

DETERMINACION DE LOS PARÁMETROS INTERNOS DE LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS DIGITALES NO MÉTRICAS, OBTENIDAS UTILIZANDO UN SENSOR CCD

Alexander Mogollón Díaz *

División de Zonas Costeras, Centro Control Contaminación del Pacífico – CCCP
Vía El Morro, Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia
Tél: +57 (2) 727 26 37, Fax: +57 (2) 727 11 80
e-mail: cccp@cccp.org.co
amogollon@cccp.org.co *

Recibido en octubre de 2003; aceptado en noviembre de 2003

RESUMEN

Las fotografías aéreas digitales de formato pequeño, resultado de la utilización de sensores remotos CCD¹ (Charge Coupled Device), son una alternativa en adquisición de información espacial en términos de resolución espacial y temporal (Beyer, 1991). La literatura sobre sensores remotos coincide en afirmar que la solución más precisa de las ecuaciones de colinealidad se consigue con mínimo cuatro puntos de control, esto no es aplicable en las zonas costera caracterizadas por la carencia de mojones e intersecciones de vías, que en general son la base para la ubicación de los puntos de control terrestre. El replanteamiento de las ecuaciones de colinealidad utilizando los parámetros internos de la cámara Nikon D1H, en un sistema expandible a partir de series de Taylor, reduce el número de puntos de control sugeridos por la literatura, lo cual es una alternativa viable de aplicar en la zona costera. El planteamiento de la georreferenciación de las fotografías implica la obtención de un sólo punto de control terrestre por cada foto, utilizando GPS por las difíciles condiciones de acceso que no permiten amojonar la zona. Esto exige conocer la altura de vuelo y cada uno de los parámetros de orientación interna de la cámara Nikon ($f, \lambda_h, \Delta r$), para poder plantear una combinación de ecuaciones que permitan obtener las coordenadas de la fotografía.

Palabras Claves: Sensor Remoto CCD, Cámara Nikon D1H, Parámetros Internos, Georreferenciación, Ecuaciones Colineales, GPS.

ABSTRACT

The digital air photographs of small format result of the use of remote sensors CCD (Charge Coupled Device), they are an alternative in acquisition of space information in terms of space resolution and storm (A.H Beyer 1991). The literature on remote sensors coincides in affirming that the solution but specifies of the collinearity equations it is gotten with minimum four control points, this is not applicable in the coastal areas characterized by the lack of markers and intersections of roads that are the base for the location of the points of terrestrial control in general. The position of the collinearity equations using the internal parameters of the camera Nikon D1H, in a scalable system starting from series of Taylor, it reduces the number of control points suggested by the literature that which is a viable alternative of applying in the coastal area. The position of the georeferencing of the photographs implies the obtaining of a single point of terrestrial control for each photo using GPS for the difficult access conditions that don't allow to materialize the area. This demands to know the flight height and each one of the parameters of internal orientation of the Camera Nikon D1H to be able to outline a combination of equations that they allow to obtain the coordinates of the photo.

Key Words: Remote Sensors CCD, Camera Nikon D1H, Internal Parameters, Georeferencing, Collinearity Equations, GPS.

¹ El sensor CCD agrupa un conjunto de fotodetectores, agrupados de manera matricial que convierten la luz en información digital.

INTRODUCCIÓN

El Centro Control Contaminación del Pacífico, CCCP, adquirió una cámara fotográfica Nikon D1H la cual es un sensor CCD, tipo reflex, caracterizado por ser no métrico y tener una distancia focal flexible (25mm a 80 mm).

Entre sus cualidades se destaca la posibilidad de obtener directamente información digital con una resolución espacial ajustable a los propósitos de las fotografías, en color verdadero, además de la operabilidad para trabajar con dispositivos de Global Position System, GPS. Este sensor será utilizado para la obtención de información geográfica y generación de cartografía base de los estudios planeados a futuro por el CCCP.

La generación de cartografía costera de referencia permitirá actualizar la información espacial existente del litoral Pacífico, con fines marítimos e investigativos. El método alternativo para la captura de información geográfica con la Nikon D1H se abordará en forma escalable, comenzará con la realización de un fotomosaico con los agregados cartográficos básicos (grilla, escala, rótulo y leyenda) en el área de estudio seleccionada; posteriormente, se construirá cartografía en formato vectorial evaluando la exactitud posicional que presenta el producto y así determinar su efectividad.

El obstáculo de este proyecto es la georreferenciación de la información. La zona costera (litoral Pacífico colombiano) se caracteriza por no contar con puntos materializados o detalles destacables y precisos, tales como intersecciones de caminos o construcciones, lo cual hace que los puntos de control útiles para el fotocontrol sean mínimos.

Si se utilizará una georreferenciación polinómica para las fotografías aéreas obtenidas con la Nikon D1H, se debe asegurar que los puntos de control estén muy bien distribuidos sobre el espacio de trabajo implicando y que el terreno ofrezca las características

para la ubicación de una apropiada cantidad de puntos de control. Factores que no ofrece la zona de interés.

Por esta razón se conceptualizó un método de georreferenciación diferencial, que permite vencer las dificultades del terreno. Éste se basa en el planteamiento de un conjunto de ecuaciones colineales que describen las relaciones existentes entre las coordenadas de la foto, las coordenadas terrestres y la orientación de los parámetros que intervienen en el momento de la captura de la información (deriva, cabeceo, ladeo, rotación y los parámetros internos del sensor).

Para adoptar este concepto de georreferenciación, el CCCP realizó un modelo geométrico-matemático para calcular los parámetros internos de la cámara Nikon D1H, que controla las deformaciones en posición de las fotografías las cuales obedecen en mayor medida a la distorsión radial de los lentes.

La metodología de calibración geométrica de la Nikon D1H para obtener los parámetros internos, con el fin de utilizar esta información en la realización de la georreferenciación diferencial de la fotos tomadas en el área de estudio, es el propósito principal de este artículo.

El problema más común para realizar este tipo de georreferenciación en las zonas costeras se debe a la poca posibilidad de generar un control terrestre apropiado (cuatro puntos de control por cada modelo estereoscópico)², dado que la cobertura predominante en la fotografía es el mar o la arena y las condiciones para amojonar la zona no son la mejores.

Se plantea una georreferenciación basada en encontrar los parámetros internos de las fotografías (distancia focal, distorsión radial del lente y factor de escala de desplazamiento) y la obtención de un sólo punto de control con coordenadas geocéntricas³ conocidas para plantear las ecuaciones de colinealidad, en términos de series de Taylor y utilizar la teoría de mínimos cuadrados.

² La técnica de resección espacial contempla mínimo tres puntos de control en la dirección X, Y, Z y de esta forma obtener los seis parámetros de la orientación externa asociados con la fotografía. Este método asume que se conocen los parámetros internos de la cámara. El cuarto punto de control se utiliza como control sistemático para las correcciones de los resultados.

³ La fotogrametría dentro de sus cálculos tiene en cuenta la curvatura de la superficie terrestre, considerando un valor de corrección en el modelado de la geometría en el momento de la toma de datos por este factor. El valor obtenido depende del tipo de coordenadas que se obtengan de la superficie terrestre. Al ser egocéntricas, son referidas al centro de masas origen del sistema WGS 84, en el cual trabajan directamente los GPS. Al ser topocéntricas, el sistema está referido a un punto datum, el cual difiere del anterior. Esto implica una conversión de un sistema a otro, aumentando el tiempo en los procedimientos involucrados en la georreferenciación diferencial; por tal razón es recomendable que los puntos de control sean referidos a la red geodésica Magna, para el caso de Colombia.

ÁREA DE ESTUDIO

La primera toma de fotografías aéreas verticales se realizará en la zona costera del departamento de Nariño, comprendida entre la latitudes 1°49' N y 1°50'57" N y longitudes 78°32'23" y 78°33'21" W; la cual se justifica porque en esta área se encuentran poblaciones como Curay, Salahonda y Bocagrande, que representan el 25% de la población existente del litoral Pacífico colombiano, de donde no se tiene información cartográfica base de entidad alguna del nivel local o nacional.

La metodología es aplicable a cualquier zona con características similares, costas o desiertos, ya que los parámetros de calibración internos son independientes de la zona a fotografiar.

METODOLOGÍA

Los métodos polinomiales para georreferenciar los productos de un sensor remoto son una aproximación matemática que transfieren los datos de un sistema a otro, sin tener en cuenta las desviaciones de la plataforma y el sensor. Son aplicables, exitosamente, a imágenes de resolución espacial media⁴ (~5m) en imágenes Spot o Landsat (Jensen 1999).

Aplicar estos métodos en las fotografías aéreas digitales obtenidas con la Nikon D1H no garantiza obtener información precisa; por tal razón se optó por utilizar la georreferenciación diferencial, que involucra la obtención de los parámetros internos de la cámara y la utilización de principios vectoriales para corregir las deformaciones en posición de las fotografías.

El problema se centra en pasar un espacio tridimensional (superficie terrestre) a uno bidimensional (fotografía digital); basados en la existencia de un vector colineal, donde la estación de exposición, el punto en el terreno y su correspondiente punto en la fotografía se ubican a lo largo de una misma línea recta. Algunos autores denominan esta propiedad como colinealidad de los espacios (Asís y Karara 1998).

Las ecuaciones de colinealidad de esta metodología exigen el conocimiento de los parámetros internos del sensor remoto en el momento de la toma de datos, los cuales se obtienen en el laboratorio, a partir de mediciones precisas sobre patrones de medida que simulan las condiciones ideales para la toma de una aerofotografía.

Obtención de los parámetros internos del sensor CCD

La fotografía aérea en forma original es un conjunto de píxeles identificados por el número de fila y columna. Al calibrar las fotografías es necesario trabajar con el sistema de coordenadas de imagen que tiene su origen en el punto principal⁵ de la fotografía. La transformada utilizada es denominada 'Afin', la cual tiene en cuenta los cambios de escala, rotación y traslación de las fotografías al pasar de un sistema a otro:

$$\begin{aligned} \Gamma &= A_1 + A_2 X + A_3 Y \\ \Pi &= B_1 + B_2 X + B_3 Y \end{aligned} \quad (1)$$

donde,

Γ y Π son las coordenadas imagen de las marcas fiduciales virtuales.

Las fotografías obtenidas con los sensores CCD no tienen marcas fiduciales y tienen una distancia focal ajustable⁶, razón por la cual se generaron marcas fiduciales virtuales que permiten el modelado de los parámetros imagen sensor. Una vez se tienen las coordenadas imagen, se debe corregir el desplazamiento de los objetos debido a la distorsión del lente de la cámara.

Los lentes de la cámara distorsionan el haz de luz de manera simétrica y asimétrica. Las deformaciones simétricas son radiales a partir del centro de la fotografía, de magnitud mayor en los extremos. Las deformaciones asimétricas son despreciables en cámaras del prototipo de la Nikon (Nikon D1H, 2001).

El método diseñado en el CCCP para obtener el coeficiente de deformación simétrico de los lentes de la cámara se realizó con una cuadrícula de círculos concéntricos en un CAD, la cual se utilizó como patrón de medida para calcular los diferenciales de

⁴ Esta resolución hace referencia a la dimensión espacial que tiene el píxel en la imagen.
⁵ Los errores implícitos de una fotografía son el desplazamiento debido al relieve y la distorsión de la información atribuida a la utilización de los sistemas ópticos (lentes, espejos o prismas). El punto principal de la fotografía es considerado libre de error.
⁶ La cámara Nikon D1H tiene una distancia focal ajustable de 25mm a 85mm. La distancia principal es inversamente proporcional al área de cubrimiento de una fotografía y directamente proporcional a la resolución espacial.

posición. Este desarrollo se basó en el diseño del Laboratorio de Percepción Remota Alternativa y Tecnología Avanzada del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, Unam.

El patrón impreso se convirtió en el objetivo de captura de una fotografía, al cual se le realizó una fotografía controlando la distancia entre el objetivo y la cámara Nikon, con intervalos de distancia focal definidos entre 25mm y 80mm; igualmente, se midió la separación del eje óptico y la superficie terrestre. Con esta información se realizó una semejanza de triángulos con la cual se ajustó la distancia focal de la cámara.

Esta fotografía se ingresó al sistema CAD, sobreponiendo el centro de la cuadrícula con el centro de la foto. Las condiciones de toma hacen posible esta ubicación, con el fin de visualizar la distorsión radial. El sistema CAD permite hacer mediciones con una precisión de 0.5 mm a la escala del dibujo, lo cual se aprovechó para medir los radios de distorsión radial (r), ajustados en una curva polinomial dada por la siguiente ecuación (Wilson and Shafer, 1994):

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 \quad (2)$$

donde,

- Δr es la distorsión radial simétrica debida a los lentes a lo largo de una distancia radial desde el punto principal (Wolf, 1983).
- K_1 y K_2 son los coeficientes del polinomio que definen la forma de la curva de distorsión.
- r es la distancia radial medida a partir del punto principal.

Para resolver el sistema es necesario generar igual número de ecuaciones como de medidas radiales. La solución de este sistema se hizo con técnicas de mínimos cuadrados; una vez calculados los coeficientes se corrige cada medición de la imagen por distorsión radial del lente.

Se calcula el valor de r como la magnitud vectorial a partir del punto principal y la ubicación actual de la imagen utilizando la fórmula de distancia euclidiana.

$$R = \pm [(X_i - X_p)^2 + (Y_i - Y_p)^2]^{1/2} \quad (3)$$

Donde el signo representa el desplazamiento del píxel: positivo hacia dentro y negativo hacia fuera.

La información del valor de Δr (distorsión radial del lente)⁷ y las coordenadas x, y de la imagen, tanto de la ubicación actual de la imagen, como de la ubicación ideal, permiten conocer los diferenciales Δx , Δy , a partir de una relación de semejanza de triángulos como se aprecia en la Figura 1. Esto permite plantear las siguientes igualdades:

$$\Delta r/r = \Delta x/x_i = \Delta y/Y_i \quad (4)$$

Con lo cual se deduce que las coordenadas corregidas X_c y Y_c de cada punto deberán ser calculados a partir de:

$$X_c = X_i - \Delta x, \quad Y_c = Y_i - \Delta y \quad (5)$$

De esta manera se corrigen todos los puntos de la imagen, tomando su posición ideal y encontrando la real, para obtener la corrección por distorsión del lente y la desviación del eje óptico (Faig, 1975).

El sensor CCD captura los fotones con un desfase en el componente horizontal de la fotografía (λ_H), por la estructura electrónica del sensor el cual se hace más notorio dependiendo del tipo de hardware utilizado para la visualización de las fotografías. Dicho factor de escala se halla de la división entre la distancia vertical promedio de los píxeles horizontales y verticales (Lenz and Tsai, 1998). El resultado debe ser aproximadamente un relación 4:3, dada por la relación existente entre el ancho y el largo de la fotografía digital (2000 x 1300 píxeles), resultado que puede ser ajustado utilizando la siguiente igualdad matemática:

$$\lambda_H = \frac{\sum_{i=2, j=1}^{m, n} (X_p^{i, j} - X_p^{i-1, j})}{\sum_{i=1, j=2}^{m, n} (Y_p^{i, j} - Y_p^{i, j-1})} \quad (6)$$

donde,

- λ_H factor de escala horizontal.
- X_p componente escalar en píxeles en dirección Este u Oeste.
- y_p componente escalar en píxeles en dirección Este u Oeste.

⁷ El cual se calcula con un conjunto de mediciones radiales, realizadas en el CAD utilizando el patrón de medida. Esta información se utilizó para encontrar los parámetros desconocidos del polinomio $\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5$.

Aplicación de los parámetros internos de la cámara Nikon D1H en la georeferenciación diferencial

Con los parámetros internos de la fotografía de la cámara Nikon D1H presentados en la Tabla 1, acompañados de las coordenadas de un punto de la superficie terrestre (Xt, Yt, Zt), que se obtendrá a partir de un método cinemático, utilizando un dispositivo GPS de doble frecuencia conectado al terminal RS-232 de la cámara, se podrá georeferenciar las fotografías digitales.

La obtención del punto de control no se ha realizado porque la planificación del vuelo no ha finalizado para la zona de interés; sin embargo, una vez se tengan las coordenadas de la superficie terrestre, se utilizarán para plantear la hipótesis de colinealidad entre los vectores medidos en la foto y el terreno, la cual afirma lo siguiente:

“Si dos vectores son colineales, se debe cumplir que un vector es un escalar múltiplo del otro” :

$$(a) = J (A) \tag{7}$$

donde,

- (a) es el vector en la foto.
- (A) es el vector en el terreno.
- J es el escalar.

Explícitamente se tiene que:

$$a = \begin{bmatrix} X_p - X_o \\ Y_p - Y_o \\ -f \end{bmatrix} \tag{8}$$

donde,

(Xo, Yo, f) representan las coordenadas del punto principal de la foto.

$$A = \begin{bmatrix} X_{tp} - X_{to} \\ Y_{tp} - Y_{to} \\ Z_{tp} - Z_{to} \end{bmatrix} \tag{9}$$

donde,

(Xto, Yto, Zto) representan las coordenadas del punto principal en el terreno.

Con el fin de homogenizar el sistema de referencia de los dos vectores, se debe multiplicar una matriz (m) con los componentes del vector terreno. Esta matriz establece los parámetros de rotación, traslación y giro en el momento de la toma de datos. Los coeficientes de la matriz son los siguientes:

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos\phi \cos\sigma + \text{sen}\phi \cos\lambda \text{sen}\sigma \\ m_{12} &= -\text{sen}\phi \cos\sigma + \cos\phi \cos\lambda \text{sen}\sigma \\ m_{13} &= \text{sen}\lambda \text{sen}\sigma \\ m_{21} &= -\cos\phi \text{sen}\sigma + \text{sen}\phi \cos\lambda \text{sen}\sigma \\ m_{22} &= \text{sen}\phi \text{sen}\sigma + \cos\phi \cos\lambda \cos\sigma \\ m_{23} &= \text{sen}\lambda \cos\sigma \\ m_{31} &= \text{sen}\phi \cos\lambda \\ m_{32} &= \text{sen}\phi \text{sen}\lambda \\ m_{33} &= -\cos\lambda \end{aligned}$$

donde,

- ϕ = *azimut*
- λ = *Inclinación*
- σ = *rotación*

Estos ángulos pueden ser obtenidos directamente en la plataforma de vuelo o a partir de la solución de mínimos cuadrados. Con el vector imagen, el vector terreno y la matriz de rotación se genera una ecuación colineal por cada pareja ordenada de la siguiente manera:

Ecuación colineal (1)

$$X_p - X_o = -F \left[\frac{m_{11}(X_p - X_o) + m_{12}(Y_p - Y_o) + m_{13}(Z_p - Z_o)}{m_{31}(X_p - X_o) + m_{32}(Y_p - Y_o) + m_{33}(Z_p - Z_o)} \right] \tag{10}$$

Ecuación colineal (2)

$$Y_p - Y_o = -F \left[\frac{m_{21}(X_p - X_o) + m_{22}(Y_p - Y_o) + m_{23}(Z_p - Z_o)}{m_{31}(X_p - X_o) + m_{32}(Y_p - Y_o) + m_{33}(Z_p - Z_o)} \right] \tag{11}$$

Las ecuaciones de colinealidad definen la relación entre la cámara Nikon, la fotografía digital y el terreno. Los parámetros internos medidos en el laboratorio ($\lambda_H, X_p, Y_p, K_1, K_2$) reducen el número de parámetros desconocidos del sistema comprendido por la fotografía aérea, el sensor y la superficie terrestre.

Esto permite replantear las ecuaciones de colinealidad en un sistema de ecuaciones sistemático controlado, con el fin de expandirlo a partir de series de Taylor para obtener el valor de los parámetros desconocidos (ϕ, σ, λ).

El sistema de ecuaciones sistemático depende de la combinación de parámetros a utilizar. La generación de cada ecuación más que una técnica es un arte; cualquier combinación de parámetros es válida siempre y cuando la ecuación represente la realidad del fenómeno y la diferencia con el valor real del sistema sea aproximadamente cero.

Una de las combinaciones lineales que se puede plantear para formular las ecuaciones colineales es la siguiente:

$$\begin{aligned} F(u, \sigma, \phi, \lambda, f, x_i, y_i, z_i) &= qu + of \equiv 0 \\ F(v, \sigma, \phi, \lambda, f, x_i, y_i, z_i) &= qv + pf \equiv 0 \end{aligned} \quad (12)$$

donde,

$$\begin{aligned} q &= m_{31}\Delta x + m_{32}\Delta y + m_{33}\Delta z \\ o &= m_{11}\Delta x + m_{12}\Delta y + m_{13}\Delta z \\ p &= m_{21}\Delta x + m_{23}\Delta y + m_{23}\Delta z \\ \Delta x &= X - X_i \\ \Delta y &= y - y_i \\ \Delta z &= z - z_i \\ u &= (x - x_p)\lambda_H \\ v &= (y - y_p) \end{aligned}$$

Para expandir las funciones en series de Taylor basta con realizar las derivadas parciales de la función F y G para cada uno de los parámetros que participan en la función.

$$\begin{aligned} 0 &= F_0 + \frac{\partial F}{\partial u} du + \frac{\partial F}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial F}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial F}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial F}{\partial f} df + \frac{\partial F}{\partial X_p} dX_p + \frac{\partial F}{\partial Y_p} dY_p + \frac{\partial F}{\partial Z_p} dZ_p \\ 0 &= G_0 + \frac{\partial G}{\partial u} du + \frac{\partial G}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial G}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial G}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial G}{\partial f} df + \frac{\partial G}{\partial X_p} dX_p + \frac{\partial G}{\partial Y_p} dY_p + \frac{\partial G}{\partial Z_p} dZ_p \end{aligned} \quad (13)$$

donde,

F_0 y G_0 son las aproximaciones iniciales de los parámetros desconocidos.

Este es el procedimiento a realizar con cada una de las ecuaciones de colinealidad.

RESULTADOS

Los parámetros internos de la cámara Nikon se calcularon para diferentes distancias focales, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1.

Los datos de la distancia focal de 80 mm se utilizarán para la toma de fotografías con fines militares. A mayor distancia focal el área de cubrimiento disminuye, pero la resolución espacial aumenta, situación ideal para la planeación estratégica militar. El error medio cuadrático medio, calculado utilizando los datos de la distancia focal de 80 mm, es de 1.3 píxeles en x y 1.6. Resultado del proceso estadístico entre las diferentes mediciones realizadas utilizando el patrón de medida con lo cual se puede inferir que los resultados no tendrán la óptima exactitud posicional de un producto cartográfico (0.5 mm a la escala del producto), pero el objetivo de generar información geográfica de referencia será alcanzado.

La Figura 2 representa la distribución de los datos de distorsión radial de la Nikon D1H. El espacio geográfico de la curva corresponde a el polinomio $\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5$ propuesto por Wilson and Shafer (1994). Con esta información se obtiene la calibración geométrica de las fotografías aéreas digitales capturadas con la cámara Nikon; utilizando estos parámetros se corrigen los diferenciales de posición en la foto. Los resultados son independientes de la zona de estudio, por esta razón los datos son aplicables para cualquier zona del litoral Pacífico colombiano.

DISCUSIÓN

El método de georreferenciación planteado necesita como mínimo un punto de control. Esto puede entenderse como un procedimiento sencillo en zonas urbanas o áreas que tengan elementos como intersecciones de vías o elementos poco dinámicos en el tiempo. La costa Pacífica colombiana no se caracteriza por tener este tipo de coberturas, por el contrario adolece la ausencia de este tipo de elementos; además, es una zona de difícil acceso (mangle, pantanos, etcétera) que dificulta el trabajo de campo para la obtención del punto de control.

El esfuerzo necesario para fotocontrolar en tierra es riesgoso y compromete la seguridad del personal humano y la vida útil de los periféricos utilizados. De esta manera el método de georreferenciación no resulta práctico e, igualmente, es poco aplicable en las zonas costeras.

La solución inmediata al problema es utilizar la capacidad que tiene el sensor para trabajar con GPS y aplicar el método cinemático en la toma de las foto-

gráficas, esto implica como mínimo el uso de dos receptores GPS; uno ubicado en un punto de coordenadas conocidas (NPN de la red Geodesica Magna) y otro soportado en la cámara en el momento del vuelo. De esta manera el punto de control se obtendrá en tiempo real en el momento de la toma; evitando el trabajo de campo poco viable por las características del terreno.

Teóricamente la georreferenciación diferencial es más precisa que la polinómica. La primera contempla todos los parámetros involucrados en la toma de las aerofotos, los cuales no intervienen cuando se utiliza una transformación polinómica de cualquier grado. En las fotografías tomadas con la Nikon D1H, al aplicar el método diferencial propuesto existe un grado de incertidumbre que la teoría no se cumpla. Es muy posible que los resultados obtenidos tengan la misma o menor exactitud posicional que un producto georreferenciado por transformada 'Afin', dado que no se pueden utilizar más puntos de control que garanticen mejores productos.

Para garantizar las diferencias reales entre una georreferenciación diferencial y una polinomial se deberá contrastar los dos procesos en una área común (área continental de Tumaco) y de esta manera concluir si el método propuesto podrá ser utilizado para actualizar la cartografía existente en el CCCP.

CONCLUSIONES

- En general el proceso de calibración genera los resultados esperados dentro del marco conceptual. Sobreponer la imagen en el patrón de medida refleja claramente que la distorsión radial aumenta, progresivamente, en los extremos.
- El factor de escala horizontal se mantiene muy homogéneo, es de esperarse porque la distancia focal no altera este parámetro.
- Finalmente, lo interesante de obtener los parámetros de orientación interna de la cámara Nikon D1H es generar la información base para realizar la georreferenciación diferencial con un sólo punto de control en tierra.
- La redundancia de información que se utiliza para resolver las ecuaciones colineales al tomar un sólo punto de control es mínima. Al expandir las ecuaciones de colinealidad en series de Taylor sólo existe como sistema de comparación un único punto de control por cada foto, esto hace

que los procesos iterativos no tengan elementos de control.

- Si se desea mayor precisión en el método diferencial lo adecuado es generar redundancia de información, esto se consigue con la utilización de un IMS (Sensor de Movimiento Inercial), que debe ir en la plataforma de vuelo midiendo los parámetros (ϕ, σ, λ) para que los procesos iterativos tengan mayor control y de esta manera la precisión de las coordenadas obtenidas aumente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asis, A. & H. Karara. 1998. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In Proc. ASP/UI Symp. Close-Range Photogrammetry Urban, II, pp. 1-18.

Beyer, A. 1991. Achurate calibration of CCD cameras. In IEEE Computer Soc. Conf. Computer Vision and Pattern Anal". Machine Intel., Intel vol 13, pp 1240 - 1245.

Faig, W. 1975. Calibration of close range photogrammetric system: Mathematical Formulation Photogramm. Eng. Remote Sens. Vol 41, pp 1479 - 1486.

Jensen, J. 1999. Introductory Digital Image Processing: Remote Sensing Perspective Volumen 1, pp 123 -128.

Lenz, R. and R. Tsai. 1998. Techniques for calibration of the scale factor and imagen center for high accuracy 3-D machine vision metrology "IEEE Trans Pattern Anal machine Intel vol 10, pp 713 - 720.

Nikon D1H. 2001. User's manual. Tokio Japón.

UNAM. 1996. Departamento de Geofísica, Laboratorio de Percepción Remota 'Calibración de Imágenes'. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 1-5.

Wilson, R. and S. Shafer. 1994. What is center of the imagen. J. Opt. Soc. Amer. Vol 11, pp 2946 - 2955.

FIGURAS Y TABLAS

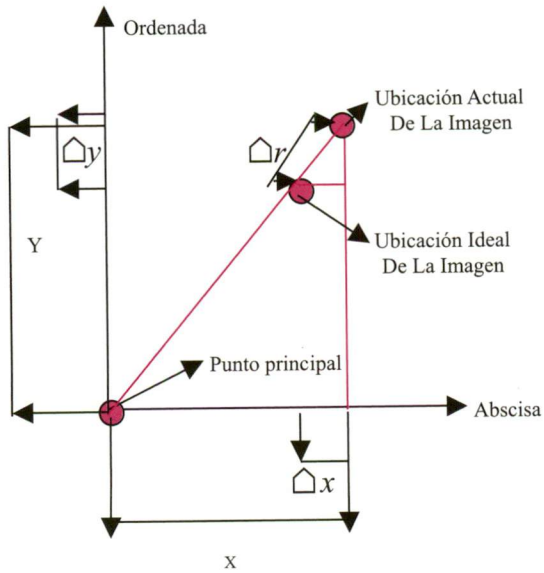


Figura 1. Relaciones existentes entre la imagen y el patrón de medida.

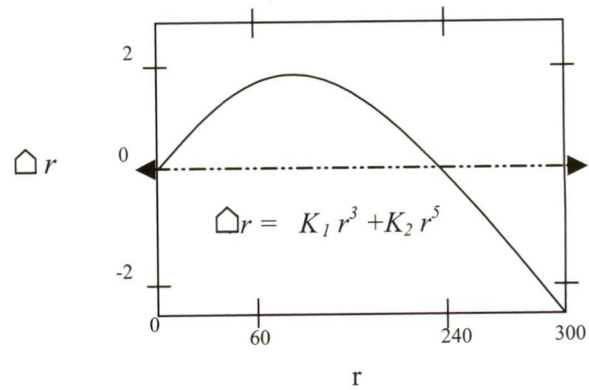


Figura 2. Representación de la curva que mejor se adapta a los datos obtenidos. Se generó con los coeficientes presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de los parámetros de calibración internos de la cámara Nikon D1H, obtenidos para diferentes distancias focales

Distancia focal	25 mm	45 mm	80mm
λ_r	1.035	1.029	1.014
K_1	$-1.92e^{-7}$	$-4.02 e^{-8}$	$-2.89 e^{-7}$
K_2	0.0221	0.0102	0.0089
X_p	336.8	321.5	312.2
Y_p	235.3	222.12	221.32