica analógica proveniente de los elementos sensores es enviada al conversor A/D para ser procesada

Energía electromagnética

Las ondas electromagnéticas transportan energía que se reparte de igual manera entre campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre si, estos oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda. La dirección de propagación está dada por el vector $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$.



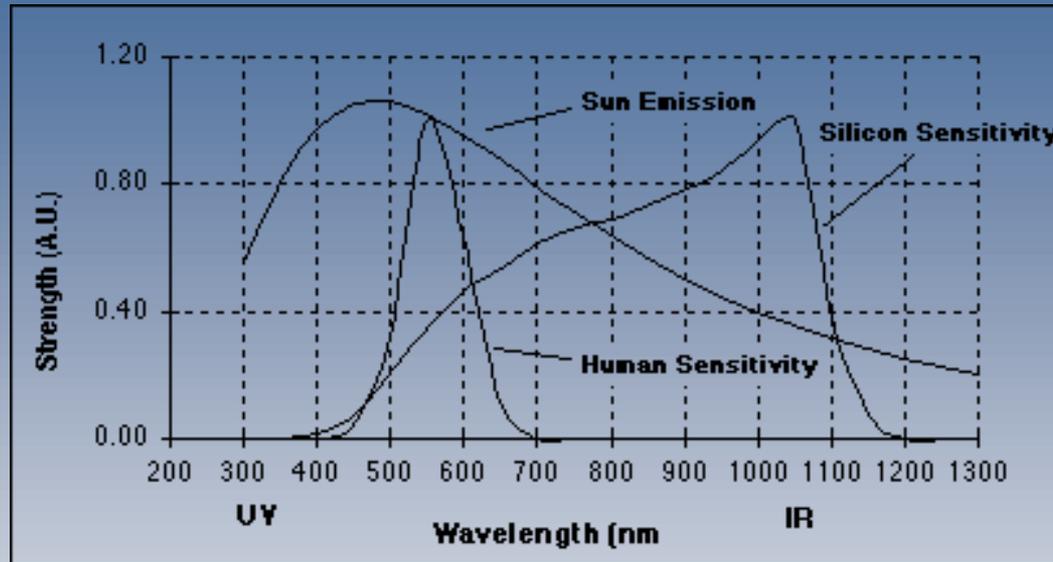
$$c = v * \lambda$$
$$v = c / \lambda n$$

$$c \approx 2.998 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

$$Q = h * \nu \quad \text{donde, } h : \text{ constante de Planck} \quad h = 6.625 \times 10^{-34} W s^2$$

$$Q = (h * c) / \lambda$$

Respuesta del Silicio



Fotones con λ superiores a $1.1 \mu\text{m}$ no producen pares electrón-hueco en el semiconductor

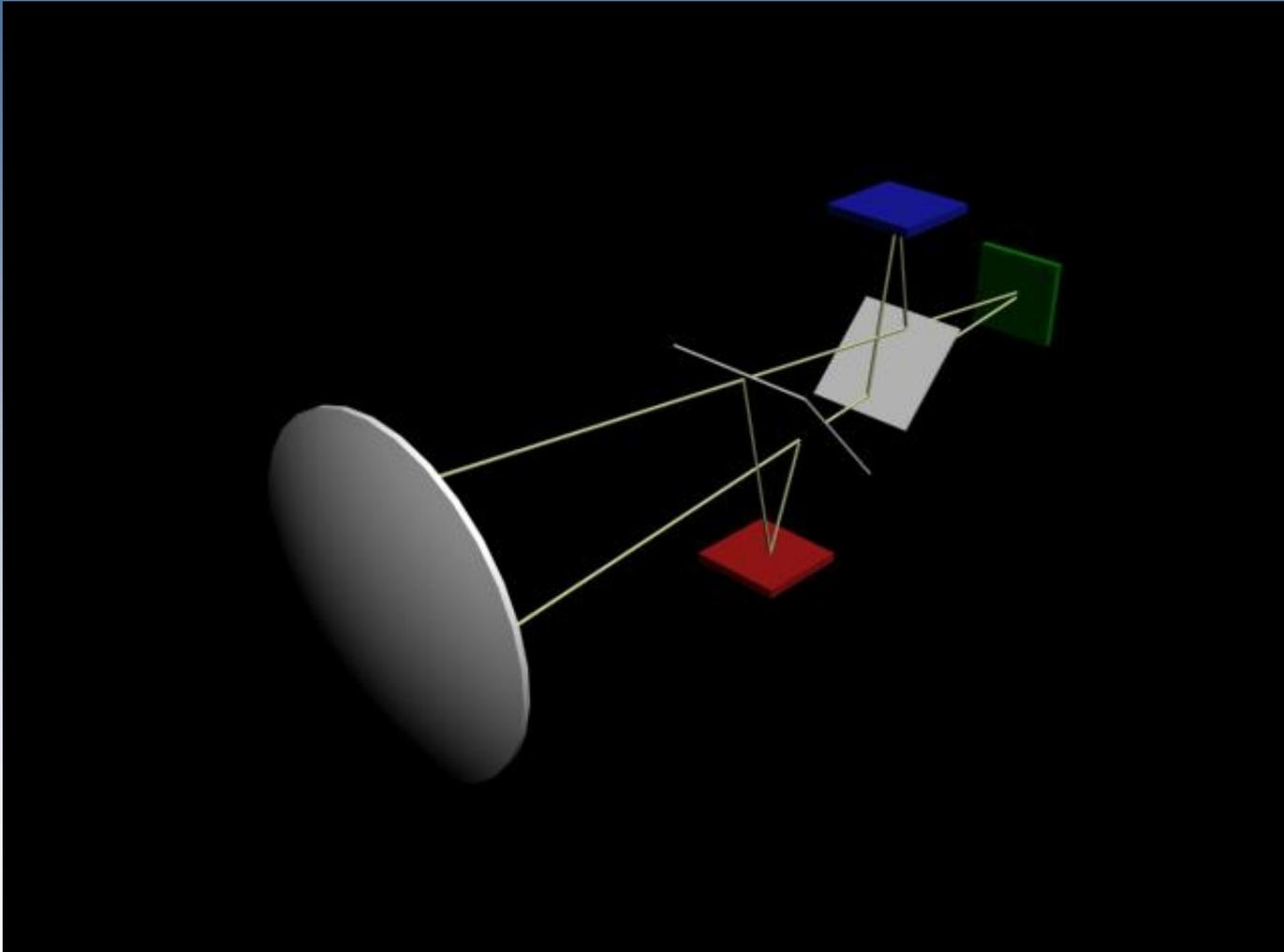
Energía de un fotón con $\lambda = 700 \text{ nm}$

$\eta \approx 1$ Aire

$$Q = \frac{h c}{\lambda} = \frac{6.625 \times 10^{-34} \text{ W s}^2 \times 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{700 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

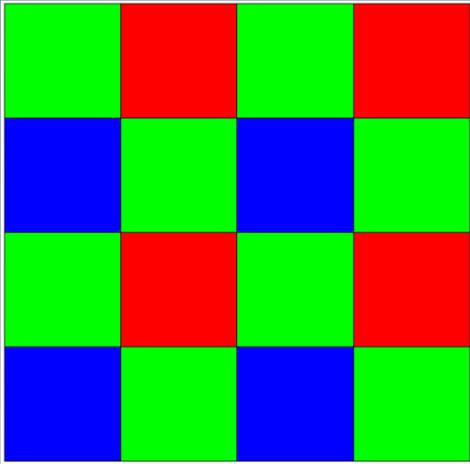
$$Q = 2.84 \times 10^{-19} \text{ W s}$$

Cámara de tres chip



Dos sistemas divisores de haz desvían los rayos luminoso a tres chip-CCD cada uno con filtros rojo azul y verde

Cámara de simple chip-CCD



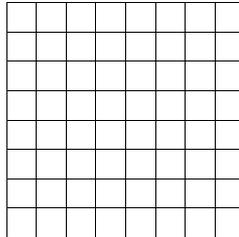
Un simple Chip es usado para obtener los valores RGB para todos los pixel.

Se utilizan pequeños filtros de color para cada elemento sensor (pixel).

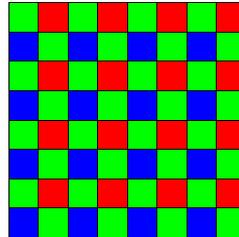
Es mas barato de construir que el sistema de tres Chip pero de menor calidad. A este modelo se lo denomina Bayer y se divide en 50% de sensores de color verde y 25% de rojo y azul

RGB = 1 byte

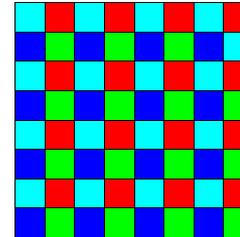
RAW = 2 byte



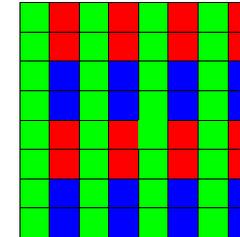
Monocromo



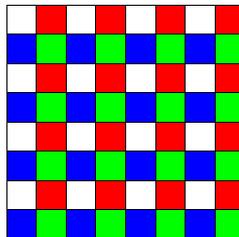
Bayer



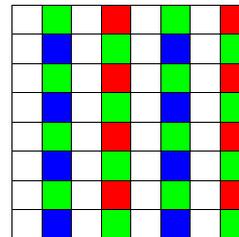
Sony



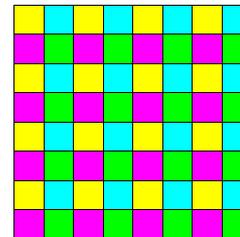
Super-CCD EXR



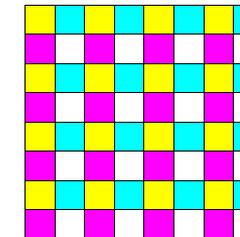
RGBW



RGBW



CYGM



CMYW

CAMARA FOTOGRAMETRICA DIGITAL

Características fundamentales

- **Sensores CCD de un tamaño aproximado de $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$**
- **Sistema óptico**
- **Sistema electrónico de FMC**
- **Formato aproximado: 13 K x 7.5 K con sistema óptico $f = 120\ \text{mm}$**
- **Multibanda: 6 K x 4 K con sistema óptico $f = 25\ \text{mm}$**
- **Condición métrica**
- **Filtros amarillo y naranja**
- **Canal NIR**
- **Sistema de navegación y obturación por coordenadas asistida por GPS**
- **Resolución es 30 a 40 l/mm**

CAMARA FOTOGRAMETRICA DIGITAL

Características

Cámara con un solo cono pancromática basada en un CCD.

Formato 12.2k x 11.4k.

Alta precisión geométrica y la más alta calidad de imagen.

Óptica Carl Zeiss.

Indicadores de desempeño

- Nadir y punto de vista de un solo centro del eje óptico de proyección

- Cámara pancromática 144 MP (12.240 x 11.418 píxeles) de 7,2 μm de tamaño de píxel y 92 mm de distancia focal

- Cuatro cámaras multiespectrales para el rojo, verde, azul, (RGB) y el infrarrojo cercano (NIR) con 42 MPíxel (6846 x 6096 píxeles) con tamaño de píxel 7,2 μm y un filtro de color específico PAN / color proporción de 1:2

Formato de la imagen final después de post-procesamiento es 12096 x 11200 píxeles

Sistema de navegación y obturación por coordenadas asistida por GPS

Resolución es 30 a 40 l/mm

Cámara Fotogramétrica Digital de Alta Resolución

Características

Cámara con un solo cono pancromática basada en un CCD

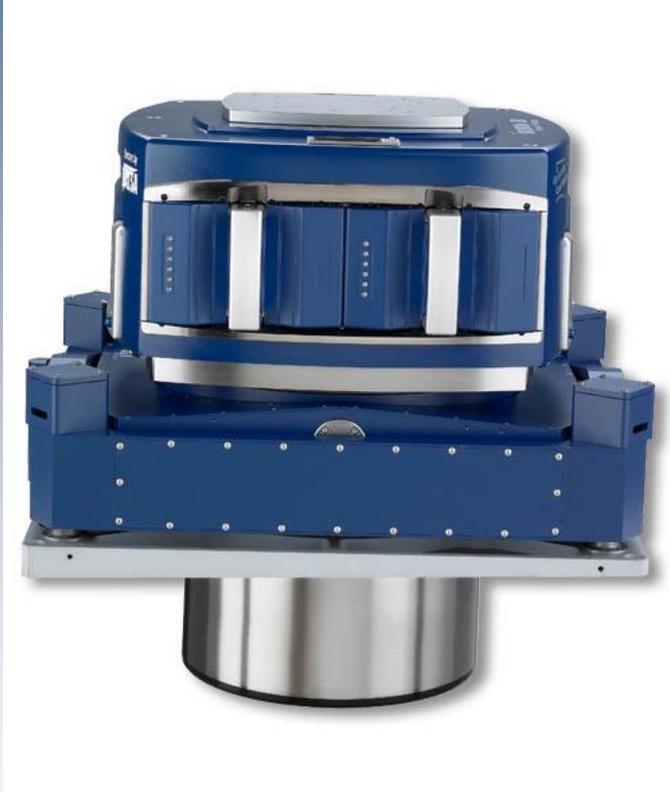
Formato 17.2k x 14.6k

Alta precisión geométrica y la más alta calidad de imagen como cualquier cámara de formato grande disponible.

Óptica Carl Zeiss

Indicadores de desempeño

- Nadir y punto de vista de un solo centro del eje óptico de proyección
- Cámara pancromática 250 MP (17.216 x 14.656 píxeles) de 5,6 μm de tamaño de píxel y 112 mm de distancia focal
- Cuatro cámaras multiespectrales para el rojo, verde, azul, (RGB) y el infrarrojo cercano (NIR) con 42 MPíxel (6846 x 6096 píxeles) de 7,2 μm de tamaño de píxel y un filtro de color específico PAN / color proporción de 1:3.2
- Imagen de los datos con post-procesamiento
- Formato de la imagen final después de post-procesamiento es 16768 x 14016 píxeles





Principales Características del Sistema Aerofotogramétrico Digital (SAD-IGN)



Sistema de Control del Vuelo Fotogramétrico



CAMARA FOTOGRAMETRICA DIGITAL



Resolución (IFOV) 30 cm

Color Natural



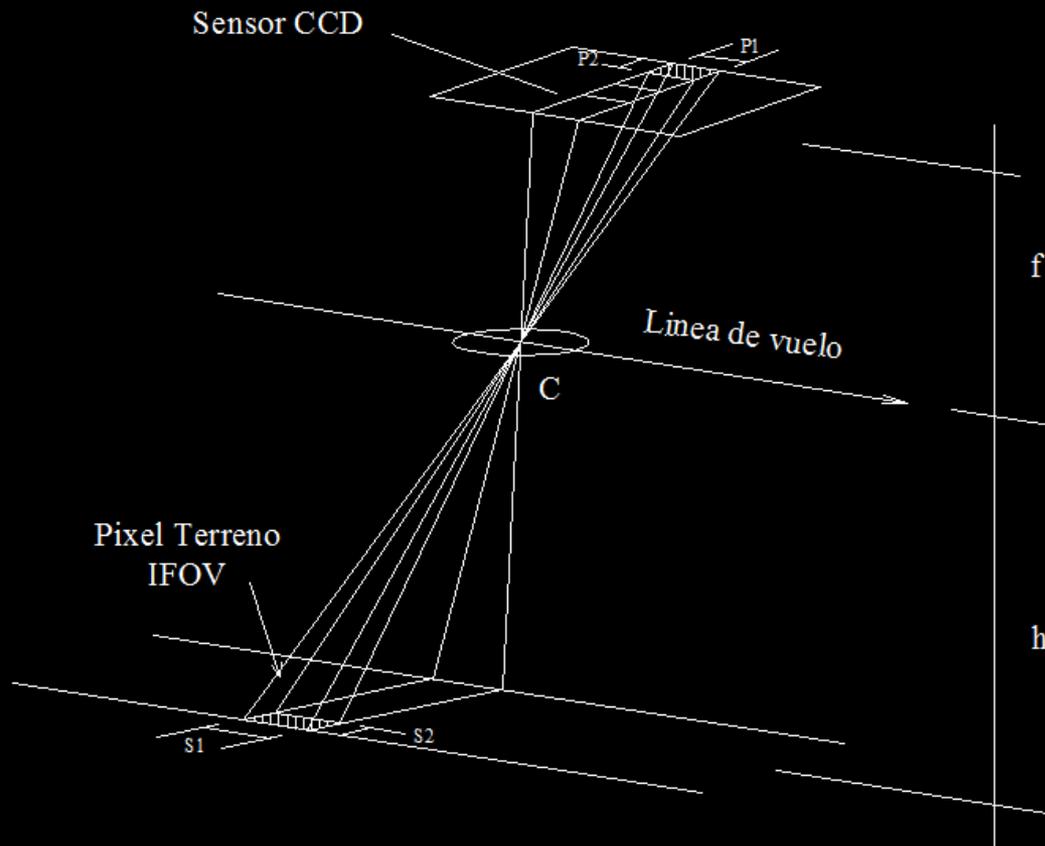
RGB 432



Pancromático



Geometría de la cámara fotogramétrica digital



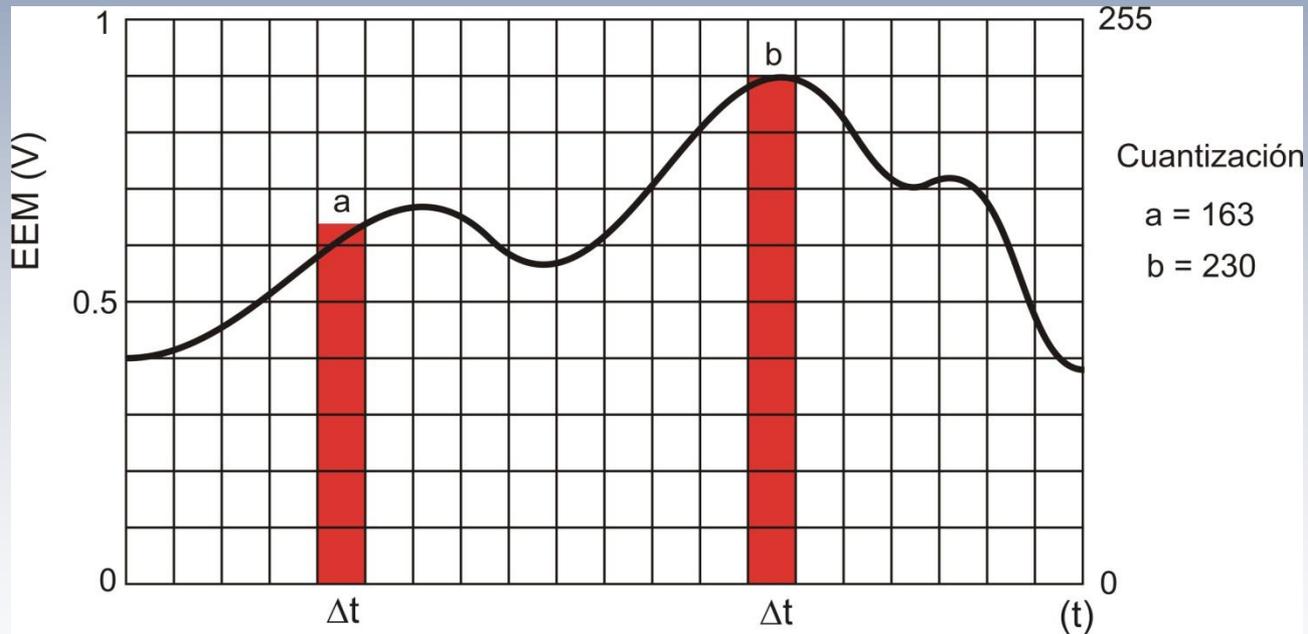
CONCEPTO DE IMAGEN DIGITAL

$$f(x, y) \rightarrow F(x, y)$$

f = valor de la amplitud (densidad)

(x, y) = variable espacial

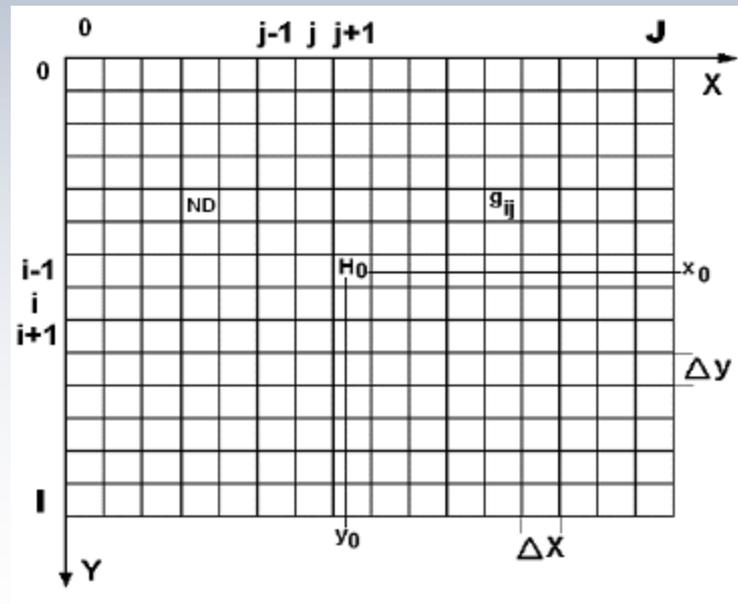
F = discretización de la amplitud o cuantización del nivel de gris



Para pasar de una función continua a una discreta aplico el teorema del muestreo que establece que el tamaño más pequeño del pixel debe ser algo menor que la mitad de la frecuencia más alta de la función continua

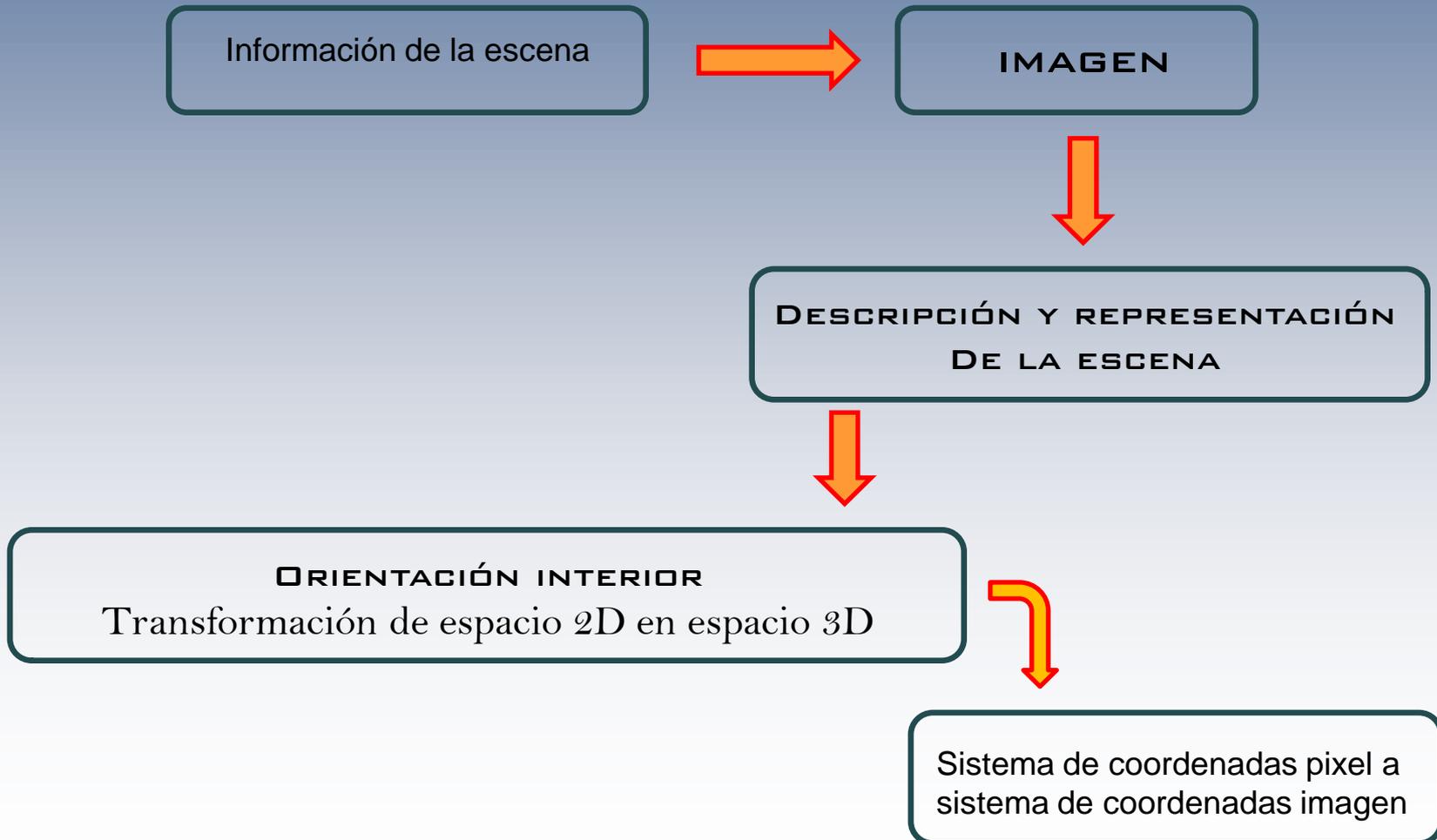
Expresión matemática de una imagen digital en escala de grises

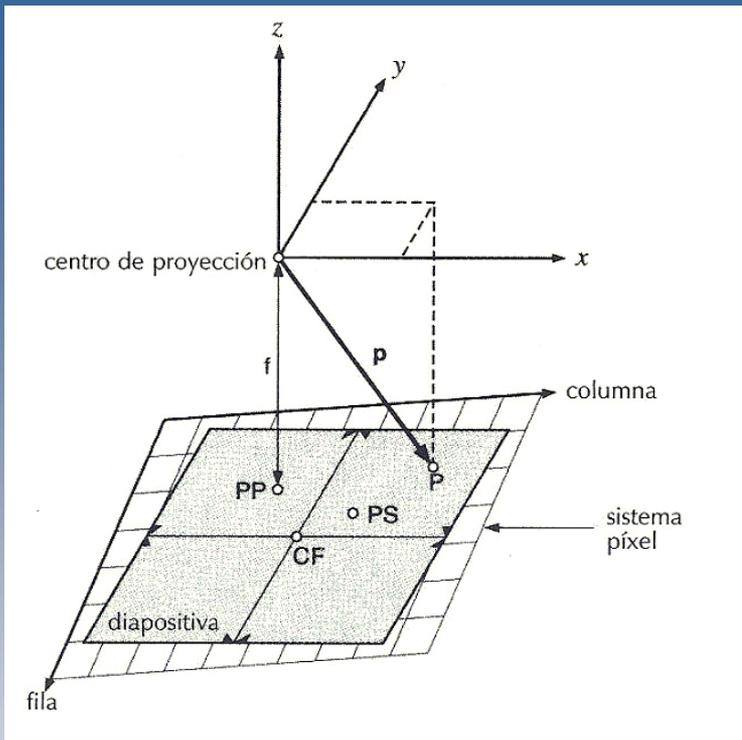
$$\mathbf{F(x, y)} = \begin{bmatrix}
 F_{\text{cuant}}(0,0) & F_{\text{cuant}}(0,1) & F_{\text{cuant}}(0,2) & \dots & F_{\text{cuant}}(0,n-1) \\
 F_{\text{cuant}}(1,0) & F_{\text{cuant}}(1,1) & F_{\text{cuant}}(1,2) & \dots & F_{\text{cuant}}(1,n-1) \\
 F_{\text{cuant}}(2,0) & F_{\text{cuant}}(2,1) & F_{\text{cuant}}(2,2) & \dots & F_{\text{cuant}}(2,n-1) \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\
 F_{\text{cuant}}(m-1,0) & F_{\text{cuant}}(m-1,1) & F_{\text{cuant}}(m-1,2) & \dots & F_{\text{cuant}}(m-1,n-1)
 \end{bmatrix}$$



Orientación Interna Automática

Tarea principal de la Fotogrametría Analógica y Digital: *Restituir el Espacio Objeto*





La posición en el espacio imagen se expresa por vectores

CF: centro fiducial
PP: punto principal

\mathbf{p} : posición del punto P en el sistema píxel $\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix}$

Transformación de un punto P en el sistema píxel (f_p, c_p)

$$\begin{aligned} x_p &= (C_p - C_0)p_c \\ y_p &= -(f_p - f_0)p_f \\ z_p &= -f \end{aligned}$$

Donde f_0, C_0 son las coordenadas píxel del punto principal y P_f, P_c es el tamaño del píxel en unidades métricas (μm)

Para diapositivas digitalizadas se determina el centro fiducial y se aplica una traslación CF->PP

Coordenadas pixel al sistema fiducial

$$x_p^f = a_{11}f_p + a_{12}c_p + a_{13}$$

$$y_p^f = a_{21}f_p + a_{22}c_p + a_{23}$$

Si se aplica una transformación de semejanza $a_{11} = s \cdot \cos \alpha$ $a_{12} = -s \cdot \sin \alpha$

s : factor de escala (dimensiones del pixel)

$$a_{21} = -a_{12} \quad a_{22} = -a_{11}$$

Si el pixel es rectangular se aplican dos factores de escala por lo que debe elegirse una transformación afín obteniéndose los siguientes coeficientes:

$$a_{11} = s_x (\cos (\alpha - \varepsilon \sin \alpha)) \quad a_{12} = -s_y \sin \alpha$$

$$a_{21} = s_x (\sen (\alpha + \varepsilon \cos \alpha)) \quad a_{22} = -s_y \cos \alpha$$

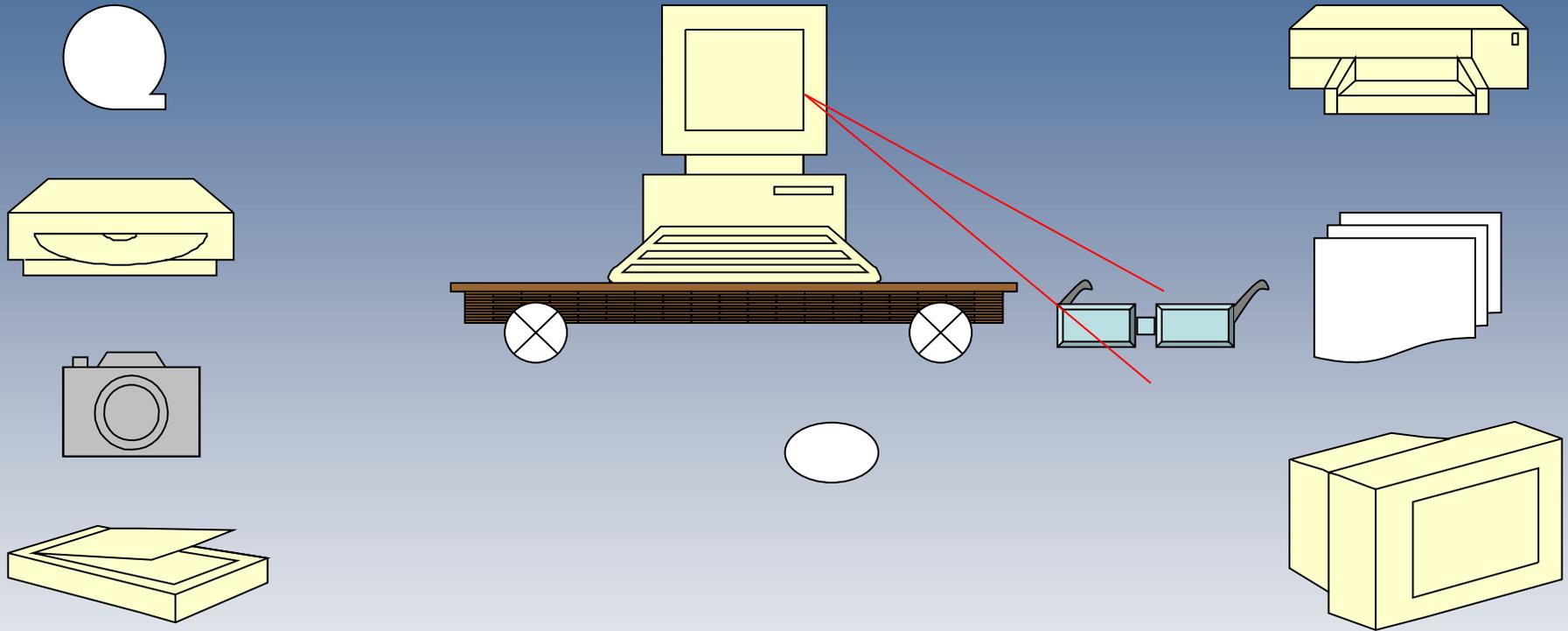
Traslación de sistema fiducial al sistema imagen

$$x_p = x_p^f - x_0$$

$$y_p = y_p^f - y_0$$

$$z_n = -f$$

ESTACIONES FOTOGRAMÉTRICAS DIGITALES



Las Estaciones Fotogramétricas Digitales principalmente están compuestas por una computadora y una serie de dispositivos especiales, que permiten realizar las mismas funciones de un restituidor analítico pero en forma totalmente digital. Los principios geométricos de coplanaridad de rayos homólogos siguen estando vigentes para las orientaciones pero ahora a través de algoritmos de imagen epipolar. Se reemplazan las imágenes sobre film (negativo o positivo), por archivos digitales de imágenes raster de alta resolución.

Generalmente los sistemas de visión estereoscópica se basan en el método de gafas activas LCD con control infrarrojo.

La orientación del modelo ahora es prácticamente automática y la disponibilidad de software permite una actualización continua para restitución vectorial, DTM , etc.

CORRESPONDENCIA DE IMAGENES

Búsqueda automática de puntos Homólogos en entidades bidimensionales

- Modelo tridimensional
- Traslación de espacios imágenes 3D sobre conjuntos 2D

La metodología de búsqueda de las entidades de correspondencia es a través de algoritmos de correlación los cuales realizan comparaciones bidimensionales de:

- Correspondencia de bordes
- Correspondencia de niveles de gris
- Comparación tridimensional (respuesta radiométrica)

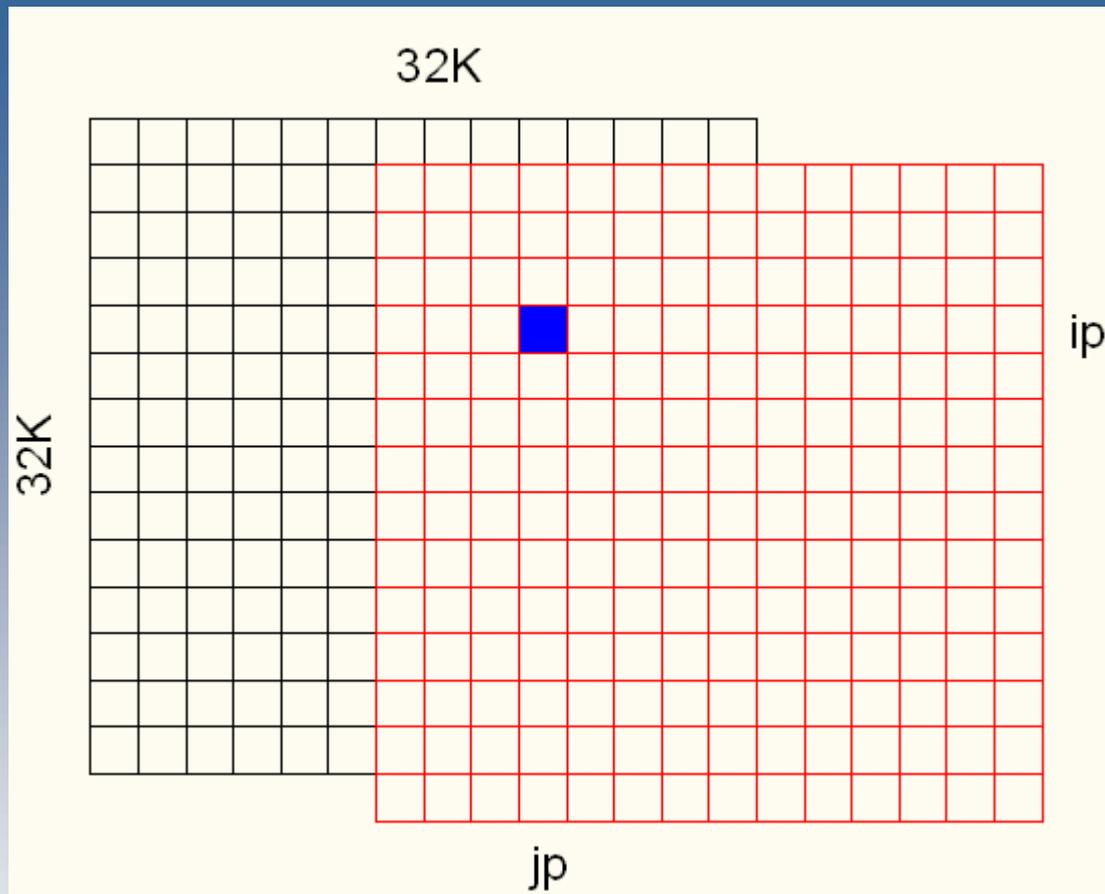
Solución única a través de matrices $N \times N$

La identificación y medida de puntos homólogos en dos o más fotogramas consecutivos es uno de los procesos fundamentales de la fotogrametría. La estéreo-fotogrametría está basada en los puntos homólogos. Cuando se realizan procedimientos de orientaciones o se efectúen mediciones sobre un Modelo tridimensional estereoscópico, el operador realiza la búsqueda de los puntos homólogos de manera intuitiva. Desde el punto de vista de la fotogrametría digital (analítica) lo que se busca es resolver el problema automáticamente. La correspondencia de imágenes comienza con la búsqueda de un mecanismo eficiente y automático de comparación de entidades mediante instrumentos conocidos como correladores (hardware analógico). Estos se basaban en la “correlación” de los niveles de gris de un film fotogramétrico utilizando dispositivos de fotocélulas. Los sistemas de correlador si bien funcionaban en forma relativamente aceptable, no eran muy eficientes ya que frecuentemente encontraban dificultades para la determinación de los elementos de comparación.

La búsqueda de puntos homólogos en un par estereoscópico es un proceso que el ser humano realiza sin demasiado esfuerzo puesto que la visión estereoscópica natural no utiliza simplemente la comparación de los niveles de gris de una entidad de imagen.

La discretización y cuantización de una imagen analógica (continua) permite que los mecanismos de búsqueda de correspondencia puedan ser a través de matrices de exploración para comparar niveles de gris, áreas, características, etc. Sin embargo los procedimientos matemáticos que permiten alcanzar la correspondencia, se traducen en algoritmos de búsqueda, llamados árboles de búsqueda, que son bastante complejos y que requieren importantes recursos de cómputo.

Sea un par estereoscópico de resolución $32K \times 32K$ (píxel = $7\mu m$). Un píxel P ocupa la posición ip, jp , con nivel de gris gp . Buscando el píxel homólogo (intuitivo) para ocurrencias de nivel de gris, implica, $0.6 \cdot 32k \cdot 32k = 6.14 \times E8$ operaciones, para un modelo podría ser de $10E17$. Además existe un problema adicional de ambigüedad. Supongamos que cada nivel de gris se produce con la misma frecuencia (tras ecualización del histograma), esto es, $(0.6 \cdot 32k \cdot 32k)/256 = 2.4 \cdot E6$ correspondencias. Si a eso se le añade un nivel de ruido de ± 5 niveles de gris, tenemos $10E7$ posibles soluciones, lo que produce una explosión combinatoria.



La correspondencia es un problema no muy bien definido. El problema es bien definido cuando: 1) existe solución, 2) la solución es única, 3) la solución depende de forma continua de los datos iniciales. Esto no siempre ocurre en la correspondencia de imágenes fotogramétricas estereoscópicas, debido a las condiciones propias de la toma. Las condiciones de iluminación de las escenas, los movimientos de la cámara en el espacio, etc., producen imágenes con elementos no suficientemente únicos lo que ocasiona que en un espacio de búsqueda de una imagen completa se dificulte el radio de convergencia para la individualización de los puntos homólogos.

Generalmente para facilitar los mecanismos de búsqueda se reducen los espacios de búsqueda mediante las técnicas de convolución discreta bidimensional.

DISTORSIONES GEOMÉTRICAS DE LAS ENTIDADES DE CORRESPONDENCIA

La correspondencia por ventanas de exploración considera a varios pixel al medir el índice de semejanza en lugar de comparar el nivel de gris de un solo pixel. Los niveles de gris de una ventana de imagen constituida por una matriz por ejemplo de $n \times m$ pixeles se comparan con los de una ventana de la otra imagen. Si suponemos que ambas ventanas de imagen están centradas en sus posiciones homologas verdaderas, el índice de semejanza será máximo si los niveles de gris de cada pixel que conforman la matriz de comparación son iguales. Esta es una situación ideal que difícilmente se da en la realidad debido a la presencia de “ruido” en la imagen, cambio de iluminación en la escena entre dos fotogramas consecutivos, distorsiones geométricas por cambio de escala o los movimientos en el espacio de la cámara así como los desniveles del terreno. Todo esto produce cambios en la equivalencia de los niveles de gris.

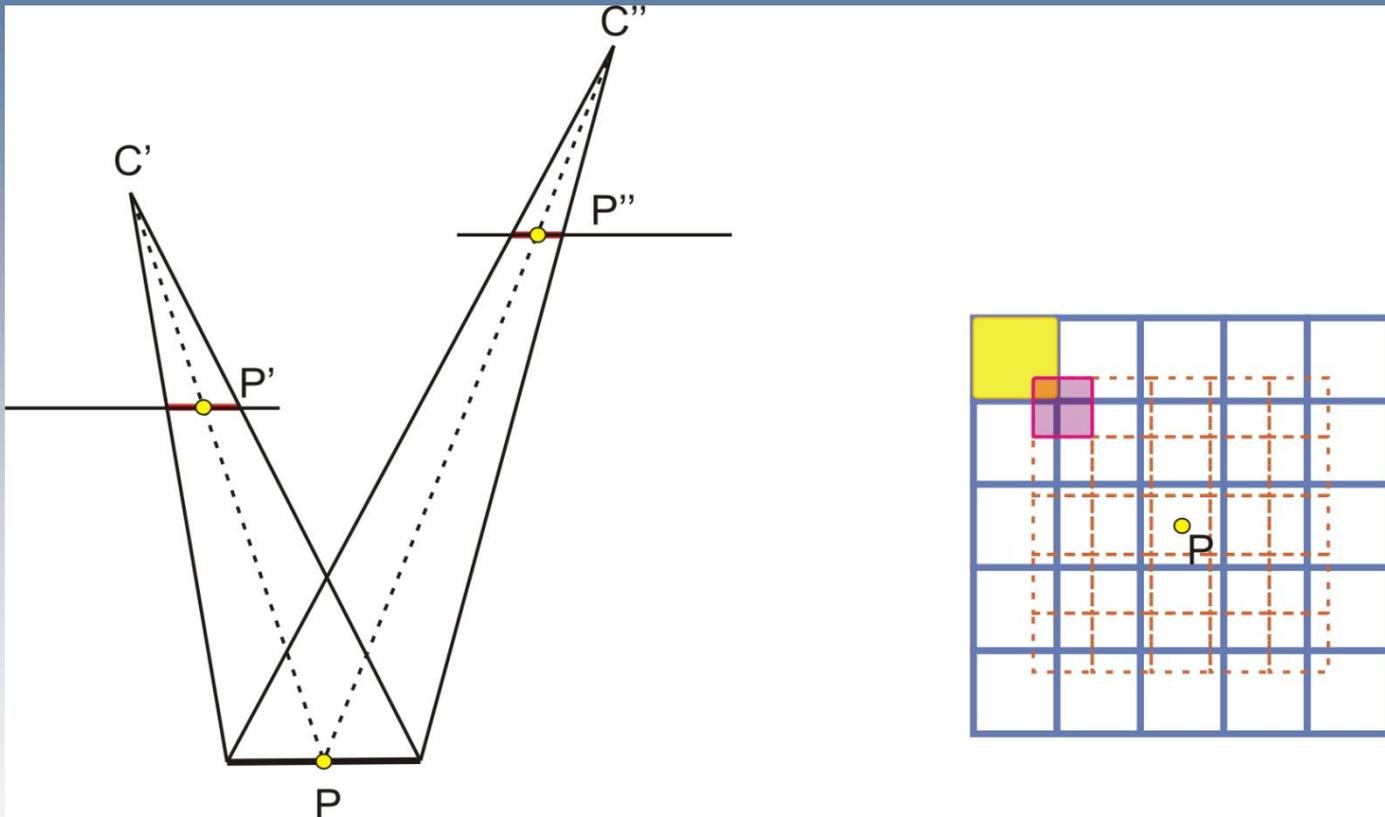
Diferencia de escala

Diferencia de Angulo de rotación de las imágenes

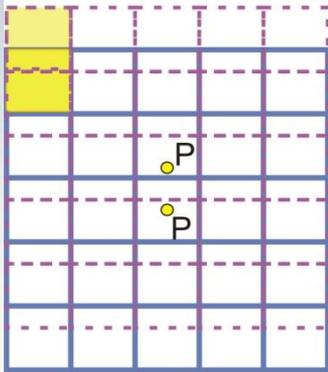
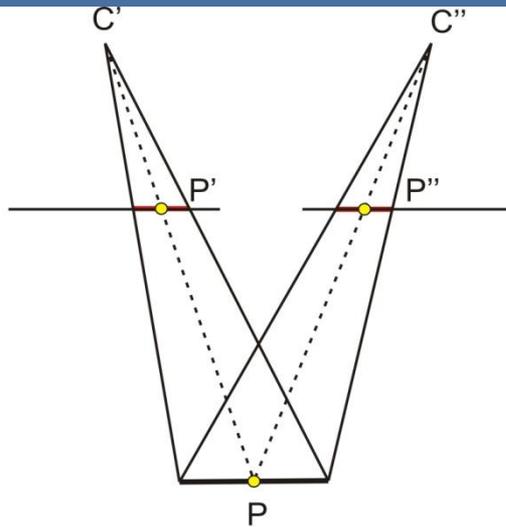
Distorsión a causa de la inclinación

Distorsión debida al relieve del terreno

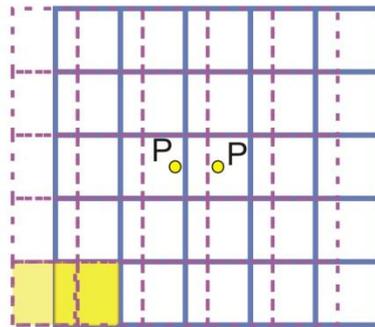
DISTORSION DE LA GEOMETRIA DE LA IMAGEN



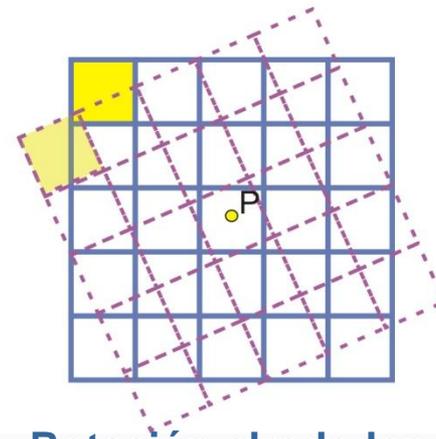
Cambio de escala



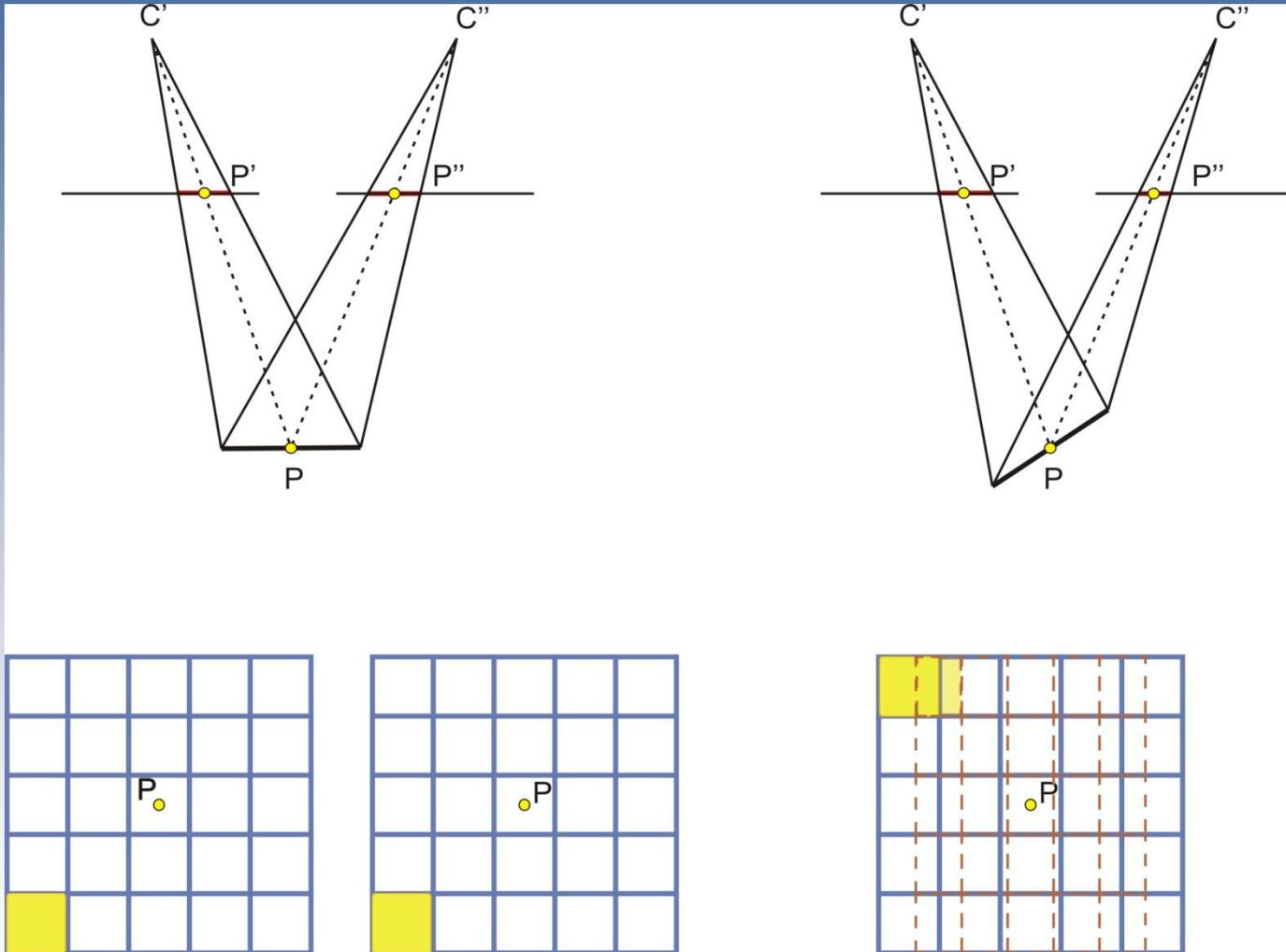
Rotación alrededor
del eje x



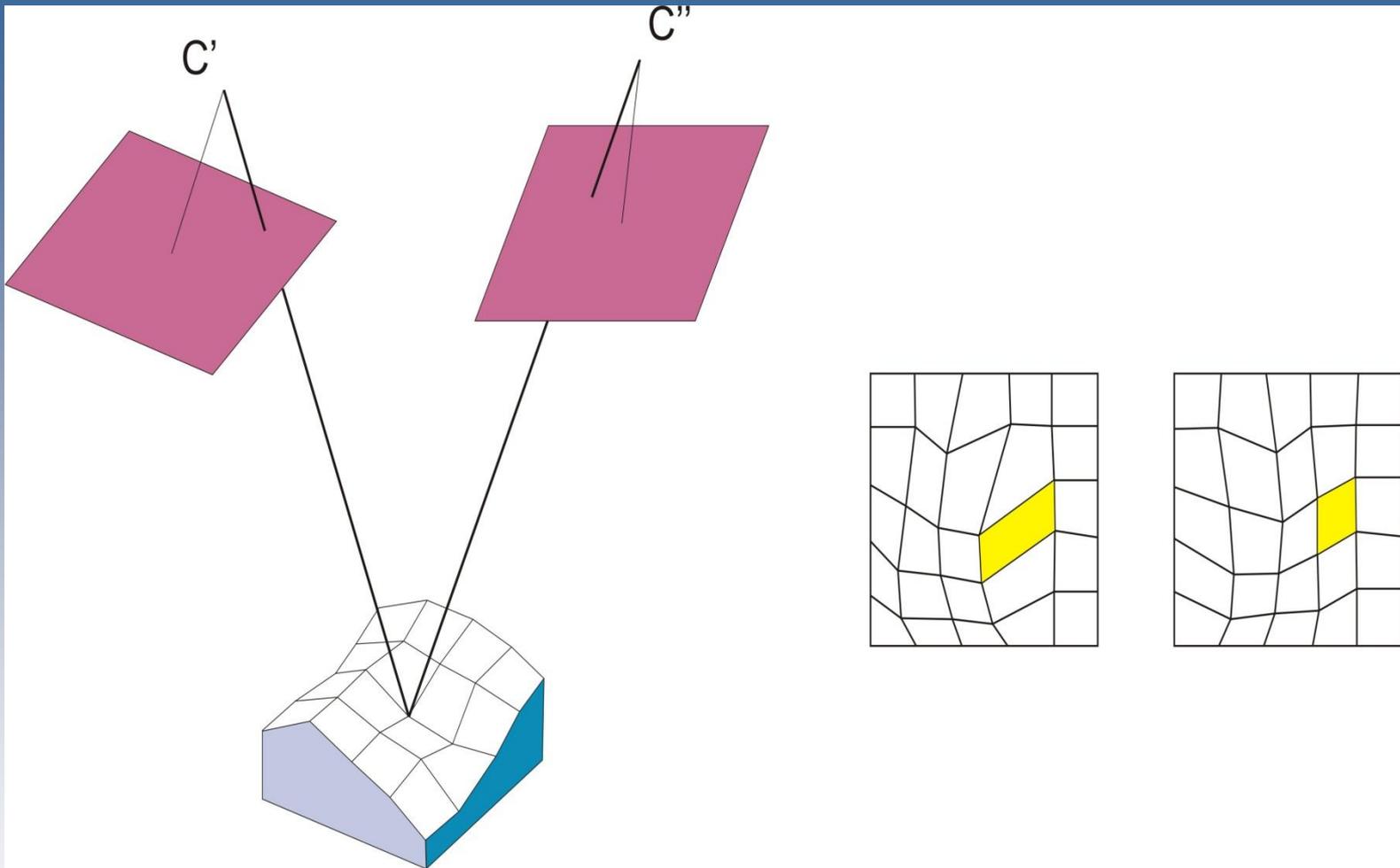
Rotación alrededor
del eje y



Rotación alrededor
del eje z

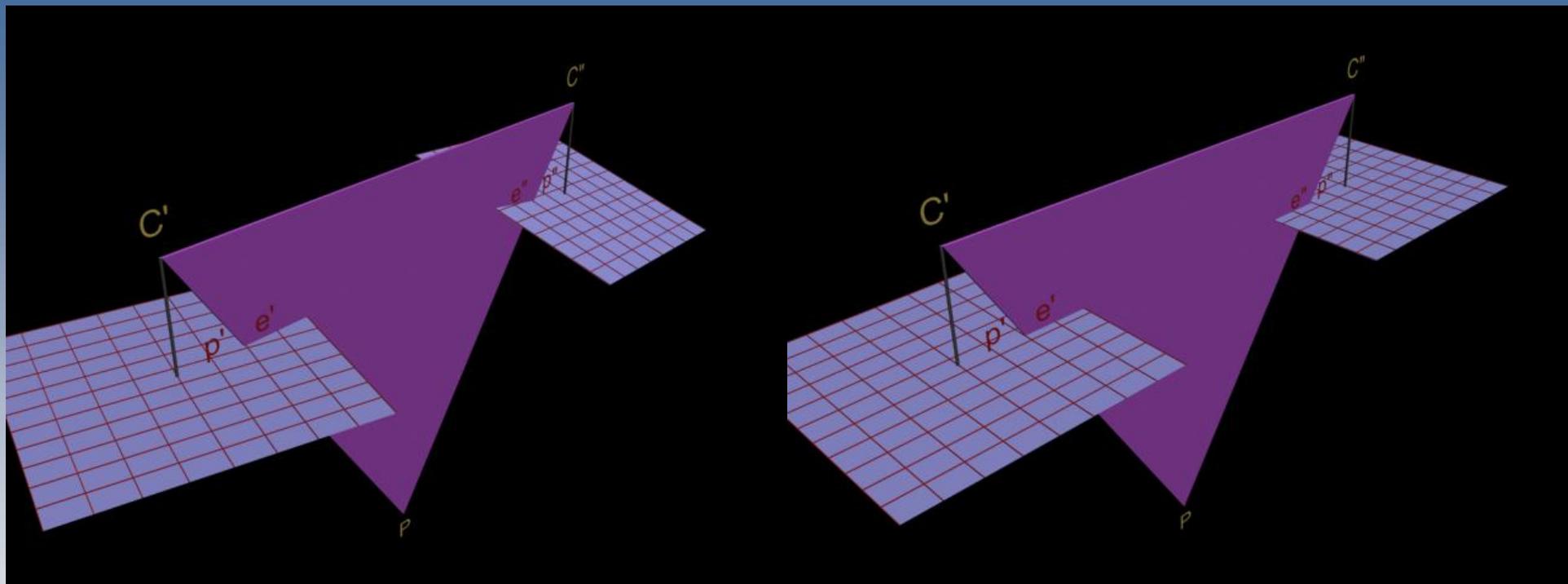


Efecto en el índice de semejanza de una superficie inclinada



Efecto causado por el relieve del terreno en el índice de semejanza al realizar una correspondencia por áreas

Imagen Normalizada



Los algoritmos de visión estereoscópica mediante sistemas de fotogrametría digital requieren que los pares estereoscópicos tengan los elementos o detalles homólogos localizados en un sistema de referencia de fila y columna esto se conoce como imagen normalizada.

La relación entre las imágenes puede expresarse convenientemente por las ecuaciones de colinealidad o transformación proyectiva puesto que ambas imágenes, la original y la normalizada son entidades bidimensionales.

Transformación utilizando las ecuaciones de colinealidad

$$x_n = -f_n \frac{r_{11}x_0 + r_{12}y_0 - r_{13}f_0}{r_{31}x_0 + r_{32}y_0 - r_{33}f_0}$$

$$y_n = -f_n \frac{r_{21}x_0 + r_{22}y_0 - r_{23}f_0}{r_{31}x_0 + r_{32}y_0 - r_{33}f_0}$$

Transformación proyectiva

$$x_n = \frac{c_{11}x_0 + c_{12}y_0 + c_{13}}{c_{31}x_0 + c_{32}y_0 + 1}$$

$$y_n = \frac{c_{21}x_0 + c_{22}y_0 + c_{23}}{c_{31}x_0 + c_{32}y_0 + 1}$$

Donde x_0, y_0 son las fotocoordenadas, de las imágenes originales; x_n, y_n las de las imágenes normalizadas y $r_{11} \dots r_{33}$ son los elementos de la matriz \mathbf{R}_n

La combinación de las tres rotaciones o giros elementales de las imágenes resulta en la matriz de rotación de la base R_b

$$R_b = R_k R_\varphi R_\omega$$

$$R_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \text{sen}(\omega) \\ 0 & -\text{sen}(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix}$$

$$R_\varphi = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \text{sen}(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix}$$

$$R_n = R_b R^T$$

$$R_k = \begin{bmatrix} \cos(k) & -\text{sen}(k) & 0 \\ \text{sen}(k) & \cos(k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

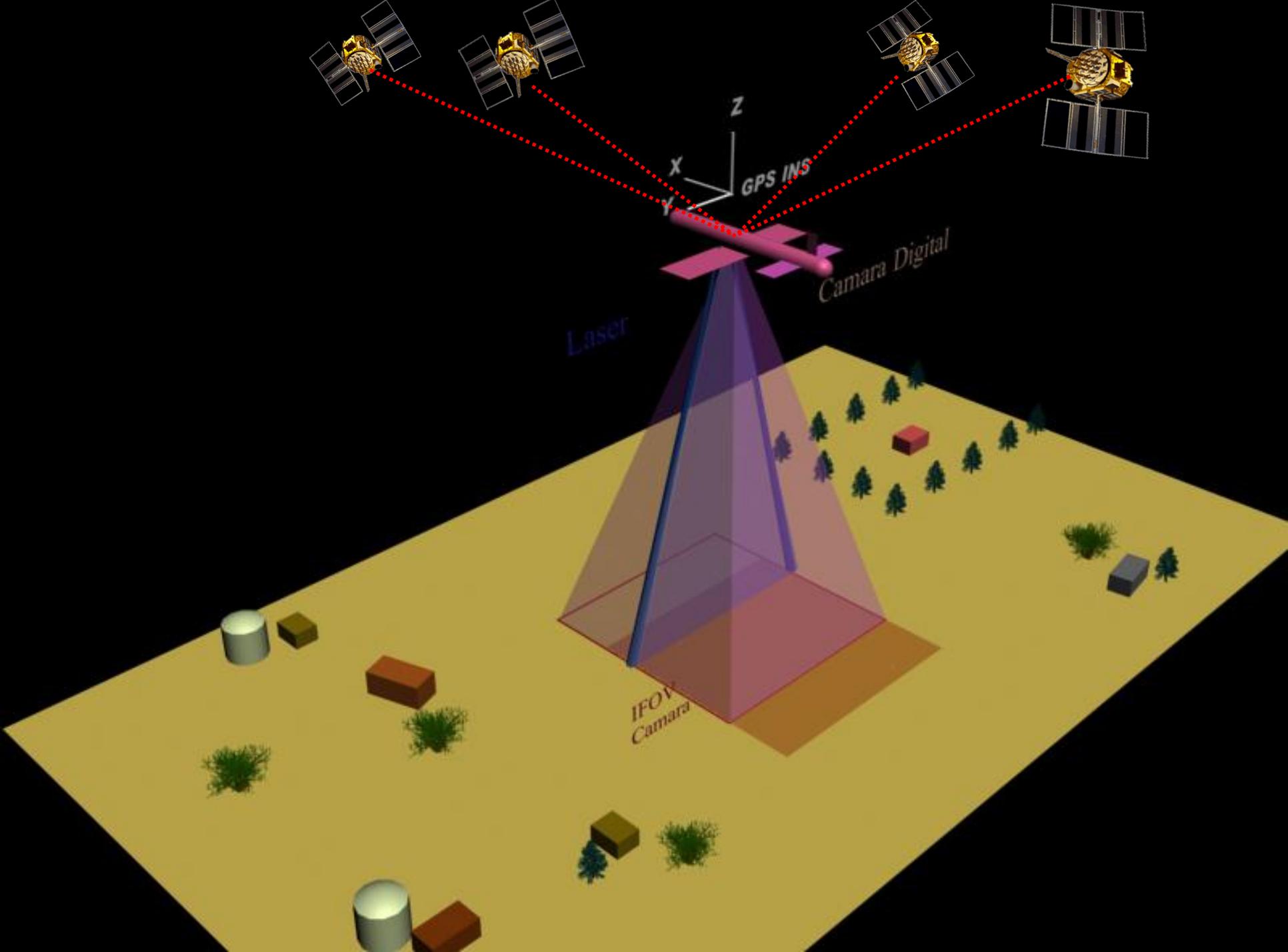
La matriz de rotación normalizada R_n , es el producto de dos matrices, la matriz de rotación que permite pasar de la imagen original a la vertical y la matriz de rotación de la base. Puesto que R^T es la matriz de la orientación externa es distinta para cada imagen por tanto R_n debe determinarse para las dos imágenes del par estereoscópico.

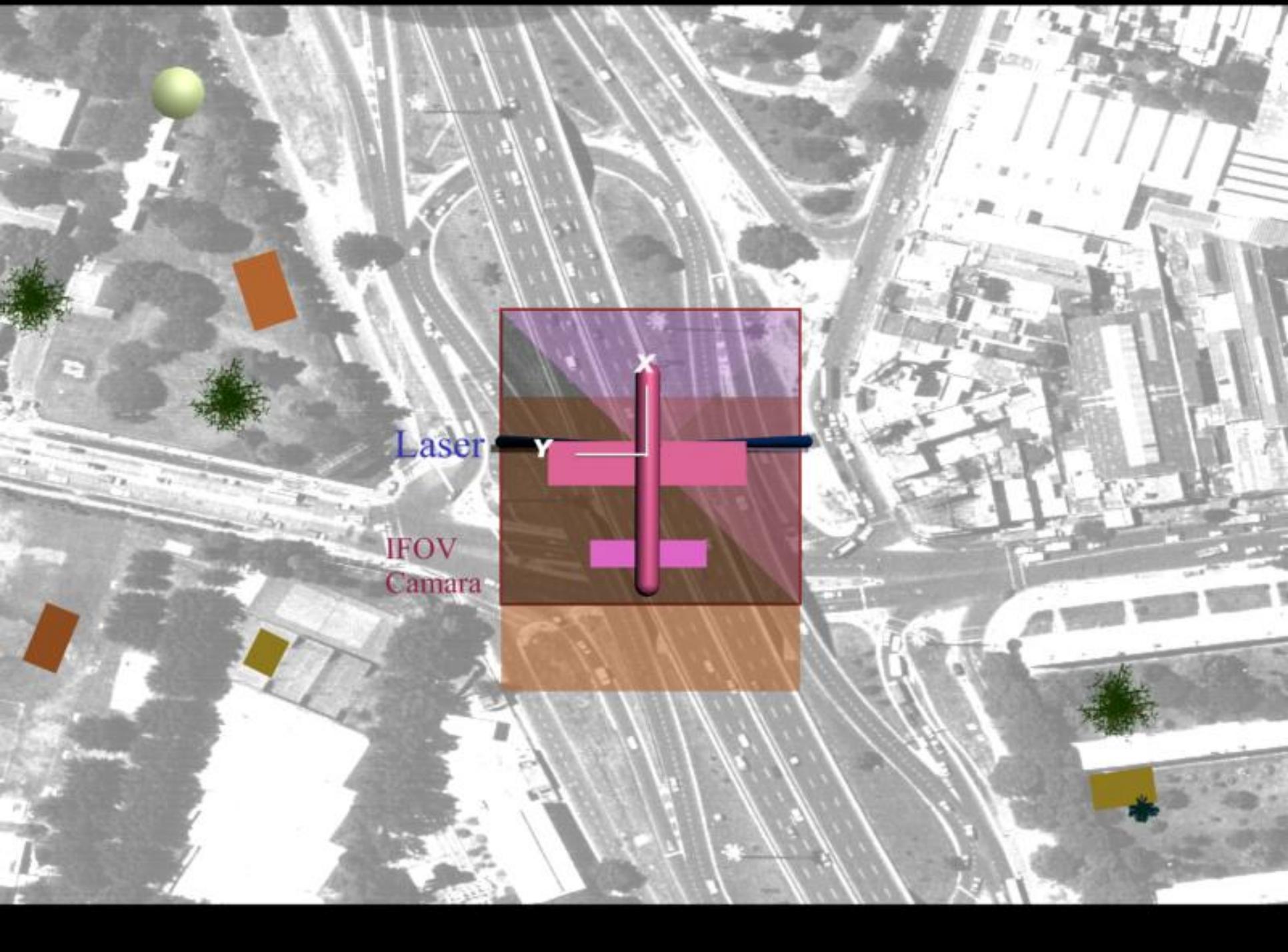
Fotogrametría Digital y Tecnología LIDAR

Los aero relevamientos modernos combinan la fotogrametría digital con las técnicas laser scanning. La fotogrametría digital posibilita las tareas de fotointerpretación a través de los procedimientos de visión estereoscópica y la tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging), define la altimetría. De esta manera es posible construir modelos tridimensionales de la superficie del terreno con muy buena exactitud tanto planimétrica como altimétrica.

La tecnología LIDAR es un sistema activo, montado normalmente sobre aviones o helicópteros, basado en un sensor que lleva a cabo la emisión de un pulso laser y la medida del tiempo que tarda dicho pulso en llegar a la superficie y volver al punto de emisión. Estos pulsos van desde la luz ultravioleta a la infrarroja, variando su longitud de onda entre 0.3 y 1.5 μm .

Los datos obtenidos por los componentes principales, Cámara Métrica Digital, Laser, GPS y Sistema Inercial, requieren procesamientos para lograr el MDT o MDE, eliminando todos aquellos datos causantes de error, principalmente altimétricos, al relacionarlos con puntos de control terrestre y luego aplicando procesos de ajuste. Los Modelos Digitales Altimétricos así obtenidos son de alta resolución (sub-métricos), tanto del terreno como de la superficie del mismo (objetos naturales o artificiales).





Laser

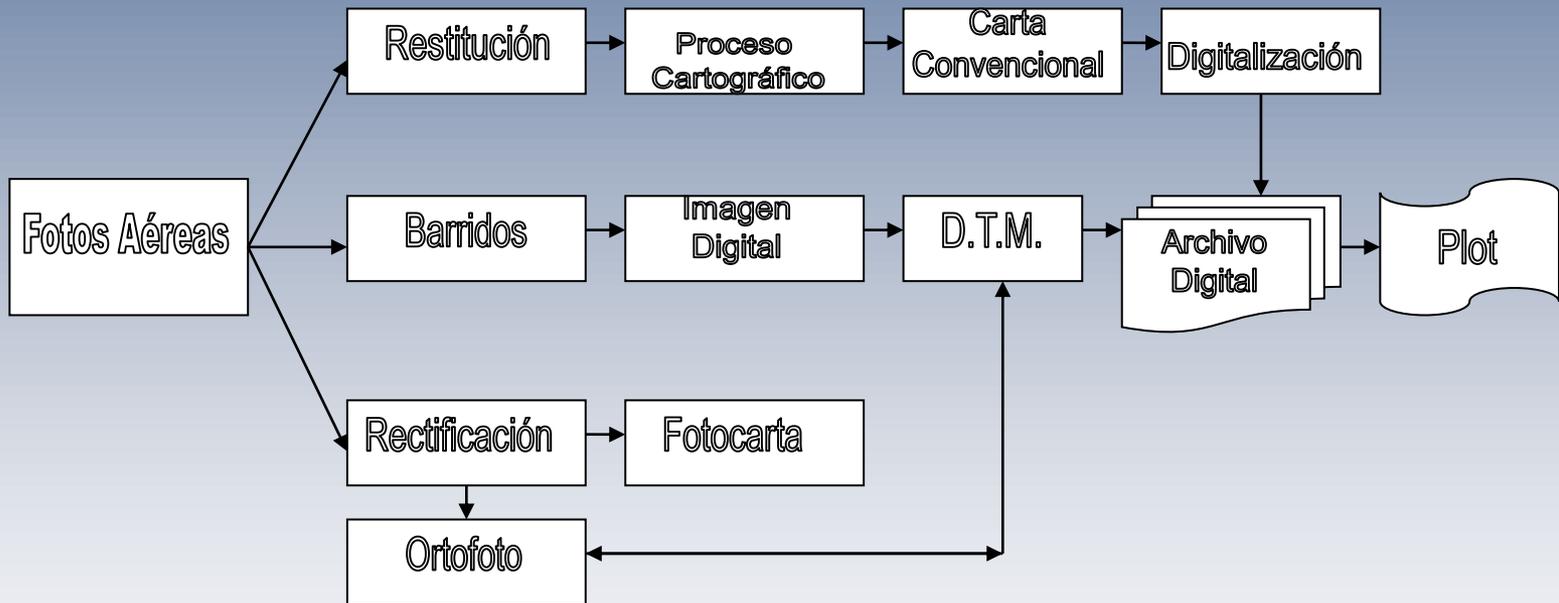
IFOV
Camara

INS - GPS

El Sistema de Navegación Inercial (Inertial Navigation System) está basado en el principio “*volar desde*”. Se trata de un conjunto de sensores empleados para obtener la aceleración en cada uno de los tres ejes de movimiento X , Y , y Z . De esta forma, a partir de unos sensores de movimiento (acelerómetros), unos sensores de rotación (giróscopos) y un pequeño computador (necesario para obtener la posición y la velocidad integrando la aceleración), se puede calcular la posición, orientación y velocidad de un objeto sin necesidad de una referencia externa. Los sistemas de navegación inerciales se emplean en aeronaves, misiles y naves espaciales, ya que un INS es capaz de registrar un cambio en la posición geográfica ($\Delta\phi$ o $\Delta\lambda$), un cambio de velocidad (módulo y dirección) y un cambio de orientación (rotación alrededor de un eje). Como este sistema no necesita una referencia externa (sólo inicialmente), es inmune a las interferencias que podría sufrir otro sistema, como el GPS..

Para el posicionamiento de cámaras aéreas o sensores utilizando la tecnología GPS, la situación de trabajo es diferente a un relevamiento pseudo estático de puntos sobre la superficie de la tierra. En un vuelo fotogramétrico la velocidad de operación del avión puede superar los 500 Km/h. Normalmente el receptor GPS y la cámara funcionan en forma independiente. Para el posicionamiento, las observaciones del receptor GPS se realizan a intervalos de tiempo de 0.5 sg. a 1 sg., en ese lapso el avión recorre una determinada distancia, por lo tanto las exposiciones de la cámara se realizan según lo programado para la planificación del vuelo fotogramétrico y posteriormente se calculan los centros de perspectiva por interpolación con los datos de la trayectoria del avión con coordenadas cada 0.5 sg.

IMAGEN FOTOGRÁFICA Y SUS PRODUCTOS



MDE - DTM

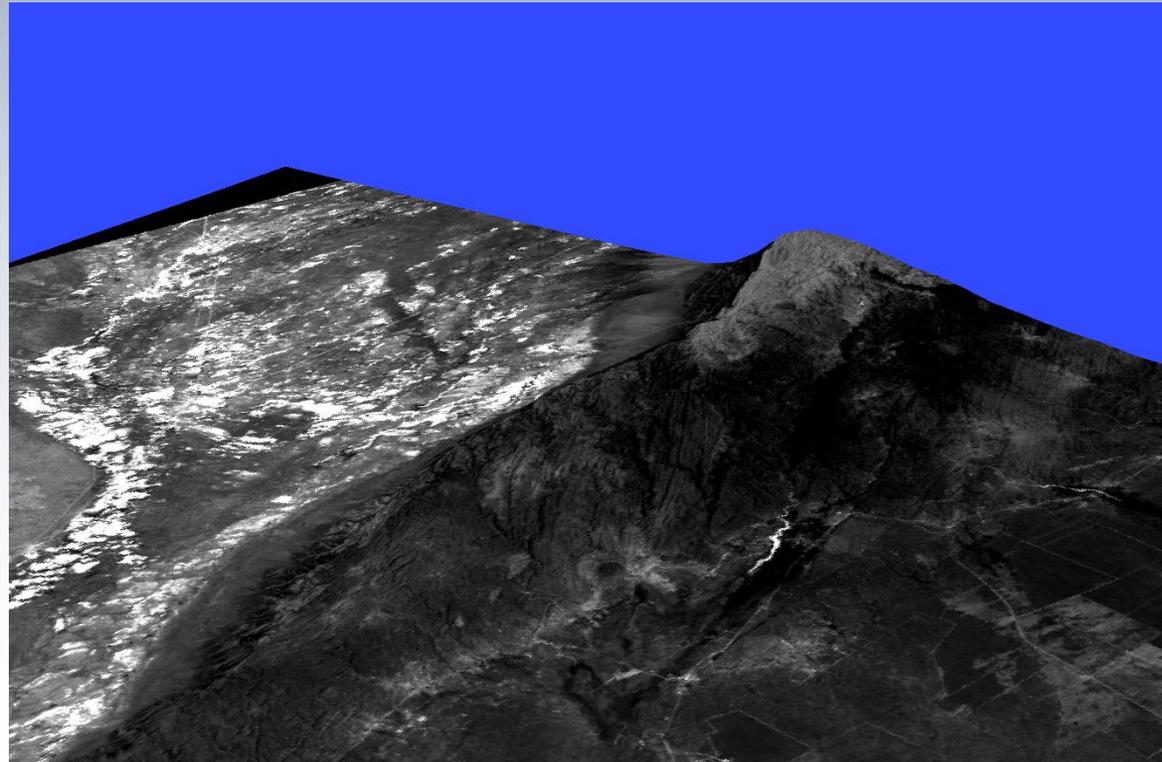
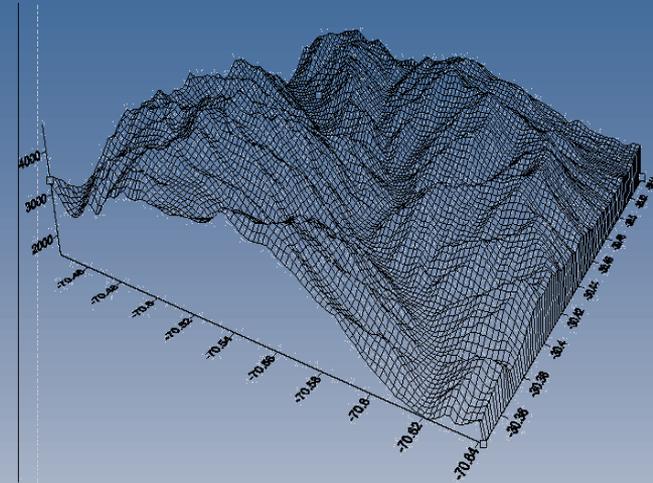
Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) permiten efectuar la representación de la superficie topográfica de la Tierra. Esta superficie se divide en celdas de una determinada dimensión que se agrupan formando una grilla ordenada. Cada celda tiene una ubicación georreferenciada, y a la misma se le asigna un valor de altura respecto del nivel medio del mar.

Los métodos para construir los MDE son variados.

- Altímetros transportados por aviones (sistema laser), o satélites que permiten determinar las diferencias de altitud entre la superficie terrestre y el vehículo que transporta el altímetro.

- Interferometría de imágenes radar, que consiste en un sensor RADAR que emite un impulso electromagnético y lo recoge tras reflejarse en la superficie terrestre, conociendo el tiempo de retardo del pulso y su velocidad, puede estimarse la distancia entre el satélite y el terreno (SRTM).

- Utilizando curvas de nivel se construyen MDE. Las curvas de nivel provienen de levantamientos topográficos convencionales o restitución fotogramétrica.



Aerotriangulación

Triangulación aérea analógica

La triangulación aérea se utiliza en los levantamientos fotogramétricos para establecer el sistema externo de orientación de los modelos. Primeramente se exigía que todo modelo fotogramétrico tuviera apoyo terrestre en cada fotografía, y aun hoy día subsiste esta necesidad cuando se trata de levantamientos de precisión sobre los cuales han de apoyarse trabajos de ingeniería. Ahora bien, para levantamientos de escala reducida o mediana que producen en general una cartografía acorde (1/50000, 1/25000) las precisiones gráficas arrojan errores planimétricos que no hace necesario tener apoyo en cada fotografía, sino cada tres, cinco y en algunos casos más fotografías. Los puntos intermedios se resuelven por una triangulación aérea, que requiere un apoyo terrestre perfecto y una gran precisión dimensional en la primera imagen estereoscópica. Este apoyo fotogramétrico exige la orientación absoluta del primer modelo o imagen espacial sobre la red de apoyo terrestre, las demás fotografías pueden referirse a este primer modelo por medio de la orientación relativa de las siguientes.

La resolución del problema de la orientación absoluta de un modelo, precisa del conocimiento de las coordenadas planimétricas de, por lo menos, dos puntos y de las altimétricas de tres puntos. Normalmente esto se consigue conociendo las coordenadas X, Y, y Z de dos puntos y la Z de un tercero. La triangulación aérea comenzó a resolverse en forma analógica mediante la creación de instrumentos que permitieran materializar de forma fidedigna en gabinete la geometría de la línea de vuelo. De esta forma se consigue dar escala y nivelar el conjunto de modelos que constituyen una faja en lugar de tener que hacerlo modelo por modelo. El procedimiento que se utiliza es analógico tanto en la medida de coordenadas como en el ajuste de las observaciones. Se parte de un primer modelo de orientación absoluta conocida realizando la intersección de haces de rayos homólogos del fotograma n con el $n - 1$, que permanece fijo, mediante la orientación relativa de la cámara n . De esta manera se coloca en escala y nivela el modelo así formado con respecto al sistema de coordenadas precedente.

En la faja siempre se debe contar con otro modelo final que permita realizar su orientación absoluta con el fin de conocer los errores de cierre de las coordenadas que se van determinando en el proceso y proceder a su compensación. En este acoplamiento de modelos se produce una serie de errores que se propagan a lo largo de todo el recorrido. Errores debidos a las inclinaciones de las cámara en vuelo que no son correctamente eliminados en el proceso de orientación relativa, $d\phi$, $d\omega$, y $d\kappa$, también errores debidos a la transferencia de escala, δs .

Triangulación radial

La triangulación radial es un método para la determinación del control horizontal, en el cual el ajuste permite tanto procedimientos de compensación gráfica como analítica. Su principal aplicación ha estado centrada en la obtención de control para planos catastrales y actualización de mapas, pero en la actualidad ha perdido interés. Una de las principales limitaciones es la topografía del terreno, puesto que cuando este no es llano o suavemente ondulado, sus precisiones no son aceptables.

El principio de este método de aero triangulación, esta basado en el hecho de que los ángulos medidos desde el centro perspectivo del fotograma son ángulos horizontales verdaderos. Esto es debido a que los desplazamientos de la imagen de los puntos producto del relieve del terreno son en sentido radial. Esta consideración también es extensiva a la distorsión del objetivo y a la refracción atmosférica. Por lo tanto, si se considera la fotografía aérea absolutamente vertical, el punto nadir y el punto principal coinciden y en ese punto no existe desplazamiento de la imagen de los puntos del terreno. La metodología de aero triangulación radial podría ser de aplicación si se emplean los nuevos software de modelado gráfico

Triangulación aérea analítica

Con el mejoramiento de los sistemas computacionales y su irrupción en la fotogrametría, los métodos ópticos mecánicos para conseguir la formación de los modelos dejan paso a la fotogrametría analítica que tiene como uno de sus principales objetivos a resolver el de la triangulación aérea. Los nuevos métodos de compensación como el método de compensación en bloque, utilizan la formación de modelos independientes y los programas de compensación según algoritmos.

En el método de modelos independientes, el modelo es la unidad geométrica que sigue teniendo tratamiento analógico, aquí el modelo se forma en un sistema de coordenadas propio, no existiendo un sistema de referencia único de toda la faja como en el caso de la triangulación aérea analógica. El enlace de modelos se realiza con las coordenadas de los puntos de superposición y además con las de sus centros de proyección a través del programas que relacionan las diferentes fajas.

Triangulación aérea digital

La triangulación aérea automática permite combinar la transferencia de puntos con la medida simultánea de puntos homólogos sobre diferentes Modelos. Debido a que el tiempo de computo no es significativo utilizando los algoritmos implementados en lenguajes de programación modernos, se puede superar el límite de nueve puntos por Modelo para asegurar las precisiones.

INFORMACION TERRITORIAL PARA LA GESTIÓN

DATOS:

- Relevamiento de Usos del Suelo (RUS)
- Bases de datos del Mercado Inmobiliario
- Fuentes Externas de datos estadísticos
- Imágenes satelitales y fotos aéreas
- Vuelo Fotogramétrico
- Cámara 360°
- Radarización del Subsuelo

INTERPRETACION DE FOTOGRAFIAS AÉREAS E IMAGENES SATELITALES

Imagen satelital de la Ciudad de Buenos Aires con fecha de toma del 2008, y la imagen de archivo 2004 para poder analizar con esta herramienta, los procesos de cambio urbano y la dinámica territorial en ese periodo, tales como ampliación de los asentamientos, espacios verdes, infraestructura nuevas, áreas edificadas, etc.

2004



2004



2008



2008



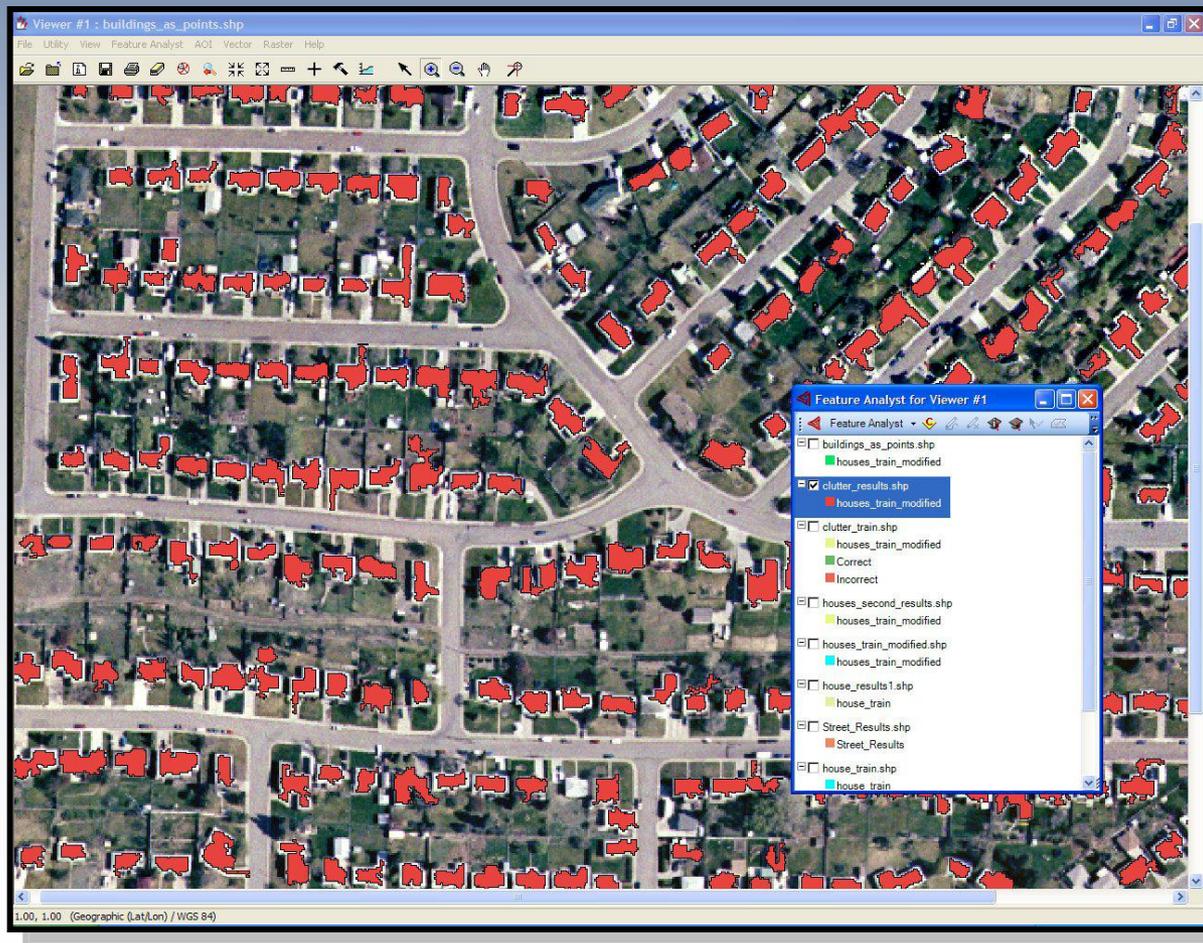
FOTOGRAFIA AEREA

Se utiliza la Fotogrametría Digital para:

- Actualización Catastral de la Ciudad, pudiendo determinar: superficie construida cubierta y descubierta, cantidad de plantas y tipo de materiales constructivos, construcciones no declaradas, o de zonas aún no relevadas a nivel catastral.
- Generación automática de DTM (grilla de cotas), lo que permite construir Modelos Digitales de Elevación.
- Mosaicos de Ortofotos, el cual permite una visión general de la ciudad, corrigiendo las deformaciones de la toma de fotos, con una perspectiva ortogonal.
- Relevamiento de Espacios Verdes.
- Relevamiento de Elementos que componen el espacio público (tapas, alcantarillas, antenas, postes, paradas de colectivos, luminarias, rampas, etc.)

AEROFOTOINTERPRETACIÓN

Un vuelo fotogramétrico realizado con una cámara métrica digital permite un relevamiento de alta precisión del terreno que junto a un equipo de Stereo Analisis de Fotogrametría Digital, posibilita obtener una visión 3D del terreno y una captura de la información con un Software GIS, para producir una base de datos consolidada e integrada al proceso de actualización del catastro de una ciudad.



AEROFOTOINTERPRETACIÓN



LA FOTOGRAMETRIA Y EL PLANEAMIENTO URBANO

La fotogrametría es la disciplina que realiza mediciones e interpretaciones por medio de imágenes aéreas y satelitales, para obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición) de un área u objeto. La toma de fotografías en serie, con una determinada superposición, permite generar un efecto de tres dimensiones (3D) y se convierte en una herramienta ideal para la captura de datos del terreno. El departamento de fotogrametría fue tradicionalmente el área generadora de los datos básicos para el catastro, y en la actualidad provee de información fundamental para la toma de decisiones en una gran variedad de temáticas.

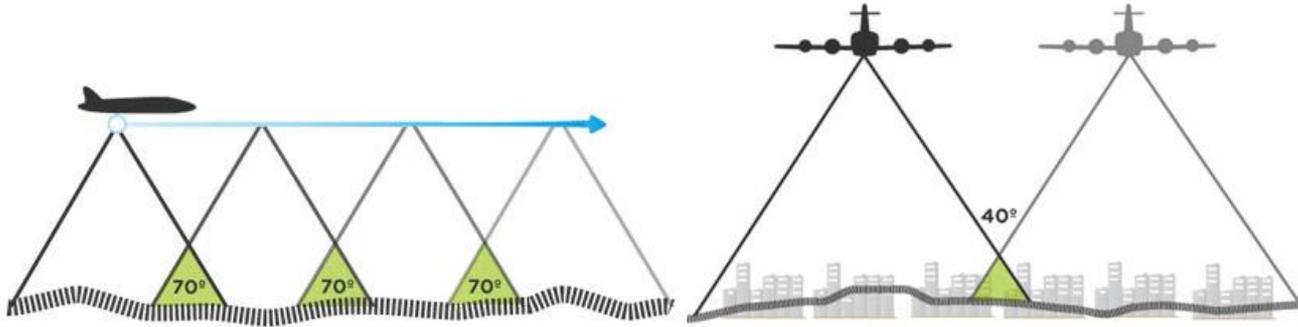
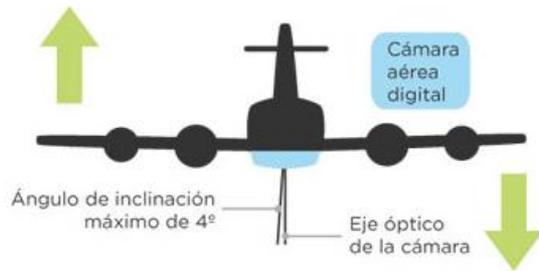
En 2009, se efectuó un vuelo fotogramétrico Color en la Ciudad de Buenos Aires que cubre la totalidad del territorio porteño. Este vuelo se realizó con la cámara UltraCamD0, una cámara inercial de $7 \mu\text{m}$ de resolución a una altura de 1.000 metros, con una superposición entre imágenes de un 80% longitudinal y un 60% transversal. La superposición entre las fotos permite minimizar los errores que pudieran surgir de los cambios de perspectiva entre toma y toma, o de las sombras que proyectan los edificios.

Además del vuelo digital de 2009, la Ciudad de Buenos Aires conserva las fotografías aéreas realizadas desde el año 1929 en adelante. Estas imágenes representan un archivo de incomparable riqueza para el estudio de la historia de la producción de la Ciudad. La Secretaría de Planeamiento cuenta con mosaicos elaborados mediante la georreferenciación de fotogramas de 1929, 1937; 1940; 1965; 1978; 1989; 1997 y 2002.



Camera details:

- Panchromatic, RGB and NIR imagery captured on a single pass
- 11500 pixels perpendicular to the flight direction
- 7500 pixels along the flight direction
- Focal length = 101.400mm
- CCD array sensor size = 103.5 x 67.5mm
- CCD pixel size = $9 \mu\text{m}$



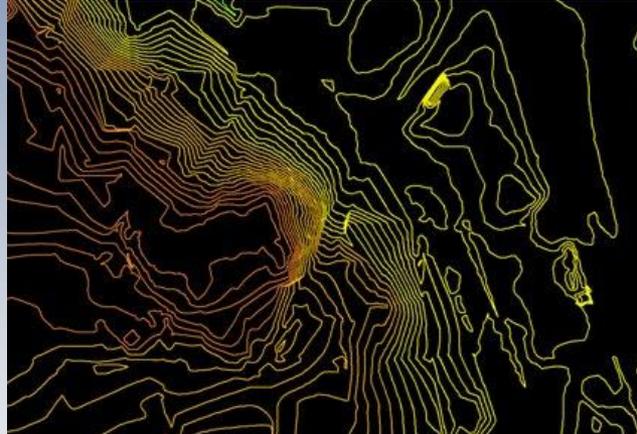
Aparato "Stereo Analys" Digital

Las imágenes superpuestas y la visión 3D posibilitan, tras el procedimiento de aerotriangulación, obtener coordenadas planas y de latitud y longitud, además, la altura o cota precisa de cualquier objeto en el terreno.

El primer paso de este proceso es la medición de puntos de apoyo fotogramétrico (PAF), tanto en la imagen como en el terreno. Estos últimos permiten controlar la medición en gabinete. La cantidad de PAF necesaria y los parámetros de precisión que se requieren varían según la finalidad del trabajo. Para realizar un mosaico, una fotografía ortorrectificada, un modelo digital o la restitución fotogramétrica de un área o edificio, la cantidad y precisión de los PAF es diferente.

Para realizar el control de calidad de los productos elaborados mediante las técnicas de fotogrametría, se seleccionan diversos sectores de la ciudad de los cuales se relevaron datos de latitud, longitud, cota y superficie, en gabinete y en campo.



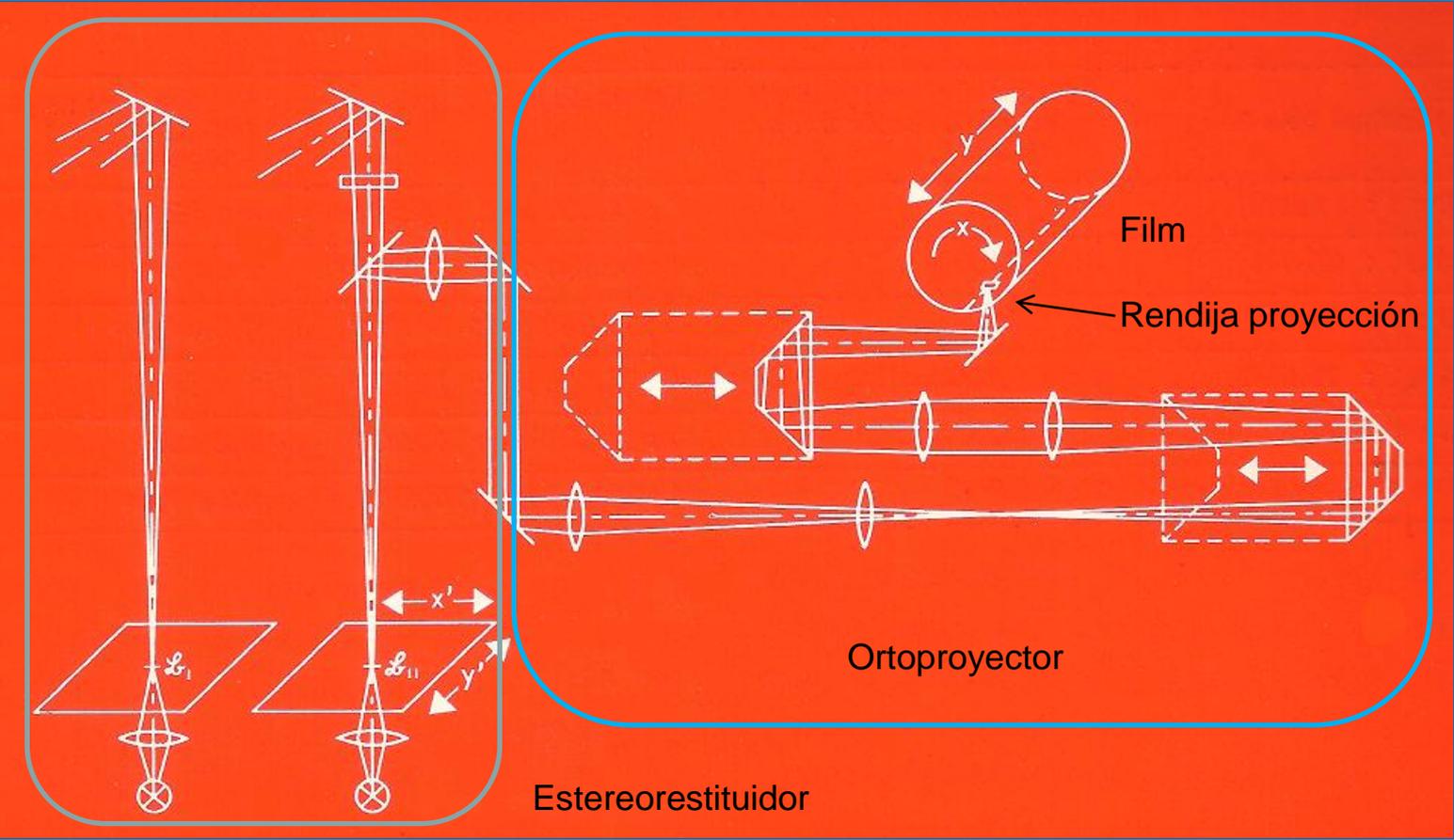


*DEM (Digital Elevation Model).
Plaza San Martín.*

A partir de la aerotriangulación se crea una malla densa de puntos con coordenadas X, Y, Z (también latitud, longitud y cota), lo cual permite generar un Modelo Digital de Elevación o DEM (*Digital Elevation Model*). Esta representación de las diferentes alturas del terreno, asociada a las denominadas *break lines* (líneas acotadas sobre terreno), posibilita la generación de curvas de nivel, con una equidistancia a definir según el objetivo del proyecto.

Ortofotografías y mosaicos

Las ortofotos o fotografías ortorrectificadas son imágenes georreferenciadas y rectificadas diferencialmente a cota de plano de referencia. Básicamente es una imagen en la que se han eliminado substancialmente las deformaciones resultado de la proyección central en terrenos con desniveles, obteniéndose así una imagen cuyos elementos son proyectados ortogonalmente. Los mosaicos, por su parte, son imágenes del vuelo georreferenciadas que, si bien no poseen un grado de precisión planimétrica similar al de las ortofotos (debido al desplazamiento radial), se utilizan para análisis de cambios en la morfología, ilustrar publicaciones y complementar informes.



Sistema de ortoproyección analógico



REFERENCIAS

- Carta de situación de Villa Carlos Paz
- Carta de detalle de Villa Carlos Paz
- Mapa topográfico de la zona de estudio
- Mapa de la zona de estudio
- Mapa de la zona de estudio
- Mapa de la zona de estudio

VUELO FOTOGRAFICO

Fecha: 1968 m.
Hora: 10:00 h.
Altitud: 2000 m.
Velocidad: 1000 m.



PUNTO INGENIERICOS

Orden	Coordenadas
1	25 25 2500
2	25 25 2500
3	25 25 2500
4	25 25 2500
5	25 25 2500

Las coordenadas de los puntos y las elevaciones topográficas fueron obtenidas por mediciones geodésicas. Se utilizó el sistema de coordenadas UTM y el datum de 1960.

ESCALA 1:25.000

VII CONGRESO NACIONAL DE AGROMENSURA - VILLA CARLOS PAZ
ORTOFOTOCARTA formato especial, sin misión geográfica
y con representación básica
Tiempo total de producción: 6 días

Ortofotocarta IGM, E=1:25000