



FIG. 1.—Vehículo equipado con una bicámara esterométrica (National Police Headquarters. Tokyo, Japón).

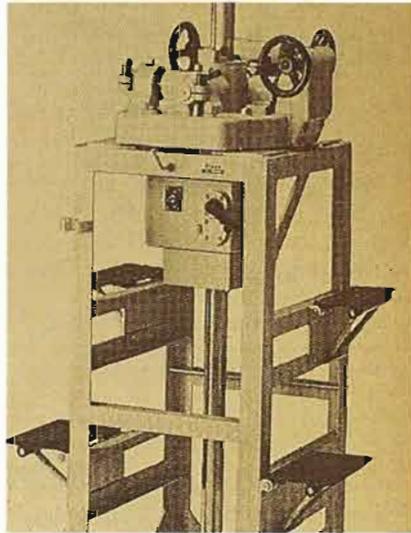
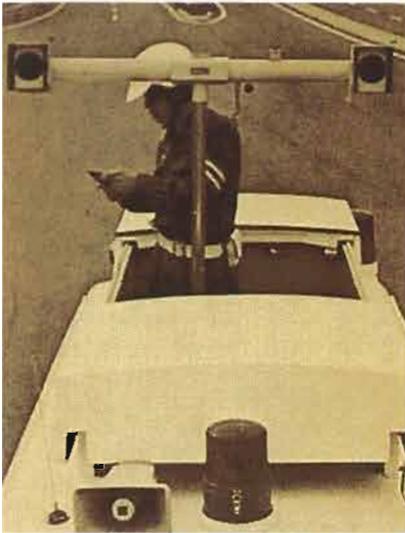


FIG. 2.—Mecanismo de elevación de la cámara (National Police Headquarters. Tokyo, Japón).

El fotograma es un testigo absolutamente objetivo e imparcial de los hechos; su interpretación y mediación admiten un alto grado de exactitud y de valor significativo.

JOAN ROSSINYOL MIRALLES
Ingeniero Industrial
Beca Fundación MAPFRE

La fotogrametría aplicada a la reconstrucción de accidentes de tráfico

La reconstrucción de un accidente de tráfico se fundamenta en el estudio minucioso de los efectos a que ha dado lugar. La huella de una frenada, la posición final de los vehículos implicados en la colisión o la magnitud de las deformaciones, constituyen una valiosa información que es necesario dejar perfectamente documentada para su posterior análisis.

Los momentos siguientes a un accidente están llenos de confusión y nerviosismo, los agentes encargados de la toma de datos no pueden hacer frente a tal avalancha de información y, a menudo, el resultado son mediciones, efectuadas con rapidez, incompletas e imprecisas. El registro de la situación del accidente por la

medición a mano y confección de croquis y bosquejos en el lugar, presenta defectos decisivos. En el caso de un tráfico intenso, este procedimiento engorroso trae consigo congestiones muy problemáticas, e incluso la paralización de la circulación.

Los defectos mencionados se eliminan en gran parte mediante la aplicación de la **fotogrametría**. La toma de los fotogramas, así como los trabajos preliminares necesarios, tales como el marcaje de huellas, etc., no requiere mucho tiempo. El fotograma propiamente dicho es un testigo absolutamente objetivo e imparcial de los hechos; su interpretación y medición admiten un alto grado de exactitud y de valor signifi-

cativo. Las mediciones complementarias ulteriores pueden ser efectuadas en cualquier momento. Es condición, naturalmente, que se haga una elección apropiada de la disposición de las tomas fotográficas, que se disponga de una buena organización del trabajo y, como elemento principal, de un instrumental funcionando de manera irreprochable.

La ciencia y técnica de efectuar mediciones exactas de un objeto a partir de fotografías del mismo se denomina **fotogrametría**. Durante muchos años, el término fotogrametría ha ido asociado a la confección de documentos cartográficos a partir de fotogramas aéreos obtenidos mediante cámaras métricas aerotrans-

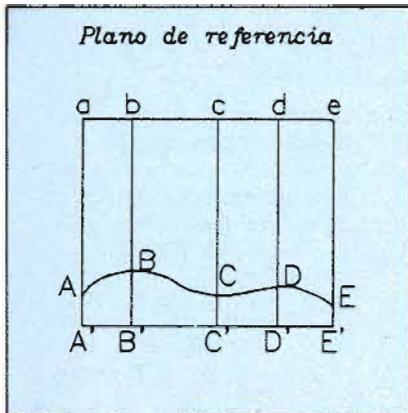


FIG. 3.—Proyección ortogonal.

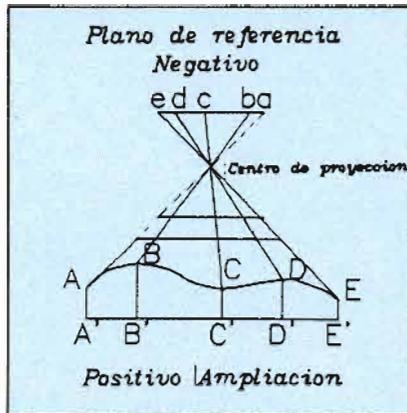


FIG. 4.—Proyección cónica o central.

que permiten utilizar cámaras convencionales de 35 mm.

GEOMETRIA DE UN FOTOGRAMA

Un mapa o un plano es la reproducción a escala de una proyección ortogonal de un terreno o un objeto sobre un plano de referencia. En la figura 3, cada punto del terreno es proyectado perpendicularmente al plano de referencia. Una distancia medida entre dos puntos cualesquiera del mapa y multiplicada por la relación de escala del mapa será igual a la distancia horizontal entre los puntos medida directamente en el campo. En la figura 3, la escala de representación es 1:1; por tanto, $ab = A'B'$; $bc = B'C'$. También se cumple que $ab/bc = A'B'/B'C'$.

En fotogrametría, un fotograma es considerado como una proyección central de un objeto tridimensional en un plano. Todos los puntos del objeto son proyectados en el plano de referencia a través del centro de proyección, que teóricamente coincide con el centro óptico de la cámara fotográfica. En una toma fotográfica, la película se halla situada en el plano de referencia. Otros planos de referencia pueden ser localizados entre el objeto y el centro de proyección. En la figura 4 se hallan representados otros tres planos de representación: una reproducción a escala 1:1 del negativo, denominada positivo; una ampliación y una reducción. Si todos los puntos proyectados se hallan en un plano paralelo al plano de referencia, la proyección resultante será una representación a escala de los puntos originales. En general, los puntos en la realidad se hallan a diferentes alturas y, como consecuencia, la relación entre los puntos proyectados y los originales no se mantiene uniforme. En otras pala-

portadas. El gran desarrollo de la fotogrametría aérea ha sido aplicado a otros campos no propios de la ingeniería, tales como el estudio y conservación de monumentos, aplicaciones médicas, arqueología, documentación de crímenes y accidentes, etc. Este tipo de aplicaciones se denomina fotogrametría terrestre (close-range photogrammetry, en terminología anglosajona).

cas fotogramétricas, y de ellos 200 son expertos operadores de restitución. En 1984, disponían de 310 cámaras estereométricas estratégicamente distribuidas a lo largo del país. El número de estereoplotters era de 67, de características muy similares a los Wild A-40. El número total de estereopares tomados en 1977 fue de 470.000, y de 460.000 en 1984. De todos los estereofotogramas tomados en 1977, 90.000 constituyeron prueba judicial y 63.000 lo fueron en 1984. De los estereopares procesados, 26.000 en 1977 y 23.000 en 1984, dieron lugar a planos detallados del accidente.

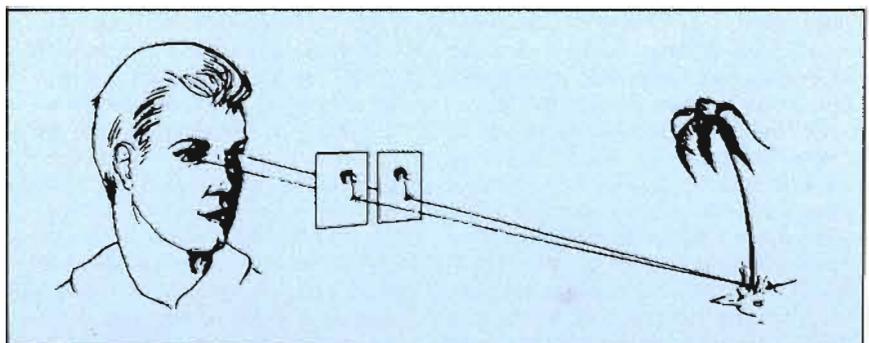
RESUMEN HISTORICO

Una vez inventada la fotografía por Niepces y por Daguerre, en el año 1837, se intentó, a partir de 1851 por Laussedat, en Francia, y a partir de 1858 por Meydenbauer, en Alemania, levantar por primera vez monumentos y fachadas célebres de obras arquitectónicas mediante un método fotogramétrico. Sin embargo, el desarrollo ulterior de la fotogrametría terrestre fue repetidas veces eclipsado por la fotogrametría aérea, la cual, como estaba al servicio de la medición de la superficie de la tierra, prevalecía entre las tareas de la fotogrametría.

Introducida por primera vez en 1933, en Suiza, la fotogrametría terrestre aplicada a la reconstrucción de accidentes de tráfico fue adoptada en Alemania el año 1935. Basándose en las experiencias europeas, Japón la empezó a aplicar en 1967, dotando a la jefatura de Saitama de un vehículo especialmente diseñado para la toma de fotogramas estereométricos (Figs. 1 y 2). Actualmente, es en este último país donde se halla más extendido el uso de la fotogrametría en la investigación de accidentes de tráfico. De las 210.000 personas que componen sus fuerzas policiales, 2.600 son perfectos conocedores de las técni-

La elevada densidad de población existente en Europa y Japón permite que con unos pocos centros dotados con equipos de elevadas prestaciones, cámaras estereométricas y vehículos especiales, se pueda disponer en breve tiempo del material adecuado en el lugar del accidente, obteniéndose un servicio excelente y una buena explotación de los aparatos, en general, bastante caros. En Estados Unidos, los factores sociales son completamente diferentes, necesitándose un gran número de equipos para dar idéntico servicio. Por ello, se han desarrollado nuevas técnicas

FIG. 5.—Mecanismo de la visión estereoscópica.



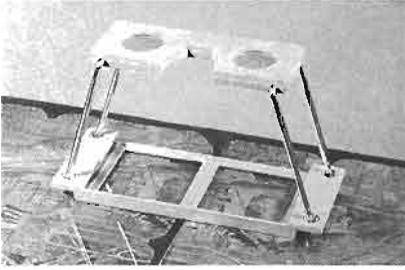


FIG. 6.—Estereoscopio de bolsillo.



FIG. 7.—Estereocompanalítico.

bras, en la figura 4, $ab/A'B' = cd/C'D'$.
El resultado de lo expuesto anteriormente se resume de la forma siguiente: la escala de una fotografía no se mantiene constante en todos los puntos y, como consecuencia, no se pueden efectuar mediciones de forma directa en un fotograma.

VISION ESTEREOSCOPICA

El sistema visual del ser humano percibe los objetos en tres dimensiones. La visión estereoscópica se fundamenta en dos fenómenos diferentes. Uno, la experiencia, mediante la cual el hombre es capaz de ordenar un paisaje, situando en distintos planos de profundidad los elementos que lo integran. Otro, la diferencia entre las imágenes bidimensionales captadas por ambos ojos, que son integradas en una sola a través de un proceso psicofisiológico en el que interviene el ojo y el cerebro.

Al igual que lo que ocurre cuando se observa la realidad con un solo ojo, en una fotografía no se puede apreciar el relieve de lo representado. Serán necesarios dos fotogramas del mismo objeto tomados desde dos puntos de vista diferentes para que de forma artificial, observando la fotografía izquierda con el ojo izquierdo y la derecha con el ojo derecho se reproduzca el fenómeno de la visión estereoscópica (Fig. 5).

De la necesidad de tener como mínimo dos fotogramas de un accidente para su observación estereoscópica se deduce que cuando se

La escala de una fotografía no se mantiene constante en todos los puntos y, como consecuencia, no se pueden efectuar mediciones de forma directa en un fotograma.

disponga únicamente de fotogramas aislados sólo podrán efectuarse mediciones bidimensionales, que muchas veces serán suficientes, como es el caso en que se desee obtener la longitud de una marca de frenada.

Para facilitar la visión de un par de fotografías estereoscópicas, también denominado **estereopar**, se han diseñado una inmensa gama de instrumentos, que van desde los sencillos **estereoscopios** (Fig. 6) a los sofisticados **estereo-comparadores analíticos** (Fig. 7).

INSTRUMENTACION

Plantilla de tráfico

Tanto **The Traffic Institute** (Northwestern University) como el **Institute of Police Technology and Management** (University of North Florida) disponen de una plantilla de dibujo (Fig. 8), que integra los signos más corrientes que aparecen en el dibujo de un croquis de un accidente. Entre las características más importantes cabe resaltar las siguientes:

FIG. 8.—Plantilla de tráfico.

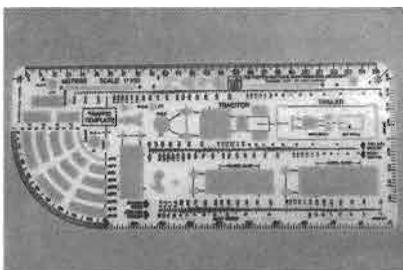


FIG. 9.—Bicámara estereométrica Carl Zeiss Jena (1956).

dibujo de vehículos, signos y señales; permite determinar la pendiente de la carretera; cálculo del factor de arrastre a partir de la velocidad y la distancia de parada.

Cámaras fotográficas

Cuando la fotogrametría terrestre empezó a aplicarse a la reconstrucción de accidentes de tráfico, las únicas cámaras utilizadas eran las denominadas **bicámaras estereométricas**, o simplemente **bicámaras**.

En la figura 9 aparece una bicámara fabricada por la firma **Carl Zeiss Jena** y utilizada en la República Democrática Alemana desde el año 1956. Está constituida por dos cámaras fotográficas idénticas, rígidamente unidas una a otra por un tubo de base, y pueden llevarse, mediante un pie telescópico, a la altura más conveniente sobre el terreno. En este caso, la longitud de la base es de 1,20 m. En la posición de trabajo, la base y las direcciones de toma son horizontales. Estas últimas son estrictamente paralelas una con respecto a otra y se hallan en ángulo recto con respecto a la base. Esto corresponde, con suma precisión, al caso normal de la estereofotogrametría y asegura la reducción a las relaciones más simples de perspectiva geométrica durante la evaluación de los fotogramas. Este tipo de cámaras se caracterizan por disponer de unos objetivos prácticamente sin distorsión, y en el momento de la toma fotográfica son impresas unas marcas en la película (**marcas fiduciales**) que posterior-

mente servirán para el centrado en el equipo de restitución.

En Japón, además de la bicámara de la figura 1, también se utiliza una bicámara Nikon TS-20, de construcción mucho más sencilla y menos voluminosa (Fig. 10).

La utilización de bicámaras para la documentación de accidentes presenta la gran ventaja de que es necesaria muy poca información de campo para la realización de un plano del mismo, dado que la posición relativa entre ambas tomas fotográficas es perfectamente conocida. La desventaja más importante que presentan es su elevado coste de adquisición. Mientras los equipos de fotogrametría disponibles en el mercado sólo permitían la restitución de fotogramas tomados con bicámaras, éstas fueron muy utilizadas, pero la introducción en los últimos años de la estereocomparadores analíticos ha hecho que casi todas las firmas comerciales abandonaran su fabricación.

Las mínimas distorsiones que presentan los objetivos de las cámaras son una de las principales causas de su elevado precio, y en muchas aplicaciones no es necesario tal grado de precisión. Con objeto de reducir el coste que supone la utilización de la fotogrametría se han seguido dos vías: fabricación de cámaras fotográficas más sencillas y el diseño de estereocomparadores que permitan la restitución de fotogramas tomados con cualquier tipo de cámara.

Las cámaras fotográficas situadas entre las cámaras métricas y las de aficionado se denominan **cámaras semimétricas**. Se caracterizan por tener unos objetivos de elevadas prestaciones, óptica intercambiable y estar dotadas de una malla reticulada en el plano de formación de la imagen. Esta malla reticulada permite conocer si la película se hallaba perfectamente plana en el momento de la exposición o si ha sufrido deformaciones durante el proceso de revelado.

En la actualidad existen varios fabricantes de este tipo de cámaras, entre los que cabe mencionar la firma **Rollei**, con sus cámaras de 35 y 60 mm. Rolleiflex 6006 (Fig. 11) y Rolleiflex 3003; **Hasselblad**, con su MK 70 y, últimamente, Wild (Leica) y **Bronica**.

Dibujo asistido por ordenador

Pocos son los campos de la actividad humana que hoy en día no se hayan visto invadidos por la informática. Inicialmente, la informática

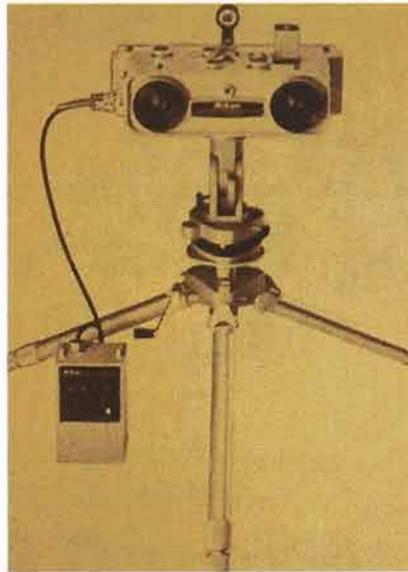


FIG. 10.—Bicámara Nikon TS-20.

se aplicó de forma intensiva a la resolución de problemas de cálculo y, posteriormente, al campo de la gestión; actualmente una de las zonas donde el mercado informático tiene más expansión es la del diseño asistido por ordenador.

Los clásicos útiles de dibujo han sido sustituidos por el **digitalizador**, la **pantalla gráfica** y el **plotter** o mesa de trazadora automática. El digitalizador consiste en un tablero de dibujo conectado al ordenador y un cursor. El ordenador conoce en cada momento la situación del cursor sobre la mesa y permite la colocación de un menú a través del que se van a dar las correspondientes órdenes de dibujo a la máquina, o bien van a poder ser copiados dibujos de planos ya existentes. La pantalla gráfica es la hoja donde se observa cómo va evolucionando el dibujo a medida que se van introduciendo nuevos elementos o alterando los ya existentes. Una vez terminado el dibujo, su reproducción sobre papel se realiza mediante el **plotter**.

Entre las diferentes ventajas que

FIG. 12.—Plano de un accidente.

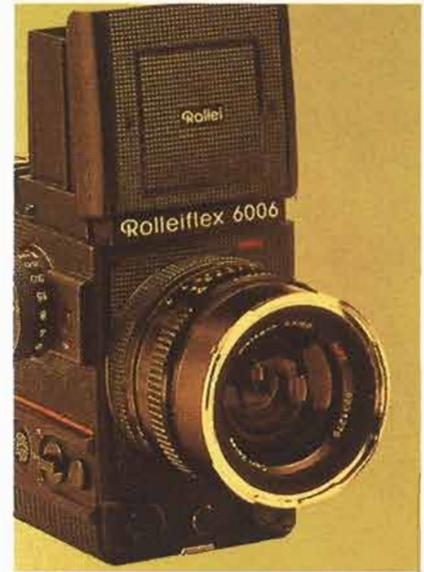
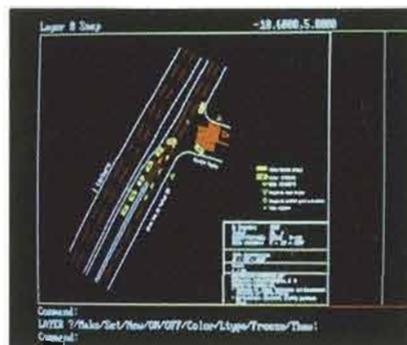


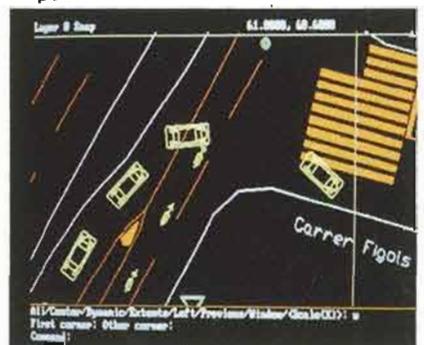
FIG. 11.—Cámara Rolleiflex 6006 Metric.

ofrece la utilización de un sistema de dibujo automático cabe citar las siguientes: utilización de planos de calles o carreteras previamente almacenados en la memoria del ordenador, disponer de archivos de los símbolos y caracteres más utilizados, posibilidad de efectuar mediciones de forma directa en el dibujo, acotación automática, interconexión del programa de dibujo con sistemas de restitución, obtención de planos sobre papel a cualquier escala, estándares de los tramos con mayor índice de peligrosidad, etc.

En el mercado existen multitud de programas de dibujo asistido por ordenador. A nivel mundial, los más utilizados son el programa **AUTOCAD**, de la firma Autodesk Inc., y el software **MICROSTATION**, de Intergraph.

En la figura 12 se puede observar un plano de un accidente realizado con la ayuda del programa de dibujo Autocad. Una ampliación de la zona donde se produjo el impacto se representa en la figura 13.

FIG. 13.—Ampliación de la zona del impacto.



Los clásicos útiles de dibujo han sido sustituidos por el digitalizador, la pantalla gráfica y el plotter.



FIG. 14.—Rolleimetric MR Image Analysis System.



FIG. 15.—Modo de utilización.

Sistemas gráficos aplicados a la restitución

La reconstrucción de accidentes de tráfico no podía ser una excepción y también se ha informatizado. En la actualidad, se comercializan dos sistemas para la extracción de información a partir de fotografías: el sistema **Rolleimetric MR** (Figs. 14, 15), comercializado por la firma Rollei, y el **Seagle 30 Photo Digitizer System**, de la casa Benima AB (Fig. 16). Ambos sistemas disponen de una mesa digitalizadora, un ordenador y un plotter para el dibujo.

El software de estos sistemas permite la restitución de fotogramas aislados y de estereofotogramas, siem-

pre partiendo de la base de que se dispone de la suficiente información de campo para que el programa pueda calcular la orientación. La información de campo necesaria depende del grado de exactitud deseado, siendo suficiente conocer una distancia cuando sólo tengan que efectuarse medidas en un plano. Será necesaria información tridimensional para efectuar mediciones espaciales.

Estos sistemas son muy adecuados para la restitución de fotogramas aislados y en el caso de que en un estereofotograma se tengan que medir unos pocos puntos, puesto que en caso contrario es mucho mejor utilizar un restituidor.

Sistemas fotogramétricos

Los primeros equipos de restitución fotogramétrica eran sistemas óptico-mecánicos (**restituidores analógicos**) que reconstruyen los haces perspectivos que constituyen la toma fotográfica (Fig. 17). Por su propia concepción, estos equipos sólo admiten fotogramas tomados con cámaras métricas o bicámaras y no per-

miten una gran desviación con respecto de los ángulos de toma óptimos.

Con la aportación de los **estereocomparadores analíticos** se han eliminado todas las limitaciones que imponían los restituidores analógicos, dado que la reconstrucción del modelo estereocópico se realiza de forma matemática. Estos equipos permiten la restitución de tomas métricas y no métricas, y no requieren disposiciones especiales para las tomas fotográficas. La única condición que deben cumplir los fotogramas es que la zona de interés se halle representada, como mínimo, en dos fotografías.

El equipo más moderno actualmente en el mercado es el **Micro Photogrammetric System** (Fig. 18) diseñado por la firma Adam Technology, de Australia. El MPS permite la restitución de estereofotogramas de un formato máximo de 7×7 cm. y funciona conectado por un canal serie a un ordenador personal tipo IBM-AT. La concepción modular del software de operación hace que su manejo pueda ser aprendido muy rápidamente por personal no expe-

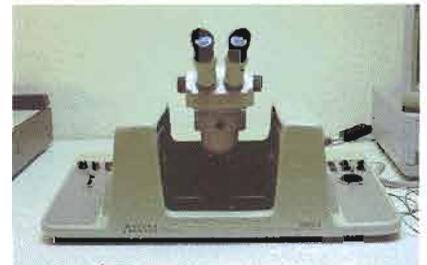
FIG. 16.—Seagle 30 Photo Digitizer System.



FIG. 17.—Restituidor analógico Zeiss.



FIG. 18.—MPS-2 Micro Photogrammetric System (Adam Technology).



rimentado en técnicas fotogramétricas con la única condición de poseer una buena visión estereoscópica. Toda la información se almacena en un archivo en disco que, posteriormente, puede ser tratado con un programa de dibujo asistido. En estos momentos este equipo está en fase de pruebas de aceptación por parte de la policía australiana.



FIG. 19.—Aplicación del método de la malla en perspectiva.

6. RESTITUCION DE FOTOGRAMAS AISLADOS

En muchos casos, la única documentación existente de un accidente la constituyen fotografías tomadas sin ningún tipo de criterio para su posterior observación estereoscópica. Para obtener información métrica de los mismos es necesario aplicar métodos basados en las propiedades geométricas de la perspectiva fotográfica. El método más utilizado es el de la malla en perspectiva puesto en práctica por William G. Hyzer, y que desde la década de los setenta se enseña en el **Traffic Institute**, de la **Northwestern University**.

Básicamente, esta técnica se fundamenta en disponer de una malla de dimensiones conocidas en la zona a fotografiar. De esta forma, todos aquellos objetos que se encuentren situados en el plano que contiene la malla pueden ser perfectamente dimensionados. Una de sus principales ventajas es su fácil aplicación, mientras que su principal inconveniente es el de reducir la posibilidad de efectuar mediciones estrictamente en el plano que contiene la placa.

En la figura 19 se observa una fotografía de unas huellas de frenada y en su parte inferior, la placa de dimensiones conocidas.

La resolución gráfica se realiza sobre una ampliación de la fotografía, y los pasos a seguir se pueden resumir de la forma siguiente:

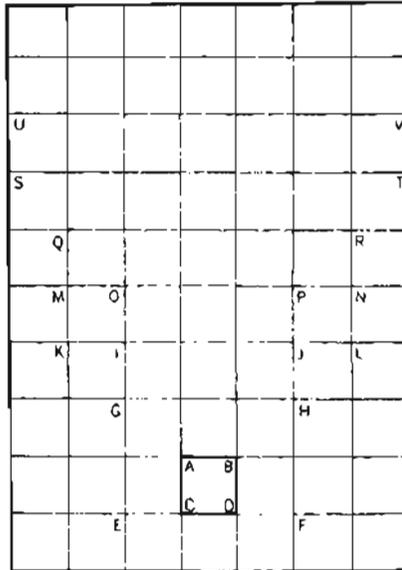


FIG. 22.—Malla ortogonal.

- Localización de los puntos de fuga.
- Dibujo de la malla.
- Preparación de la malla ortogonal.
- Traspaso de los puntos.

Este proceso se puede observar en las figuras 20, 21, 22 y 23, donde se ha representado una fotografía con dos marcas y la placa de dimensiones conocidas. El resultado final es un plano a escala del lugar del accidente.

En determinadas ocasiones, la ausencia de la placa puede ser suplida por marcas de dimensiones conocidas. En la figura 24 se representa una fotografía en la que se ha trazado la perspectiva a partir de las marcas de separación entre carriles. En la figura 25 se presenta el resultado de las mediciones efectuadas.

Cuando la malla no aparece en las fotografías y tampoco es posible utilizar elementos de magnitud determinada, es posible obtener información de los fotogramas mediante **métodos analíticos**. El campo de

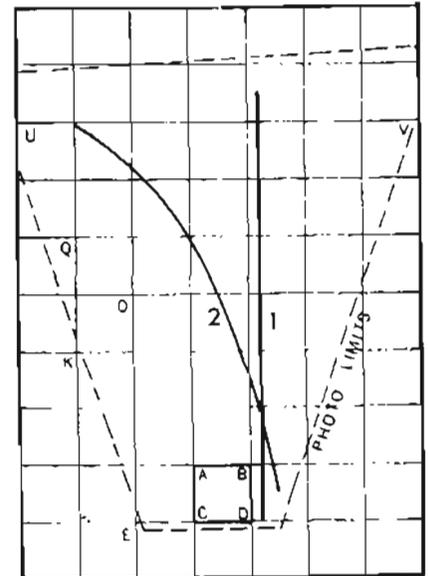


FIG. 23.—Mapa de la zona.

ampliación de este método se reduce a superficies planas y se ha de conocer las posiciones de cuatro o más puntos claramente identificables en el fotograma.

En la figura 26 aparece el fotograma de un accidente y en él se hallan señalados los puntos A, B, C, D, cuyas distancias relativas entre ellos son conocidas por haber sido medidas con cinta métrica. Mediante la resolución de la ecuaciones que definen la perspectiva se determinan las constantes de calibración y se pueden determinar las coordenadas de los demás puntos de interés. El resultado aparece en la figura 27.

RESTITUCION DE FOTOGRAFIAS ESTEREOSCOPICAS

Si se desean efectuar mediciones de puntos tridimensionales o disponer de una documentación exhaustiva del accidente se necesitan como mínimo dos fotogramas que abarquen la misma zona. De forma gráfica se puede explicar fácilmente

FIG. 20.—Localización de los puntos de fuga X, Y, Z.

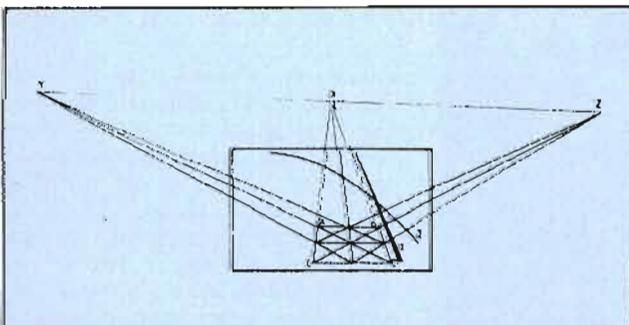


FIG. 21.—Dibujo de la malla.

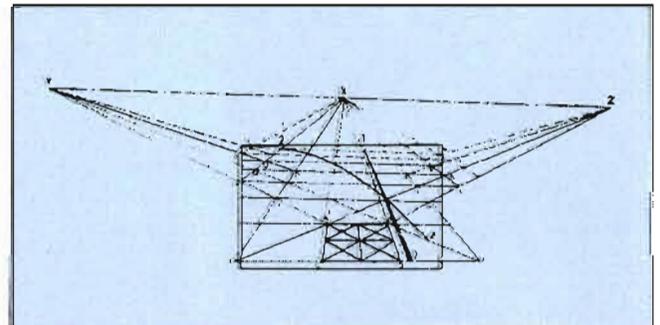




FIG. 24.—Utilización de las marcas de separación de carriles como referencia para la aplicación del método del malla.

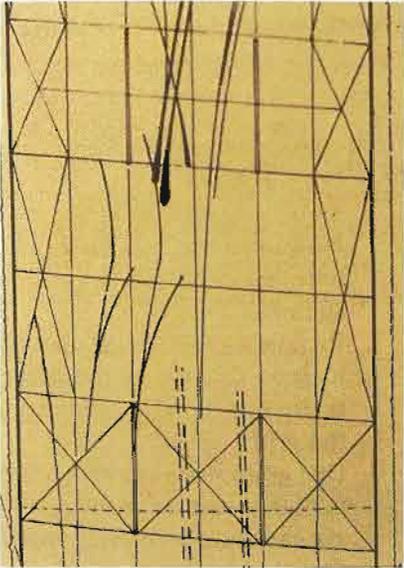


FIG. 26.—Mapa obtenido a partir de la foto anterior.

esta necesidad: la posición de un punto en el espacio se halla perfectamente definida por la intersección de, al menos, dos haces de rayos. Las fotografías con recubrimiento estereoscópico se pueden conseguir mediante la utilización de una cámara estereométrica, tal como la representada en la figura 9, o bien situando la cámara en dos posiciones consecutivas desplazadas una cierta distancia de forma paralela al lugar del accidente.

Utilizar una cámara estereométrica

FIG. 26.—Fotograma con puntos de coordenadas conocidas.



El número total de estereopares tomados en Japón en 1977 fue de 470.000, y de 460.000 en 1984.

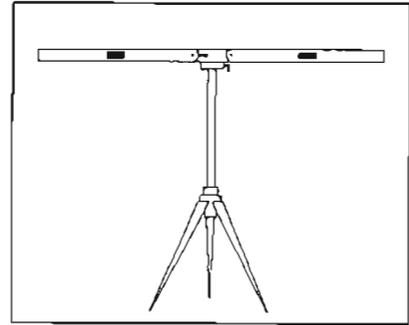


FIG. 28.—Trípode para la toma de fotografías estereoscópicas.

- Se adapta a cualquier tipo de cámara, posibilitando el uso de las cámaras ya adquiridas.
- Es muy manejable y se transporta fácilmente.
- El proceso de operación de las tomas se aprende rápidamente.
- Dada la rapidez con que se toman las fotografías es posible despejar la vía de forma rápida.
- Reducido coste de adquisición.

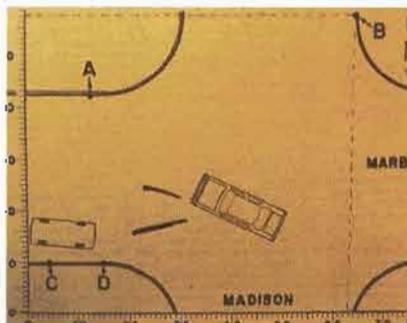
supone la gran ventaja de que no es necesario tomar ninguna medida en el lugar de los hechos, al ser perfectamente conocida la situación de la cámara fotográfica. La desventaja que presenta es su alto precio.

Un sistema alternativo a la bicámara es la utilización de un trípode lo suficientemente rígido para que permita situar la cámara de forma alternativa en ambos extremos y en la posición central sin que se mueva. En la figura 28 se representa un trípode de estas características. Está constituido por dos brazos plegables y tres puntos (central y extremos) donde se pueden fijar la cámara fotográfica, y dispone de los suficientes grados de libertad para ser orientado en cualquier dirección.

Entre las ventajas que presenta la utilización de este trípode cabe destacar las siguientes:

- Permite una rápida documentación del accidente sin necesidad de realizar mediciones in situ.

FIG. 27.—Plano correspondiente a la figura 26.



Una vez se han obtenido las fotografías, éstas pueden ser restituidas mediante un estereocomparador analítico, tal como el MPS-2, o bien punto a punto, mediante un programa de ordenador, tal como la Transformación Lineal Directa (Direct Linear Transformation Approach. DLT). Este programa fue desarrollado en la Universidad de Illinois, en 1971.

Los dos métodos de observación ofrecen idéntica precisión, si bien la observación estereoscópica en el estereocomparador aporta mucha más información sobre el accidente.

MEDICION DE DEFORMACIONES

La estimación de la velocidad a partir de las huellas de frenada está empezando a ser sustituido por la medición de las deformaciones sufridas por los vehículos como fuente de información.

La fotogrametría permite medir las deformaciones sufridas por los vehículos a partir de fotografías estereoscópicas. La evaluación se realiza en un estereocomparador analítico, con salidas numéricas en un formato compatible con los programas de cálculo.

Entre los programas que aceptan información fotogramétrica cabe mencionar los siguientes: **COLLISION DEFORMATION CODE (CDC)**, adoptado por la SAE, y el **CRASH3**, programa elaborado por el NHTSA. ■