

APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRIA TERRESTRE EN LEVANTAMIENTOS PARA INGENIERIA CIVIL

Manuel JAUREGUI O.
 Instituto de Fotogrametría
 Universidad de Los Andes
 Mérida, Venezuela

RESUMEN

Para la elaboración de muchos proyectos de Ingeniería Civil, es indispensable disponer de planos topográficos confiables del terreno sobre el cual estos proyectos se vayan a ejecutar.

Generalmente estos levantamientos se efectúan por lo métodos tradicionales de la Topografía clásica, sin embargo en algunos casos debido a dificultades tales como:

- a. Necesidad de efectuar el levantamiento en un tiempo muy corto.
- b. Terreno de relieve muy escarpado o difícil de acceso.
- c. Inestabilidad del Terreno.

Se hace necesario la aplicación de la fotogrametría terrestre por presentar ventajas como:

- rapidez en el trabajo de campo
- contacto físico muy limitado con la superficie a medir
- alta precisión en las mediciones

En este artículo se exponen dos ejemplos típicos de estas aplicaciones, el primero en el cálculo de volúmenes de movimientos de tierra y el segundo en el levantamiento de detalle de un sitio de presa de difícil acceso.

ABSTRACT

Terrestrial topographical maps are a basic requirement for many Civil Engineering projects. Commonly those maps are elaborated through the use of traditional field survey methods, in some instances, when:

- a) The survey has to be completed in a short time period
- b) The terrain surface is very rough or of difficult accessibility
- c) The terrain has instability

Then it is necessary the use of terrestrial photogrammetry for having the advantages:

- field work is faster
- limited physical contact with the terrain surface
- high precision on measurements

This article shows two examples of applications. The first on Earthworks computations. The second on surveying of a DAM site.

INTRODUCCION

La Fotogrametría es la ciencia que se encarga de efectuar mediciones por intermedio de fotografías, para determinar así las características geométricas tales como: tamaño, forma y posición del objeto fotografiado.

Aún cuando, uno de los usos más extensos y conocidos de la Fotogrametría ha sido en la producción de mapas topográficos a partir de fotografías aéreas, actualmente se le está dando usos diferentes a los tradicionales mediante la aplicación de la Fotogrametría Terrestre, en la que las fotografías se toman con cámaras estacionadas sobre el terreno. Así podemos considerar la Fotogrametría como una rama de la metrología en la cual en vez de efectuar mediciones directas sobre el objeto, primero se efectúa el registro de una imagen sobre la cual posteriormente se hacen mediciones.

Uno de los campos en los cuales la Fotogrametría Terrestre encuentra muchas aplicaciones es en el de los levantamientos para Ingeniería Civil.

Generalmente estos levantamientos se efectúan por los métodos tradicionales de Topografía clásica con buenos resultados, sin embargo existen casos donde hay dificultades tales como:

- Necesidad de efectuar el levantamiento en corto tiempo
- Terreno de relieve muy escarpado y difícil acceso
- Inestabilidad del terreno

En estos casos se hace necesaria la aplicación de la Fotogrametría Terrestre por presentar las siguientes ventajas:

- Rapidez al efectuar el trabajo de campo
- Contacto físico muy limitado o inexistente con el terreno a levantar
- Alta precisión y fidelidad en la medición de las características geométricas del terreno

A pesar de lo anterior debe tomarse en cuenta que:

- Toda la medición depende de la calidad de la imagen fotográfica

- No siempre es posible fotografiar todo el terreno de interés

El objetivo del presente trabajo es el de presentar el procedimiento de levantamientos del terreno con Fotogrametría Terrestre e ilustrarlo con dos ejemplos de aplicaciones concretas.

PRINCIPIOS MATEMATICOS DE LA FOTOGAMETRIA TERRESTRE

Una fotografía desde el punto de vista de la proyectiva es una proyección central en la que todos los rayos pasaban a través de un centro de proyección situado en algún lugar del sistema de lente y en la cual existe un elemento proyectado (la superficie del terreno) y un plano de proyección que es la placa del negativo.

Las ecuaciones generales que nos dan la descripción matemática de la proyección central de puntos del terreno sobre una fotografía son:

$$x = C \frac{a_1(X-X_0) + a_2(Y-Y_0) + a_3(Z-Z_0)}{a_7(X-X_0) + a_8(Y-Y_0) + a_9(Z-Z_0)}$$

$$y = C \frac{a_4(X-X_0) + a_5(Y-Y_0) + a_6(Z-Z_0)}{a_7(X-X_0) + a_8(Y-Y_0) + a_9(Z-Z_0)}$$

donde

X, Y, Z : Son las coordenadas de puntos en el sistema de coordenadas del terreno.

X_0, Y_0, Z_0 : Son las coordenadas del centro de proyección en el sistema de coordenadas del terreno.

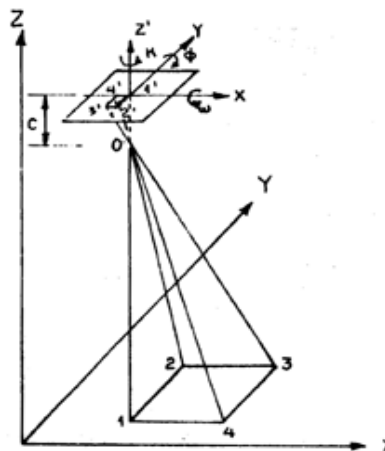


FIG. 1.--Proyección de puntos del terreno sobre una fotografía.

x, y : Son las coordenadas del punto proyectado sobre el negativo fotografiado en el sistema de coordenadas de la fotografía (diferenciando x', y' para la fotografía izquierda y x'', y'' para la fotografía derecha).

C : Distancia principal de la cámara fotográfica.

Los coeficientes $a_1, a_2, a_3 \dots a_9$ son función de las inclinaciones κ, ϕ, ω de la cámara, considerando un eje X primario, un eje Y secundario y un eje Z terciario.

Al utilizar estas fórmulas en fotogrametría terrestre debemos tomar en cuenta el intercambio que efectuamos entre los ejes Z e Y, así pues denominamos:

Eje X al eje X
Eje H al eje Y
Eje Y al eje Z

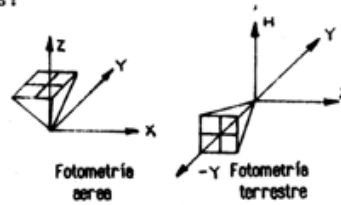


FIG.2

Invirtiéndolo las ecuaciones anteriores y sustituyendo en ellas esta nomenclatura obtenemos las ecuaciones que nos dan la coordenadas del punto en el terreno a partir de las coordenadas, medidas sobre el negativo fotográfico, del punto proyectado.

$$\frac{X - X_0}{-(Y - Y_0)} = \frac{a_1x + a_4y + a_7C}{a_3x + a_6y + a_9C}$$

$$\frac{H - H_0}{-(Y - Y_0)} = \frac{a_2x + a_5y + a_8C}{a_3x + a_6y + a_9C}$$

CASOS DE LA ESTEREOFOTOGRAMETRÍA TERRESTRE

En la Estereofotogrametría Terrestre podemos distinguir cuatro casos o configuraciones utilizadas en la toma de las fotografías, las cuales serán analizadas a continuación:

Caso normal

Los ejes principales de las cámaras son horizontales, paralelos entre sí y perpendiculares a la línea de base. El valor de las rotaciones κ , ϕ , ω es cero para ambas cámaras y las coordenadas de los centros de proyección de las fotografías son:

Fotografía izquierda $X_0 = Y_0 = H_0 = 0$

Fotografía derecha $X_0 = B$; $Y_0 = H_0 = 0$

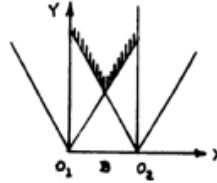


FIG.3.

Caso paralelo desviado:

Los ejes principales de las cámaras son horizontales, paralelos entre sí pero no perpendiculares a la línea de base.

El valor de las rotaciones κ , ϕ , ω es cero para ambas cámaras y las coordenadas de los centros de proyección de las fotografías son:

Fotografía izquierda $X_0 = Y_0 = H_0 = 0$

Fotografía derecha $X_0 = B \cos \phi_1$

$Y_0 = B \sin \phi_1$; $H_0 = 0$

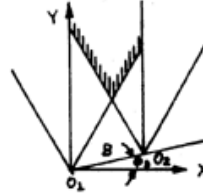


FIG.4

Donde ϕ_1 es el giro de la línea de base con respecto al eje X.

Caso oblicuo

Los ejes principales de las cámaras son paralelos entre sí, perpendiculares a la línea de base, pero inclinados con respecto al plano horizontal.

El valor de las rotaciones κ , ϕ es cero para ambas cámaras mientras que existe una rotación $\omega = \omega_1$.

Las coordenadas de los centros de proyección de la fotografías son:

Fotografía izquierda $X_0 = Y_0 = H_0 = 0$

Fotografía derecha $X_0 = B, Y_0 = H_0 = 0$

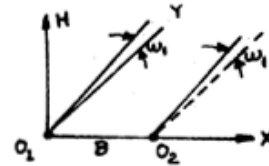


FIG.5

Caso general

En este caso las fotografías se toman con pequeñas inclinaciones κ, ϕ, ω , en consecuencia los ejes principales de las cámaras no son paralelos entre sí.

Los centros de proyección no están alineados sobre el eje X, ya que puede existir desplazamiento relativo de una de las cámaras en la dirección de los ejes H e Y.

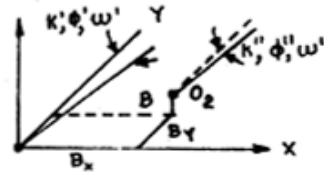


FIG.6

En consecuencia tomamos como coordenadas de los centros de proyección los siguientes valores:

Fotografía izquierda $X_0 = Y_0 = H_0 = 0$

Fotografía derecha $X_0 = B_x ; Y_0 = B_y ; H_0 = B_H$

CONSIDERACIONES RESPECTO A LAS PRECISIONES OBTENIBLES EN LA MEDICION DE LAS COORDENADAS X, Y, H.

Al utilizar instrumentos análogos para la obtención de las coordenadas X, Y, H del terreno nosotros seguimos el proceso dado en el diagrama del flujo a continuación.



La precisión de los paralajes X e Y (P_x y P_y) depende de:

1. Exactitud geométrica de la fotografía
2. Error del instrumento de restitución
3. Error del operador en la observación o eliminación de los paralajes

Asumiendo que estos errores son accidentales sobre toda la extensión del modelo tenemos:

$$\sigma^2_{\text{paralaje}} = \sigma^2_{\text{fotografía}} + \sigma^2_{\text{instrumento}} + \sigma^2_{\text{observación}}$$

La experiencia ha mostrado que los siguientes valores estimados pueden ser utilizados (H. Hoschitzky). Theory of Relative and Absolute Orientation).

$$\sigma^2_{\text{fotografía}} = 25 \mu^2; \quad \sigma^2_{\text{observación}} = 25 \mu^2; \quad \sigma^2_{\text{instrumento}} = 50 \mu^2$$

De acuerdo a estos valores, podemos asumir la desviación estándar de una observación de paralaje (P_x o P_y) en un punto es $\sigma_0 = 10 \mu$, a la escala de la fotografía.

Los errores cometidos en la orientación relativa, producen deformaciones d_x , d_y , d_H sobre el modelo estereoscópico. Sin embargo, cuando efectuamos la orientación absoluta mediante la ayuda de puntos de control sobre el terreno u objeto a levantar,

podemos eliminar toda la parte lineal de la deformación del modelo en X, Y, H.

En consecuencia, los errores en la medición de las coordenadas sobre el modelo orientado dependen de los errores no lineales de la orientación relativa, de las imperfecciones en la orientación absoluta, y de la correcta eliminación de los P_x y ubicación exacta de la marca flotante sobre los puntos.

En un modelo correctamente orientado, la principal fuente de error proviene de la correcta eliminación de los P_x y de la ubicación exacta de la marca flotante sobre los puntos.

Si estudiamos la precisión obtenible para el caso normal, asumiendo que el modelo está correctamente orientado, podemos conocer la magnitud de los errores de las coordenadas X, Y, H medidos sobre el modelo.

Partiendo de la ecuaciones generales del caso normal (para positivos fotográficos), y aplicando los principios de propagación de errores, obtenemos las siguientes expresiones para las precisiones en X, Y, Z:

$$\sigma Y = \pm \frac{Y^2}{BC} \sigma_{p_x}$$

$$\sigma X = \pm \sqrt{\frac{Y}{2BC} (2X - B)^2 \sigma_{p_x}^2 + \left(\frac{Y}{C}\right)^2 \sigma_{x_1}^2}$$

$$\sigma H = \pm \sqrt{\left(\frac{HY}{BC}\right)^2 \sigma_{p_x}^2 + \left(\frac{Y}{C}\right)^2 \sigma_{y_1}^2}$$

donde

σ_{p_x} : 10 μ (Precisión en la observación de paralajes)
 σ_{x_1} ; σ_{y_1} : Precisión en la ubicación de la marca flotante sobre puntos del modelo. Aproximadamente = 1/3 del diámetro de la marca flotante en la escala de la fotografía.

Siempre σY será mayor que σH , es decir que σY será el factor limitante en cuanto a precisión se refiere.

Esto hace necesario que al considerar la precisión exigida en un proyecto de fotogrametría terrestre, la evaluemos en función de la base de toma, la distancia principal y la separación cámara-objeto, a fin de conocer en forma previa a la ejecución del proyecto la posibilidad de cumplir con esas precisiones.

METODOLOGIA UTILIZADA EN LOS LEVANTAMIENTOS CON FOTOGAMETRIA TERRESTRE

Se pueden establecer las siguientes fases en los Levantamientos con Fotogrametría Terrestre:

- a. Planificación del Levantamiento
- b. Trabajo de Campo
- c. Procesamiento Fotográfico
- d. Restitución de los Modelos
- e. Dibujo Final

a. Planificación del Levantamiento

En función del tipo de levantamiento a realizar y de los requisitos de precisión y nivel de detalle exigidos, determinamos los siguientes parámetros:

- Base de toma fotográfica
- Escala de las fotografías
- Posición de las estaciones de toma fotográfica
- Número y disposición de los puntos de control
- Tipos de levantamiento para la ubicación de los puntos de control
- Equipos y personal necesarios para el Proyecto
- Estimación de costos y cronograma de actividades

b. Trabajo de Campo

El objetivo del trabajo de campo es en primer lugar la determinación de las coordenadas de puntos del terreno o "Control de Apoyo", para la ubicación óptima de las estaciones de toma

fotográfica y para la determinación de los parámetros de orientación externa de los Modelos Fotogramétricos, y en segundo lugar la toma de las fotografías de la zona de interés.

- El Control de Apoyo: En todos aquellos casos en que se realicen levantamientos secuenciales del terreno, es conveniente el establecimiento y medición de un poligonal base con puntos bien definidos y localizados en zonas que garanticen su permanencia a lo largo del período en que se van a efectuar los levantamientos y aún posteriormente al mismo.

- Ubicación de las Estaciones de Toma Fotográfica: Las estaciones de toma fotográfica debe ubicarse de forma que garanticen un recubrimiento adecuado del terreno a levantar. Ciertas condiciones deben ser consideradas, como:

- La base fotográfica y la distancia cámara objeto deben satisfacer los requisitos de precisión exigidos, asegurando a la vez una adecuada visión estereoscópica.

- La diferencia de altura entre las dos estaciones debe estar conforme con el rango B_y del instrumento de restitución.

- La variación de la distancia cámara objeto entre dos estaciones de toma, deberá ser compatible con el rango B_z del instrumento de restitución.

- Ubicación del Control del Modelo: los métodos más utilizados para ello son los siguientes:

- Determinación de las coordenadas de puntos definidos o señalados sobre el terreno a levantar, partiendo del control de apoyo.

- Determinación de las coordenadas del centro de proyección de la cámara y de las inclinaciones de la misma, (en el momento de toma fotográfica) con respecto a un sistema de ejes definido.

- La toma de las fotografías: Para ello se utilizan cámaras métricas cuyos elementos de orientación interna son conocidos. La toma de las fotografías se efectúan con ejes ópticos paralelos. Si las condiciones del terreno lo permiten, los ejes ópticos pueden tomarse horizontales y perpendiculares a la base, simplificando así el proceso de orientación de los modelos estereoscópicos.

c. Procesamiento Fotográfico

Comprende el revelado de los negativos y la producción de las diapositivas e impresiones en papel.

d. Restitución de los Modelos

Comprende todo el conjunto de procedimientos mediante los cuales a partir de un par de fotografías que conforma un modelo fotogramétrico y utilizando un instrumento de restitución se efectúa la representación de todas las características del terreno mediante la elaboración de planos detallados o a través del registro de las coordenadas de puntos característicos.

e. Dibujo Final

A partir del manuscrito obtenido en la restitución, el dibujante se encarga de copiar fielmente este sobre una lámina en material estable.

DOS CASOS DE APLICACIONES PRACTICAS

El primer caso lo constituye el levantamiento efectuado por el Instituto de Fotogrametría para la determinación de volúmenes removidos en una sección de la carretera Ejido - La Mesa en el Estado Mérida.

En este proyecto se produjeron dos Mapas topográficos de la zona, uno antes y otro después de efectuado el movimiento de tierras.

Posteriormente, mediante comparación de estos dos mapas se pudo determinar el volumen de material removido.

Descripción del procedimiento:

Trabajo de campo: Debido a que los dos mapas de la zona (antes y después del movimiento de tierras) deben estar en el mismo sistema de coordenadas, se procedió a medir y nivelar una poligonal base a partir de la cual se ubicaron los puntos de estación de toma fotográfica, y cuatro puntos de control sobre el terreno, mediante intersecciones directas desde puntos de poligonal.

La escogencia de la distancia cámara-objeto y de la base de toma fotográfica estuvo limitada por las condiciones topográficas de la zona.

Los datos en la toma de las fotografías fueron los siguientes:

Cámara utilizada: Wild P-32 montada sobre teodolito Wild T.2

Posición de las cámaras: Caso general

Distancia principal de la cámara = 64,20 m.m.

Base de toma fotográfica = 12,90 m

Distancia media cámara-objeto = 130 m

Escala de las fotografías 1/2000

Relación B/Y = 1/10

Recubrimiento estereoscópico del terreno por modelo = 150 mts

Número de fotografías = 2

Número de modelos estereoscópicos = 1

Tiempo de exposición de las fotografías = 1/125 seg.

Apertura relativa = f/16

Resolución del negativo = 50 1/m.m.

El tamaño del menor detalle visible sobre la fotografía es de 41 m.m. sobre el terreno. Aplicando los criterios de precisión obtenemos:

$$y_{\max} = \pm 200 \text{ mm} \quad * \quad x_{\max} = \pm 115 \text{ mm} \quad * \quad z_{\max} = \pm 175 \text{ mm}$$

Posteriormente se procesó el material fotográfico y se procedió a la restitución de los modelos a escala 1/1000 y dibujo del manuscrito a escala 1/250, con curvas de nivel cada metro produciendo los planos que se muestran en las figuras: 1 y 2.

La Figura 1 muestra el terreno antes del movimiento de tierras.

La Figura 2 muestra el terreno después del movimiento de tierras.

Estos dos planos, con curvas de nivel cada metro, fueron utilizados posteriormente para el cálculo de la cantidad de movimientos de tierra.

El segundo caso es el levantamiento de un sitio de presa sobre la quebrada "La Gavidia", cerca de la población del mismo nombre en el estado Mérida.

Descripción del procedimiento:

Trabajo de Campo: Se procedió a establecer una poligonal cerrada con 7 vértices que sirvió de apoyo para la ubicación de las estaciones de toma fotográfica así como de los puntos de control terrestre.

Debido a lo abrupto de la topografía no se ubicaron puntos de control para la corrección del común.

Toma de las Fotografías: También en este caso las características topográficas de la zona fueron limitaciones en la escogencia de la escala de las fotografías.

Los datos de las tomas fotográficas fueron las siguientes:

Cámara utilizada: Wild P-32 sobre teodolito Wild T.2.

Posición de las cámaras: Caso general, aunque con ejes principales horizontales, así no es necesario disponer de puntos de control para la corrección del común, ya que su valor original es igual a cero.

Distancia de la cámara = 64.20 mm.

Base de toma de fotografía = 3 mm.

Distancia media cámara-objeto = 14 mm.

Escala de las fotografías 1/235

Relación B/Y = 1/15

Recubrimiento estereoscópico del terreno por modelo = 15.6 m.

Número de fotografías = 10 a cada margen del río.

Número de modelos estereoscópicos = 5 a cada margen del río.

Tiempo de exposición de las fotografías = 1/125 seg.

Apertura relativa = f78

Resolución del negativo = 50 l/mm.

El tamaño del menor objeto visible sobre las fotografías es de 4,7 mm.

Aplicando los criterios de precisión obtenemos:

$$y_{\max} = 11,7 \text{ mm.} \quad x_{\max} = 3,26 \text{ mm.} \quad z_{\max} = 11,3 \text{ mm.}$$

Luego de procesado el material fotográfico, se efectuó la restitución de los 10 modelos fotogramétricos del terreno, produciéndose un plano del sitio de presa a escala 1:100 con curvas de nivel cada metro, como se muestra en la Figura 3.

CONCLUSIONES

Los levantamientos del terreno con Fotogrametría Terrestre ofrecen una alternativa interesante en todos aquellos casos donde:

- El terreno sea de forma compleja o presente gran cantidad de detalles.
- El terreno sea de difícil acceso.
- El terreno sea inestable.
- El trabajo de campo debe ser realizado en un lapso de tiempo muy corto.

Los ejemplos aquí expuestos, representaban dos casos en los cuales la Fotogrametría Terrestre era la única alternativa válida para realizar esos levantamientos.

El método en sí es bastante sencillo y eficaz por lo que es recomendable su divulgación a fin de que pueda ser aplicado normalmente por las empresas e instituciones que tienen a su cargo el levantamiento topográfico del terreno.

FOTOGRAFIA 1. TALUD EN CARRETERA EJIDO LA MESA



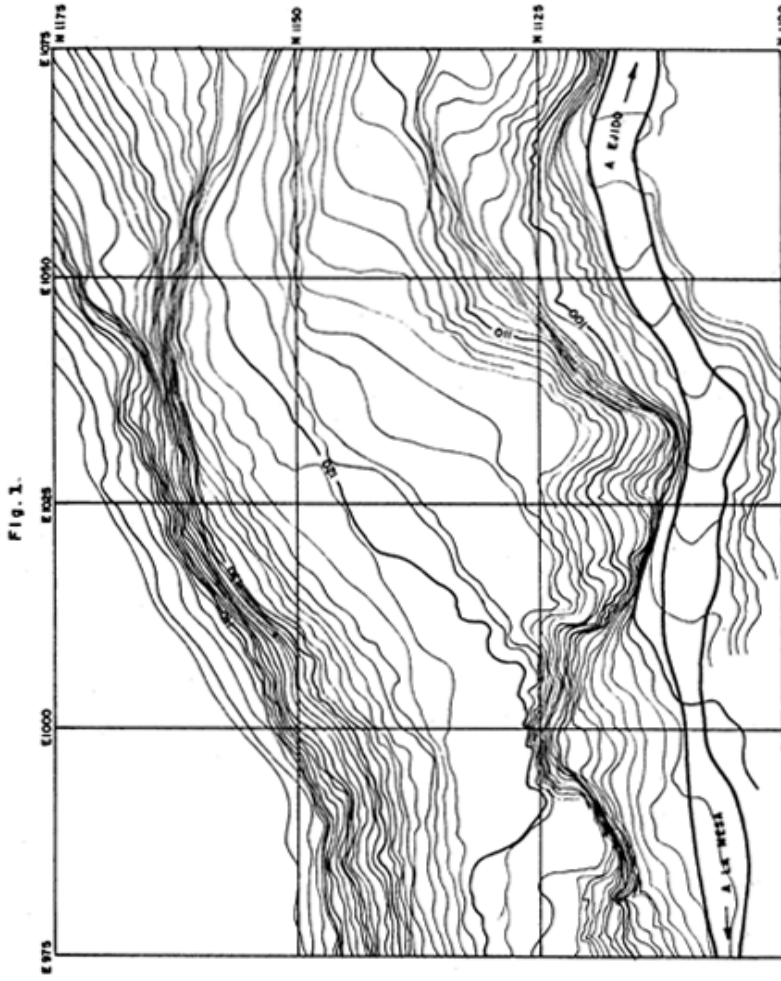
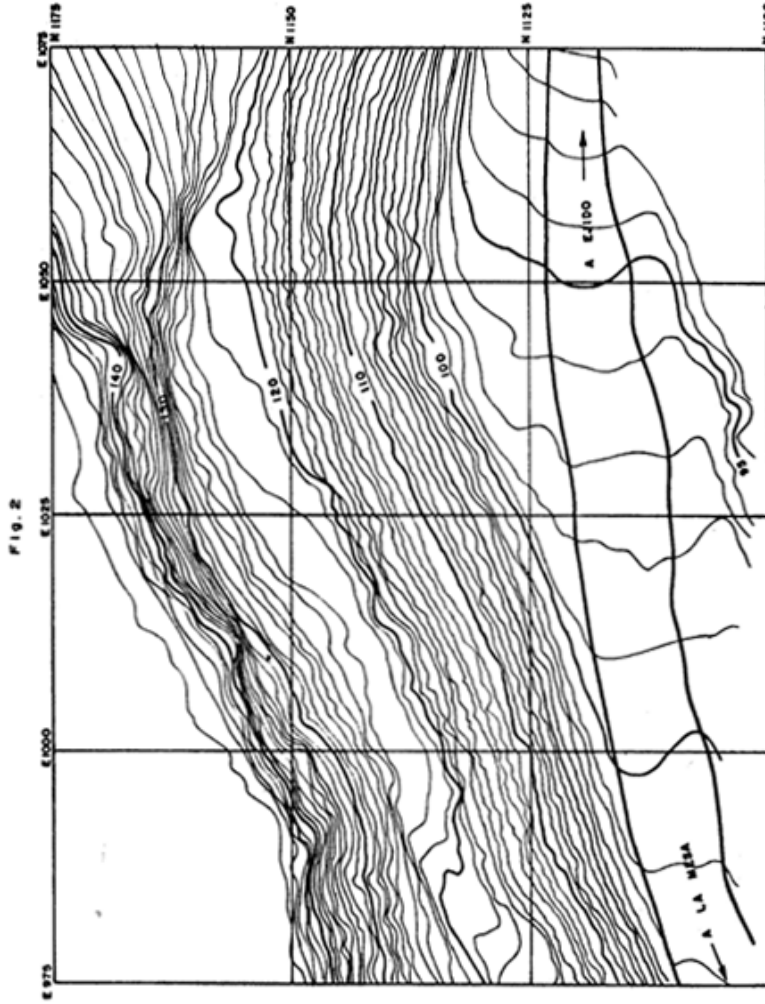


Fig. 1.

REPUBLICA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
INSTITUTO DE FOTOGRAMETRIA
FACULTAD DE INGENIERIA
TALUD EN CARRETERA EJIDO - LA MESA





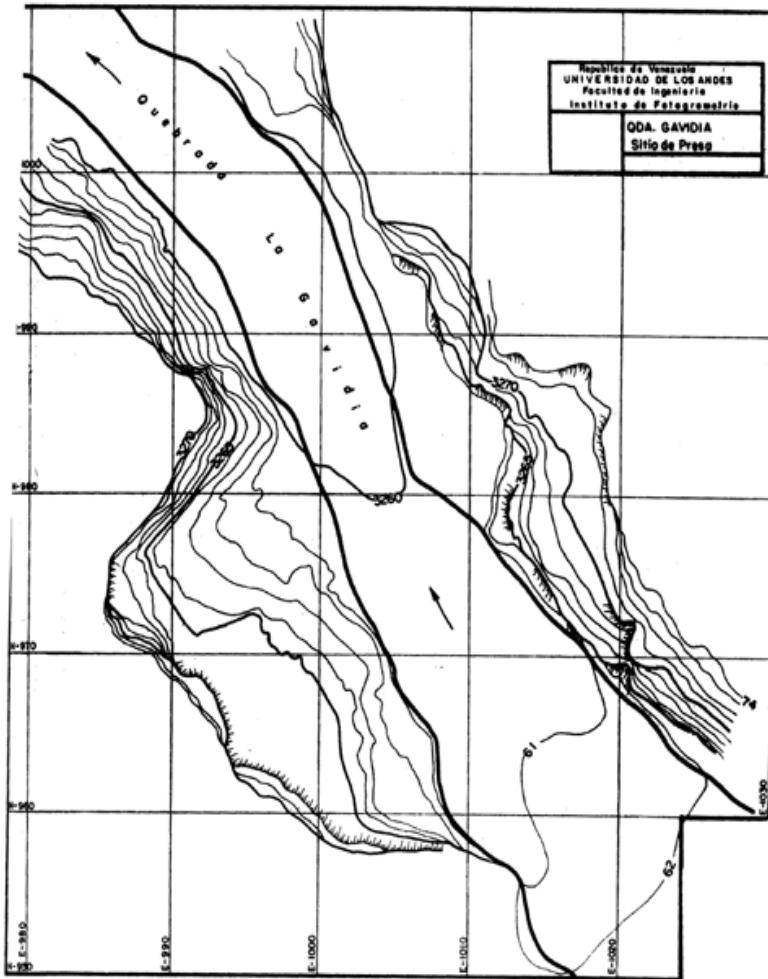
REPUBLICA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
INSTITUTO DE FOTOGRAMETRIA
FACULTAD DE INGENIERIA
TALUD EN CARRETERA EJIDO - LA MESA

b

FOTOGRAFIA 2. PARTE DEL AREA LEVANTADA EN LA QUEBRADA "LA GAVIDIA"



Fig. 3 MAPA DEL AREA DE PRESA SOBRE LA QUEBRADA "LA GAVIDIA"



REFERENCIAS

- <1> AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, Manual of Photogrammetry, A.S.P. (1980)
- <2> COLLINS S., MOON G.: Stereometric Measuremet of streambank Erosion, Photogrametric Engineering, N° 2, Feb. (1979)
- <3> JAUREGUI M.: Aplicaciones Prácticas de la Fotogrametría Terrestre, Trabajo de Ascenso, U.L.A Mérida, (1982)
- <4> SCHWIDEFSKY, K.: Precision Photogrammetry at close range with simple camaras, Photogrammetric record, Oct., (1970)