

## HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA MEDIR AREAS DE ASOLEAMIENTO TRIDIMENSIONALES

Daniel Hoyos, Maiver Villena

Instituto de Energías No Convencionales (INENCO)  
Consejo de Investigación U.N.Sa

Tel. 0387-4255424 - Fax 0387-4255424 e-mail: [hoyosd@unsa.edu.ar](mailto:hoyosd@unsa.edu.ar), [maiver@inenco.net](mailto:maiver@inenco.net)

### RESUMEN:

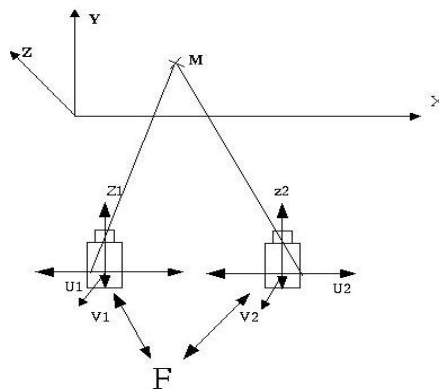
La medición del área de asoleamiento de una casa o la geometría de un concentrador solar es importante para distintos cálculos en energías renovables. Este trabajo presenta una herramienta computacional que permite reconstruir, a partir de imágenes, tomadas con cámaras fotográficas o filmaciones, la geometría tridimensional de una escena y presenta este resultado como un archivo DXF el cual es de uso común en arquitectura.

**Palabras claves:** energía solar, instrumentación, imágenes, visión artificial, estereografía

### INTRODUCCIÓN

Existen distintas técnicas para medir un objeto o un área tridimensional, una de esas técnicas consiste en tomar imágenes con una cámara y reconstruir la escena de tres dimensiones. El uso de esta técnica tiene algunos problemas debido a que una imagen tridimensional no puede ser analizada con un simple cambio de escalas. Una cámara proyecta una imagen tridimensional sobre un plano, por lo tanto la tercera dimensión se pierde. Si se desea medir una superficie plana y el plano a medir no es perfectamente perpendicular al eje de la óptica de la cámara, la escena aparece deformada por la proyección anteriormente dicha, también la fotografía es deformada para tener una mejor apariencia al ojo humano, esto se denomina relación de aspecto. Para solucionar estos problemas se utiliza la técnica denominada estereografía, [Faugeras et al, 2001] la cual consiste en tomar fotografías a la superficie frontal del objeto desde dos puntos de vista distintos. Existen dos formas de realizar estereografía: conociendo puntos del objeto (estereografía calibrada) o la geometría de la óptica de las cámaras y de las distancias entre ellas (estereografía no calibrada).

En este trabajo se utilizó la técnica de estereografía calibrada, puesto que no se necesita conocer la geometría con que se obtuvieron las imágenes, [Stefan Scherer. 1995] entonces, en la misma debían existir un conjunto de puntos de coordenadas conocidas y que se puedan observar por las dos cámaras para caracterizar la óptica de la misma, este procedimiento se denomina calibración de una cámara [Y. H. Kwon, 1998]



**Figura 1: Diagrama .**

Se construyó una herramienta computacional para reconstruir escenas de tres dimensiones utilizando imágenes tomadas por cualquier tipo de cámaras. Este programa se desarrolló utilizando el software Scilab [M. M. Escobar, 2002 ] y también se utilizó el lenguaje Tcl/Tk [Brent B. Welch]. A partir de ahora se supondrá que las imágenes fueron adquiridas de alguna forma, se analizará la geometría del sistema y de las cámaras para poder obtener una medición confiable.

### CALIBRACIÓN DE LAS CAMARAS

Tomar una imagen con una cámara consiste en proyectar un objeto tridimensional en un plano de dos dimensiones. Suponiendo, en una primera aproximación, que la cámara no presentara ningún defecto se puede utilizar el modelo pinhole.

Este modelo consiste en suponer que la cámara no tiene óptica, si no que es un pequeño orificio que proyecta la luz sobre un plano perpendicular al mismo. Esta es la cámara más simple que puede existir.

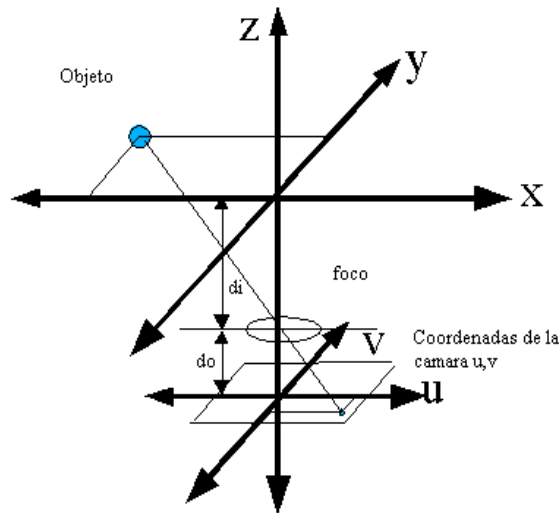


Figura 2: Esquema de una cámara modelo pinhole

En la figura 2 se puede observar un esquema de la cámara, de la misma se puede inferir que las coordenadas del objeto proyectado sobre el plano imagen son las correspondientes a la fórmula [1].

$$\begin{aligned}
 U &= -d_o / (z + d_i) * x & [1] \\
 V &= -d_o / (z + d_i) * y \\
 u &= a_{11} * x + a_{12} * y + a_{13} * z + a_{14} * t & [2] \\
 v &= a_{21} * x + a_{22} * y + a_{23} * z + a_{24} * t & [2] \\
 w &= a_{31} * x + a_{32} * y + a_{33} * z + a_{34} * t \\
 U &= u / w & [3] \\
 V &= v / w \\
 X &= x / t & [4] \\
 Y &= y / t & [4] \\
 Z &= z / t & [4]
 \end{aligned}$$

donde  $d_i$  es la distancia del foco al plano imagen,  $z$  es la distancia del foco al objeto,  $U$  y  $V$  coordenadas cartesianas del punto proyectado sobre el plano imagen,  $(u, v, w)$  son las coordenadas proyectivas de la proyección del punto sobre el plano imagen  $(x, y, z, t)$  son las coordenadas proyectivas del objeto  $(X, Y, Z)$  son las coordenadas cartesianas del objeto. Para realizar la medición se utiliza la matriz de proyección perspectiva de la cámara, la que surge de utilizar un sistema proyectivo de coordenadas en lugar del cartesiano. La expresión de las mismas es mostrada en la fórmula [2], las fórmulas [3] y [4] muestran el cambio a coordenadas euclidianas en el plano utilizando el sistema de ecuaciones [3] y en el espacio utilizando el sistema de ecuaciones [4]. Para encontrar la posición de un objeto se necesita conocer la matriz anterior, por lo tanto, el proceso de calibración de una cámara consiste en calcular los coeficientes  $a_{ij}$ . Del análisis de [1] [2] y [3] se obtiene la ecuación [5]

$$\begin{aligned}
 u &= U * w \text{ de [3]} \\
 u &= a_{11} * x + a_{12} * y + a_{13} * z + a_{14} * t \\
 w &= a_{31} * x + a_{32} * y + a_{33} * z + a_{34} * t \\
 a_{11} * x + a_{12} * y + a_{13} * z + a_{14} * t &= U * (a_{31} * x + a_{32} * y + a_{33} * z + a_{34} * t) \\
 \text{si } a_{34} &= 1 \text{ y } t = 1 \\
 a_{11} * x + a_{12} * y + a_{13} * z + a_{14} * t &= a_{31} * x * U + a_{32} * y * U + a_{33} * z * U + U \\
 U &= a_{11} * x + a_{12} * y + a_{13} * z + a_{14} * t - a_{31} * x * U - a_{32} * y * U - a_{33} * z * U & [5]
 \end{aligned}$$

Esta ecuación está formada por los componentes  $a_{ij}$  de la matriz, las coordenadas espaciales y del plano imagen de cada punto. Se puede obtener de la misma forma la siguiente ecuación [6]

$$V1 = x_1 * a_{21} + y_1 * a_{22} + z_1 * a_{23} + a_{24} * t - a_{31} * x_1 * V1 - a_{32} * y_1 * V1 - a_{33} * z_1 * V1 & [6]$$

Con estas ecuaciones y un conjunto de puntos conocidos, que fueron previamente medidos sobre el objeto a analizar, se construye la matriz de calibración de la cámara [7], esta matriz tiene once incógnitas, necesita al menos once ecuaciones independientes, cada punto conocido suministra dos ecuaciones independientes, por lo tanto se necesitan al menos seis para poder realizar una medición, resolviendo esta matriz se encuentran los coeficientes buscados [Young-Hoo, 1998]. Al ser este

algoritmo muy sensible a fallas se recomienda utilizar una mayor cantidad de puntos posibles, así se dispone de una matriz con mayor cantidad de ecuaciones que incógnitas, la resolución de este sistema debe efectuarse utilizando el método de los cuadrados mínimos, para minimizar el error de medida.

$$\begin{aligned}
 & x_1 \cdot a_{11} + y_1 \cdot a_{12} + z_1 \cdot a_{13} + a_{14} && -a_{31} \cdot x_1 \cdot U_1 - a_{32} \cdot y_1 \cdot U_1 - a_{33} \cdot z_1 \cdot U_1 = U_1 \\
 & x_1 \cdot a_{21} + y_1 \cdot a_{22} + z_1 \cdot a_{23} + a_{24} \cdot t - a_{31} \cdot x_1 \cdot V_1 - a_{32} \cdot y_1 \cdot V_1 - a_{33} \cdot z_1 \cdot V_1 = V_1 \\
 & \circ \\
 & \circ \\
 & \circ \\
 & \circ \\
 & x_n \cdot a_{11} + y_n \cdot a_{12} + z_n \cdot a_{13} + a_{14} && -a_{31} \cdot x_n \cdot U_n - a_{32} \cdot y_n \cdot U_n - a_{33} \cdot z_n \cdot U_n = U_n \\
 & x_n \cdot a_{21} + y_n \cdot a_{22} + z_n \cdot a_{23} + a_{24} \cdot t - a_{31} \cdot x_n \cdot V_n - a_{32} \cdot y_n \cdot V_n - a_{33} \cdot z_n \cdot V_n = V_n
 \end{aligned} \tag{7}$$

En la aplicación desarrollada se visualizan dos imágenes y se pueden seleccionar las coordenadas de los puntos conocidos (x,y,z) en las imágenes (u1,v1) para la primera y (u2,v2) para la segunda. Luego de esta selección se construye para cada imagen la matriz [6] y se calcula la matriz de distorsión proyectiva de cada una.

### ESTEREOGRAFIA

Teniendo en cuenta que una cámara proyecta puntos del espacio tridimensional en un plano bidimensional, la misma no posibilita reconstruir el espacio tridimensional. Para realizar esta reconstrucción se necesitan dos cámaras, el esquema experimental es el mostrado en la figura 3.

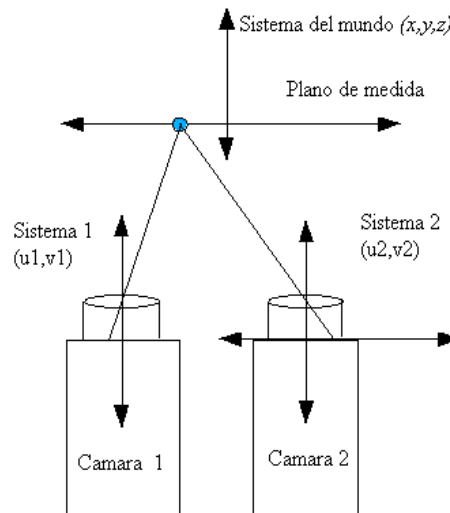


Figura 3: Sistema para realizar estereografía

Las cámaras se calibran, según el punto anterior, enfocadas sobre el plano donde se mide el objeto. Cada una de las cámaras presenta su matriz de proyección perspectiva (en este caso para la primera a y b para la segunda) para obtener la información tridimensional se deben combinar estas dos matrices utilizando las ecuaciones [5] y [6] ordenadas de forma diferente, así se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 & (a_{11}-a_{31} \cdot u_1) \cdot x + (a_{12}-a_{32} \cdot u_1) \cdot y + (a_{13}-a_{33} \cdot u_1) \cdot z + (a_{14}-a_{34} \cdot u_1) \cdot t = 0 \\
 & (a_{21}-a_{31} \cdot v_1) \cdot x + (a_{22}-a_{32} \cdot v_1) \cdot y + (a_{23}-a_{33} \cdot v_1) \cdot z + (a_{24}-a_{34} \cdot v_1) \cdot t = 0 \\
 & (b_{11}-b_{31} \cdot u_1) \cdot x + (b_{12}-b_{32} \cdot u_1) \cdot y + (b_{13}-b_{33} \cdot u_1) \cdot z + (b_{14}-b_{34} \cdot u_1) \cdot t = 0 \\
 & (b_{21}-b_{31} \cdot v_1) \cdot x + (b_{22}-b_{32} \cdot v_1) \cdot y + (b_{23}-b_{33} \cdot v_1) \cdot z + (b_{24}-b_{34} \cdot v_1) \cdot t = 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

Resolviendo el mismo se obtiene la posición en 3D del punto analizado. Se realiza la descomposición SVD, la cual convierte la matriz en un producto de tres matrices, donde la central es diagonal y son los autovalores del sistema. Se busca el autovalor cercano a cero cuyo autovector correspondiente es la solución buscada [Cambridge, 1992].

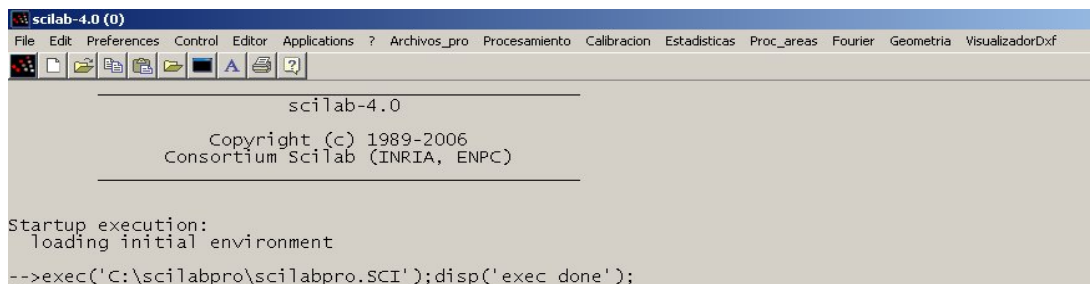
### SOFTWARE DESARROLLADO

Se desarrolló un programa que permite medir formas tridimensionales utilizando los algoritmos previamente descritos. Debido a que, en muchas aplicaciones el usuario suele trabajar con programas de dibujo del tipo CAD, se presenta la información obtenida en el formato DXF (Drawing Interchange Format es un formato vectorial que la empresa Autodesk lanzó para permitir el intercambio de archivos de dibujo entre los diferentes programas de CAD), todos los puntos marcados se conectan entre sí formando un POLYLINE, también se puede presentar la información como tres vectores (x,y,z). Se describe solamente la primera de las dos opciones.

Para este fin se utilizó Scilab, un software dedicado al cálculo numérico que provee un poderoso ambiente de desarrollo para aplicaciones científicas e ingeniería, para lo cual posee un intérprete y un lenguaje de programación de alto nivel. Scilab fue concebido para ser un sistema abierto donde el usuario pueda definir nuevos tipos de datos y operaciones sobre ellos. También permite incorporar funciones definidas por el usuario, posibilitando ampliar su biblioteca de funciones, estas pueden ser invocadas en cualquier momento por el en forma de scripts (programas scilab).

La interface gráfica de Scilab fué desarrollada en Tcl/Tk, un lenguaje de programación interpretado que permite crear múltiples interfaces de usuario independientes de la plataforma en la cual se ejecuten, esto permitió que Scilab se encuentre disponible para distintos Sistemas Operativos de Computadoras como por ejemplo Linux y Windows.

Cualquier aplicación desarrollada con Tcl/Tk requiere de un intérprete para su ejecución, el mismo está incluido en casi todas las distribuciones del Sistema Operativo GNU/Linux y para el caso de Windows podemos utilizar ActiveTcl, un interprete que puede ser instalado conjuntamente con Scilab, posibilitando la ejecución de programas escritos en Tcl/Tk. Otra de las ventajas de Scilab es que permite la ampliación de su menú gráfico de usuario, de modo tal que podemos incluir en el mismo aplicaciones que pueden ser ejecutadas interactivamente, ya sea desde el menú principal o desde su línea de comandos.



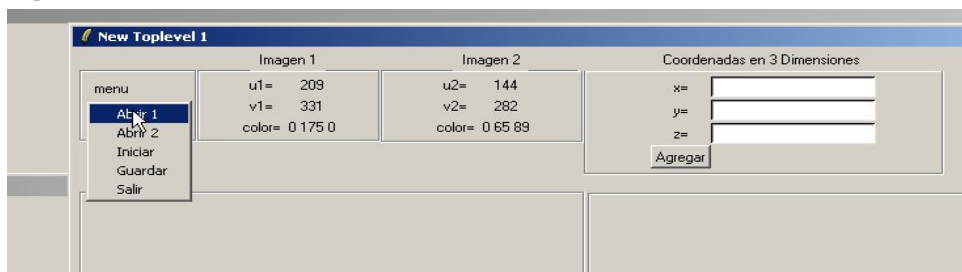
**Figura 4:** Entorno de Scilab con scilabpro

El conjunto de rutinas desarrolladas en este trabajo, tanto en el lenguaje de programación de Scilab como en Tcl/Tk fueron agrupadas como extensiones de Scilab en un conjunto denominado ScilabPro, la ejecución de este grupo de aplicaciones se refleja en el menú principal con sus distintas opciones (ejemplo Calibración) figura 5.



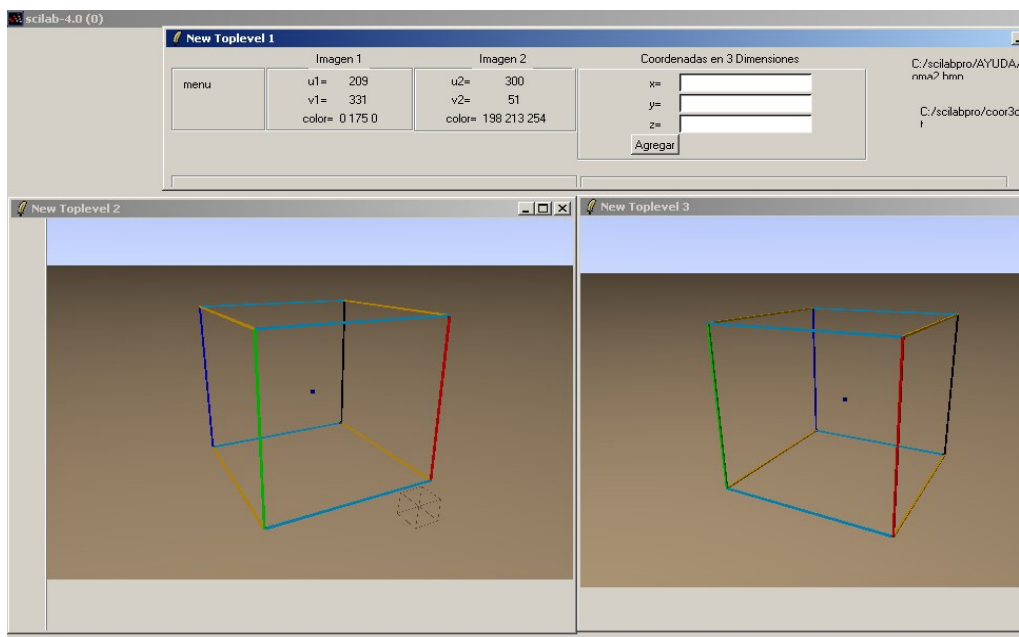
**Figura 5:** Entorno de Scilab y utilización del menú de ScilabPro

Al igual que Scilab, el software desarrollado, pretende ser multiplataforma para lo cual será necesario tener previamente instalados en el sistema operativo tanto Scilab como un interprete Tcl/Tk. Para la ejecución del programa desarrollado el usuario deberá seleccionar las dos imágenes, a partir de las cuales se reconstruirá la imagen tridimensional, (desde el menú Calibración / Cálculo Calibración 3d) para ello nuestro programa ubica en dos ventanas cada una de las imágenes y en una tercera la aplicación de calibración.



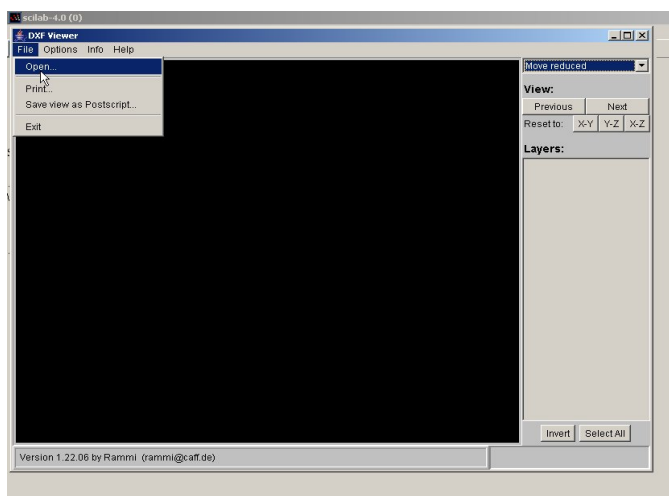
**Figura 6:** Programa para calcular la matriz de calibración

Una vez seleccionados los archivos gráficos correspondientes, el usuario deberá seleccionar (en ambas imágenes) los puntos comunes, agregando en el formulario de aplicación una serie de coordenadas (x,y,z). Una vez seleccionados los puntos, el programa almacena los datos de los cálculos correspondientes en un archivo .dat, para ello solicita al usuario los nombre correspondientes. Estos datos ingresados a Scilab, son utilizados en el sistema de ecuaciones [6], la resolución de este sistema (utilizando el algoritmo de cuadrados mínimos) permite obtener las matrices de proyección perspectiva de cada una de las imágenes. Estas matrices quedan definidas en el entorno de Scilab y se almacenan para un uso posterior.



**Figura 7:** Programa de medida

Posteriormente deberá invocarse al procedimiento Reconstruye 3D DXF, esta función reconstruye la imagen tridimensional, para posteriormente almacenar los resultados en un archivo gráfico DXF, para esta tarea utilizamos una rutina escrita Scilab denominada WriteDXF (la cual es freeware). Para poder visualizar el resultado final de nuestro trabajo utilizamos un programa de visualización escrito en Java (también freeware) que es invocada desde el menú Visualizador DXF, para lo cual solo se necesita seleccionar el archivo DXF a ser visualizado.



**Figura 8:** Programa freeware de visualización de archivos DXF

## CONCLUSIONES.

En las figuras 9 y 10 se muestra una vivienda donde se tomaron 2 fotografías desde dos puntos de vista distintos, las cuales serán utilizadas para generar la reconstrucción 3d. Se tomaron medidas de algunas dimensiones para calibrar las imágenes. En la tabla 1 se muestra un conjunto de puntos medidos utilizando esta técnica comparando con medidas realizadas utilizando ruleta, y comparando con planos de la construcción. El punto mas elevado fue estimado del plano de la construcción. El cálculo del error se realizó midiendo las dimensiones y comparando con los datos obtenidos. Sobre los puntos calibrados el error es del orden de 10 cm, sobre los puntos interiores a la zona de los puntos calibrados es también del orden de 10 cm. En el exterior de la zona el error de la medida es mayor y crece en función de la distancia a los puntos calibrados, por ejemplo, el vértice del techo presenta un error de 50 cm. Se interpreta este resultado suponiendo que cada pixel representa un ángulo sólido, mientras mayor es la distancia a la cámara este ángulo cubre una superficie mayor, por lo tanto el error es mayor mientras mas se aleja de la zona calibrada.



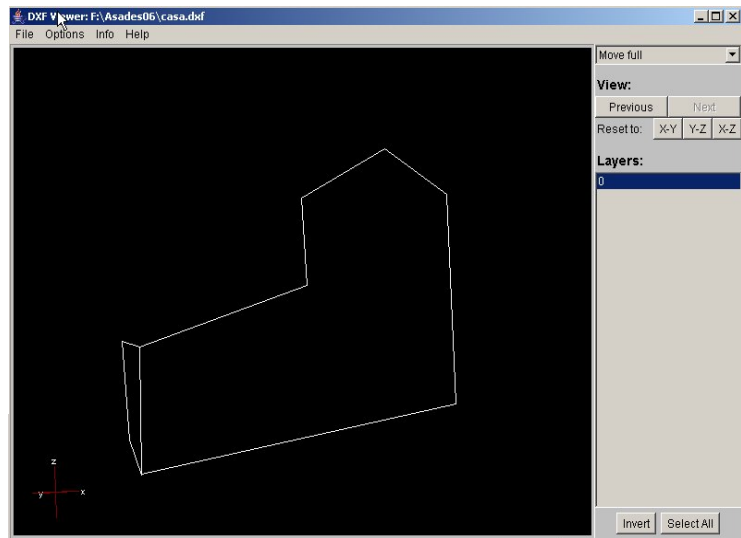
**Figura 9:** fotografía 1



**Figura 10:** fotografía 2

Se obtuvieron los siguientes cambios de coordenadas y la imagen tridimensional reconstruida que se muestra en la figura 11

Matriz imagen 1	Matriz imagen 2
0.654825	0.489108
-0.041663	-0.017058
-0.072234	0.021619
408.535866	217.400737
0.133606	0.036719
-0.579157	-0.462871
0.241066	0.187010
417.965976	412.981769
0.000396	0.000134
-0.000020	0.000004
0.000557	0.000434



**Figura 11:** Matrices de calibración y visualización de imagen DXF

La exactitud con que se realiza la selección de píxeles que corresponden al mismo punto en las dos imágenes es muy importante, para disminuir el error de medida. Por ejemplo un desplazamiento de 10 píxeles puede provocar un error de medida del orden de 50 cm.

Se está analizando modificar el método de medida de utilizar tres imágenes para mejorar el error del sistema.

Xfoto	Yfoto	Zfoto	Xmed	Ymed	Zmed
-0.04	2.71	0.01	0	2.70	0
-0.08	2.75	2.42	0	2.7	2.2
0.01	0.00	2.43	0	0	2.2
-0.08	-0.17	0.02	0	0	0
3.95	0.004	0.001	3.95	0	0
8.91	0.48	0.004	7.95	0	0
8.75	0.47	0.578	7.95	0	0
6.56	0.42	6.57	5.95	0	6.4
4.17	0.35	5.55	3.95	0	5.4
4.06	0.16	3.54	3.95	0	4.00

Tabla1: Valores medidos con metodo fotografico y con ruleta

## REFERENCIAS

Stefan Scherer. (1995). Shape for uncalibrated Stereo.

Zhengyou Zhang Olivier Faugeras Rachid Deriche (1997) An effective technique for Calibrating a Binocular Stereo Through Projective Reconstruction Using Both a Calibration Object and the Environment Massachusetts Institute of Technology.  
Janne Heikkila and Olli Silven (1997) A Four-step Camera Calibration procedure with Implicit Image Correction.  
Faugeras Oliver y Quang-Tuan Luong (2001) The Geometry of Multiple Images Massachusetts Institute of Technology.  
(1992) Numerical Recipes in C Cambridge Press.  
Brent B. Welch Practical Programming in TCL and TK (1997) Prentice Hall.  
Young-Hoo Kwon, (1998) DLT method Internet  
Young-Hoo Kwon, (1998) LSQ method Internet  
Manuel Mora Escobar Héctor (2002) **Introducción a SCILAB** Departamento de Matemáticas Universidad Nacional de Colombia

#### **ABSTRACT**

In non conventional energy there exists a group of problems who need 3D visualization to be analyzed. We write the software to visualize and made the reconstruction of the 3D information using calibrated stereographic. We use Scilab and Tcl/Tk to programming.

**Keywords:** solar energy, instrumentation, vision reconstruction.