

# Nuevas técnicas aplicadas a la auscultación de movimientos en Ingeniería Civil

REVISTA **MAPPING**  
Vol. 27, 188, 36-39  
marzo-abril 2018  
ISSN: 1131-9100

## *New techniques applied to movements monitoring in Civil Engineering*

Adrián García Sánchez, Luis Ramos Alcázar, David Galán Martín,  
Miguel Marchamalo Sacristán, Rubén Martínez Marín

### Resumen

Los avances que se han producido en los últimos años, en el campo de la instrumentación electrónica, han permitido su aplicación en numerosos campos de la ingeniería civil. En concreto, una aplicación que puede beneficiarse de los mencionados avances es la auscultación de movimientos, tanto del terreno como de las estructuras. En este artículo se exponen dos de las últimas técnicas que se están aplicando a la medición de movimientos en estructuras: El GPS diferencial con algoritmos de filtrado (DGPS filtrado) y el Láser-escáner Terrestre (Terrestrial Laser Scanner, TLS).

Dos son las características que diferencian ambas técnicas. Mientras el DGPS permite la medición en continuo, el TLS realiza sus mediciones por campañas, de igual forma que se realizaría aplicando la nivelación o la colimación angular. La segunda característica que los diferencia es la precisión obtenida. En el caso del DGPS se consigue apreciar movimientos del orden del milímetro, mientras que la precisión del TLS está cercana a los 3 milímetros, si bien se espera que evoluciones futuras mejoren la actual precisión hasta alcanzar el milímetro.

Al margen de sus precisiones, es de destacar que ambas técnicas pueden ser aplicadas con éxito a la auscultación de movimientos de estructuras y elementos relacionados con las mismas, como por ejemplo taludes, obras auxiliares, etc.

### Abstract

The advances that have occurred in recent years, in the field of electronic instrumentation, have allowed their application in many fields of civil engineering. In particular, the auscultation of movements of both the terrain and the structures can benefit from the aforementioned advances. In this article two of the latest techniques that are being applied to the measurement of movements in structures are exposed: Differential GPS with filtering algorithms (filtered DGPS) and the Terrestrial Laser-scanner (TLS).

There are two characteristics that differentiate both techniques. While the DGPS allows continuous measurement, the TLS performs its measurements by campaigns, just as it would be done by applying leveling or angular collimation. The second characteristic that differentiates them is the precision obtained. In the case of the DGPS it is possible to appreciate movements of the order of the millimeter, while the TLS achieves an accuracy of 3 millimeters. Nevertheless it is expected that future enhancements will enhance this performance up to one millimeter in the near future.

Regardless of their precisions, it is noteworthy that both techniques can be applied successfully to the auscultation of movements of structures and elements related to them, such as slopes, auxiliary structures, etc.

**Keywords:** DGPS filtrado, Láser-escáner Terrestre, TLS, auscultación, control de movimientos en estructuras.

**Palabras clave:** Filtered DGPS, Terrestrial Laser Scanner, TLS, monitoring, structures movements control.

*E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - Universidad Politécnica de Madrid*

*adrian.garcia.sanchez.aero@gmail.com,  
luis.ramos.alcazar@upm.es, miguel.marchamalo@upm.es,  
ruben.martinez@upm.es*

*Canal Isabel II. Área de explotación de Presas y Pozos  
dgalanmartin@canaldeisabelsegunda.es*

*Recepción 16/01/2018  
Aprobación 26/02/2018*

## 1. INTRODUCCIÓN

La evolución e introducción de la instrumentación electrónica en la ingeniería civil, está permitiendo realizar auscultaciones de movimientos en las estructuras con exactitudes similares a la instrumentación clásica, pero con un esfuerzo y un coste muy inferiores.

El objetivo de este trabajo consistió en seleccionar dos técnicas novedosas, como son el GPS diferencial con filtrado de datos y el Láser-escáner Terrestre y comparar los resultados obtenidos con los que proporcionan los instrumentos tradicionales.

Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios, llegando a la conclusión de que ambas técnicas son adecuadas para la auscultación de movimientos en obras civiles, pudiendo constituir un buen complemento a la instrumentación tradicional. Además, dadas sus características, pueden también ser complementarias entre sí, ya que mientras el DGPS filtrado proporciona datos continuos sobre un número pequeño de receptores, el TLS proporciona un dato, por campaña de escaneo, pero sobre una gran cantidad de puntos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo la investigación se seleccionó una presa de hormigón arco-gravedad localizada en la cuenca del Tajo (Figura 1).

La presa dispone de cuatro péndulos directos que dan información de los desplazamientos en coronación respecto a los puntos de la galería perimetral en que están ubicadas las bases de lectura inferiores. Este sistema de auscultación tradicional, se ha considera-



Figura 1. Presa objeto del estudio

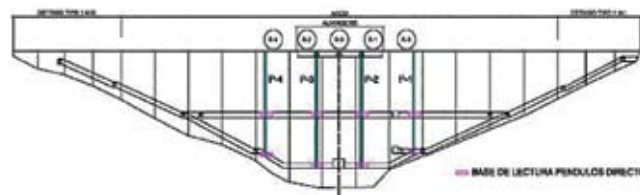


Figura 2. Péndulos directos

do que proporciona los verdaderos movimientos de la estructura, siendo por tanto el sistema contra el que se calcularon los errores de los dos sistemas digitales (Figura 2).

### 2.1. Red DGPS filtrada

Se diseñó una red GPS diferencial (Gökalp, E. & Taşçi, L., 2009) que consta de tres partes fundamentales: las antenas y receptores GPS, un sistema de comunicaciones y un sistema informático de proceso de datos. El sistema de comunicaciones para la transmisión de datos entre los receptores GPS y el servidor de cálculo fue una línea ADSL en la presa. (Figura 3).

El sistema informático implementado fue el 3DTracker (Pinnacle, 2009). Esta aplicación permite recibir y gestionar los datos provenientes de las estaciones GPS además de aplicar un filtro tipo Kalman (Welch, G. & Bishop, G., 2002), de tendencia-varianza, para lograr precisiones milimétricas. Los datos procesados se compararon con los obtenidos mediante la medición de los péndulos directos y se calcularon los errores.

### 2.2. Láser-escáner Terrestre (TLS)

La técnica TLS se basa en obtener una nube de puntos perfectamente georreferenciados (X,Y,Z) de la superficie objeto de la auscultación. Por la naturaleza de esta instrumentación, cada nube de puntos corresponde a una campaña. La estación que se utilizó fue una LEICA C10, con velocidad de escaneo de 50.000 puntos por segundo (Heine, E. et al., 2007), (Chrzanowski, A. et Al., 2011).

#### 2.2.1. Campañas de escaneo



Figura 3. Situación de los receptores y péndulos. Planta general

Se efectuaron dos campañas de escaneo al año, programadas en primavera (2011) y otoño (2013). El objetivo de realizar las campañas en estas fechas fue fijado por los técnicos de explotación que conocen perfectamente los ciclos de movimientos de la presa. El componente más importante de los movimientos es el debido a las variaciones térmicas ambientales.

### 2.2.2. Postprocesado de datos

A los datos obtenidos en cada campaña se les aplica una serie de operaciones que en su conjunto se denomina «postproceso». La operativa es como sigue:

- Depuración de datos
  - Filtrado por distancia e intensidad.
  - Eliminación de píxeles mixtos (aislados), efecto de la divergencia del rayo.
  - Distorsiones distancia-intensidad.
  - Trayectorias compuestas debido a reflexiones múltiples (píxeles aislados).
  - Ruido por ángulo de incidencia e intensidad.
- Registro de las nubes de puntos
  - Se trata de hacer transformaciones de coordenadas (giro, traslación, escalado) de las diferentes nubes de puntos tomadas a un sistema de coordenadas común,
    - Utilizando dianas, naturales o artificiales.
    - Por solape de nubes de puntos (algoritmo ICP – interactive closest points).

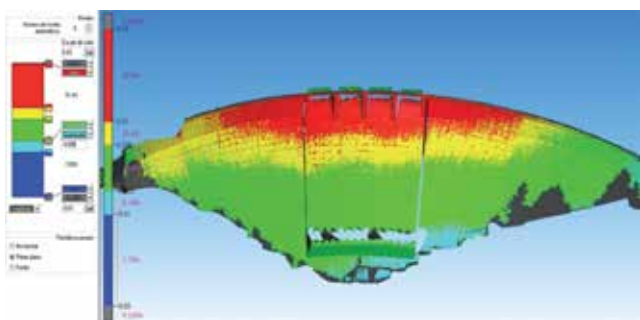


Figura 4. Modelo 3D de deformaciones de la presa a partir de datos tomados con TLS

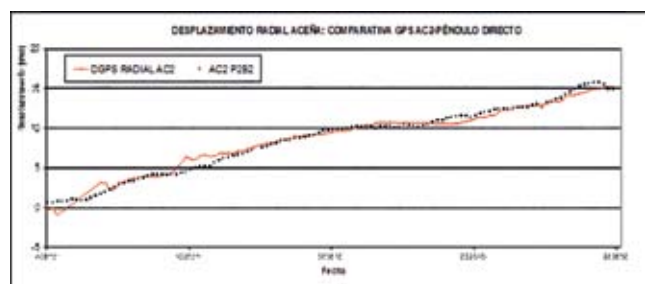


Figura 5. Correlación entre los datos del péndulo P-2 y del receptor AC2 DGPS

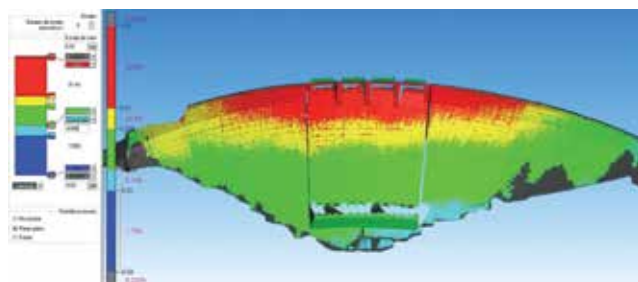


Figura 6. Movimientos entre dos mallas

- Modelado
  - Consiste en definir el modelo 3D a partir de la nube de puntos (Figura 4), basándose en:
    - Primitivas geométricas (ajuste por mínimos cuadrados).
    - Triangulación (Delaunay).
    - NUBRS (non-uniform rational B-splines), formas libres.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5 se presenta la evolución de las mediciones de DGPS filtrado y péndulos en el periodo indicado en el gráfico. Como puede apreciarse, la correlación entre ambas series durante los meses analizados, es muy alta.

El coeficiente de correlación obtenido para este periodo fue 0,92, lo que demuestra la bondad de los resultados obtenidos con el DGPS filtrado.

En la figura 6 se muestran los desplazamientos entre la malla de referencia (abril 2011) y la obtenida en octubre de 2013; los valores positivos indican movimientos aguas arriba. Las distancias se agrupan en cinco intervalos diferenciados por color sólido. También se muestra el porcentaje de puntos que hay en cada intervalo.

En la figura 7 se muestra la comparación de movimientos en coronación de la presa, tanto los observados con el péndulo 4, como los obtenidos en esa misma posición pero calculados a partir de las observaciones realizadas con el TLS (Ramos, L.A., et al., 2014).

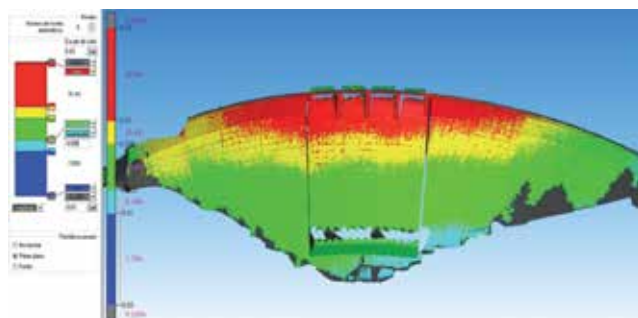


Figura 7.- Movimientos de la presa en coronación en la posición del péndulo 4, en mm

## 4. CONCLUSIONES

En relación con la técnica DGPS filtrada, se puede afirmar que este sistema es muy útil de cara a la gestión de la auscultación y la seguridad de las presas al reflejar adecuadamente su deformación, siendo un método alternativo, y siempre complementario, a los tradicionales.

El coste de la infraestructura necesaria es muy inferior, del orden de cien veces inferior, al coste que supone implantar los medios de auscultación tradicionales, especialmente los péndulos.

En cuanto a la técnica TLS, y dado que se basa en campañas, como la nivelación o la colimación angular, el coste es similar al que se incurre con la instrumentación tradicional, salvo la inversión inicial en la adquisición de la estación TLS cuyo coste es muy superior al que corresponde a un nivel o una estación total. No obstante, la técnica TLS permite analizar una gran cantidad de movimientos de puntos y estudiar el movimiento del paramento como superficie en conjunto.

Ambas técnicas son compatibles e incluso complementarias entre sí y con respecto a las técnicas tradicionales de nivelación y colimación angular e incluso a los propios péndulos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la colaboración de los técnicos de Leica Geosystems y su apoyo continuo a para desarrollar este trabajo. Así mismo agradecemos la ayuda prestada por todos los compañeros del laboratorio de Geomática de la Escuela de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

## REFERENCIAS

- Chrzanowski, A., Szostak- Chrzanowski, A. & Steeves, R. (2011). *Reliability and Efficiency of Dam deformation monitoring schemes*. Proceedings of the CDA 2011 Annual Conference. Fredericton, NB. Canada. CD-ROM.
- Gökalp, E. & Taşçı, L., (2009). *Deformation Monitoring by GPS at Embankment Dams and Deformation Analysis*. Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 2 Firat University, Elazığ, Turkey.
- Heine, E. et al. (2007). *3Driskmapping: preparing learning material on the use of laser scanning for risk assessment of public infrastructure*. European Leonardo Da Vinci Programme. International Workshop on

the application of terrestrial laser scanning for risk mapping. Valencia, Spain.

- Pinnacle, (2009). *Libby Dam Motion. Exam Integrity Monitoring with Pinnacle's, 3DTracker Global Positioning System*. EEUU, U.S. Army Corps of Engineers.
- Ramos, L.A., Marchamalo, M., Martínez-Marín & R., Rejas, J.G. (2014). *Aplicación del láser escáner terrestre (TLS) a la modelización de estructuras: precisión, exactitud y diseño de la adquisición en casos reales*. Informes de la Construcción. DOI 10.3989/ic.13.103
- Welch, G. & Bishop, G., (2002). *An Introduction to the Kalman Filter*. TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill.

### Sobre los autores

#### Adrián García Sánchez

Ingeniero Aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid y Máster por la Universidad de Cranfield (UK). Actualmente está desarrollando la Tesis Doctoral en el Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPM

#### Luis Ramos Alcázar

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la UPM y Profesor Asociado en el Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPM.

#### David Galán Martín

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la UPM y Profesor de la Universidad Alfonso X el Sabio, así como ingeniero especialista en el Área de Explotación de Presas y Pozos del Canal de Isabel II.

#### Miguel Marchamalo Sacristán

Profesor Titular de Universidad en el Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPM.

#### Rubén Martínez Marín

Catedrático de Universidad en el Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPM.