

# Aplicaciones del Láser Scanner a la ingeniería civil.

**José Herráez Boquera<sup>(1)</sup> ; José Luis Denia Ríos<sup>(2)</sup> ; Emilio Miguel García García<sup>(3)</sup> ;  
Pablo Navarro Esteve<sup>(4)</sup>**

<sup>(1)</sup> Universidad Politécnica de Valencia, [jherraез@cgf.upv.es](mailto:jherraез@cgf.upv.es)

<sup>(2)</sup> Universidad Politécnica de Valencia, [jdenia@cgf.upv.es](mailto:jdenia@cgf.upv.es)

<sup>(3)</sup> Universidad Politécnica de Valencia, [emgarga0@aaa.upv.es](mailto:emgarga0@aaa.upv.es)

<sup>(4)</sup> Universidad Politécnica de Valencia, [pnavarr1@ega.upv.es](mailto:pnavarr1@ega.upv.es)

© Copyright: José Herráez Boquera, José Luis Denia Ríos, Emilio Miguel García García, Pablo Navarro  
Esteve

E-mail: [jherraez@cgf.upv.es](mailto:jherraez@cgf.upv.es)

RECEPCIÓN: 22-03-2012

APROBACIÓN: 29-03-2012

# **Aplicaciones del Láser Scanner a la ingeniería civil.**

## **RESUMEN**

La evolución de los instrumentos de topografía hacia la obtención masiva de información de todo el entorno, está haciendo cada vez más útiles los equipos de scanner de laser. El progresivo descenso del precio inicial de adquisición, la mejoría en los equipos informáticos que manejan la información de la nube de puntos, la mayor versatilidad de los programas de explotación así como el incremento de las funciones implementadas hacen cada vez más atractiva su utilización. En la actualidad resulta más útil en la fase de medición obtener toda la geometría del entorno de trabajo, para luego en gabinete decidir cual será la información que se extrae o se aprovecha puntualmente.

**Palabras clave:** Scanner laser, fotogrametría, medición, nube de puntos.

# **Applying scanner laser in civil engineering works.**

## **Abstract**

The development of instruments for surveying to obtain massive information of the environment is becoming increasingly useful, and for it, laser scanner equipment is a new tool. The progressive decrease the initial purchase price, the computers improvement for handling the point-cloud, the programs versatility and the implemented functions; have made profitable their use. Today are useful in the measurement work, for obtaining all the geometry of the environment. Later, in the office work we can decide which information is removed or useful. We sow in this article some application examples.

**Key words:** Scanner laser, photogrammetry, surveying, point Cloud.

## Introducción.

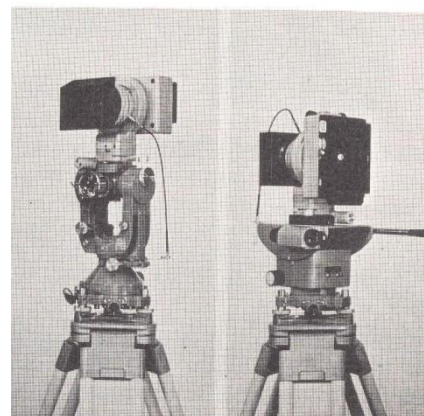
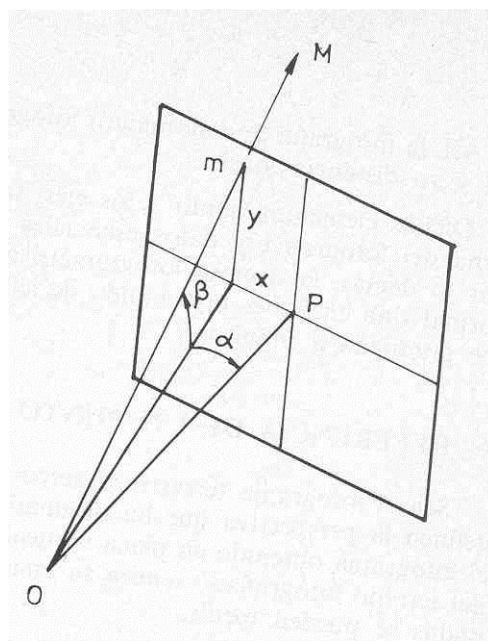
Inspirados en los métodos fotogramétricos, en los que la obtención de un único par de imágenes del entorno, permitía obtener la geometría de un gran número de puntos del espacio; (siempre que el punto necesario este en la zona de recubrimiento del par fotogramétrico). Hacía falta diseñar un instrumento topográfico que emulando la fotogrametría fuese capaz de obtener del entorno una nube de puntos que cubriendo un ángulo específico contuviera todos los puntos que pudieran ser medidos.

Hace algo más de un siglo la fotogrametría había simplificado y abaratado el proceso de medición, sobre todo a partir del momento en que la fotografía permitió la toma global de todo el entorno que observamos mientras trabajamos en la medición: El penúltimo paso fue quizás la aplicación de la fotografía aérea, en la que el espacio modelo se observa desde el punto de vista más rentable (desde el espacio); de modo que cualquier superficie queda representada en el área más grande posible en la imagen y con el mínimo despilfarro de superficie de imagen.

Hasta la aparición de las aplicaciones métricas de la fotografía, las mediciones se realizaban utilizándose métodos que llamamos topográficos, en los que se realizan mediciones angulares y de distancia, y con ellas se realiza el cálculo de coordenadas en el espacio. Utilizando bien dos ángulos, dos distancias o un ángulo y una distancia pueden obtenerse las coordenadas  $(x, y)$ ; y con un ángulo mas o una diferencia de cota, la tercera coordenada  $(z)$ . Sin embargo el método más rentable era la radiación, midiendo a partir de un punto dos ángulos y una distancia para obtener las tres coordenadas.

Cuando el geómetra se dirige a realizar la medición, selecciona un objetivo para la medición y apuntando a ése obtiene ángulo o distancia. El despilfarro de tiempo utilizado para obtener de ese escenario solo geometría de un punto se resolvió adicionando al instrumento topográfico una cámara conocida (como vemos en la imagen adjunta). Cada vez que vamos a obtener los datos angulares o de distancia de un único punto obtenemos además una imagen del escenario . Este procedimiento fue el inicio de la fotogrametría y realizando una única observación geométrica, recopilamos en una fotografía adicional (fotograma), la información geométrica de un número casi infinito de puntos adicionales que aparecen en la imagen. El procedimiento se denominó fotogrametría terrestre y el instrumento diseñado fototeodolito, del cual se diseñaron muchas variantes.

El método permitía salir con un instrumento topográfico, y auxiliándose de una cámara fotográfica obtener una reserva de información por si algún punto de la imagen fuera interesante sin necesidad de volver al mismo punto a realizar una nueva medición adicional. Sobre la imagen se medían coordenadas  $x$  e  $y$ , que fácilmente podían transformarse en datos angulares que pudieran ser tratados como datos procedentes de un instrumento topográfico.



Angulo horizontal:  $\alpha = \text{Arctan} \left[ \frac{x}{f} \right]$

Angulo vertical de altura:  $\beta = \text{Arctan} \left[ \frac{y}{\sqrt{x^2 + f^2}} \right]$

Como el sistema de medición angular y de distancias existía ya era utilizado sistemáticamente por los profesionales de la topografía, faltaba diseñar un instrumento que repitiera la operación del instrumento topográfico con mucha mayor rapidez asimilándose a una cámara fotográfica pero añadiendo ahora la medición de distancias. Con un instrumento topográfico se puede obtener la geometría de un punto (ángulos horizontal, vertical y distancia) con una velocidad máxima de un punto quizás cada 3 segundos; había que aumentar esa velocidad hasta 1.000, 10.000, 100.000 o 1000.000 puntos por segundo.



El resultado que obtenemos es una matriz de datos en el espacio semejante a una toma fotográfica, en la que además de los ángulos horizontal y vertical y color del punto que obtiene la cámara adjunta al instrumento, disponemos de la distancia en el espacio para cada uno de los puntos. De algún modo el diseño permitiría realizar un trabajo topográfico masivo desde cada uno de los puntos de estación, tomando de forma sistemática un número ingente de puntos, en el que la disposición sistemática en forma matricial podría ser la más rentable por facilitar su ordenación, almacenamiento y tratamiento posterior. Dada la enorme cantidad de puntos medidos al conjunto se le ha denominado nube de puntos (point cloud).

Con un instrumento topográfico adaptado a esta nueva situación podremos llegar a obtener nubes de puntos con una cantidad de información muy grande, por lo que si hacemos algunos cálculos sencillos diremos que con un instrumento simple con precisión de 20 segundos centesimales y llegando a aprovechar solamente la quinta parte de su precisión podríamos en una vuelta completa de horizonte obtener 40.000 puntos distintos (uno cada minuto centesimal).

Por otro lado si solamente cubriéramos sobre el frente un ángulo de 60 grados y aplicando la misma resolución, permitiría obtener en este recorrido 6.000 puntos.

Si hacemos simplemente la multiplicación veremos que el total de puntos obtenido en este recubrimiento es de 240 millones de puntos; y podríamos obtener veinticinco veces más con este equipo.

Si la máxima distancia de toma de datos fuera de 50m. cualquier instrumento nos proporciona precisiones en medición de distancia entre 3 y 6mm. Y el especificado instrumento de medición de ángulos nos proporciona precisiones de :

$$\frac{0.0020}{63.6620} * 50 = 0.002 \text{ m.} = 2 \text{ mm.}$$

La densidad obtenida de puntos a 50 metros resulta como mínimo una malla de:

$$\frac{0.010}{63.6620} * 50 = 0.008 \text{ m.} = 8 \text{ mm.}$$

Según pues nos demuestran los números, resulta sencillo obtener la geometría de nuestro entorno con más de un punto cada centímetro con precisión de algunos milímetros.

El trabajo con el “nuevo” sistema requiere adaptar los antiguos métodos-ecuaciones topográficos y fotogramétricos al nuevo conjunto de datos de modo que resuelvan de forma eficaz la generación, visualización, el manejo y la extracción de información de las geometrías medidas, resolviendo las necesidades que el instrumento diseñado plantee en cada momento.

Para que el nuevo instrumento sea eficaz necesitamos unas características de la instrumentación que permita obtener esta información en una cantidad de tiempo moderada. Si consideramos eficaz obtener una estación cada 15 minutos, la velocidad de trabajo de nuestro instrumento sería aconsejable fuera al menos de:

$$\frac{240.000.000}{15 \cdot 60} = 266.666$$

Habida cuenta que los instrumentos mas rápidos del mercado sobrepasan los 500.000 puntos por segundo, deberemos pensar que quizás esta aplicación está ya disponible para su aprovechamiento. Por otro lado instrumentos con velocidades de 50.000 puntos por segundo se encuentran a la quinta parte de velocidad de la propuesta anteriormente.

Del mismo modo que en fotogrametría imágenes de 1000 Mpixel aun no están disponibles (es el tamaño de imagen que se obtiene al escanear un fotograma de aérea de 220mm\*220 mm con una resolución de 7 micras). El uso de escáneres con velocidades de 500.000 puntos por segundo no está al alcance de cualquier usuario, pero pronto se encontraran al alcance de los técnicos para su trabajo diario.

Como objetivo de investigación y transferencia de tecnología en la universidad, desarrollamos la aplicación en las actividades cotidianas del profesional de la ingeniería de obra, y para ello disponemos de algunos ejemplos de aplicación rentable de esta tecnología en labores que denominaríamos “cotidianas”.

Como aplicación docente:

- Nuestro primer objetivo es enseñar a nuestros alumnos la aplicación de estos sistemas, en docencia reglada, y en máster de especialización.
- Comprobando la calibración del equipo y el funcionamiento de los sistemas de espejos, comprobando algunas propiedades del montaje específico de nuestros equipos.
- Obtención de geometría para las prácticas en asignaturas de dibujo y sistemas de representación y asignaturas en máster de restauración.

Aplicaciones en Cálculo de estructuras:

- Medición de estructuras metálicas existentes para su cálculo estructural por el método de los elementos finitos, con obtención de nudos, longitudes de elementos, geometría de estos (secciones y espesores),...para su introducción automática para el cálculo.

Aplicaciones en Ingeniería hidráulica:

- Generación de modelos de cauces de ríos, puentes y aliviaderos, para simulación de avenidas y de riesgo de erosión para el diseño del proyecto de protección.

#### Aplicaciones en Ingeniería del terreno.

- Generación de modelos de laderas para estudios de estabilidad.
- Modelos para cubicación de canteras y vertederos.

#### Aplicaciones en Ingeniería Civil.

- Obtención de perfiles transversales de una carretera situando el equipo sobre un carro motorizado.

#### Aplicaciones en prevención de incendios.

- Obtención de la forma de la superficie de riesgo para generar una simulación mediante elementos finitos del resultado de aplicar la ecuación de Navier-Stokes.

#### Aplicaciones en modelado.

- Obtención de modelos de objetos de menor tamaño con propósitos de diseño artístico.

A continuación estudiaremos cómo funciona un instrumento de láser en la actualidad y justificaremos la metodología de trabajo para sus posibles aplicaciones en la ingeniería civil, para posteriormente ver un pequeño extracto de algunos casos reales abordados por el grupo de Fotogrametría del Instituto de Restauración del Patrimonio.



## EL INSTRUMENTO DE LASER (SCANER DE LASER).

La palabra LASER es un acrónimo de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación) y es un dispositivo que utiliza un efecto que tienen algunos cristales de emisión de luz, para generar un haz de luz coherente. Las propiedades fundamentales para nuestra técnica es que la frecuencia emitida es única (monocromática) y la onda emitida es coherente. Hace ya algunos años que por diversos procedimientos se consiguió modular en amplitud la onda emitida, por lo que la emisión de láser puede transportar otra señal (señal de modulación).

La palabra LIDAR (un acrónimo del inglés Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging), es una tecnología que permite determinar la distancia a un objeto utilizando un emisor láser. En general, la tecnología LIDAR tiene aplicación siempre que queramos medir una distancia.

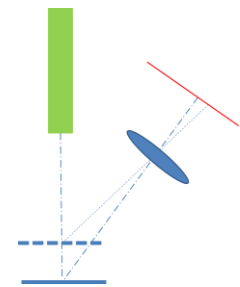
Los instrumentos de medición de láser se presentan normalmente como instrumentos cuya medición se realiza sin contacto con el objeto (a distancia). Sin embargo se realiza una emisión de láser que se dirige al objeto y solo podemos obtener medición a través de la parte de la emisión que regresa tras el contacto con el objeto (por reflexión).

Definimos como albedo la relación, expresada en porcentaje, de la radiación que cualquier superficie refleja sobre la radiación que incide. Las superficies claras tienen valores de albedo mayores que las oscuras. El albedo medio de la Tierra según la enciclopedia WIKIPEDIA es de 30-32%.

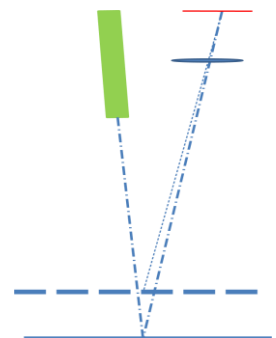
El valor del albedo que permite trabajar a cada instrumento es importante ya que hay instrumentos de láser que permiten trabajar con albedos muy pequeños (albedo del 10% significa objetos muy oscuros-negros y absorbentes de esa energía), y hay otros que solo permiten trabajar con albedos muy altos (albedos cercanos a 100% correspondientes a objetos fundamentalmente blancos).

Los instrumentos de medición de láser se clasifican básicamente en cuanto a su tecnología en dos metodologías:

1.- Instrumentos de triangulación: Tienen un sistema de emisión y uno de recepción separados entre sí una distancia conocida (llamada base), y analizando donde/cómo se produce la detección se obtiene la distancia a la que se encuentra el objeto. En la figura observamos el esquema típico de trabajo con este sistema. Se observa un emisor de láser y a una cierta distancia un sistema de detección, constituido por una matriz de células. Según el punto en el que se perciba la detección podremos deducir la distancia a la que se encuentra el objeto.



2.- Instrumentos de medición directa: Tienen un sistema de emisión y de recepción, y evalúan la distancia comparando la onda emitida con la onda recibida. En la imagen adjunta vemos que el emisor de láser apunta al objeto, pero la geometría de la figura no influye en el cálculo de la distancia. Será la energía detectada en el receptor la que permitirá calcular la distancia a la que se encuentra el objeto.



Los instrumentos basados en triangulación solo sirven para distancias hasta 20 veces la longitud de la base por lo que son equipos que solo son

aplicables para objetos de pequeño tamaño, ya que para su aplicación a arquitectura (hasta en edificios pequeños de 20 o 30 m.), habría que diseñar equipos de más de 1m. de base (con lo que el tamaño total del Equipo sería grande y difícilmente transportables).



Sin embargo existen muy buenas soluciones para objetos de tamaño inferior al m. y con altas precisiones en la medición. Es por lo que diríamos que básicamente la tecnología sirve para otro tipo de aplicaciones como es la escultura y pintura. A la derecha observamos dos modelos distintos de 3d-DIGITAL CORPORATION que utilizan este principio.

Los instrumentos de medición directa han evolucionado enormemente y básicamente y por ello tendremos que ampliar la clasificación, ya que se diseñan equipos que utilizan en la medición de distancias dos técnicas distintas:

a.- Tiempo de vuelo: Se emite un spot de láser que tras reflejarse en el objeto regresa una porción de la energía emitida al detector. En este se determina con precisión el tiempo transcurrido desde la emisión hasta la recepción. La distancia invertida en el recorrido de ida y vuelta se puede calcular si conocemos la velocidad de la luz en el medio en el que se transmite:  $d = t * c$

Siendo: d distancia recorrida.  
t tiempo transcurrido.  
c velocidad de la luz en el medio.

La precisión del resultado pues dependerá de la precisión en la medición del tiempo transcurrido, y este dependerá de la electrónica del instrumento y del tamaño del spot. Así pues para tener una precisión en la distancia de 3 mm. es necesario poder medir el tiempo con precisión de  $10^{-11}$  segundos. En el lateral podemos ver un instrumento (SCANSTATION 2 de LEICA), que utiliza este principio en la medición de distancias.



b.- Diferencia de fase: Transportado con la emisión de Laser se emite una onda sinusoidal continua que tras reflejarse en el objeto regresa hasta el receptor. Tras la recepción de la señal se compara la onda emitida con la recibida, y se obtiene la diferencia de fase entre ambas. Si se conoce la longitud de onda ( $\lambda$ ) del láser emitido (en el medio que atraviesa), y se sabe que una onda completa corresponde a una diferencia de fase de  $2\pi$  radianes, la longitud recorrida en la ida y vuelta podrá obtenerse con la expresión:  $d = \lambda * \frac{\Delta\phi}{2\pi}$

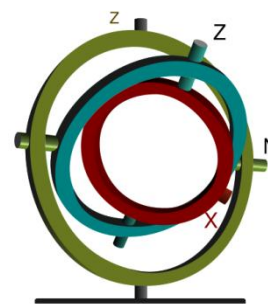
Siendo: d distancia recorrida en ida y vuelta.  
 $\lambda$  longitud de onda.  
 $\Delta\Phi$  diferencia de fase.

Este es el método más ampliamente utilizado en los instrumentos topográficos de medición y la precisión del resultado depende de la exactitud obtenida en la determinación de la diferencia de fase. Esta es mucho más sencilla de obtener que el tiempo de vuelo, por lo que el principio usado en estos instrumentos permitiría obtener mayor exactitud en los resultados. Sin embargo para obtener una buena onda reflejada y poder comparar su fase con la onda emitida es necesario que la onda tenga una energía elevada, por lo que es necesaria la emisión de mucha energía y/o que el objeto a medir se encuentre cerca. Los instrumentos de este tipo tienen en general



menor alcance y mayor precisión. En el lateral derecho vemos un instrumento (HDS-6000), de la misma firma comercial anterior (LEICA) y que utiliza este procedimiento para la obtención de las distancias.

El montaje en general de un instrumento de láser se basa en la medición de la distancia a cualquier punto del espacio sabiendo la dirección en la que se encuentra ese punto, por lo que es necesario montar el emisor-receptor de láser en un sistema cardan en el que podamos controlar en cualquier momento la posición de cualquier eje de giro. En la figura vemos un ejemplo típico del montaje de un sistema cardan de tres ejes.



Otra solución alternativa a provocar el giro del conjunto emisor-receptor es la utilización de espejos rotativos que permiten redirigir el rayo emitido en cualquier dirección del espacio sin apenas masa en el sistema. Tiene la ventaja de que un espejo es un sistema inerte y puede ser de escasa masa, más fácil de rotar que un emisor de láser con su receptor y su electrónica.

Tras el montaje el conjunto láser-célula receptora (o su alternativa con espejos), solo requiere tener dos ejes de giro: Uno vertical que le permita barrer el horizonte y otro horizontal que le permita elevar o descender su dirección). El montaje se parece mucho al de un instrumento topográfico, con la excepción de que en un instrumento topográfico la perpendicularidad de ejes y su posibilidad de estacionamiento son muy importantes.

En un instrumento de láser (como veremos a continuación), es necesario determinar la geometría del emisor y sus ejes de rotación; y será necesaria su aplicación para el cálculo y regeneración del modelo.

Entre las diversas soluciones mecánicas diseñadas para el problema, nos encontramos con soluciones en que el sistema emisor gira, y otras soluciones en que el sistema emisor es fijo y mediante espejos se consigue redirigir la emisión hacia cualquier dirección del espacio.

Parece que resulta más sencilla de montaje la alternativa de mantener fijo el emisor de láser, siendo dirigida/reflejada su proyección por un sistema de espejos. El giro de los espejos (elementos inertes), resulta más sencillo de gobernar y probablemente con menor inercia del sistema y permite enviar la proyección del láser casi en cualquier dirección del espacio. Harán falta para ello dos espejos, uno de eje horizontal y uno de eje vertical.

Un montaje intermedio se basaría en situar fijo el emisor de láser sobre una base rotativa de eje vertical (que le permite rastrear todo el entorno), y redirigir el láser con un espejo de eje horizontal (para poder inclinar la proyección del láser).

Para justificar matemáticamente el funcionamiento de un equipo de este tipo deberemos plantear:

- a.- Cual es la ecuación de la trayectoria de un rayo láser.
- b.- Como se modifica esta trayectoria tras realizar algunas rotaciones.
- c.- Como se modifica la trayectoria con reflexiones sobre un espejo.

Para los razonamientos siguientes no impondremos ninguna condición de dirección, de perpendicularidad, de nivelación o de corte de ejes o planos; tanto para la trayectoria del rayo, para las rotaciones o para las reflexiones.

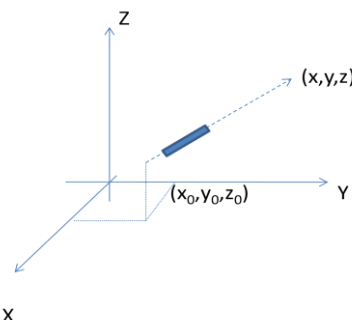
### A.- Ecuación de la Trayectoria de un rayo láser.

Supongamos que tenemos un emisor de láser y que la distancia recorrida hasta el objeto es conocida o ha sido determinada con un sistema LIDAR. Supondremos además que hemos establecido un sistema de coordenadas espacial en el que queremos realizar el cálculo de la posición de cualquier punto proyectado por el LASER.

Si la trayectoria del láser es corta podremos suponer que describe una línea recta, partiendo del punto de emisión, por lo que supondremos un punto de aplicación y un vector de longitud conocida. Si la trayectoria fuera superior a 100 m. la trayectoria del láser ya no podría ser considerada como una línea recta ya que la refracción atmosférica curva la trayectoria de la luz.

Si estudiamos la figura, rápidamente deduciremos que las coordenadas del punto en el espacio se pueden obtener de la ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + d * \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}$$



Donde :

X, Y y Z son las coordenadas del punto donde se reflejó el láser.

X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub> y Z<sub>0</sub> Son el punto de partida desde donde se realiza la medición del láser.

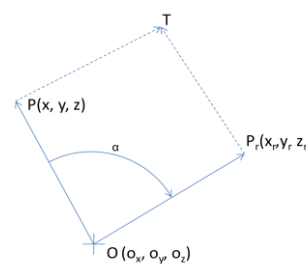
v<sub>x</sub>, v<sub>y</sub> y v<sub>z</sub> son las componentes del vector unitario en la dirección del puntero de láser.

d es la distancia medida.

### B.- Ecuación matricial de la rotación alrededor de un eje en el espacio.

Vamos a suponer un eje de giro y una cantidad a girar alrededor de este eje. El resultado es una matriz sin funciones trigonométricas, que resulta lineal y no requiere para su resolución conocer valores iniciales ni aplicar métodos iterativos. Este método se deduce fácilmente utilizando técnicas de cuaterniones, pero su desarrollo no es de fácil interpretación geométrica.

Planteamos como se modifica la posición de un punto en el espacio P(x, y, z) tras la aplicación de una rotación (α) aplicada con un eje cualesquiera. Para ello supongamos que un punto cualesquiera va a ser rotado alrededor de un eje según se observa en la figura adjunta.



Suponiendo que:

Las coordenadas del punto son: P(X, Y, Z).

El eje de rotación pasa por el punto O(o<sub>x</sub>, o<sub>y</sub>, o<sub>z</sub>).

El ángulo de rotación alrededor del eje es (α).

El vector (a, b, c), que no está en la figura y es perpendicular a ella, tiene la dirección y sentido del eje de giro y su modulo es tan(α/2).

La figura anterior ha sido construida con una vista en la dirección del eje de rotación, por lo que la traslación recibida con la rotación se observa en verdadera magnitud. En la figura se han construido además los vectores PT (perpendicular al OP) y P<sub>r</sub>T (perpendicular al vector OP<sub>r</sub>) que se intersectan en el punto T. La trayectoria del punto rotado se puede considerar como un arco de círculo desde el

punto P hasta el punto  $P_r$ , o como la suma de dos traslaciones representadas por el vector  $PT$  y el contrario al vector  $P_rT$ .

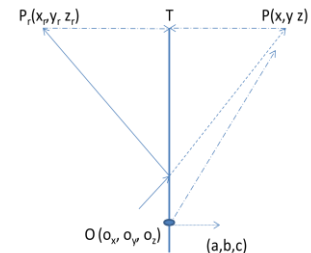
La traslación del punto P hasta  $P_r$ , se obtiene de:

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = (1 - S)^{-1}(1 + S) * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

Que es la ecuación matricial de una rotación respecto del origen de coordenadas, más una traslación identificada por  $T_x$ ,  $T_y$  y  $T_z$ .

### C.- Ecuación matricial de una reflexión.

Planteamos como se modifica la trayectoria espacial de un rayo que llegaría a un punto  $P(x, y, z)$ , tras la reflexión en un espejo plano definido por un punto de paso  $O(o_x, o_y, o_z)$  y un vector asociado  $(a, b, c)$  unitario y perpendicular al espejo. Para ello supongamos que una trayectoria cualesquiera que llegaría al punto P, va a ser reflejada en un espejo según se observa en la figura adjunta.



Suponiendo que:

Las coordenadas del punto son:  $P(X, Y, Z)$ .

El espejo pasa por el punto  $O(o_x, o_y, o_z)$ .

La dirección de la perpendicular al espejo es la del vector unitario  $E(a, b, c)$ .

Obteniendo la ecuación de una reflexión como:

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - 2 * \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac \\ ab & b^2 & bc \\ ac & bc & c^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 2a^2 & 2ab & 2ac \\ 2ab & 1 - 2b^2 & 2bc \\ 2ac & 2bc & 1 - 2c^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Podríamos ver además que la matriz propuesta es *involutiva*, y comprobar que el resultado de aplicar dos veces la misma simetría genera la matriz identidad.

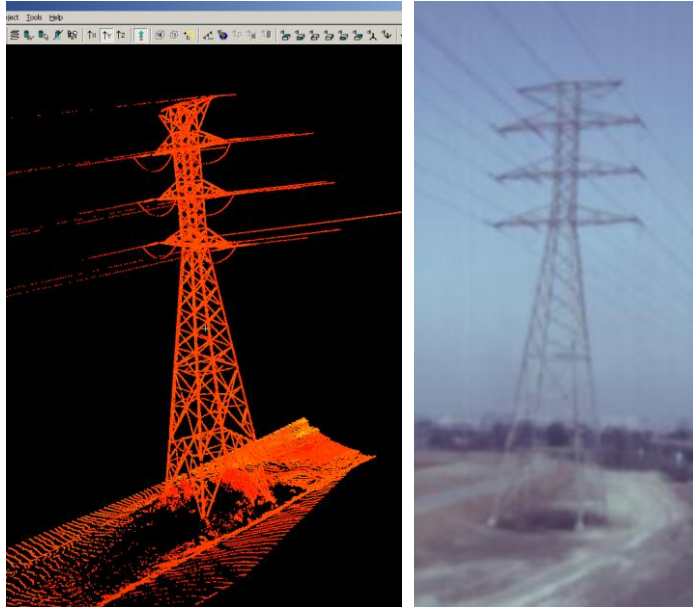
## Aplicación de La tecnología de Laser a la medición de estructuras.

Básicamente hemos aplicado esta técnica a dos tipos de estructuras:

1.- Estructuras formadas por elementos bien definidos y ajustados a normativa dimensional (formada por perfiles normalizados).

2.- Estructuras formadas por elementos resistentes de dimensiones ajustadas según el cálculo estructural y que no se ajustan a ninguna normativa de perfiles.

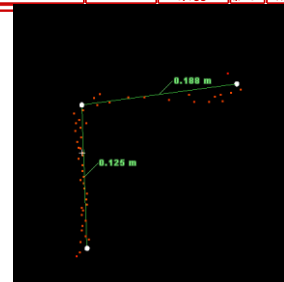
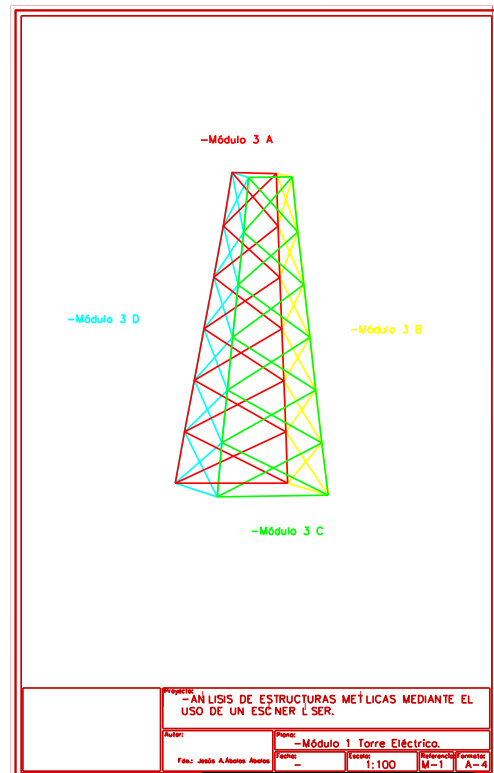
Como ejemplo de medición de estructura, en el proyecto fin de carrera de Jesús Abalos Abalos, se eligieron una torre eléctrica formada por perfiles normalizados (la mayoría angulares) y un puente metálico sobre el río Júcar (Puente de Riola).



En el primero se hizo una única estación del escáner que dejara las mínimas zonas ocultas posibles (viéndose en el modelo todas las barras de la estructura. Para modelar la estructura se midió la posición en el espacio de todos los nodos como punto de intersección de las barras que allí concurrían; obteniendo como conclusión la longitud de las barras (como distancia entre los nodos); midiendo adicionalmente el tipo de perfil mediante la medición de las dimensiones del angular. Únicamente el grosor de las barras no resulta sencillo de medir sobre el modelo tridimensional.

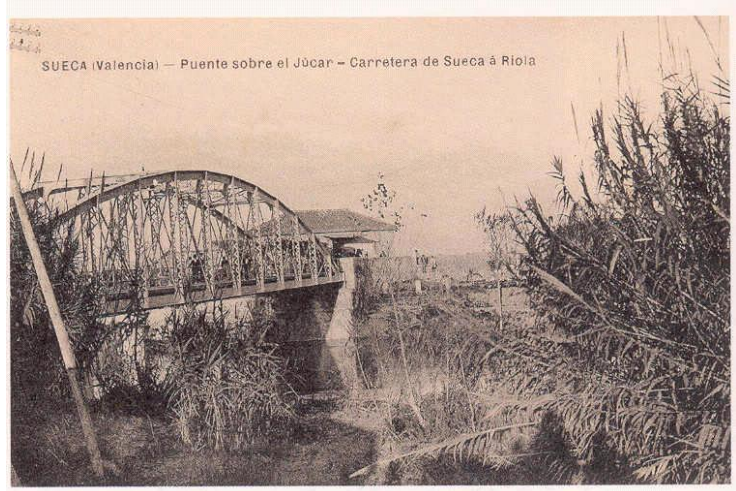
En la primera imagen vemos una foto de la torre medida, junto al modelo tridimensional resultante de la medición de la torre. En la tercera imagen vemos el dibujo de autocad de algunos de los nodos y las barras de la estructura; y en la página siguiente y en la cuarta imagen vemos como es realiza en el programa de gestión la medición del tipo de perfil a que corresponde el angular.

El segundo ejemplo para comprobar la facilidad de medición de estructuras, sin necesidad de escaladores, (portando un sistema de medición manual); y obteniendo una sencilla croquización del objeto con precisión de algunos milímetros es el puente metálico de Riola. Observamos una foto antigua del puente metálico de Riola más abajo. El puente forma parte de un conjunto de puentes metálicos sobre el río Júcar, proyectados y diseñados hace algo más de 100 años y ha dado servicio al entorno durante todo este tiempo a pesar de las vicisitudes que el río Júcar ha provocado en el periodo.

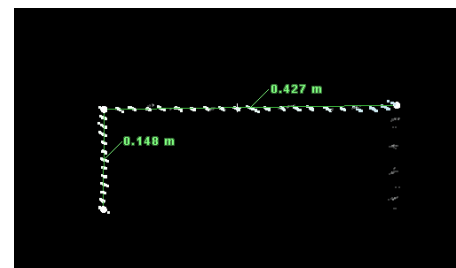
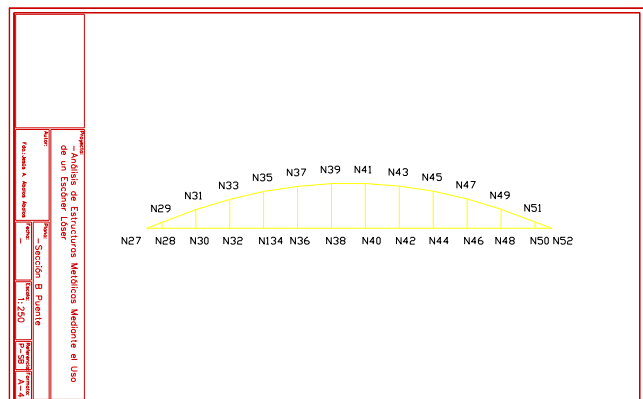
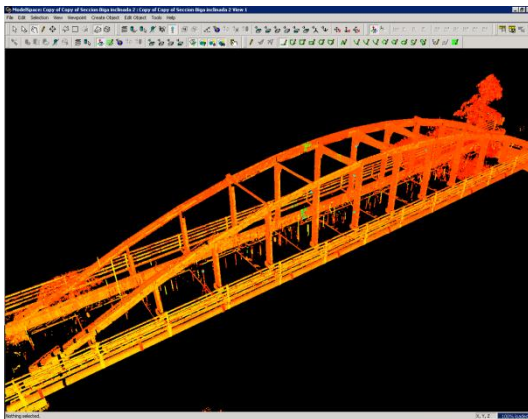


En las imágenes que vemos a continuación se encuentra el resultado de la medición tridimensional de la estructura utilizando dos estaciones del escáner una a cada lado del puente; y el dibujo de autocad de uno de los dos laterales del puente definiendo sus nodos.

El resultado de la medición se completó con la acotación de las diversas secciones de estructura como la que se ve en la imagen inferior.



En ambos casos de medición el resultado es un conjunto de archivos de texto con las coordenadas de los nodos, la definición de las barras con nodos de partida y llegada y las secciones obtenidas de cada elemento.



## **LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS, UNA NUEVA META PARA LA UTILIZACIÓN DEL ESCANER LASER.**

El objetivo del artículo es dar a conocer como la tecnología láser puede ser una herramienta muy importante en la prevención de incendios. Para ello se han realizado el escaneo de dos escenarios distintos que van a permitir trasladar las nubes de puntos 3D a un programa de Simulación de Incendios para poder investigar el comportamiento de los incendios. De esta forma, poder analizar el transporte de calor y combustión de productos. La transferencia de calor por radiación y convección. La pirolisis de la combustión de un material. El crecimiento del incendio y la propagación de la llamas. Los escenarios que se analizan son; “La Casa del Alumno” en el Campus de la Universidad Politécnica de Valencia. El monumento fallero de la Comisión de “Convento Jerusalén- Matemático Marzal”, muy importante en la preparación del dispositivo de prevención en la noche de la “Crema”.

### **INTRODUCCIÓN.**

La tecnología de escáner láser 3D ha revolucionado las disciplinas de la topografía, la ingeniería civil y la criminología. En este momento se encuentra buscando su parcela en el terreno de la prevención de incendios. Esta se preocupa ahora de amenazas tan variadas como la seguridad de los bosques, desde dos perspectivas. La primera, desde el punto de vista de conservación del medio ambiente. La segunda por la peligrosidad de los incendios que se desarrollan en la masa forestal, que no deja de producir un elevado número de víctimas entre el personal que interviene en la extinción. En el terreno urbano, la evolución de los materiales con que decoramos nuestras viviendas, que se elaboran con productos derivados del petróleo. Las nuevas tipologías de construcción, que han variado las cotas de evacuación, construyendo edificios de gran altura. Verdaderas obras de ingeniería que constituyen un reto a la hora de la intervención.

En estos momentos, nuestra sociedad se encuentra con fondos limitados y presupuestos muy apretados. Por lo que la posibilidad que nos brinda el uso de programas informáticos, nos facilita herramientas para poder obtener geometrías de edificios singulares, parcelas forestales y escenarios donde se han producidos incendios. Una vez obtenidos las geometrías necesarias, nos trasladamos al laboratorio donde se puede trabajar de manera segura. Conseguir espacios virtuales con los que poder realizar los ensayos necesarios para poder extraer las conclusiones para poder conseguir los parámetros buscados. Con ello garantizar resultados precisos que garanticen la excelencia de los profesionales en este campo.

### **LA TECNOLOGIA LÁSER APLICADA A LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN ENTORNOS URBANOS.**

El Instituto de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia, se encuentra desarrollando estudios sobre el comportamiento del fuego en edificios, para su aplicación en trabajos de prevención de incendios que el Instituto ha ido abordando.

Básicamente, el equipo es un sistema de medición tridimensional con obtención de distancia que utiliza un laser visible con diámetro de spot de 6 mm. El rastreo espacial del objeto se obtiene con un espejo de eje horizontal y el giro del cabezal de eje vertical. El giro horizontal permite barrer todo el horizonte (360°), y el espejo vertical solo 270°, dejando sin cubrir en la parte inferior del equipo un ángulo de 45° en dirección vertical hacia abajo en ambos sentidos.



El sistema tiene calibrada la geometría del emisor de laser así como la posición y movimientos de los espejos de modo que el sistema aparentemente se comporta como una estación total con una velocidad de medición superior a los 2000 puntos por segundo, que en las mejores condiciones de medición podría llegar a los 50000 puntos por segundo.

Para comenzar, se realiza un levantamiento de todo el edificio con varias capturas. A continuación se usan los datos para introducirlos en el programa de simulación de incendios.

Finalizada esta fase se comienza el estudio de la repercusión del incendio en el edificio. El comportamiento del fuego y de los productos de la combustión. Las zonas de mayor riesgo, por la geometría del recinto o por la carga de fuego de los materiales que se encuentra en el interior. Los lugares más vulnerables, por ser zonas de evacuación de los posibles usuarios, (escaleras de emergencia).

Incluso valorar toxicidad de gases, visibilidad de la zona y las temperaturas en el interior del recinto.

Las conclusiones a las que se llegó tras realizar el análisis del edificio con nuevas tecnologías permiten evaluar los factores positivos y negativos que se nos presentan. La experiencia de trabajar con el láser escáner se puede afirmar que ha sido muy positiva. El grado de precisión relativa obtenido es muy elevado, y la rapidez con que se adquieren lo convierte en un instrumento de futuro para realizar trabajos de levantamiento de planos de edificios singulares.

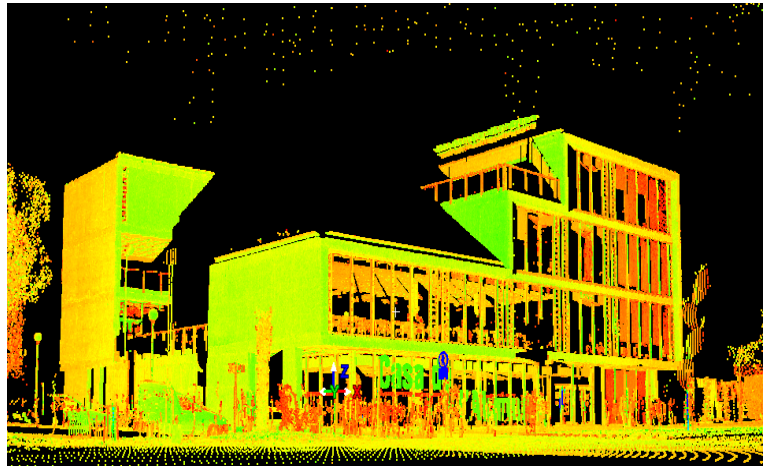


Imagen 1. Captura de las fachadas de "La casa del Alumno".

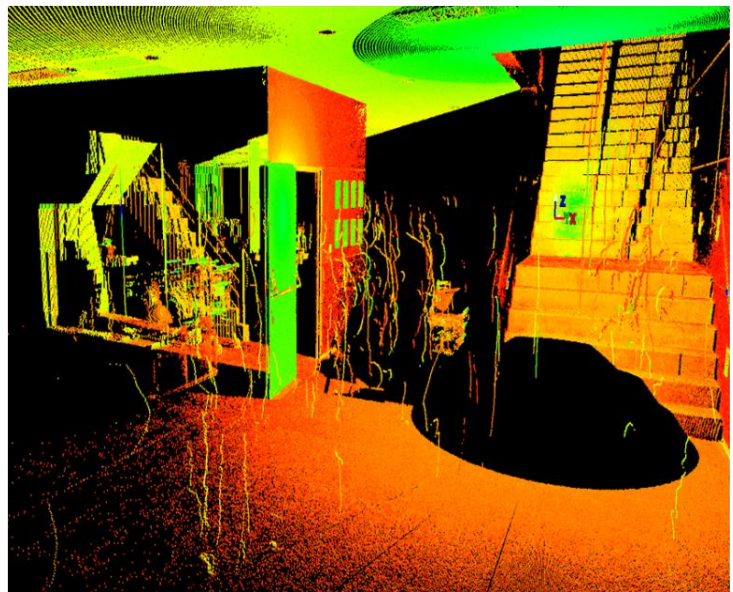


Imagen 2. Captura de la zona interior de "La casa del Alumno".

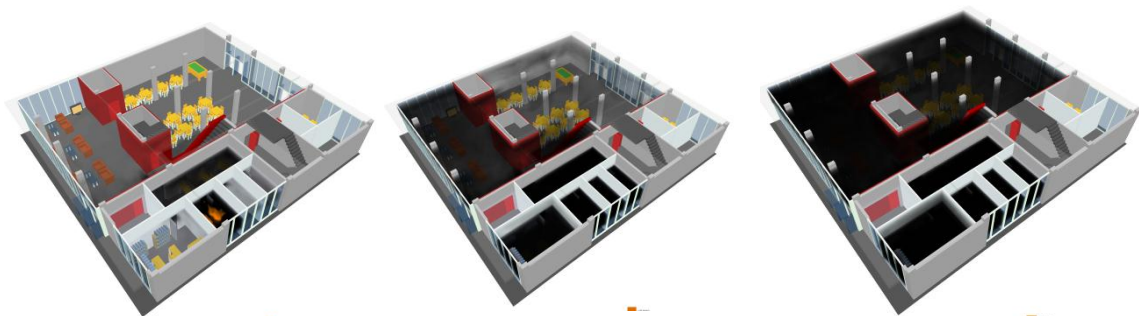


Imagen 3- Secuencia del desarrollo de un incendio en el edificio. El humo inunda todo el recinto.

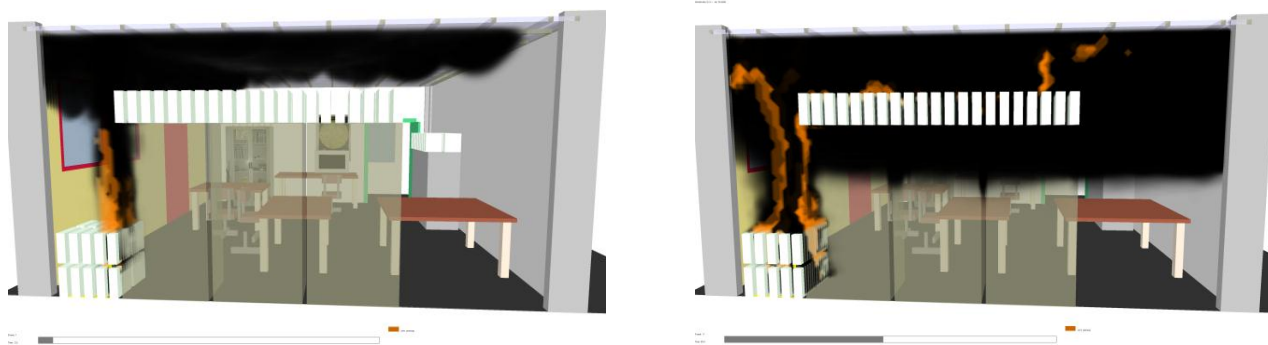


Imagen 4– Secuencia del desarrollo de incendio en el edificio. Se termina por consumir todo el mobiliario.

Una vez terminado el trabajo se muestra los datos obtenidos al personal de la actividad que se dedica a la implantación del plan de autoprotección. De forma que puedan valorar la seguridad de la estructura. Las zonas de mayor vulnerabilidad y el recorrido que van a seguir los productos de la combustión por el edificio. De esta forma, a la hora de realizar la evacuación del edificio, contarán con la certeza y la seguridad de elegir los recorridos más adecuados y del recorrer los caminos más seguros.

## EL DISPOSITIVO DE LA “CREMA”, UN NUEVO RETO.

En la actualidad, el Servicio de Bomberos se ha basado en la experiencia en horas de fuego o en el desarrollo del puesto de trabajo, para proporcionar nuevos profesionales con los conocimientos necesarios, en el trabajo de la extinción de las fallas. El paso del tiempo, está llevando a gran parte de estos bomberos a la edad de jubilación. Con ello, el Servicio de Extinción de Incendios, se enfrenta al reto de una formación continua de los nuevos bomberos, en una intervención que reúne unas características especiales, como es la de no desvirtuar la esencia del fuego y la necesidad de protección de todo en entorno que rodea al monumento fallero.



Fotografía 1– Monumento fallero de análisis, perteneciente a la comisión “Convento Jerusalén – Matemático Marzal.

La sociedad Universitaria, pendiente de aportar apoyo en actividades donde se puede necesitar ayuda, se ha prestado para preparar un estudio de aplicación de nuevas tecnologías, con el objetivo de mejorar la eficacia y la seguridad en una situación de riesgo. Para ello, pretende proporcionar a la ciencia, parámetros que son críticos para el desarrollo de los incendios.

Todo ello se traduce a un rico entorno de información, instrumentos de formación en intervención en incendios, y la aplicación de nuevas tecnologías innovadoras. Beneficiando a los bomberos y sus mandos en el momento de la toma de decisiones. Al igual que al reto de personal interviniente en las emergencias.

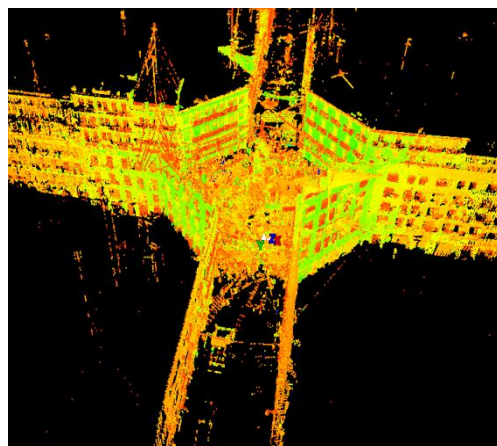


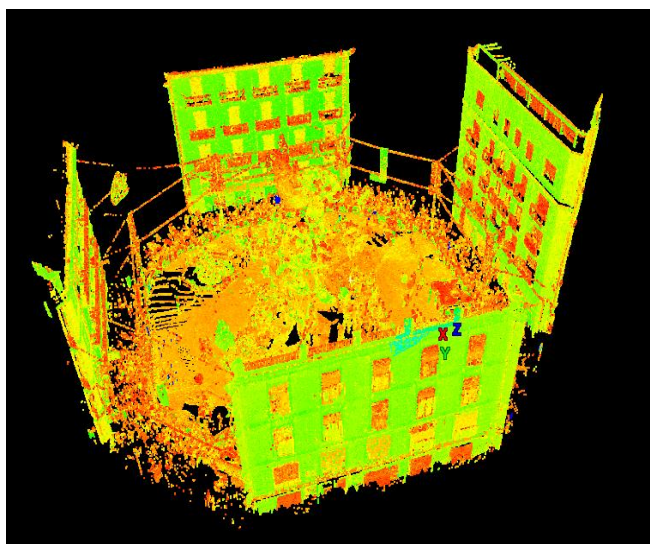
Imagen 5– Captura de puntos del monumento fallero analizado, dentro del entorno de la plaza donde se encuentra ubicado.

La planificación de la prevención de incendios en una fiesta tan tradicional como son las fallas en la ciudad de Valencia, ha sufrido notable variaciones con la incorporación de nuevos materiales y con el aumento del volumen del monumento fallero. Esta situación hace saltar las alarmas del personal encargado de velar por el dispositivo de seguridad en la noche de máximo esplendor de la “Crema”, donde los bomberos son los encargados de proteger los edificios que se encuentran en sus inmediaciones, la seguridad de los ciudadanos que se encuentran contemplando el singular espectáculo y hasta la propia vida de los profesionales, que se encuentran inmersos en las tareas de control del incendio. El equipo ha sido aplicado en la primera fase del proyecto, para la obtención de la geometría. A partir de aquí comienza todo un proceso de trabajo que nos va a permitir dar un carácter científico a esta tarea.

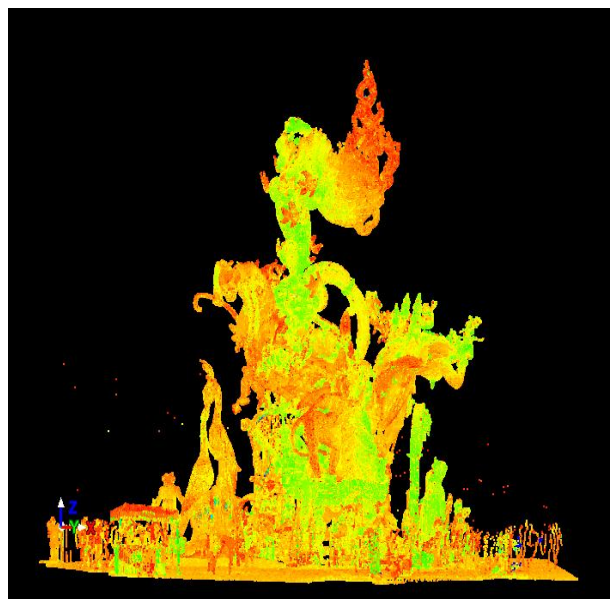
Conseguir una correcta y eficaz actuación necesita práctica, experiencia y capacidad. Estas cualidades deben de ir acompañadas de una adecuada base científica y teórica. Posiblemente sea esta la razón del considerable número de efectivos que se desplazan para la realización de la prevención. La captura de datos se realizó mediante 8 capturas. Las cuatro primeras, las principales, han sido las que nos van a servir para poder componer la geometría de la plaza y conseguir la ubicación del monumento. A continuación se realizan cuatro más, entre medias de las capturas anteriores para poder conseguir más detalle de la zona central, con la que poder trabajar esta parte con mayor comodidad. El objetivo pasa por disponer de una geometría exacta del monumento para posteriormente caracterizarlo en un programa de simulación de incendios y poder observar cual es la temperatura que se llega a alcanzar durante el periodo de la “Crema”.

A continuación, con los datos obtenidos, se comparan con las imágenes que proyectan las cámaras térmicas de la grabación de la misma falla. Con toda esta información, obtener unas conclusiones sobre la temperatura que llega hasta las fachadas de los edificios. La afección que sufren los materiales, al encontrarse sometidos a estas temperaturas tan elevadas. Controlar las zonas donde trabajan los bomberos para poder indicarles las zonas de mayor seguridad y las zonas de riesgo. De igual manera, observar cómo afecta el comportamiento del viento en el desarrollo de la combustión.

La ventaja del escaneado láser, nos deja tomar en nuestro caso, una gran cantidad de puntos con una alta precisión en un tiempo relativamente corto. Exactamente, cuatro horas.



*Imagen 6–Captura general de las fachada de los edificios de la plaza.*



*Imagen 7.– Captura detallada del monumento.*

Trabajar con esta técnica, permite una alta precisión a la hora de la toma de datos, puesto que la técnica que utiliza, es como realizar una fotografía, con el complemento de la información de profundidad. El escáner láser, es un instrumento de línea de vista. Si que se han realizado varias capturas, desde diferentes estaciones, para garantizar una cobertura completa del monumento fallero, que tiene una particular complicación por tratarse de figuras y de motivos ornamentales muy detallados.

Las conclusiones que se obtienen son:

La identificación y evaluación de riesgos: determinación y análisis del peligro potencial, características y comportamiento, (p.ej. carga térmica, afección de los edificios colindantes).

Tratamiento del riesgo potencial:

Reducción: planificación y aplicación de dispositivos de actuación (equipos de bomberos necesarios para cubrir el dispositivo, colocación de barreras de protección).



Fotografía 2.- Captura detallada del monumento.

Advertencia temprana: provisión de información efectiva y a tiempo real a través de los artistas falleros, para instruir a los equipos de intervención.

Los escáneres láser se utiliza en la actualidad, para una gran variedad de aplicaciones en el campo de la Protección Civil como son, entre otras:

- Análisis de la estructura de un edificio en peligro de colapso.
- Deformaciones estructurales debido al paso del tiempo.
- Análisis de zonas inundables.
- Simulación de terremotos.
- Registro de escenarios de incendios, para una posterior investigación.
- Documentación de zonas catastróficas.
- Cartografía SIG: localización de población afectada e infraestructuras críticas tales como hospitales o parques de bomberos.

## FORMACIÓN ESPECÍFICA EN INCENDIOS FORESTALES.

Los incendios forestales son el problema medioambiental más grave que, en la actualidad, afecta al medio natural nacional, tanto en forma de pérdidas económicas como ecológicas, en ocasiones de forma muy dramática. La formación en este tipo de disciplina, permite poner a disposición del personal, un instrumento de ayuda a la toma de decisiones para la adecuada aplicación de decisiones y del material. Hay que poner un especial hincapié sobre las precauciones a tener en cuenta para no arriesgar la vida de las personas que, de forma directa o indirecta, actúan sobre el incendio para su control y posterior extinción, (imagen 8).

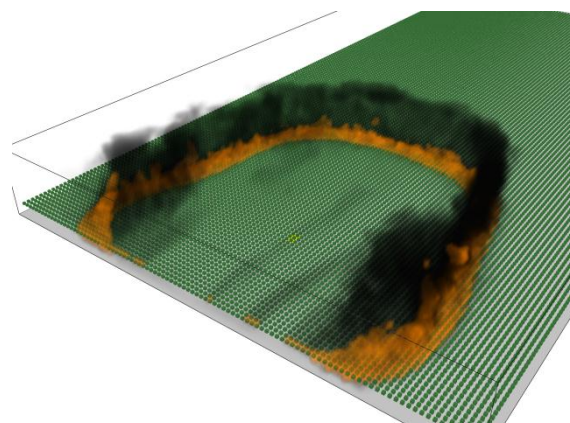


Imagen 8- Características de los incendios forestales. Comportamiento.

El escáner láser ha permitido un fácil levantamiento tanto de los edificios como del monumento fallero. Disponer de una importante seguridad, por la cantidad de datos recibidos y la comodidad de los mecanismos de obtención. Los resultados en cada conjunto escaneado suelen ser sorprendentes y espectaculares, aunque se abre muchas posibilidades a la hora de su aplicación práctica.

El escáner con su potencial indiscutible ofrece una gran capacidad de detalle y rapidez, especialmente para las formas orgánicas, muy difíciles de levantar con procedimientos clásicos. También en espacios difícilmente alcanzables. Simplifica la toma de datos respecto a la fotografía tradicional, que en el campo de la prevención de incendios, es desde la aparición de este tipo de herramienta, un método complementario.

## **Estudios de corrección y estabilización del cauce del río Genil en su cruce con la Autovía A-4, de Andalucía.**

El estudio se dirige a la corrección y estabilización del cauce del Río Genil en el entorno de influencia de su cruce con la Autovía de Andalucía A-4. Se pretende la protección del puente, situado en el P.K. 453+090 de la A-4, Tº Mpal. de Écija (Sevilla), así como de su cimentación. La superestructura consta de dos tableros gemelos isostáticos de siete vanos constituidos por siete vigas de hormigón pretensado en el vano principal (cinco en el resto, mas cortos), y losa de compresión de 20 centímetros, con cinco de espesor mínimo en la capa de rodadura. La plataforma de cada puente alberga dos carriles de 3.5 m de anchura, arcén exterior de 2.5 m e interior de 1.0 m, además de aceras de 0.9 m de ancho. Se rematan con barandillas metálicas, disponiendo en los bordes de arcén de defensas flexibles tipo bionda.

Los dinteles de apoyo se sustentan por tres fustes cilíndricos de 1 metro de diámetro separados 5 metros entre ejes. La cimentación es profunda, materializada por dos pilotes de 1.0 m de diámetro por fuste (en total 6 por dintel), con encepado de 2.0 m de canto. La longitud de los pilotes oscila entre los 10 y los 14 m. Los encepados están además unidos mediante vigas de atado de 1.0 m de ancho y 2.0 m de canto. Los estribos son de hormigón armado, de tipo cerrado con aletas en vuelta. La cimentación de estos es también profunda materializada por 6 pilotes también de 1.0 m de diámetro, arriostrados en cabeza mediante un encepado ahora de 1.5 m de canto.

### **Planteamiento de los trabajos**

La implementación de los modelos hidráulicos de cálculo requiere a priori una definición geométrica de calidad no sólo en cuanto a la métrica del entorno a analizar, sino también en lo relativo a la eficiencia de ‘comunicación’ entre las distintas aplicaciones. La enorme cuantía de datos proporcionados como ‘output’ por cada escaneo, o implícitamente incorporados a cada imagen fotogramétrica, ha de traducirse con el mínimo esfuerzo en ‘inputs’ del resto de aplicaciones: los distintos programas a emplear han de ‘comunicarse’ cómoda y eficientemente.

En concreto, el empleo del modelo Hec-Ras, así como las metodologías de diseño de encauzamientos fluviales estables con todas sus variantes, requiere no sólo una calibración adecuada de los parámetros hidráulicos del cauce y su zona de inundación, sino también su correcta georreferenciación, con mayor grado de detalle cuanto más crítico sea el entorno en el que se estiman (o se miden en el caso de la geometría de los perfiles o elementos susceptibles de definir condiciones de contorno que condicionan el comportamiento del conjunto, o definen la interacción del flujo con elementos antrópicos a proteger o proyectar).

Consecuentemente, se planteó la definición de unos 2.500 metros del cauce del Río Genil y sus inmediaciones a su paso por Écija (con un ancho mínimo del orden de los 400 metros), para el estudio hidráulico en régimen extraordinario de avenidas. Se precisa adicionalmente una definición más pormenorizada en los entornos de los puentes de la Autovía, del puente romano y del azul,

situados ambos en el extremo de aguas abajo del tramo de cauce considerado. El límite de aguas abajo del tramo de cauce de interés es precisamente el mencionado azud pues constituye la condición de contorno de aguas abajo, de calado crítico, necesaria para la modelación hidráulica del cauce.

En cuanto a los trabajos topográficos realizados, éstos han sido:

▪ *Vuelo Fotogramétrico, Apoyo por Topografía Clásica y Trabajo de Restitución.*

Escala 1/3.500 con escaneo de 20  $\mu$  en color.

Medición en campo de 10 puntos de apoyo.

Aerotriangulación.

Generación de las secciones mediante restitución digital.

▪ *Trabajo con el Scanner Láser.*

Definición del entorno del puente y del azud.

Resolución de malla de 5-20 centímetros en un entorno de entre 100 y 200 metros.

Empalme de modelos.

Generación de secciones cada 2'5 metros y detalles a discreción.

En cuanto al análisis hidráulico:

▪ *Análisis de la situación actual mediante Hec-Ras.*

▪ *Propuesta de actuaciones mediante Hec-Ras y otras metodologías específicas de diseño.*

▪ *Validación de los diseños*

### **El vuelo fotogramétrico y su explotación.- Vuelo y orientación:**

Se realizaron las dos pasadas reflejadas en el gráfico de vuelo de la figura 2. Consta de un total de 10 fotogramas en la pasada principal (números desde 2063 hasta 2072) y 4 en la pasada adicional para el meandro (números 2059 hasta 2062). Con ello queda asegurada la definición del cauce y un mínimo de 200 m. a cada lado de este.

El apoyo fotogramétrico se realizó con 10 puntos GPS. La medición fue realizada por profesores de la Escuela Superior de Arquitectura Técnica de Sevilla utilizando el equipo de GPS de doble frecuencia de Leica.



**Figura 1.- Apoyo fotogramétrico. Medición utilizando GPS de doble frecuencia Leica**

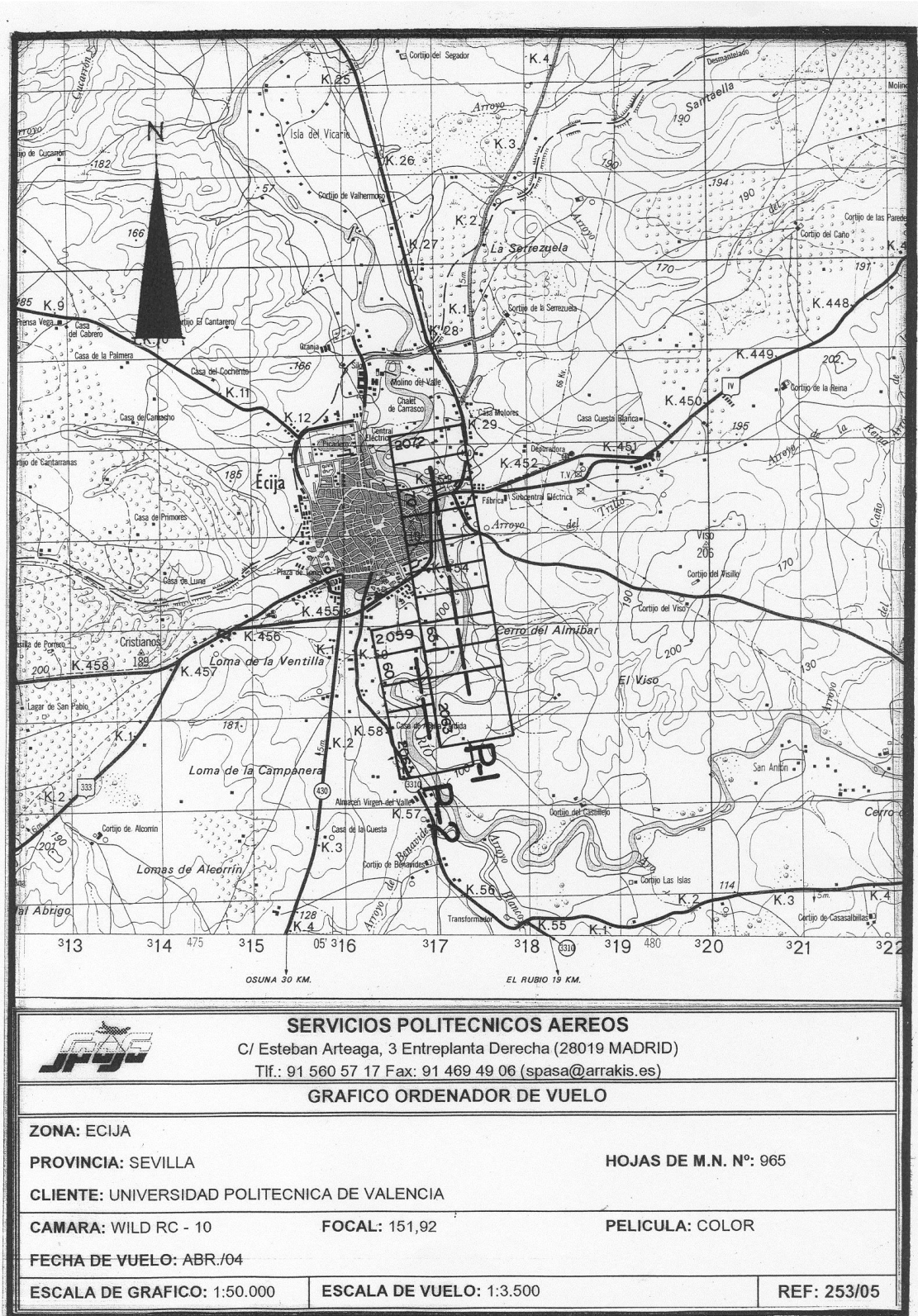


Figura 2.- Vuelo Fotogramétrico. Gráfico de Vuelo.

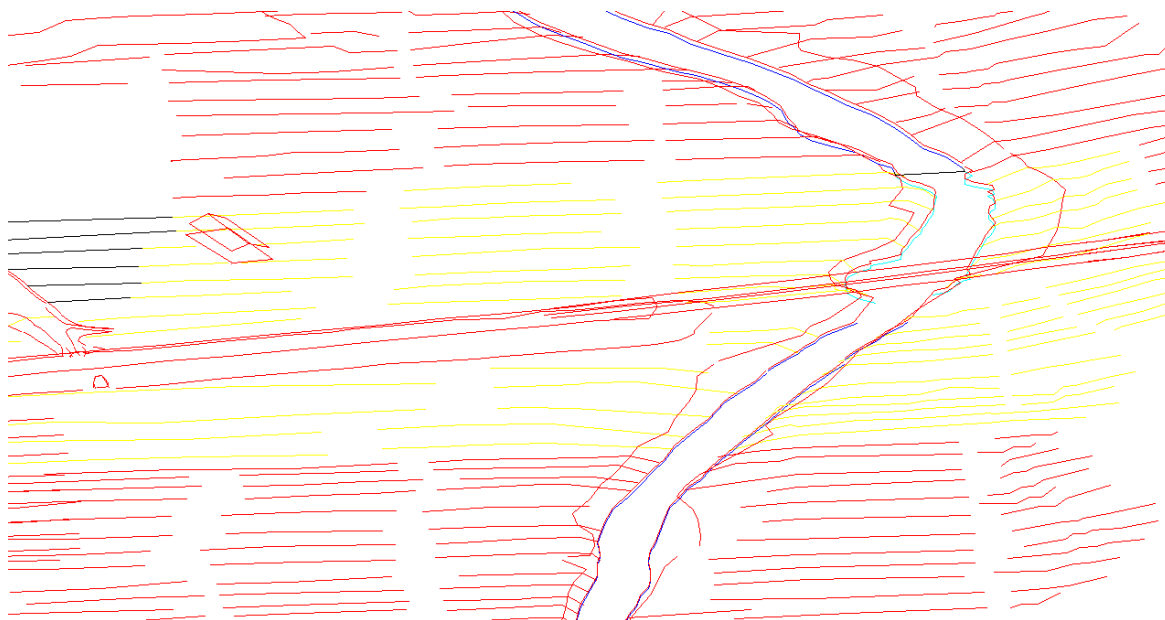
La orientación de los fotogramas se realizó en bloque para mejorar la continuidad entre modelos, realizando una aerotriangulación por el método de los modelos independientes. La medición de cada modelo se hizo en un restituidor analítico Planicomp c-100. El empalme de los modelos medidos se realizó con el cálculo de la aerotriangulación con el programa PATM.



## Restitución y modelos digitales compatibles

Con el programa 3D Mapper se genera una malla de puntos con espaciado de 20 metros y definición de alineaciones de ruptura de pendiente, con especial atención a bordes de la lámina libre y coronación de taludes de ambas márgenes del río.

La información cartográfica obtenida se procesa mediante *ArcView GIS versión 3.3* usando la extensión *HEC-GeoRAS versión 3.0* de Abril de 2000 (Geospatial River Analysis System). Esta extensión de ArcView opera sobre un modelo de elevación digital del terreno, obteniendo las características que definen el tramo a analizar y creando un fichero de salida con esta información que puede ser importada posteriormente desde el modelo hidráulico *HEC-RAS versión 3.1.2* de abril de 2004 (*Hydrologic Engineering Center-River Analysis System*). El conjunto de programas se ha diseñado cuidando especialmente la compatibilidad de formatos de importación y exportación de resultados parciales. A partir de la información cartográfica, ArcView representa la superficie del terreno mediante una red de triángulos irregulares adosados TIN .



**Figura 3.- Vista 3D parcial de la cartografía obtenida. Tramo de cauce en el entorno de los puentes de la Autovía A-4.**

A partir del MDT se obtienen las características geométricas del tramo como puede verse en la Figura 4.

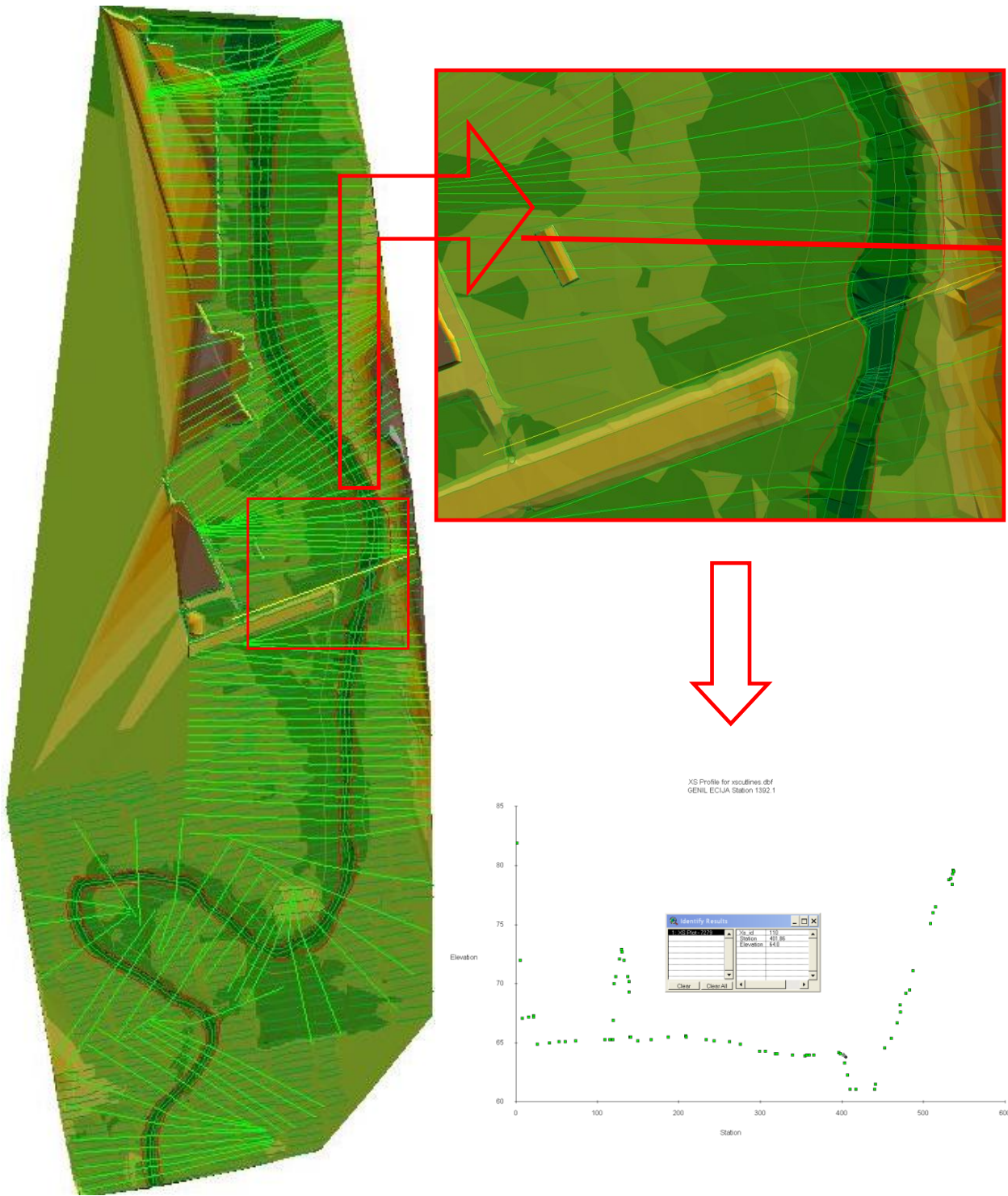
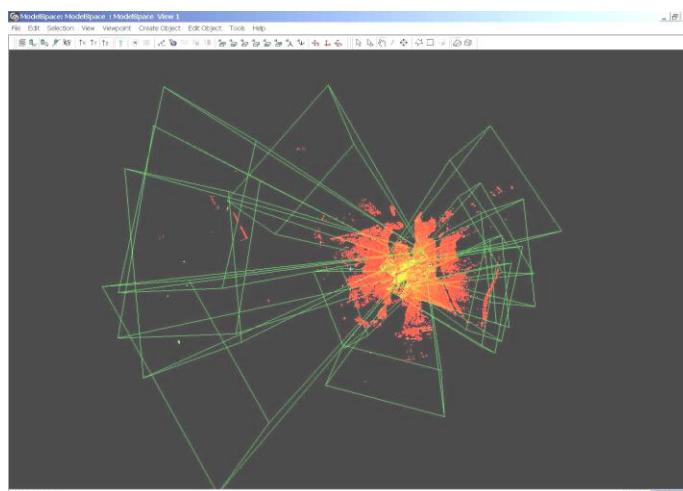


Figura 4.- Geometría obtenida a partir del MDT.

## Trabajos de detalle con el scanner láser

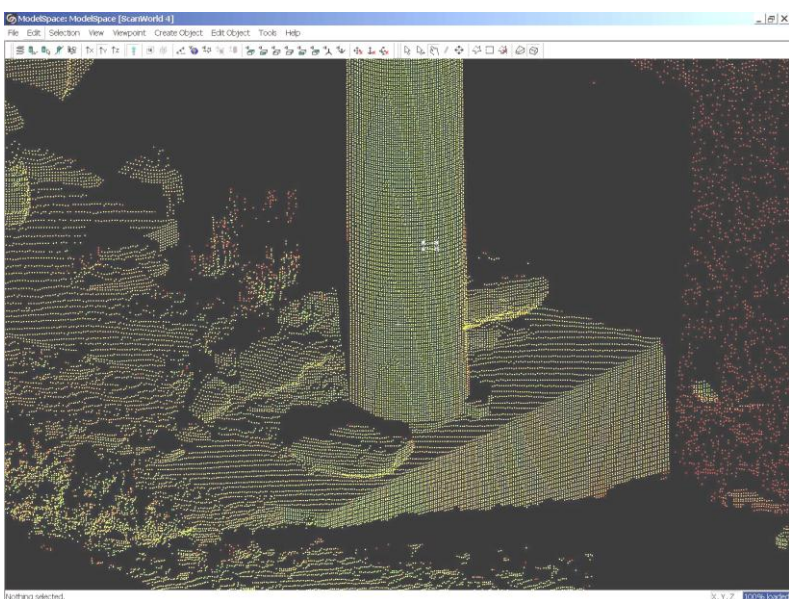


**Figura 5.- Scanner láser modelo CYRAX distribuido por la firma LEICA**



**Figura 6.- Medición con Scanner Láser. Situación de los puntos de estación utilizados para la medición de los puentes de la autovía (13 modelos).**

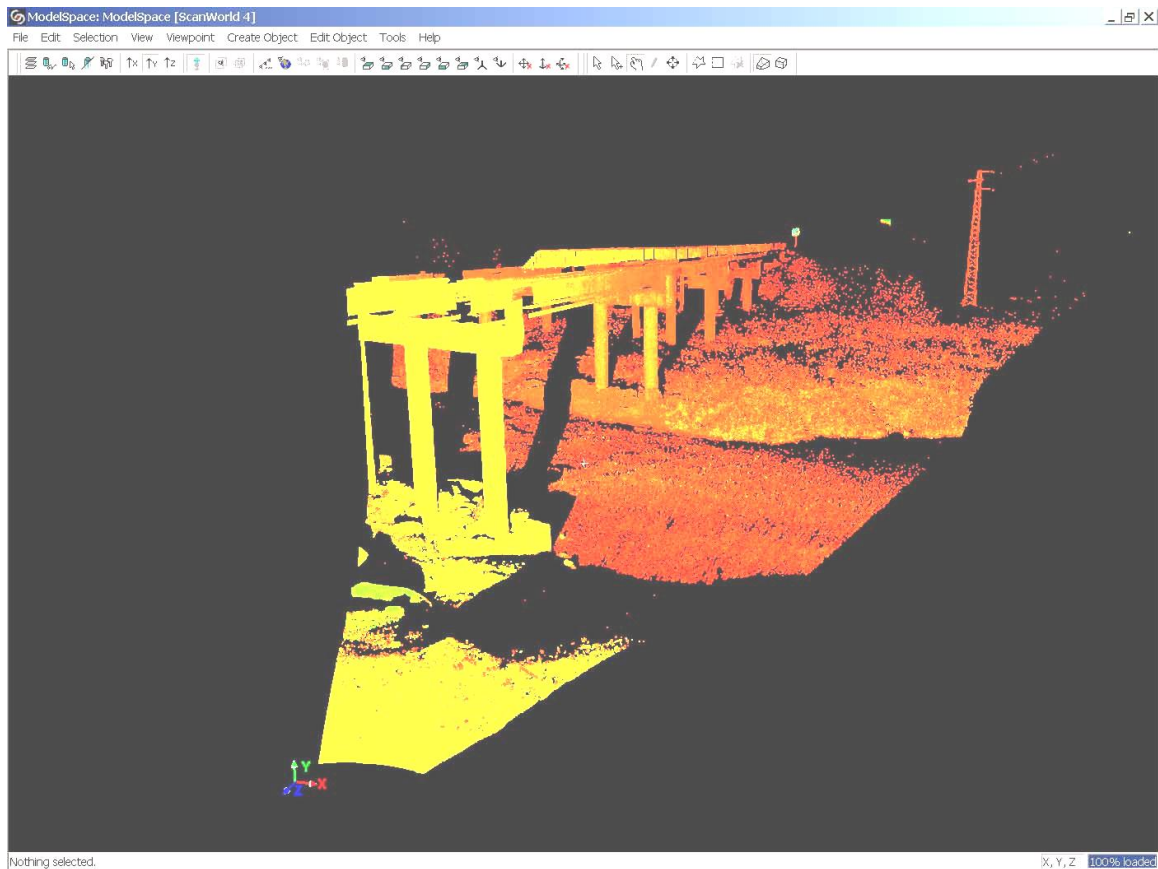
Las inmediaciones del puente no pueden ser abarcadas desde un solo punto de toma, ni es abarcable con la limitación de apertura de 40 grados para cada una de ellas tanto en horizontal como en vertical. Se requiere por tanto en este caso la generación de 13 modelos para los puentes de la Autovía (figura 6) y 14 para la definición del puente romano y el azud. Todos ellos, después de ‘cosidos entre sí’ (empalmados), generaron un modelo único.



**Figura 7.- Medición con Scanner Láser. Detalle de fuste y encepado de una de las pilas de los puentes de la Autovía A-4.**

La malla de puntos generada en cada uno de los modelos tiene una densidad de 1 punto cada 1-2 centímetros en promedio, resultando muy superior en los puntos cercanos al punto de estación: La definición de la malla es por repetición angular; en las zonas cercanas o inmediatas al scanner la malla de puntos obtenida contiene puntos muy cercanos entre sí.

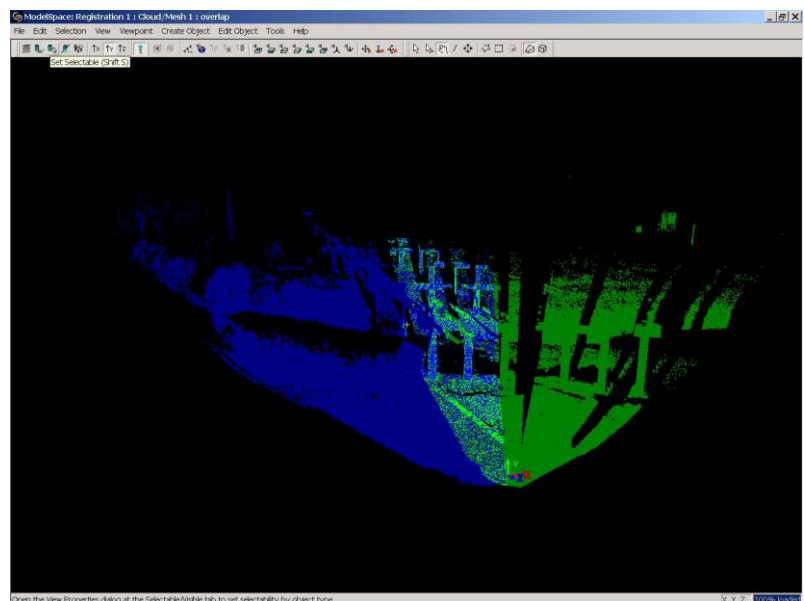
En la figura 7 se aprecia el grado de detalle obtenido en una de las pilas del puente y su correspondiente encepado.



**Figura 8.- Uno de los modelos generados con estación en la margen derecha, lado de aguas abajo, de los puentes de la Autovía A-4, Río Genil**

Durante la toma del scanner se tiene la precaución de medir áreas comunes entre parejas de modelos de modo que en esas áreas se obtengan algunos millares de puntos ‘homologos’. En la **figura 9** vemos dos escaneos a punto de ser empalmados por su área común.

El proceso de empalme impone la restricción de que la superficie generada por la nube de puntos en cada escaneo es la misma en ambos modelos. Se realiza mediante un cálculo por mínimos cuadrados que compara la situación de la nube de puntos base y la de comparación con el fin de minimizar residuales (diferencias entre las superficies). El ajuste suele tener una precisión acorde con el sistema de medida (entre 3 y 7 mm), muy superiores a las necesidades geométricas de definición del cauce.

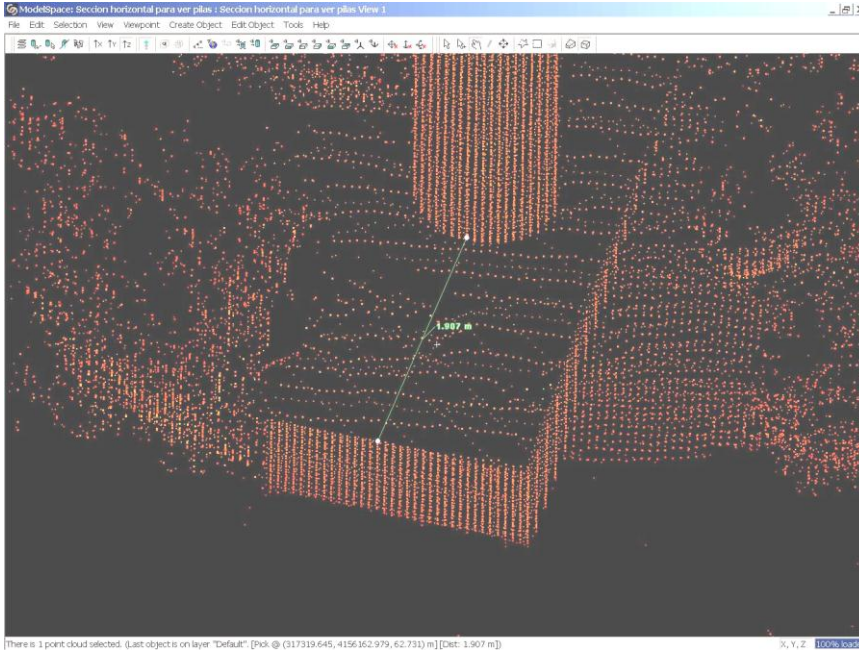


**Figura 9.- Solape de dos modelos parciales preparados para ser empalmados.**

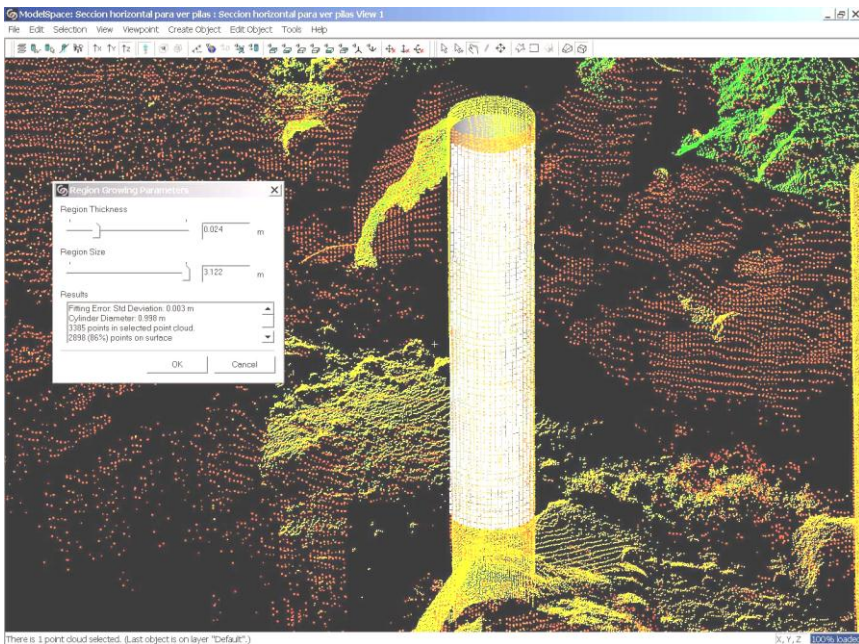
El modelo resultante del empalme se ha adaptado al sistema de coordenadas UTM, adoptado en los cálculos de GPS y mediciones posteriores de fotogrametría.

### Explotación del modelo del scanner láser

Con el conjunto obtenido se pueden obtener los datos necesarios para croquizar detalles de los puentes de la autovía, del puente romano y del azud así como para la reconstrucción de los perfiles transversales necesarios en el cálculo hidráulico.



**Figura 10.- Medición de distancia sobre el Modelo 3D obtenido del Scanner Láser**



**Figura 11.- Ajuste de un cilindro a uno de los fustes.**

Concretamente se pueden obtener coordenadas de cualquiera de los puntos del modelo, medir distancias entre cualesquiera dos de ellos (**figura 10**), ajustar geometrías simples (planos, cilindros, conos), a las identificables en el modelo (**figura 11** para el caso de un cilindro), seccionar por cualquier plano la nube de puntos a base simplemente de seleccionar por rebanadas los que han de quedar visibles, etc... Si fuera el caso, las

posibilidades de incorporar información en el modelo llegan al nivel de aquello que sea susceptible de aparecer en una imagen con la que texturizar la malla geométrica. Podrían así inventariarse defectos o indicios de ellos que fueran visibles, ubicándolos en su posición real (desconches, microfisuras, manchas, etc.) Aunque todo el trabajo puede realizarse con el software del equipo es importante poder exportar la nube de puntos a otros editores de gráficos.

## **Obtención de perfiles transversales de una carretera situando el equipo sobre un carro motorizado.**

La metodología expuesta en el presente estudio cartográfico se planteó para resolver la ampliación de la autopista A7 entre los PK 514 Y 516, en el término municipal de Valencia, a un carril más por sentido, para poder absorber el incremento de tráfico que se ha producido en los últimos años, reduciendo así la intensidad y mejorando la fluidez.

### **Problemática cartográfica:**

- Los planos que contienen ambas calzadas son distintos.
- Tras la ampliación se tendrá un escalonamiento de ambas calzadas del orden de 20 cm.
- Con los programas de modelado habituales la geometría se define a partir de unos pocos vértices de muestreo y se estima el resto con suposiciones del diseño.

### **Objetivo y aplicaciones:**

El objetivo principal es obviamente obtener una geometría lo más cercana posible a la realidad.

La aplicación principal del programa es la reconstrucción de una geometría tridimensional partiendo de una realidad densamente muestreada. Mediante el escaneado de la superficie real, con el equipo de escáner láser, se obtiene una nube de puntos, a partir de la cual se procede a la reconstrucción superficial.

### **Procedimiento:**

Para ello se realizan dos sistemas de tomas de datos: uno sección a sección y otro en movimiento.

Con el escaneo en movimiento lo que se pretende es conseguir definir una manera sistemática y rápida (en comparación con el escaneo sección a sección) de toma de datos mediante el escáner láser, y a partir de esos datos obtener las secciones transversales necesarias con las que poder diseñar la ampliación a un tercer carril, realizar las cubicaciones del terreno ... etc.

En el escaneo sección a sección se hace estación en aquellas secciones que se quieren estudiar detalladamente y, estando parados, se realiza un escaneo que dura aproximadamente cinco minutos.

En el escaneo en movimiento se realiza un escaneo del tramo a estudiar a una velocidad constante y en continuo. Tras un procesado de los datos obtenidos se trata de discretizar la nube de puntos obtenida y transformarla en secciones transversales espaciadas una distancia fija, la cual se pueda elegir según convenga. La toma de datos fue realizada a lo largo de una tarde.

En ambos casos, para asegurar la obtención de buenos resultados hay que cuidar:

- Verticalidad:** Controlable en el jalón mediante el nivel esférico que incorpora.
- **Perpendicularidad al eje de la calzada:** Mediante la escuadra para trazar perpendiculares.

### **Equipo:**

Consistió en el aparato escáner-láser con su trípode, una batería eléctrica que alimenta al escáner, un jalón con dianas, una escuadra para trazar perpendiculares, y un ordenador al que se

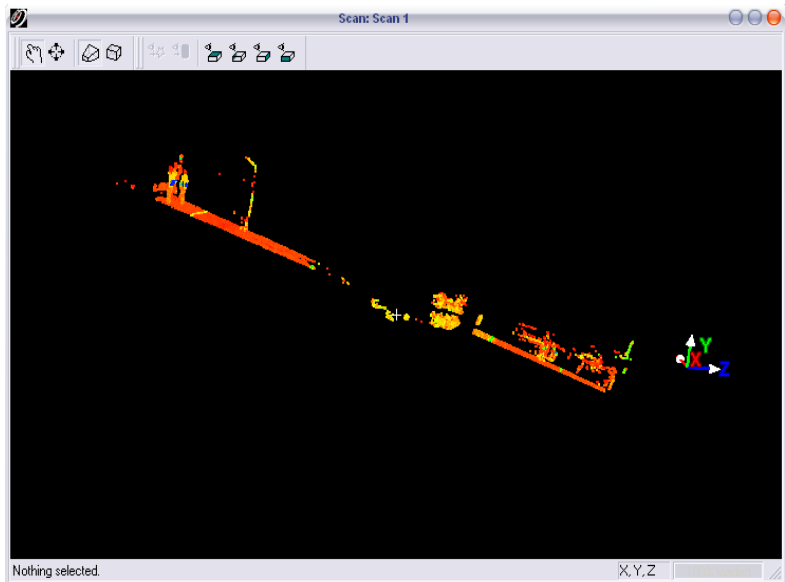
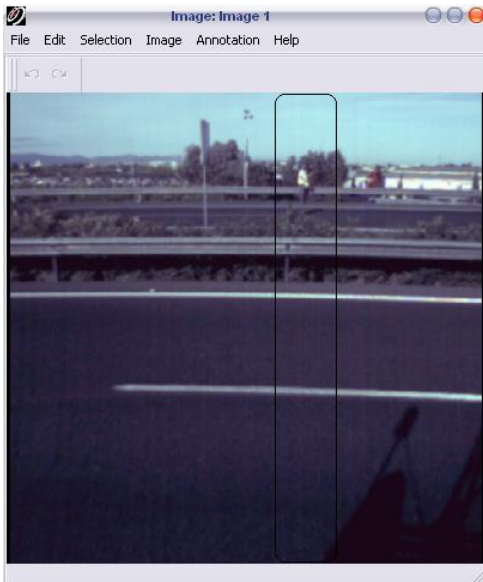
encuentra conectado el equipo de escáner láser, todo ello transportado en una camioneta a lo largo de la zona de estudio.



### Escaneo sección a sección:

**Paso 1:** se realiza una fotografía de la zona a escanear con la cámara que incorpora el propio escáner

**Paso 2:** una vez determinada la posición del jalón, se pasa a seleccionar la zona de escaneo y el número de puntos que se desean escanear tanto en vertical como en horizontal. En nuestro caso se tomaron 1000 puntos en vertical por 100 en horizontal.



### Escaneo en movimiento:

Se pretende con este escaneo diseñar un método de obtención de secciones transversales más rápido y sistemático que el explicado anteriormente.

El escáner lanza los rayos continuamente con un ángulo máximo de abertura de  $40^\circ$ ,  $20^\circ$  a

cada lado de su eje de colimación.

Para diferenciar cuáles son las secciones transversales que nos interesan de entre toda la nube de puntos (las escaneadas en el apartado anterior, para poder comparar resultados posteriormente) y cómo van a ser determinadas sus verticalidades, el proceso a seguir ha sido el siguiente:



1- Colocación del jalón en posición vertical en la primera sección a escanear, estando el escáner posicionado anteriormente a él.

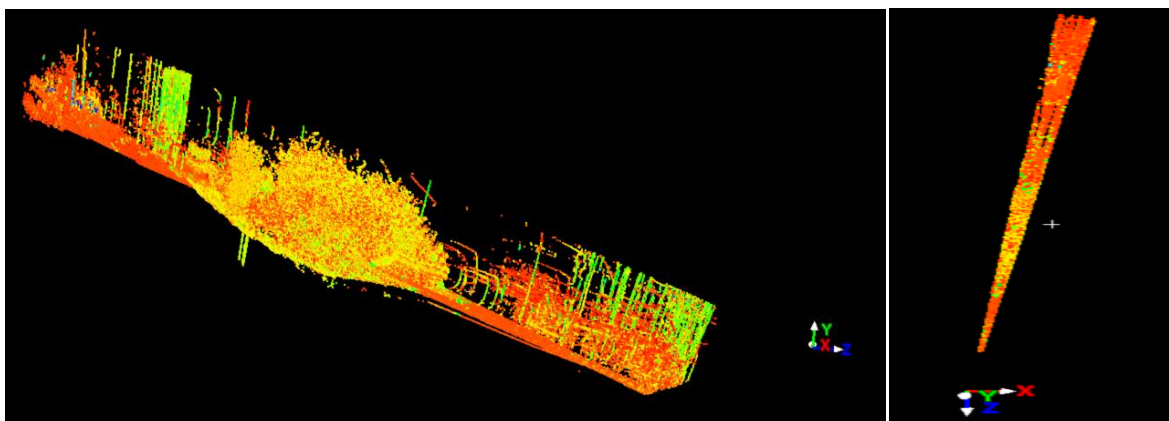
2- Se pone en movimiento el escáner, a velocidad constante. Una vez haya pasado por el jalón y lo haya dejado atrás de sí, se da la vuelta al jalón de manera que los rayos lanzados por el escáner no reflejen las pegatinas.

3- Rápidamente, antes de que el escáner haya llegado, se coloca el jalón en la siguiente sección transversal, con la pegatina reflectante mirando al frente y en posición vertical.



-Para conseguir que el rayo lanzado sea lo más perpendicular posible al escáner lo que se ha decidido para este escaneo es, al igual que en el caso anterior, escanear una banda estrecha.

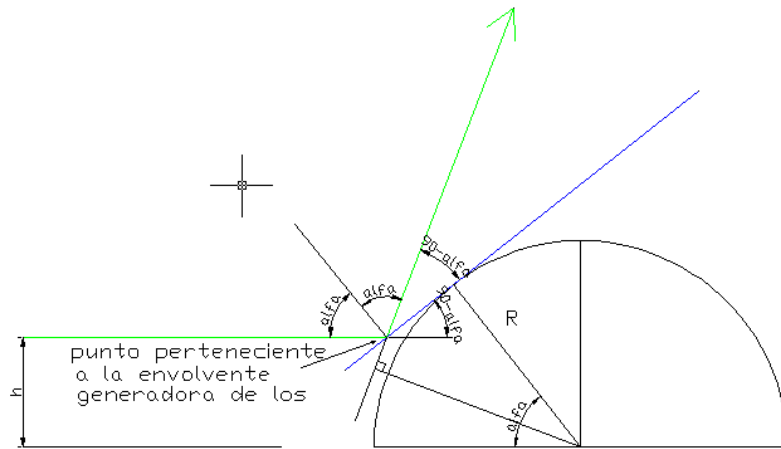
- La densidad de puntos con la que finalmente se ha decidido escanear es de 1000 puntos en vertical y 3000 en horizontal.



**Extracción de las secciones:**



¿Cómo se pasa de una única nube de puntos a distintas secciones equiespaciadas una distancia dada? Tras diversas aproximaciones sin resultado positivo, se plantea el estudio siguiente:

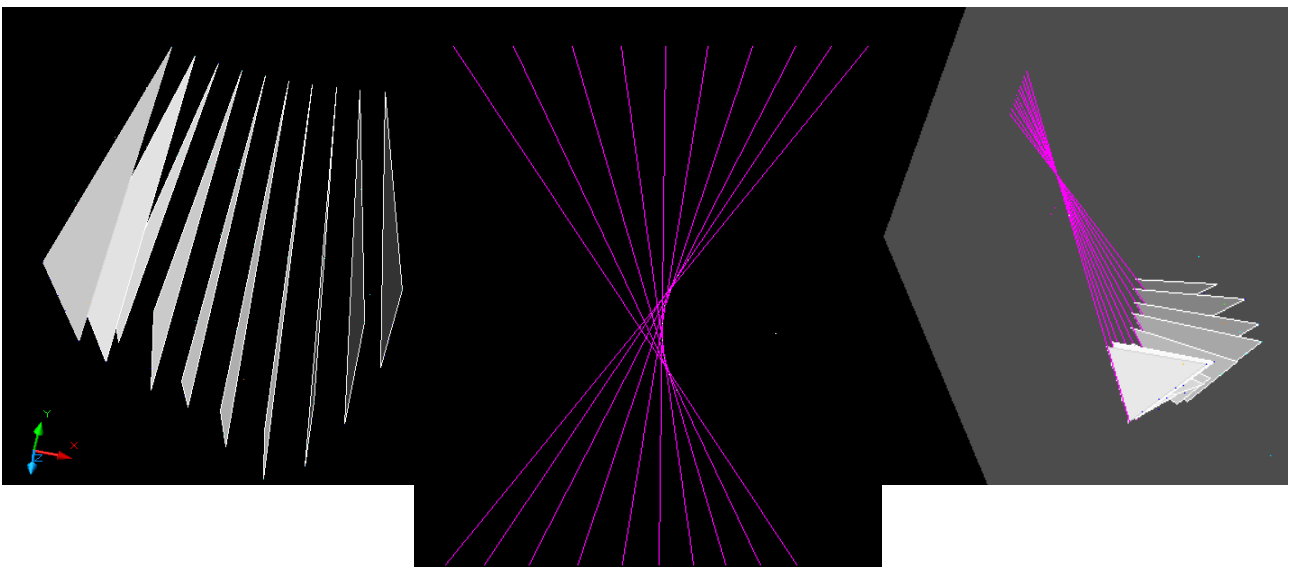


#### Hipótesis:

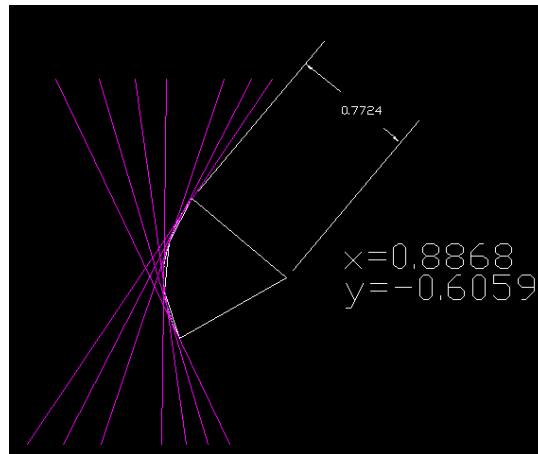
- El espejo gira respecto un determinado punto del que se encuentra a una distancia  $R$ .
- Tras haberse reflejado en el primer espejo, el rayo llega al segundo, sobre el que se reflejará a una altura “ $h$ ” respecto del citado punto.

#### Pruebas en entorno controlado y resolución:

- 1-Escaneo zona localizada: escaneo de la esquina de una habitación, e identificación de los rayos lanzados, los cuales estarán formados cada uno por diez puntos.
- 2-Ajuste de los puntos pertenecientes a cada uno de los planos escaneados, mediante el método de los mínimos cuadrados.
- 3-Obtención de los puntos intersección entre las rectas obtenidas anteriormente para determinar qué puntos pertenecen a la envolvente.
- 4-Generación de envolventes, para distintos valores de  $R$  y  $h$ .
- 5-Comparación de la envolvente real obtenida en el apartado 3 con las obtenidas en el 4. Obtención del parámetro  $R$  y  $h$  asociados al escáner.



La curva obtenida se puede ajustar a un círculo de las siguientes características:

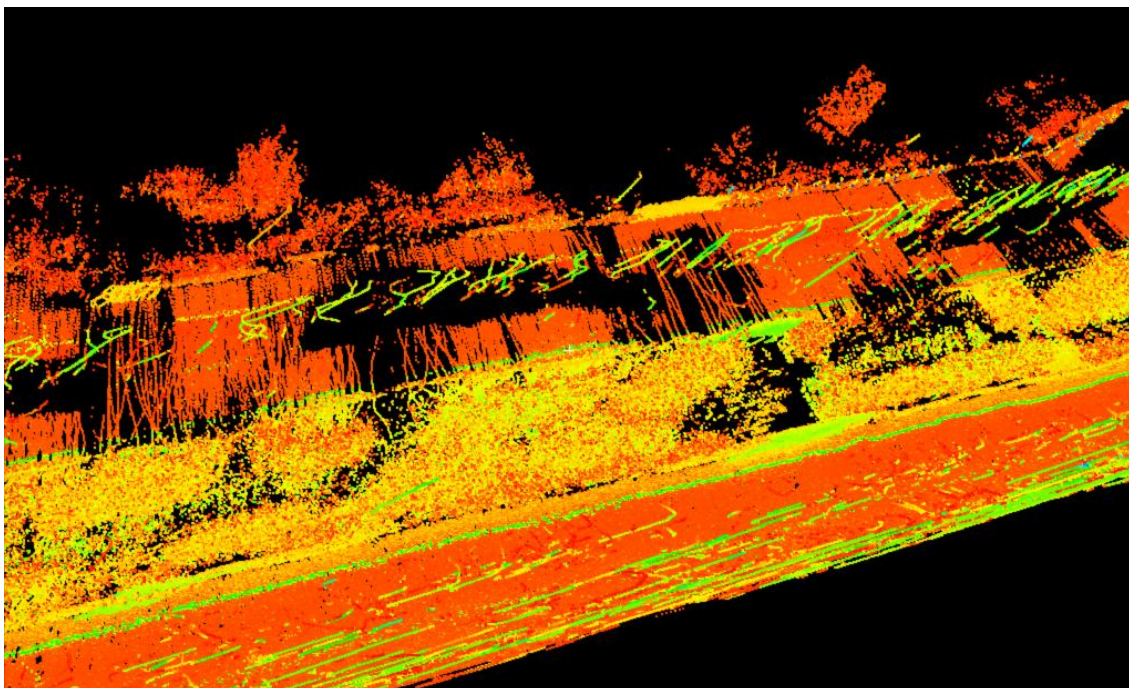


Una vez llegados a este punto, el siguiente paso es el de, con los parámetros obtenidos, transformar la nube de puntos, eliminando su conicidad y colocando las secciones paralelas. Para la realización de este paso caben dos planteamientos:

-El primero y más sencillo tendrá como punto de partida el hecho demostrado anteriormente de que la envolvente generadora de rayos (curva cuya característica principal es que todos los rayos son tangentes a ella) se ajusta a una circunferencia:

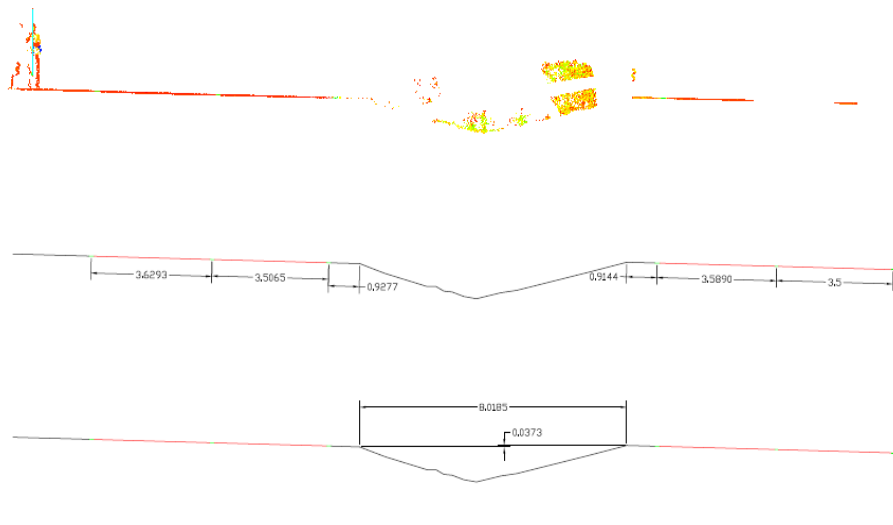
-El segundo planteamiento partirá del conocimiento de los parámetros R y H. En este caso la curva generadora de rayos no la suponemos con una forma conocida, sino que lo que de ellas se conoce son los puntos que la componen y que se han calculado anteriormente.

Finalmente se realiza un programa informático que transforma (estira), la nube de puntos, teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos hasta el momento. El resultado es:



Convenientemente cortada por los planos verticales de interés, resultan secciones

transversales como las de los siguientes ejemplos, en los que se llega a apreciar la inestimable ayuda adicional que representa el diferente color de reflexión del láser sobre las marcas viales, tanto más si pensamos en que una de ellas será eje de replanteo de la propia obra y de su ampliación.



### **Definición geométrica y monitorización de grandes sistemas de saneamiento.**

Con carácter de propuesta que nos consta ya ha sido contemplada desde más de un Ayuntamiento, se plantea la definición geométrica de la red de colectores y obras de regulación y/o control de 'primer orden' del sistema de saneamiento del núcleo urbano. Estamos hablando en principio de los colectores visitables por el equipo humano (susceptibles de ser transitados con todas las medidas de seguridad sanitaria y ambiental pertinentes). En segundo término y supeditados a la posible robotización de los medios de transporte y control del equipo láser escáner, es perfectamente viable el levantamiento de colectores de orden medio (diámetros a partir del orden del metro o metro y veinte centímetros). Para diámetros menores, las características geométricas serían deducibles del proyecto de ejecución o liquidación correspondiente a su construcción pueden ser perfectamente asumibles para completar el modelo. Esto mismo ocurre si fuera de interés contar con las características de espesores de hastiales o losas, recubrimientos, etc..., ajenos a la estricta sección hidráulica del colector o elementos auxiliares: se extraerían con facilidad de los correspondientes proyectos de ejecución y/o liquidación.

Presumiblemente más sencilla sería la tarea de obtención del modelo geométrico de las cuencas o zonas de vertido de la red en extensión suficiente para cubrir la zona de influencia de eventuales caudales extraordinarios por cuantía (de origen fundamentalmente pluvial, inundación), por naturaleza (puntual, de carácter nocivo o peligroso), por persistencia (con niveles asumibles de contaminación pero de eventual sostenibilidad en el medio afectado), etc...

Contaríamos por tanto con el modelo geométrico completo del sistema hidráulico de captación, transporte, depuración y/o vertido del sistema, independientemente de que se trate de un sistema único, separativo o compartido por tramos.

### **Complementos.**

La mera descripción geométrica no basta para caracterizar el sistema hidráulico, entenderlo, prever su comportamiento ni evaluar los efectos de roturas, fallos o modificaciones en él introducidas. Es imprescindible la asistencia técnica de expertos en la caracterización de parámetros hidráulicos no estrictamente geométricos (rugosidades, roturas de carga, elementos de maniobra, etc...), presentes o futuros en el sistema. Es igualmente imprescindible la asistencia técnica de expertos usuarios o generadores de software de modelos hidráulicos

### **Beneficios.**

Simulación en modelos hidráulicos: Calibración de parámetros; funcionamiento de elementos instalados y efecto de maniobras sobre ellos; efectos de nuevos elementos a implantar, hipótesis de malfuncionamiento o colapso de tramos, etc...

Evaluación de riesgos ante supuesto de cuantía y/o calidad de vertidos

Simulación directa (sobre hipótesis y características) del posible origen y niveles de contaminación inducidas, o inversa para la localización una vez detectado.

Evaluación de alternativas de vertido a posibles cuencas 'en reserva'

Generación de automatismos de partición o alivio de flujos ante eventuales daños o ineficacia de las instalaciones de depuración

Implantación de sistemas automáticos de gestión de vertidos

Diseño óptimo de instrumentación de la red en cuanto a ubicación y características de equipos (tomamuestras, caudalímetros o secciones de control...)

### **Destinado a:**

Gestores urbanísticos. Gestores de sistemas de saneamiento y evacuación. Gestores de sistemas de depuración. Auditores mediambientales, etc...

**AGRADECIMIENTOS:** A D. Francisco José Vallés Morán y D<sup>a</sup>. María Navarro Camallonga, Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, cuyo magnífico trabajo y generosidad han facilitado la redacción del presente artículo, hasta el punto de que quizá fuera más justa su inclusión como coautores del mismo.

## **Conclusiones de la experiencia en levantamientos con scanner láser en el Instituto de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia.**

El escáner láser ha facilitado los mecanismos para los levantamientos arquitectónicos, pero su aún novedosa aplicación (especialmente por el elevado precio del dispositivo), implica un desconocimiento general de la aplicación del resultado. Las posibles aplicaciones que se desarrollan a partir de estos datos siempre proporcionan una seguridad importantísima al usuario pues la generosidad en la cantidad de datos obtenida y la sencillez de los mecanismos de obtención proporcionan una tranquilidad y seguridad que otras metodologías no ofrecen. Los resultados en cada conjunto escaneado suelen ser sorprendentes y espectaculares, y su aplicación práctica puede abarcar un número altísimo de aplicaciones que requieren información geométrica de una cierta precisión, por lo que el ajuste del proceso a la optimización de los trabajos conducentes a la generación de estos datos aún requiere investigación.

Además de los típicos trabajos de levantamiento necesarios para proyectos de restauración, se han abordado muchos otros de otro objetivo (cuya descripción aquí alargaría mucho el contenido de estas páginas y que pueden ser objeto de otra publicación). Así pues hemos realizado otras actuaciones con otros objetivos:

Docente:

- Enseñar a nuestros alumnos la aplicación de estos sistemas, en docencia reglada, y en máster de especialización.
- Comprobar la calibración del equipo y el funcionamiento de los sistemas de espejos comprobando algunas propiedades del montaje específico de nuestros equipos.
- Obtención de geometría para las prácticas en asignaturas de dibujo y sistemas de representación y asignaturas en máster de restauración.

Aplicaciones en Cálculo de estructuras:

- Medición de estructuras metálicas existentes para su cálculo estructural por el método de los elementos finitos, con obtención de nudos, longitudes de elementos, geometría de estos (secciones y espesores),... para su introducción automática para el cálculo.

Aplicaciones en Ingeniería hidráulica:

- Generación de modelos de cauces de ríos, puentes y aliviaderos, para simulación de avenidas y de riesgo de erosión para el diseño del proyecto de protección.

Aplicaciones en Ingeniería del terreno.

- Generación de modelos de laderas para estudios de estabilidad.
- Modelos para cubicación de canteras y vertederos.

Aplicaciones en Ingeniería Civil.

- Obtención de perfiles transversales de una carretera situando el equipo sobre un carro motorizado.

### Aplicaciones en prevención de incendios.

- El escáner láser ha permitido un fácil levantamiento tanto de los edificios como del monumento fallero. Disponer de una importante seguridad, por la cantidad de datos recibidos y la comodidad de los mecanismos de obtención. Los resultados en cada conjunto escaneado suelen ser sorprendentes y espectaculares, aunque se abre muchas posibilidades a la hora de su aplicación práctica.
- El escáner con su potencial indiscutible ofrece una gran capacidad de detalle y rapidez, especialmente para las formas orgánicas, muy difíciles de levantar con procedimientos clásicos. También en espacios difícilmente alcanzables. Simplifica la toma de datos respecto a la fotografía tradicional, que en el campo de la prevención de incendios, es desde la aparición de este tipo de herramienta, un método complementario.

### Aplicaciones en modelado.

- Obtención de modelos de objetos de menor tamaño con propósitos de diseño artístico.

El escáner estudiado tiene un potencial indiscutible, por su capacidad de detalle y rapidez, especialmente usado sobre formas orgánicas, muy difíciles de representar con procedimientos clásicos. Igualmente resulta muy útil en espacios difícilmente alcanzables pues su rango de medición, según lo experimentado por equipos actuales. Sin duda, simplifica enormemente la toma de datos respecto a la fotogrametría tradicional, que en el campo de la arquitectura, es desde la aparición de estos instrumentos un método complementario.

Según nuestra experiencia, la gran virtud del láser es su precisión, tanto general, como en los pequeños detalles, todo levantado en un proceso simultáneo. Esa exactitud es, de hecho impresionante, sobre todo cuando trabajamos con una única nube de puntos, es decir, con apenas una toma de datos del campo de visión de láser. Pero, según hemos experimentado, esa precisión disminuye con la adición de más condiciones como es el empalme de varias nubes de puntos. Ejemplificando, la información común de dos nubes de puntos, que en teoría tendría que quedar perfectamente coincidente, la inexperiencia en el manejo de este tipo de aplicaciones puede derivar en errores de ejecución que derivan en informaciones duplicadas en posiciones desviadas. La experiencia en estos casos nos lleva a intuir la información más correcta, para localizar el problema y eliminarlo. Como en cualquier tipo de aplicación, la experiencia en el manejo del equipo aumenta la velocidad de trabajo y minimiza los errores que inevitablemente luego hay que corregir. En este aspecto el sistema requiere mucha experiencia para obtener buenos resultados.