

**MODO DE HACER MAPAS CON FOTOGRAFÍAS AERÉAS**  
**PARTE III.—COMO TOMAR MEDIDAS DE LAS**  
**FOTOS AERÉAS (\*)**  
**BYON F. KENT (\*\*)**

**INTRODUCCION**

Tomar medidas de las fotos aéreas se está convirtiendo rápidamente en una de las fases más importantes del trabajo fotogeológico y el resultado de la combinación de métodos sencillos de trabajo con el uso de aparatos de precisión baratos y pequeños, es la obtención de una multitud de datos útiles para fines geológicos. Los datos que se obtienen son cuantitativos y objetivos, características que bastan para hacer que este trabajo pueda considerarse en forma independiente del trabajo fotogeológico ordinario. Sin embargo, no debe olvidarse que como sucede en la mayoría de las ciencias, la fotogeología también se compone de un 90% de "transpiración" y no más de un 10% de "inspiración".

Los instrumentos para tomar medidas de las fotos aéreas que van a considerarse aquí son del tipo estereométrico, tales como el estereómetro Wild que se presenta en la ilustración. Mecánicamente hablando este aparato no es más que un micrómetro sensitivo de precisión. Su función principal es medir distancias horizontales entre pares de fotoimágenes idénticas, sobre dos fotos aéreas verticales dispuestas en forma estereos-

(\*) Conferencia sustentada ante la Sociedad Geológica Mexicana en agosto de 1958.

(\*\*) Fotogeólogo; United States Geological Survey.

cópica para ser observadas con un estereoscopio de espejos. En un marco tan rígido de fotos orientadas, hay pequeñísimas diferencias en las distancias horizontales entre todos los pares de fotoimágenes que se funden a diferentes altitudes dentro del relieve del estereomodelo. La medida de estas diferencias es necesaria porque pueden traducirse matemáticamente en diferencias de elevación.

#### **APLICACIONES DE LOS METODOS DE ESTEREOMETRIA:**

La diferencia de elevación es el elemento básico en la solución de muchos tipos de problemas de geología estructural y es también un elemento básico en la solución de espesores estratigráficos. Si hay alguna evidencia de unidades o lechos rocosos en un estereomodelo se pueden obtener medidas estereométricas en muchos casos. Vamos a mencionar algunos:

(1).—Se puede determinar la verdadera inclinación y orientación de una capa vista en un estereomodelo, por el método conocido como "triple apuntamiento". El método de tres puntos es un método de campo preciso, bien conocido, que se emplea cuando el grado exacto de la inclinación es importante para el problema geológico de que se trate. Las diferencias de elevación son los elementos básicos empleados en este método.

(2).—Si en el estereomodelo se muestra una falla evidente, puede determinarse exactamente la magnitud de la dislocación.

(3).—Si se descubren diferentes unidades estratigráficas, como por ejemplo en las paredes de un cañón, puede determinarse el espesor estratigráfico de estas unidades; si la pared es vertical o casi vertical, las simples diferencias de elevación se convierten en una medida de espesor estratigráfico, pero en todo caso, las diferencias en la elevación serán datos básicos para soluciones trigonométricas.

(4).—Es posible conocer las diferencias relativas de elevación entre dos o más puntos de interés o de importancia geológica. Aunque no podemos determinar la elevación absoluta de estos puntos sobre el nivel del mar porque no se

dispone de un control sobre el terreno, podemos sin embargo llegar, por medio de métodos estereométricos, a una solución bastante exacta en cuanto a las diferencias relativas de elevación.

(5).—Pueden establecerse elevaciones de puntos lejanos a un punto de elevación conocida. Esto ha sido posible en algunos casos en que un punto de elevación conocida estaba a 50 kilómetros o más del área cuya elevación debía establecerse. El método empleado es llevar, empleando métodos estereométricos, un trazado transversal de elevación por varias fotos.

(6).—Según se ha dicho en discusiones anteriores, algunas veces es de mucha importancia determinar la verdadera dirección y la inclinación exacta del estereomodelo; lo que se llama "tilt". Si en el estereomodelo hay un lago, por ejemplo, o cualquier otro elemento que necesariamente debe ser horizontal y aparece inclinado, ello constituye una clara indicación de que existe una inclinación en el estereomodelo. Usando métodos estereométricos se puede determinar la cantidad y dirección de la inclinación de un estereomodelo orientado, desde 3 puntos localizados en la superficie del lago.

Para resumir, puede decirse que prácticamente cualquier problema geológico de tres dimensiones que aparece en la superficie de la tierra puede ser resuelto por métodos estereométricos.

### FORMULAS

Aunque ya se dijo que las medidas estereométricas son medidas de distancias horizontales, es igualmente correcto decir que son medidas de "diferencias en paralaje". Por medio de la siguiente fórmula, estas diferencias en paralaje se convierten en diferencias de elevación:

$$\Delta h = \frac{H'}{b + \Delta p} \Delta p \dots\dots (1)$$

En esta fórmula,  $\Delta p$  es la diferencia en paralaje (la lectura neta obtenida por métodos estereométricos) y  $\Delta h$  es la

diferencia en la elevación. (Con el estereómetro que se muestra, la unidad básica es un centésimo de milímetro).

La letra  $H'$  representa la altura de vuelo sobre uno de los dos puntos por determinar; la letra "b" representa la "paralaje estereoscópica absoluta" del punto inferior.

Aunque la fórmula es exacta, no es muy útil ni fácil de usar. Por ejemplo: la paralaje estereoscópica absoluta ¿Qué es y cómo encontrarla? — Para todos los efectos prácticos la paralaje estereoscópica absoluta de un punto en el terreno o en el estereomodelo tiene el mismo valor numérico que la "fotobase" de este punto. Esta correlación es de muchísima importancia, por lo que más adelante hablaremos de estos términos.

Antes de continuar vamos a mencionar otra fórmula que desgraciadamente, aunque goza de mucha popularidad, da lugar a muchos errores:

$$\Delta h = \frac{H'}{b} \Delta p \dots (2)$$

En esta fórmula  $\Delta p$  y  $\Delta h$  representan las diferencias respectivas en la paralaje y en la elevación. Pero la letra  $H'$  representa la altura **media** de vuelo sobre el terreno, y la letra "b" representa la fotobase media, o sea el promedio de las distancias entre los centros de fotografías y los centros transferidos. Por ejemplo: en la figura 1, el promedio de las distancias (a) y (b) es la fotobase media.

Esta fórmula es útil en áreas de bajo relieve, pudiéndose obtener el valor de  $H'$  por medio de la fórmula general:

$$S = \frac{f}{H} \dots (3)$$

La fórmula (3) se aplica cuando son conocidas la distancia focal de la cámara y la escala aproximada de la foto. La

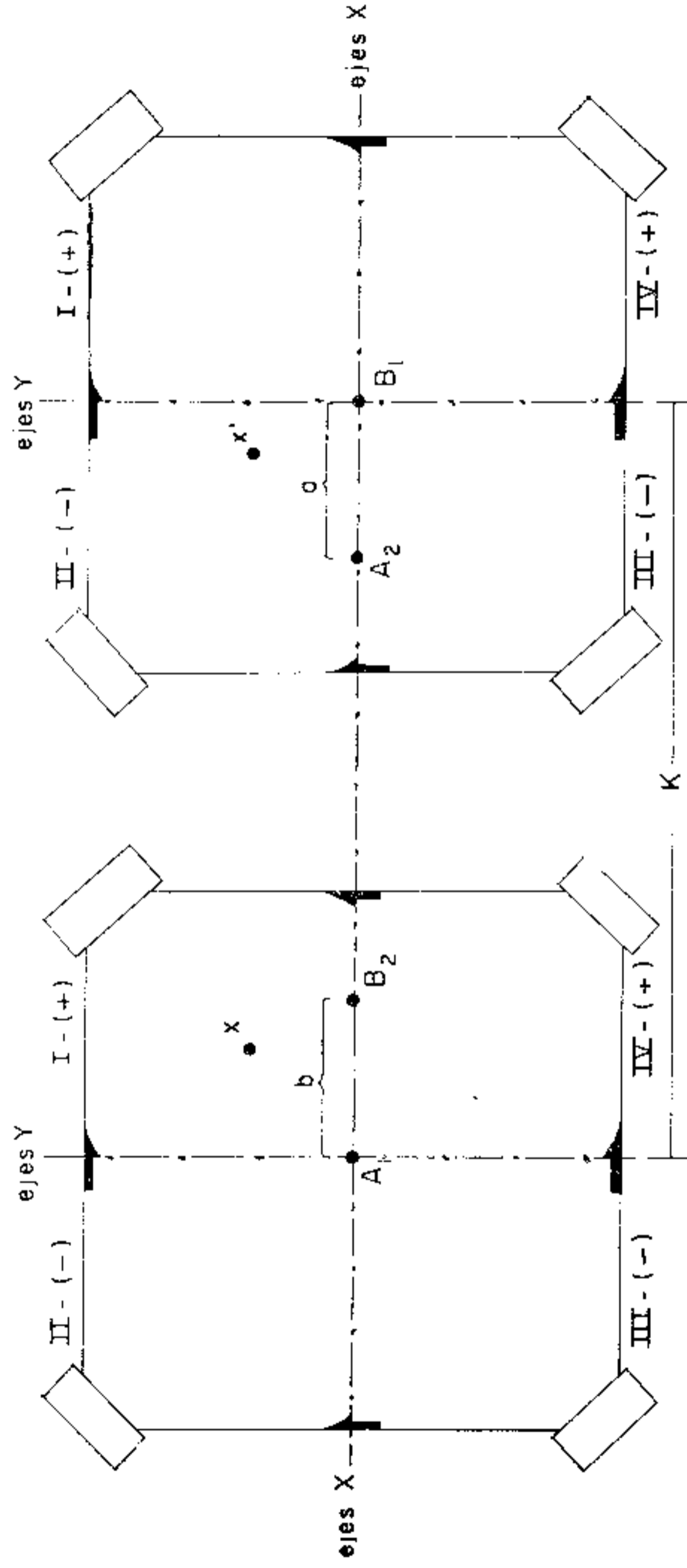
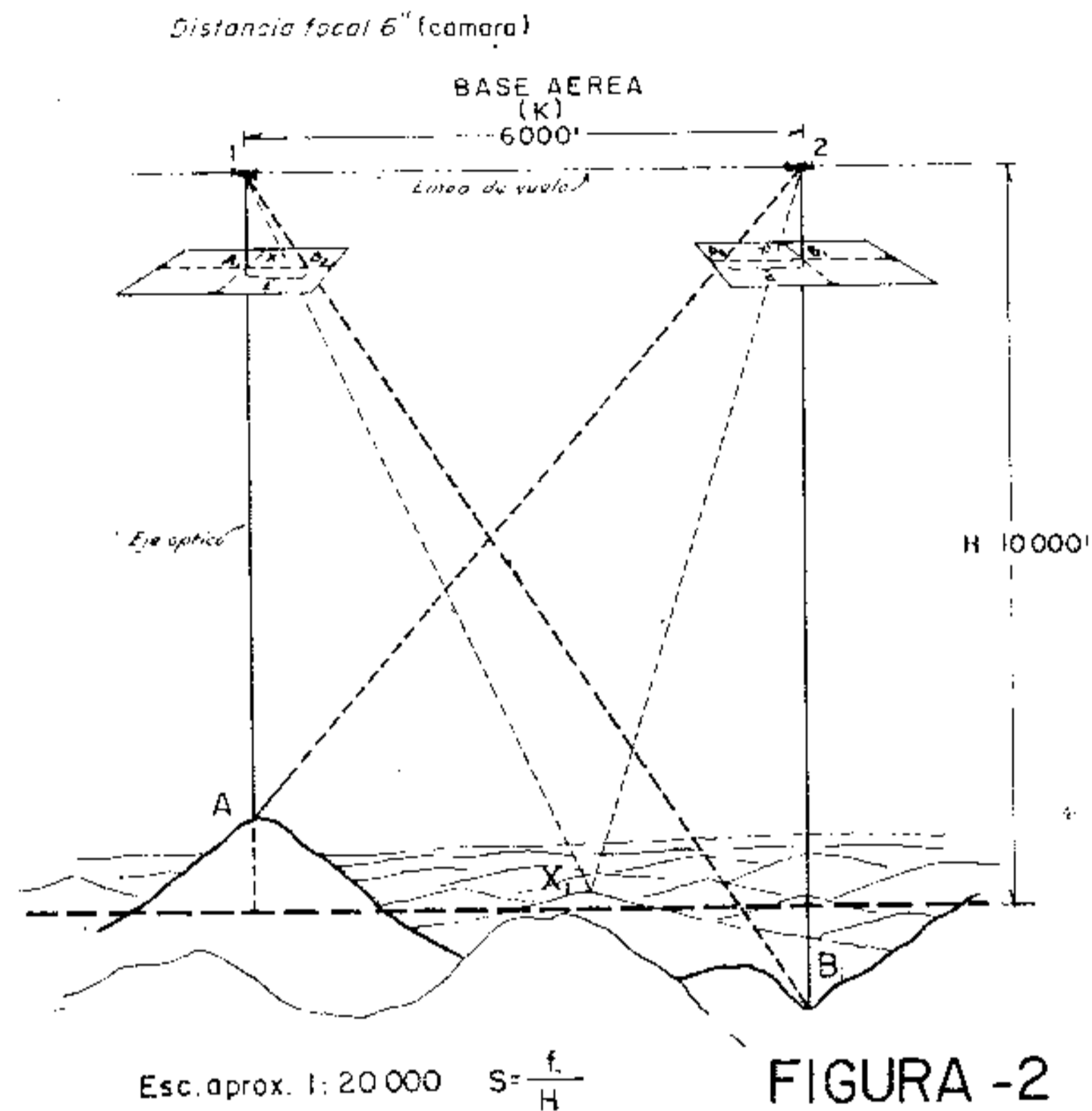


FIGURA -I

$\overline{A_1 B_2}(b)$  = Foto base del punto B<sub>1</sub>  
 $\overline{A_2 B_1}(a)$  = Foto base del punto A<sub>1</sub>  
 $\frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{2}$  = Promedio de los puntos foto-base  
 $\overline{A_1 B_1 + X X'}$  = Foto-base del punto "x"  $\overline{A_1 B_1} = K$



$$S = \frac{f}{H}$$

S = Escala

f = Distancia focal de la camara

H = Altitud del aeroplano (sobre el nivel del mar)

$$S = \frac{f}{H-h}$$

h = Altitud del plano seleccionado (sobre nivel del mar)

fotobase media se puede determinar directamente de las fotos aéreas.

La fórmula (2) no es exacta y puede dar lugar a bastantes errores, sobre todo si se aplica a áreas de relieve moderado o alto.

### PARALAJE ESTEREOSCOPICA ABSOLUTA:

La paralaje estereoscópica absoluta de un punto es un término fotogramétrico para una característica estereoscópica.

Los fotogrametristas asocian esta característica con distancias de las estaciones de cámara al objeto en el terreno, con la separación de las estaciones de cámara, y con la distancia focal de la cámara. Sin embargo, las **diferencias** en paralaje estereoscópica absoluta están directamente asociadas con los **desplazamientos** de relieve y con **diferencias** de elevación. La determinación de diferencias de paralaje, es un objetivo fundamental en la fotogrametría de precisión.

El término "paralaje estereoscópica absoluta" se explica generalmente por medio del sistema de coordenados de la geometría analítica.

En la figura 1 el eje de las "X" representa también la línea de vuelo y hay dos ejes de las "Y". Se puede definir la posición de cada fotoimagen con referencia a este sistema de coordenadas; sin embargo, solamente interesan los valores de las "X", porque estos valores son los únicos relacionados directamente con la estereoscopia.

Como puede observarse en la misma figura, la posición de una fotoimagen puede estar en cualquiera de los cuatro cuadrantes y siguiendo lo acostumbrado, cada cuadrante se marca con el signo positivo o negativo. En el caso presente, la fotoimagen (X) cae en el cuadrante I de la foto, y la otra fotoimagen de este punto (X') cae en el cuadrante II de la otra foto. Ahora bien, generalmente se define que "la paralaje estereoscópica absoluta" de un punto (X, X') es la diferencia algebraica entre los valores de sus abscisas, es decir:

$$p = x - x'$$

**FOTOBASE:**

El termino "fotobase" ha ocasionado muchas dificultades. El "Manual de Fotogrametría" define a la "fotobase" como "la longitud de la base aérea tal y como se representa en una fotografía". Esta definición se acepta sin discusión en fotogrametría de precisión, pero para nuestro trabajo de fotografías de contacto dista mucho de la realidad.

En la figura 2 se puede apreciar que la "base aérea" entre las dos estaciones de cámara es una distancia **fija**. Si consideramos "fotobase" como un término directamente correlativo con "base aérea", podremos suponer equivocadamente que "fotobase" es también una distancia fija, o que existe un solo valor para la "fotobase".

Por otra parte, es costumbre tanto para los fotogrametristas como para los fotogeólogos, poner en correlación general la altura de vuelo con la distancia focal de la cámara, ya que generalmente decimos que:

$$\frac{\text{base aérea}}{H} \text{ proporcional } \frac{pb}{f}$$

Como se puede observar en la figura 2, una altura de vuelo puede ser una distancia extremadamente variable y si se desea emplear una altura específica de vuelo, se tiene que definir el punto o plano de referencia en el terreno, o decir la "altura de vuelo sobre el nivel del mar o sobre un plano específico de referencia".

Además, en la fotografía aérea, la distancia focal de una cámara es una distancia fija. Entonces, si se supone que la fotobase también es una distancia fija, no habría ningún modo de expresar los elementos de la tercera dimensión, en una foto plana. Evidentemente son necesarios términos nuevos y conceptos nuevos para su empleo en el trabajo con fotografías de contado.

Este año fué publicado un excelente boletín sobre técnicas estereométricas en el que se introducen y definen nuevos términos y se han modificado algunas de las definiciones de los términos antiguos.



Aquí aparece el concepto de un "punto imagen estereoscópico" que se define como el **"punto en el cual la imagen de un objeto en el terreno aparece en el estereomodelo"**. Un "punto imagen estereoscópico" se forma por la fusión en el estereomodelo de un par de fotoimágenes en las fotos.

En el mismo boletín, el término "fotobase" se define como la **"distancia sobre una foto entre el centro fotográfico y el centro transferido"**. Por ejemplo, la distancia "b" en la figura es un valor de "fotobase" correspondiente a una foto, como lo es la distancia "a" en la otra foto. ¿Pero con qué están relacionados estos valores de fotobase?

A pesar de que lo que se ilustra no es el diagrama de un estereomodelo, se puede ver que, para el punto imagen estereoscópico representado por las fotoimágenes  $B_1$  y  $B_2$ , la fotobase correlativa con la altura del punto imagen estereoscópico B sería la distancia "b". Por lo tanto, al saber la altura de vuelo sobre el punto B del terreno se podrá encontrar la fotobase correlativa, muy exacta con ese nivel en el estereomodelo. Desde luego lo mismo se aplicaría al punto del terreno representado por A.

Ahora bien, vamos a extender este concepto un poco más allá. Se ha dicho que la fotobase "b" está relacionada con el punto de imagen estereoscópico representado por fotoimágenes en  $B_1$  y  $B_2$  o por el punto B y que la distancia "a" está en relación con el punto imagen estereoscópico "A". De aquí se deduce que la fotobase media  $1/2 (a + b)$  está en correlación con los puntos imagen estereoscópicos a la distancia media entre ellos en el relieve del estereomodelo (o a este nivel). También se puede ver que las abscisas (x) de  $A_1$  y  $B_1$  son "cero". Así, la abscisa (x) de  $B_2$  define la fotobase del punto imagen estereoscópico B, y la abscisa (x) de  $A_2$  define la del punto A. En la práctica, los valores fotobásicos correlativos con estos puntos tienen el mismo valor numérico que la paralaje estereoscópica absoluta de estos puntos.

Vayamos un poco más adelante. Es conocido que antes de emplear métodos estereométricos, las dos fotos tienen que

ocupar posiciones fijas, orientadas para visión estereoscópica. No hay razón pues, para que no podamos considerar la distancia  $A_1 B_1$  como una **constante** fija para un determinado par de fotos. Ahora bien; ¿Cómo se encuentra la fotobase correlativa con cualquier punto imagen estereoscópico representado, por ejemplo, en la figura 1 por los puntos de imagen X y X'? Simplemente se mide la distancia horizontal entre los puntos X y X', se resta esta distancia de la constante  $A_1 B_1$ , y el resultado será la fotobase correlativa con el punto imagen estereoscópico "X". El método de que se trata (si podemos llamarlo método), es una forma sencilla, rápida y exacta para encontrar la fotobase correcta de cualquier punto o plano de elevación en el estereomodelo.

Este método se originó por un curioso accidente: William Hemphill, autor del boletín a que se ha hecho referencia, es un experto en métodos estereométricos. En uno de los manuscritos anteriores a esta publicación, citaba un método conocido para encontrar en un estereomodelo la fotobase del punto de mínima altura; pero accidentalmente lo citó en forma equivocada como un método para encontrar el punto inferior, porque así era como quería usarlo. (En la práctica, la mayoría de los problemas encierran la determinación de un punto inferior y uno superior en el estereomodelo). Sin embargo, el método conocido era muy específico —encontrar solamente el punto de mínima altura— lo cual a veces resulta bastante difícil.

Al revisar la parte técnica del manuscrito indicado y corregir las citas equivocadas se estableció accidentalmente la notable diferencia de sentido entre el punto específico de mínima altura y un punto arbitrario inferior. Después de discutir con Hemphill durante dos horas obtuvimos un método para encontrar la fotobase de cualquier punto en el estereomodelo. Al principio yo no podía permitirle referirse al método conocido en la forma como él lo citaba, y él no podía usarlo a menos que lo citara equivocadamente. Por otra parte, a mi no se me ocurrió emplear el método para encontrar un "punto inferior" y él no lo había empleado correctamente. Pero así es el progreso de la ciencia.

**ALTURA DE VUELO**

La determinación del valor correcto de la "altura de vuelo" para aplicarlo en una fórmula siempre ha sido un verdadero problema. La eterna interrogación es: ¿altura de vuelo sobre qué? El manual afirma que en fotografía aérea el plano de referencia es generalmente el nivel del terreno; sin embargo, para los altímetros, la base es el nivel del mar y no siempre estamos seguros de cuál base se utilizó.

Por ejemplo, si se usa una foto de la Ciudad de México a escala 1:20,000, tomada con una lente de 6 pulgadas, ¿cuál sería la altura de vuelo? podríamos decir: "10,000 pies"; pero ¿sobre qué?, pues sobre el nivel medio de la Ciudad de México, es decir unos 7,650 pies. Sin embargo, el piloto prefiere decir que el vuelo se realizó a una altura de 17,650 pies. Si el piloto mantuviera el mismo nivel de vuelo, la escala fotográfica sobre Acapulco sería aproximadamente de 1:35,300. Para obtener una escala de 1:20,000 en Acapulco, tendría que descender a unos 10,000 pies sobre el nivel del mar.

Si elegimos un plano medio de referencia de 3,800 pies, y se vuela a 10,000 pies sobre dicho plano, la escala fotográfica cerca del Popocatepetl sería muy grande, puesto que la lente de la cámara estaría debajo del terreno.

Por lo anterior puede decirse que la letra "H" mayúscula de las fórmulas para determinar diferencias en elevación siempre ocasiona problemas. En realidad no se debe tratar de hacer un trabajo preciso de estereómetro a menos que se tenga algún control de los desniveles del terreno, y que sea posible encontrar una escala específica correlativa con un nivel en el estereomodelo.

Las diferencias indicadas hicieron que Hemphill modificase la fórmula original de esta manera:

$$\Delta h = \frac{H \Delta p}{ab + \Delta p} \dots (4)$$

siendo  $\Delta h$  y  $\Delta p$  las diferencias en la elevación y en el paralaje;  $H'$  la altura de la cámara sobre el punto inferior de los dos puntos imagen estereoscópicos, y "ab" la fotobase ajustada a la escala fotográfica al nivel del punto inferior. Esta fórmula es bastante exacta y tiene mucha mayor utilidad.

### **PROCEDIMIENTO PARA MEDIR LAS DIFERENCIAS EN PARALAJE:**

La mayoría de los estereómetros emplean para determinar las lecturas en los puntos de elevación del estereomodelo el método de "punto flotante".

El procedimiento consiste en colocar un punto "flotante" en coincidencia con un punto en el estereomodelo y leer posteriormente el instrumento. Después se cambia de punto en el estereomodelo colocando el punto flotante en coincidencia con el nuevo punto, volviéndose a leer el instrumento. La diferencia entre las dos lecturas es la diferencia de paralaje, ( $\Delta p$ ).

La unidad básica del instrumento que se ilustra es 1/100 de milímetro y las lecturas a veces pueden ser interpoladas a una o dos milésimas de milímetro. Para dar una idea de la exactitud potencial que esto representa, si utilizamos fotografías de 6" a escala 1:20,000, cada centésimo de milímetro equivale a aproximadamente 1.1 pies, es decir, menos de la tercera parte de un metro.

Por experiencia, hemos encontrado que la combinación del estereómetro Wild o bien uno semejante, y un estereoscopio Old Delft, proporciona el máximo de confianza y exactitud en cuanto a las lecturas de paralaje. Después de cierta práctica con esta combinación, para una serie de 10 o más lecturas de un punto en el estereomodelo, la variación es del orden de tres unidades base. Cuando es posible obtener un promedio de lecturas, se logra reducir aún más el "error de instrumento".

No debe pensarse que los errores pueden reducirse siempre a unas cuantas unidades básicas. Este es solamente el error de instrumento que puede esperarse y de ningún modo defi-

ne la cantidad total de errores que ocurren con los métodos estereométricos.

Existen diferentes clases de errores, tanto en forma como en intensidad. Para ilustrarlos, pondremos un ejemplo: Al utilizar una plancheta, se espera que el filo de la regla sea paralelo a la dirección de la línea de colimación del aparato ya que en caso contrario se produce una cierta cantidad de error instrumental. Una ocasión utilizamos una plancheta donde la dirección de la línea de colimación se cruzaba con la prolongación del filo de la regla, a una distancia del orden de 5,000 pies. Pueden ustedes imaginar los trastornos que ésto ocasionó, sin embargo, este error nada tuvo que ver con que se intentase encontrar el punto más alto de una banderola a través de la reverberación producida por el calor, o que se tomaran tres lecturas perfectas a un ángulo vertical con un trazo amarrado a una barda pensando que era una banderola de estación.

En otras palabras, se tienen tres tipos de errores: errores de instrumento, errores por condiciones difíciles de trabajo, y errores de operación debidos a que todos de vez en cuando nos equivocamos.

### **INCLINACION.**

Con toda seguridad la presencia inevitable de "inclinación" (lo que se llama "tilt") en el estereomodelo, será causa de error en nuestro trabajo estereométrico. Este error es debido a los "instrumentos" o a las condiciones difíciles de trabajo. Se puede disminuir los errores debidos a inclinación tratando de reconocer, por claves geomorfológicas o fisiográficas, la cantidad y dirección de la inclinación. Algunas veces es posible medirla verdaderamente, si por ejemplo vemos un lago inclinado. Otras veces se puede reducir al mínimo este efecto midiendo puntos en direcciones paralelas al eje de inclinación y computar el error de pie por milla para corregir lecturas. Sin embargo, si se toman lecturas verticales, como en las paredes de un cañón, será muy poco el efecto de la inclinación.

Si no se tiene cuidado al orientar las fotos, puede ocasionarse inclinación en el estereomodelo. Entonces los errores resultantes son de operación.

En nuestro diagrama la línea entre  $A_1$ ,  $B_2$ ,  $A_2$  y  $B_1$  tiene que ser recta. Si algún segmento de ella gira, aunque sea ligeramente, resulta algún error. Cualquier cantidad de rotación hará que las fotoimágenes giren, acercándose o alejándose entre ellas. Entonces si vamos a medir dicho error en términos de unidades básicas de un centésimo de milímetro, esto resulta fuera de sentido común.

Para finalizar, debe tenerse especial cuidado con el procedimiento para orientar las fotos, y una vez que las fotos estén orientadas lo mejor posible, deben sujetarse firmemente, de preferencia pegándose a la mesa de trabajo.

### RESUMEN.

Una conferencia no es la mejor manera de enseñar los métodos estereométricos; se puede mencionar solamente unas cuantas aplicaciones, los principios fundamentales y algunas de las causas de error. El trabajo práctico y la experiencia adquirida al cometer errores, enseñan mejor y más rápidamente, y si los errores resultan costosos, hay menos posibilidades de olvidar la lección.

Para terminar, buena suerte y recuerden esta recomendación: **No cometan dos veces el mismo error.**

\* \* \*

### Nota del Editor

La Sociedad Geológica Mexicana agradece al Ing. Carlos Castillo Tejero el interés especial que puso en la revisión, corrección y preparación para su publicación, de los originales de la Serie de Conferencias sobre el tema: "Modo de Hacer Mapas con Fotografías Aéreas", dictadas por el Sr. Byon F. Kent en el mes de agosto de 1958.