



# ARCHIVO DEL LABORATORIO DE DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DEL PATRIMONIO

LABORATORY FOR THE GEOMETRIC DOCUMENTATION OF  
HERITAGE'S ARCHIVE


Sección de proyectos fin de carrera / Undergraduate master  
projects section

# 3

Información general / General information		
AUTOR:	Pablo PÉREZ VIDIELLA	:AUTHOR
TUTOR:	Álvaro RODRIGUEZ MIRANDA José Manuel VALLE MELÓN	:TUTOR
TITULACION:	Ingeniería Técnica en Topografía. Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz (UPV-EHU)	:DEGREE
TITULO:	Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas	:TITLE
FECHA:	Septiembre 2009 / September 2009	:DATE
NUMERO:	LDGP_pfc_003	:NUMBER
IDIOMA:	español / Spanish	:LANGUAGE

<b>Resumen</b>	
TITULO:	Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas
RESUMEN:	En el presente trabajo se realiza una breve presentación de la auscultación de edificios históricos, centrándose principalmente en un tipo de elementos singulares que son las torres inclinadas. Posteriormente se analiza un trabajo realizado en la Iglesia de Santa María la Blanca en Agoncillo (La Rioja), se definen los factores: precisión, fiabilidad, coste, tiempo y complejidad, y se analizan las variaciones en el instrumental y la metodología para ver cómo afectan a estos factores.
DESCRIPTORES NATURALES:	patrimonio, análisis de deformaciones, técnicas de bajo coste, auscultación
DESCRIPTORES CONTROLADOS:	(Procedentes del Tesoro UNESCO [ <a href="http://databases.unesco.org/thessp/">http://databases.unesco.org/thessp/</a> ]) Patrimonio Cultural, Ingeniería de la Construcción, Costes

<b>Abstract</b>	
TITLE:	Optimization of a monitoring project, aimed at the study of the geometry of an historical building by means of classical surveying techniques.
ABSTRACT:	This project -after a brief presentation of the geometrical monitoring topic applied to historical buildings, specially the leaning towers- analyses the monitoring of Santa María la Blanca's church in Agoncillo (La Rioja, Spain) and extract the following relevant factors: accuracy, reliability, cost, time and complexity. Then, the project go on checking the effect on these factors due to variations in the equipment or the used methodology.
NATURAL KEYWORDS:	heritage, deformation analysis, low-cost, monitoring
CONTROLLED KEYWORDS:	(From the UNESCO's thesaurus [ <a href="http://databases.unesco.org/thesaurus/">http://databases.unesco.org/thesaurus/</a> ]) Cultural Heritage, Construction engineering, Costs

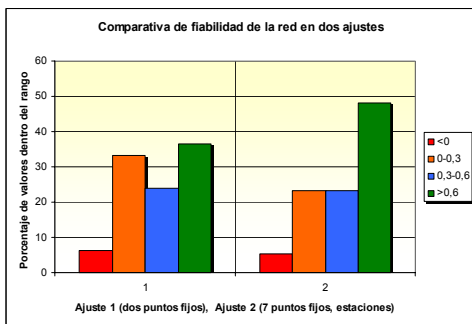
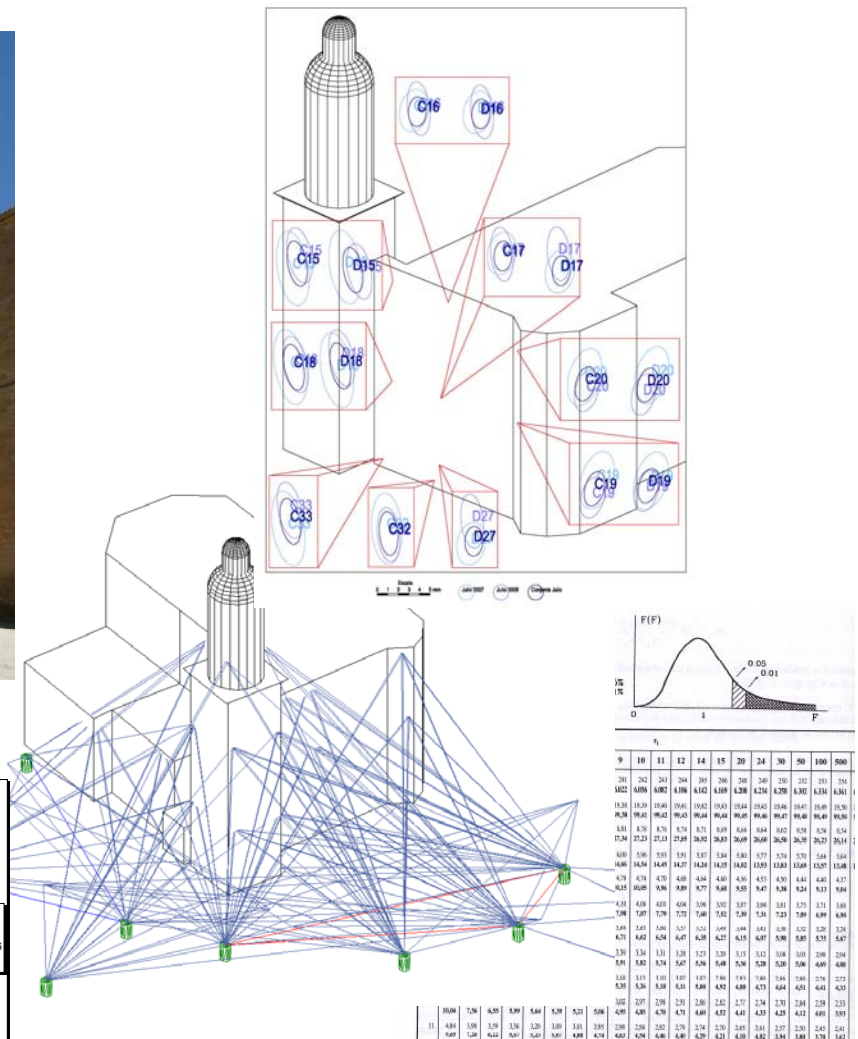
<b>Derechos / Rights</b>		
DERECHOS:	<p>Está permitido citar y extraer el texto, siempre que la fuente sea claramente identificada (respecto a la consideración de “no comercial” ver el apartado “otros derechos”). / <b>Permission is granted to quote and take excerpts from this text, provided that the source of such material is fully acknowledged (for the “non commercial” label see below in “others rights”).</b></p> 	:RIGHTS
OTROS:	<p>Algunas imágenes y planos corresponden a proyectos de documentación realizados por encargo y, en consecuencia, su uso comercial puede infringir derechos de explotación de los promotores. / <b>Some pictures and plans come for the documentation of commissioned projects, therefore, their use for commercial purposes may be an infringement of the promoters rights.</b></p>	:OTHERS

<b>Renuncia de responsabilidad / Disclaimer</b>		
DESCARGO:	<p>El uso de la información contenida en este documento se hará bajo la completa responsabilidad del usuario. / <b>The use of the information contained in this document will be under the exclusive responsibility of the user.</b></p>	:DISCLAIMER

<b>Estructura / Framework</b>		
ID PERMANENTE:	<a href="http://hdl.handle.net/10810/7001">http://hdl.handle.net/10810/7001</a>	:PERMANENT ID
ESTRUCTURA:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>ldgp_pfc003_PabloPV.pdf</b>: este documento / <b>this document.</b></li> <li>• <b>ldgp_pfc003_fot_(?).jpg</b>: 4 fotografías de documentación / <b>4 photographs of documentation.</b></li> </ul>	:FRAMEWORK

<b>Cita completa recomendada / Recommended full citation</b>		
CITA:	<p>PÉREZ VIDIELLA, Pablo. <i>Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas</i>. Proyecto fin de carrera de Ingeniería Técnica en Topografía. Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz (Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea). 2009.</p>	:CITATION

# Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas.



Alumno: **D. Pablo Pérez Vidiella**

Tutores: **D. Álvaro Rodríguez Miranda**  
**Dr. D. José Manuel Valle Melón**



Titulación: Ingeniero Técnico en Topografía  
Septiembre 2009



Antes de introducirnos en el contenido de este proyecto, quisiera dedicar un momento a mostrar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han formado parte activa en todas las etapas que he ido salvando.

Un especial agradecimiento a José Manuel Valle Melón, quién desde el primer momento me apoyó y ayudó con la idea de proyecto que le presenté y que sin él no habría podido poner en práctica. Gracias por ser el artífice de la materialización, por el apoyo incondicional, por los buenos consejos que siempre me has dado y por todos los momentos vividos. Muchas gracias por tu generosidad y por todos estos años de prácticas y complicidades en el Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio, en los cuales he aprendido grandes lecciones (vitales y técnicas).

Mi especial agradecimiento a mi incansable tutor, compañero y amigo Álvaro Rodríguez Miranda, cuya sabiduría y paciencia, en todos los campos, me han permitido llevar a buen término este proyecto, animándome en cada paso y tropiezo que iba dando, siendo paciente conmigo y ayudándome a comprender los intrínquilis matemáticos que encierra un proyecto de este tipo, amenizando los momentos de decaimiento personal, con su imperturbable humor, levantándome cada vez que me caía y poniéndome los pies sobre la tierra en los momentos de exaltación. Muchas gracias por haberme ayudado tanto a lo largo de estos años.

Ambos sois grandes “amarillos” para mi.

A Francisco Madrid, por haber aceptado ser parte del tribunal que juzgará, con benevolencia, el trabajo que aquí expongo.

A mi familia por darme todo.

A Laura, por su apoyo incondicional.

A todos los amigos que me han acompañado y soportado con humor mis “locuras” y devaneos.

A todos los compañeros que están y han pasado por el L.D.G.P.

## ÍNDICE

### 1.- Introducción

### 2.- Objetivos

### 3.- Auscultación de estructuras

#### 3.1. Auscultación

3.1.1.- ¿Qué medir?

3.1.2.- ¿Para qué medir?

3.1.3.- ¿Cómo medir?

3.1.4.- ¿Con qué precisión se debe medir?

3.1.5.- ¿Durante cuánto tiempo se debe medir y con qué frecuencia?

3.1.6.- ¿Qué hacer con las medidas?

#### 3.2.- Modelos matemáticos

#### 3.3.-Ejemplos

3.3.1.- Ejemplo 1. Muralla de Amelia

3.3.2.- Ejemplo 2. Teatro anatómico de Padua

3.3.3.- Ejemplo 3. Iglesia de Villamorón en Burgos

3.3.4.- Ejemplo 4. Diagnósticos en paramentos históricos

3.3.5.- Ejemplo 5. El caso de La Iglesia de Nuestra Señora de la Blanca de Agoncillo

### 4.- Optimización de la metodología

#### 4.1.- Descripción de factores

#### 4.2.- Instrumentos: geodésicos o topográficos

4.2.1.- Tabla teórica y justificación

4.2.2.- Pruebas realizadas

4.2.3.- Tabla obtenida del análisis

#### 4.3.- Señalización: pilares de observación

4.3.1.- Tabla teórica y justificación

4.3.2.- Pruebas realizadas

4.3.3.- Tabla obtenida del análisis

#### 4.4.- Señalización: placas

4.4.1.- Tabla teórica y justificación

4.4.2.- Pruebas realizadas

4.4.3.- Tabla obtenida del análisis

#### 4.5.- Señalización: clavos

4.5.1.- Tabla teórica y justificación

4.5.2.- Pruebas realizadas

4.5.3.- Tabla obtenida del análisis

#### 4.6.- Observaciones: eliminar lecturas a la referencia

4.6.1.- Tabla teórica y justificación

4.6.2.- Pruebas realizadas

4.6.3.- Tabla obtenida del análisis

#### 4.7.- Observaciones: eliminar puntos de observación

4.7.1.- Tabla teórica y justificación

4.7.2.- Pruebas realizadas

- 4.7.3.- Tabla obtenida del análisis
- 4.8.- Observaciones: eliminar series
  - 4.8.1.- Tabla teórica y justificación
  - 4.8.2.- Pruebas realizadas
  - 4.8.3.- Tabla obtenida del análisis
- 4.9.- Observaciones: introducir medidas de distancias
  - 4.9.1.- Tabla teórica y justificación
  - 4.9.2.- Pruebas realizadas
  - 4.9.3.- Tabla obtenida del análisis

## 5.- Resultados

## 6.- Recomendaciones y conclusiones

### 6.1.- Respecto a los análisis realizados

- 6.1.1.- Instrumental utilizado
- 6.1.2.- Necesidad de erigir estaciones de control
- 6.1.3.- Pasar de placas a clavos y a prismas
- 6.1.4.- Eliminar series de observaciones a la referencia
- 6.1.5.- Eliminar puntos de observación
- 6.1.6.- Eliminar series de observación desde cada estación
- 6.1.7.- Introducir un observable nuevo: Distancias

### 6.2.- Respecto a los factores

- 6.2.1.- Precisión
- 6.2.2.- Fiabilidad
- 6.2.3.- Coste
- 6.2.4.- Tiempo
- 6.2.5.- Complejidad

### 6.3. Tabla de resultados cuantificada en %

### 6.4. Conclusión: Simulación de la optimización de una auscultación geodésica

## Bibliografía

## Anexos

- Anexo 1: Noticias relacionadas
- Anexo 2: Características de la instrumentación utilizada.
- Anexo 3: Datos y gráficas de los análisis llevados a cabo.
- Anexo 4: Artículos



Iglesia de Nuestra Señora de La Blanca de Agoncillo. Elemento patrimonial que da origen a este proyecto. Se puede observar en la fotografía, la inclinación que presenta la torre, estimada en 2 grados sexagesimales y que supone una separación a la altura del tejado de la iglesia de 40 cm, al igual que se aprecia una grieta en la fachada principal del conjunto.

Figura 1. Iglesia de Nuestra Señora de la Blanca. Agoncillo, (La Rioja)

---

---

## 1.- Introducción

*“El patrimonio está constituido por todo aquello que se considera **valioso y es transmitido** de unas generaciones a otras, cuyo valor es asignado socialmente por diversos motivos y circunstancias, pudiendo cambiar esta valoración en función de la coyuntura.”*

*José Manuel Valle Melón. Tesis Doctoral. Documentación Geométrica del Patrimonio: Propuesta conceptual y metodológica. Logroño, junio de 2007. Página 19.*

Los edificios históricos, se incluyen dentro de la clasificación de elementos patrimoniales culturales-materiales-arquitectónicos, (según la clasificación que se expone en la página 20 de la Tesis Doctoral de Don José Manuel Valle Melón, Documentación Geométrica del Patrimonio: Propuesta conceptual y metodológica. Logroño, junio de 2007) por tanto se ven afectados por necesidades básicas del patrimonio como son su gestión, difusión, transmisión y preservación.

Debemos de ser conscientes de estas necesidades, pues las generaciones futuras también tienen derecho a disfrutar de estos elementos como lo hacemos en la actualidad. Las administraciones movidas por éste y otros intereses dedican partidas del presupuesto público al mantenimiento del patrimonio, pero existe un gran problema que es el ingente número de elementos a gestionar y el escaso presupuesto disponible para su mantenimiento, por lo cual las administraciones frecuentemente se centran en la preservación de entidades mayores (con más atractivo turístico y posibilidad de



retorno económico) relegando a las entidades menores (de las que se tienen múltiples ejemplos).

La mayoría de los edificios históricos que se conservan en la actualidad, llevan a sus espaldas siglos de vida y uso. A lo largo de periodos de tiempo tan amplios se han visto sometidos a múltiples cambios del entorno y de las condiciones climáticas, que han afectado a su estructura. En muchos casos los edificios presentan diferentes patologías, y necesitan por tanto de un estudio de deformaciones, aunque en ocasiones no se llega a actuar por el alto precio de los estudios, la falta de recursos asignados, pérdida de interés social por el bien, como por ejemplo, ligada a la despoblación de entidades locales menores.

Una de las herramientas de las que disponemos, con el fin de garantizar las necesidades citadas, y en concreto la preservación, es la auscultación de estructuras, en el sentido más amplio de técnicas e instrumentación.

Una solución a este problema sería desarrollar una metodología de trabajo acorde a los recursos de los que se dispone (en línea con la ISPRS<sup>1</sup>) sin que ello conlleve una pérdida en las precisiones del estudio.

Desde Julio de 2007, hasta el momento de redacción de este proyecto y con una fecha de finalización fijada para Octubre de 2009, el Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio de la UPV-EHU (LDGP) lleva realizando el estudio de las deformaciones del conjunto arquitectónico de la Iglesia de Nuestra Señora de La Blanca, en la localidad de Agoncillo perteneciente a la Comunidad Autónoma de La Rioja, utilizando una técnica de estudio de bajo coste, basada en la utilización de instrumentación y metodología topográfica clásica (instrumentación con precisión en la medida de ángulos del orden de 5 segundos centesimales y observación mediante pares sobre una referencia). Hasta el momento se han llevado a cabo ocho campañas de auscultación, realizadas con un periodo de tres meses, obteniendo una precisión media de 2 milímetros de error medio cuadrático en la determinación de las coordenadas de las señales de observación.



Figura 2. Actuaciones dentro del estudio de la Iglesia de Nuestra Señora de La Blanca

---

<sup>1</sup> El desarrollo de nuevos métodos de bajo coste es una línea emergente de investigación en la documentación patrimonial, como puede verse en *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing COMMISSION V CLOSE-RANGE SENSING: ANALYSIS AND APPLICATIONS*, en la que dentro del WG V/2 - CULTURAL HERITAGE DOCUMENTATION, tiene como un línea de trabajo "Development of low-cost and rapid techniques in documentation and monitoring of the cultural heritage"  
[ [http://www.isprs.org/technical\\_commissions/wgtc\\_5.html#wg5/2](http://www.isprs.org/technical_commissions/wgtc_5.html#wg5/2) ]

El detonante de este proyecto, entre otras causas, fue la propuesta marcada por el Gobierno de La Rioja, consciente de la problemática, quiso realizar pruebas para definir una metodología de trabajo útil para el control de edificaciones, para lo cual se puso en contacto con el LDGP y se decidió actuar, realizando el primer test, en la Iglesia de Nuestra Señora de La Blanca de Agoncillo.

Si bien esta metodología, desarrollada y utilizada para este proyecto por el LDGP, ha dado resultados satisfactorios, se hace necesario un estudio en profundidad de la misma con el fin de optimizarla para posteriormente extrapolarla a otros trabajos en los que se precise su utilización, debido al problema anteriormente citado de los recursos limitados.



Torre de Pisa: Ejemplo de elemento patrimonial en el cual se han invertido esfuerzo y dinero con el fin de preservarlo. Presenta una inclinación de 4,95 grados. Es uno de los monumentos más visitados del mundo, y símbolo de la arquitectura italiana. La Torre Inclinada de Pisa es el campanario de la catedral de Pisa. Fue construida para que permaneciera en posición vertical pero comenzó a inclinarse tan pronto como se inició su construcción en agosto de 1173. La altura de la torre es de 55,7 a 55,8 metros desde la base, su peso se estima en 14.700 toneladas y la inclinación de 4,95° extendiéndose 4,5 m de la vertical. La torre tiene 8 niveles, una base de arcos ciegos con 15 columnas, 6 niveles con una columnata externa y remata en un campanario. La escalera interna en espiral tiene 294 escalones.

Información obtenida de [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

Figura 3. Torre de Pisa

---

---

## 2.- Objetivo

*“Los **elementos patrimoniales**, como cualquier otro bien inherente a la actividad humana, precisan de su documentación, catálogo, medida e inventario, para que puedan ser, entre otras cosas identificados, individualizados, **gestionados**, reproducidos, investigados y **difundidos**”*

*José Manuel Valle Melón. Tesis Doctoral. Documentación Geométrica del Patrimonio: Propuesta conceptual y metodológica. Logroño, junio de 2007. página 3.*

El objetivo fundamental de este proyecto es desarrollar una metodología de trabajo extrapolable al control de las deformaciones de otros edificios históricos o cualquier otro elemento patrimonial. Se utilizará como base el análisis de los trabajos realizados durante el periodo comprendido entre Julio de 2007 y Enero de 2009 en la Iglesia de Nuestra Señora de La Blanca de Agoncillo (La Rioja).

Para ello, se analizarán en profundidad una serie de factores que determinan los resultados finales y sus características, con el fin de obtener

unas pautas, mediante las cuales, cualquier estudio de deformaciones en elementos patrimoniales que sea necesario realizar, tenga una referencia para plantear y definir el proyecto tanto en las precisiones que se necesitan alcanzar como en tiempo, coste y tipología de la red (puntos de control, puntos de referencia y estaciones de control).

Para la consecución del objetivo planteado se analizarán los tres conjuntos de variables en los que se centra la metodología empleada:

**Instrumentación:** hace referencia al estudio de la instrumentación que se decide utilizar para realizar las observaciones. (geodésica o topográfica)

**Señalización:** hace referencia tanto al tipo (materiales, forma, tamaño...) de señalización como a la disposición de las mismas sobre el conjunto arquitectónico.

**Observaciones:** referente a la metodología de observación, observables y configuración de la red.

Debido a que el proyecto se va a centrar en el análisis del estudio realizado por el LDGP en el conjunto arquitectónico de la Iglesia de Nuestra Señora de La Blanca, voy a exponer las características del mismo de forma sucinta con el fin de aportar una primera idea de las acciones que se van a analizar, es decir, el punto de partida de la optimización:

**Instrumentación:** Se ha utilizado una estación total Leica 1205, de precisión angular de 5 segundos centesimales (instrumentación topográfica convencional).

**Señalización:** Se opta por una doble señalización, compuesta por:

- Placas de puntería de acero inoxidable de 100 x 70 mm con el número de señal troquelado y una pegatina adherida con la información referente al proyecto. El punto de observación se materializa mediante un agujero de 1 mm de diámetro en el centro realizado por mecanizado láser.
- Clavos de acero inoxidable cuya cabeza de 5 mm de diámetro tiene grabada una cruz sobre la que se puede hacer puntería precisa, estos clavos se han situado próximos a las placas.

En total se implanta una red de señales de referencia constituida por 58 señales, distribuidas tanto por el edificio (a distintos niveles, suelo, 7, 14 y 21 de metros de altura) como por los edificios aledaños.

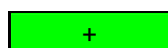
Como puntos de observación, se utiliza un equipo de centrado forzoso compuesto por cuatro trípodes que se sitúan en campo, estos trípodes van equipados de una plataforma nivelante que puede alojar, tanto a la estación total desde la que se realizan las observaciones, como un prisma que permite observarlos como dianas.

**Observaciones:** Las observaciones se ejecutan por el conocido método de observación geodésica de pares a la referencia con una secuencia  $CD_{referencia}-CD_{diana}-CI_{diana}-CI_{referencia}$  (CD = círculo directo, CI = círculo inverso), utilizando

tres referencias distintas por punto para aportar suficiente redundancia. La configuración se ha diseñado para que cada diana sea observada como mínimo desde tres estaciones siendo el máximo de seis.

El análisis de este estudio se va a centrar en distintos factores que a mi parecer son los importantes (por diversas razones que serán justificadas y descritas más adelante) y definen las características del estudio. A continuación se plantea una tabla en la cual se pueden observar los factores (precisión, fiabilidad, coste, tiempo y complejidad), los distintos análisis que se van a realizar (propuestas) y los efectos teóricos que se esperan sobre los factores de la realización de las distintas propuestas.

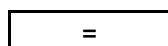
Propuesta		Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Instrumentación	Instrumentación geodésica	+	=	-	=	=
	Pilares de observación	+	+	-	=	=
Señalización	Pasar de placas a clavos	=	=	+	=	=
	Pasar de placas a prismas	+	=	-	=	=
	Eliminar nº de lecturas a referencia	=	=	+	+	-
Observaciones	Eliminar puntos de observación	=	=	+	+	=
	Eliminar series	-	=	+	+	=
	Medida de distancias	+	+	-	-	-



Beneficio



Perjuicio



Sin efecto

Figura 4. Tabla de factores a analizar y propuestas para la optimización.

Durante este punto no me centraré en la explicación ni justificación de esta tabla, antes de ello es necesario hacer un acercamiento a los términos usados dentro de un estudio de deformaciones con el fin de familiarizarnos y poder comprender lo que significa un proyecto de estas características.

Más adelante, en el punto tercero, trataré de forma general lo que supone una auscultación en edificios, centrándome posteriormente en distintos aspectos más concretos, hablando de lo que es auscultar y de lo que supone enfrentarse a este tipo de trabajos, citando y explicando los distintos modelos matemáticos de ajuste de observaciones, tratando las metodologías e instrumentación que se pueden utilizar mediante el análisis de distintos ejemplos reales.

Una vez introducidos en el contexto de los hechos, procederé al análisis de las distintas partes del proyecto realizado en Agoncillo, describiendo en primer

lugar, los factores que se han tenido en cuenta a la hora de la optimización, desarrollando cada una de las pruebas a las que se somete tal proyecto y realizando una justificación teórica de los factores de la figura 4 y por consiguiente de lo que se pretende analizar con cada una de las propuestas.

Con todos los datos extraídos de los análisis anteriores, se confeccionará una recapitulación de resultados, presentando para cada caso los datos de la forma más representativa, ya sean tablas, gráficas, dibujos o un conjunto de ellos, en el punto cinco.

Como finalización del proyecto, en el último punto se procederá a la extracción de conclusiones y generación de recomendaciones, es decir, convertir los datos obtenidos del análisis en conclusiones tangibles que debe tener cualquier profesional que se plantee la realización de un proyecto de auscultación utilizando estos medios.



Iglesia de Suurhusen en Alemania: Es la torre más inclinada del mundo actualmente y reconocida en el libro Guinness, con una inclinación de 5,19 grados sexagesimales, aventaja a la famosa torre de Pisa.

Figura 5. Iglesia de Suurhusen.

---

---

### 3.- Auscultación de estructuras

*“Auscultar no es colocar una serie de aparatos. Ni siquiera es observar y/o medir. Es un proceso (con las investigaciones y reconocimientos adicionales a que haya lugar) que debe ayudar a interpretar el comportamiento de la presa y permitir evaluar si es éste razonable o no. En definitiva, debe facilitar al ingeniero la realización de un **diagnóstico**, sobre la existencia de alguna **patología** (que no haya sido salvaguardada por la acción preventiva del proyecto y de la construcción).”*

*Dr. Francisco Javier Sánchez Caro. Tesis doctoral. Seguridad de presas: Aportación al análisis y control de deformaciones como elemento de prevención de patologías de origen geotécnico. Página 59.*

### **3.1.-Auscultación**

Efectivamente el proyecto de auscultación está formado por una serie de pasos que se deben tener en cuenta antes, durante y después de la ejecución del estudio. Cuando se requiere la puesta en ejecución de este trabajo, los responsables se plantean siempre las mismas cuestiones, o al menos deberían tener presente las respuestas a preguntas como: “ ¿Para qué medir?, ¿Qué debo medir?, ¿Cómo medir?, ¿Con qué precisión?, ¿Durante cuánto tiempo se debe medir?, ¿Con qué frecuencia se realizará la toma de medidas?, ¿Cuánto va a costar?, ¿Qué medios necesito?, ¿Qué hacer con las medidas?, ¿Cómo proteger los datos del paso del tiempo?, ¿Cómo difundir los resultados?, es esencial para la buena realización de un proyecto de estas características o extrapolando, para cualquier otro tipo de proyecto.”<sup>2</sup>

Por tanto auscultar, es un proceso o un conjunto de acciones que se realizan con el fin de discernir, si el movimiento es considerado normal o anormal (es decir, si entraña un peligro de estabilidad para la estructura), dado por supuesto que todas las construcciones erigidas por el hombre no son totalmente estáticas (esto se abordará posteriormente),. Ayuda a la detección de **patologías**, es decir, como el Dr. Francisco Javier Sánchez Caro cita aludiendo a términos médicos: “*responder a la pregunta de si está o no enfermo el paciente*”. Estas patologías pueden, verse a simple vista en la mayoría de las ocasiones (grietas, deformaciones estructurales, inclinación de fachadas...) o no, dependiendo del alcance producido por esos movimientos sobre la estructura. Y permite el diagnóstico, es decir, establecer las posibles causas, el origen y la localización de las patologías, con el fin de poner remedio a las mismas para evitar el colapso de la estructura, y el peligro que conlleva para los habitantes que conviven en su entorno, en definitiva, para evitar riesgos.



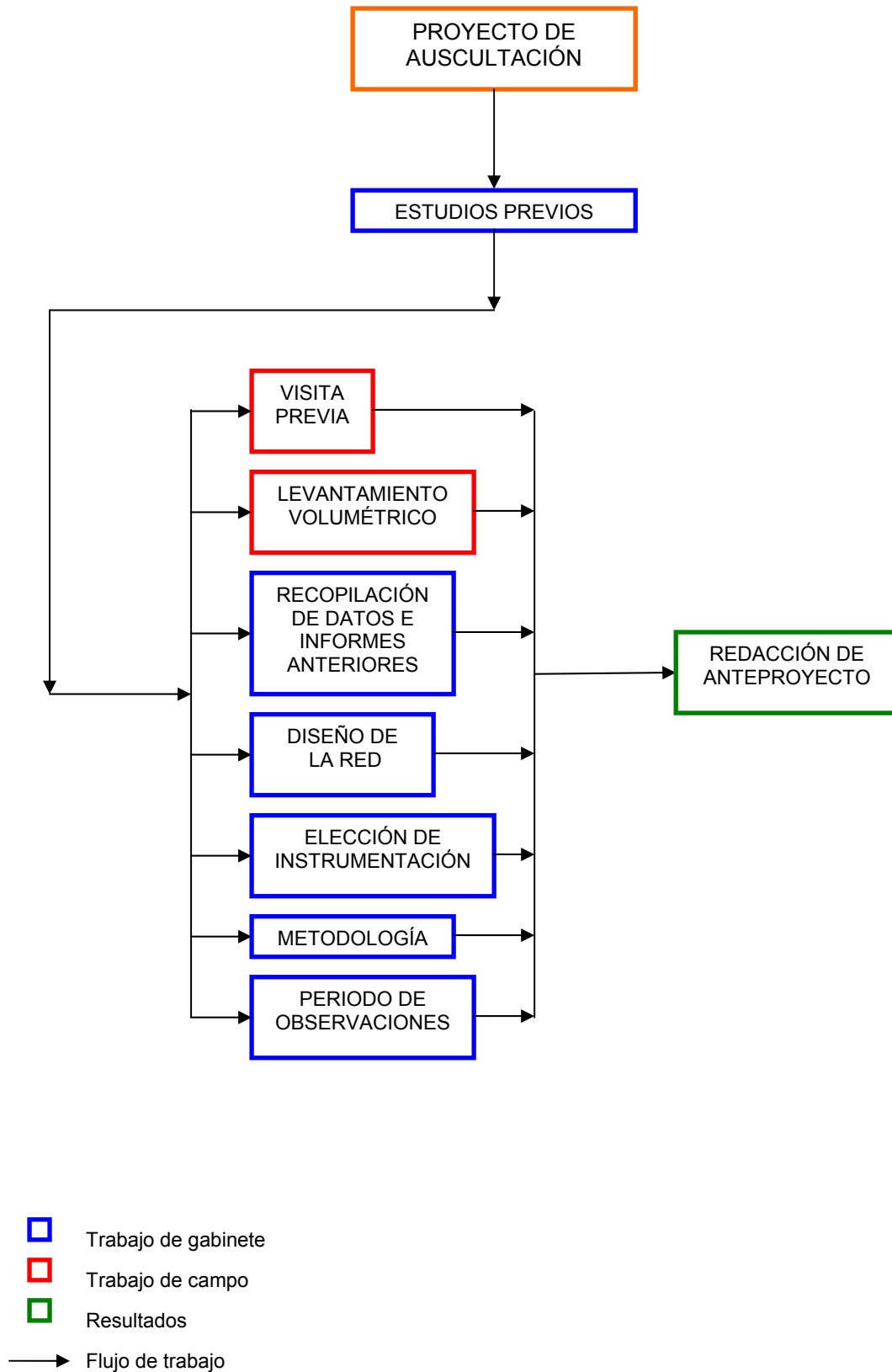
**Auscultar**, del latín *auscultare*, significa “*escuchar con atención*” y proviene de la raíz *aus, auris* que significa oído.

Figura 6. Fachada de la Iglesia de Nuestra Señora de La Blanca (Agoncillo) Auscultar.

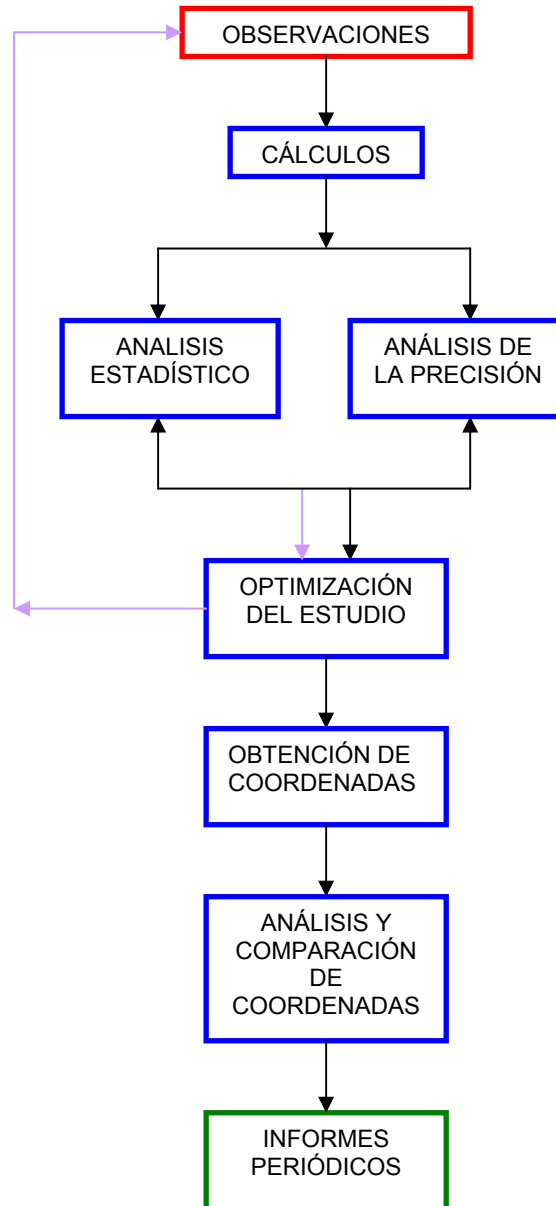
---

<sup>2</sup> José Manuel Valle Melón. Tesis Doctoral. Documentación Geométrica del Patrimonio: Propuesta conceptual y metodológica. Logroño, Junio de 2007

Organigrama de un proyecto de auscultación:



### Optimización de un proyecto de auscultación:



- Trabajo de gabinete
- Trabajo de campo
- Resultados
- Flujo de trabajo
- Proceso iterativo de optimización





Torre de la Iglesia de San Pedro de los Francos en Calatayud. Al encontrar esta torre inclinada y restaurada en la red, se envió un correo electrónico al Concejal de Cultura del Ayuntamiento, con el fin de pedir información acerca del proyecto que se había realizado, remitiéndonos al estudio de arquitectura que lo había llevado a cabo. En cierta medida, este hecho es preocupante porque estas deformaciones deben ser gestionadas y conocidas directamente por las administraciones, no por empresas privadas.

Figura 9. Iglesia de San Pedro de los Francos, Calatayud.

---

---

### **3.1.1.- ¿Qué medir?**

Los edificios son estructuras dinámicas que están sujetas a una serie de movimientos de carácter periódico, por lo tanto, el objetivo no puede consistir únicamente en detectar movimientos sino en poder interpretarlos como acordes o anómalos dentro de estos periodos naturales (Taliercio y Binda, 2007)]. Por otro lado, la existencia de patologías en edificios históricos no significa que exista un riesgo de colapso inminente, ya que a priori se desconoce si las patologías visibles corresponden a procesos antiguos que ya se han estabilizado o están causados por fuerzas que actualmente están afectando al edificio y, por lo tanto, se encuentran en avance progresivo (Carpinteri y otros, 2004).

Según M.C. Baker, los factores que causan deformaciones pueden clasificarse en:

- 1- Cargas aplicadas que producen deformaciones de dos tipos, elásticas e inelásticas, teniendo en cuenta si se recupera la posición inicial o no. (viento, terremotos, asentamientos del terreno...)
- 2- Cambios de temperatura, que producen expansión o contracción de los materiales que conforman la estructura.
- 3- Cambios en la humedad del ambiente que producen hinchazón o contracción en los materiales.
- 4- Acciones químicas producidas por la humedad y agentes contaminantes que pueden cambiar el volumen.

Una de estas causas o la combinación de varias de ellas producen movimientos en el edificio.

Conociendo estas causas, se puede realizar una clasificación de los movimientos que pueden afectar al conjunto:

- 1- **Movimientos puntuales**, producidos por desastres naturales, como terremoto, que pueden llevar al colapso de la estructura o por el contrario pueden producir el acomodamiento del edificio a la nueva situación.
- 2- **Movimientos cíclicos**, producidos por los cambios de temperatura y humedad del ambiente, dan lugar a deformaciones elásticas recuperándose la posición inicial al completar el ciclo.
- 3- **Movimientos de tendencia progresiva**, debidos a problemas estructurales o combinación de factores que se van acumulando a lo largo del tiempo y son los causantes de la inestabilidad de la construcción, como el efecto de fatiga con el paso del tiempo. Este tipo de movimientos, entraña el concepto de **velocidad** de desplazamiento. Este concepto, es fundamental a la hora de diagnosticar la evolución de la estructura.

Los movimientos puntuales, por definición suelen ser impredecibles (no se puede predecir cuando va a suceder un terremoto ni dónde) y de magnitud variable. A no ser que se trate de zonas específicas en las cuales se registran frecuentemente fenómenos de este tipo, pero en general no tiene sentido intentar detectarlos y menos en el proyecto que estamos tratando.

Los movimientos cíclicos, al recuperarse, entran dentro de la dinámica natural de la estructura, sin embargo, sí que es interesante conocer su magnitud con el fin de poder diferenciarlos de los movimientos anómalos. Aunque los manuales y reglamentos proporcionan tablas de deformación relativas a la variación térmica y de humedad para los diferentes materiales, no es fácil disponer de datos fiables para estos efectos cíclicos ya que dependen, en gran medida, de las características constructivas del edificio y de su emplazamiento.

Como ejemplo de movimiento cíclico se presenta la siguiente gráfica (figura 10) (Azkarate y otros, 2001) que muestra el comportamiento temporal de una grieta en un muro de sillería, controlada mediante extensómetro, en ella se aprecia que el movimiento se compone de un conjunto de efectos cíclicos de diferentes periodos (diario día/noche, estacional verano/invierno, etc.). En la gráfica se observa que estos movimientos se recuperan completamente y, por lo tanto, se puede pensar en una situación de estabilidad. El rango de movimiento que presenta es de orden submilimétrico.

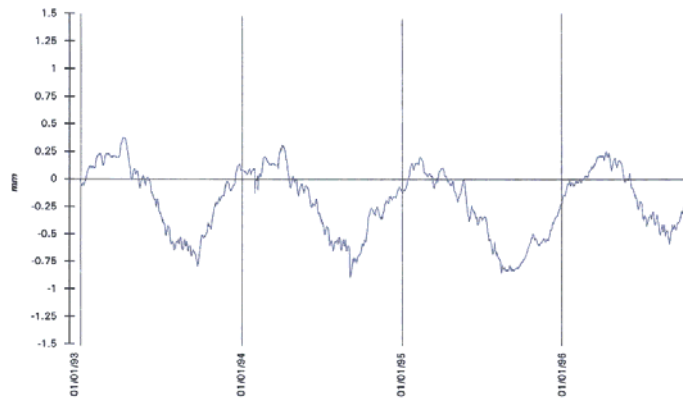


Figura 10. Gráfica que representa el control de deformaciones de una grieta, controlada mediante el empleo de un extensómetro.

En otros estudios, como los realizados por Gheorghe M.T. Radulescu, sobre la incidencia de los rayos solares sobre una torre de acero de 350 m de altura, la magnitud de los valores para el movimiento cíclico es mayor, alcanzando valores hasta 28 cm diarios.

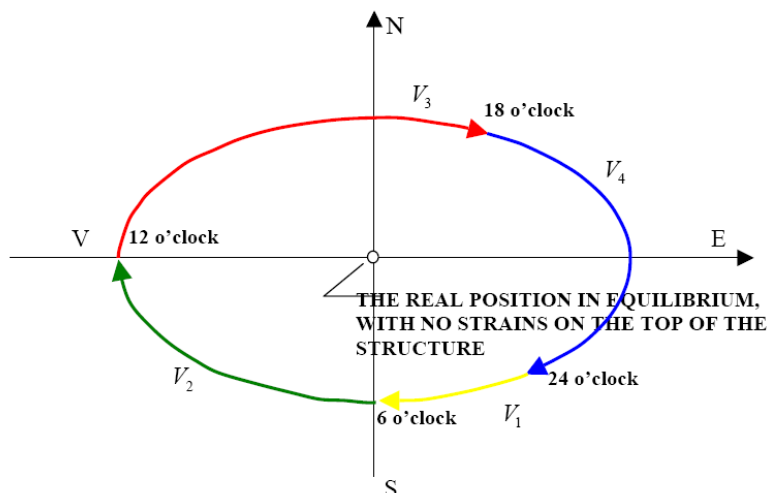


Figura 11. Gráfico que representa las deformaciones sufridas por una torre a lo largo de un día, debido a la influencia de la temperatura producida por la incidencia de los rayos solares.

Como se puede extraer de los ejemplos citados, el rango de magnitudes de estos movimientos son variables, en función de las características estructurales y de los materiales utilizados en la construcción. Sin embargo estos movimientos cíclicos no representan inestabilidad de la estructura, puesto que como se aprecia en las gráficas, el elemento a estudio recupera la posición inicial pasado un periodo de tiempo.

Por el contrario, en esta otra gráfica, (Azkarate y otros, 2001), además del efecto cíclico, se puede observar una tendencia progresiva, suceso que ocasiona una falta de coincidencia entre la posición inicial y final durante un periodo, hablando por tanto de inestabilidad.

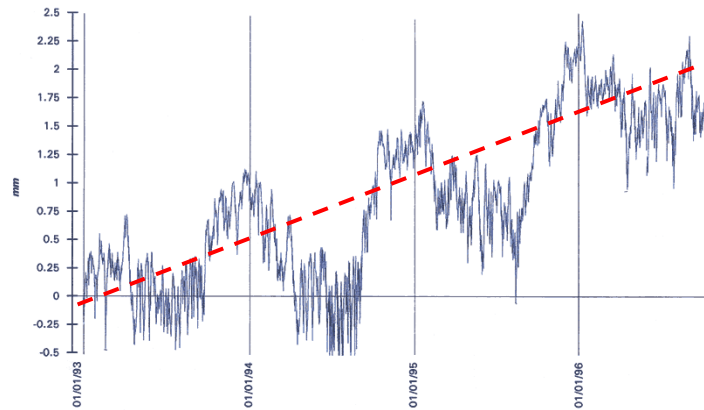


Figura 12. Gráfica que representa el control de deformaciones de una grieta mediante extensómetro, en la cual se encuentra representada por una línea a trazos de color rojo la tendencia del movimiento.

Son estos movimientos de tendencia progresiva los que interesa detectar, puesto que son los causantes de la inestabilidad del edificio.



La torre Garisenda y la torre Asinelli son dos torres construidas en la ciudad de Bolonia, la primera, Garisenda, presenta una inclinación de 4,5 grados centesimales; la segunda, Asinelli, se inclina 0,5 grados centesimales. Asinelli, la más alta, tiene una altura de 97,6m. En el momento de su construcción no superaba los 60m, siendo ampliada posteriormente. En el siglo XIV pasó a ser propiedad de la ciudad, siendo destinada sucesivamente como fortaleza y prisión. Por su parte Garisenda mide 48m. En el momento de su construcción medía 60m, pero en el siglo XIV fue recortada a causa de que el terreno donde había sido construida estaba cediendo. La torre Garisenda es famosa por haber sido citada por Dante varias veces, tanto en la Divina Comedia, como en sus Rimas. Los nombres de Asinelli y Garisenda, provienen de las familias a las que tradicionalmente se les atribuyó la construcción de las mismas. Sin embargo no hay una constatación fidedigna. Por ejemplo, el nombre de Asinelli fue citado por primera vez en relación a la torre homónima en 1185, casi sesenta años después de su construcción.

Las dos torres (Garisenda a la izquierda y Asinelli a la derecha)

Información obtenida de [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

Figura 13. Torres de Garisenda y Asinelli, en Bolonia.

### **3.1.2.- ¿Para qué medir?**

En primer lugar cabe resaltar que la realización de estos proyectos, aparte de la importancia que tiene para la conservación del elemento patrimonial, aboga por la seguridad de las personas que hacen uso de ellas o cuya residencia se encuentra en las cercanías del edificio, a priori no se sabe si existe un movimiento de tendencia, y en caso de su detección tampoco se puede asegurar que conlleve un riesgo de colapso inminente (en el anexo 1 noticias relacionadas, se incluyen artículos que ilustran estas afirmaciones).

Cualquiera que pregunte a las personas que conviven en el entorno del elemento patrimonial, obtendrá distintas respuestas, algunas dirán que estaba así hace mucho tiempo y no se mueve, otros que han aparecido de repente, algunos dirán que en los años anteriores esas patologías se han ido incrementando... Lo que tenemos, es una percepción subjetiva sobre la evolución del edificio.

Como se ha comentado en el punto anterior, los movimientos que realmente importa detectar son aquellos de tendencia progresiva, para ello se utilizarán técnicas que permitan controlarlos, y se desarrollará una colección de datos.

El proyecto de auscultación, aporta como resultado esto mismo, una colección de datos tangibles, que resuelven dos cuestiones fundamentales, por una parte permite pasar de una percepción subjetiva del problema a una percepción objetiva y por otra da respuesta al interrogante fundamental ¿existe tendencia?, y a otras que se derivan de una respuesta afirmativa como ¿cuánto?, ¿en qué dirección y sentido?

Como conclusión se puede extraer que **el fin último de la medida es pasar de una percepción subjetiva a una objetiva del problema, con el fin de aportar datos que permitan aclarar con seguridad si la estructura presenta peligro de colapso y formar la base para posibles actuaciones.**

### **3.1.3.- ¿Cómo medir?**

Como se ha dicho anteriormente, el fin de la medida es la detección de movimiento (cíclicos o de tendencia progresiva). Para alcanzar este fin existen multitud de metodologías e instrumentación, y se deben elegir aquellos que mejor se adapten a las necesidades del proyecto.

En una primera clasificación podríamos diferenciarlos en dos tipos:

- Geodésicos

<b>MÉTODOS GEODÉSICOS APLICADOS AL CONTROL DE DEFORMACIONES</b>	
<b>Métodos</b>	<b>Precisiones alcanzadas</b>
• Nivelación geométrica	0,1 mm en distancias cortas del orden de decenas de metros y 1 mm en largas distancias
• Medida de distancias con cinta métrica	0,1 mm en pocos metros y una relación de 2 ppm sobre centenas de metros
• Poligonación	1/30000-1/150000
• Triangulación	1/30000-1/1000000
• Medición electromagnética de distancias (EDM)	0,2 mm o 1 ppm a 5 ppm
• Nivelación trigonométrica	2mm $\sqrt{\text{km}}$
• Métodos fotogramétricos	1/5000-1/100000

Figura 14. Tablas extraídas de: Kuang (1996). *Geodetic Network Analysis and Optimal Design*.

Durante los últimos años se han desarrollado nuevos instrumentos de medida, como el sistema GPS o el Láser Escáner, que permiten realizar también el control de deformaciones, con precisión centimétrica o incluso mejores, como se ha ido demostrando en numerosos trabajos de control, en todo tipo de estructuras. Como los que se describen en el apartado 3.3 de este proyecto.

- No geodésicos

MÉTODOS NO GEODÉSICOS PARA EL CONTROL DE DEFORMACIONES		
Tipo de deformación	Métodos e instrumentos	Precisión
<b>Extensiones y esfuerzos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extensómetros tipo cinta                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Distometro ISETH</li> <li>- Invar CERN</li> <li>- Espía de Rocas</li> </ul> </li> <li>• Extensómetros tipo mira y tubo                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Extensómetro de punto</li> <li>- Extensómetro multipuntos</li> <li>- Extensómetros tipo Torpedo</li> </ul> </li> <li>• Interferómetros láser tipo Michelson                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Metro láser de esfuerzos</li> </ul> </li> <li>• Medición con calibre</li> </ul>	<p>0,05 mm 0,05 mm 0,02-0,2 mm</p> <p>0,01-0,02 mm 0,01-0,02 mm 0,1 mm</p> <p>0,0004 ppm 0,1 mm</p>
<b>Inclinaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclinómetros de precisión                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inclinómetro de mercurio de alta precisión</li> <li>- Nivel electrónico</li> <li>- Talyvel</li> </ul> </li> <li>• Nivelación hidrostática                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elwaag001</li> <li>- Sistema telenivelador Nivomatic</li> </ul> </li> <li>• Péndulos invertidos y suspendidos</li> </ul>	<p>0,0002" 0,25" 0,5"</p> <p>0,01 mm / 40 m 0,1 mm / 24 m 0,1 mm</p>
<b>Alineaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Métodos mecánicos                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alineación con cinta metálica</li> <li>- Alineación con cinta de nailon</li> </ul> </li> <li>• Alineación óptica directa</li> <li>• Alineación con rejillas de difracción láser</li> </ul>	<p>0,1 mm 0,035 mm-0,070 mm</p> <p>1-10 ppm 0,1-1 ppm</p>

Figura 15. Tablas extraídas de: Kuang (1996). *Geodetic Network Analysis and Optimal Design*.

Los datos que se incluyen en las tablas han sido extraídos directamente del texto, son datos teóricos, algunos de ellos pueden chocar con las precisiones que se pueden obtener en campo debido a que existen múltiples factores que afectan a las medidas, por lo tanto, los valores aportados en las tablas deben tomarse con precaución.

Para que los resultados obtenidos sean correctos, deben estar contrastados por medio de tests estadísticos que indiquen la calidad de la medidas realizadas y de las precisiones obtenidas, no se pueden exponer los resultados tal y como se obtienen de las medidas en campo, porque no sabemos con seguridad si son aceptables, ya que en la aplicación práctica de la auscultación hay muchos factores que afectan a las observaciones y que pueden hacer que existan fuertes discrepancias con respecto a los valores aportados por los fabricantes en condiciones de laboratorio.

Lo más importante a la hora de presentar los resultados obtenidos es aportar con ellos los errores obtenidos y el análisis estadístico de esos errores, no sirve de nada presentar unos datos que a priori parecen muy buenos y de una magnitud pequeña, si no se aportan los errores obtenidos en esas medidas que realmente indican dentro de qué magnitud de medida se encuentran los resultados obtenidos.

## **Las medidas sin análisis y control de precisiones no sirven de nada.**

### **3.1.4.- ¿Con qué precisión se debe medir?**

Varios conceptos deben ser reseñados antes de introducirnos en este punto:

**Exactitud**, hace referencia al grado de aproximación de una observación a la realidad o a un modelo predeterminado y se estima mediante la magnitud de los errores cometidos.<sup>3</sup>

**Precisión**, se define como el grado de perfección o afinamiento con que se realiza una observación o se establece un resultado; dependerá principalmente de la instrumentación utilizada, fórmulas empleadas y esmero de los observadores<sup>3</sup>.

**Discrepancia**, diferencia entre dos medidas obtenidas de una misma magnitud. Si se tienen dos series de observación de una misma magnitud y si la discrepancia entre ambas es pequeña, se puede decir a priori que no se han cometido equivocaciones<sup>3</sup>.

En el campo en el que nos movemos, la auscultación de elementos patrimoniales, la definición de precisión descrita por múltiples autores, no se adapta perfectamente, puesto que si bien es cierto que depende de los tres factores citados anteriormente (instrumentación, formulación y esmero de los observadores), también entran factores como, la metodología de observación utilizada y la geometría de la red, que a fin de cuentas son los factores con más peso dentro del término precisión.

Aparte de estas definiciones también se debe tener en cuenta que la precisión aumenta el coste de forma exponencial, por tanto la precisión con la que se debe medir debe ser solamente la necesaria y nada más, con el fin de aunar ambos factores (coste y precisión).

Los movimientos de tendencia tienen una magnitud que va aumentando conforme pasa el tiempo (concepto de velocidad antes mencionado). Para conseguir detectar estas variaciones, la precisión de las medidas obtenidas mediante la auscultación ha de ser mayor que la magnitud de los desplazamientos, lo que, de forma directa nos define el periodo entre campañas de observación.

Es importante conocer la velocidad, puesto que mediante ella, se puede llegar a conocer o realizar un modelo teórico de la deformación a lo largo del tiempo, con el fin de aportar soluciones para poner freno a dicho movimiento.

El “modelo” es un tema en el que no se entra en este proyecto, (en el ejemplo 3.4 se incide sobre ello) pero debe tenerse siempre presente, el objetivo de una auscultación es medir con el fin de poder realizar una predicción

---

<sup>3</sup> Definiciones extraídas de Chueca Pazos, M. Teoría de errores e instrumentación.



del futuro (evolución del movimiento) y para ello es necesario construir un modelo con los datos obtenidos, presentes y pasados, además de introducir en el modelo otras características físicas y morfológicas del elemento a estudio.

Al mismo tiempo, es importante comentar, que no implica el mismo riesgo de inestabilidad un movimiento de 1 mm en un año, que 1 mm en un mes, puesto que aún siendo un desplazamiento muy pequeño, entraña más riesgo de inestabilidad el que más velocidad posee.

Además, este concepto de velocidad, permite que utilizando una metodología basada en instrumentación topográfica clásica (que supuestamente va a alcanzar menores precisiones que una metodología geodésica pura), aumentando el periodo de observación a valores temporales más largos (observaciones cada cinco años por ejemplo) se pueda observar esa variación de coordenadas de los puntos de control o la tendencia que pueda existir. Es decir, para medir con la misma precisión la velocidad de desplazamiento (métodos topográficos clásicos frente a geodésicos) se requiere un plazo de tiempo mayor.

Como ejemplo, exagerando, pongamos el caso en el cual observando la misma estructura por ambas metodologías, con el método topográfico se alcanza una precisión de 1 cm, y utilizando métodos geodésicos se alcanza una precisión de 1 mm. Suponiendo que la velocidad de desplazamiento es de 3mm por año, con el segundo método se tardará en detectar esa velocidad un año, puesto que la precisión es menor que el desplazamiento, pero con el primer método, se tardarán unos siete años.

En estructuras que están continuamente sometidas a cargas y variaciones de las mismas (como las presas), estos métodos topográficos no son viables puesto que se requiere una determinación de la velocidad de desplazamiento prácticamente en el momento, pero en el marco en el que nos centramos, generalmente (salvo casos concretos) los elementos arquitectónicos no están sometidos a fuertes cargas con grandes variaciones, además de haber tenido un periodo de tiempo de asentamiento de siglos y por tanto las velocidades de desplazamiento suelen ser generalmente pequeñas, y no crean por tanto problemas de inestabilidad o riesgo de colapso inminente (siempre y cuando los estudios no se realicen llegados a un punto crítico).

Pero esta idea del factor velocidad de desplazamiento, puede ser muy útil y se puede llegar a realizar dos distinciones dentro del problema de auscultaciones:

- Si el objetivo de la auscultación es la determinación de la magnitud del movimiento en una estructura, la mejor solución será la que permita obtener valores muy precisos y pequeños en la determinación de observaciones angulares o de distancias.
- Si se reduce el problema a velocidades, entonces lo que se busca es establecer la relación entre desplazamiento y tiempo, por lo tanto se tienen dos factores con los cuales establecer distintas escalas (de precisión o de tiempo de observación), es decir, si se puede ampliar el periodo de

observación, se puede llegar a detectar pequeñas velocidades (como en el caso anterior) pero utilizando para ello instrumentos de menor precisión, teniendo observables con menor precisión.



Torre Nueva de Zaragoza (España). Se encontraba en la actual plaza de San Felipe. La Torre Nueva de Zaragoza fue el primer edificio construido en la ciudad durante el siglo XVI. De 1504 a 1512, el Concejo mandó construir una torre para albergar el reloj - construido por el leridano Jaime Ferrer - y las campanas que regulaban el pulso de la ciudad. Las campanas fueron colocadas en 1508. La torre fue realizada en ladrillo en estilo mudéjar interviniendo en la obra maestros cristianos (Gabriel Gombao y Antón Sariñena) y mudéjares (Juce Galí, Ismael Allabar y el maestro Monferriz). En 1892 el ayuntamiento decidió demoler la torre, justificando la decisión con la inclinación y la probable ruina de la obra. La decisión, calificada de caciquil, tuvo la oposición de muchos intelectuales y de parte de la población, pero los esfuerzos por salvarla fueron en vano.

Información obtenida de [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

Figura 16. Torre Nueva de Zaragoza.

### **3.1.5- ¿Durante cuánto tiempo se debe medir y con qué frecuencia?**

#### **Determinación de la tendencia:**

Como se ha comentado en el punto anterior, el periodo de tiempo de observación dependerá de la precisión alcanzada con el método utilizado y de la velocidad de desplazamiento que llegue a presentar la estructura.

Respecto al tiempo de observación se puede hacer una distinción:

- Tiempo para establecer un modelo
- Tiempo necesario para continuar el seguimiento una vez conocido el modelo

#### **Determinación de movimientos cíclicos:**

Otros factores que influyen en las edificaciones son los ambientales (la temperatura y la humedad). Ambos factores afectan a los materiales con los que está construido el elemento patrimonial, creando efectos de dilatación y contracción. Estos factores provocan el movimiento cíclico al cual están sometidas todas las construcciones. Entre los efectos cíclicos predominan dos: una variación día-noche y otra verano-invierno, correspondiente a periodos en los que se alcanzan máximos y mínimos valores para esos factores.

En cualquier caso, en los estudios topográficos, las observaciones suelen durar una jornada completa y debido a que dichas observaciones van a tratarse de forma conjunta para la obtención de las coordenadas, se deduce que cualquier efecto cíclico cuyo periodo sea menor que el correspondiente a la captura de la información (es decir, diario o inferior) no va a ser detectado independientemente de su magnitud: en el caso de que dicha magnitud sea menor que la precisión de las medidas simplemente pasará ignorado en los cálculos subsiguientes y en el caso de que sea igual o mayor se incorporará como parte de la incertidumbre de las coordenadas obtenidas en el cálculo. Con este planteamiento, el único efecto cíclico que podríamos llegar a detectar sería la variación estacional (verano / invierno) que además suele ser la más importante.

Es de gran interés tratar de determinar el comportamiento natural de la estructura debido a factores ambientales con el fin de distinguirlos de los anómalos.

Las deformaciones de la estructura debidas a cambios de temperatura y cambios de estación a lo largo de un año fluctúan entre unos valores máximos y mínimos, intercalando periodos de recuperación. En primer lugar se debe tratar de determinar estos valores máximos y mínimos de deformación natural, que corresponden generalmente en nuestras latitudes, a los meses de Julio y Enero.

Como se puede extraer de la siguiente figura, 17, en el caso de la Iglesia de Nuestra Señora de Agoncillo, esos periodos de temperatura máxima y mínima, según los valores obtenidos por Aena (Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea), corresponden a Julio y Enero.

TEMPERATURAS (°C) EN AGONCILLO				
Mes	Media del mes	Máximas diarias	Mínimas diarias	Horas de Sol
<b>Enero</b>	<b>5,8</b>	<b>9,3</b>	<b>2,2</b>	<b>109</b>
Febrero	7,3	11,5	3,1	136
Marzo	9,3	14,3	4,4	173
Abril	11,5	16,4	6,6	184
Mayo	15,1	20,7	9,5	224
Junio	18,8	25,2	12,7	263
<b>Julio</b>	<b>22,1</b>	<b>29,1</b>	<b>15,2</b>	<b>306</b>
Agosto	21,8	28,4	15,2	286
Septiembre	19,2	25,5	12,9	216
Octubre	14,4	19,6	9,3	174
Noviembre	12,5	13,2	5,1	116
Diciembre	9,1	9,8	3,0	98

Figura 17. Fuente: Instituto Nacional de Meteorología. Valores climatológicos normales en el período 1961-1990. Información correspondiente al aeropuerto, obtenida de: [www.aena.es](http://www.aena.es)

Además, se puede realizar una estimación de la magnitud de movimiento que se puede encontrar debido a los cambios térmicos. Para ello basta realizar el cálculo de la dilatación térmica del cuerpo a estudio, puesto que conocemos el material del que está construido (en el caso de Agoncillo, sillares de roca

arenisca) y podemos conocer el coeficiente de dilatación de dicho material a partir de las distintas tablas publicadas.

Para ello calcularemos la componente lineal de la dilatación mediante el siguiente algoritmo:

$$\Delta L = L1 * \alpha * (T2 - T1)$$

$\alpha$  = coeficiente de dilatación del material  
 $L1$  = longitud del elemento considerado  
 $T1$  = temperatura inicial  
 $T2$  = temperatura final  
 $\Delta L$  = variación de longitud del elemento entre dos estados de temperaturas.

Figura 18. Manual del Constructor. Dilatación térmica de sólidos.  
[http://issuu.com/sabravof/docs/manual\\_del\\_constructor\\_polpaico/281](http://issuu.com/sabravof/docs/manual_del_constructor_polpaico/281)

De una primera visita, se pueden conocer las dimensiones del edificio, mediante un levantamiento volumétrico o consultando bibliografía existente sobre las características del mismo.

Los parámetros máximos y mínimos de temperatura del entorno, los podemos obtener buscando en distintas páginas dedicadas a la meteorología, y en particular de las páginas referentes a las estaciones meteorológicas distribuidas por toda la geografía (como la obtenida en la figura 17).

En el caso de la Iglesia de Agoncillo, se realizó un levantamiento volumétrico del conjunto, obteniendo las siguientes dimensiones: 35 m de altura de torre, 5,80 m de ancho de la torre, 17,5 m de ancho en la fachada principal y 17 de altura en dicha fachada. Las temperaturas máximas y mínimas se extrajeron de la página web de la estación meteorológica del aeropuerto cercano a dicha localidad.

A si mismo, de la tablas publicadas en distintas bibliografías, se obtiene el coeficiente de dilatación térmico correspondiente a la roca arenisca, que es de 0,000011 1/°C y a la obra de albañilería labrada de 0,0000063 1/°C.

Con estos datos, obtenemos que el desplazamiento que se puede observar es de 1/10000, por tanto se tiene un rango de movimiento del edificio por causas ambientales de unos 2 mm.

### **Determinación de ciclo y tendencia:**

Por lo tanto, para determinar si existen variaciones estacionales, es necesario comprobar si se detectan diferencias entre las coordenadas medidas en las campañas de verano e invierno, adicionalmente se pueden realizar observaciones en meses intermedios (octubre y abril) para ver la transición entre estos valores extremos. Por otro lado, para comprobar si existen variaciones no estacionales que vamos a considerar como debidas a la tendencia, se deberán contrastar las coordenadas obtenidas en el mismo mes en años diferentes. Conformando un periodo de observaciones de al menos un

año (para establecer el ciclo anual) y de dos años para tener una comprobación de dicho comportamiento.

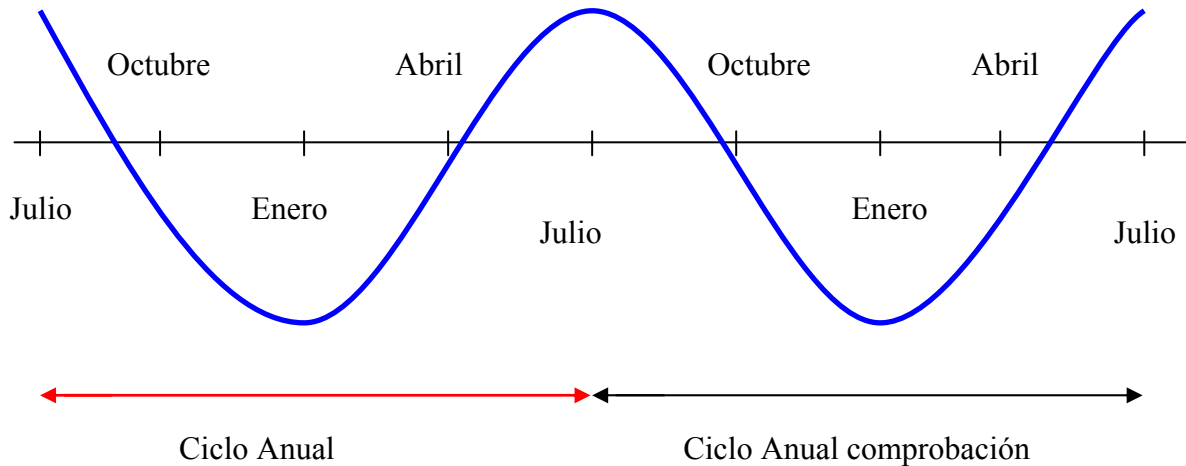


Figura 19. Gráfica que representa el ciclo de deformaciones de la estructura a lo largo de dos años.

### **3.1.6- ¿Qué hacer con las medidas?**

“Existe un ‘chascarrillo ingenieril’ bastante difundido, que afirma que una infraestructura es segura siempre que se caiga después de que el ingeniero responsable se haya jubilado. Esto que, evidentemente, es una broma, plantea una idea que es, sin embargo, muy importante: la seguridad es un concepto que suele estar ligado a la escala temporal humana. Esto puede plantear problemas cuando se aplica a infraestructuras (como las presas) con una ‘vida útil’ que excede la duración de la vida humana” (Sánchez Caro, Francisco Javier 2007)

La mayoría de las estructuras que están catalogadas como patrimonio, han tenido una vida útil que ha excedido con creces a la generación que las construyó y muchas más.

Además, se debe tener en cuenta que esa larga vida, en este tipo de estructuras, también va afectando a su estabilidad, puesto que se ha demostrado que existe un efecto de fatiga que afecta a todas ellas a lo largo del transcurrir de los años. Esta fatiga es acumulativa, pero sus efectos pueden no ser visibles hasta transcurridos decenios o siglos.

Se debe pensar por tanto, que una vez que el responsable o responsables del control de la estructura se jubilen, otra persona tomará su relevo. Para que ese relevo no presente ningún inconveniente, ni para la persona ni para la seguridad de la estructura, es necesario que exista una buena documentación tanto de la metodología utilizada anteriormente para el control, como de los datos obtenidos, su tratamiento para el análisis y los programas utilizados. De esta forma, una vez realizado el traspaso de control, no se parte de cero, sino que se tienen unas bases para poder seguir utilizando la misma metodología de trabajo y contrastar nuevas medidas con las anteriores

o, por otro lado, cambiar la metodología de control conociendo perfectamente las características del proyecto anterior para poder aprovechar todos los datos de los que se dispone.

Para esto, es recomendable seguir unos criterios de organización y estandarización de los resultados del proyecto que posibiliten la accesibilidad (que se pueda llegar a ellos en cualquier momento), la comprensibilidad (para que una vez que se haya accedido a ellos, sea posible conocer las características del proyecto que los originaron y los productos que se obtuvieron) y el conocimiento de sus características (lo que permitirá su explotación).

La ausencia, desconocimiento o falta de uso de legislaciones, reglamentos técnicos, e incluso de recomendaciones científicas al respecto obliga a los técnicos el desarrollo de sus propios criterios de estandarización y organización. Es importante que aquellos estándares que se utilicen sean públicos y de estructura y funcionalidad conocida.

En éste y cualquier proyecto que se ejecute, se obtienen una serie de resultados, que se pueden dividir en tres grupos; registros (almacenamiento de alguna de las características geométricas del elemento, en nuestro caso, las observaciones de campo), representaciones (formadas por todo tipo de imágenes en las que quedan reflejadas las relaciones entre magnitudes, en el proyecto que nos ocupa serán las gráficas de movimiento, elipses de error, tablas...) y presentaciones (tanto las memorias como los programas multimedia en los que se hagan accesibles los resultados).

### **3.2.- Modelos matemáticos**

A continuación se procede a realizar una breve exposición de los métodos matemáticos utilizados para el cálculo y compensación de las observaciones de campo obtenidas en cada campaña. Solamente me centraré en métodos y ecuaciones utilizados, para ampliar información, si se desea, en el apartado dedicado a bibliografía dejo referencia a los libros consultados.

#### **3.2.1.- Modelo matemático de Gauss-Markov**

El modelo matemático empleado ha sido el modelo de Gauss-Markov (GMM), que es un modelo formado por relaciones funcionales y estocásticas entre una serie de observaciones y parámetros. Se va considerar el desarrollo matemático bajo la condición de la existencia de datum mínimo, es decir, se conocen las coordenadas de un punto en el sistema de referencia empleado, un acimut y una distancia que da escala a la red, o lo que es lo mismo, las coordenadas en el sistema de referencia de dos puntos de la red se mantienen fijas para todo el proceso de cálculo.

### **3.2.2.- Método de ecuaciones de observación. Ajuste de observaciones indirectas.**

Es el modelo que aparece en geodesia con más frecuencia y será el utilizado para la resolución de la red geodésica. Se dispone de más ecuaciones que incógnitas y se conoce como el modelo GMM regular. La formulación simplemente está tomada de

• **Modelo funcional.**

$$L = F(x)$$

Vector de parámetros incógnita de dimensión  $nx1$

$$x = X - X_0$$

$X_0 \rightarrow$  Vector de valores iniciales de los parámetros de dimensión  $nx1$

$X \rightarrow$  Vector de parámetros ajustados de dimensión  $nx1$

$L \rightarrow$  Vector de valores ajustados de las observaciones de dimensiones  $mx1$

$L_0 \rightarrow$  Vector de observaciones calculadas con los valores aproximados de los parámetros de dimensión  $mx1$

$$L_0 = F(X_0)$$

$l \rightarrow$  Vector de observaciones reales de dimensión  $mx1$

$t \rightarrow$  Vector de términos independientes de dimensión  $mx1$

$$t = l - L_0$$

$v \rightarrow$  Vector de errores residuales de dimensiones  $mx1$

$m \rightarrow$  N° de observaciones (ecuaciones de observación)

$n \rightarrow$  N° de parámetros independientes (incógnitas) /  $m > n$

$r = m - n \rightarrow$  N° de ecuaciones redundantes o grados de libertad del ajuste

$P \rightarrow$  Matriz de pesos de las observaciones, simétrica y definida positiva de dimensión  $mxm$ . y rango  $m$

$Q \rightarrow$  Matriz cofactor a priori de las observaciones, de dimensión  $mxm$  y rango  $m$

$\sigma_0^2 \rightarrow$  Varianza a priori de la unidad de peso

$\Sigma \rightarrow$  Matriz de varianza-covarianza a priori de las observaciones, de dimensión  $mxm$  y rango  $m$

$$\Sigma = \sigma_0^2 Q = \sigma_0^2 P^{-1}$$

$A \rightarrow$  Matriz de diseño de dimensión  $mxn$  y rango  $n$

$$A = \left. \frac{\delta F}{\delta X} \right|_{X=X_0}$$

El símbolo “ $\wedge$ ” designa las cantidades estimadas.

• **Ecuaciones de observación. Linealización.**

El modelo funcional se linealiza aplicando el desarrollo en serie de Taylor hasta el primer orden, quedando lo siguiente:

$$L = F(X_0) + \left. \frac{\delta F(X')}{\delta X'} \right|_{X=X_0} (X - x_0)$$

$$L = L_0 + Ax$$

$$Ax + L_0 - l = v$$

$$Ax - t = v$$

Siendo este un sistema de m ecuaciones con n incógnitas, con  $m > n$ , denominado *sistema de ecuaciones de observación*.

• **Modelo estocástico.**

Sea  $\Sigma_{ll} = \Sigma$  la matriz de varianza-covarianza a priori de las observaciones l, como  $L_0$  es un vector de constantes, la ley de propagación de las covarianzas aplicada a la ecuación  $t = l - L_0$  nos permite escribir:

$$\Sigma_{tt} = \Sigma = \sigma_0^2 P^{-1}$$

El modelo estocástico viene definido por:

$$E\{t\} = Ax \Rightarrow E\{v\} = 0 \quad E\{vv^T\} = E\{[t - E(t)][t - E(t)]^T\} = \Sigma = \sigma_0^2 P^{-1}$$

• **Ecuaciones normales. Condición de mínimos cuadrados.**

Los parámetros x se determinan bajo la condición de mínimo en el espacio de las observaciones.

$$T(v) = v^T P v = \text{mín}$$

$$T(x) = x^T A^T P A x - 2t^T P A x + t^T P t$$

Igualando las derivadas parciales de  $T(x)$  a cero obtenemos la condición de mínimo:

$$\frac{\delta T(x)}{\delta x} = 2\hat{x}^T A^T P A - 2t^T P A = 0$$



Operando:

$$A^T P A \hat{x} - A^T P t = 0$$

$$N = A^T P A$$

$$d = A^T P t$$

Resultando el sistema de *ecuaciones normales*, con  $\dim(N) = (n \times n)$  y  $\dim(t) = (n \times 1)$ .

$$N \hat{x} - d = 0$$

• **Valores estimados.**

Si la matriz  $A$  no es deficiente de rango y la matriz  $P$  es definida positiva el vector de parámetros solución es:

$$\hat{x} = N^{-1} d = (A^T P A)^{-1} A^T P t$$

Los parámetros estimados  $\hat{x}$  son una estimación lineal.

Los valores estimados de los parámetros serán:

$$\hat{X} = X_0 + \hat{x}$$

Los valores estimados de los residuos son:

$$\hat{v} = A \hat{x} - t = A N^{-1} A^T P t - t$$

Los valores estimados de las observaciones:

$$\hat{L} = l + \hat{v} = L_0 + t + A \hat{x} - t = L_0 + A \hat{x} = L_0 + A N^{-1} A^T P t$$

• **Estimación de la precisión a posteriori.**

El conocimiento de las matrices varianza-covarianza a posteriori es básico a la hora de hacer un análisis estadístico de los resultados del ajuste.

La varianza del ajuste a posteriori vendrá dada por la expresión:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{v}^T P \hat{v}}{m - n}$$

• **Matrices cofactor y covarianzas.**

El modelo estocástico define a priori las matrices cofactor y varianza-covarianza de las observaciones y las constantes:

$$Q_{ll} = Q = P^{-1} \text{ y } \Sigma_{ll} = \sigma_0^2 Q_{ll} = \sigma_0^2 P^{-1}$$

$$Q_{tt} = Q = P^{-1} \text{ y } \Sigma_{tt} = \sigma_0^2 Q_{tt} = \sigma_0^2 P^{-1}$$

Aplicando la ley de propagación de las varianzas se obtienen las matrices cofactor de los parámetros ajustados  $\hat{x}$ , los residuos  $\hat{v}$  y las observaciones ajustadas  $\hat{L}$ .

$$Q_{\hat{x}\hat{x}} = N^{-1} A^T P Q_{ll} P A N^{-1} = N^{-1}$$

$$Q_{\hat{v}\hat{v}} = P^{-1} - A N^{-1} A^T$$

$$Q_{\hat{L}\hat{L}} = A Q_{\hat{x}\hat{x}} A^T = A N^{-1} A^T = Q_{ll} - Q_{\hat{v}\hat{v}}$$

Las matrices de varianza-covarianza son:

$$\Sigma_{\hat{x}\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 N^{-1}$$

$$\Sigma_{\hat{v}\hat{v}} = \hat{\sigma}_0^2 (P^{-1} - A N^{-1} A^T)$$

$$\Sigma_{\hat{L}\hat{L}} = \Sigma_{ll} - \Sigma_{\hat{v}\hat{v}}$$

### Ecuaciones de observación empleadas en la metodología de geodesia clásica

Los observables utilizados en la metodología geodésica han sido ángulos horizontales. A continuación se desarrolla el proceso de obtención de las ecuaciones lineales de observación para cada observable, valga la redundancia, a partir de las ecuaciones de observación no lineales.

#### Ecuaciones de observación para ángulos horizontales.

Un ángulo horizontal queda definido por la diferencia de dos acimutes (Fig. 4.1.).

$$\omega_{ijk} = \alpha_{ik} - \alpha_{ij}$$

$$\omega_{ijk} = \omega(X_i, Y_i, X_j, Y_j, X_k, Y_k)$$

Siendo X e Y coordenadas planimétricas del punto estación y de los puntos visados en un determinado sistema de referencia cartesiano y con sentido de giro dextrógiro:

$$\omega_{ijk}^c = \omega(X_i^0, Y_i^0, X_j^0, Y_j^0, X_k^0, Y_k^0) + d\omega$$

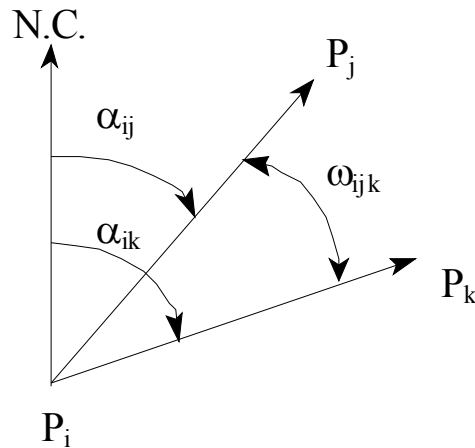


Figura 20. Ángulo horizontal.

Donde las  $X^0$  e  $Y^0$  son los valores aproximados de las coordenadas, calculados con los valores de las observaciones medidas en campo, y  $d\omega$  es la corrección a aplicar al valor de  $\omega$  calculado con valores aproximados para obtener el valor calculado  $\omega^c$ . Por lo tanto tendremos:

$$\omega_{ijk} = \omega_{ijk}^{(0)} + d\omega$$

$\omega_{ijk}^{(0)} \rightarrow$  Valor calculado con coordenadas aproximadas.

$d\omega \rightarrow$  Correcciones a aplicar al acimut.

$$d\omega = \frac{\partial \omega}{\partial X_i} \delta X_i + \frac{\partial \omega}{\partial Y_i} \delta Y_i + \frac{\partial \omega}{\partial X_j} \delta X_j + \frac{\partial \omega}{\partial Y_j} \delta Y_j + \frac{\partial \omega}{\partial X_k} \delta X_k + \frac{\partial \omega}{\partial Y_k} \delta Y_k$$

Pero se ha dicho anteriormente que el ángulo horizontal entre dos puntos visados se puede definir como la diferencia de dos acimutes.

$$\omega_{ijk} = \alpha_{ik}(X_i, Y_i, X_k, Y_k) - \alpha_{ij}(X_i, Y_i, X_j, Y_j)$$

Entonces:

$$d\omega = \left( \frac{\partial \alpha_{ik}}{\partial X_i} - \frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial X_i} \right) \delta X_i + \left( \frac{\partial \alpha_{ik}}{\partial Y_i} - \frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial Y_i} \right) \delta Y_i + \frac{\partial \alpha_{ik}}{\partial X_k} \delta X_k + \frac{\partial \alpha_{ik}}{\partial Y_k} \delta Y_k - \frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial X_j} \delta X_j - \frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial Y_j} \delta Y_j$$

De este modo eliminamos la incógnita correspondiente al centrado del aparato, es decir, la desorientación en el punto estación.

El acimut entre dos puntos en un sistema de referencia plano viene dado por la siguiente expresión:

$$\alpha_{ij} = \arctan \frac{X_j - X_i}{Y_j - Y_i} + c$$

Las derivadas parciales de esta expresión con respecto a cada componente son las siguientes:

$$\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial X_i} = \frac{Y_j^0 - Y_i^0}{D_{ij}^{02}} = a_1$$

$$\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial Y_i} = \frac{X_i^0 - X_j^0}{D_{ij}^{02}} = a_2$$

$$\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial X_j} = \frac{-Y_i^0 - Y_j^0}{D_{ij}^{02}} = a_3$$

$$\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial Y_j} = \frac{-X_j^0 - X_i^0}{D_{ij}^{02}} = a_4$$

Siendo  $D_{ij}^0 \rightarrow$  Distancia reducida entre ambos puntos.

Entonces para el caso de ángulos la corrección a aplicar quedaría del siguiente modo:

$$d\omega = \underbrace{(a_1^k - a_1^j)}_{b_1} \delta X_i + \underbrace{(a_2^k - a_2^j)}_{b_2} \delta Y_i + a_3^k \delta X_k + a_4^k \delta Y_k - a_3^j \delta X_j - a_4^j \delta Y_j$$

Quedando la **ecuación de observación para ángulos** de la forma:

$$\omega_{ijk}^{(0)} + d\omega - \omega_{ijk} = v_{ijk}^{\omega} \rightarrow \text{Residuo}$$

Sustituyendo el valor calculado para la corrección:

$$b_1 \delta X_i + b_2 \delta Y_i + a_3^k \delta X_k + a_4^k \delta Y_k - a_3^j \delta X_j - a_4^j \delta Y_j - (\omega_{ijk} - \omega_{ijk}^{(0)}) = v_{ijk}^{\omega}$$

Donde:

$b_1, b_2, a_3(k,j), a_4(k,j) \rightarrow$  Coeficientes de la matriz de diseño calculados con valores aproximados.

$\omega_{ijk} \rightarrow$  Valor observado en campo.

$\omega_{ijk}^{(0)} \rightarrow$  Valor del ángulo calculado con valores aproximados. Para calcular este valor se utiliza la diferencia de acimutes calculados con coordenadas aproximadas.

$v_{ijk}^{\omega} \rightarrow$  Residuos de los ángulos en las ecuaciones de observación.

$(\omega_{ijk} - \omega_{ijk}^{(0)}) \rightarrow$  Término independiente.

### **3.2.3.- Diseño de la red y optimización**

El **diseño de la red** es uno de los pasos más importantes que se realizan en un proyecto de auscultación y debe realizarse con detenimiento, puesto que será la base para llegar al éxito.

Por diseño de una red se entiende, la situación sobre el terreno de los puntos que la forman, todas las combinaciones de uniones posibles entre los mismos (futuras observaciones) y la elección del instrumental con el que se van a realizar las observaciones y su precisión.

El diseño de la red depende de varios factores:

- El fenómeno a cuantificar.
- La morfología de la zona a estudio.
- Coste y prescripciones técnicas de la operación.

#### **Problemas de diseño**

- **Diseño de Orden Cero (ZOD):** En el que se definirá el Datum adoptado, además de la estabilidad del mismo entre las dos épocas de observación, para garantizar de este modo la no-movilidad del bloque referencia.
- **Diseño de Primer Orden (FOD):** En esta fase se determinará la correcta localización del bloque referencia y el bloque objeto en función de diversos factores: topografía de la zona, tipo de objeto y movimiento a controlar, metodología a emplear, etc., además, en esta fase se definen todas las uniones u observaciones necesarias para que la red de control presente la exactitud y consistencia geométrica adecuada para los fines del control, se puede decir que en esta fase queda establecida a priori la matriz de diseño  $A$ .
- **Diseño de Segundo Orden (SOD):** Consiste en determinar la instrumentación adecuada para alcanzar los niveles de precisión exigidos por el fenómeno a cuantificar. En esta fase se determina la matriz de pesos  $P$  de las observaciones.
- **Diseño de Tercer Orden (TOD):** Esta fase tiene especial importancia en redes de control en los que se realizan estudios multiépoca. Se basa siempre en los resultados obtenidos de la época o épocas anteriores, y tiene como finalidad modificar los observables, número de puntos y/o el instrumental con el fin de mejorar dichos resultados.

Los métodos de resolución de estos problemas planteados siguen dos líneas o estrategias, el diseño analítico y los métodos de simulación.

Normalmente el método más sencillo y usado es el de simulación, consistente en la resolución de una serie de pasos, partiendo de unas coordenadas aproximadas de los puntos que formarán la red y del conocimiento

de las precisiones del instrumental a utilizar, realizando un proceso iterativo con el fin de llegar a la mejor solución posible.

El esquema de los métodos de simulación puede resumirse en:

- 1- Elección de la situación de los puntos de la red (son dotados de coordenadas aproximadas sobre la cartografía preexistente o por la generada en la fase de levantamiento).
- 2- Especificación de todas las observaciones posibles.
- 3- Estimación a priori de la precisión de las observaciones basadas en la instrumentación y métodos de observación a utilizar.
- 4- Formulación del modelo de Gauss-Markov y cálculo de las medidas de la precisión, fiabilidad, sensibilidad a deformaciones y coste.
- 5- Cálculo de la influencia de cada observación en las cuatro medidas anteriores con el fin de decidir las imprescindibles.
- 6- Búsqueda de la solución que con menor coste proporcione suficiente precisión, fiabilidad y sensibilidad a deformación mediante:
  - Eliminación de observaciones superfluas.
  - Cambio del instrumental.
  - Cambio de los métodos de observación.Tras estos cambios se repiten los pasos 4, 5 y 6 hasta obtener la mejor solución posible.

### **3.3.-Ejemplos**

Continuando con lo comentado en el apartado 3.1.3, se procede a exponer y analizar varios ejemplos de control de deformaciones, en elementos patrimoniales, mediante la utilización de distintas metodologías e instrumentación.

La casuística es muy variada y no se pretende hacer una revisión exhaustiva, simplemente se van a introducir una serie de ejemplos seleccionados que ilustran diferentes aspectos metodológicos a los que se hace referencia en este trabajo.

Los textos completos originales se presentan en el anexo 4.



Torre original colapsando en 1902.

El Campanario de San Marcos es el campanario de la Basílica de San Marcos en Venecia, ubicado en la plaza del mismo nombre. Es uno de los símbolos de la ciudad de Venecia. La torre posee una altura de 98,6 metros, y se encuentra en una esquina de la Plaza de San Marcos, cerca de la portada de la basílica.

En julio de 1902 sobre la pared norte de la construcción se descubre la presencia de una peligrosa hendidura que en los sucesivos días aumentó de dimensiones hasta que la mañana del lunes 14 de julio a las 9:47 el campanario se desplomo. No hubo víctimas y, vista la posición de la construcción, los daños fueron relativamente limitados. Durante la tarde el consejo comunal, reunido de urgencia, decidió la reconstrucción aportando 500.000 liras para contribuir a solventar los trabajos.

Información obtenida de [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

Figura 21. Campanario de la Iglesia de San Marcos. Venecia.

### **3.3.1.- Ejemplo 1 Muralla de Amelia (Italia)**

Referencia: “An integrated monitoring system for the monumental walls of Amelia” Donatella Dominici, Guido Fastellini, Fabio Radicioni and Aurelio Stoppini. DAU, University of LÁquila, Italy, DICA, Uneversity of Perugia, Italy.

“Measuring the Changes” of the FIG 13th Symposium on Deformation Measurement and Analysis and the IAG 4th Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. Lisbon, Portugal, 12-15 May 2008

“Integración de sistemas de monitorización en el conjunto monumental de las murallas de Amelia”

En este artículo se presenta una recopilación de técnicas utilizadas para el control de deformaciones en una muralla romana que circunda la población de Amelia (Italia).

Las distintas técnicas aplicadas en el estudio fueron:

- GNSS: para la determinación de las coordenadas de la red en el sistema ETRS89, con el objetivo de establecer un dátum único para todos los trabajo desarrollados con una precisión subcentimétrica.

El uso de está técnica se justifica dentro de este proyecto puesto que existen distintas zonas de auscultación sin visibilidad entre ellas y se pretende obtener las coordenadas de la red en el mismo sistema de referencia, con el fin de poner en relación todas las zonas.

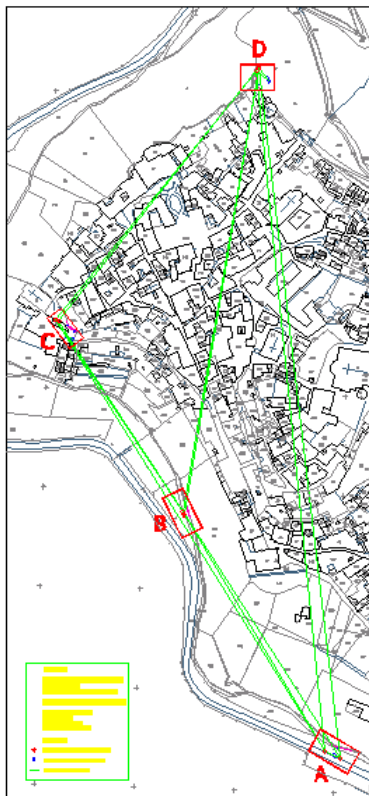


Figura 22. Esquema de la red observada mediante GNSS

- Metodología geodésica: estableciendo una red de puntos de observación con coordenadas tridimensionales, erigiendo pilares de observación y observando a miniprismas (Leica GMP101) anclados en las grietas del paramento mediante el uso de una estación total robotizada (Leica TCA 2003, instrumentación de precisión angular de 0,5"), obteniendo precisiones milimétricas.

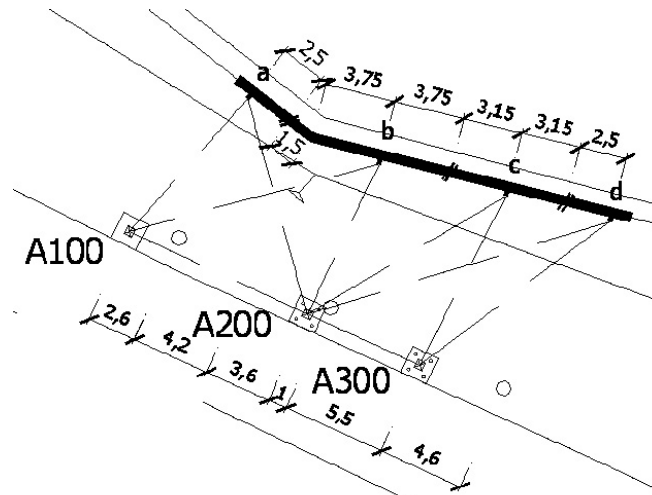


Figura 23. Distribución de los pilares de observación y dianas de control

- Escáner Láser: hasta el momento, solamente se ha realizado un escaneo del lienzo, utilizando para orientar la nube de puntos, las coordenadas de los miniprismas. En el mismo artículo se hace referencia a la posibilidad de realizar posteriores escaneos, solamente en el caso de que la auscultación geodésica diera resultados de deformación en la estructura.

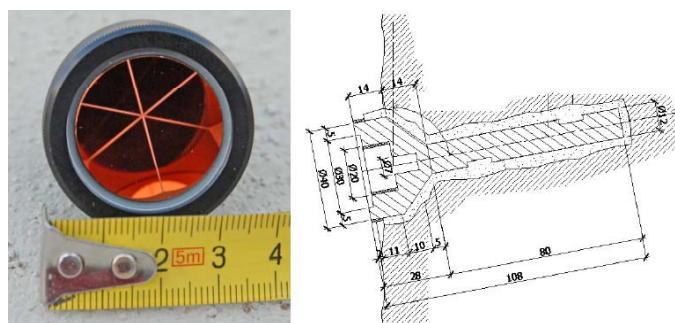


Figura 24. Detalle del sistema de miniprisma empleado



- Fotogrametría digital terrestre: como en el caso del escáner láser, los puntos de orientación absoluta fueron los miniprismas, utilizando para la orientación el sistema de aereotriangulación. Se obtuvo una precisión subcentimétrica en la determinación de los puntos.

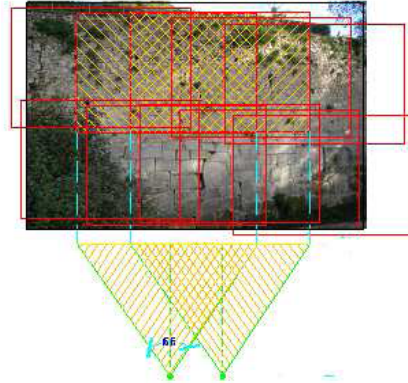


Figura 25. Representación de los pares obtenidos y la zona de recubrimiento.

Este artículo es interesante porque ofrece un amplio abanico de técnicas, además es muy riguroso en cuanto a las precisiones reales que se pueden obtener con cada una. Al mismo tiempo se indica que existe cierta homogeneidad entre las precisiones alcanzadas con la distinta metodología utilizada, siendo este aspecto importante puesto que se pueden establecer relaciones entre las distintas observaciones obtenidas con distinta metodología, llegando incluso a controlar unas medidas con otras obtenidas mediante otro sistema de medida y observar si existen discrepancias importantes.

Por otro lado, se observa también que dichas precisiones (las obtenidas mediante el empleo de auscultación utilizando técnicas topográficas clásicas) son parecidas a las obtenidas por el LDGP en el proyecto realizado en Agoncillo, lo que respalda la metodología empleada.

### **3.3.2.- Ejemplo 2. Teatro anatómico de Padua (Italia)**

Referencia: “*Combined techniques for the stability control of historical structures*” Alberto Guarnieri , Nicola Milan and Antonio Vettore. CIRGEO – Interdepartment Research Center for Geomatics, University of Padua, Italy.

“*Measuring the Changes*” of the FIG 13th Symposium on Deformation Measurement and Analysis and the IAG 4th Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. Lisbon, Portugal, 12-15 May 2008

“*Combinación de técnicas para el control de estabilidad de estructuras históricas.*”

Mediante este ejemplo se pretende señalar varios aspectos; en primer lugar el estudio de deformaciones de un edificio mediante el empleo de un escáner láser; en segundo lugar, hacer hincapié, en la **falta de rigurosidad a la hora de analizar y desarrollar conclusiones.**

Este ejemplo se centra en el análisis y comparación de movimientos verticales detectados mediante escáner láser (precisión en la captura de puntos de 6 mm a 50 m de distancia) y estación total, en el Anatomy Theatre en la localidad de Padua, Italia (estructura contenida en el Palacio del Bo, construida totalmente en madera en el año 1594 y utilizado como recinto en el cual se impartían clases de anatomía).

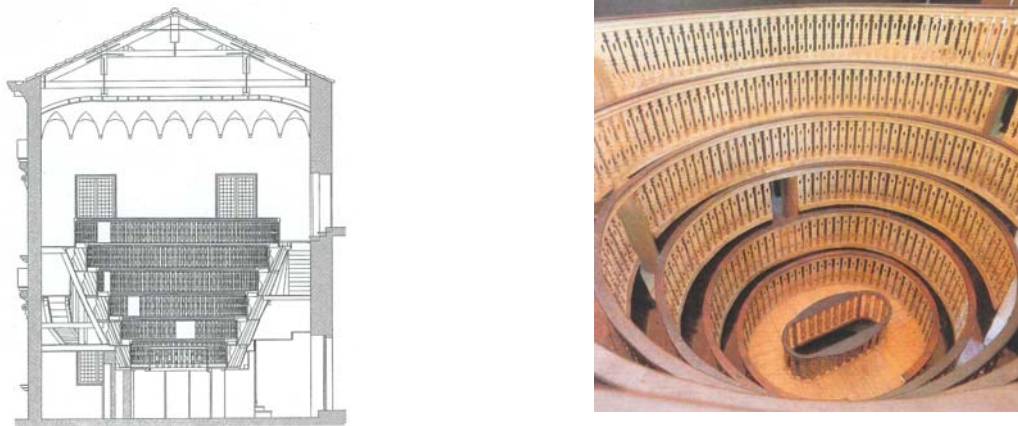


Figura 26. Sección y perspectiva del Anatomy Theatre de Padua

Para ello, se implantaron una serie de puntos fijos repartidos por la estructura, los cuales se usan para orientar las nubes de puntos, dotados de coordenadas tridimensionales mediante radiación con estación total. Se realizan varios escaneos (mediante el empleo de un escáner láser HDS300 de Leica) de los que se obtiene una nube formada por 25.000.000 de puntos. Estas nubes de puntos son tratadas mediante un programa (Cyclone) que realiza la orientación de todas las nubes de puntos (con una precisión de 7 mm), obteniendo como resultado un modelo tridimensional de puntos coloreados.

## Características técnicas del escáner láser HDS3000 de Leica

**Instrument type** Pulsed, high-speed laser scanner, with survey-grade accuracy, range, and field-of-view

**User interface** Notebook or Tablet PC

**Scanner drive** Servo motor

**Camera** Integrated high-resolution digital camera

### System Performance

#### Accuracy of single measurement

Position\* 6mm Distance\* 4mm Angle (horizontal/vertical) 60 microradians/60 microradians, one sigma

**Modeled surface precision\*\*/noise** 2 mm, one sigma

**Target acquisition\*\*\*** 2 mm std. deviation

**Data integrity** Periodic self-check during operation monitoring and start-up Laser Scanning System

**Type** Pulsed; proprietary microchip

**Color** Green

**Laser Class** 3R (IEC 60825-1)

**Range** 300 m @ 90%; 134 m @ 18% albedo

**Scan rate** Up to 4,000 points/sec, maximum instantaneous rate Average: dependent on specific scan density and field-of-view

### Scan resolution

Spot size From 0 - 50m:4mm (FWHH - based); 6mm (Gaussian - based) Selectability Independently, fully selectable vertical and horizontal point-to-point measurement spacing† Point spacing Fully selectable horizontal and vertical; 1.2 mm minimum spacing, through full range† Maximum sample density 1.2 mm Scan row (horizontal) 20,000 points/row, maximum Scan column (vertical) 5,000 points/column, maximum

### Field-of-view (per scan)

Horizontal 360° (maximum) Vertical 270° (maximum) Aiming/Sighting Optical sighting using QuickScan™ button

**Scanning Optics** Single mirror, panoramic, front and upper window design Environmentally protected by housing and two glass shields

**Scan motors** Direct drive, brushless

### Data & power transfer to/from rotating turret

Contact-free: optical data link and inductive power transfer

**Communications** Static Internet Protocol (IP) Address

**Integrated color** User-defined pixel resolution: **digital imaging** Low, Medium, High Single 24° x 24° image: 1024 x 1024 pixels (1 megapixel) @ "High" setting Full 360° x 270° dome: 111 images, approx. 64 megapixels, automatically spatially rectified

Leica Geosystems AG Heerbrugg, Switzerland [www.leica-geosystems.com/hds](http://www.leica-geosystems.com/hds)

Figura 27. Características técnicas del escáner láser HDS300 de Leica

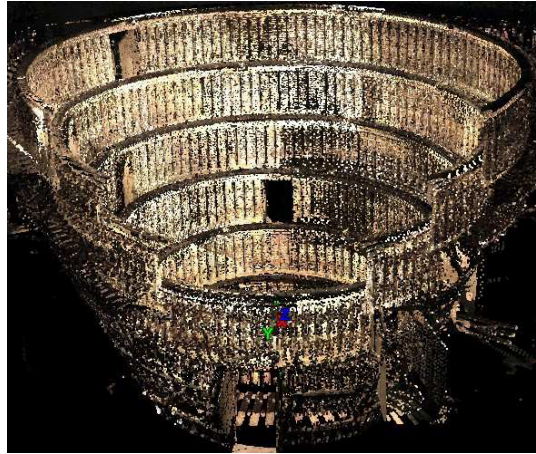


Figura 28. Resultado de la orientación de los escaneos

Al final de todos los puntos capturados solamente se escogen aquellos que determinan la geometría de las señales de control (14 señales en total), que son observados también con estación total.

Con los datos obtenidos de distintas campañas de observación utilizando la misma metodología, se presenta una tabla que contiene la variación de movimiento en el eje vertical detectada mediante la aplicación de escáner láser y estación total, aportando resultados por debajo del milímetro, que se presentan en la siguiente tabla:

Target ID	Vertical displacements (mm)		Delta (mm) (TLS – Tot Stat)
	HDS 3000	Total station	
1	-3.6	-3.4	-0.2
2	-3.0	-2.6	-0.4
3	0.3	0.1	0.2
4	-3.0	-3.2	0.2
5	0.7	0.3	0.4
6	0.2	-0.1	0.3
7	-0.1	-0.3	0.2
8	-0.4	-0.1	0.3
9	0.4	0.2	0.2
10	-0.2	0.1	-0.3

Figura 29. Representación de desplazamientos y diferencias entre metodologías

Aparentemente estos resultados son muy buenos, pero la realidad es otra; se debe tener en cuenta que en la determinación de un punto a una distancia de 50 m con escáner láser se tiene una incertidumbre de 6 mm, el error de la orientación de las nubes de puntos de 7 mm y la determinación del centro de las señales de control de entre 1,5 y 0,1 mm respectivamente; por otro lado se utiliza una estación total que tendrá sus correspondientes errores, el más importante el de dirección no sabemos como lo han solucionado. De todos

modos cabe la duda de que la estación total pueda alcanzar precisiones por debajo del milímetro.

Con todo ello, suponiendo en el caso más favorable, que la composición de errores fuese inferior al milímetro, como por ejemplo 0,5 mm para ambos, la composición de errores sería de 0,7 mm, y como vemos se presentan datos de desplazamientos y diferencias mucho menores, lo que hace que nos preguntemos por la veracidad de los mismos.

Los instrumentos presentan datos con muchos decimales añadidos, pero es función del operador determinar el punto de corte de los mismos, debido a la metodología utilizada, a las características de las señales de control y del software utilizado en el tratamiento de los datos. No debemos creernos a primera vista los datos que nos aportan los instrumentos, pues en muchas ocasiones no son totalmente ciertos.

Para realizar una buena presentación de los datos y permitir la comprensión de los mismos por cualquier persona, sería conveniente acompañarlos de las elipses de error o de las incertidumbres debidas a la metodología y a la instrumentación.

### **3.3.3.- Ejemplo 3. Iglesia de Villamorón (Burgos).**

*Referencia: "Evaluation of structural damages from 3D laser scans". J.I. Fernández-Martín, J.D. Pérez-Moneo, J. Finat, J. Martínez-Rubio. Universidad de Valladolid, Spain.*

*XXI International CIPA, Symposium, 01-06 October 2007, Athens Greece.*

*"Evaluación de daños estructurales mediante escáner láser 3D"*

En este estudio se plantea la problemática del vasto patrimonio en zonas rurales y la falta de estrategias a la hora de controlar los diversos problemas que las estructuras presentan, debido principalmente a la falta de inversiones para proyectos de estudio de deformaciones. El proyecto se centra en la aplicación de técnicas mediante el uso de escáner láser en la iglesia de Villamorón (Burgos).



Figura 30. Escáner Láser Optech utilizado en Villamorón (Burgos)

La solución que se adopta es el uso de escáner láser con el fin de documentar las patologías que puedan presentar las edificaciones y realizar los análisis mediante la realización de secciones y comparando con modelos de simetría.

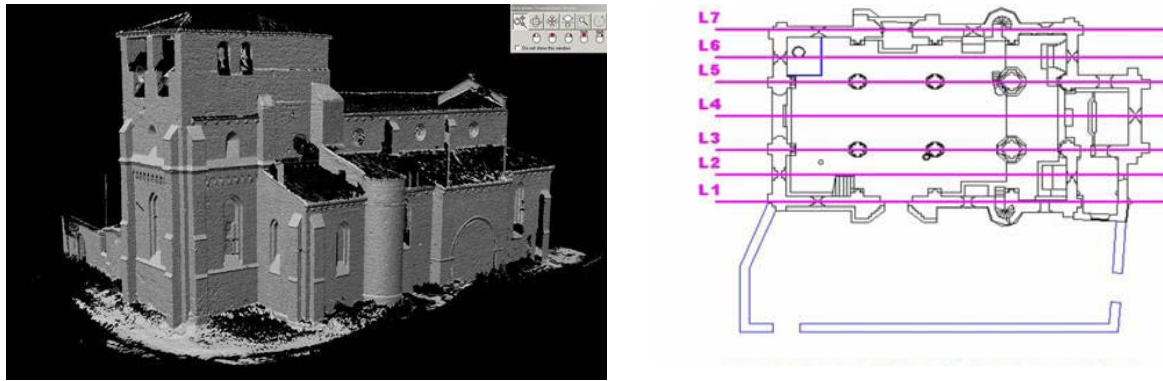


Figura 31. Modelo obtenido de la iglesia (sup. izquierda), secciones obtenidas (sup. derecha), comparativa con el modelo de simetría (inferior central)

Podemos darnos cuenta que el uso del escáner láser solamente sirve para una documentación de patologías que pueden observarse a simple vista, no realizándose escaneos posteriores con el fin de establecer comparativas en distintos momentos para observar la evolución del edificio, sino que las nubes de puntos obtenidas son tratadas y comparadas con modelos de simetría, algo con lo que no estoy de acuerdo puesto que en innumerables ocasiones la presencia de asimetrías no dice que el edificio sea inestable, puesto que una vez construido existe la posibilidad de que se produzcan asentamientos de la estructura que cambien su configuración inicial hasta un punto de estabilidad.

También se dice en el artículo que mediante esta metodología se pueden observar las posibles causas, lo cual no es cierto porque lo que se determina es la posición actual, es decir, “las consecuencias”, en ningún caso se pueden determinar cuales son los motivos que las han causado e incluso que las estén empeorando actualmente, si no se hace un seguimiento durante ciertas campañas.

Estoy de acuerdo en que el láser escáner es un buen método de documentación del edificio en su estado actual y esto puede ser utilizado en posibles proyectos de restauración del conjunto arquitectónico.

ILRIS	ILRIS-3D	ILRIS-3D-ER	ILRIS-HD	ILRIS-HD-ER
<b>Scanner Performance</b>				
Range 80% Reflectivity	1200 m	1700 m	1200 m	1700 m
Range 10% Reflectivity	400 m	650 m	400 m	650 m
Minimum Range	3 m			
Laser Repetition Rate (Hz)	2500 to 3500 Hz		10,000 Hz	
Raw Range Accuracy <sup>1</sup>	7 mm @ 100 m			
Raw Range Accuracy (Averaged) <sup>1,2</sup>	n/a		3-4 mm @ 100 m	
Raw Angular Accuracy	8 mm @ 100 m			
Raw Angular Accuracy	80 µrad			
<b>Scanner Properties</b>				
Field of View, ILRIS-3D/HD	40° x 40°			
Field of View, ILRIS-36D Option	-20° through 90° -90° through 20°			
Minimum Step Size <sup>1</sup>	0.001146° (20 µrad)		0.000745° (13 µrad)	
Maximum Sample Density (Point-to-Point Spacing)	2 mm @ 100 m		1.3 mm @ 100 m	
Rotational Speed	0.001 to 20 deg/sec			
Rotational Step Size, Minimum	0.001146° (20 µrad)			
Beam Diameter (1/e)	22 mm @ 100 m		19 mm @ 100 m	
Beam Divergence	0.009740° (170 µrad)		0.008594° (150 µrad)	
Laser Wavelength	1535 nm			
Laser Class <sup>4</sup>	1	1M	1M	
Integrated Camera	High-Res Digital, 3.1 Mpixel			
<b>Physical and Environmental</b>				
Size (L x W x H)	320 x 320 x 220 mm		320 x 320 x 240 mm	
Weight	13 kg		14 kg	
Weight, ILRIS-36D Base	7 kg			
Operating Temperature	0 to 40°C			
Storage Temperature	-20°C to +50°C			
Power Consumption	75 Watts			
Battery Operation (Standard Battery Pack, Hot-Swappable)	5 hours operation			
Data Storage	Removable USB drive			
<b>Standard Accessories</b>				
Scanner control software for Windows and Window CE-based computers	Data extraction software to generate user-selectable file formats			
Automated alignment software	2.0 GB USB memory drive			
User manuals	Universal AC voltage power supply			
Interconnect power/battery cables	Rugged carrying case			
<b>Optional Accessories</b>				
Automated and manual pan/tilt bases	GPS/external camera mounting kit			

Figura 32. Características técnicas del escaner láser Optech Ilris 3D utilizado en este proyecto.  
<http://www.optech.ca/pdf/Brochures/ILRIS-DS-LR.pdf>



### **3.3.4.- Ejemplo 4. Diagnóstico de paramentos históricos.**

*Referencia: "Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries" L. Binda, A. Saisi, C. Tiraboschi. Department of Structural Engineering (D.I.S), Politecnico of Milan, Piazza Leonardo da Vinci. January 2000. "Construction and Building Materials" 14 (2000) 199-233*

"Procedimiento de investigación para el diagnóstico de edificios históricos"

En este artículo se trata en profundidad el estudio de deformaciones en edificios históricos, haciendo una exposición de los puntos a seguir, de las metodologías que se pueden utilizar en cada caso y de los análisis a realizar.

El proyecto realizado en Agoncillo es un estudio previo, con el fin de lograr determinar si existe inestabilidad en el conjunto y el ciclo anual de deformación por causas naturales, como base a posteriores estudios si se hiciesen necesarios, por tanto no se centra en estudios más detallados como los que se presentan en este artículo, pero es conveniente señalarlos con el fin de hacernos una idea de su complejidad.

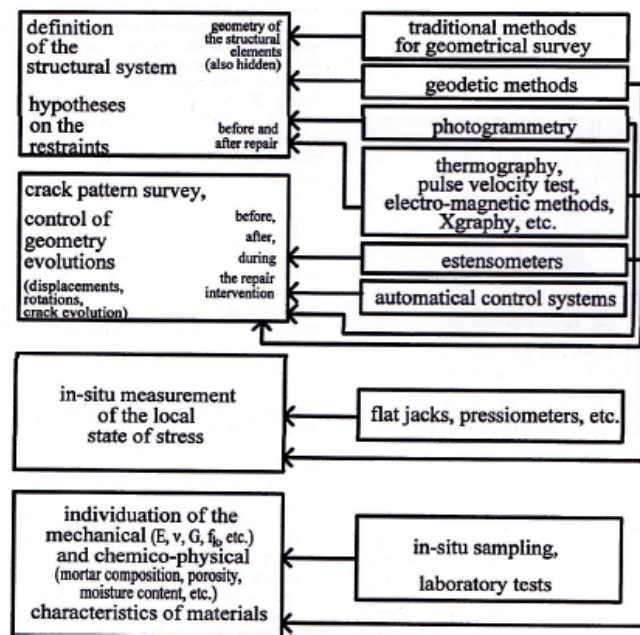


Figura 33. Cuadro propuesto de actuaciones en el estudio.

En primer lugar se plantea la idea de la realización del diagnóstico del edificio, siguiendo algunos pasos como, realización de una documentación métrica de todo el conjunto y en especial de las patologías que se pueden observar a simple vista, con el fin de establecer la base para posteriores trabajos, en segundo lugar, elegidas las zonas de estudio, proceder al control y

a la monitorización de las mismas, para registrar posibles desplazamientos y establecer un modelo de deformaciones procedente de las variaciones climáticas (movimiento cíclico del edificio), también es necesario realizar mediciones del terreno y de los cimientos así como la realización de test en el laboratorio, del tipo de suelo, de los materiales que conforman la estructura ... y la realización de test in situ mediante diferentes técnicas.

A continuación, con todos los datos obtenidos de las diferentes actuaciones realizadas se procede al análisis y a la presentación de los mismos de una forma entendible y relacionando unos con otros para formar conclusiones.

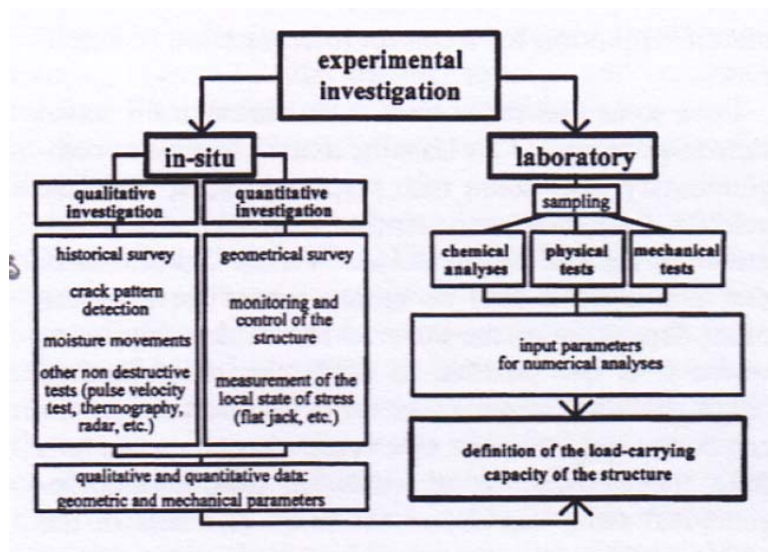


Figura 34. Diagrama correspondiente al análisis de todos los datos obtenidos

### **3.3.5.- Ejemplo 5. El caso de La Iglesia de Nuestra Señora de la Blanca de Agoncillo**

El proyecto propuesto, se basa en el estudio desarrollado por el Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio en Agoncillo, por tanto a continuación, con la idea de presentar los trabajos realizados y establecer la base de partida de todo lo que se desarrollará en los puntos siguientes, se procede a un primer acercamiento al estudio citando los puntos más destacables. Para más información sobre el estudio se presenta la memoria completa en el anexo 2 y el artículo presentado en el congreso internacional “Measuring the Changes” of the FIG 13th Symposium on Deformation Measurement and Analysis and the IAG 4th Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. Lisbon, Portugal, 12-15 May 2008.



Figura 35. Imágenes de algunos de las operaciones realizadas en campo durante el proyecto de auscultación de la Iglesia de Agoncillo.

Esquema del proyecto de auscultación:

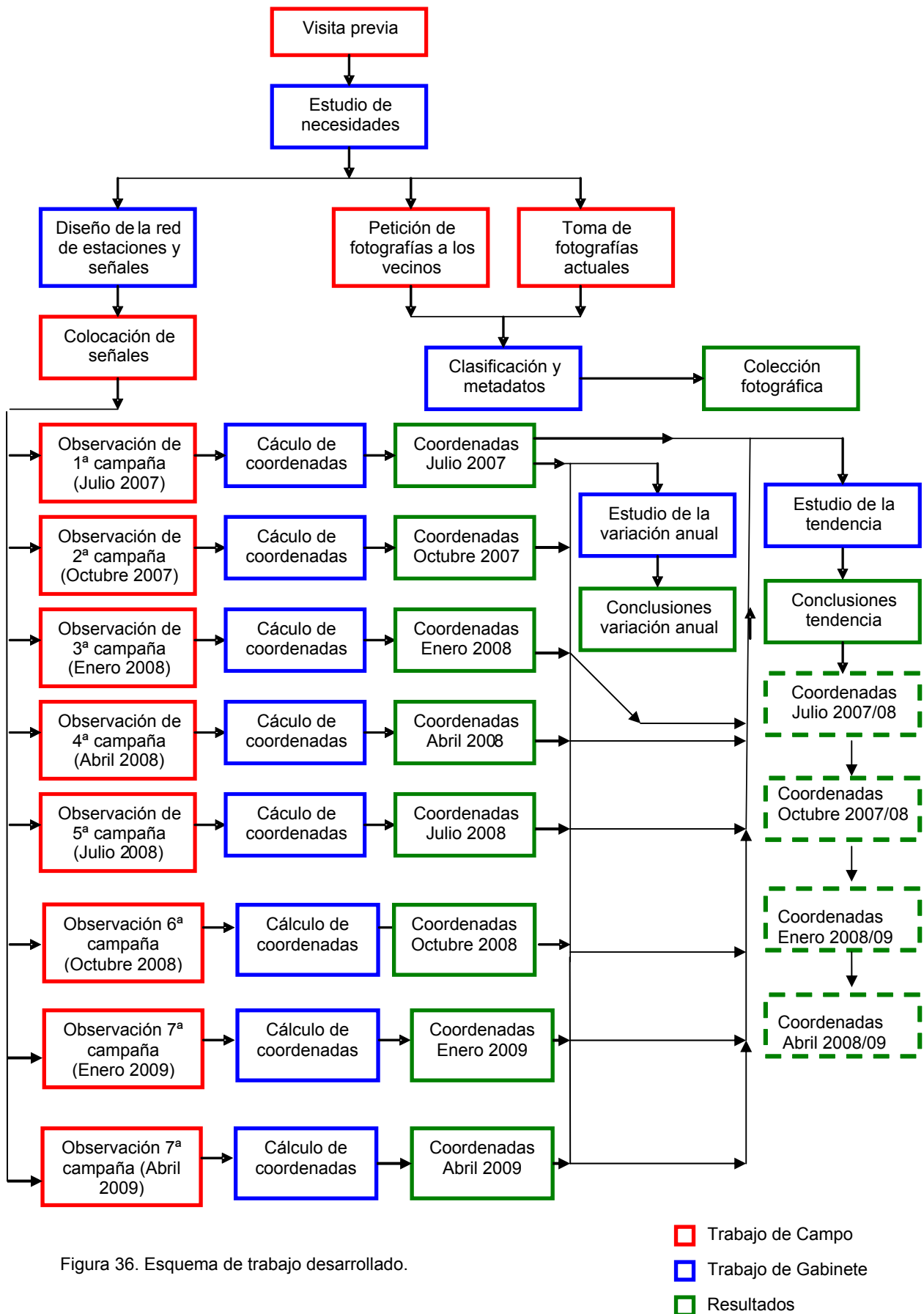


Figura 36. Esquema de trabajo desarrollado.

## **Documentación fotográfica**

No existe un acuerdo entre los vecinos acerca de si han notado un incremento en las patologías (grietas e inclinación de la torre) a lo largo de los años, con el fin de contar con información objetiva, se pidió su colaboración recabando fotografías antiguas en las apareciese la zona de estudio.



Figura 37. Imágenes en distintos periodos de la Iglesia de Nuestra Señora de La Blanca de Agoncillo.

Al igual que para el estudio actual es interesante disponer de imágenes del estado del edificio en las décadas anteriores, es posible que futuros investigadores tengan el mismo interés respecto al estado del edificio a día de hoy por lo que se ha procedido a realizar una documentación fotográfica que consta de dos partes; fotografía métrica y fotografía no métrica.

## **Diseño de la red de señales y estaciones**

### **Red de señales de control**

Se plantearon dudas a la hora de determinar que tipo de señalización era el idóneo para materializar los puntos que se utilizarían para controlar los movimientos de las diferentes partes del edificio. Finalmente, se decidió utilizar dos tipos diferentes e ir analizando cuál tenía mejor comportamiento en cuanto a la definición de la puntería y su estabilidad temporal, esta doble señalización consiste en:

- **Placas de puntería** de acero inoxidable de 100 x 70 mm con el número de señal troquelado y una pegatina adherida con la información referente al proyecto. El punto de observación se materializa mediante un agujero de 1 mm de diámetro en el centro. Estos puntos se han denominado con la letra "D" en los listados.
- **Clavos** de acero inoxidable cuya cabeza de 5 mm de diámetro tiene grabada una cruz sobre la que se puede hacer puntería precisa, estos clavos se han situado próximos a las placas. Estos puntos se han denominado con la letra "C".

Tras analizar las características del edificio y los posibles movimientos que era previsible determinar, se procedió a situar la señalización de forma estratégica a diferentes niveles (suelo, 7, 14 y 21 metros de altura), en las fachadas oeste y

norte de la iglesia y de la torre, además de otras 10 referencias en los edificios circundantes (previo consentimiento de sus dueños) en los que se ha situado placa pero no clavo.



Figura 38. Ejemplo de croquis de dianas y clavos utilizado durante el proyecto.

En el conjunto de la Iglesia, se colocaron 43 señales de observación, siendo el total de todos los puntos que integran la red de 53.

### **Red de estaciones**

La solución adoptada consiste en la utilización de un equipo de centrado forzoso compuesto por cuatro trípodes que se sitúan en campo, estos trípodes van equipados de una plataforma nivelante que puede alojar, tanto a la estación total desde la que se realizan las observaciones, como un prisma que permite observarlos como dianas. Para poder observar todas las señales de puntería desde un mínimo de tres estaciones (requisito para que exista redundancia en su determinación) es necesario repetir este esquema de cuatro estaciones según se presenta en la siguiente figura.

Cada conjunto de trípodes con centrado forzoso hace las veces de los pilares de observación ya que mantienen una geometría estable mientras dura la toma de medidas, sin embargo, no es posible volver a situar los trípodes exactamente en las mismas posiciones durante la siguiente campaña por lo que será necesario considerarlos como puntos distintos y volver a calcular sus coordenadas.



Figura 39. Croquis de la red de vértices de observación (con sus enlaces) y la red de señales de puntería.

## **Metodología de observación**

Para realizar las observaciones angulares se ha utilizado una estación Leica TCR1205 R300, como se muestra en el esquema siguiente (figura 40), se presenta una vista en planta con las estaciones como círculos de color verde, en líneas gruesas azul y rojo están las conexiones entre estaciones para cada serie (conjuntos de cuatro tripodes) y en morado las visuales a las dianas.

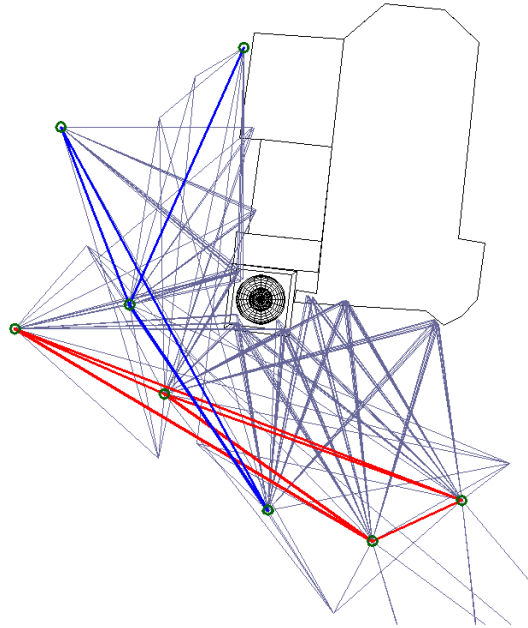


Figura 40. Croquis de las estaciones de control y sus enlaces (en rojo y azul oscuro) y de las observaciones en azul claro.

Las auscultaciones se han llevado a cabo utilizando varios métodos topográficos y geodésicos distintos:

- Intersección inversa múltiple, para dotar de coordenadas a la primera estación con precisión de unos pocos milímetros, desde la cual se desarrollará la primera serie de lecturas, observando a varias dianas de la red de referencia.
- Radiación, utilizado para dotar de coordenadas aproximadas a las demás estaciones de observación, materializadas en campo mediante tripodes con un sistema de centrado forzoso.
- Observación angular mediante pares a la referencia, realizando tres series desde cada estación, cambiando de referencia y usando la siguiente secuencia de observación:  $CD_{referencia}-CD_{diana}-CI_{diana}-CI_{referencia}$ . Las observaciones se llevan a cabo por dos observadores distintos que se van turnando en la realización de las series con el fin de evitar sistematismos.

## **Control de las observaciones**

- Desde cada estación se observan las medidas en círculo directo y en círculo inverso por motivos de eliminación de sistematismos instrumentales, de forma adicional se comprueba las diferencias entre ambos valores para ver que no supera un límite considerado “aceptable” en función de las características del instrumental utilizado.
- Los ángulos medidos en campo se comprueban con los que deberían obtenerse (se pueden conocer por las coordenadas de las señales disponibles de campañas anteriores) con lo que se pueden identificar puntos bien observados pero mal identificados (es decir, que se ha escrito que se está midiendo a una señal cuando en realidad se está apuntando a otra diferente).
- Desde cada estación, cada punto se mide respecto a tres referencias distintas lo que permite realizar un primer promedio que identifique si existe algún valor inesperado.
- Una vez que se dispone de coordenadas, los desplazamientos no se analizan de forma individual para cada punto sino que se intenta realizar un análisis conjunto buscando patrones, por ejemplo, si se trata de un punto con doble señalización, se comprueba que el desplazamiento detectado aparezca tanto en la placa como en el clavo.

## **Cálculo de las observaciones**

Para la realización de los cálculos se ha desarrollado un programa informático específico. Esto nos ha permitido incorporar las opciones y métodos que nos resultaban más adecuados para cada fase, adaptándonos completamente a las características del proyecto.

El programa se estructura por fases que deben realizarse de forma consecutiva, éstas son:

- Carga y comprobación de ficheros.
- Ajustes de estación.
- Definición de datum y pesos.
- Cálculo de coordenadas.
- Control estadístico.

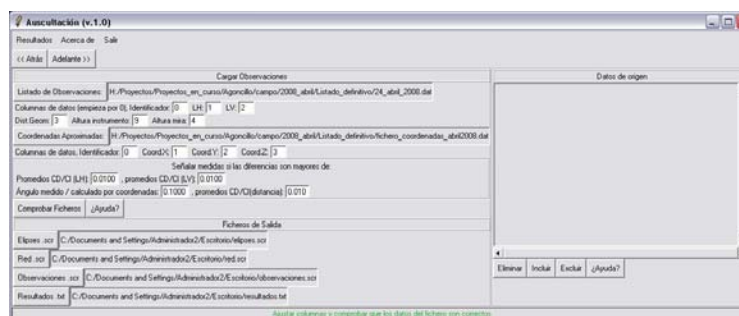


Figura 41. Pantalla principal del programa de cálculo utilizado.



### Análisis de los resultados

Para la interpretación de los resultados se puede recurrir a técnicas numéricas, gráficas o una combinación de ambas, en este caso se ha optado por un método gráfico que consiste en el dibujo de las elipses de confianza de cada campaña, siendo esta forma de estudio de los resultados muy intuitiva aunando simplicidad con la posibilidad de realizar interpretaciones globales

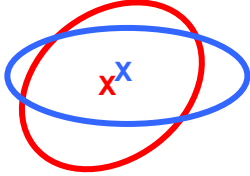
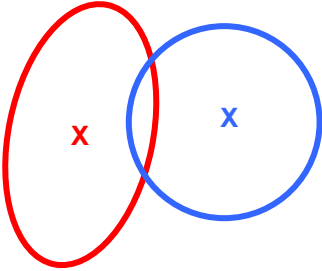
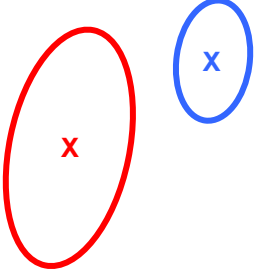
ELIPSES DE ERROR EN DOS CAMPAÑAS DIFERENTES			
	Caso A	Caso B	Caso C
<b>Dibujo</b>			
<b>Situación</b>	Las elipse de una campaña contiene las coordenadas de la otra. No existe diferencia apreciable de coordenadas.	La elipses se intersecan aunque no contienen a las coordenadas de la otra campaña. Existe una diferencia apreciable de coordenadas, aunque no puede asegurarse que ésta no sea debida a la propia incertidumbre de los resultados.	Las elipses no se cortan. Existe una diferencia apreciable entre las coordenadas de cada campaña y ésta no puede ser explicada por la incertidumbre de los resultados.

Figura 42. Interpretación de los resultados según las posiciones de las elipses de error en dos campañas.

#### **4.- Optimización de la metodología**

Se tienen tres partes fundamentales en la auscultación, la instrumentación, la señalización y las observaciones. Asociados a estas divisiones del proyecto aparecen cinco factores limitantes, la precisión, la fiabilidad de la red, el coste, el tiempo y la complejidad.

Por otra parte, la optimización va en relación con los cuatro problemas de diseño comentados en el punto 3.2.3. Lo que se pretende ahora es poner de manifiesto la relación existente entre los factores que se van a analizar y los cuatro problemas de diseño, con el fin de demostrar que esos factores no proceden del azar si no de un análisis.

La elección de la instrumentación está relacionada de forma directa con el diseño de segundo orden en el que se establece la ponderación a emplear, y el factor que interviene en este problema es la precisión.

La señalización entronca con el diseño de primer orden, en el cual se establece la configuración de la red, siendo el factor que se relaciona en este caso la fiabilidad.

Las observaciones, también están relacionadas con el problema de primer orden, pues en este estudio se decide la metodología de observación y los observables, relacionándose también en este caso la precisión y la fiabilidad.

La señalización y las observaciones pueden ser relacionadas además con el problema de orden cero, en el cual se define el datum, puesto que mediante el empleo de una buena señalización y unas correctas observaciones se puede llegar a definir correctamente el datum, asegurando su estabilidad y la correcta observación del mismo en las campañas sucesivas.

El diseño de tercer orden se puede relacionar con las tres divisiones, instrumentación, señalización y observaciones, estableciendo también las relaciones con los cinco factores citados, puesto que se trata de la parte del diseño que se encarga de modificar observables, puntos, geometría de la red, instrumental, costes, modelo de cálculo, con el fin de lograr mejores resultados.

#### 4.1.- Descripción de factores

En el punto 2, se comentó la existencia de una serie de factores que conviene ser analizados a la hora de realizar la optimización del proyecto de auscultación. En la tabla siguiente (figura 40), se puede ver la relación entre esos factores (precisión, fiabilidad, coste, tiempo y complejidad, que son descritos a continuación) y las distintas propuestas que se han considerado, estando estas dentro de las tres variables en las que se centra la metodología empleada. Los signos de los efectos ocasionados se han dispuesto partiendo de consideraciones teóricas, más adelante en este proyecto se analizarán en profundidad cada uno de ellos.

Propuesta		Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Instrumentación	Instrumentación geodésica	+	=	-	=	=
	Pilares de observación	+	+	-	=	=
Señalización	Pasar de placas a clavos	=	=	+	=	=
	Pasar de placas a prismas	+	=	-	=	=
	Eliminar nº de lecturas a referencia	=	=	+	+	-
Observaciones	Eliminar puntos de observación	=	=	+	+	=
	Eliminar series	-	=	+	+	=
	Medida de distancias	+	+	-	-	-

 Beneficio

 Perjuicio

 Sin efecto

Figura 43. Tabla de factores y propuestas a analizar.

Como se puede observar en la tabla superior, las decisiones que se toman suelen tener efectos en varios factores de los que se analizan y normalmente son opuestos, es decir, mejoran alguno a costa de empeorar otro. Es interesante, por lo tanto, cuantificar estas ganancias o pérdidas para poder llegar a una solución óptima.

**La precisión** de las coordenadas obtenidas mediante el empleo de esta metodología u otra va a restringir la magnitud de los movimientos que se pueden detectar, por tanto es un factor muy importante a tener en cuenta y debe analizarse su variación al cambiar cualquier condición dentro de los elementos de los que se compone la auscultación.

**Fiabilidad**, hace referencia a la capacidad que tiene la red utilizada para detectar errores sistemáticos y errores groseros sin requerir ninguna información adicional, simplemente chequeando la red y depende fundamentalmente de la geometría de la misma, de la disposición espacial de los puntos que la forman.

Con el fin de analizar este factor, nos centraremos en un indicador referente a la fiabilidad interna llamado redundancia de las observaciones. Este indicador se obtiene al multiplicar los elementos de la diagonal principal de la matriz cofactor de los residuos por el peso que le corresponde a dicha observación, y se corresponde a la contribución de la misma a la redundancia total de la red, siendo la suma de todas las redundancias los grados de libertad del ajuste.

Los valores son mejores cuanto más cercanos a la unidad sean, se consideran no controlado el valor 0, débilmente controlados los valores comprendidos entre 0 a 0,3 y bien controlados desde 0,3 a la unidad.

**Coste**, relacionado con el coste total del proyecto de auscultación, que dependerá del instrumental utilizado, del tiempo de observación, del sistema de señalización utilizado, del número de observadores y del número de campañas a realizar. Cuando más adelante se habla del coste como factor limitante a priori, se está haciendo referencia al presupuesto inicial.

**El tiempo**, dependiente del número y tipo de observables, así como del periodo de observaciones. Tiene relación directa con el coste, además de suponer una limitación en algunas circunstancias.

Siendo importante por sí sólo puesto que es posible que los periodos durante los que se pueden realizar las observaciones sean limitados (por ejemplo, puede ocurrir que en el entorno en el que se realizan los estacionamientos sucedan actividades propias de la vida cotidiana que impidan desarrollar la actividad). Además se debe tener en cuenta todo lo expuesto anteriormente cuando se habló del ciclo diario de la estructura.

**Complejidad**, referente a la dificultad o sencillez del modelo de cálculo utilizado, en función de correcciones que se deben tener en cuenta antes de realizar el cálculo propiamente dicho (como en el caso de las distancias) y de la formulación utilizada para el ajuste. Como ya se ha comentado el método de ajuste es el modelo general Gauss-Markov, pero dependiendo del tipo de observables y de la metodología de observación, la formulación a utilizar puede ser más complicada que la utilizada en este proyecto. También se tiene en cuenta dentro de la complejidad, la velocidad o facilidad con la que se consigue que el ajuste se realice correctamente.

## **4.2.- Instrumentos: geodésicos o topográficos**

En el proyecto de auscultación de la Iglesia de Nuestra Señora de La Blanca de Agoncillo, se decidió utilizar instrumentación topográfica convencional por motivos de disponibilidad y coste.

A continuación se procederá al análisis en el supuesto de haber utilizado un instrumento de tipo geodésico en el desarrollo del estudio.

### **4.2.1.- Tabla teórica y justificación**

	Propuesta	Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Instrumentación	Instrumentación geodésica	+	=	-	=	=

Figura 44. Tabla teórica correspondiente a la instrumentación.

En esta tabla se puede observar el efecto teórico sobre los factores intervinientes del empleo de un instrumental geodésico en el estudio.

En un principio, se puede suponer (se habla en términos teóricos), que la precisión en la determinación de las coordenadas de los puntos va a aumentar, puesto que el instrumental utilizado posee mejores características técnicas, sobre todo en la determinación de ángulos (estamos hablando de aparatos con precisión de décima de segundo centesimal en la determinación de ángulos, frente a otro con precisión de segundos). Asimismo, se puede decir que la fiabilidad de la red va a ser la misma, puesto que como hemos comentado en el punto anterior, la fiabilidad de la red depende exclusivamente de la geometría de la misma, de la disposición espacial de los puntos que la forman y en este caso no varía.

Es lógico también que la introducción de estos equipos en el proyecto, lo van a encarecer, puesto que las diferencias de precios entre geodésicos y convencionales es grande, siendo los primeros más caros, tanto si se tiene que comprar como si se desea alquilarlo.

A grandes rasgos, no afectará al tiempo de observaciones, salvo que se utilicen equipos que no dispongan de un sistema de grabación de datos en memoria interna y/o externa, que aún hoy en día se siguen utilizando, y tampoco variara la complejidad de los cálculos a realizar, puesto que las observaciones son de la misma naturaleza (solamente ángulos). Aunque también podría darse el caso de que el tiempo de estacionamiento aumente, debido principalmente a la sensibilidad de los niveles.

#### **4.2.2.- Pruebas realizadas**

##### *1º- Estudio del efecto sobre la precisión:*

Durante el proyecto realizado no se ha utilizado instrumental geodésico, por tanto no se podrá realizar un análisis basado en datos reales de observación, pero si que se puede realizar un estudio teórico de errores, para ello se procede a calcular el error angular de cada instrumento (estación total Leica 1205 de precisión angular 5 segundos centesimales y un instrumento geodésico, estación total Leica TCA-2003 con precisión angular de 0,15 segundos centesimales) y el error máximo cometido en la realización de una intersección directa con cada uno de esos instrumentos. Este análisis está íntimamente relacionado con la resolución del problema de orden dos, en el cual se calcula la precisión de la instrumentación a utilizar y se confecciona la matriz de pesos.

Para determinar el error angular de los instrumentos se utiliza la formulación conocida:

La expresión que define el error angular del instrumento:

$$e_a = \sqrt{e_v^2 + e_d^2 + e_p^2 + e_l^2}$$

Donde  $e_v$  es el error de verticalidad de eje principal:

$$e_v = \frac{1}{12} S$$

Siendo S la sensibilidad del nivel.

$e_l$  es el error de lectura:

$$e_l = \frac{2}{3} a$$

Donde  $a$  es la apreciación del instrumento utilizado.

$e_d$  el error de dirección:

$$e_d = \frac{e_e + e_s * r''}{D}$$

Donde  $e_e$  es el error de estacionamiento del instrumento,  $e_s$  es el error de señal, D es la distancia entre la estación y el punto visado y  $r''$  los segundos que tiene un radian.

Y  $e_p$  el error de puntería:

$$e_p = \frac{10''}{A} * \left(1 + \frac{4A}{100}\right)$$

Donde A son los aumentos del instrumento y 10'' es un valor angular que se obtiene suponiendo que el límite de percepción visual se sitúa en 30'', siendo por tanto el error que se puede cometer de 2/3 del mismo (siendo visuales a elementos medianamente bien definidos) pero en el caso de una visual a un punto bien definido, como es el caso de las señales fijas situadas en un paramento, este error se reduce a 10''.

Como en la metodología de observación utilizada se aplica Bessel, debemos tener en cuenta que los errores de lectura y de puntería se ven reducidos en raíz de dos, por tanto las expresiones para dichos errores son las siguientes:

Error de lectura:

$$e_l = \frac{2}{3} a \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Error de puntería:

$$e_p = \frac{10''}{A} * \left(1 + \frac{4A}{100}\right) * \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Conocidas las especificaciones técnicas de cada uno de los instrumentos a analizar, se procede, teniendo en cuenta varios casos:

- **Caso 1:** Longitud de las visuales de la intersección directa de 30 m, ángulo de intersección de 80 grados centesimales, y supuesto un error de estación de 1mm y un error de señal de 1mm.
- **Caso 2:** Longitud de las visuales de la intersección directa de 30 m, ángulo de intersección de 80 grados centesimales, y supuesto un error de estación y señal nulos.

### Estudio del caso 1:

<b>Instrumento Geodésico LEICA TC-2003</b>	<b>Ángulos en gones y distancias en m</b>	<b>Angulo de intersección</b>
Sensibilidad	0,0002	80 <sup>g</sup>
Aumentos	30	
Apreciación	0,000015	
Error de estación	0,001	
Error de señal	0,001	
Longitud	30	
Error de verticalidad	1,66667E-05	
Error de dirección	42,4413	
Error de puntería	1,5556	
Error de lectura	0,0001	
Error angular	42,4698	
Error del instrumento	60,0614	
<b>Error máximo de la intersección directa =</b>	<b>0,0034</b>	

Figura 45. Estudio de los errores angulares máximos en la intersección directa con instrumental geodésico.

<b>Instrumento utilizado LEICA TCR 1205</b>	<b>Ángulos en gones y distancias en m</b>	<b>Angulo de intersección</b>
Sensibilidad	0,0002	80 <sup>g</sup>
Aumentos	30	
Apreciación	0,0005	
Error de estación	0,001	
Error de señal	0,001	
Longitud	30	
Error de verticalidad	1,66667E-05	
Error de dirección	42,4413	
Error de puntería	1,5556	
Error de lectura	0,0002	
Error angular	42,4698	
Error del instrumento	60,0614	
<b>Error máximo de la intersección directa =</b>	<b>0,0034</b>	

Figura 46. Estudio de los errores angulares máximos en la intersección directa con instrumental convencional.



Como se puede observar en las tablas, la utilización de un instrumental de tipo geodésico no afecta al error máximo de la intersección directa observada, el único error que disminuye con la utilización de instrumental geodésico es el error de lectura, siendo este uno de los errores que menos relevancia tienen en el cálculo del error angular y por consiguiente en el error máximo de la intersección directa.

### Estudio del caso 2:

<b>Instrumento Geodésico LEICA TC-2003</b>	<b>Ángulos en gones y distancias en m</b>	<b>Angulo de intersección</b>
Sensibilidad	0,0002	80 <sup>g</sup>
Aumentos	30	
Apreciación	0,000015	
Error de estación	0	
Error de señal	0	
Longitud	30	
Error de verticalidad	1,66667E-05	
Error de dirección	0	
Error de puntería	1,555635	
Error de lectura	7,07107E-06	
Error angular	1,555635	
Error del instrumento	2,2	
<b>Error máximo de la intersección directa =</b>	<b>0,0001</b>	

Figura 47. Estudio de los errores angulares máximos en la intersección directa con instrumental geodésico.

<b>Instrumento utilizado LEICA TCR 1205</b>	<b>Ángulos en gones y distancias en m</b>	<b>Angulo de intersección</b>
Sensibilidad	0,0002	80 <sup>g</sup>
Aumentos	30	
Apreciación	0,0005	
Error de estación	0	
Error de señal	0	
Longitud	30	
Error de verticalidad	1,66667E-05	
Error de dirección	0	
Error de puntería	1,5556	
Error de lectura	0,0002	
Error angular	1,5556	
Error del instrumento	2,2	
<b>Error máximo de la intersección directa =</b>	<b>0,0001</b>	

Figura 48. Estudio de los errores angulares máximos en la intersección directa con instrumental convencional.

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

En este otro estudio se elimina el error de dirección, lo que podría obtenerse utilizando un sistema de centrado forzoso y observaciones sobre pilares, reduciendo considerablemente el error máximo de la intersección directa, pero como se puede apreciar en las tablas, con la utilización de equipos de distinta precisión, se obtienen idénticos resultados.

En cualquier caso esta situación estaría relacionada con la utilización de pilares de observación y señalización específica (que se verá en el siguiente punto).

## 2º- Estudio del efecto sobre el coste:

		DÍA	SEMANA	15 DÍAS	MES
<b>ESTACIONES TOTALES *</b>					
<b>Estaciones totales con memoria interna</b>	 TCR 705/805   15cc   láser	40,00 €	168,00 €	240,00 €	390,00 €
	 TCRM 1105/1205   15cc   láser	43,00 €	181,00 €	271,00 €	480,00 €
	 TCRM 1103/1203   10cc   láser	63,00 €	202,00 €	303,00 €	510,00 €
	 TCRM 1201   3cc   láser*		320,00 €		890,00 €
	 TCRA 1201   3cc   láser*		375,00 €		970,00 €
	 TCRP 1203   10cc   láser con control remoto*				990,00 €
	 TCA2003   equipo de auscultación*				3000,00 €

Figura 49. Cuadro de precios de alquiler de distintos instrumentos topográficos obtenido de [www.instop.es](http://www.instop.es) Precios a fecha Marzo de 2009



### TO-D626

#### Estacion Total LEICA TCA 2003

TCA2003, Taquímetro automático de precisión de 0.5" (0.15mgon), con plomada láser, doble teclados  
- Accesorios, manual de empleo y estuche.

**Precio: 33.662,00 €**

Descargar Catalogo  .pdf



### TO-D613

#### Estacion Total LEICA TCR 1205 R300

TCR1205 R300, 5" (1.5mgon) taquímetro con EDM sin reflector, plomada láser, 1 teclado con touch screen  
- Aplicaciones estándar, manual, maletín.

**Precio: 16.758,00 €**

Descargar Catalogo  .pdf

Figura 50. Precios obtenidos de la página web [www.estaciontotal.com](http://www.estaciontotal.com) Precios a fecha Marzo de 2009

A partir de los cuadros de precios obtenidos, se puede calcular el coste del instrumental tanto en el caso de compra como de alquiler:

	Estación total leica 1205	Estación total leica TCA 2003
Compra	16758 euros	33662 euros
Alquiler /día	43 euros	100 euros

Figura 51. Tabla de precios (en euros) de dos instrumentos topográficos (convencional y geodésico). El precio del alquiler por día de la estación Leica TCA 2003 se ha obtenido dividiendo el valor del alquiler por mes (obtenido de la tabla de Instoo) de la misma entre 30 días.

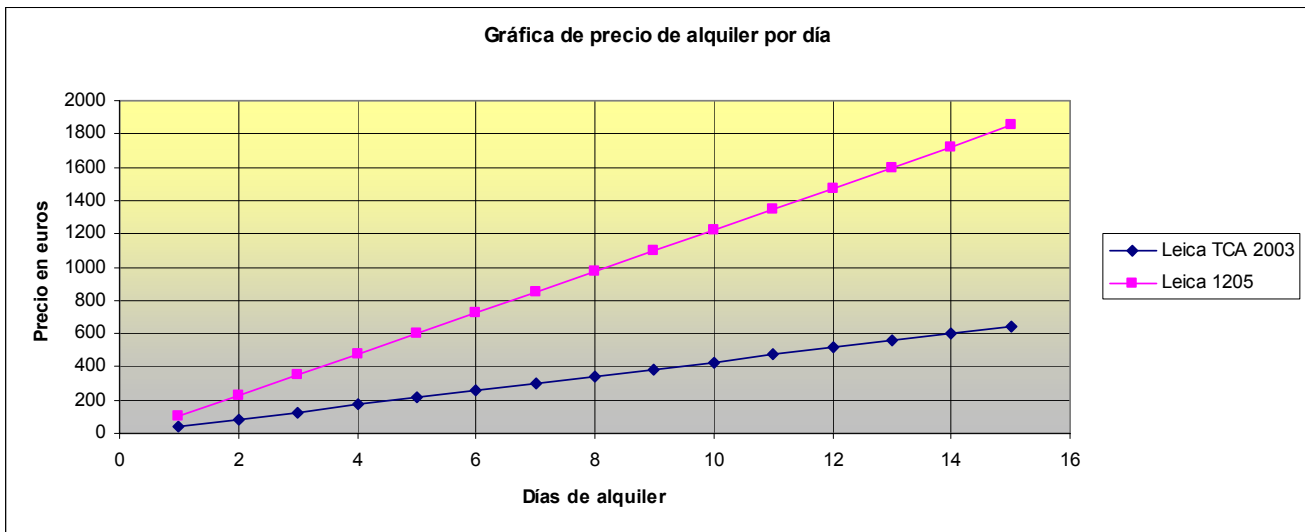


Figura 52. Gráfico que representa el coste de alquiler del instrumental geodésico y convencional por día.

En el caso de alquilar el instrumental, se puede observar que existe una diferencia de 67 euros por día entre la utilización de un instrumento convencional y otro geodésico.

Extrapolando y calculando esa diferencia para el total de las campañas que se han realizado obtenemos:

Precio de alquiler por 13 días de alquiler:

Leica 1205 ..... 473 euros  
 Leica TCA 2003 ..... 1300 euros

Lo que **encarece** el precio total del proyecto **827 euros** si se utiliza un instrumental geodésico.

En el caso de compra del instrumental, se debe incluir en el precio del proyecto, la amortización de los instrumentos empleados para ello se ha realizado el cálculo utilizando el método de amortización lineal o de cuotas fijas, que se basa en que las cuotas de amortizaciones son constantes. A cada ejercicio económico se le asigna la n-ésima parte del valor de amortización.

$$Cuota\ de\ amortización = \frac{V_0 - V_r}{n}$$

Donde  $V_0$  es el valor del instrumento sin I.V.A.  $V_r$  es el valor residual estipulado (o vida útil del instrumento) y  $n$  el número de años de vida supuestos del instrumental o el periodo mínimo de amortización del mismo.

En este caso, el periodo de amortización mínimo establecido ha sido de 7 años para ambos instrumentos, y otorgando un valor residual en el caso de un instrumento TCR 1205 de 5000 euros y para la estación total TCA 2003 de 9000 euros. Con estos datos y este método se ha obtenido la siguiente tabla:

	<b>TCR 1205</b>	<b>TCA 2003</b>
<b>Precio sin iva</b>	16758	33662
<b>Precio con iva</b>	19439,28	39047,92
<b>Valor residual</b>	5000	9000
<b>Periodo mínimo de Amortización (años)</b>	7	7
<b>Amortización en periodo mínimo</b>	1679,71	3523,14
<b>Seguro (anual)</b>	125	125
<b>Calibraciones (anual)</b>	200	350
<b>Total anual</b>	2004,71	3998,14
<b>Total por día</b>	5,49	10,95

<b>Número de días de auscultación</b>	13	13
<b>Precio total del instrumental (euros)</b>	71,40	142,40

Figura 53. Tabla en la que se representa el importe, derivado de la amortización del instrumental, que se debe cobrar por día de trabajo.

#### **4.2.3.- Tabla obtenida del análisis**

Del análisis podemos obtener la siguiente tabla con los efectos sobre los factores que se han observado tras el análisis de la propuesta inicial.

	Resultado	Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Instrumentación geodésica		=	=	-	=	=

Figura 54. Tabla que representa los efectos en los factores que se obtienen tras el estudio.

Como se observa en la tabla 54, el efecto sobre la precisión que se consideraba a priori que podría mejorar con la utilización de una

instrumentación con mejores características técnicas, no es así. Esto es debido a que el error que más influencia tiene en la indeterminación angular es el de dirección, y es el único de los errores que no depende de la instrumentación, si no que depende de las señales de puntería y del tipo de estacionamiento. Como se ha comprobado, realizando los cálculos de los errores pertinentes, las mejoras en la apreciación que se introducen al utilizar una instrumentación geodésica prácticamente no influyen en el error angular total.

Por otro lado, la utilización de un instrumental geodésico, aumenta el coste del proyecto, tanto si se realiza la compra del mismo como si es alquilado solamente para las campañas a realizar.

Por lo tanto a la vista de los resultados obtenidos, no sería conveniente el empleo de esta instrumentación geodésica frente a la convencional, puesto que no aporta mejoras considerables en precisiones y aumenta considerablemente el coste del proyecto.

#### **4.3.- Señalización: Pilares de observación**

Uno de los problemas con los que se encontraba este proyecto en primer lugar fue la imposibilidad de erigir pilares de observación en la zona de estudio, debido tanto al escaso presupuesto como a la negativa del Ayuntamiento de modificar el entorno de la Iglesia. Esto reduce las posibilidades de elección de un datum, pero es interesante conocer como pueden variar los efectos en función de la elección de un datum externo formado por pilares de observación.

##### **4.3.1.- Tabla teórica y justificación**

	<b>Propuesta</b>	<b>Precisión</b>	<b>Fiabilidad</b>	<b>Coste</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Complejidad</b>
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
	Pilares de observación	+	+	-	=	=
<b>Señalización</b>						

Figura 55. Tabla teórica correspondiente a la introducción de pilares de observación.

Teóricamente, la construcción de pilares de observación, aumentará la precisión de las coordenadas de los puntos observados, puesto que se reduce el error de estacionamiento a cero. Al mismo tiempo, la configuración de la red cambia y la elección del datum también, ahora tenemos un conjunto de puntos fijos (los pilares de observación), y se pasa de dos puntos fijos a siete.

En principio el tiempo de observación no va a cambiar, debido a que no variará la metodología de observación ni los observables (siguen siendo ángulos), pero si que va a aumentar el coste del proyecto.

A continuación se procede a la obtención de datos que avalen o desmientan estas hipótesis teóricas de partida.



Figura 56. Ejemplo de pilar de observación geodésico

### **4.3.2.- Pruebas realizadas**

#### *1º- Estudio sobre la precisión*

Estudio de la precisión basado en la eliminación del error de estacionamiento debido al centrado forzoso sobre el pilar y utilizando el mismo instrumento topográfico. Como se puede observar en la tabla, el error de estacionamiento es cero.

<b>Instrumentación utilizada LEICA TCR 1205</b>	<b>Ángulos en gones y distancias en m</b>	<b>Angulo de intersección</b>
Sensibilidad	0,0002	80 <sup>g</sup>
Aumentos	30	
Apreciación	0,0005	
Error de estación	<b>0</b>	
Error de señal	0,001	
Longitud	30	
Error de verticalidad	1,7E-05	
Error de dirección	21,22066667	
Error de puntería	1,5556	
Error de lectura	0,0002	
Error angular	21,2776	
Error del instrumento	30,1	
<b>Error máximo de la intersección directa =</b>	<b>0,0017</b>	

Figura 57. Tabla que representa el error máximo de la intersección directa mediante el empleo de pilares de observación (error de estacionamiento 0) e instrumental convencional.

Tabla que representa el error de la intersección directa, mediante el empleo de la metodología de observación desarrollada en el proyecto de Agoncillo, en el cual se estaciona sobre trípode en lugar del estacionamiento sobre pilar de observación con centrado forzoso.

<b>Instrumentación utilizada LEICA TCR 1205</b>	<b>Ángulos en gones y distancias en m</b>	<b>Angulo de intersección</b>
Sensibilidad	0,0002	80
Aumentos	30	
Apreciación	0,0005	
Error de estación	0,001	
Error de señal	0,001	
Longitud	30	
Error de verticalidad	1,66667E-05	
Error de dirección	42,4413	
Error de puntería	1,5556	
Error de lectura	0,0002	
Error angular	42,4698	
Error del instrumento	60,0614	
<b>Error máximo de la intersección directa =</b>	<b>0,0034</b>	

Figura 58. Tabla que representa el error máximo de la intersección directa mediante la metodología puesta en práctica en Agoncillo.

Como se puede comprobar, mediante el empleo de pilares de observación, se elimina el error de estacionamiento, disminuye el error máximo de la intersección directa observada a la mitad, verificando la hipótesis de partida.

## 2º- Estudio de la fiabilidad de la red

Para estudiar el efecto sobre la fiabilidad nos basamos en los valores de redundancia, comparando dos ajustes, el realizado con dos puntos fijos y el supuesto de que existiesen pilares de observación.

**Ajuste 1:** Se trata de un ajuste conjunto de las campañas de Enero 2008 y Enero 2009, utilizando como datum los puntos fijos C31 y C35.

**Dos puntos fijos.**

**Ajuste 2:** Cálculo conjunto de las campañas de Enero de 2008 y Enero de 2009, utilizando como puntos fijos las estaciones de observación.

**Siete puntos fijos.**

<b>Ajuste 1</b>	
Ecuaciones	270
Incógnitas	96
Grados de libertad	174
Redundancia media	0,64
Ecuaciones por incógnita	2,8
<b>Ajuste 2</b>	
Ecuaciones	261
Incógnitas	72
Grados de libertad	189
Redundancia media	0,72
Ecuaciones por incógnita	3,6

Figura 59. Tabla que representa las características de los justes 1 y 2.

Como se puede observar en esta tabla, el número de ecuaciones en ambos ajustes no son los mismos, esto procede de la propia definición de cada uno de los ajustes puesto que en uno de ellos los puntos establecidos como fijos son solamente 2 y en el segundo ajuste 7, por lo tanto podemos pensar y sería correcto, que la diferencia de ecuaciones entre ambos ajustes sería de 14 puesto que por cada punto se tienen 2 incógnitas (X e Y), pero resulta que además, debido al paso de los test estadísticos de detección de errores sistemáticos y groseros en ambos ajustes y al ser estos distintos se han tenido que eliminar algunas ecuaciones y distintas en cada ajuste para que el ajuste sea correcto.

En la tabla comparativa siguiente, el total de observaciones es el mismo, aunque debiera coincidir con el número de ecuaciones de cada ajuste, lo que sucede es que para realizar la comparación estadística de ambos ajuste con el fin de observar la fiabilidad en cada uno de los casos, es necesario quedarse simplemente con las observaciones que quedan en común después del ajuste, si no los datos obtenidos del análisis estarían falseados.

	<b>Ajuste 1</b>	<b>Ajuste 2</b>	Porcentaje	
			<b>Ajuste 1</b>	<b>Ajuste 2</b>
Valores =0	5	6	2	2
Valores entre 0 y 0,3	5	3	2	1
Valores entre 0,3 y 0,6	50	25	19	10
Valores mayores o iguales a 0,6	199	225	77	87
Total observaciones	259	259		
Valor máximo	0,94	0,98		
Valor mínimo	0	0		

Figura 60. Tabla que representa el número de observaciones y su valor después de realizar el ajuste en cada caso y el porcentaje de las mismas.

En el siguiente gráfico se representan los datos de la tabla anterior.



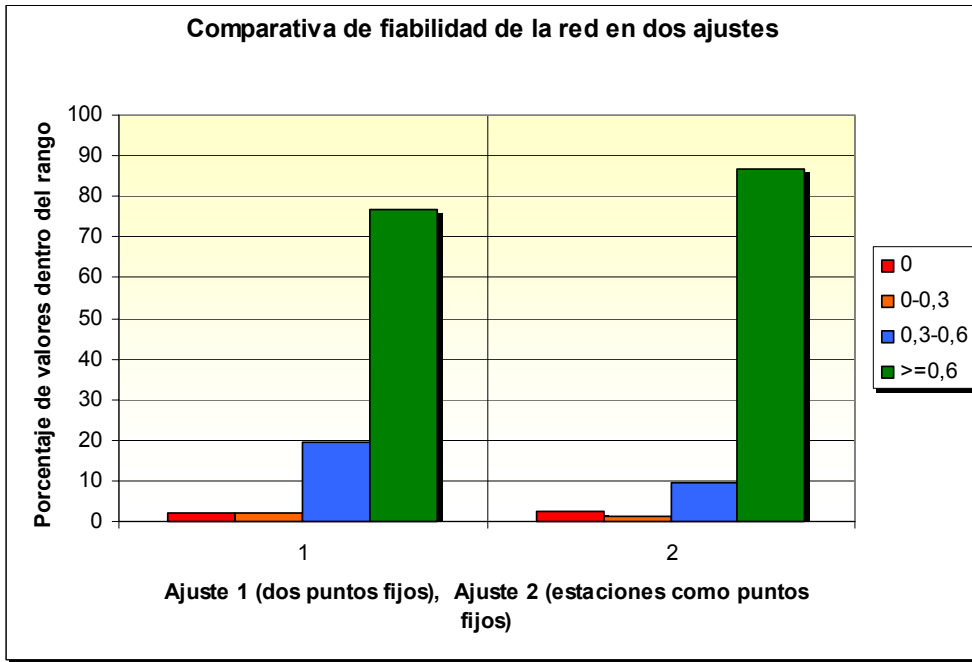


Figura 61. Gráfica que representa el número de observaciones dentro de un valor de fiabilidad, después de realizar el ajuste. El valor 0 representa observaciones no controladas, entre 0 y 0,3 observaciones escasamente controladas, entre 0,3 y 0,6 bien controladas y por encima de 0,6 muy bien controladas.

Como se puede observar, el número de observaciones con una fiabilidad superior a 0,6 aumenta considerablemente (un 10%) al realizar el ajuste con las estaciones de control como puntos fijos, lo que supone una gran mejora sobre la geometría de la red.

### 3º- Estudio sobre el coste

En las siguientes tablas se desglosan los precios derivados de la construcción de pilares de observación:

	Dimensiones
<b>Base</b>	1m x 1m x 1m
<b>Cilindro</b>	1,20m x 0,30m radio
<b>Total en m3</b>	3,25

Materiales	Precio	Unidades	Coste
Hormigón H250	120 euros/ m3	3,25	390
Malla de acero	10 euros/kg	10	100
Mano de obra	18 euros/hora	4	72
Sistema de centrado	30 euros	1	30

	Coste de un elemento	
<b>Bruto</b>	592	Euros
<b>Iva</b>	94,72	16% de iva
<b>Total</b>	686,72	Euros

Figura 62. Desglose del coste derivado de la construcción de pilares de observación.

Como se puede extraer de la tabla, el precio final del proyecto, con la construcción de siete pilares de observación se incrementa en **4807,04 euros**, siendo siete el número mínimo de estaciones a construir, puesto que llegado el caso de erigirlos en el terreno sería conveniente construir alguno más que sirviese de referencia y control de los elementos de observación.

Además de tener en cuenta el precio de construcción de los pilares se deben tener en cuenta los costes derivados del mantenimiento de los mismos, tienen que encontrarse en el mismo estado de una campaña a otra, pues cualquier modificación sufrida puede acarrear problemas en las observaciones, con el incremento de la dificultad en el cálculo, pues sería necesario hacer una traslación de los datos a las condiciones de partida (como por ejemplo giros o cambio de altura de los pilares, casos en los que sería necesario realizar una excéntrica para conseguir tener las observaciones en las condiciones iniciales de observación).

#### **4.3.3.- Tabla obtenida del análisis**

Según las pruebas realizadas, la tabla resultante queda de la siguiente manera:

	<b>Resultado</b>	<b>Precisión</b>	<b>Fiabilidad</b>	<b>Coste</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Complejidad</b>
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
	Pilares de observación	+	+	-	=	=
<b>Señalización</b>						

Figura 63. Tabla resultante de los estudios realizados.

Como se puede extraer de los análisis realizados, la precisión de las coordenadas de los puntos observados mejora el doble que en el caso de no utilizar pilares de observación.

La fiabilidad de la red mejora en un 10%.

El coste del proyecto aumenta en 4807, 04 euros.

A la vista de estos valores, podría ser recomendable, si se dispone del suficiente presupuesto y las especificaciones del proyecto lo permiten, la construcción de este tipo de pilares, puesto que mejoran considerablemente los resultados que se puedan obtener.

#### **4.4.- Señalización: Pasar de placas a Clavos**

Como se ha comentado en apartados anteriores, en el proyecto de auscultación de la torre de Agoncillo, se utilizó un sistema de doble señalización, uno mediante placas grabadas de acero inoxidable y otro mediante clavos con una cruz grabada en la cabeza. Con el fin de optimizar esta red doble, se va a proceder a continuación con el estudio del sistema de señalización mediante placas, para ello se han realizado varios análisis que pasamos a desarrollar a continuación.



Figura 64. Ejemplo de punto de observación con doble señalización (Diana y Clavo)

No todos los puntos de observación poseen doble señalización, los puntos que se encuentran en los edificios cercanos al conjunto, D04, D05, D10, D21, D22, D23 y D26, no poseen doble señalización, así como el C31, C32, C33, C34, C35, C36 y D27 que se encuentran en la cota más baja de la estructura. Por tanto, estos puntos quedarán fuera del análisis al que se procede a continuación.

#### **4.4.1.- Tabla teórica y justificación**

	Propuesta	Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Señalización	Pasar de placas a clavos	=	=	+	=	=

Figura 65. Tabla teórica de los efectos sobre los factores al pasar de una señalización de placas a una de clavos.

Se va a proceder al análisis de la red en función de cada una de las señalizaciones de las que se dispone, en primer lugar se obtendrán ajustes de distintas campañas en las que solamente se han utilizado placas y el mismo ajuste en las que solamente se ajustaran los clavos, procediendo posteriormente a la comparación de ambos y al estudio de distintos factores según esos datos. A priori del estudio, se puede considerar que la precisión, la fiabilidad, el tiempo de observación y la complejidad del ajuste no van a cambiar. El coste si que se va a reducir puesto que el coste de los clavos es mucho menor que el de las placas. Para contrastar esta hipótesis de partida se procederá a continuación al análisis detallado.

#### **4.4.2.- Pruebas realizadas**

##### *1º Estudio sobre la precisión*

Para ello se han realizado varios ajustes de la red en los cuales, en unos solamente se han incluido las observaciones realizadas a las placas de puntería y en otro solamente las observaciones a los clavos, obteniendo los siguientes datos de precisiones en cada punto, atendiendo a los semiejes de las elipses de error, realizándose un ajuste en dos campañas distintas, Julio de 2007 y Julio de 2008, puesto que solamente se observaron las placas de puntería en estas dos campañas.

Ajustes correspondientes exclusivamente a las dianas:

Ajuste de la campaña de Julio 2007, clavos y dianas:

<b>Nº de Punto</b>	<b>Semieje mayor a (unidades en metros)</b>	<b>Semieje menor b (unidades en metros)</b>
D01	0,003	0,001
D02	0,002	0,002
D03	0,002	0,002
D06	0,005	0,003
D07	0,003	0,002
D08	0,002	0,001
D09	0,002	0,001
D11	0,002	0,001
D12	0,002	0,001
D13	0,002	0,001
D14	0,002	0,001
D15	0,004	0,001
D16	0,002	0,001
D17	0,002	0,001
D18	0,004	0,001
D19	0,003	0,002
D20	0,003	0,001
D21	0,004	0,002
D22	0,004	0,003
D23	0,003	0,002
D26	0,004	0,002
D27	0,002	0,001

Figura 66. Ajuste de la campaña de Julio de 2007 con clavos y dianas

<b>Nº de Punto</b>	<b>Semieje mayor a (unidades en metros)</b>	<b>Semieje menor b (unidades en metros)</b>
D01	0,003	0,001
D02	0,002	0,001
D03	0,002	0,002
D06	0,006	0,002
D07	0,003	0,002
D08	0,002	0,001
D09	0,002	0,001
D11	0,001	0,001
D12	0,001	0,001
D13	0,001	0,001
D14	0,001	0,001
D15	0,003	0,001
D16	0,003	0,001
D17	0,003	0,001
D18	0,003	0,001
D19	0,002	0,001
D20	0,002	0,001
D21	0,003	0,002
D22	0,003	0,002
D23	0,003	0,001
D26	0,003	0,001
D27	0,003	0,001

Figura 67. Ajuste de la campaña de Julio de 2008 con clavos y dianas.

<b>Nº de Punto</b>	<b>Semieje mayor a (unidades en metros)</b>	<b>Semieje menor b (unidades en metros)</b>
C01	0,008	0,002
C02	0,002	0,002
C03	0,002	0,002
C06	0,005	0,003
C07	0,003	0,002
C08	0,002	0,001
C09	0,002	0,001
C11	0,001	0,001
C12	0,002	0,001
C13	0,002	0,001
C14	0,001	0,001
C15	0,004	0,001
C16	0,002	0,001
C17	0,002	0,001
C18	0,004	0,001
C19	0,003	0,002
C20	0,003	0,001
C32	0,003	0,001
C33	0,004	0,001
C34	0,002	0,001
C36	0,002	0,001
C37	0,003	0,002
C38	0,011	0,003

Figura 68. Ajuste de la campaña de Julio de 2007, sólo clavos.

Ajuste de la campaña de Julio de 2008, sólo clavos:

<b>Nº de Punto</b>	<b>Semieje mayor a (unidades en metros)</b>	<b>Semieje menor b (unidades en metros)</b>
C01	0,002	0,001
C02	0,002	0,002
C03	0,002	0,002
C06	0,006	0,002
C07	0,003	0,002
C08	0,002	0,001
C09	0,002	0,001
C11	0,001	0,001
C12	0,001	0,001
C13	0,001	0,001
C14	0,001	0,001
C15	0,003	0,001
C16	0,003	0,001
C17	0,003	0,001
C18	0,003	0,001
C19	0,002	0,001
C20	0,002	0,001
C32	0,003	0,001
C33	0,003	0,001
C34	0,001	0,001
C36	0,002	0,001

Figura 69. Ajuste de la campaña de Julio 2008 sólo clavos.

Comparativa de precisiones en el ajuste de la campaña de Julio 2007 entre los puntos con doble señalización. Con el fin de discriminar en función de la precisión el tipo de señal más conveniente se ha establecido el siguiente criterio:

- Si la precisión de la señal clavo es mayor a la precisión obtenida para la diana, se elige el clavo.
- Si la precisión obtenida es igual entre clavo y diana se deja como señal la diana.
- Si la precisión de la señal clavo es menor que la precisión obtenida para la diana, se elige la diana.

Ajuste de la campaña de Julio 2007:

Npunto	elipse_max_A	elipse_max_B		
D01	0,003	0,001	Diana	Diana
C01	0,008	0,002		
D02	0,002	0,002	=	=
C02	0,002	0,002		
D03	0,002	0,002	=	=
C03	0,002	0,002		
D06	0,005	0,003	=	=
C06	0,005	0,003		
D07	0,003	0,002	=	=
C07	0,003	0,002		
D08	0,002	0,001	=	=
C08	0,002	0,001		
D09	0,002	0,001	=	=
C09	0,002	0,001		
D11	0,002	0,001	Clavo	=
C11	0,001	0,001		
D12	0,002	0,001	=	=
C12	0,002	0,001		
D13	0,002	0,001	=	=
C13	0,002	0,001		
D14	0,002	0,001	Clavo	=
C14	0,001	0,001		
D15	0,004	0,001	=	=
C15	0,004	0,001		
D16	0,002	0,001	=	=
C16	0,002	0,001		
D17	0,002	0,001	=	=
C17	0,002	0,001		
D18	0,004	0,001	=	=
C18	0,004	0,001		
D19	0,003	0,002	=	=
C19	0,003	0,002		
D20	0,003	0,001	=	=
C20	0,003	0,001		

Figura 70. Tabla que representa el criterio de elección de la señalización en función de la precisión obtenida en el ajuste de la campaña de Julio de 2007.

Ajuste de la campaña de Julio 2008:

Nº de punto	elipse_max_A	elipse_max_B	Señal	Señal
D01	0,003	0,001	Diana	=
C01	0,002	0,001		
D02	0,002	0,001	=	Diana
C02	0,002	0,002		
D03	0,002	0,002	=	=
C03	0,002	0,002		
D06	0,006	0,002	=	=
C06	0,006	0,002		
D07	0,003	0,002	=	=
C07	0,003	0,002		
D08	0,002	0,001	=	=
C08	0,002	0,001		
D09	0,002	0,001	=	=
C09	0,002	0,001		
D11	0,001	0,001	=	=
C11	0,001	0,001		
D12	0,001	0,001	=	=
C12	0,001	0,001		
D13	0,001	0,001	=	=
C13	0,001	0,001		
D14	0,001	0,001	=	=
C14	0,001	0,001		
D15	0,003	0,001	=	=
C15	0,003	0,001		
D16	0,003	0,001	=	=
C16	0,003	0,001		
D17	0,003	0,001	=	=
C17	0,003	0,001		
D18	0,003	0,001	=	=
C18	0,003	0,001		
D19	0,002	0,001	=	=
C19	0,002	0,001		
D20	0,002	0,001	=	=
C20	0,002	0,001		

Figura 71. Tabla que representa el criterio de elección de la señalización en función de la precisión obtenida en el ajuste de la campaña de Julio de 2008.

Como se puede extraer de este estudio, en la mayoría de los puntos, la precisión obtenida del ajuste tanto para dianas como para clavos es similar, no pudiendo por tanto descartar una u otra en función de este análisis de precisiones, tendremos que ir a otros criterios, como por ejemplo y seguramente, al coste.



## 2º Estudio de la fiabilidad

Utilizando las mismas campañas que en el estudio sobre precisiones, Julio de 2007 y Julio de 2008, se procede a analizar la fiabilidad de la red, atendiendo a criterios de redundancia de las observaciones.

Como se ha comentado anteriormente, la fiabilidad de la red depende de la geometría de la misma, es decir, de la disposición espacial y de los enlaces que se establecen entre puntos de estación y de observación, en este caso, al estudiar la doble señalización, el factor geométrico entre ambos ajustes queda eliminado, puesto que la geometría no varía, por lo tanto, cualquier variación que exista en la fiabilidad vendrá derivado del tipo de señalización.

		Ajuste de dianas Julio 2007		
Estación	Referencia	Diana	Redundancia	¿Controlable?
E01	D10	D01	0,25	*débil*
E01	D10	D11	0,63	ok
E01	D10	D12	0,69	ok
E01	D10	D13	0,68	ok
E01	D10	D14	0,63	ok
E01	D10	D15	0,21	*débil*
E01	D10	D16	0,45	ok
E01	D10	D17	0,44	ok
E01	D10	D18	0,22	*débil*
E01	D10	D19	0,26	*débil*
E01	D10	D20	0,27	*débil*
E01	D10	D22	0,35	ok
E01	D10	D23	0,68	ok
E01	D10	D26	0,26	*débil*
E01	D10	D27	0,45	ok
E02	D26	D01	0,62	ok
E02	D26	D02	0,61	ok
E02	D26	D10	0,92	ok
E02	D26	D11	0,63	ok
E02	D26	D12	0,65	ok
E02	D26	D13	0,65	ok
E02	D26	D14	0,63	ok
E02	D26	D15	0,63	ok
E02	D26	D16	0,62	ok
E02	D26	D17	0,62	ok
E02	D26	D18	0,63	ok
E02	D26	D19	0,65	ok
E02	D26	D20	0,65	ok
E02	D26	D22	0,10	*débil*
E02	D26	D23	0,64	ok
E02	D26	D24	0,11	*débil*
E02	D26	D25	0,00	*no*
E02	D26	D27	0,62	ok
E05	D10	D02	0,06	*débil*
E05	D10	D03	0,23	*débil*

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

E05	D10	D06	0,66	ok
E05	D10	D07	0,71	ok
E05	D10	D08	0,74	ok
E05	D10	D09	0,74	ok
E05	D10	D21	0,15	*débil*
E05	D10	D26	0,65	ok
E04	D10	D04	0,61	ok
E04	D10	D05	0,49	ok
E04	D10	D06	0,54	ok
E04	D10	D07	0,46	ok
E04	D10	D08	0,40	ok
E04	D10	D09	0,26	*débil*
E04	D10	D11	0,13	*débil*
E04	D10	D12	0,05	*débil*
E04	D10	D13	0,05	*débil*
E04	D10	D14	0,13	*débil*
E04	D10	D16	0,24	*débil*
E04	D10	D17	0,24	*débil*
E04	D10	D19	0,39	ok
E04	D10	D20	0,38	ok
E04	D10	D21	0,07	*débil*
E04	D10	D22	0,60	ok
E04	D10	D26	0,65	ok
E04	D10	D27	0,24	*débil*
E03	D10	D01	0,10	*débil*
E03	D10	D02	0,28	*débil*
E03	D10	D04	0,63	ok
E03	D10	D11	0,51	ok
E03	D10	D12	0,53	ok
E03	D10	D13	0,53	ok
E03	D10	D14	0,51	ok
E03	D10	D15	0,12	*débil*
E03	D10	D16	0,59	ok
E03	D10	D17	0,59	ok
E03	D10	D18	0,12	*débil*
E03	D10	D19	0,57	ok
E03	D10	D20	0,58	ok
E03	D10	D22	0,17	*débil*
E03	D10	D23	0,21	*débil*
E03	D10	D26	0,65	ok
E03	D10	D27	0,59	ok
E07	D21	D03	0,39	ok
E07	D21	D06	0,07	*débil*
E07	D21	D07	0,18	*débil*
E07	D21	D08	0,56	ok
E07	D21	D09	0,43	ok
E07	D21	D22	0,86	ok
E06	D21	D04	0,37	ok
E06	D21	D05	0,38	ok
E06	D21	D06	0,45	ok
E06	D21	D07	0,44	ok
E06	D21	D08	0,31	ok

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

E06	D21	D09	0,32	ok
E06	D21	D22	0,80	ok
E06	D21	D24	0,65	ok
E06	D21	D26	0,64	ok
E08	D23	D03	0,25	*débil*
E08	D23	D04	0,02	*débil*
E08	D23	D05	0,00	*no*
E08	D23	D08	0,51	ok
E08	D23	D21	0,65	ok
Redundancia media			0,44	

Ajuste Julio 2008				
Estación	Referencia	Diana	Redundancia	¿Controlable?
E41	D26	D01	0,23	*débil*
E41	D26	D11	0,67	ok
E41	D26	D12	0,72	ok
E41	D26	D13	0,71	ok
E41	D26	D14	0,66	ok
E41	D26	D15	0,19	*débil*
E41	D26	D16	0,16	*débil*
E41	D26	D17	0,16	*débil*
E41	D26	D18	0,19	*débil*
E41	D26	D19	0,27	*débil*
E41	D26	D20	0,28	*débil*
E41	D26	D22	0,33	ok
E41	D26	D23	0,39	ok
E41	D26	D27	0,16	*débil*
E41	D26	D10	0,73	ok
E42	D26	D01	0,59	ok
E42	D26	D02	0,54	ok
E42	D26	D10	0,77	ok
E42	D26	D11	0,59	ok
E42	D26	D12	0,62	ok
E42	D26	D13	0,62	ok
E42	D26	D14	0,59	ok
E42	D26	D15	0,6	ok
E42	D26	D16	0,6	ok
E42	D26	D17	0,6	ok
E42	D26	D18	0,6	ok
E42	D26	D19	0,64	ok
E42	D26	D20	0,64	ok
E42	D26	D22	0,09	*débil*
E42	D26	D23	0,5	ok
E42	D26	D27	0,6	ok
E45	D21	D02	0,06	*débil*
E45	D21	D03	0,13	*débil*
E45	D21	D06	0	*no*
E45	D21	D07	0,54	ok
E45	D21	D08	0,57	ok

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

E45	D21	D09	0,57	ok
E45	D21	D10	0,01	*débil*
E45	D21	D26	0,67	ok
E44	C06	D04	0,2	*débil*
E44	C06	D05	0	*no*
E44	C06	D06	0	*no*
E44	C06	D07	0,37	ok
E44	C06	D08	0,22	*débil*
E44	C06	D09	0,23	*débil*
E44	C06	D10	0,17	*débil*
E44	C06	D11	0,1	*débil*
E44	C06	D12	0,03	*débil*
E44	C06	D13	0,03	*débil*
E44	C06	D14	0,1	*débil*
E44	C06	D19	0,34	ok
E44	C06	D20	0,33	ok
E44	C06	D21	0,06	*débil*
E44	C06	D22	0,54	ok
E44	C06	D26	0,64	ok
E48	C07	D03	0,35	ok
E48	C07	D04	0	*no*
E48	C07	D05	0	*no*
E48	C07	D07	0,34	ok
E48	C07	D08	0,56	ok
E48	C07	D09	0,55	ok
E48	C07	D21	0,57	ok
E43	D26	D01	0,14	*débil*
E43	D26	D02	0,33	ok
E43	D26	D04	0,41	ok
E43	D26	D10	0,42	ok
E43	D26	D11	0,51	ok
E43	D26	D12	0,51	ok
E43	D26	D13	0,52	ok
E43	D26	D14	0,52	ok
E43	D26	D15	0,18	*débil*
E43	D26	D16	0,21	*débil*
E43	D26	D17	0,21	*débil*
E43	D26	D18	0,17	*débil*
E43	D26	D19	0,65	ok
E43	D26	D20	0,65	ok
E43	D26	D22	0,08	*débil*
E43	D26	D23	0,03	*débil*
E43	D26	D27	0,21	*débil*
Redundancia media			0,37	

Figura 72. Tablas derivadas de los ajustes de las campañas de Julio de 2007 y 2008, con dianas obteniendo unos valores de redundancia que expresan la fiabilidad de la red.

En las siguientes gráficas se representan los datos obtenidos del ajuste de la red en cuanto a fiabilidad de la misma, representando el número de puntos que presentan un valor de fiabilidad dentro de cuatro intervalos.

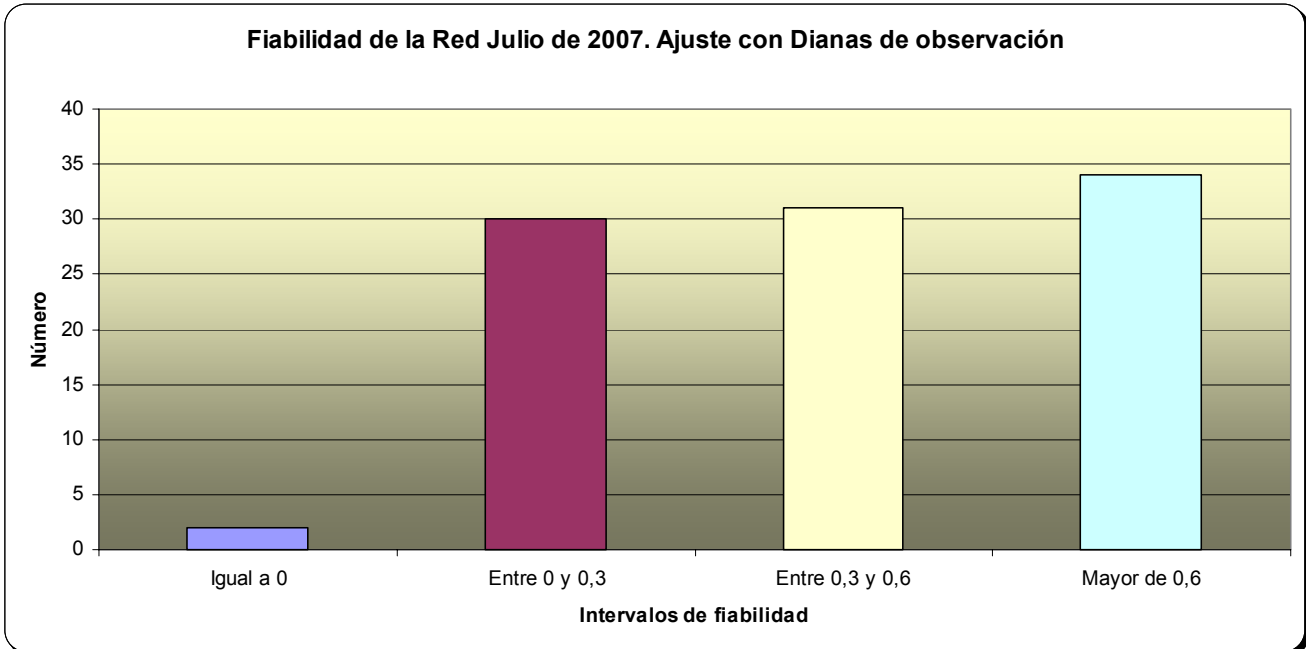


Figura 73. Distribución de los valores de fiabilidad en el ajuste de Julio de 2007 en el cual se ajustaron 97 observaciones.

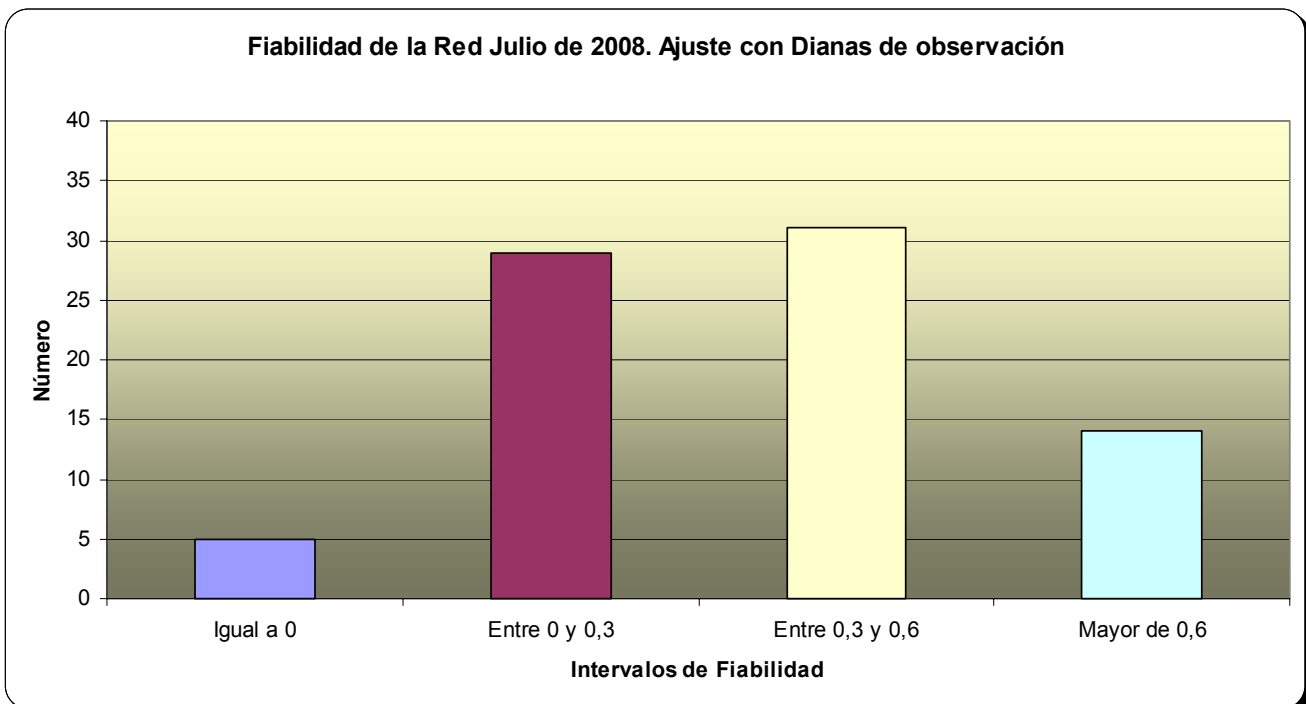


Figura 74. Distribución de los valores de fiabilidad en el ajuste de Julio de 2008 en el cual se ajustaron 79 observaciones.

En las siguientes gráficas se presentan los datos anteriores de fiabilidad mediante el porcentaje de observaciones que quedan dentro de los cuatro intervalos anteriores:

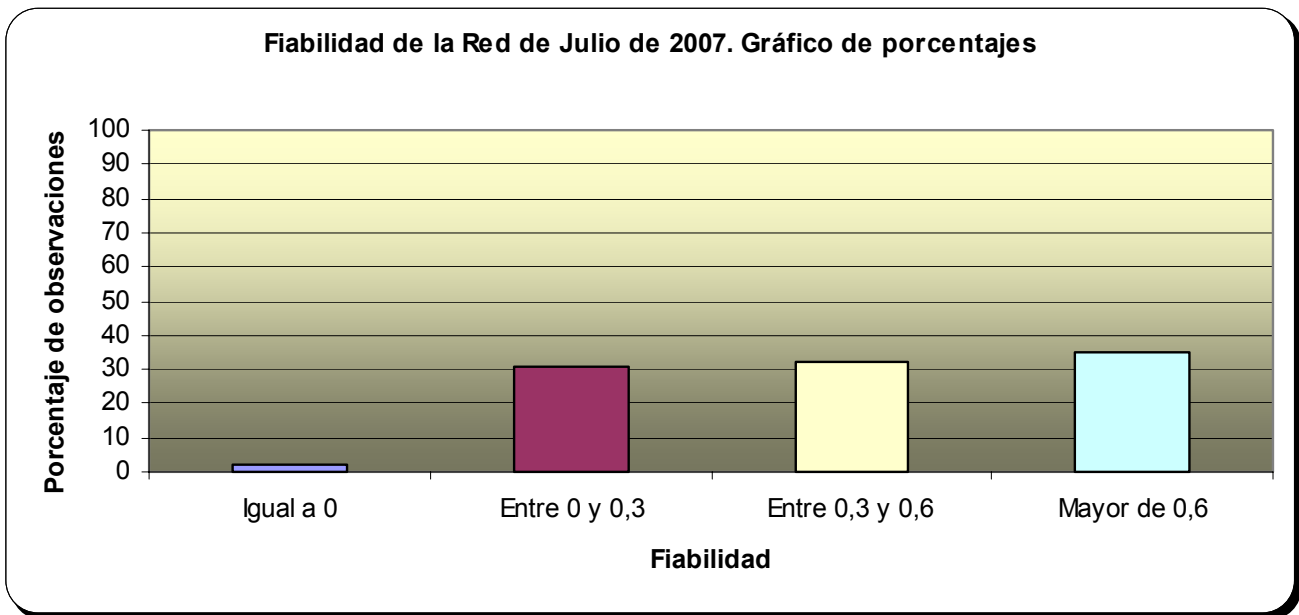


Figura 75. Gráfica de distribución de fiabilidad en el ajuste de la campaña de Julio de 2007 con dianas.

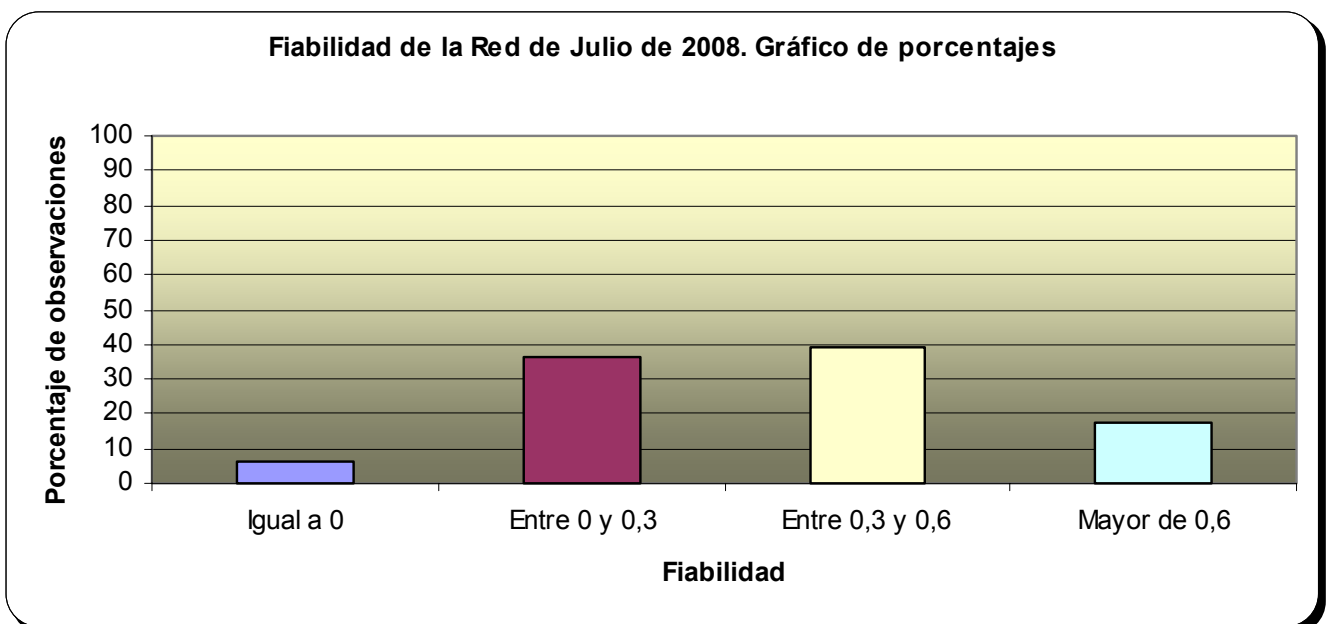


Figura 76. Gráfica de distribución de fiabilidad en el ajuste de la campaña de Julio de 2008 con dianas.

Datos del ajuste de la red referentes a la fiabilidad de la misma, en un ajuste en el cual solamente se han tenido en cuenta las observaciones a clavos:

<b>Ajuste de clavos Julio 2007</b>				
Estación	Referencia	Diana	Redundancia	¿Controlable?
E01	D10	C01	0	*no*
E01	D10	C11	0,68	ok
E01	D10	C12	0,75	ok
E01	D10	C13	0,75	ok
E01	D10	C14	0,67	ok
E01	D10	C15	0,22	*débil*
E01	D10	C16	0,46	ok
E01	D10	C17	0,45	ok
E01	D10	C18	0,22	*débil*
E01	D10	C19	0,26	*débil*
E01	D10	C20	0,26	*débil*
E01	D10	C25	0	*no*
E01	D10	C31	0,26	*débil*
E01	D10	C32	0,19	*débil*
E01	D10	C33	0,22	*débil*
E01	D10	C34	0,63	ok
E01	D10	C35	0,75	ok
E02	D26	C01	0	*no*
E02	D26	C11	0,65	ok
E02	D26	C12	0,7	ok
E02	D26	C13	0,69	ok
E02	D26	C14	0,64	ok
E02	D26	C15	0,63	ok
E02	D26	C16	0,62	ok
E02	D26	C17	0,62	ok
E02	D26	C18	0,63	ok
E02	D26	C19	0,65	ok
E02	D26	C20	0,65	ok
E02	D26	C25	0	*no*
E02	D26	C31	0,65	ok
E02	D26	C32	0,62	ok
E02	D26	C33	0,63	ok
E02	D26	C34	0,63	ok
E02	D26	C35	0,69	ok
E05	D10	C02	0	*no*
E05	D10	C03	0,23	*débil*
E05	D10	C06	0,66	ok
E05	D10	C08	0,74	ok
E05	D10	C09	0,74	ok
E05	D10	C11	0,69	ok
E05	D10	C12	0,62	ok
E05	D10	C13	0,62	ok
E05	D10	C14	0,69	ok
E05	D10	C35	0,63	ok
E05	D10	C36	0,74	ok
E04	D10	C06	0,54	ok

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

E04	D10	C07	0,44	ok
E04	D10	C08	0,4	ok
E04	D10	C09	0,26	*débil*
E04	D10	C11	0,25	*débil*
E04	D10	C12	0,15	*débil*
E04	D10	C13	0,15	*débil*
E04	D10	C14	0,26	*débil*
E04	D10	C16	0,23	*débil*
E04	D10	C17	0,24	*débil*
E04	D10	C19	0,39	ok
E04	D10	C20	0,38	ok
E04	D10	C31	0,39	ok
E04	D10	C34	0,13	*débil*
E04	D10	C35	0,15	*débil*
E04	D10	C36	0,43	ok
E04	D10	C37	0,43	ok
E04	D10	C38	0	*no*
E03	D10	C02	0	*no*
E03	D10	C11	0,51	ok
E03	D10	C12	0,56	ok
E03	D10	C13	0,56	ok
E03	D10	C14	0,51	ok
E03	D10	C15	0,12	*débil*
E03	D10	C16	0,59	ok
E03	D10	C17	0,59	ok
E03	D10	C18	0,12	*débil*
E03	D10	C19	0,58	ok
E03	D10	C20	0,58	ok
E03	D10	C31	0,58	ok
E03	D10	C32	0,14	*débil*
E03	D10	C33	0,12	*débil*
E03	D10	C34	0,51	ok
E03	D10	C35	0,56	ok
E07	D21	C03	0,39	ok
E07	D21	C06	0,07	*débil*
E07	D21	C07	0,13	*débil*
E07	D21	C08	0,55	ok
E07	D21	C09	0,44	ok
E07	D21	C36	0,53	ok
E07	D21	C37	0,13	*débil*
E06	D21	C06	0,45	ok
E06	D21	C07	0,34	ok
E06	D21	C08	0,31	ok
E06	D21	C09	0,32	ok
E06	D21	C36	0,33	ok
E06	D21	C37	0,34	ok
E06	D21	C38	0	*no*
E08	D23	C03	0,24	*débil*
E08	D23	C08	0,51	ok
E08	D23	C36	0,48	ok
Redundancia media			0,42	



Ajuste de clavos Julio 2008				
Estación	Referencia	Diana	Redundancia	¿Controlable?
E41	D26	C01	0,23	*débil*
E41	D26	C11	0,69	ok
E41	D26	C12	0,74	ok
E41	D26	C13	0,74	ok
E41	D26	C14	0,68	ok
E41	D26	C15	0,19	*débil*
E41	D26	C16	0,16	*débil*
E41	D26	C17	0,16	*débil*
E41	D26	C18	0,19	*débil*
E41	D26	C19	0,27	*débil*
E41	D26	C20	0,28	*débil*
E41	D26	C31	0,28	*débil*
E41	D26	C32	0,16	*débil*
E41	D26	C33	0,19	*débil*
E41	D26	C34	0,68	ok
E41	D26	C35	0,72	ok
E42	D26	C01	0,59	ok
E42	D26	C11	0,6	ok
E42	D26	C12	0,64	ok
E42	D26	C13	0,64	ok
E42	D26	C14	0,6	ok
E42	D26	C15	0,6	ok
E42	D26	C16	0,6	ok
E42	D26	C17	0,6	ok
E42	D26	C18	0,6	ok
E42	D26	C19	0,64	ok
E42	D26	C20	0,64	ok
E42	D26	C31	0,64	ok
E42	D26	C32	0,6	ok
E42	D26	C33	0,6	ok
E42	D26	C34	0,6	ok
E42	D26	C35	0,62	ok
E45	D21	C02	0	*no*
E45	D21	C03	0,14	*débil*
E45	D21	C06	0	*no*
E45	D21	C07	0,55	ok
E45	D21	C08	0,55	ok
E45	D21	C09	0,56	ok
E45	D21	C11	0,72	ok
E45	D21	C12	0,68	ok
E45	D21	C13	0,68	ok
E45	D21	C14	0,72	ok
E45	D21	C34	0,72	ok
E45	D21	C36	0,56	ok
E44	C06	C07	0,42	ok
E44	C06	C08	0,14	*débil*
E44	C06	C09	0,14	*débil*

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

E44	C06	C11	0,22	*débil*
E44	C06	C12	0,11	*débil*
E44	C06	C13	0,12	*débil*
E44	C06	C14	0,23	*débil*
E44	C06	C19	0,34	ok
E44	C06	C20	0,33	ok
E44	C06	C31	0,33	ok
E44	C06	C34	0,23	*débil*
E44	C06	C35	0,03	*débil*
E44	C06	C36	0,14	*débil*
E48	C07	C03	0,34	ok
E43	D26	C01	0,14	*débil*
E43	D26	C02	0	*no*
E43	D26	C11	0,51	ok
E43	D26	C12	0,52	ok
E43	D26	C13	0,53	ok
E43	D26	C14	0,52	ok
E43	D26	C15	0,18	*débil*
E43	D26	C16	0,21	*débil*
E43	D26	C17	0,21	*débil*
E43	D26	C18	0,17	*débil*
E43	D26	C19	0,65	ok
E43	D26	C20	0,65	ok
E43	D26	C31	0,65	ok
E43	D26	C32	0,21	*débil*
E43	D26	C33	0,17	*débil*
E43	D26	C34	0,51	ok
E43	D26	C35	0,51	ok
E47	D21	C03	0,42	ok
E47	D21	C07	0,37	ok
E47	D21	C08	0,19	*débil*
E47	D21	C09	0,18	*débil*
E47	D21	C36	0,18	*débil*
Redundancia media			0,41	

Figura 78. Tablas derivadas de los ajustes de las campañas de Julio de 2007 y 2008, con clavos obteniendo unos valores de redundancia que expresan la fiabilidad de la red.

Gráficas representativas de la distribución de los puntos dentro de cuatro intervalos de confianza, referentes a la fiabilidad de los mismos.

Significando cada intervalo:

Igual a 0: mal controlados.

Entre 0 y 0,3: débilmente controlados

Entre 0,3 y 0,6: bien controlados

Mayores o iguales a 0,6: muy bien controlados

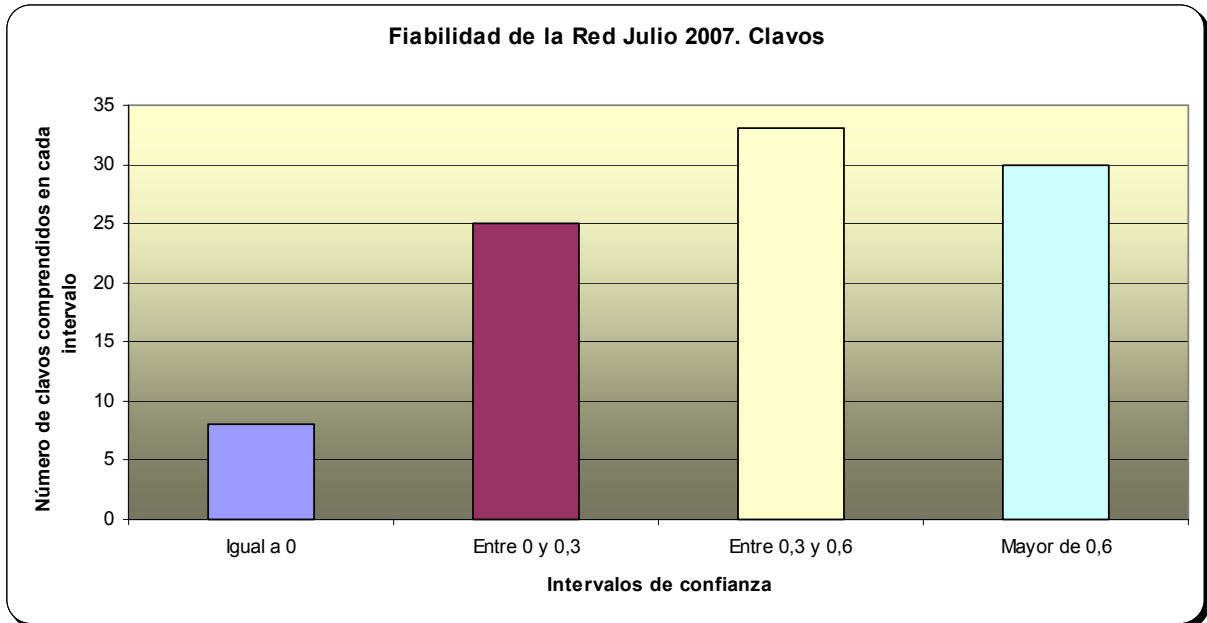


Figura 79. Distribución de los valores de fiabilidad en el ajuste de Julio de 2007 en el cual se ajustaron 96 observaciones.

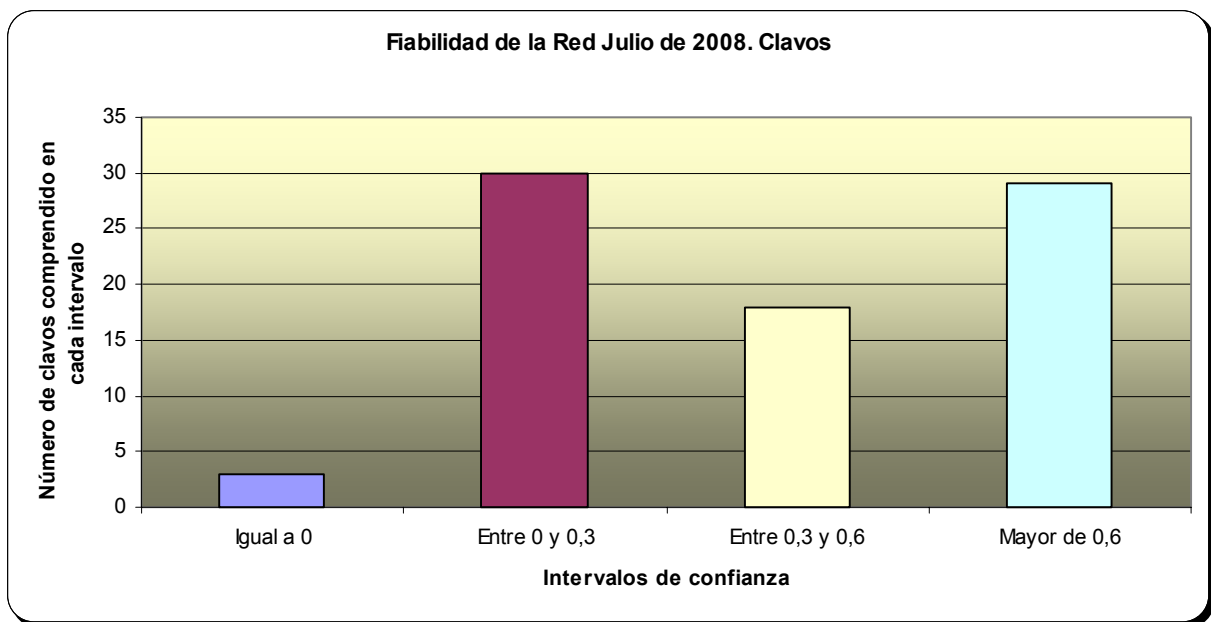


Figura 80. Distribución de los valores de fiabilidad en el ajuste de Julio de 2008 en el cual se ajustaron 80 observaciones.

En las siguientes gráficas se presentan los datos anteriores de fiabilidad mediante el porcentaje de puntos que quedan dentro de los cuatro intervalos anteriores:

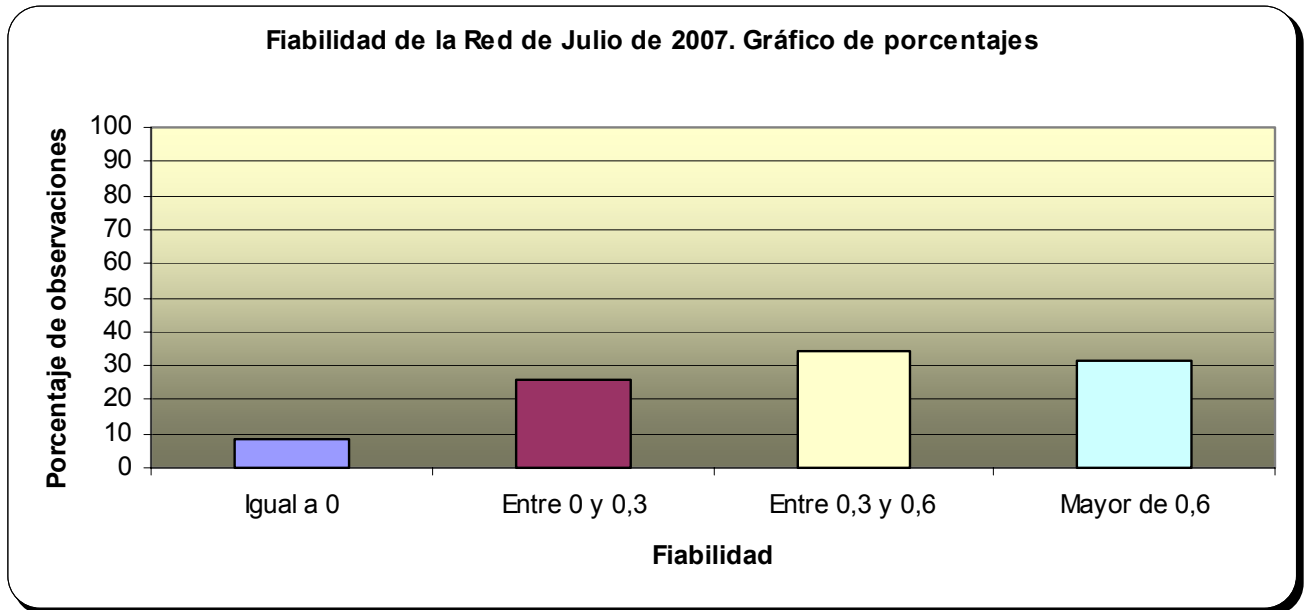


Figura 81. Gráfica de distribución de fiabilidad en el ajuste de la campaña de Julio de 2007 con clavos.

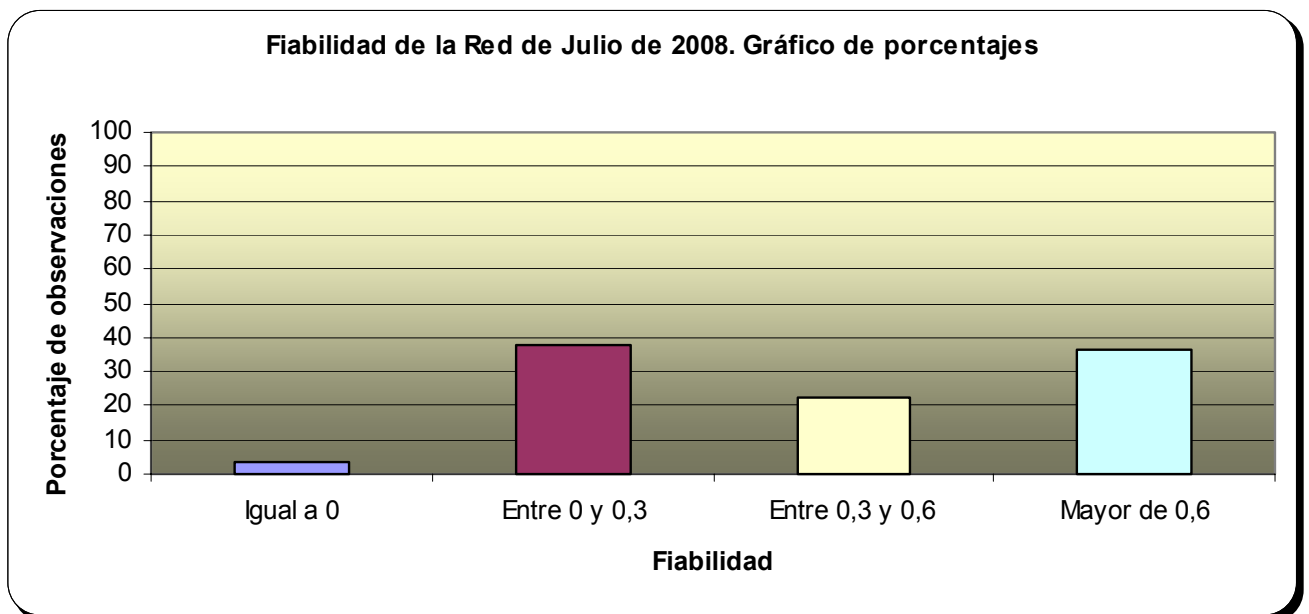


Figura 82. Gráfica de distribución de fiabilidad en el ajuste de la campaña de Julio de 2008 con clavos.

Gráficas en las que se representa la comparativa de la fiabilidad en la distribución de puntos en cuatro intervalos:

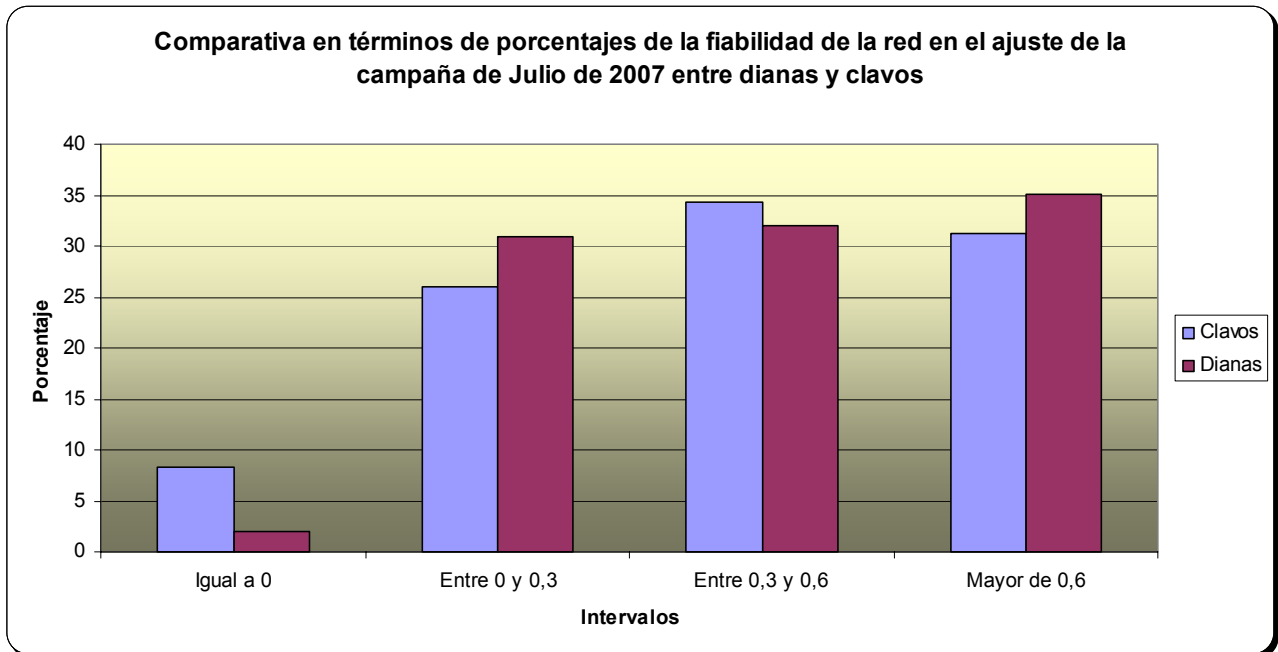


Figura 83. Gráfica comparativa de distribución de fiabilidad en el ajuste de la campaña de Julio de 2007 entre clavos y dianas.

En esta primera campaña, la fiabilidad de la red es mejor en el caso de una señalización mediante dianas que formada por clavos.

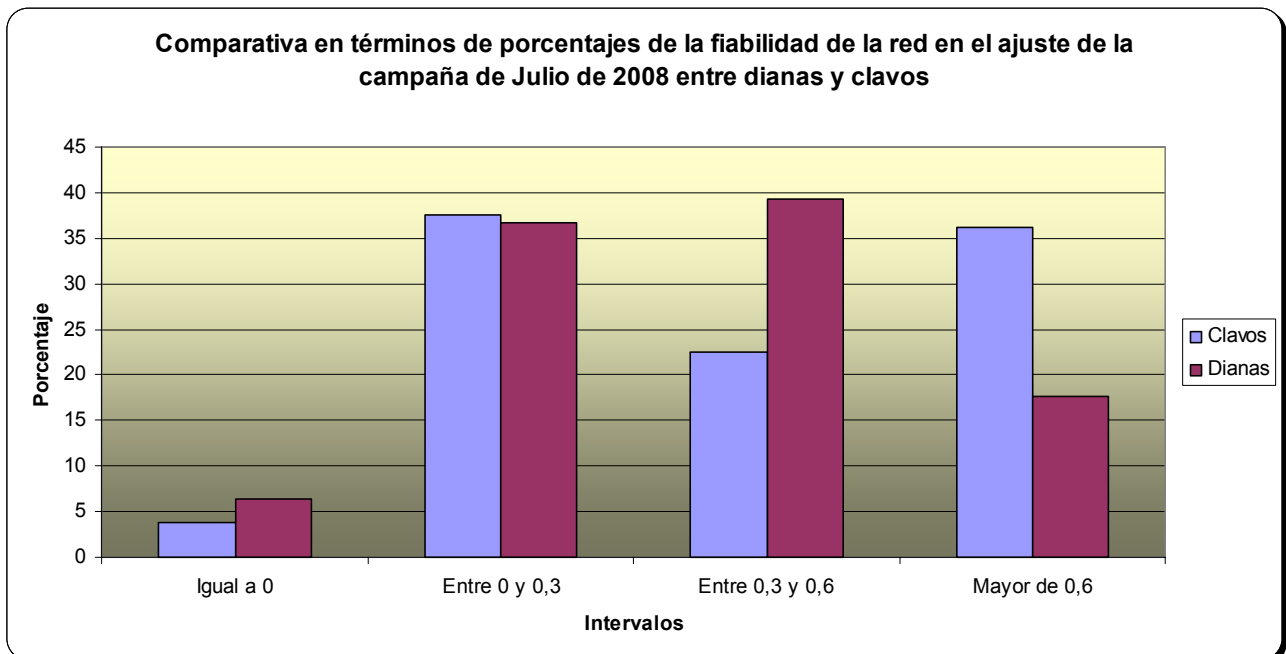


Figura 84. Gráfica comparativa de distribución de fiabilidad en el ajuste de la campaña de Julio de 2008 entre clavos y dianas.

En este segundo caso, 2008, podemos observar como la fiabilidad de la red es mejor en el caso de una señalización mediante clavos.

Como conclusión, se puede establecer que la fiabilidad de la red tanto en el caso de señalización mediante clavos como de dianas, es similar y no se producen cambios considerables.

A la vista de los resultados, se puede extraer otra conclusión, que más o menos ya se conocía, puesto que la fiabilidad de la red depende de la geometría de la misma, se puede observar en este análisis que esto es cierto. Los datos que se obtienen del análisis, no presentan homogeneidad y sabiendo que la geometría de observación de Julio 2007 y Julio 2008 no fue la misma (en Julio 2007 se utilizaron 8 estaciones de control y en Julio de 2008 se utilizaron 7), podemos ver como la modificación de la geometría de la red de observación repercute en los valores de fiabilidad de la misma.

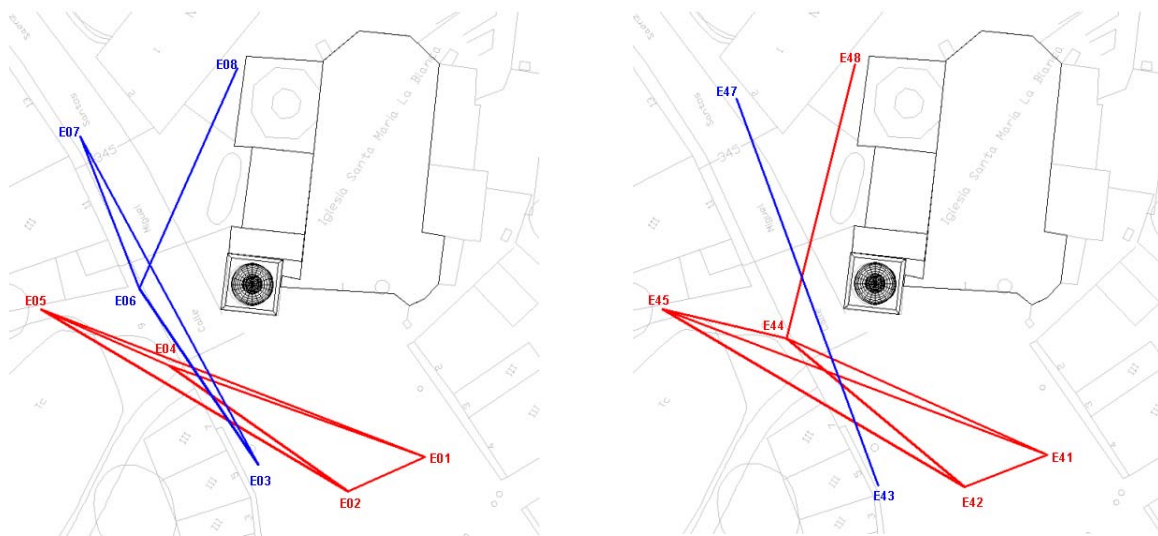


Figura 85. Geometría de la red en Julio de 2007 (izquierda), geometría de la red en Julio de 2008 (derecha).

### 3º Estudio sobre el factor tiempo

En total entre clavos y dianas se observaron tanto en Julio de 2007 como en Julio de 2008, 48 señales de referencia, de las cuales 25 son placas de puntería y 23 clavos.

En el resto de las campañas solamente se observan los clavos y aquellas placas que sirven como referencia en cada una de las series, que generalmente suelen ser D1, D2, D3, que poseen doble señalización y D4, D5, D10, D21, D22, D23, D26, D27, que no poseen doble señalización.

Para realizar el estudio sobre el tiempo, se han centrado los análisis en estas dos campañas, Julio 2007 y Julio 2008, por haberse observado en ambas la doble señalización completa.

Para ello se ha calculado la diferencia de tiempo existente entre la observación a la placa de puntería y al clavo que la acompaña en cada serie y

desde cada una de las estaciones, comparando las lecturas en círculo directo a placa con círculo directo a clavo e igualmente en círculo inverso, obteniendo los siguientes datos:

#### Campaña de Julio de 2007:

Total observaciones	500
Clavos	249
Dianas	251
Mayor diferencia	0:02:46
Mínima diferencia	0:00:00
Media	0:00:08

Figura 86. Datos correspondientes al estudio sobre el tiempo. Julio 2007.

#### Campaña de Julio de 2008:

Total observaciones	500
Clavos	249
Dianas	251
Máxima diferencia	0:02:20
Mínima diferencia	0:00:00
Media	0:00:07

Figura 87. Datos correspondientes al estudio sobre el tiempo. Julio 2008.

Se han analizado 500 observaciones en cada una de las campañas, obteniendo distintos datos:

- Clavos: hace referencia a la elección del tipo de señalización "Clavo", atendiendo al valor de la diferencia de tiempo entre placa y clavo, si esta es positiva, equivale a decir que la observación al clavo ha sido más rápida y por lo tanto la mejor señalización en dicha observación ha sido el clavo.
- Placas: siguiendo con el criterio anterior, en el caso de que la diferencia de tiempo sea negativa, significa que la mejor señalización ha sido la placa.
- Máxima diferencia: es el valor de la mayor diferencia entre tiempo de observación a placa y clavo.
- Mínima diferencia: es el valor de la menor diferencia entre tiempo de observación a placa y clavo.
- Media: la media de las diferencias entre tiempos de observación.

Se observa que los datos obtenidos para ambas campañas son prácticamente los mismos, lo que indica que la diferencia de tiempo de observación entre un tipo de señalización u otro es el mismo.

Aunque se debe tener en cuenta que los clavos se encuentran a partir de la localización de las placas, es decir, seguramente sin la existencia de las placas al lado de los clavos, sería bastante costoso y se perdería bastante tiempo en buscar los puntos sobre el edificio, de lo que se deriva, que a pesar de que no existe diferencia de tiempo, entre observaciones a una u otra señalización, se produce un efecto negativo sobre este factor sí solamente se utilizan como señalización clavos.

#### 4º Coste

Coste de las placas de puntería:

##### Precios unitarios

	Precio con I.V.A. (en euros)
Placa	6
Acetato	1
Pega especial	11,90
Tirafondos	0,05

	Precio con I.V.A. (en euros)	Unidades	Precio con I.V.A. (en euros)
Placa	6	1	6
Acetato	1	1	1
Adhesivo especial	11,90	0,04	0,52
Tirafondos	0,05	2	0,1
		<b>Coste total por placa</b>	<b>7,62</b>

Figura 88. Tablas desglosadas de precios correspondientes a las placas de puntería.

Con un coste total para todas las dianas colocadas (25) de **189,40 euros**.



Figura 89. Imagen de las placas de puntería de acero inoxidable, con y sin el acetato adherido.



Coste de los clavos:

**ACCESORIOS LEICA**  
 Todos los accesorios de Leica  
 Geosystems con entrega en 24 horas

**Clavo de espiga estriada** **21.00 €**

Clavos de espiga estriada y cabeza con marca de cruz.  
 Longitud: 30 mm  
 Diámetro cabeza: 9mm

902 93 02 83

ALQUILER DE EQUIPOS LEICA...

Modelo	Descripción	Cantidad	Precio
1005	Clavo Geopunt 50mm de diámetro cabeza: 24mm	Bolsa 100 uds.	65,00 €
CLAVONIF	Clavo de nivelación para pared de inoxidable, utilizando resinas de fijación		9,00 €
C2	Cabeza semiesférica. Longitud: 25mm. Cabeza redonda de D: 10mm	Caja 100 uds.	43,00 €
C3	Cabeza semiesférica. Longitud: 30mm. Cabeza redonda de D: 15mm	Caja 50 uds.	30,00 €
C4	Cabeza semiesférica. Longitud: 40mm. Cabeza redonda de D: 20mm	Caja 25 uds.	23,00 €
TOP30	Clavos de espiga estriada y cabeza con marca de cruz. Longitud: 30mm. Diámetro cabeza: 9mm	Caja 100 uds.	21,00 €
C9/30	Clavo C9 sin arandela. Longitud: 30mm Diámetro cabeza: 9mm	Caja 100 uds.	12,00 €
C9/22	Clavo C9 con arandela. Longitud: 22mm Diámetro cabeza: 9mm	Caja 100 uds.	13,00 €
	Clavos de espiga estriada yClavo SPIT. Clavo universal cabeza con marca de cruz. X-DNI 27 PB	Caja de 100 uds.	

Figura 90. Tipos de clavos en el mercado con sus correspondientes precios obtenidos del siguiente enlace:

[http://www.instop.es/accesorios/clavos/cross\\_clavo\\_espiga\\_plata.php](http://www.instop.es/accesorios/clavos/cross_clavo_espiga_plata.php)  
 Tabla de precios a fecha Julio de 2009

El coste del tipo de clavo utilizado, clavo de acero de espiga estriada y cabeza con marca de cruz es de 21 euros 100 unidades, por tanto cada clavo tiene un coste de **0,21 euros**.

Puesto que se han utilizado en este proyecto 23 clavos, el coste que ha supuesto es de **4,83 euros**.

La diferencia de precio entre una señalización y otra es muy clara, siendo la misma de **7,41 euros por señal**.

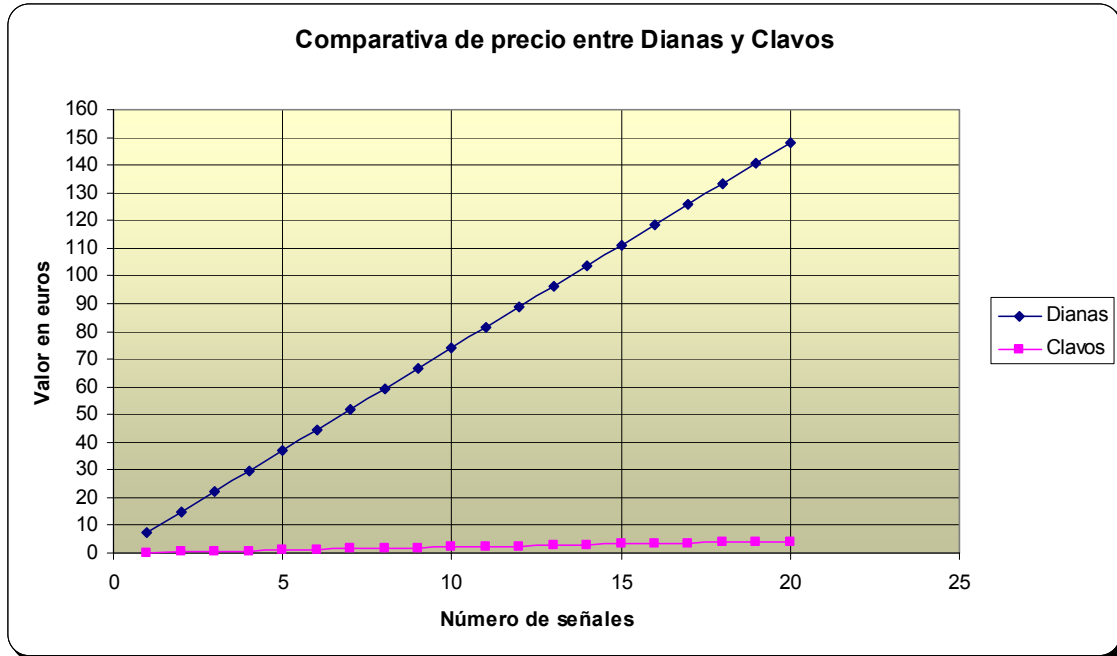


Figura 91. Comparativa de precio en función del número de elementos entre placas de puntería y clavos.

### 5º Estudio sobre la complejidad del ajuste

En lo referente a la complejidad del ajuste se puede asegurar que la elección de una u otra señal, no influye en absoluto, puesto que la metodología de observación no cambia y por consiguiente las observaciones tampoco varían y este es el único factor que influye a la hora de realizar el ajuste.

#### 4.4.3.- Tabla obtenida del análisis

Con los análisis realizados, la tabla de resultados se compone de la siguiente forma:

	Resultado	Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Señalización	Pasar de placas a clavos	=	=	+	-	=

Figura 92. Tabla de resultados correspondiente al estudio: pasar de placas a clavos.

Los resultados reflejan que ambos tipos de señalización son válidos en términos de precisión y fiabilidad, en ambos factores no se aprecian diferencias significativas que nos inclinen por uno u otro tipo de señalización. Lo mismo

ocurre en cuanto a la complejidad del ajuste, puesto que las observaciones no cambian.

En cuanto al coste si que se produce una diferencia significativa, puesto que el precio de los clavos es mucho menor que el de las placas de puntería.

En lo referente al tiempo, las diferencias entre tiempos de observación en una y otra señalización no son significativas, es más, son prácticamente iguales, aunque existe la salvedad comentada anteriormente de la dificultad de localizar los clavos en la fachada del conjunto sin una señal cercana que los indique, por ello, el efecto sobre este factor es negativo.

Por tanto, sí que es recomendable, atendiendo al coste del proyecto, la elección de una señalización formada por clavos, pero siempre y cuando se acompañen los mismos de algún elemento señalizador (que no suponga alto coste) que facilite la localización de dicha señalización.

#### **4.5.- Señalización: Pasar de placas a prismas**

Actualmente podemos encontrar en el mercado instrumentación geodésica-topográfica que poseen sistemas motorizados de movimiento y función de reconocimiento automático de señales (autofocus y autolock).

- Autofocus: sistema de reconocimiento de señales estáticas; mediante un software específico, la propia estación total robotizada es capaz de reconocer y enfocar perfectamente a una señal de la cual se conoce su dirección.

El funcionamiento de este sistema en las estaciones Leica serie TPS 1000 y 2000, es el siguiente:

El seguimiento automático de prisma ATR1 emite una luz láser. La luz reflejada se guía a una cámara incorporada (CCD). Allí, se analiza la posición del punto de luz reflejada y se determina la desviación del centro en los sentidos Hz y V. Los valores de desviación sirven para que los motores lleven el retículo al centro del prisma o sigan un prisma en movimiento. Para optimizar los tiempos de medición, el retículo no se lleva al centro exacto del prisma. La desviación puede ser de 5mm como máximo. A continuación, se corrigen los ángulos Hz y V por el valor de la desviación comprendida entre el retículo y el centro del prisma. De esta manera, los ángulos tienen el centro del prisma como punto de referencia, independientemente de si el retículo se encuentra en el centro del prisma o no.

El área activa del seguimiento automático de prisma ATR1 es el tercio central del campo visual del anteojo. Dentro de este área, el seguimiento automático de prisma ATR1 reconoce inmediatamente al prisma. De no estar en esa área se realiza una exploración del campo visual del anteojo siguiendo la forma de una espiral. El tiempo necesario de esta exploración es de aproximadamente 2 - 4 segundos.

- Autolock: sistema que permite el seguimiento continuo del prisma que es desplazado por el propio operador, que con un sistema de mando remoto es capaz de grabar los puntos.

Entre este tipo de instrumentación se encuentran las estaciones totales robotizadas Leica TPS system 1000-2000, cuyas series incluyen instrumentación con el sistema ATR de reconocimiento automático de señales y presentan varias gamas de instrumentos en función de la precisión angular que poseen:

Tipos	Precisión Hz, V (DIN18723)
1100	3" (1 mgon)
1500	2" (0.6 mgon)
1700	1.5" (0.5 mgon)
1800	1" (0.3 mgon)
2003	0.5" (0.15 mgon)

<b>Visualización</b> (unidad mínima)	1" (0.1mgon)
Tipo 1100	1" (0.5 mgon)
Tipo 2003	0.1"(0.01 mgon)
<b>Posibilidad de selección</b>	360°, 400 gon, V%, 6400 mil
<b>Método</b>	absoluto. continuo

Figura 93. Tabla de precisiones angulares correspondiente a la serie TPS 1000-2000 de la casa Leica.

Debido a esta instrumentación que ya ha sido empleada en distintos trabajos de control geométrico de estructuras, vamos a realizar un estudio sobre el sistema de señales que este tipo de instrumentación es capaz de detectar automáticamente.

Las distintas señales que son capaces de detectar automáticamente estos instrumentos son:

- Dianas reflectantes de 60 x 60 mm
- Prisma circular
- Prisma de 360°, o también llamado de reflexión total
- Miniprisma

En las siguientes gráficas se puede observar la precisión que se puede alcanzar, según el fabricante (sería conveniente realizar comprobaciones en campo, puesto que estos parámetros suelen establecerse en laboratorio y con unas condiciones ideales), en la observación angular a distintas señales mediante el sistema ATR. Las gráficas han sido obtenidas de <http://www.eltopografo.cl/descargas/leicaTPS1000-2000espaol.pdf> manual de usuario de las estaciones totales de Leica serie TPS 1000.

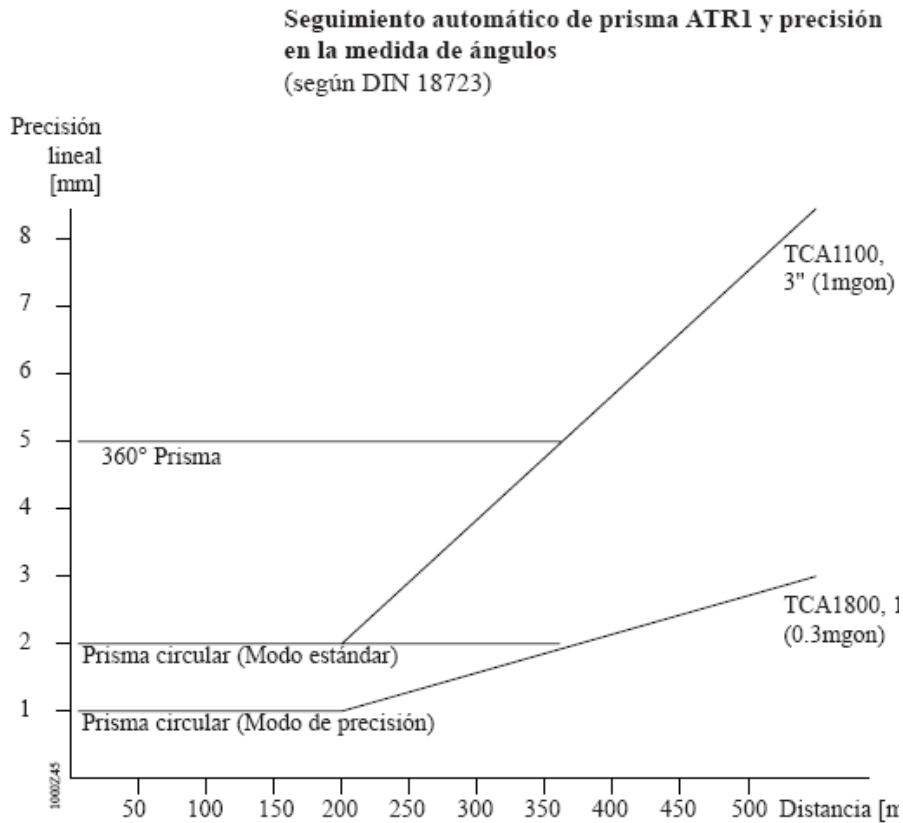


Figura 94. Tabla que expresa la precisión lineal del instrumento en función de su precisión angular y la distancia a la que se observa, en los instrumentos ATR de la serie 1000 de Leica.

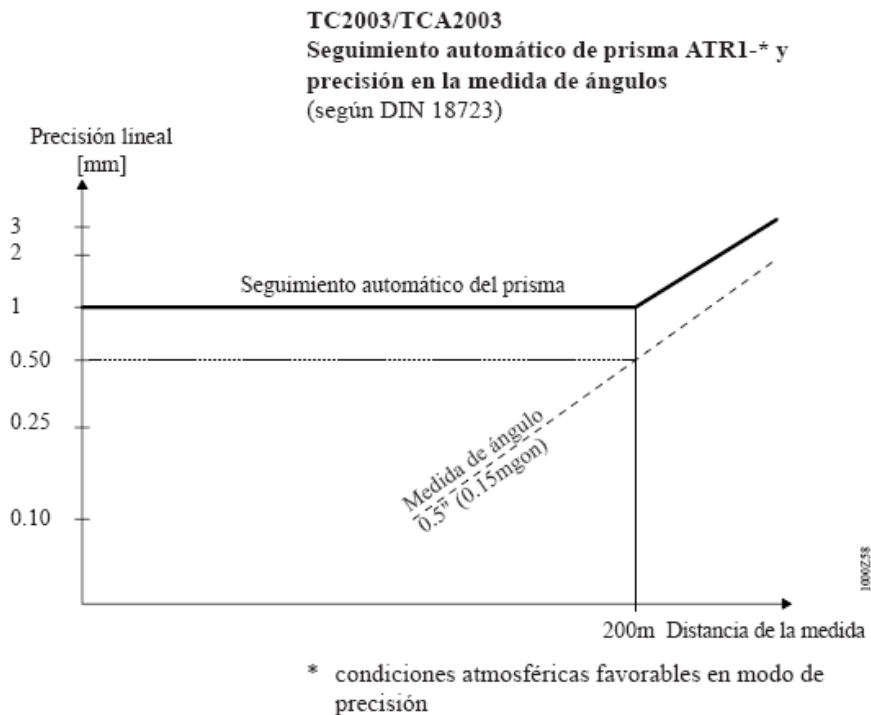


Figura 95. Tabla que expresa la precisión lineal del instrumento en función de su precisión angular y la distancia a la que se observa, en los instrumentos ATR de la serie 2000 de Leica.

#### **4.5.1.- Tabla teórica y justificación**

Partimos de la siguiente propuesta:

Propuesta		Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Señalización	Pasar de placas a prismas	+	=	-	+	=

Figura 96. Tabla teórica sobre el estudio: Pasar de placas a prismas.

#### **4.5.2.- Pruebas realizadas**

Este sistema de señales y el tipo de instrumentación no se ha utilizado en este proyecto, por lo tanto no se puede realizar un análisis en profundidad contrastando con valores obtenidos en campo, pero aún así, se va a proceder a describir sus características más destacables, basando el proceso en los datos aportados por el fabricante y relacionando con los datos que sí se han obtenido para la señalización mediante placas y clavos.

##### *1º Estudio sobre la precisión*

Como se puede ver en las figuras 94 y 95, este instrumental de reconocimiento automático de señales, abarca un amplio abanico de precisiones angulares, desde 1 mgon a 0,15 mgon, lo que nos permite hacer un estudio de errores angulares como los realizados en el apartado 4.2.2 estudio de la precisión. Ahora se debe tener en cuenta que al utilizar una instrumentación que es capaz de reconocer automáticamente la señal de puntería y el operador no interviene en la realización de la observación, se eliminan varios errores de la ecuación, el error de puntería y el error de señal. Si además se utiliza un sistema de centrado forzoso para estacionar el instrumento, se eliminará también el error de estacionamiento y por tanto el error de dirección, consiguiendo precisiones en la determinación de coordenadas inferiores al milímetro.

En las siguientes tablas se pueden observar los resultados obtenidos del cálculo de los distintos errores que intervienen y el error final del cálculo de una intersección directa, mediante el empleo de distinta instrumentación con sistema ATR y distintos métodos de estacionamiento.

<b>Instrumento ATR convencional sobre tripodes</b>	<b>Ángulos en gones y distancias en m</b>	<b>Ángulo de intersección</b>
Sensibilidad	0,0002	80 <sup>g</sup>
Aumentos	30	
Apreciación	0,0005	
Error de estación	0,001	
Error de señal	0	
Longitud	30	
Error de verticalidad	1,66667E-05	
Error de dirección	42,44133333	
Error de puntería	0,0000	
Error de lectura	0,0001	
Error angular	42,4413	
<b>Error máximo de la intersección directa =</b>		<b>0,0017</b>

Figura 97. Tabla con los errores obtenidos supuesto el empleo de una estación total de precisión convencional provista de sistema ATR (localización automática de señales) y estacionada sobre trípode.

<b>Instrumentación ATR geodésica sobre tripodes</b>	<b>Ángulos en gones y distancias en m</b>	<b>Ángulo de intersección</b>
Sensibilidad	0,0002	80 <sup>g</sup>
Aumentos	30	
Apreciación	0,000015	
Error de estación	0,001	
Error de señal	0	
Longitud	30	
Error de verticalidad	1,66667E-05	
Error de dirección	42,44133333	
Error de puntería	0,0000	
Error de lectura	0,0002	
Error angular	42,4413	
<b>Error máximo de la intersección directa =</b>		<b>0,0017</b>

Figura 98. Tabla con los errores obtenidos supuesto el empleo de una estación total geodésica provista de sistema ATR (localización automática de señales) y estacionada sobre trípode.

<b>Instrumentación ATR convencional + pilares de observación</b>	<b>Ángulos en gonos y distancias en m</b>	<b>Ángulo de intersección</b>
Sensibilidad	0,0002	80 <sup>g</sup>
Aumentos	30	
Apreciación	0,0005	
Error de estación	0	
Error de señal	0	
Longitud	30	
Error de verticalidad	1,66667E-05	
Error de dirección	0	
Error de puntería	0,0000	
Error de lectura	0,0002	
Error angular	0,0002	
<b>Error máximo de la intersección directa =</b>		<b>&lt;1 mm</b>

Figura 99. Tabla con los errores obtenidos supuesto el empleo de una estación total de precisión convencional provista de sistema ATR (localización automática de señales) y estacionada sobre pilar de observación.

<b>Instrumentación ATR geodésica + pilares de observación</b>	<b>Ángulos en gonos y distancias en m</b>	<b>Ángulo de intersección</b>
Sensibilidad	0,0002	80 <sup>g</sup>
Aumentos	30	
Apreciación	0,000015	
Error de estación	0	
Error de señal	0	
Longitud	30	
Error de verticalidad	1,66667E-05	
Error de dirección	0	
Error de puntería	0,0000	
Error de lectura	0,0000	
Error angular	0,000018	
<b>Error máximo de la intersección directa =</b>		<b>&lt; 1mm</b>

Figura 100. Tabla con los errores obtenidos supuesto el empleo de una estación total geodésica provista de sistema ATR (localización automática de señales) y estacionada sobre pilar de observación.

De este estudio, se puede concluir que la precisión en la determinación de las coordenadas de los puntos aumenta considerablemente en el caso de utilizar este tipo de señalización e instrumentación, tanto si se estaciona sobre



Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

trípodes (en este caso la precisión respecto a la señalización mediante placas de puntería o clavos aumenta el doble, se pasa de una precisión de 0,0034 mm a 0,0017 mm) como si se utilizan pilares de observación (mediante los cuales se consigue una precisión inferior al milímetro).

### 2º Estudio sobre la fiabilidad

Como se ha visto en otros puntos de este proyecto, la fiabilidad depende de la geometría de la red, por consiguiente el cambio de señalización o instrumentación no afecta a este factor.

### 3º Estudio sobre el coste

Para este estudio, se han buscado precios de distinta señalización que el sistema ATR es capaz de detectar automáticamente como:

Miniprismas:



**GMP104 Mini Prisma con estribo L**

Ref:641762  
Fabricante:( Leica Geosystems )  
Plazo estimado de entrega: Consultar  
Descripción:

**113,00 €**

Cantidad:

  
Añadir al Carro

[Alguna duda sobre el producto?](#)


Figura 101. Miniprisma con estribo en L. Información consultada en: <http://www.nivela.net/GMP104-Mini-Prisma-con-estribo-L> Julio de 2009


- 0134 Miniprisma *Leica GMP 101* (tablilla, nivel, estuche y punta de puntería) 230,00 €
- 0135 Miniprisma *Leica GMP 111* (Set 4 mini-bastones y soporte con nivel) 246,00 €
- 0146 Miniprisma *SMP222 Basic Japan* + 4 mini-bastones 271,00 €
- 0140 Set miniprisma (miniprisma, funda y 3 mini-bastones) 170,00 €
- 0145 Miniprisma en soporte plástico 150,00 €

Figura 102. Precios de miniprismas: Información consultada en: [www.toposistemas.es](http://www.toposistemas.es) Julio de 2009

### Dianas reflectantes:

**Detalle del producto** 60 x 60 mm.

Imprimir 



**Datos técnicos:**  
Diana Reflectante 60 x 60 mm


Actua como prisma con cualquier estación.


Diana adhesiva de gran durabilidad para trabajos de precisión y puntos de control.

**Precio venta:** 7.35 € (IVA no incluido)

[clic para ampliar](#)

**Detalle del producto** 4 Ud de 30 x30 mm

Imprimir 



**Datos técnicos:**  
4 Ud .de Diana Reflectante 30 x 30 mm.

Actua como prisma con cualquier estación.

Dianas adhesivas de gran durabilidad para trabajos de precisión y puntos de control.

**Precio venta:** 8.93 € (IVA no incluido)

[clic para ampliar](#)

Figura 103. Precios de dianas reflectantes. Información consultada en: <http://www.intotopografia.com/detalle.php?id=157&tipo=venta> Julio de 2009

0148 Dianas reflectantes *Leica* 20x20mm. (20 piezas) 67,00 €

0149 Dianas reflectantes *Leica* 40x40mm. (20 piezas) 75,00 €

0150 Dianas reflectantes *Leica* 60x60mm. (20 piezas) 83,00 €

Figura 104. Precios de dianas reflectantes. Información consultada en: [www.toposistemas.es](http://www.toposistemas.es) Julio de 2009

### Prismas 360°:



**639985**

GRZ4 Reflector 360 grados

1.036,00 € 



**754384**

Prisma GRZ122

1.836,00 € 

Figura 105. Precios de prismas de reflexión total. Información consultada en: <http://www.nivela.net/GMP104-Mini-Prisma-con-estribo-L> Julio de 2009

### Prismas Circulares:



**362830**

GPR1 Prisma circular, en estuche.

196,00 € 

Figura 106. Precio de prisma circular. Información consultada en: <http://www.nivela.net/GMP104-Mini-Prisma-con-estribo-L> Julio de 2009

0137 Prisma circular Leica *GPR 113* (con portaprismas rojo) 205,00 €

0138 Prisma circular Leica *GPR 111* (prisma, soporte y señal de puntería) 221,00 €

0139 Prisma circular Leica *GPR 121* (prisma, soporte y señal de puntería) 295,00 €

Figura 107. Precios de prismas circulares. Información consultada en: [www.toposistemas.es](http://www.toposistemas.es) Julio de 2009

Estableciendo un precio medio por unidad y tipo de señal que se puede utilizar de:

- Diana reflectante: 7,97 euros
- Miniprisma: 185,71 euros
- Prisma circular: 229 euros
- Prisma 360°: 1436 euros

Se pueden obtener las siguientes gráficas:

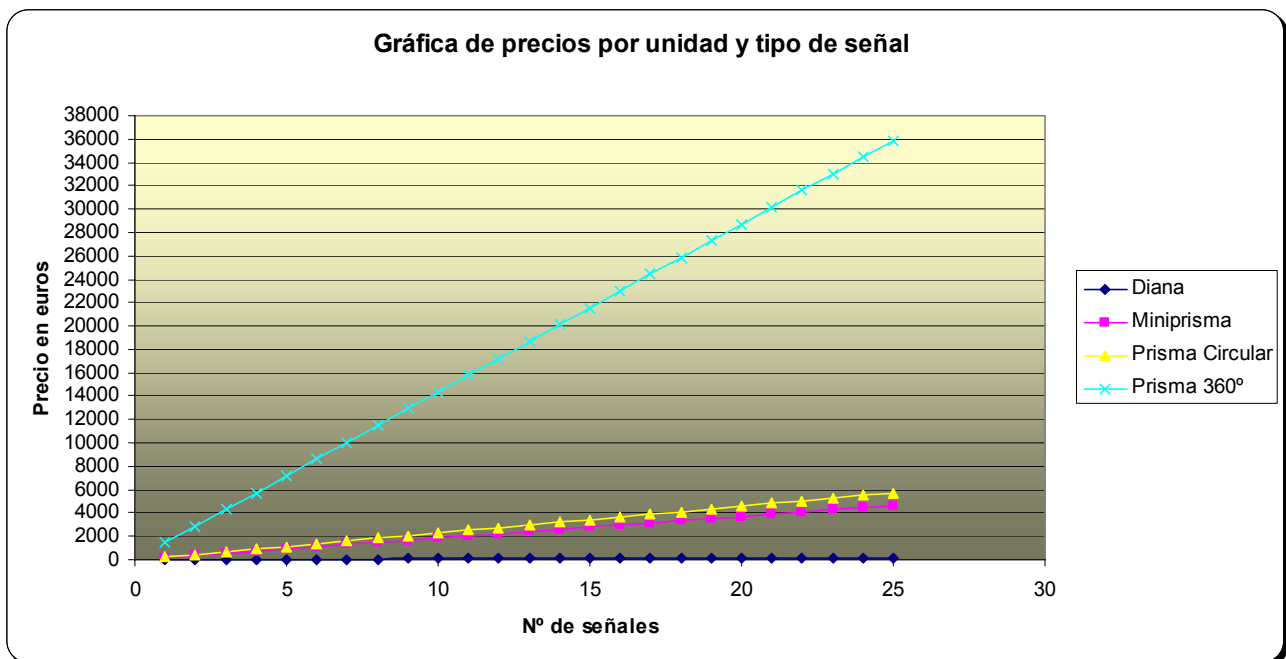


Figura 108. Gráfica que representa el coste en euros de cada sistema de señalización en función del número de elementos a utilizar.

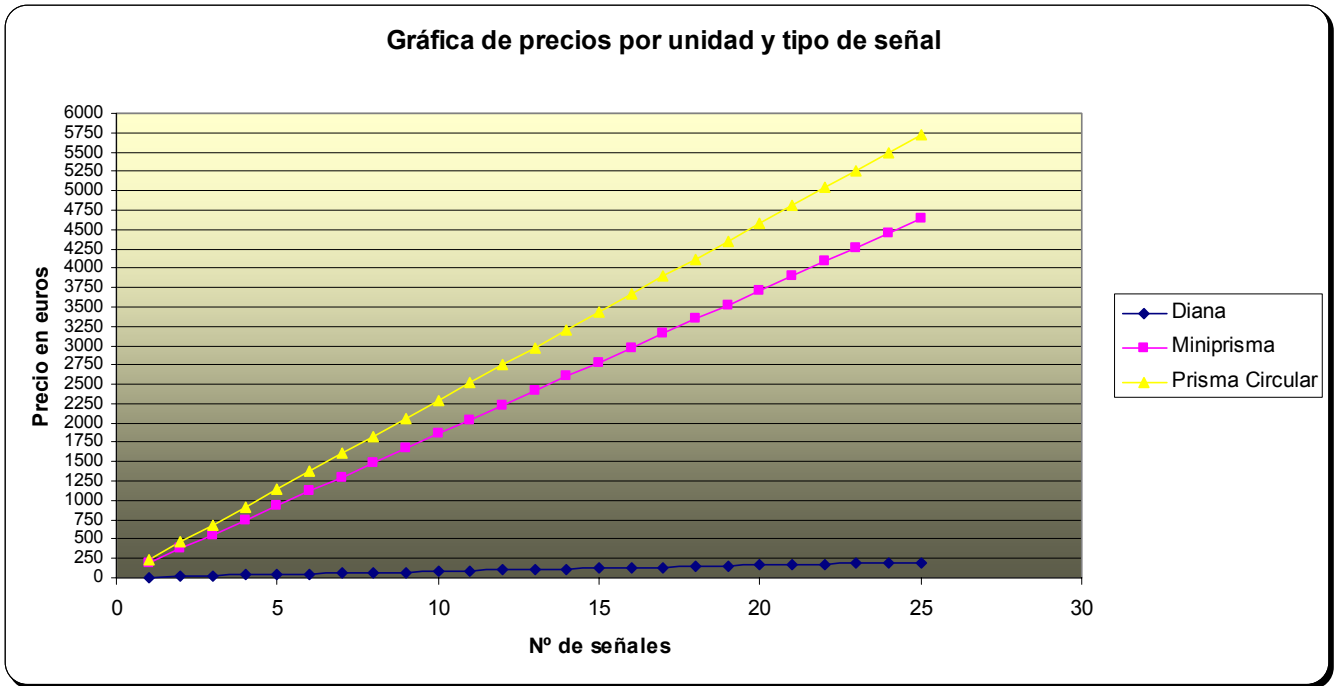


Figura 109. Gráfica que representa el coste en euros de cada sistema de señalización en función del número de elementos a utilizar. Difiere de la figura 108, puesto que en este caso se ha eliminado de la gráfica la señalización de prismas de reflexión total (360°) para poder cambiar la escala y resaltar la variación del precio en los otros tres sistemas.

#### 4º Estudio sobre el tiempo

Los datos que conocemos sobre el tiempo que se tarda en realizar una observación, mediante este sistema de medida, son solamente los aportados por el fabricante y para la observación fina al centro de la señal, no teniendo datos sobre el tiempo que tarda el instrumento para moverse por él mismo entre un ángulo determinado tanto en el plano horizontal como en el vertical (como por ejemplo el tiempo que tarda en realizar Bessel automáticamente), pero sí que se puede decir, que tarda menos que un operador que realice la misma observación, puesto que solamente el tiempo que se pierde apuntando al centro de la señal, enfocando manualmente para eliminar la paralaje y apretando el botón de registro, es un proceso que se automatiza en uno sólo, no tardando el instrumento por sí solo más de 4 segundos como se indica el fabricante en el manual de usuario en la página web: [http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/TM30/brochures/TM30\\_Brochure\\_es.pdf](http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/TM30/brochures/TM30_Brochure_es.pdf)

#### 5º Estudio sobre la complejidad del ajuste

La complejidad del ajuste solamente se verá afectada si se introducen en el cálculo observaciones distintas, como es el caso de medida de distancias, u observaciones con distinta precisión provenientes del mismo instrumento o la introducción de observaciones de distintos instrumentos con distintas precisiones, que no es el caso, por lo tanto este factor no se verá afectado.

Sin embargo si que se puede decir que utilizando una señalización adecuada a la instrumentación que permita la detección automática de las señales, se mejora la complejidad del ajuste si hablamos de la primera fase del ajuste, que es la revisión manual que se realiza antes de introducir las observaciones en el ajuste, en cuanto a observaciones olvidadas o mal realizadas por parte del operador, puesto que en el caso de utilizar una estación robotizada capaz de detectar y observar por sí sola los puntos de estudio, se elimina al operador de la ecuación, y por tanto todos los posibles errores que un operador humano pueda cometer.

Con el fin de eliminar cualquier tipo de error grosero que pueda cometer la estación observando por sí misma, se puede cambiar el modelo de ajuste introduciendo un ajuste por métodos robustos que elimine aquellos posibles errores que a simple vista no lo parecen pero que pueden ser groseros.

#### **4.5.3.- Tabla obtenida del análisis**

Con los análisis realizados se construye la tabla de resultados que queda de la siguiente forma:

Resultado		Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Señalización	Pasar de placas a prismas	+	=	-	+	=

Figura 110. Tabla de resultados del análisis sobre la propuesta: Pasar de placas a prismas.

Como conclusión a este análisis, se observa como la precisión aumenta considerablemente, incluso se podrían conseguir, teóricamente, precisiones inferiores al milímetro. Además al utilizar instrumentación de reconocimiento automático de señales, se reduce el tiempo de observación, lo que por otra parte disminuye el coste.

Existe una parte negativa que influye sobre el coste, puesto que esta señalización es más cara que las anteriores se aumenta el coste del proyecto, teniendo en cuenta además que para conseguir esas precisiones que se han comentado, se requiere una instrumentación específica, puesto que la señalización mediante prismas, sin la utilización de una instrumentación que sea capaz de reconocerlos automáticamente no tiene mucho sentido, puesto que solamente se aumenta el coste del proyecto sin conseguir mejoras tangibles.

#### **4.6.- Observaciones: Eliminar lecturas a la referencia**

##### **4.6.1.- Tabla teórica y justificación**

Propuesta		Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Observaciones	Reducir nº de lecturas a referencia	=	=	+	+	-

Figura 111. Tabla teórica del análisis sobre la propuesta: Reducir número de lecturas a referencia.

La metodología de trabajo desarrollada en el proyecto de Agoncillo, implica la observación a un punto de referencia al inicio y final de la observación a cada punto de control, de esta forma, los ángulos internos se obtienen como diferencia de la observación al punto de control y a la referencia y al menos con tres referencias distintas, puesto que se realizan tres series de medida desde cada estación. Con el fin de reducir el trabajo en campo, se va a proceder al estudio en el caso de eliminar lecturas a la referencia, suponiendo que se visa a la referencia solamente al inicio y al final de cada serie.

A priori se puede establecer que este cambio va a ser positivo tanto en el coste como en el tiempo de observación (se reducen observaciones, por tanto se reduce el tiempo y con ello el coste) y negativo para la complejidad del ajuste, puesto que al eliminar observaciones a las referencias los ángulos obtenidos pasan de ser calculados independientemente a ser valores correlados, como se verá más adelante.

A continuación se exponen los estudios realizados sobre los factores.

##### **4.6.2.- Pruebas realizadas**

###### *1º Precisión y fiabilidad*

En primer lugar se debe comentar que el modelo de cálculo desarrollado para el proyecto de auscultación de Agoncillo, no contempla que las observaciones al punto contengan menos de cuatro lecturas, y dos de ellas deben ser a la referencia. En el caso de estudio que nos ocupa, se eliminan las observaciones a la referencia en todos los puntos de cada serie, excepto al inicio y al final de las mismas, por lo que el programa no es capaz de realizar el ajuste. El modelo matemático utilizado para el cálculo no contempla la inclusión de ángulos dependientes entre sí, por lo tanto no se puede proceder al estudio de la precisión y la fiabilidad de las observaciones con datos procedentes de un ajuste previo.

A priori se puede decir que hablando de precisión, como los observables son los mismos y la instrumentación también, las precisiones obtenidas van a ser parecidas o iguales.

En cuanto a la fiabilidad, no varía la geometría de la red, por tanto la fiabilidad va a ser la misma que en casos anteriores.

No obstante, se realizarán algunas consideraciones al final.

### 2º Estudio sobre el tiempo

Suponiendo que solamente se realiza una observación a la referencia al inicio y final de cada serie, se reduce el número de observaciones a la mitad en cada serie, debido a que con la metodología de observación aplicada, se observa a una referencia al inicio y final de la observación a cada punto, lo que supone el aumento de observaciones al doble.

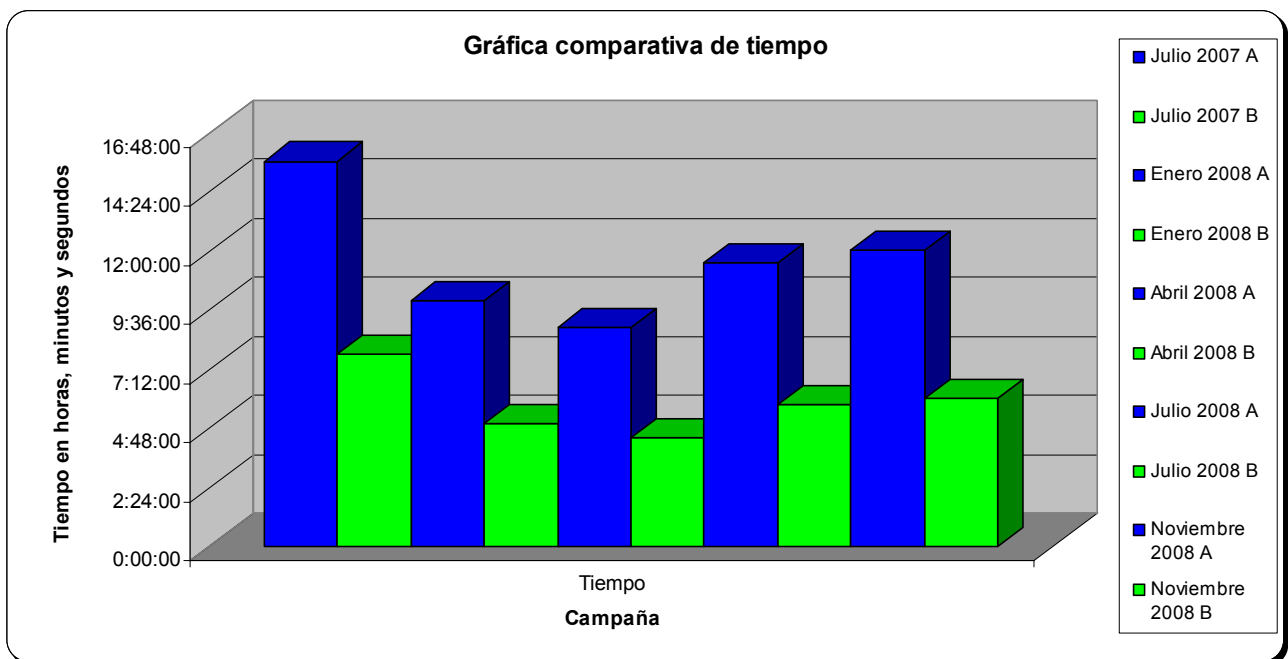


Figura 112. Gráfica comparativa de tiempo de observación de cada campaña con la metodología utilizada (A, de color azul en la gráfica), y el tiempo de observación de la misma campaña suponiendo solamente la observación de la referencia al inicio y final de cada serie (B, en color verde en la gráfica).

### 3º Estudio sobre el coste

El coste está relacionado con el tiempo de observación, por lo tanto al reducirse el tiempo a la mitad, se elimina el coste también en esa proporción.



#### 4º Estudio sobre la complejidad del ajuste

Como se ha comentado anteriormente, la relación existente entre los ángulos, al eliminar lecturas a la referencia cambia, de tener ángulos independientes entre sí, a establecerse una relación de dependencia en la cual, cualquier sistematismo que se pueda cometer en el establecimiento de la primera observación se va a ir acumulando hasta el final de la serie. Además, cada ángulo calculado, dependerá al mismo tiempo del anterior, así que cualquier error grosero que se cometa, será difícilmente detectable, aunque se podría comparar con las lecturas realizadas en la serie posterior.

En el modelo de observación y cálculo utilizado en el proyecto de Agoncillo, la relación entre ángulos se establece de la siguiente forma:

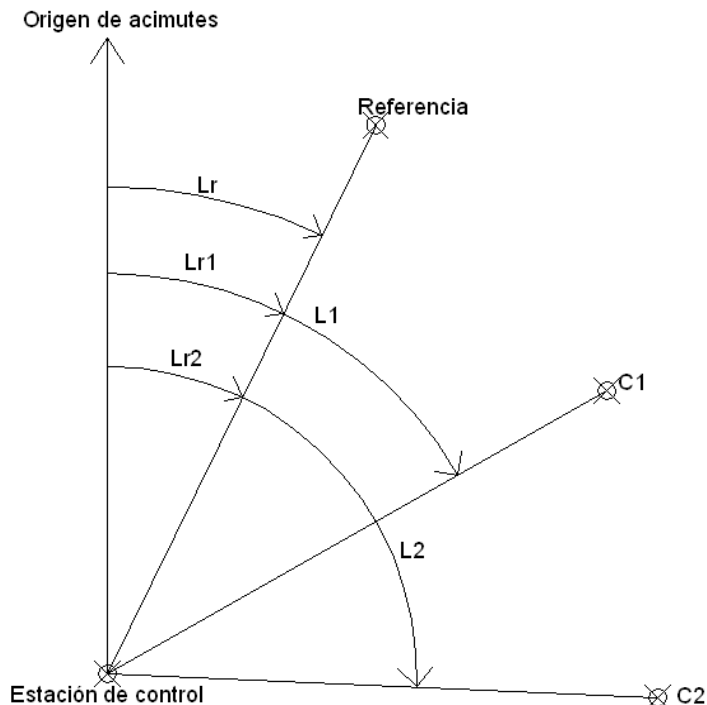


Figura 113. Relación entre ángulos en la metodología de observación aplicada en el proyecto.

Donde los ángulos internos, se obtienen por diferencia de las lecturas entre la referencia y el punto de observación:

$$W_{C1} = L1 - Lr1$$

$$W_{C2} = L2 - Lr2$$

Y así sucesivamente con todos los puntos de observación y en cada serie para cada referencia elegida.

Sin embargo, si eliminamos la observación a la referencia en cada punto, el modelo cambia:

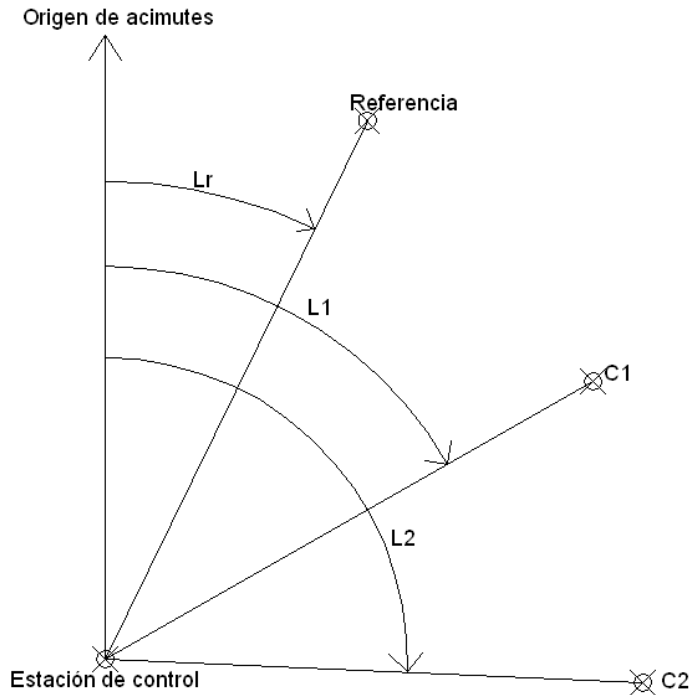


Figura 114. Relación entre ángulos en la metodología de observación supuesto la reducción de observaciones a la referencia. Solamente se observaría a la referencia al inicio y final de la serie.

En este caso, los ángulos pasan de ser independientes, como en el caso anterior, a ser ángulos dependientes unos de otros, puesto que comparten lecturas comunes, como es el caso de la observación a la referencia, y el modelo matemático cambia por completo, puesto que se debe introducir un cambio en la matriz de pesos:

$$P_d = (B \cdot B^T) \cdot P$$

Siendo la matriz B de la forma:

$$B = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & , & , & , \\ -1 & 0 & 1 & 0 & , & , & , \\ \cdot & \cdot & , & , & , & , & , \\ , & , & , & , & , & , & , \\ , & , & , & , & , & , & , \\ , & , & , & , & , & , & , \\ -1 & , & , & , & 0 & 1 & 0 \\ -1 & , & , & , & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Por lo tanto, el modelo matemático de cálculo se complica, y al mismo tiempo, pueden aparecer sistematismos al realizar el ajuste, debido a la forma de operar en campo, puesto que cualquier error que se pueda cometer en la observación del primer punto, se va arrastrando hasta el final de cada serie de observaciones, siendo al mismo tiempo más difícil la detección de errores groseros, lo cual implicará una pérdida de fiabilidad de la red.

Respecto a la precisión, vamos a dejarla con un "=", aunque, según lo dicho, reducir las lecturas a la referencia debilita la robustez del ajuste por lo que es posible que también se resienta de forma negativa.

#### **4.6.3.- Tabla obtenida del análisis**

La tabla de resultados que da de la siguiente forma tras la realización de los análisis:

Resultado		Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Observaciones	Reducir nº de lecturas a referencia	=	-	+	+	-

Figura 115. Tabla de resultados derivada del análisis de la propuesta: Reducir el número de lecturas a la referencia.

#### **4.7.- Observaciones: Eliminar puntos de observación**

Como se comentó anteriormente, durante el proyecto de auscultación, se implantó un sistema de doble señalización, dianas y clavos, siendo el total de puntos de observación y referencia de 25 dianas y 23 clavos. Anteriormente se ha realizado un estudio de cual sería la mejor de las señalizaciones, pero ahora lo que se pretende es reducir el número de puntos de observación con el fin de reducir el tiempo empleado en campo, conservando aquellos puntos que mejores resultados aportan al estudio.

##### **4.7.1.- Tabla teórica y justificación**

Propuesta		Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Observaciones	Reducir puntos de observación	=	=	+	+	=

Figura 116. Tabla de teórica del análisis de la propuesta: Reducir puntos de observación.

Es lógico suponer que al eliminar puntos de observación, se reducirá el tiempo de observación y como consecuencia el coste y que esta propuesta no tendrá consecuencias en la precisión, fiabilidad y complejidad, puesto que lo único que cambia es el volumen de puntos observados, no las observaciones ni la metodología empleada.

##### **4.7.2.- Pruebas realizadas**

###### *1º Clasificación de los puntos*

En primer lugar se ha realizado una clasificación de los puntos en función de varios criterios:

- Atendiendo al número de estaciones desde los que se visan.
- Según la geometría de observación que presenta, basándose en el estudio de los semiejes de las elipses de error máxima, cuanto más se acerque a 1 (es decir que la geometría de la elipse sea lo más parecida a una circunferencia, pues indica que el punto se observa desde una buena configuración geométrica) la división del semieje mayor entre el semieje menor.
- Según la precisión que presenta después del ajuste de la red, basándose en el área de la elipse de error máxima, puesto que a mayor área mayor indeterminación en las coordenadas observadas y al contrario.

Para realizar este análisis se llevó a cabo un proceso de reclasificación, obteniendo como solución la clasificación del conjunto de puntos entre muy buenos, buenos, regulares y malos.

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

Clasificación 1	Clasificación 2	Clasificación 3	Composición 1+2+3	Clasificación final	Punto
2	1	3	6	Regular	D1
2	1	3	6	Regular	C1
2	2	3	7	Bueno	D2
2	3	3	8	Muy Bueno	C2
2	3	3	8	Muy Bueno	D3
2	3	3	8	Muy Bueno	C3
2	1	2	5	Malo	D4
1	1	1	3	Malo	D5
3	1	2	6	Regular	D6
3	1	2	6	Regular	C6
2	1	3	6	Regular	D7
2	1	3	6	Regular	C7
3	1	3	7	Bueno	D8
3	1	3	7	Bueno	C8
3	1	3	7	Bueno	D9
3	1	3	7	Bueno	C9
3	3	3	9	Muy Bueno	D10
3	3	3	9	Muy Bueno	D11
3	3	3	9	Muy Bueno	C11
3	3	3	9	Muy Bueno	D12
3	3	3	9	Muy Bueno	C12
3	3	3	9	Muy Bueno	D13
3	3	3	9	Muy Bueno	C13
3	3	3	9	Muy Bueno	D14
3	3	3	9	Muy Bueno	C14
2	1	3	6	Regular	D15
2	1	3	6	Regular	C15
3	1	3	7	Bueno	D16
3	1	3	7	Bueno	C16
3	1	3	7	Bueno	D17
3	1	3	7	Bueno	C17
2	1	1	4	Malo	D18
2	1	3	6	Regular	C18
3	2	3	8	Muy Bueno	D19
3	2	3	8	Muy Bueno	C19
3	2	3	8	Muy Bueno	D20
3	2	3	8	Muy Bueno	C20
1	1	3	5	Malo	D21
3	2	3	8	Muy Bueno	D22
2	2	3	7	Bueno	D23
3	1	3	7	Bueno	D26
3	1	3	7	Bueno	D27
3	0	0	3		C31
2	1	3	6	Regular	C32
2	3	3	8	Muy Bueno	C33
3	1	3	7	Bueno	C34
3		0	3		C35
3	2	3	8	Muy Bueno	C36

Figura 117. Tabla de clasificación de los puntos de observación atendiendo a varios criterios. Se han utilizado las campañas de Julio de 2007 y Julio de 2008 para realizar la clasificación.

- Clasificación 1: Según número de estaciones desde el que se visa el punto, si se visa desde 2 estaciones se aplica el valor 1, si se visa desde 3 el valor es 2 y si se visa desde más de 3 el valor es 3.
- Clasificación 2: Según el coeficiente (a/b) Semieje mayor de la elipse de error máximo entre semieje menor de dicha elipse, este valor representa la geometría, cuanto más se acerca al valor 1, mejor es la geometría de observación para el punto. El valor 1 indica que en lugar de elipse de error se tiene una circunferencia de error, que sería el caso ideal. Si el valor obtenido es superior o igual a 2, se aplica el valor 1, si el resultado está comprendido entre 1,5 y 2, se aplica el valor 2, y si es menor o igual a 1,5 el valor correspondiente es 3.
- Clasificación 3: Según el área de la elipse de error, este valor indica la indeterminación máxima que existe en la determinación de la posición del punto observado. Si el resultado obtenido es mayor o igual a 60 mm<sup>2</sup>, el valor a aplicar es 1, si está comprendido entre 30 y 60 mm<sup>2</sup> el valor correspondiente es 2, y si es menor o igual a 30 mm<sup>2</sup>, el valor es 3.

Los valores de la reclasificación: 1 indica malo  
2 indica regular  
3 indica bueno

En esta clasificación, se ha tenido en cuenta, el estudio sobre la precisión obtenida en el ajuste de los puntos y la geometría de observación de los mismos, que representa el estudio sobre la fiabilidad. Por tanto, ya se puede hacer una primera eliminación de puntos, si se elimina todos aquellos que son malos o regulares nos podemos quedar con:

Bueno	<b>D2</b>
Muy Bueno	<b>C2</b>
Muy Bueno	<b>D3</b>
Muy Bueno	<b>C3</b>
Bueno	<b>D8</b>
Bueno	<b>C8</b>
Bueno	<b>D9</b>
Bueno	<b>C9</b>
Muy Bueno	<b>D10</b>
Muy Bueno	<b>D11</b>
Muy Bueno	<b>C11</b>
Muy Bueno	<b>D12</b>
Muy Bueno	<b>C12</b>
Muy Bueno	<b>D13</b>
Muy Bueno	<b>C13</b>
Muy Bueno	<b>D14</b>
Muy Bueno	<b>C14</b>
Bueno	<b>D16</b>
Bueno	<b>C16</b>
Bueno	<b>D17</b>
Bueno	<b>C17</b>

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

Muy Bueno	<b>D19</b>
Muy Bueno	<b>C19</b>
Muy Bueno	<b>D20</b>
Muy Bueno	<b>C20</b>
Muy Bueno	<b>D22</b>
Bueno	<b>D23</b>
Bueno	<b>D26</b>
Bueno	<b>D27</b>
Muy Bueno	<b>C33</b>
Bueno	<b>C34</b>
Muy Bueno	<b>C36</b>

Figura 118. Tabla de clasificación de los puntos de observación. Atendiendo a criterios de precisión y fiabilidad.

Que en total suman 30 puntos de observación, más los puntos 31 y 35 que conforman el datúm y no se pueden eliminar, suman 32.

Si de los puntos con doble señalización escogemos, solamente los clavos y de entre ellos solamente los considerados buenos ó muy buenos, obtenemos el siguiente listado:

Muy Bueno	<b>C2</b>
Muy Bueno	<b>C3</b>
Bueno	<b>C8</b>
Bueno	<b>C9</b>
Muy Bueno	<b>D10</b>
Muy Bueno	<b>C11</b>
Muy Bueno	<b>C12</b>
Muy Bueno	<b>C13</b>
Muy Bueno	<b>C14</b>
Bueno	<b>C16</b>
Bueno	<b>C17</b>
Muy Bueno	<b>C19</b>
Muy Bueno	<b>C20</b>
Muy Bueno	<b>D22</b>
Bueno	<b>D23</b>
Bueno	<b>D26</b>
Bueno	<b>D27</b>
Muy Bueno	<b>C33</b>
Bueno	<b>C34</b>
Muy Bueno	<b>C36</b>

Figura 119. Tabla de clasificación de los puntos de observación. Atendiendo a criterios de precisión y fiabilidad, escogiendo solamente los clasificados como buenos ó muy buenos.

Con un total de 20 puntos, más 2 que forman el datum, 22 puntos.

## 2º Efecto en el tiempo

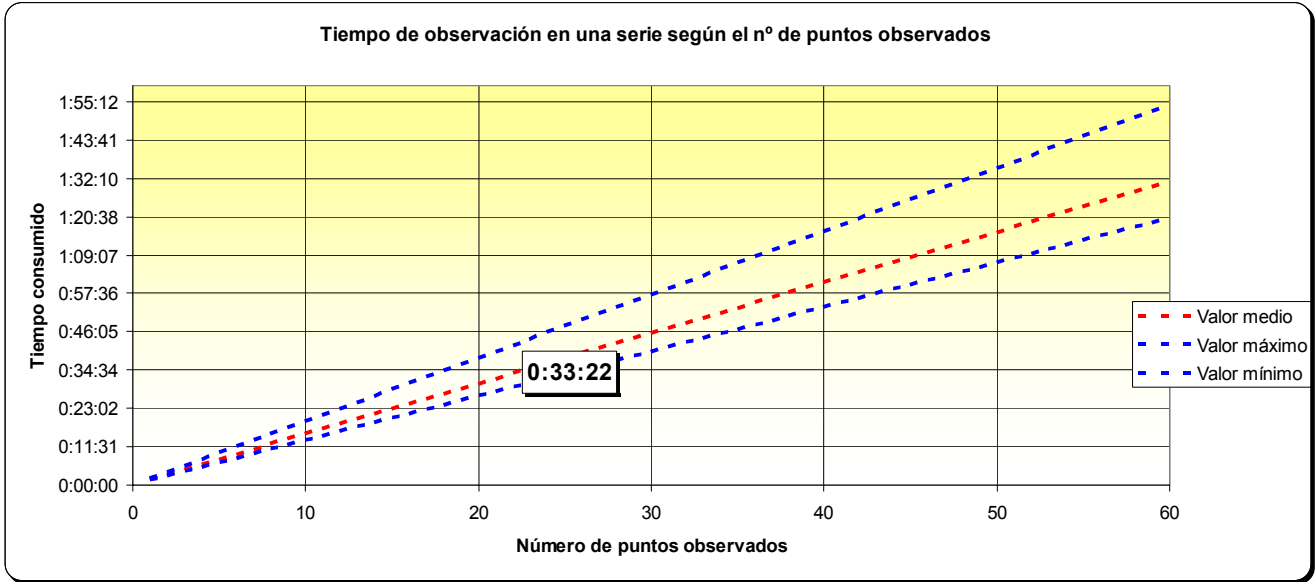


Figura 120. Representación del tiempo de observación de una serie en función del número de puntos a observar.

Como se puede extraer de la gráfica, para 22 puntos de observación, se obtiene un valor de tiempo medio por cada serie de 33 minutos y 22 segundos, por lo tanto para tres series y siete estaciones (suponiendo que desde todas las estaciones se visan todos los puntos, que en realidad esto no ocurre) se obtiene un tiempo total de **11:40:42 horas**.

Lo que reduce el tiempo de observación prácticamente a la mitad del que se ha estado empleando hasta el momento.

## 3º Estudio sobre el coste

El coste, en este caso, depende del tiempo de observación y del número de puntos de observación (precio por material implantado). Al reducirse el número de puntos a la mitad, se reduce el tiempo en esa misma proporción, por tanto el coste derivado del tiempo también se reduce a la mitad y se reduce también el gasto de material para materializar dichos puntos en el terreno.



#### **4.7.3.- Tabla obtenida del análisis**

Por tanto, la tabla de resultados obtenida es la siguiente:

		Resultado	Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
			Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Observaciones	Reducir puntos de observación	=	=	+	+	=	

Figura 121. Tabla de resultados derivada del análisis de la propuesta: Reducir número de puntos de observación.

Como se puede concluir de los análisis realizados, la disminución del número de puntos a observar no tiene influencia sobre los factores precisión, fiabilidad y complejidad, puesto que la metodología a utilizar es la misma, la red no cambia de forma y el ajuste se ejecuta de la misma forma.

El efecto que produce la eliminación de puntos de observación en el tiempo y en el coste es el mismo, al disminuir el número de puntos, disminuye el tiempo de observación y el coste del proyecto, produciéndose una disminución de tiempo y coste del 60%.

#### **4.8.- Observaciones: Eliminar series**

Con el fin de reducir el tiempo de observación y el volumen de observaciones en campo, se propone la reducción del número de series medidas desde cada estación de tres a dos. A continuación se va a proceder a los análisis de los efectos sobre los factores que esta propuesta puede ocasionar.

##### **4.8.1.- Tabla teórica y justificación**

		Propuesta	Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
			Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Observaciones	Reducir nº de series	-	=	+	+	=	

Figura 122. Tabla de teórica sobre el análisis de la propuesta: Reducir número de series por estación.

A priori se puede decir, que la precisión va a decrecer, puesto que se va a reducir considerablemente el número de observaciones, reduciendo por tanto el número de ecuaciones en el ajuste para el mismo número de incógnitas.

En cuanto a la fiabilidad de la red, puesto que la geometría de la misma no va a variar, se podría considerar que esta tampoco se va a resentir.

Los efectos sobre el coste y el tiempo serán positivos, puesto que al reducir el número de series, se reduce el tiempo de observación en campo y por lo tanto también el coste del proyecto.

Como tampoco se introducen nuevos observables ni la metodología de observación varía, se va a considerar de partida que la complejidad del ajuste será la misma.

#### **4.8.2.- Pruebas realizadas**

##### *1º Estudio sobre la precisión:*

Con el fin de analizar la precisión derivada de esta propuesta, se realizó el ajuste de las campañas eliminando en todas ellas la última serie desde cada estación, y se realizó una comparación de errores máximos entre los nuevos ajustes y el ajuste de las campañas completas.

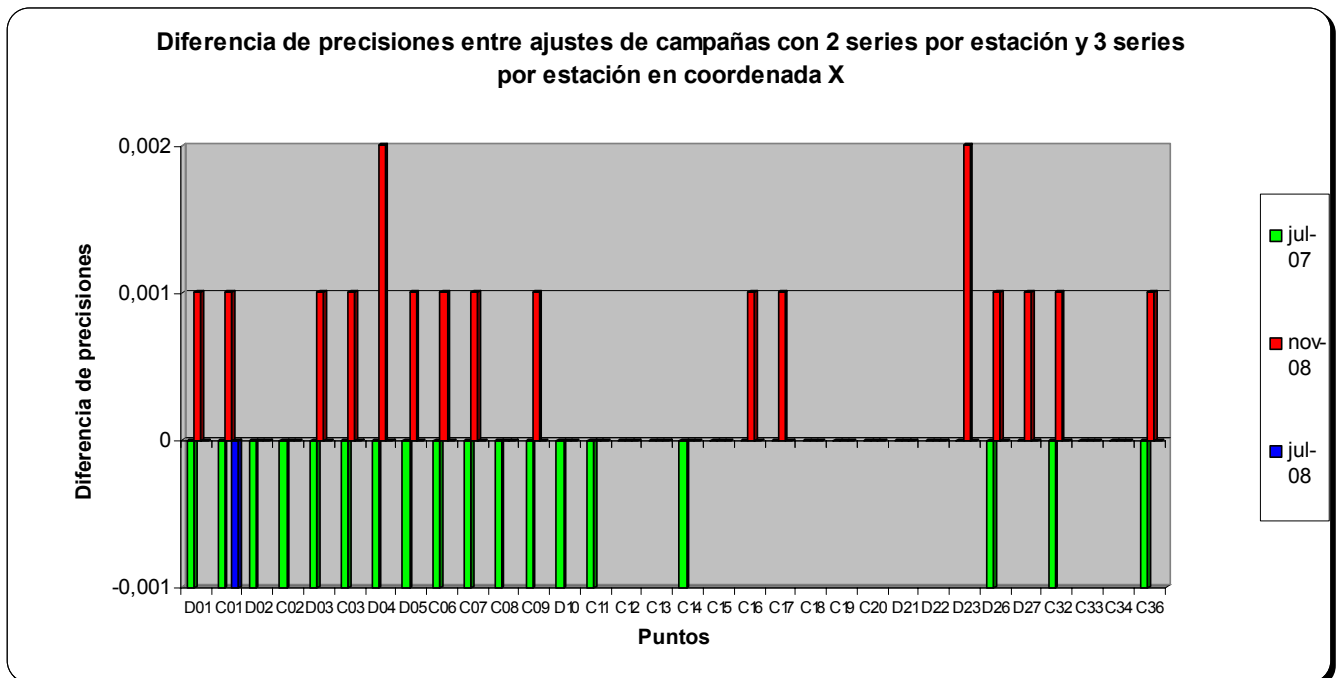


Figura 123. Gráfico comparativo de las precisiones en coordenada X en el ajuste de campañas con 2 series por estación y el ajuste de campañas con tres series por estación (no se han incluido las campañas de Enero y Abril 2008, puesto que no se han conseguido ajustar satisfactoriamente).

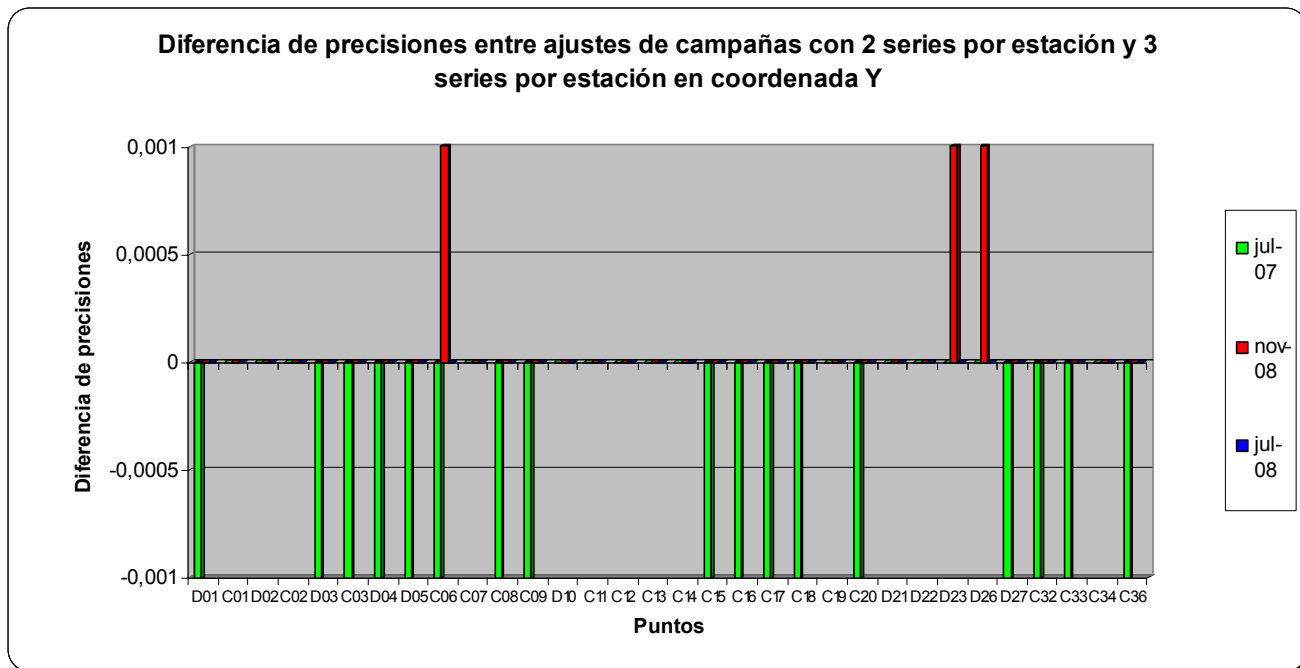


Figura 124. Gráfico comparativo de las precisiones en coordenada X en el ajuste de campañas con 2 series por estación y el ajuste de campañas con tres series por estación (no se han incluido las campañas de Enero y Abril 2008, puesto que no se han conseguido ajustar satisfactoriamente).

Para la obtención de esta gráfica, se ha realizado un ajuste de las campañas de Julio 2007, Enero 2008, Abril 2008 y Julio 2008 reduciendo el número de series observadas en campo por estación a dos, y se ha relacionado con el ajuste completo de las mismas campañas mediante la diferencia del ajuste completo menos el ajuste con dos series. Por lo tanto, con un simple vistazo a la gráfica se puede deducir que las barras que están por encima del valor 0 nos indican que el ajuste con sólo dos series ha sido más preciso que el completo y al contrario.

Se han utilizado para la comparativa las campañas anteriormente citadas, pero se deben tener en cuenta los siguientes valores obtenidos del ajuste:

<b>Ajuste 2 series Julio 2007</b>	
Test de varianza de peso unidad	1,0
Normalidad de los residuos	-1,1
Grados de libertad	95
<b>Ajuste 2 series Enero 2008</b>	
Test de varianza de peso unidad	2,8
Normalidad de los residuos	-3,0
Grados de libertad	61
<b>Ajuste 2 series Abril 2008</b>	
Test de varianza de peso unidad	1,0
Normalidad de los residuos	-30,2
Grados de libertad	55

<b>Ajuste 2 series Julio 2008</b>	
Test de varianza de peso unidad	1,1
Normalidad de los residuos	0,2
Grados de libertad	73
<b>Ajuste 2 series Noviembre 2008</b>	
Test de varianza de peso unidad	1,5
Normalidad de los residuos	0,3
Grados de libertad	48

Figura 125. Tabla con los datos estadísticos derivados del ajuste de las campañas anteriores con 2 series por estación.

*Test de varianza de peso unidad:*

Comprobar que la varianza a posteriori tiene un valor cercano a uno, se comprueba con la tabla de la función F con los grados de libertad del ajuste (por ejemplo al 95%).

<b>DISTRIBUCIÓN F DE FISHER</b>	
<b>Grados de libertad</b>	<b>H<sub>0</sub> (valor de referencia) al 95%</b>
2	19,5
5	4,63
10	2,54
20	1,84
30	1,62
40	1,51
50	1,44
100	1,28
200	1,19
400	1,13
1000	1,08
∞	1,00

Figura 126. Tabla con los valores estadísticos de referencia en función de los grados de libertad del ajuste para una distribución F de Fisher al 95%.

*Normalidad de los residuos:*

Comprobar que no existen sistematismos en los residuos, se analiza que se distribuyan según una distribución normal o una t-Student si se consideran los grados de libertad (por ejemplo al 95%), el valor debe ser aproximadamente menor de 2.

DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT	
Grados de libertad	H <sub>0</sub> (valor de referencia) al 95%
2	4,30
5	2,57
10	2,22
20	2,08
30	2,04
40	2,02
50	2,01
100	1,98
1000	1,96
∞	1,96

Figura 127. Tabla con los valores estadísticos de referencia en función de los grados de libertad del ajuste para una distribución T de Student al 95%.

De la tabla con los valores de los test estadísticos de los ajustes y conociendo las condiciones de dichos test, se puede decir que las campañas correspondientes a Enero y Abril 2008 no han sido ajustadas correctamente, pues ambas presentan sistematismos y además la campaña de Enero no pasa el test de varianza.

Observando las gráficas 123 y 124, y teniendo en cuenta los datos obtenidos, se puede concluir que la precisión solamente aumenta en una de las campañas, Julio de 2007, en el resto disminuye y además la reducción de series provoca que no todas las campañas se puedan ajustar de forma satisfactoria.

*2º Estudio sobre la fiabilidad:*

Con el fin de estudiar la fiabilidad de la red en el caso de disminución de series observadas a dos, solamente se han utilizado las campañas que pasaron ambos test estadísticos (las campañas de Julio 2007, Julio 2008 y Noviembre de 2008).

Se han obtenido varias gráficas que representan el porcentaje de puntos que quedan dentro de un determinado intervalo de fiabilidad (igual a 0, entre 0 y 0,3, entre 0,3 y 0,6 y mayor de 0,6).

Significando cada intervalo:

Igual a 0: mal controlados.

Entre 0 y 0,3: débilmente controlados

Entre 0,3 y 0,6: bien controlados

Mayores o iguales a 0,6: muy bien controlados

En primer lugar se realiza la gráfica de porcentajes correspondiente al ajuste de las campañas con tres series por cada estación. Esta gráfica será la utilizada como referencia, puesto que la hipótesis de partida es que este ajuste tendrá mayor fiabilidad que el realizado solamente con dos series por cada estación.

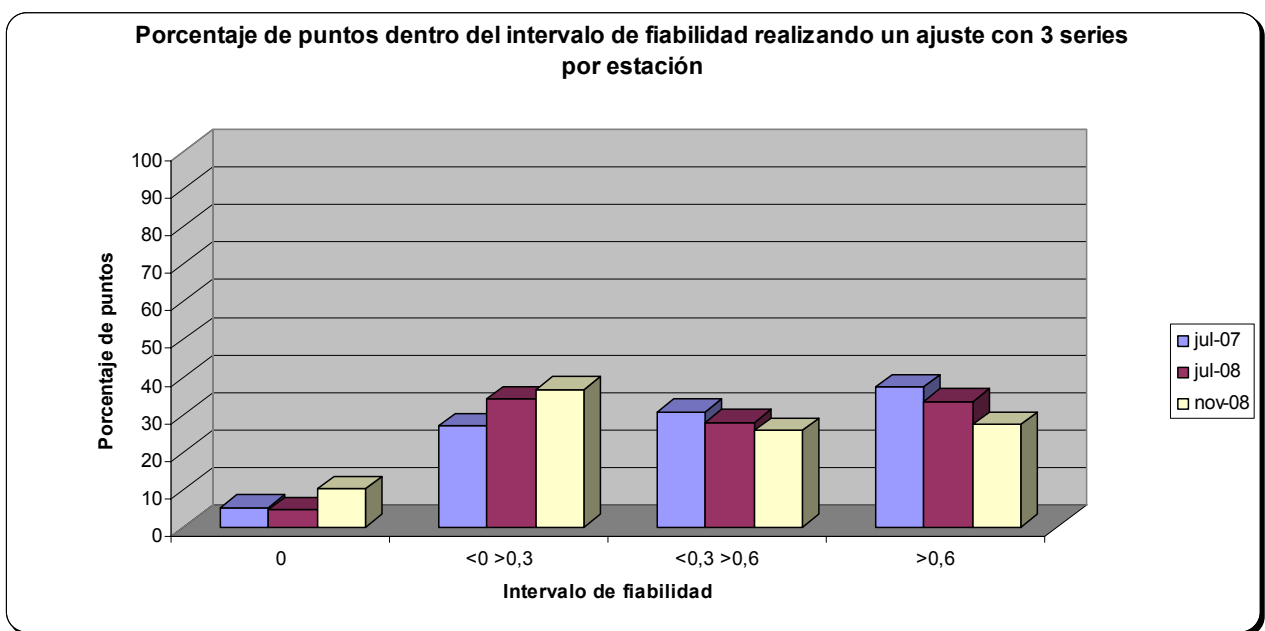


Figura 128. Gráfica que representa el porcentaje de observaciones localizadas dentro de un intervalo de fiabilidad, en el ajuste de las campañas de Julio 2007, Julio 2008 y Noviembre 2008, con tres series por estación.

En segundo lugar se confecciona la misma gráfica pero con los datos del ajuste con dos series por estación.

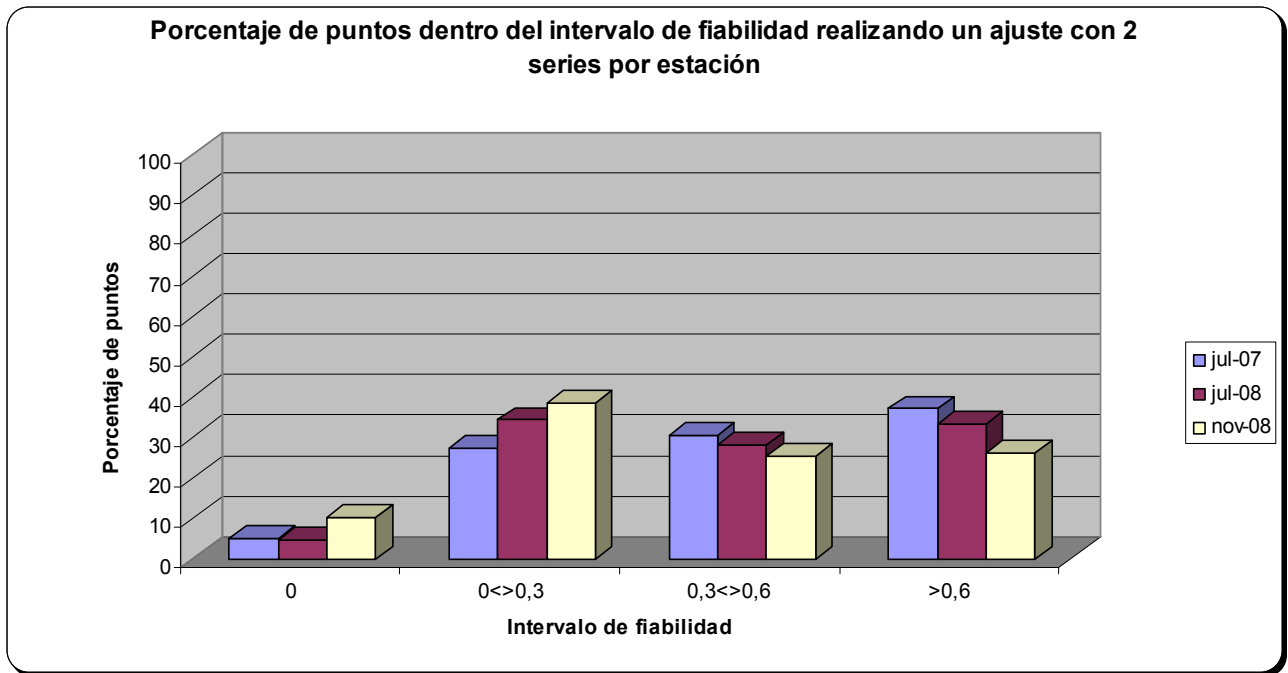


Figura 129. Gráfica que representa el porcentaje de observaciones localizadas dentro de un intervalo de fiabilidad, en el ajuste de las campañas de Julio 2007, Julio 2008 y Noviembre 2008, con dos series por estación.

Por último, se establece la relación que existe entre ambos ajustes mediante una gráfica en la que podemos observar ambos al mismo tiempo.

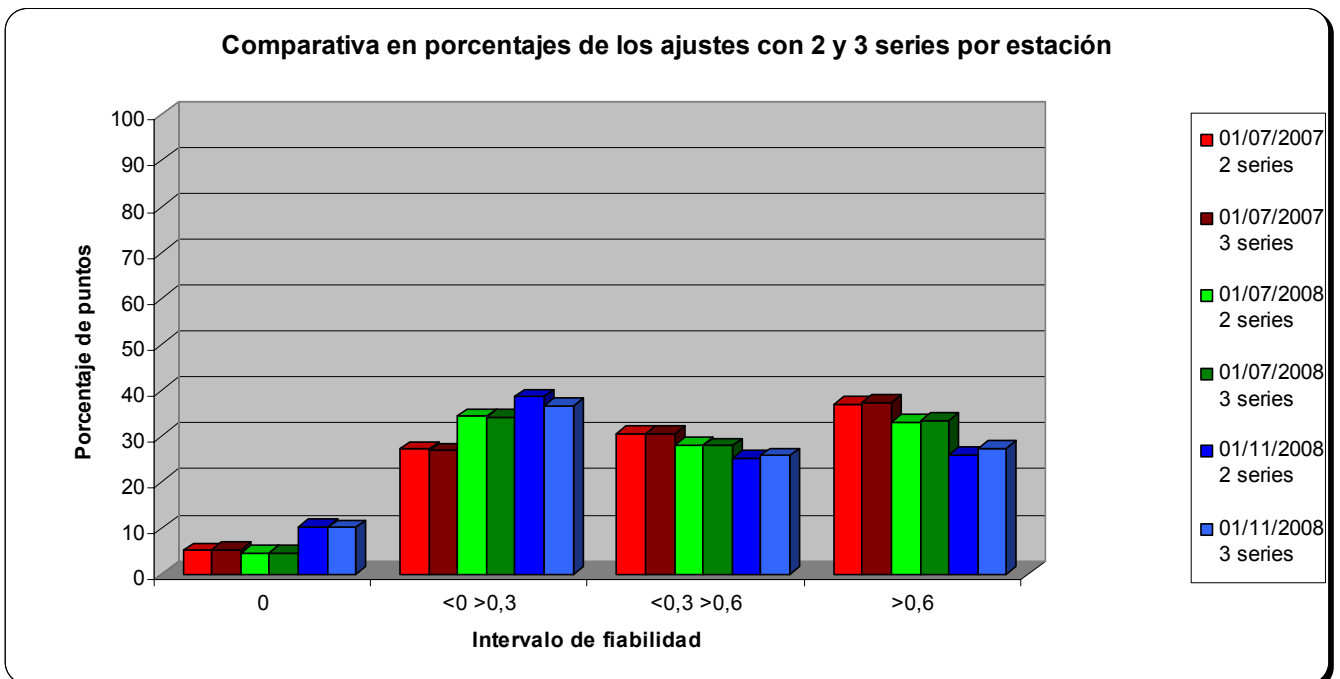


Figura 130. Gráfica que representa el porcentaje de observaciones localizadas dentro de un intervalo de fiabilidad, en el ajuste de las campañas de Julio 2007, Julio 2008 y Noviembre 2008, comparando los ajustes de dichas campañas con tres series por estación y dos series por estación.

Como se puede extraer de esta gráfica, aumenta el porcentaje de observaciones dentro de los intervalos 0 y < 0 > 0,3 (observaciones mal

controladas y débilmente controladas), en el ajuste con dos series respecto al ajuste con tres series, como consecuencia se produce el efecto contrario en los intervalos bien controladas y muy bien controladas, lo que indica un desplazamiento de valores de fiabilidad hacia la izquierda de la gráfica, significando que la fiabilidad de la red disminuye en todos los casos.

.Por tanto el ajuste con dos series por estación disminuye la fiabilidad de la red, esto es derivado de la aparición de sistematismos en las observaciones con dos series por estación.

### *3º Estudio sobre el tiempo*

Campaña	Tiempo	Diferencia
Julio 2007 3 series	15:40:49	4:35:17
Julio 2007 2 series	11:05:32	
Julio 2008 3 series	11:31:11	3:21:54
Julio 2008 2 series	8:09:17	
Noviembre 2008 3 series	12:04:08	3:59:31
Noviembre 2008 2 series	8:04:37	

Figura 131. Tabla que representa el tiempo de observación y la diferencia en campo entre cada campaña, realizando tres y dos series por estación.

En esta tabla se presentan los tiempos totales invertidos por campaña en función de observaciones de tres series y dos series, así como la diferencia de tiempo entre ambos casos.

Como se puede apreciar, la media de tiempo que se gana al reducir las observaciones a dos series es de **3:26 horas**, lo que supone una disminución de tiempo del **30%** respecto al total.

### *4º Estudio sobre el coste*

El coste está relacionado con el tiempo de observación, por lo tanto si el tiempo se reduce en un 30%, el coste se va a reducir en la misma forma, un **30%**.

### *5º Complejidad del ajuste*

A la vista de los resultados obtenidos, podemos concluir que la complejidad del ajuste entendida como tal, no se ve afectada, pero si que se debe tener en cuenta que existen varios casos en los cuales no se ha podido realizar el ajuste correctamente, que son las campañas de Enero y Abril de 2008, que presentan sistematismos dentro del ajuste (lo que indica que existe algún tipo de error o indeterminación dentro de las observaciones que no se ha podido eliminar debido a que el número de observaciones es escaso), ocurriendo además que la campaña de Enero de 2008 no pasa el control estadístico sobre la varianza de peso unidad, lo que indica que el ajuste no es correcto.



Con ello se puede llegar a la conclusión de que se está trabajando con un número de series mínimo, por debajo de tres series por estación, el ajuste de la red no está garantizado.

#### **4.8.3.- Tabla obtenida del análisis**

	Propuesta	Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Observaciones	Reducir nº de series	-	-	+	+	-

Figura 132. Tabla de resultados derivada del análisis de la propuesta: Reducir el número de series.

Como conclusión general, decir que se ha demostrado que actualmente en el proyecto de Agoncillo se está trabajando con un número de series mínimo, 3, por debajo de este valor no se garantiza que el ajuste de las campañas se pueda realizar, lo que indica que por otra parte se produce un efecto negativo en la complejidad del ajuste con dos series por estación. Además se ha determinado que la precisión de las observaciones disminuye, aparecen sistematismos en las observaciones que no se pueden detectar y disminuye la fiabilidad de la red en todos los casos.

Solamente el tiempo y el coste salen beneficiados de esta propuesta y ambos con un mismo valor, el 30% de disminución.

Aunque no es recomendable realizar esta propuesta en este proyecto al menos.

#### **4.9.- Observaciones: Introducir medidas de distancias**

La introducción en la observación y cálculo de un nuevo observable (la distancia), a priori, se puede suponer que va a mejorar considerablemente la precisión y la fiabilidad de la red en los términos en los que se han definido anteriormente, pero se debe hacer un estudio detallado de los efectos reales que puede acarrear este nuevo tipo de observaciones.

En primer lugar se va a hacer un inciso teórico de la medición electromagnética de distancias (EDM), que es el método de medida que posee el instrumental empleado, centrándonos en los errores que posee.

Tipos de error en EDM:

Existen cuatro posibles comportamientos al analizar la tipología y el tratamiento de los errores:

- Determinar su valor de forma directa y aplicar la adecuada corrección.

- Establecer su modelo matemático y calcular la adecuada corrección a aplicar.
- Establecer una metodología observacional que lo compense.
- Asumirlo.

Es un hecho incuestionable que nunca se puede eliminar totalmente un error. Siempre quedará de forma residual y habrá que asumirlo.

Las fuentes de error existentes en distanciometría electrónica se integran en dos grupos: proporcionales y no proporcionales a la distancia:

- Proporcionales a la distancia:
  - Incide de refracción: se calcula mediante fórmulas empíricas necesitando para el mismo, parámetros meteorológicos observados en campo.
  - Frecuencia de modulación: que depende de la tensión de alimentación del instrumento.
- No proporcionales a la distancia:
  - Constante de equipo: o error de cero, que se compone de la constante de instrumento más la constante del prisma. Se calcula en gabinete mediante un sistema de centrado y variando la distancia al prisma según una serie de distancias previamente conocidas. Se aplica la corrección conjunta.
  - Error cíclico: se repite en la distancia, en cada módulo de semi-longitud de onda moduladora, y depende por tanto de la onda.
  - Centrados mecánicos: depende del instrumento y del centrado del sistema de medida respecto del sistema de colimación. Suele proporcionar este error el fabricante.

Las fuentes de error proporcionales a la distancia generan un factor de escala y plantean una problemática muy especial, puesto que no afectan a la precisión interna, pero si que se manifiestan a la hora de unir distintos trabajos ejecutados mediante equipos diferentes.

Las fuentes de error no proporcionales a la distancia generan errores absolutos, unos sistemáticos como la constante de equipo y el error cíclico y otros accidentales, como los causados por inexacto centrado de estacionamiento.

Lo que en última instancia mide cualquier distanciómetro electrónico es el tiempo que tarda la onda portadora en recorrer la distancia dos veces (ida y vuelta). La velocidad de propagación es una variable que depende de la longitud de onda de la portadora y de las características de propagación del medio por el cual se transmite.

Todo fabricante de este tipo de instrumentos, establece de partida unas condiciones ideales del medio, dentro de las cuales la distancia medida coincide con la distancia real, y de aquí se deduce el concepto de índice de refracción residente del medio. Para determinar el factor de escala, que es la variación de la velocidad de la onda portadora al cambiar las condiciones del medio, es

necesario conocer el índice de refracción  $n$  en el momento de la observación (que se calcula mediante las fórmulas de Barrel-Sears, Owens, Essen-Froome, etc.) en función de los parámetros meteorológicos, temperatura, tensión del vapor de agua y presión atmosférica, obtenidos de la temperatura seca, la temperatura húmeda y la presión atmosférica. Relacionando ambos índices de refracción, residente y del medio se obtiene el factor de corrección a aplicar.

$$F_e = n_r/n$$

Donde  $F_e$  es el factor de escala calculado  
 $n_r$  el índice de refracción residente  
 $n$  índice de refracción del medio

Como se ha comentado en el párrafo anterior, se deben medir en campo parámetros meteorológicos que deberían alcanzar ciertas precisiones para poder corregir correctamente las distancias observadas.

Para que el error en la determinación de  $n$  permita conseguir la precisión alcanzable por el instrumento, suponiendo que se desea estar en un valor típico de 1ppm, si se trabaja con instrumental con portadora óptica, el error sería:

dT.....	Temperatura .....	<+-1°C
de.....	Presión parcial del vapor de agua.....	<+-25hPa
dP.....	Presión.....	<+-3,5hPa

Teniendo en cuenta que la presión parcial del vapor de agua no se mide directamente, si no que se obtiene a partir de las medidas de temperatura seca y húmeda con el sicrómetro.

Con el fin de determinar todos los parámetros atmosféricos en campo, sería necesario el empleo de instrumentación específica como:

- Medida de presión:

Barómetros: Hipsómetros de mercurio  
Hipsómetros aneroides

- Temperatura y humedad:

Termómetros de vidrio, de mercurio o de alcohol.  
Aspirosicrómetros y sicrómetros

Toda esta instrumentación a emplear supone un coste adicional al proyecto, tanto si se tiene que comprar como si se tiene la opción de alquilar.

Además se debe realizar una calibración periódica de la instrumentación y el empleo de los mismos conlleva también la aplicación de una serie de correcciones a las observaciones realizadas.

#### 4.9.1.- Tabla teórica y justificación

	Propuesta	Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Observaciones	Medida de distancias	+	+	-	-	-

Figura 133. Tabla teórica sobre el efecto de la propuesta: medida de distancias.

Se puede suponer a priori, que la introducción en el cálculo de nuevas y distintas observaciones, van a crear un volumen nuevo de ecuaciones con el fin de resolver el mismo número de incógnitas, por lo tanto esto va a aumentar la redundancia en el ajuste que repercutirá en un aumento de la fiabilidad de la red. Si estas medidas de distancias, se realizan con una cierta precisión, comparable a la obtenida mediante las lecturas angulares, puede que aumente también la precisión en la determinación de las coordenadas de los puntos, pero también es de suponer que nuevas medidas aumentarán el tiempo de toma de datos en campo y por consiguiente el coste.

#### 4.9.2.- Pruebas realizadas

##### 1º Estudio sobre la precisión

Durante este análisis se ha utilizado la campaña de Octubre de 2008, en la cual se observaron distancias en la última de las series realizadas desde cada estación. Esto nos permite obtener valores reales.

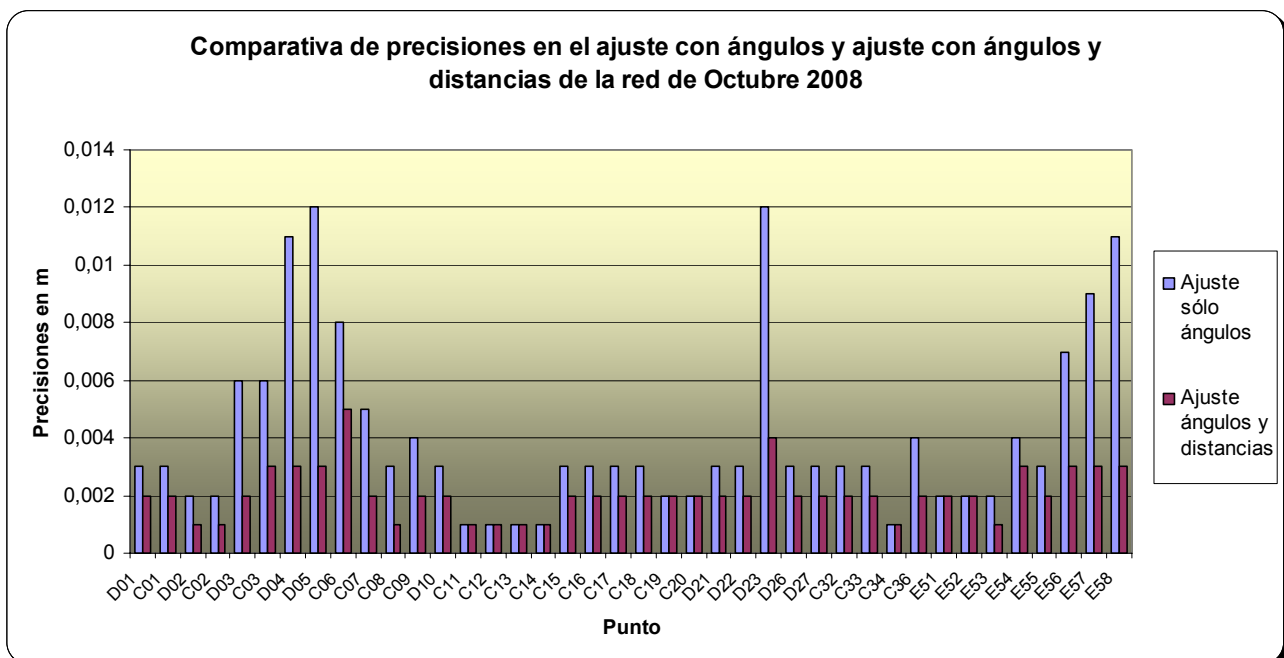


Figura 134. Gráfica que representa la comparativa de precisión alcanzada en el ajuste de la campaña de Octubre de 2008 en los casos de ajuste sólo con observaciones angulares e introduciendo posteriormente las observaciones de distancias.

Como se puede extraer de la gráfica anterior (figura 134), se produce una importante mejora en la precisión de las coordenadas obtenidas mediante el ajuste conjunto de ángulos y distancias, obteniendo una precisión mínima de 0,005 m, y una precisión media de 0,002 m. Esto es debido a que la introducción de las observaciones de distancias, suponen un nuevo acotamiento a la elipse de error que se genera en las intersecciones angulares y mejorando al mismo tiempo la geometría, como se demuestra en el siguiente gráfico:

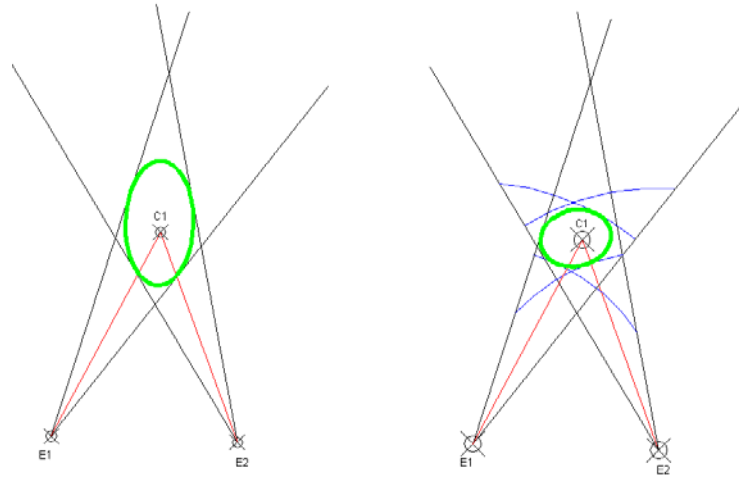


Figura 135. A la izquierda se observa la elipse de indeterminación generada por una intersección angular y a la derecha la elipse de error generada por una intersección de ángulos y distancias. En verde la elipse de error, en rojo las visuales a los puntos observados, en negro las bandas de indeterminación angular y en azul las bandas de indeterminación en distancias.

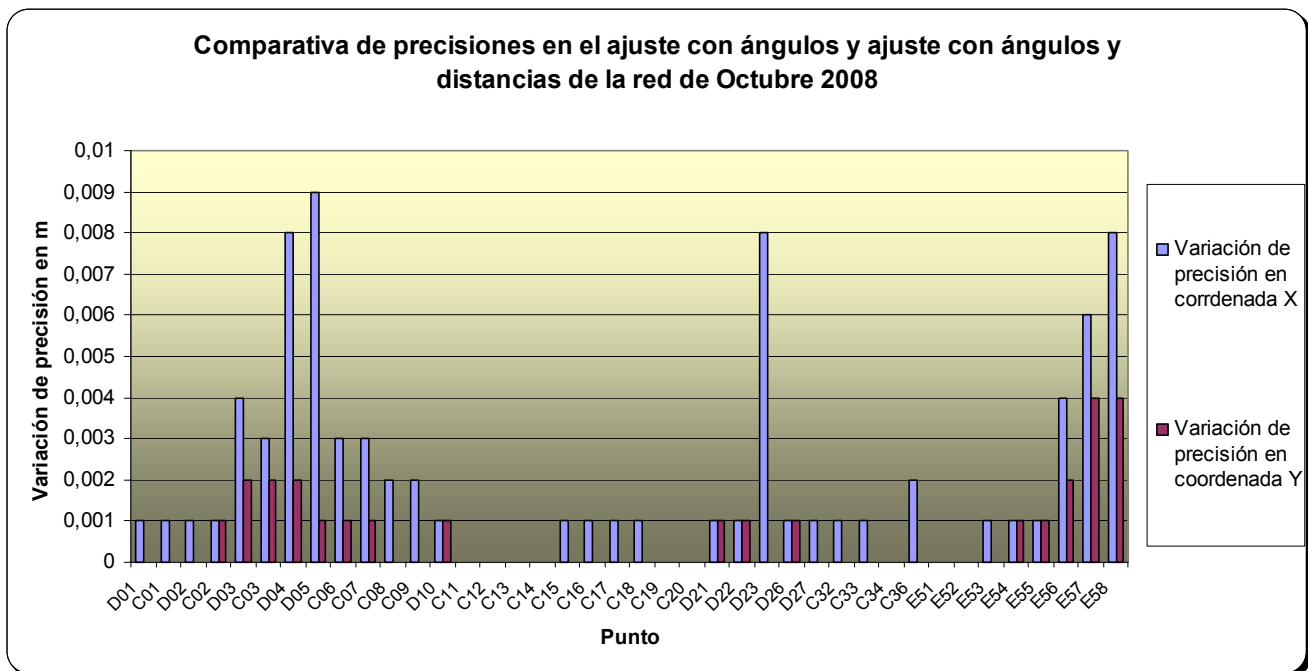


Figura 136. Gráfica que representa la comparativa de precisión alcanzada en el ajuste de la campaña de Octubre de 2008 en los casos de ajuste sólo con observaciones angulares e introduciendo posteriormente las observaciones de distancias, representando la variación de la precisión tanto en el eje X como en el Y.

De esta tabla comparativa, se puede extraer que la precisión en coordenada X es más importante que la mejora en coordenada Y para ciertos puntos. Analizando en profundidad estos datos, observando su distribución en campo, podemos llegar a la conclusión que esos puntos (C03, D04, D05, C06,

C07, C08, C09, D10 y D26, señalados en la figura siguiente), están débilmente controlados en el eje X y que para la mejora de la precisión en esa dirección, cabrían dos soluciones:

- 1- Introducir en el ajuste observaciones de distancias a dichos puntos.
- 2- Establecer en campo una distribución distinta de estaciones de control, con el fin de obtener mejores intersecciones angulares desde la dirección Y.

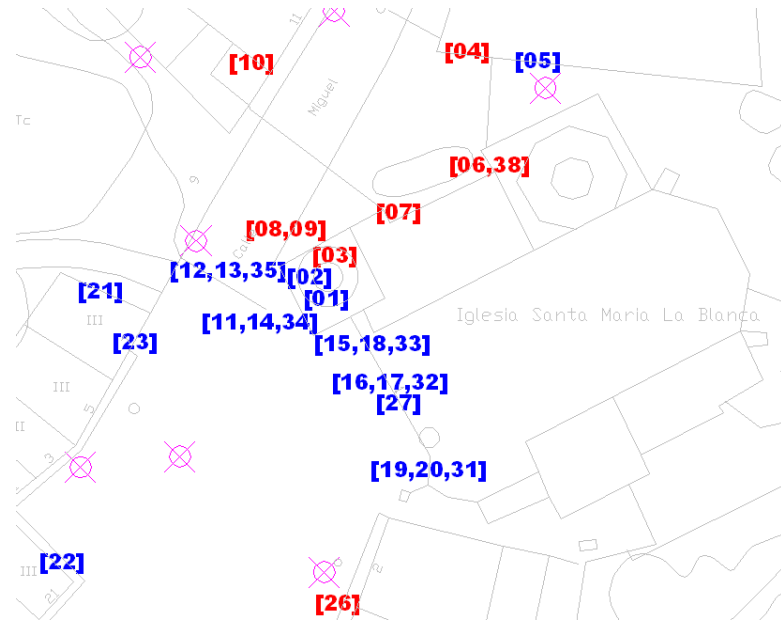


Figura 137. Croquis de la zona de estudio. En rojo se representan aquellos puntos de control que no están muy bien controlados en la dirección X. En azul el resto de puntos de control y en magenta las estaciones de control situadas en campo.

## 2º Estudio sobre la fiabilidad

Para el análisis de la fiabilidad, como en otros casos se va a proceder de la misma forma, realizando el ajuste de la campaña en el caso desarrollado en el proyecto de Agoncillo y en el caso hipotético, comparando el número de observaciones que quedan dentro de un intervalos de fiabilidad determinado, que para este caso como para los anteriores son:

- Igual a 0: mal controlados.
- Entre 0 y 0,3: débilmente controlados
- Entre 0,3 y 0,6: bien controlados
- Mayores o iguales a 0,6: muy bien controlados

Obteniendo las siguientes gráficas para los distintos ajustes:

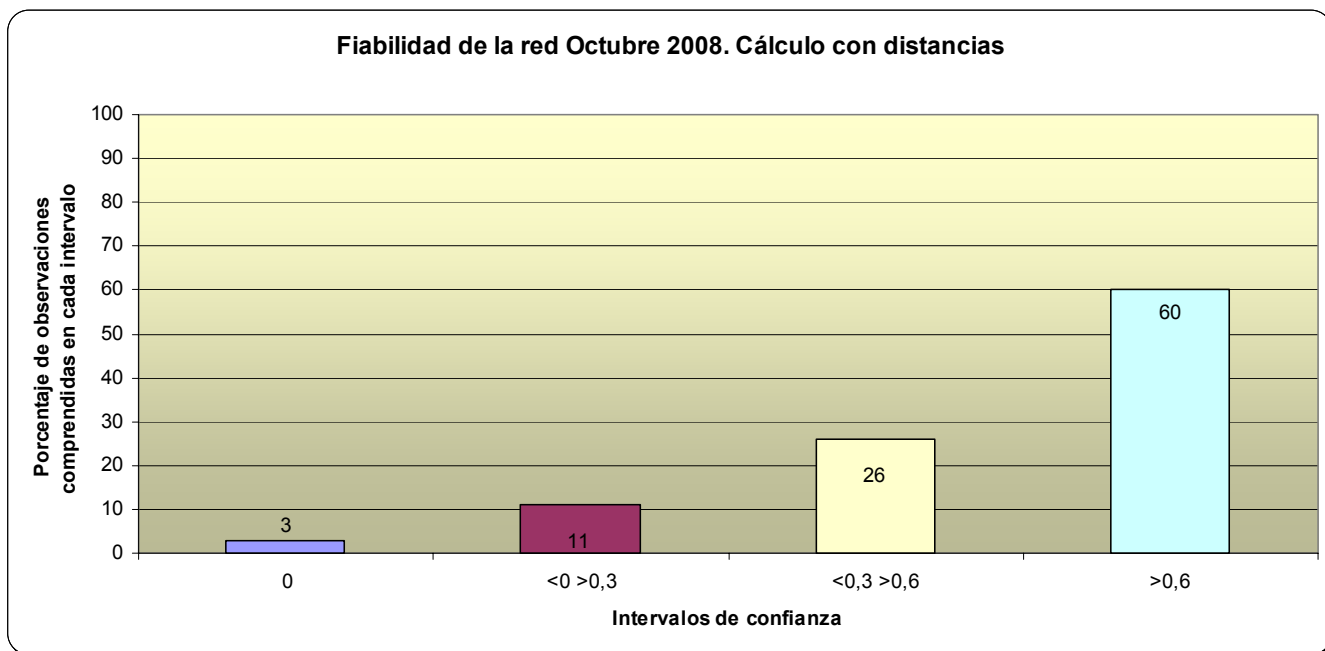


Figura 138. Gráfica que representa el porcentaje de observaciones que quedan dentro de los intervalos de confianza, después de realizar el ajuste de la campaña de Octubre de 2008 con observaciones de ángulos y distancias.

Ángulos	
Redundancia media	0,48
	Nº de observaciones
0	5
<0 >0,3	24
<0,3 >0,6	53
>0,6	41

Distancias	
Redundancia media	0,84
	Nº de observaciones
0	1
<0 >0,3	0
<0,3 >0,6	4
>0,6	91

Ecuaciones	219
Incógnitas	80
Grados de libertad	139

Intervalos	Número	Porcentaje %
0	6	3
<0 >0,3	24	11
<0,3 >0,6	57	26
>0,6	132	60

Figura 139. Tablas que representan los distintos valores del ajuste completo de la campaña de Octubre de 2008 con ángulos y distancias. Superior izquierda: representa los valores en número del ajuste pero solamente de las observaciones angulares. Superior derecha: representa los valores del ajuste pero exclusivamente de la parte que corresponde a observaciones de distancias. Inferior central: representa el número y el porcentaje de observaciones conjuntas (ángulos y distancias) del ajuste de la campaña de Octubre de 2008 y los intervalos elegidos.

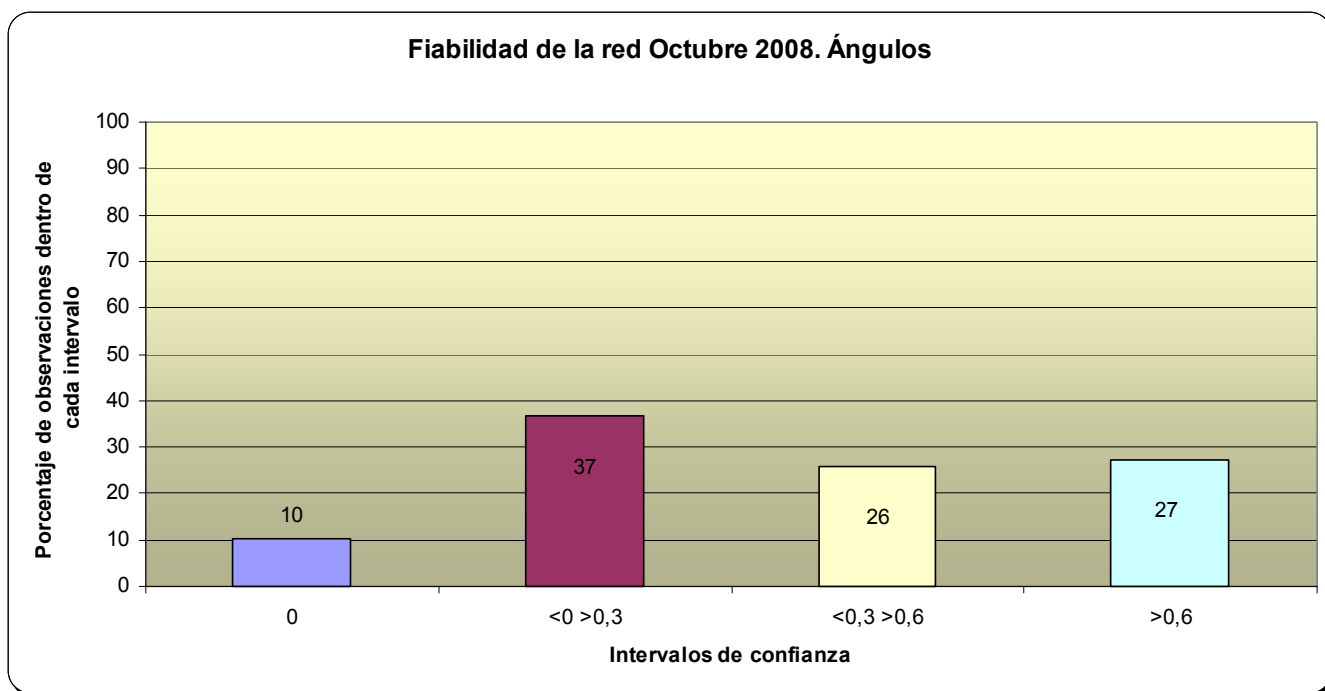


Figura 140. Gráfica que representa el porcentaje de observaciones que quedan dentro de los intervalos de confianza, después de realizar el ajuste de la campaña de Octubre de 2008 con observaciones de ángulos.

Redundancia media	0,38
	Nº de observaciones
Ecuaciones	128
Incógnitas	80
Grados de libertad	48

Intervalos	Número	Porcentaje %
0	13	10
<0 >0,3	47	37
<0,3 >0,6	33	26
>0,6	35	27

Figura 141. Tablas que representan los distintos valores del ajuste completo de la campaña de Octubre de 2008 con ángulos.

Como se ha visto y comentado en el estudio sobre la precisión, al introducir distancias en el ajuste, a la vez que se aumenta la precisión (las elipses disminuyen de tamaño), también cambia la dirección de los ejes de la elipse, consiguiendo elipses que se acercan más a la geometría de una circunferencia. A la vista de las dos gráficas presentadas sobre la fiabilidad de la red en el ajuste de la campaña de Octubre de 2008 con ángulos y en el ajuste de la misma campaña con ángulos y distancias, se comprueba que es cierto que la fiabilidad de la red aumenta, incrementando el número de puntos “bien controlados” y “muy bien controlados” en un 33%.



### 3º Estudio sobre el tiempo

Con el fin de analizar el efecto de la incorporación de observaciones de distancias en campo sobre el factor tiempo, se ha confeccionado la siguiente tabla, en la cual para cada serie realizada en la campaña de Octubre de 2008, se ha obtenido el tiempo que se ha tardado en observar cada visual y cada punto (cuatro visuales), señalando aquellas series en las que se observaron distancias.

	Tiempo	Visuales	Puntos	Tiempo por visual	Tiempo por punto	Observación de distancias
E51 serie 1	0:48:27	96	24	0:00:30	0:02:01	No
E51 serie 2	0:41:32	92	23	0:00:27	0:01:48	No
E51 serie 3	0:55:27	96	24	0:00:35	0:02:19	Sí
E52 serie 1	0:57:49	84	21	0:00:41	0:02:45	No
E52 serie 2	0:39:43	92	23	0:00:26	0:01:44	No
E52 serie 3	0:55:13	92	23	0:00:36	0:02:24	Sí
E53 serie 1	0:59:20	92	23	0:00:39	0:02:35	No
E53 serie 2	0:57:58	88	22	0:00:40	0:02:38	No
E53 serie 3	0:47:40	92	23	0:00:31	0:02:04	SI
E54 serie 1	0:36:42	68	17	0:00:32	0:02:10	No
E54 serie 2	0:27:13	64	16	0:00:26	0:01:42	No
E54 serie 3	0:26:49	48	12	0:00:34	0:02:14	Sí
E55 serie 1	0:40:01	100	25	0:00:24	0:01:36	No
E55 serie 2	0:30:31	96	24	0:00:19	0:01:16	No
E55 serie 3	0:36:47	100	25	0:00:22	0:01:28	Sí
E57 serie 1	0:10:42	32	8	0:00:20	0:01:20	No
E57 serie 3	0:07:28	24	6	0:00:19	0:01:15	No
E57 serie 2	0:13:13	32	8	0:00:25	0:01:39	Sí
E58 serie 1	0:11:49	28	7	0:00:25	0:01:41	No
E58 serie 2	0:09:37	24	6	0:00:24	0:01:36	No
E58 serie 3	0:10:07	24	6	0:00:25	0:01:41	Sí
Total	12:04:08	1464	366	0:09:59	0:39:57	
Inicio	9:02:31	10/11/2008				
Fin	18:21:13	10/11/2008				
Inicio	8:55:45	11/11/2008				
Fin	12:17:45	11/11/2008				

Figura 142. Tabla en la que se representa el tiempo consumido en campo en la campaña de Octubre de 2008, para cada una de las series, señalando aquellas series en las que se observaron distancias.

A partir de la tabla se obtuvieron las medias de tiempo empleado en la observación de ángulos y distancias:

	Media por visual	Media por punto
Ángulos	0:00:28	0:01:52
Distancias	0:00:30	0:01:59

Figura 143. Tabla que expone el tiempo medio consumido en campo, en la observación de una visual o de un punto completo, según la metodología utilizada, tanto en la medida de ángulos como de distancias durante la campaña de Octubre de 2008.

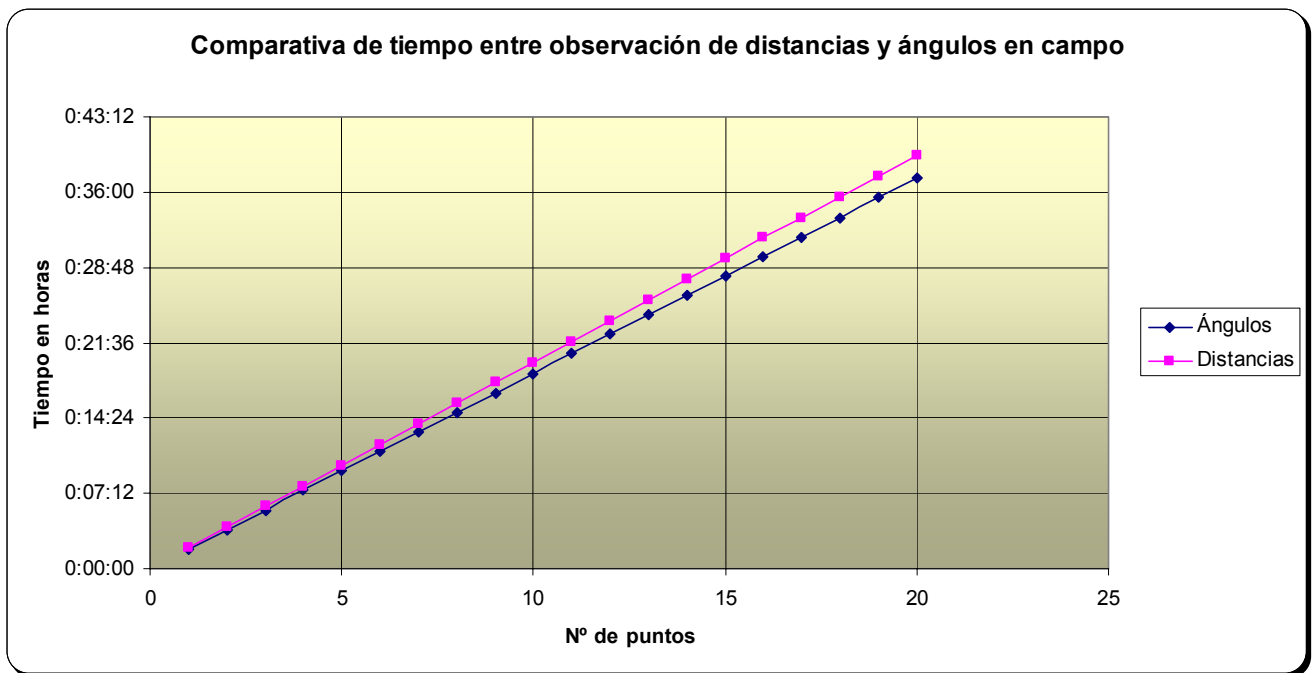


Figura 144. Tabla comparativa de tiempo consumido en la observación de ángulos y distancias en la campaña de Octubre de 2008, en función del número de puntos observados, y utilizando como valor de tiempo por punto la media obtenida en la figura 143.

Se puede concluir que la diferencia de tiempo entre la observación de distancias y ángulos es de 6 segundos por punto, lo que equivale a 1,5 segundos más por visual en la que se observa distancias que en la que solamente se mide el ángulo.

Por tanto podemos decir que la diferencia es prácticamente despreciable, puesto que en 20 puntos, el tiempo consumido de más debido a la observación de distancias sería de 2 minutos, lo que equivale a observar en campo un punto más en cada serie.

#### 4º Estudio sobre el coste

Como se ha visto en los apartados anteriores, con el fin realizar las correcciones debidas a efectos atmosféricos, se deben medir en campo presión, temperatura y humedad. Para ello se necesita una instrumentación adicional, que permita alcanzar precisiones adecuadas que permitan a su vez detectar variaciones dentro de las propias correcciones como:

dT..... Temperatura .....<+-1°C  
de.....Presión parcial del vapor de agua.....<+-25hPa  
dP.....Presión.....<+-3,5hPa

Para ello, se utilizan instrumentos como psicrómetros, barómetros y termómetros.

### Termómetros

Instrumento de medición de temperatura. Desde su invención ha evolucionado mucho, principalmente a partir del desarrollo de los termómetros electrónicos digitales.

La escala más usada en la mayoría de los países es la *centígrada* (°C), también llamada Celsius desde 1948, en honor a Anders Celsius (1701 - 1744). En esta escala, el cero (0°C) y los cien (100°C) grados corresponden respectivamente a los puntos de congelación y de ebullición del agua, ambos a la presión de 1 atmósfera.

Otras escalas termométricas son:

- Fahrenheit (°F), propuesta por Gabriel Fahrenheit en 1724, que es la unidad de temperatura en el sistema anglosajón de unidades, utilizado principalmente en Estados Unidos.
- Grado Réaumur (°R), en desuso. Se debe a René-Antoine Ferchault de Reaumur (1683-1757). La relación con la escala celsius es:  $T_{\text{Reaumur}} = (4/5) * T_{\text{Celsius}}$
- Kelvin (K) o *temperatura absoluta*, unidad de temperatura del Sistema Internacional de Unidades. Su cero es inalcanzable por definición y equivale a -273,15°C.



#### **Rainbow estación meteorológica**

Estación meteorológica y reloj con gran pantalla LCD. Para pared o escritorio. 2 pilas AAA no incluidas.

**34,08 €**

Figura 145. Estación meteorológica. Información obtenida de: <http://www.pixmania.com/es/es/1795/xx/xx/448/45/criteresn.html> Consultado en Marzo de 2009

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas



### Estación meteorológica Cirrus

Estación meteorológica con barómetro. Cuerpo de plástico. 2 pilas AAA no incluidas.

**30,32 €**

Figura 146. Estación meteorológica. Información obtenida de: <http://www.pixmania.com/es/es/1795/xx/xx/448/45/criteresn.html> Consultado en Marzo de 2009

	<p><b>Termómetro Ventix 5863</b></p> <p>VENTIX Termómetro interior y exterior con sensor sin cable. <a href="#">más información...</a></p>	<p>Precio <b>27,90</b> EUR</p>
	<p><b>Termómetro digital certificado TFA 31.119K</b></p> <p>TFA Termómetro doble infrarrojo/pincho con certificado de calibración. <a href="#">más información...</a></p>	<p>Precio <b>124,80</b> EUR</p>
	<p><b>Termómetro TFA 30.1012</b></p> <p>TFA Termómetro de interior y exterior con sensor con cable <a href="#">más información...</a></p>	<p>Precio <b>12,80</b> EUR</p>
	<p><b>Termómetro TFA 30.1011</b></p> <p>TFA Termómetro de interior y exterior con sensor con cable <a href="#">más información...</a></p>	<p>Precio <b>18,80</b> EUR</p>
	<p><b>Termómetro TFA 30.2017</b></p> <p>TFA Termómetro de interior sin sensor exterior <a href="#">más información...</a></p>	<p>Precio <b>9,00</b> EUR</p>
	<p><b>Termómetro TFA 30.1017.10</b></p> <p>TFA Termómetro de exterior o interior sin sensor exterior. <a href="#">más información...</a></p>	<p>Precio <b>17,90</b> EUR <b>- 18 % Oferta 14,65</b> EUR</p>
	<p><b>Reloj termómetro Oregon Scientific JM889</b></p> <p>OREGON SCIENTIFIC Reloj radiocontrolado con dígitos de gran formato con termómetro. <a href="#">más información...</a></p>	<p>Precio <b>39,00</b> EUR</p> <p><b>Agotado temporalmente</b></p>

Figura 147. Termómetros. Información obtenida de: <http://www.casaclima.com/tienda-l/250-1/Digitales.html> Consultado en Marzo de 2009

## Psicrómetro

Instrumento utilizado en meteorología para medir la humedad o contenido de vapor de agua en el aire, distinto a los higrómetros corrientes. Los psicrómetros constan de un termómetro de bulbo húmedo y un termómetro de bulbo seco. La humedad puede medirse a partir de la diferencia de temperatura entre ambos aparatos. El húmedo medirá una temperatura inferior producida por la evaporación de agua. Es importante para su correcto funcionamiento que el psicrómetro se instale aislado de vientos fuertes y de la luz solar directa.



[Ficha técnica](#)

### **Medidor de humedad relativa PCE HT110**

Medidor de humedad relativa de 2 canales para mediciones prolongadas de temperatura y humedad relativa con interfaz RS-232 y pantalla (memoria de 64 k).

- Capacidad de memoria de 64
- Interfaz RS-232
- Software opcional y cable datos para la transmisión y valoración de datos en el PC
- Pantalla con iluminación de fondo
- Protección de la carcasa IP 66
- Recalibrable
- Certificado de calibración ISO opcional

**134,00 EUR** más 16 % IVA

Excluido: [Costes de Envío](#)

Plazo de entrega: 1-3 Días (Salvo fin Stock)

Figura 148. Psicrómetro. Información obtenida de: [http://www.pce-group-europe.com/espanol/index.php/cat/c1305\\_Medido--hume--rel--serie-PCE-HT.html/XTCsid/0ed828e53c4c112f985590cbaafd4b72](http://www.pce-group-europe.com/espanol/index.php/cat/c1305_Medido--hume--rel--serie-PCE-HT.html/XTCsid/0ed828e53c4c112f985590cbaafd4b72) Precios obtenidos en Marzo de 2009.



### **Psicometro exterior con tabla -5+50°**

MD11


Psicómetro con tejadillo montado sobre soporte metálico pintado en color blanco.

**53,20 €**  
(IVA incluido)

Figura 149. Psicrómetro. Información obtenida de: [http://www.depositohidrografico.com/b2c/index.php?page=pp\\_producto.php&md=0&ref=MD11](http://www.depositohidrografico.com/b2c/index.php?page=pp_producto.php&md=0&ref=MD11) Precios obtenidos en Marzo de 2009.

## Barómetros

Instrumento que mide la presión atmosférica. La presión atmosférica es el peso por unidad de superficie ejercida por la atmósfera.




**Barómetro AVM 4000**

4 medidores en 1: velocidad del viento, humedad relativa, temperatura, presión barométrica.

- memoria interna (transmisión de datos posible con interfaz opcional y software)
- unidades: m/s; ft/s; km/h; mph; nudos y beaufort; °C; °F; % H.r.; mbar; hPa
- rangos: 0.3 ... 41 m/s / 0 ... 95 % H.r. / -29 ...+70 °C/ 870 ... 1080 hPa
- opcional: rueda alada de repuesto / software e interfaz / equipo de calibración de humedad

[Ficha técnica](#) El envío incluye: barómetro, baterías e instrucciones de uso.  
**249,00 EUR** más 16 % IVA

Figura 150. Barómetro. Información obtenida de: [http://www.pce-group-europe.com/espanol/index.php/cat/c304\\_Barometros-AVM-4000.html/XTCsid/e937042c58843045622a7e93ffb7dd88](http://www.pce-group-europe.com/espanol/index.php/cat/c304_Barometros-AVM-4000.html/XTCsid/e937042c58843045622a7e93ffb7dd88) Precios obtenidos en Marzo de 2009.



**Barómetro PCE DB 2**

Barómetro de presión para mediciones de presión barométrica (positiva/ negativo (vacío) y de presión absoluta.

- unidades: mbar; psi
- rangos:
  - 0 ...+2000 mbar absoluta o
  - -1000...0...+2000 mbar diferencial o vacío
  - 0...+29,00 psi absoluta o
  - -14,50 ... 0 ... 29,00 psi diferencial o vacío
- precisión:
  - $\pm 2$  % de la lectura (700 ... 1100 mbar),
  - $< \pm 0.5$  %,  $\pm 1$  digit para el resto
- opcional: certificado de calibración ISO/ software y cable RS-232 para el ordenador/ conectores neumáticos/ 2 metros de tubo de aire

**El envío incluye:** barómetro, bolso de transporte, adaptador de red, instrucciones d uso.  
**325,00 EUR** más 16 % IVA

Figura 151. Barómetro. Información obtenida de: [http://www.pce-group-europe.com/espanol/index.php/cat/c304\\_Barometros-AVM-4000.html/XTCsid/e937042c58843045622a7e93ffb7dd88](http://www.pce-group-europe.com/espanol/index.php/cat/c304_Barometros-AVM-4000.html/XTCsid/e937042c58843045622a7e93ffb7dd88) Precios obtenidos en Marzo de 2009.

A la vista de los precios de la instrumentación necesaria para medir con una precisión adecuada los factores meteorológicos que afectan a la medición electromagnética de distancias, se puede establecer el aumento en el coste del proyecto estableciendo un precio medio por instrumento necesario:

- Termómetro.....34,50 euros
- Psicrómetro.....91,00 euros
- Barómetro.....287,00 euros

**Incremento total medio en el coste del proyecto de 412,50 euros.**

### 3º Estudio sobre la complejidad del ajuste

En el ajuste de observaciones de distancias se contemplan dos partes diferenciadas del mismo, una a priori y otra a posteriori:

- A priori: corrección de meteorológica de las distancias, que consiste en corregir las observaciones, de los factores atmosféricos que intervienen (presión, temperatura y humedad).
- A posteriori: ajuste de las observaciones de distancias conjuntamente con las observaciones angulares (es decir, ajuste de intersecciones mixtas mediante la utilización del modelo matemático de Gauss-Markov anteriormente comentado), con el consiguiente aumento en la dificultad del modelo, puesto que se deben introducir en el cálculo las ecuaciones de observación de distancias y los pesos asignados a cada tipo de distancia medida (se debe tener en cuenta que se realizan dos medidas distintas de distancias, una mediante la utilización de infrarrojo con prisma de reflexión y medidas mediante láser sin prisma y que ambas tienen distinta precisión).

La precisión de medida mediante sistema **de infrarrojo con prisma** estándar es de **2 mm +2ppm**.

La precisión en distancias con **láser sin prisma** es de **3mm+2ppm**

Por lo tanto, a la hora de realizar el ajuste, se debe introducir una matriz de pesos: P

Ecuación de observación de distancias para el modelo Gauss-Markov:

Las observaciones de tipo distancia tienen la siguiente información: estaciones origen y visada, distancia observada, desviación estándar y residuo.

La fórmula general es:

$$\frac{x_{i0} - x_{j0}}{L_0} dx_i + \frac{y_{i0} - y_{j0}}{L_0} dy_i + \frac{x_{j0} - x_{i0}}{L_0} dx_j + \frac{y_{j0} - y_{i0}}{L_0} dy_j = k_{ij} + v_{ij}$$

En la ecuación anterior:

$$k_{ij} = l_{ij} - L_0$$

$$L_0 = \sqrt{(x_{j0} - x_{i0})^2 + (y_{j0} - y_{i0})^2}$$

La desviación estándar de cada observación es:

$$\sigma = \sqrt{e_{dc}^2 + e_{dp}^2}$$

En la ecuación anterior:

$e_{dc}$  = Error del equipo constante en distancia

$e_{dp}$  = Error proporcional del equipo (ppm)

Corrección de las observaciones debido al efecto de las condiciones atmosféricas:

Todos los datos que nos aporta el fabricante sobre las características técnicas del instrumento con el que estamos trabajando en distancias, son obtenidos en unas condiciones ideales de laboratorio, pero cuando se trabaja en campo, esas condiciones ambientales cambian, por lo tanto las observaciones realizadas deben ser corregidas. A continuación se expone el estudio sobre esas correcciones al cambiar las condiciones atmosféricas en dos campañas distintas, Enero de 2009 y Julio de 2008, utilizando para ello la formulación usada por el fabricante a la hora de obtener correcciones:

Fórmula utilizada proporcionada por el fabricante:

$$\Delta D = 285,92 - \left( \frac{0,29492 * p}{1 + \alpha * t} - \frac{4,126 * 10^{-4} * h}{(1 + \alpha * t) * 10^x} \right)$$

Siendo  $X = \frac{7,5 * t}{237,3 + t} + 0,7857$

$\Delta D$  = corrección en función de las condiciones atmosféricas

t = temperatura en grados centígrados

p = presión en milibares

h = humedad en tanto por ciento

P1 = 0,29492*P	300,612
P2 = 0,29492*P	298,828
P3 = 0,29492*P	300,229
h1 = 4,126*10 <sup>(-4)</sup> *h	0,034
h2 = 4,126*10 <sup>(-4)</sup> *h	0,025
h3 = 4,126*10 <sup>(-4)</sup> *h	0,024
X = [(7,5*t)/(237,3+t)]+0,7857	0,995
X2 = [(7,5*t)/(237,3+t)]+0,7857	1,147
X3 = [(7,5*t)/(237,3+t)]+0,7857	1,414
alfa = $\alpha$	0,004
1+ $\alpha$ *t temperatura en Enero 2009	1,025
1+ $\alpha$ *t temperatura en condiciones ideales (fabricante)	1,044
1+ $\alpha$ *t temperatura en Julio de 2008	1,079

Figura 152. Tabla que representa los valores dados para los distintos factores, humedad, temperatura y presión, por el fabricante. En el caso de la estación Leica TCR 1205.



A continuación se expone la tabla con los resultados obtenidos del cálculo de las correcciones para ambas campañas (Julio 2008 y Enero 2009) y en condiciones de laboratorio:

Campaña	Presión (mbar)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	ppm
<b>ene-09</b>	<b>1019,3</b>	<b>6,8</b>	<b>82</b>	<b>-7</b>
Condiciones ideales	1013,25	12	60	0
<b>jul-08</b>	<b>1018</b>	<b>21,7</b>	<b>58</b>	<b>8</b>

Figura 153. Tabla que expone las correcciones sobre las distancias mediadas en campo, en dos campañas (Julio 2008 y Enero 2009) y las obtenidas en condiciones ideales (laboratorio). En el caso de las campañas de Julio y Enero, los factores atmosféricos fueron medidos mediante una estación meteorológica.

Aplicando las correcciones a las distancias reales observadas en campo, se puede apreciar (en la figura 154), que la variación no es muy grande, considerando que la precisión obtenida en la determinación de las coordenadas no es inferior al milímetro.

	Distancias	Corrección Enero en mm	Corrección Julio en mm	Variación en la medida de distancias entre épocas sin prisma en mm
Distancia máxima	66,161	<b>-0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>1,0</b>
Distancia mínima	5,5408	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
Distancia media	35,8509	<b>-0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>0,6</b>

Figura 154. Tabla que representa la corrección realizada para las observaciones de distancias medidas en campo, en las campañas de Julio 2008 y Enero 2009, en milímetros.

Sí que es necesario a la vista de los resultados obtenidos, realizar las correcciones oportunas en medida de distancias a priori, puesto que si bien en una campaña se podría decir que el error cometido es despreciable, en función de la precisión obtenida en la determinación de los puntos, al comparar distintas campañas, ese error puede ser importante, como se ve al realizar la variación de corrección entre ambas épocas, en la tabla anterior.

Además de todo lo anterior, se debe tener en cuenta, que la finura con la que se mide (en el caso de distancias con láser sin prisma), depende de la distancia e inclinación con la que se vise al punto, puesto que el tamaño del puntero láser aumenta de tamaño con la distancia, como nos indica el fabricante. Factor importante a tener en cuenta, puesto que no siempre la distancia medida coincide con el punto que se observa por el ocular.

Distancia al punto	Tamaño del puntero láser en mm
20 m	7x14mm
100 m	12x40mm

Figura 155. Tabla que representa las dimensiones del puntero láser de la estación total Leica TCR 1205, a una determinada distancia. Datos proporcionados por el fabricante.

#### **4.9.3.- Tabla obtenida del análisis**

Los análisis realizados podemos condensarlos en la siguiente tabla:

	Resultado	Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
Observaciones	Medida de distancias	+	+	-	=	-

Figura 156. Tabla de resultados obtenidos de los análisis realizados sobre la propuesta: Medida de distancias.

Concluyendo este análisis, podemos decir que al incluir la observación de distancias, la precisión en la determinación de las coordenadas aumenta hasta un límite, no se obtienen precisiones inferiores al milímetro, pero se consiguen precisiones medias de 2 mm, lo que mejora respecto a las precisiones con observaciones de ángulos solamente, en al menos 1 mm en cada punto.

La fiabilidad de la red es la que más mejora presenta, pasando de un porcentaje de observaciones muy bien determinadas del 27% (solamente con ajuste de ángulos) a un 60% y de un 10% de observaciones no controladas a un 3%, lo que indica una mejora global de la fiabilidad de un 30%.

Respecto al tiempo, como se deriva del análisis realizado, se nota un incremento de 6 segundos en la observación de cada punto, que puede considerarse despreciable.

El coste aumenta, al ser necesario una instrumentación precisa para la determinación de parámetros atmosféricos precisos, con el fin de obtener las correcciones que se deben aplicar a las distancias observadas. Estas correcciones, nos incrementan también por otro lado la complejidad del ajuste, además de cambiar el modelo de cálculo, puesto que se deben introducir las ecuaciones de observación de distancias y matrices de pesos.

## 5.- Resultados

Tabla con las hipótesis de partida:

	<b>Propuesta</b>	<b>Precisión</b>	<b>Fiabilidad</b>	<b>Coste</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Complejidad</b>
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
<b>Instrumentación</b>	Instrumentación geodésica	+	=	-	=	=
	Pilares de observación	+	+	-	=	=
<b>Señalización</b>	Pasar de placas a clavos	=	=	+	=	=
	Pasar de placas a prismas	+	=	-	+	=
<b>Observaciones</b>	Reducir nº de lecturas a referencia	=	=	+	+	-
	Reducir puntos de observación	=	=	+	+	=
	Reducir nº de series	-	=	+	+	=
	Medida de distancias	+	+	-	-	-

Figura 157. Tabla con las hipótesis de partida, antes de realizar los análisis.

Tabla obtenida del análisis de cada propuesta sobre los factores:

	<b>Resultado</b>	<b>Precisión</b>	<b>Fiabilidad</b>	<b>Coste</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Complejidad</b>
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
<b>Instrumentación</b>	Instrumentación geodésica	=	=	-	=	=
	Pilares de observación	+	+	-	=	=
<b>Señalización</b>	Pasar de placas a clavos	=	=	+	-	=
	Pasar de placas a prismas	+	=	-	+	=
<b>Observaciones</b>	Reducir nº de lecturas a referencia	=	-	+	+	-
	Reducir puntos de observación	=	=	+	+	=
	Reducir nº de series	-	-	+	+	-
	Medida de distancias	+	+	-	=	-

Figura 158. Tabla con los resultados obtenidos de todos los análisis.

Tabla comparativa entre la tabla de hipótesis iniciales y la tabla obtenida de los análisis:

	Resultado	Precisión	Fiabilidad	Coste	Tiempo	Complejidad
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto
<b>Instrumentación</b>	<b>Instrumentación geodésica</b>	Variación	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial
	<b>Pilares de observación</b>	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial
<b>Señalización</b>	<b>Pasar de placas a clavos</b>	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Variación	Hipótesis Inicial
	<b>Pasar de placas a prismas</b>	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial
<b>Observaciones</b>	<b>Reducir nº de lecturas a referencia</b>	Hipótesis Inicial	Variación	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial
	<b>Reducir puntos de observación</b>	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial
	<b>Reducir nº de series</b>	Hipótesis Inicial	Variación	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Variación
	<b>Medida de distancias</b>	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Hipótesis Inicial	Variación	Hipótesis Inicial

Figura 159. Tabla con la variación, después de realizar los análisis pertinentes, entre las hipótesis de partida planteadas y los resultados obtenidos.

## **6.- Recomendaciones y conclusiones**

### **6.1.-Respecto a las pruebas realizadas**

#### **6.1.1.- Instrumental utilizado**

Se tiene el análisis de tres tipos de instrumental a utilizar:

- **Convencional:** precisiones en medida de ángulos no inferiores al segundo centesimal. Mediante este instrumental y la metodología empleada, se consiguen precisiones en la determinación de coordenadas de hasta 1mm.
- **Geodésico:** con precisiones angulares inferiores al segundo. Se puede llegar a la conclusión a partir de los análisis realizados que con la metodología empleada no aumentan la precisión conseguida con el instrumental anterior, pero si que aumenta el coste de los trabajos, puesto que el propio coste de compra o alquiler del instrumental es más caro.

Pero en el caso de utilizar este instrumental sobre estaciones de control (pilares de observación con sistema de centrado forzoso), si que aumentan la precisión en coordenadas, puesto que además de eliminarse el error de dirección, debido a que se elimina el error de estacionamiento, la alta

precisión en la determinación angular, permite obtener precisiones inferiores al milímetro.

- **Instrumentación con sistema ATR** (reconocimiento automático de señales): no incide tanto su utilización en la precisión de las coordenadas obtenidas, puesto que se tienen instrumentos tanto con precisiones angulares por encima y por debajo del segundo centesimal, si no que la ventaja principal es la rapidez en la toma de datos que gracias a este sistema se consigue, además se reducen en campo los posibles errores groseros que un operador humano pueda cometer y se eliminan errores como la desnivelación del instrumento estacionado sobre trípode debido a movimientos aplicados por el operador sobre el mismo, y se reduce al mismo tiempo el error de dirección, al reducirse el error de señal (el instrumento localiza automáticamente el centro de la señal sin ambigüedad alguna). Pero también aumenta el coste del proyecto, puesto que el instrumental, tanto en alquiler como en compra es más caro y el tipo de señalización especial también lo es. Permite a su vez la monitorización continua del elemento a estudio. Además, debido a la señalización especial que se debe instalar, permite la medida de distancias mediante infrarrojo, lo que aumenta la precisión y la fiabilidad de la red como se ha expuesto en el apartado 4.9.

Este instrumental, empleado conjuntamente con pilares de observación dotados con sistema de centrado forzoso puede permitir alcanzar grandes precisiones (el centrado forzoso elimina el error de estacionamiento y el instrumental elimina el error de señal, por tanto, el error de dirección que es el que más peso tiene en el cálculo del error angular, se hace cero).

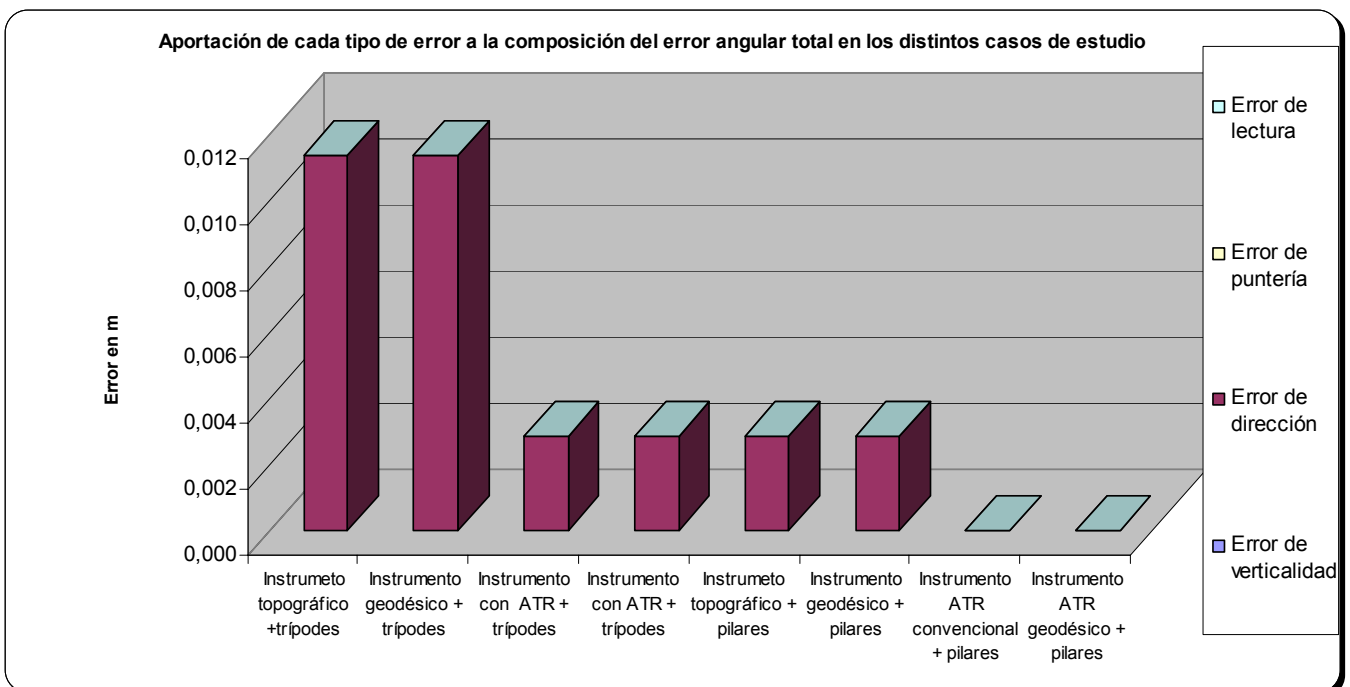


Figura 160. Gráfico que representa todas las posibles combinaciones de instrumentación y sistemas de estacionamiento que se han analizado y la acumulación del error en milímetros que se comete, derivado de los errores de puntería, lectura, dirección y verticalidad, que componen el error angular total. Como se puede observar, el error con mayor peso es el de dirección.

Como se puede extraer del gráfico anterior, el error que mayor repercusión tiene en la determinación del error angular del instrumento es el de dirección, que se compone a su vez del error de estacionamiento y señal. Por tanto, si se consigue eliminar por algún método estos dos errores, se podrán alcanzar precisiones mayores. En el gráfico se ve la evolución en la disminución del error angular, en función de las medidas tomadas para eliminar o disminuir el error de dirección.

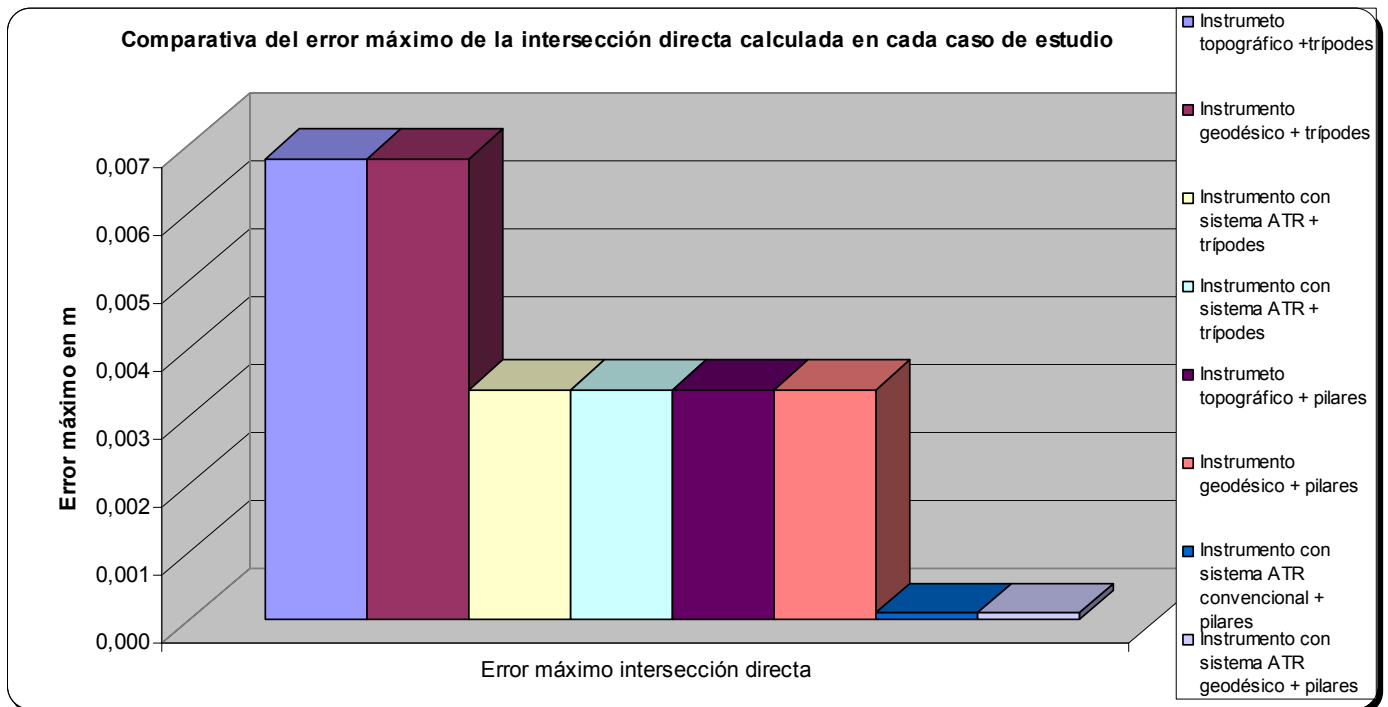


Figura 161. Gráfico que representa todas las posibles combinaciones de instrumentación y sistemas de estacionamiento que se han analizado y el error máximo que se comete en la determinación de una intersección directa con un ángulo de intersección de  $80^{\circ}$ , teniendo en cuenta el error angular cometido que se obtiene de la gráfica 160.

El error máximo de la intersección inversa viene expresado como el producto de una constante  $((\text{distancia}/(\text{ángulo de intersección})/2))$ , suponiendo el caso de una distancia media de 30 m y un ángulo de intersección de 80 grados centesimales, por el error angular. En la gráfica anterior se puede observar como el error de la intersección directa disminuye en función de la disminución del error angular, que a su vez decrece en función a la reducción o eliminación del error de estacionamiento, de señal o de ambos, según el instrumental utilizado. Se puede extraer por tanto que utilizando una estación total convencional, con sistema de reconocimiento automático de señales y estacionada sobre pilares de observación dotados con sistema de centrado forzoso, se pueden llegar a conseguir precisiones inferiores al milímetro (se debe tener en cuenta que estos datos se obtienen de cálculos matemáticos que tienen en cuenta algunos de los factores que influyen en la observación, no están contrastados en campo y además existen muchos otros factores que pueden influir en las observaciones y que no se pueden cuantificar, produciendo errores no controlados y no corregibles).

### **6.1.2.- Necesidad de erigir estaciones de observación**

Además de la mejora en la precisión de los puntos aludida en el punto anterior, es lógico suponer que al aumentar el número de puntos fijos en el ajuste, la precisión del mismo va a aumentar, puesto que al variar el ajuste de dos puntos fijos a siete, lo que estamos haciendo es mantener el número de ecuaciones y disminuyendo en 10 el número de incógnitas (puesto que tenemos como incógnitas para cada punto X e Y).

Esto es demostrable:

	<b>Ajuste 1</b>
Ecuaciones	131
Incógnitas	80
Grados de libertad	51
	<b>Ajuste 2</b>
Ecuaciones	130
Incógnitas	70
Grados de libertad	60

Figura 162. Tabla que expone los datos derivados del ajuste de una campaña de observación en dos situaciones distintas, con dos puntos fijos y con siete puntos fijos.

Ajuste 1: realizado con dos puntos fijos

Ajuste 2: realizado con 7 puntos fijos

Al aumentar los puntos fijos, disminuimos las incógnitas y por consiguiente se aumenta el grado de libertad del ajuste.

En vista de los resultados obtenidos de los distintos ajustes que se han realizado, se puede concluir que el introducir los puntos de estación como puntos fijos de la red, aumenta entre un 10% y un 20% el número puntos con un valor de fiabilidad superior a 0,6 (valor de redundancia de cada observación, su contribución a la redundancia total), este valor informa sobre la capacidad de detectar errores groseros en esa observación. Los valores son mejores cuanto más cercanos a la unidad sean, se consideran débilmente controlados los valores inferiores a 0'3), con lo cual el ajuste se considera más preciso.

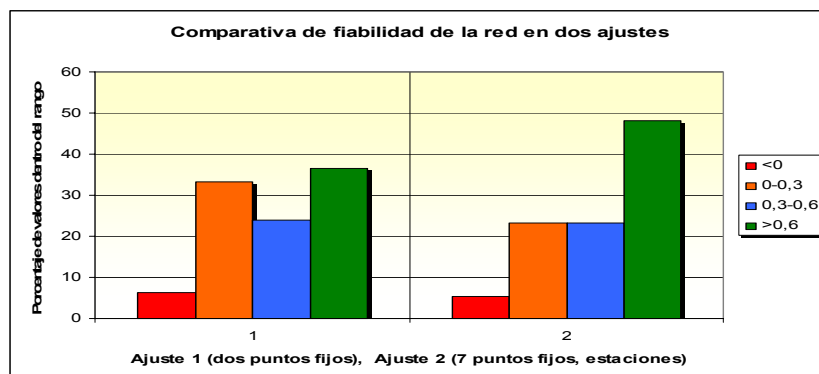


Figura 163. Comparativa de fiabilidad de dos ajustes de la misma campaña en condiciones distintas.

Se puede asegurar que la inclusión de puntos fijos mejora la fiabilidad de la red y para ello es necesario fijar esos puntos en el terreno, es decir, construir pilares de observación, que por otro lado, se ha demostrado que aumentan el coste total del proyecto.

Por tanto, el principal condicionante a la hora de erigir pilares de observación, es el presupuesto asignado al proyecto. Si el presupuesto lo permite es aconsejable este tipo de estaciones de control, y si no es así, se ha visto que el sistema de trípodes cubre las necesidades de un proyecto de auscultación en términos de precisión y fiabilidad.

### **6.1.3.- Pasar de placas a clavos y a prismas**

El principal factor a tener en cuenta es el coste de cada tipo de señalización, ordenando las tres señalizaciones por coste de menor a mayor, se obtiene:

- **Clavos:** es la señalización más económica. Como se ha demostrado, mediante su uso, se aumenta la precisión en la determinación de las coordenadas respecto a las placas, y poseen mejor reflexión en cuanto a la medición de distancias con láser que las placas, por tanto, mejores precisiones en la determinación de distancias. Sin embargo tienen un inconveniente y es que por su pequeño tamaño son difíciles de localizar sobre la estructura y necesitan de otra señalización al lado para poder ser encontrados. Otro problema, que se desconoce si en este caso se puede producir, es la oxidación de los mismos, puesto que en otros trabajos ha ocurrido, con el paso del tiempo pueden oxidarse y perder sus cualidades físicas, y por lo tanto alterar las sucesivas observaciones que se realicen a los mismos.
- **Placas:** su principal ventaja es que se pueden localizar sobre la estructura sin necesidad de emplear otra señalización al lado (se ven a simple vista, y el impacto visual que generan es muy pequeño). Además son de acero inoxidable, que en principio no se van a alterar con el paso del tiempo, pero presenta algunos problemas. El principal de ellos es que presenta una superficie de reflexión total, lo que ocasiona que al realizar medidas de distancias con láser, la señal no llegue con la suficiente coherencia como para que el instrumento sea capaz de calcular la distancia. Por lo tanto, para posteriores trabajos sería necesario que al utilizar este tipo de señalización se realice algún tipo de tratamiento para que no se produzca este efecto espejo.
- **Prismas:** su principal ventaja es que pueden ser reconocidos automáticamente por la instrumentación con sistema ATR (reconocimiento automático de señales fijas) y permiten la automatización de las observaciones en campo, eliminando los posibles errores groseros que puedan cometer los operadores humanos y disminuyendo el tiempo de observación. Al mismo tiempo permite la medida de distancias mediante el



sistema de infrarrojo, lo que aumenta la precisión en dichas observaciones con respecto a las medidas con láser. Y se desconoce por otro lado, la estabilidad temporal a largo plazo.

#### **6.1.4.- Eliminar series observaciones a referencia**

Esta modificación, disminuye considerablemente el volumen de puntos observados en campo y por consiguiente el tiempo de observación, lo que hace que disminuya también el coste del proyecto debido al coste de los operarios por hora de campo.

Pero presenta una desventaja muy importante y es que en ocasiones no se puede realizar el ajuste de las observaciones, puesto que al eliminar observaciones a la referencia, hace que la determinación de los ángulos internos pasa de realizarse de una forma independiente para cada observación a una determinación que depende del cálculo del ángulo anterior, los ángulos pasan a ser dependientes unos de otros, por lo que los errores que se cometan en la primera observación se convierten en sistematismos para todas las demás, al igual que los posibles errores groseros, se vayan acumulando de forma progresiva hasta la próxima observación a referencia. Esto hace que el ajuste en muchas ocasiones no se pueda culminar, apareciendo como resultados de los test estadísticos sistematismos no controlados en las observaciones, disminuyendo la fiabilidad de la red. Además, al cambiar la dependencia de los ángulos se debe cambiar el modelo de cálculo matemático de ajuste, introduciendo una matriz de pesos que aumenta la complejidad del ajuste.

Por lo tanto no es conveniente eliminar lecturas a la referencia, y se recomienda utilizar la metodología seguida hasta el momento.

#### **6.1.5.- Eliminar puntos de observación**

Esta medida no afecta en absoluto a la precisión en la determinación de las coordenadas de los puntos como se ha deducido de los análisis realizados y tampoco causa disminución en la fiabilidad de la red.

Al disminuir el número de puntos de control, disminuye el número de observaciones a realizar en campo, lo que conlleva una disminución en el tiempo de observación y como consecuencia también reduce el coste del proyecto. No tiene incidencia en la complejidad del cálculo puesto que los observables son los mismos y la configuración de los puntos no varía.

Se debe tener en cuenta que para eliminar puntos de control, se debe hacer una vez obtenidos resultados de ajustes anteriores, y una vez que se ha establecido que esos puntos no presentan movimientos anómalos o que son importantes para la deducción del posible movimiento de la estructura. Además es conveniente realizar una tabla como la que se ha obtenido en el punto

4.7.2.1, en la cual se clasifican los puntos atendiendo al número de estaciones desde las que son observados, a la geometría de la elipse de error que presentan del ajuste y a la precisión que se ha obtenido en la determinación de sus coordenadas después del ajuste. Con esto se obtiene una clasificación de los puntos en malos, regulares, buenos y muy buenos, que nos ayuda a eliminar todos aquellos puntos que son malos o incluso los regulares.

#### **6.1.6.- Eliminar series de observación desde cada estación**

Ocurre un efecto parecido al ocasionado por disminuir las lecturas a la referencia, se disminuye el volumen de observaciones a realizar en campo, se reduce el tiempo y por consiguiente el coste del proyecto, pero se pierde en precisiones y en la fiabilidad de la red como se extrae del análisis realizado en los puntos 4.8.2.1 y 4.8.2.2 referentes a la precisión y fiabilidad en el ajuste de campañas con dos series por estación.

Ocurre también que no en todas las campañas es posible la culminación del ajuste y por consiguiente no se obtienen las coordenadas ajustadas de los puntos de control, objetivo de la auscultación.

Se concluye por tanto que en el proyecto de Agoncillo estamos trabajando con un número de series por estación mínima, lo que permite conseguir el ajuste de las observaciones, pero no sería conveniente la disminución del número de series por estación, en tal caso, se podría incluso incrementar en una serie más, aunque a la vista de los resultados obtenidos, no sería necesario.

#### **6.1.7.- Introducir un observable nuevo: Distancias**

En el proyecto de Agoncillo, se miden distancias entre estaciones de control observando a prismas mediante el sistema de medida de infrarrojo, lo que permite obtener medidas con una indeterminación de  $2\text{mm}+2\text{ppm}$  según el fabricante.

Estas distancias no se utilizan en la determinación de las coordenadas de los puntos de estación, pero a la vista de los resultados derivados de los análisis realizados en el punto 4.9. sería conveniente introducirlas, puesto que como se ha demostrado aumenta la fiabilidad de la red y la precisión en la determinación de las coordenadas de los puntos (por lo menos en este caso en la obtención de las estaciones de control).

Al introducir un nuevo observable en el ajuste se aumenta la redundancia del mismo, lo que aumenta la fiabilidad de la red. La medida de distancias aporta nuevas ecuaciones para resolver el mismo número de ecuaciones, lo que favorece el aumento de la fiabilidad, pero es cierto que según se extrae del análisis realizado, aumenta el tiempo de observación en campo y requiere de una señalización específica que permita medir distancias con buena precisión,

lo que hace que se tengan que controlar nuevos parámetros que influyen en las nuevas observaciones como son la presión la temperatura y la humedad, necesarios para corregir de deformaciones las distancias, lo que implica el uso de instrumentos precisos para la determinación de esos parámetros que encarecen el coste del proyecto.

La introducción de distancias en el ajuste hace que el modelo de cálculo cambie, ahora en el ajuste se deben introducir ecuaciones de observación para distancias y si además se ajustan distancias obtenidas por distintos métodos de medida (infrarrojo o láser) se debe introducir una matriz de pesos, puesto que las precisiones de ambos métodos son distintas.

La introducción de medidas de distancias es un aspecto que mejora considerablemente las precisiones alcanzadas y la fiabilidad de la red pero aumenta a la vez el coste del proyecto y la complejidad del mismo.

Sería justificable su aplicación en el caso de querer aumentar la precisión de las coordenadas obtenidas.

## **6.2. Respecto a los factores**

A continuación se va a proceder a exponer un resumen de los análisis realizados, orientados a los efectos que cada uno de ellos producen sobre los factores.

Todos los resultados que se aportan a continuación, son comparados con los obtenidos durante la ejecución del proyecto de auscultación en Agoncillo.

### **6.2.1. Precisión**

Con el fin de aumentar la precisión de las observaciones se pueden realizar varias propuestas:

1.- Construcción de pilares de observación:

Por sí solos, independientemente de la instrumentación que se utilice, aumentan la precisión de las observaciones en un 50%.

2.- Utilizar estación total topográfica convencional, estacionando sobre pilares de observación.

Esta propuesta produce un incremento en este factor de 0,0033 metros, lo que traducido a porcentaje sería un incremento del 91%.

3.- Pasar de una señalización formada por placas de puntería a otra en la cual los elementos de puntería son prismas:

Esta propuesta, por sí sola no aumenta la precisión de las observaciones, pero permite el uso de un nuevo instrumental, estaciones totales con sistema de reconocimiento automático de señales, que como se ha

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

demostrado mediante los análisis mejoran considerablemente la precisión.

4.- Instrumentación con sistema de localización automático de señales (ATR) estacionado sobre trípodes:

Produce un incremento en la precisión de 0,0017 metros, lo que supone un incremento del 50%.

5.- Instrumentación con sistema de localización automático de señales (ATR) estacionado sobre pilares de observación:

De esta forma, se incrementa la precisión de las coordenadas en un 100%, obteniendo precisiones por debajo del milímetro.

6.- Introducción de un nuevo observable en el ajuste, las distancias:

Introduce una mejora en la precisión de 0,0014 m, lo que es equivalente a decir que incrementa la precisión en un 41%.

De todas las propuestas analizadas durante este proyecto, solamente una de ellas, reducir el número de series por estación, ejerce un efecto negativo sobre este factor, reduciéndolo en 1 milímetro, lo que supone un descenso del 29%.

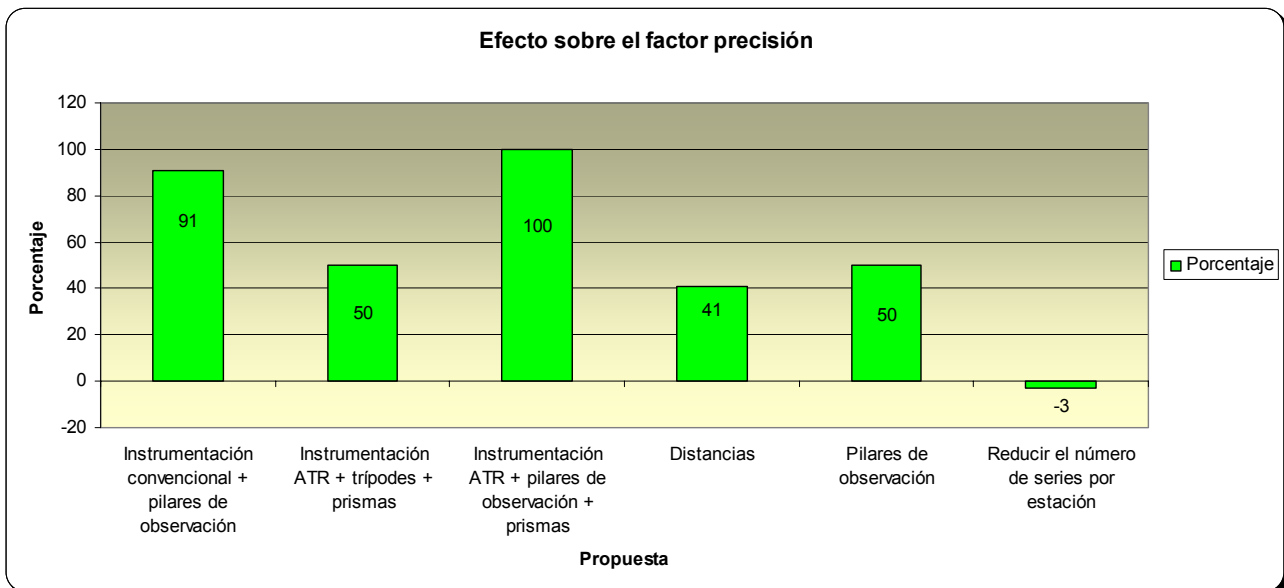


Figura 164. Efecto producido sobre el factor precisión, en función de las distintas propuestas analizadas, respecto a los resultados obtenidos durante el proyecto de auscultación realizado por el LDGP en Agoncillo.

Todas las propuestas anteriores que mejoran la precisión de las observaciones, producen un efecto negativo sobre el factor coste, por lo tanto debemos tener en cuenta cuales son las necesidades de precisión del proyecto, cual es el presupuesto asignado y en función, escoger la propuesta que mejor se adapte.

### **6.2.2.- Fiabilidad**

Como resumen del estudio realizado sobre el factor fiabilidad, se han obtenido los siguientes datos:

Propuestas que introducen mejoras en el factor:

1.- Construcción de pilares de observación:

Esta medida incrementa la fiabilidad de nuestra red en un 10%.

2.- Observación de distancias en campo:

Se obtiene una mejora en la fiabilidad de la red del 33%.

Propuestas que producen un efecto negativo sobre el factor:

1.- Reducir el número de lecturas a la referencia

Disminuye la fiabilidad de la red, debido a la aparición de sistematismos en el ajuste, lo que influye negativamente en la fiabilidad, pero no es posible cuantificarlo numéricamente.

2.- Reducir el número de series por estación:

Disminuye la fiabilidad en un 1%.

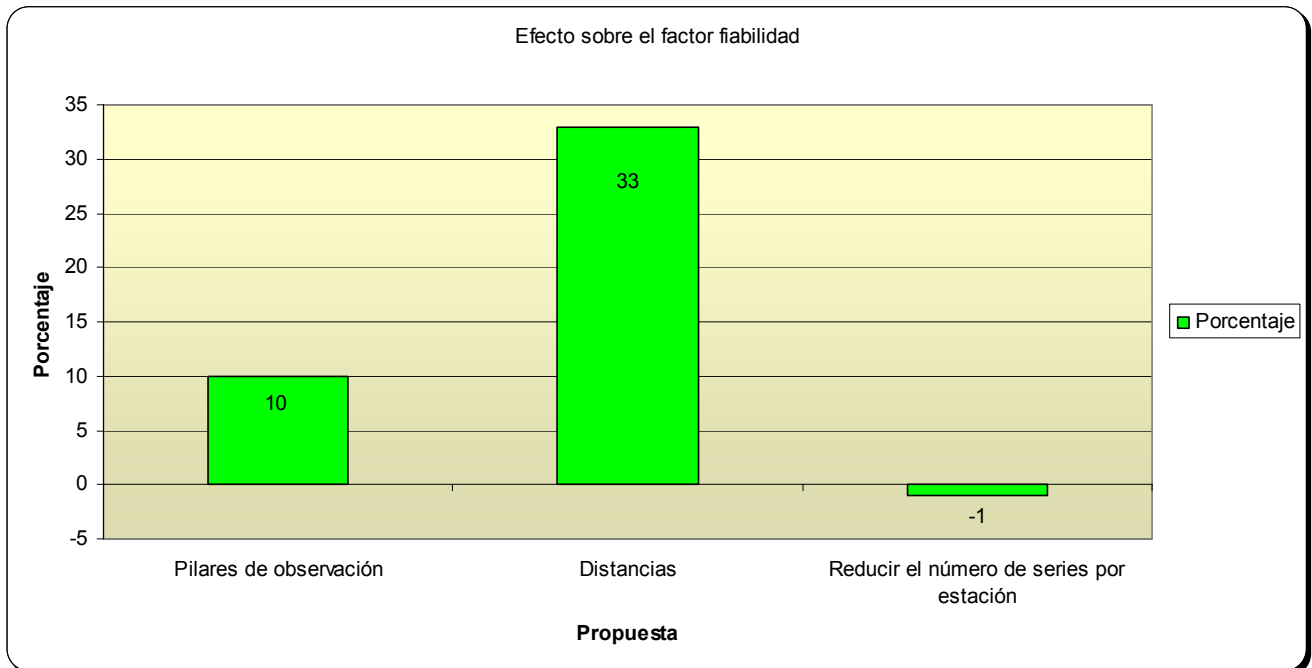


Figura 165. Efecto producido sobre el factor fiabilidad, en función de las distintas propuestas analizadas, respecto a los resultados obtenidos durante el proyecto de auscultación realizado por el LDGP en Agoncillo.

### **6.2.3. Coste**

Este es el único factor, que se ha analizado, el cual se modifica tanto positivamente como negativamente al aplicar cualquiera de las propuestas, lo que significa que es el factor con mayor variabilidad de todos.

El coste se divide tres partes fundamentales dentro de un proyecto, el derivado del precio de la instrumentación, de la señalización y del tiempo dedicado (que repercute sobre el precio por hora del operador). Cada una de estas tres divisiones representa por tanto el 33,3% del coste total.

Las propuestas que lo modifican son las siguientes

1.- Pasar de placas a clavos:

Reduce el coste del proyecto en un 31%, puesto que reduce el 98% del coste relacionado con la parte de señalización.

2.- Reducir el número de lecturas a la referencia.

Reduce el 50% del coste derivado del tiempo, lo que supone una reducción total del 16,6%.

3.- Reducir el número de puntos de observación

Esta propuesta reduce el coste en dos divisiones, tanto en el tiempo como en la señalización, obteniendo una reducción del 50% sobre el tiempo y del 50% en señalización, lo que supone una reducción total del 33,3%.

4.- Reducir el número de series por estación

Dicha propuesta reduce el coste derivado del tiempo en un 30%, lo que equivale a una reducción total del 9,9%.

5.- Instrumentación geodésica

Aumenta el coste derivado de la instrumentación en un 17%, equivalente a un aumento total del 5,6%.

6.- Construcción de pilares de observación

Supone el incremento del total del proyecto en un 33%

7.-Pasar de placas a prismas

Esto supone un aumento del 96% sobre el coste derivado de la señalización, lo que va a suponer en términos globales un aumento del 31,8%. Por otro lado, el tiempo de observación se reduce en un 60%, lo que reduce el coste derivado del tiempo

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

también en un 60%. Supone una reducción del coste total del 19,9%.

El cómputo global de esta propuesta supone un aumento en el coste de un 11,9%.

#### 4.- Medida de distancias

Aumenta el coste derivado del instrumental en un 35%, suponiendo un aumento del coste total del 11,6%.

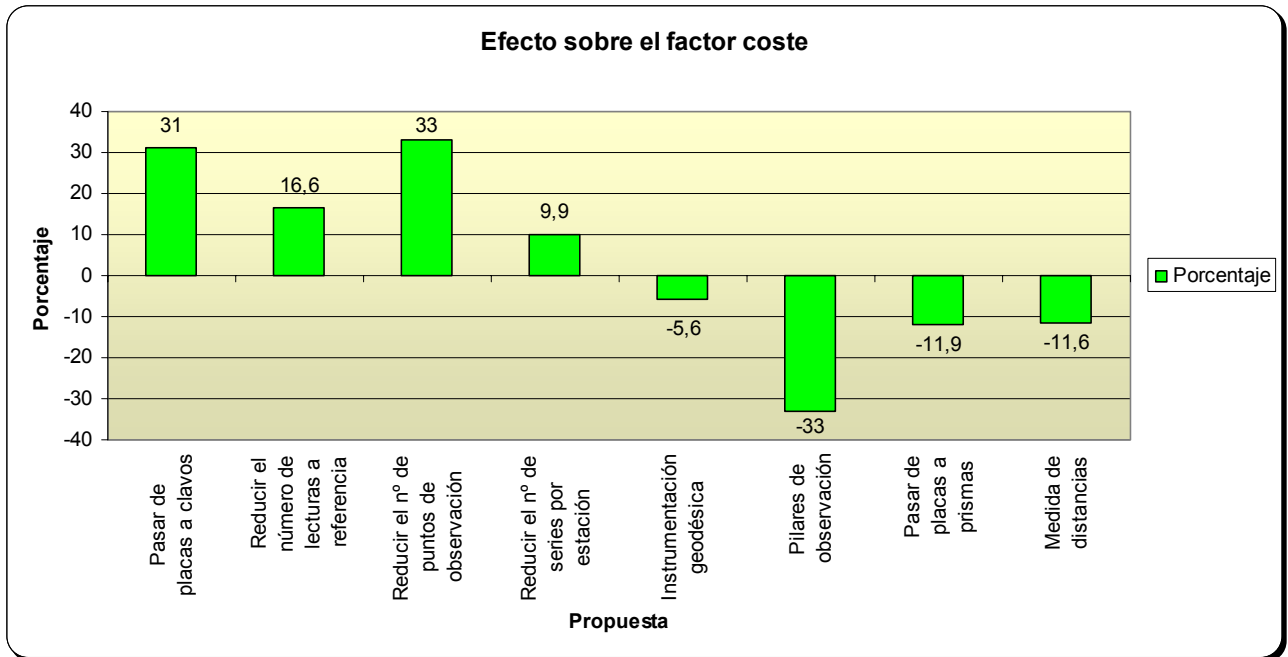


Figura 166. Gráfico que representa el efecto de las diferentes propuestas, en porcentaje, sobre el factor coste. Los porcentajes negativos indican el efecto negativo sobre el factor (es decir, que el coste del proyecto aumenta).

### **6.2.3.- Tiempo**

Existen cuatro propuestas que producen una variación positiva sobre el factor tiempo, y solamente una que produce un efecto negativo y son las siguientes:

Efecto positivo:

1.- Pasar de placas a prismas:

Como la señalización mediante prismas, permite la utilización de instrumentación con sistema ATR, se reduce el tiempo de observación en un 60%

2.- Reducir el número de lecturas a la referencia:

En este caso, el estudio se centra en la eliminación de lecturas a la referencia, visando a la misma solamente al inicio y final de cada serie, lo que reduce el tiempo de observación en un 50%.

3.- Reducir el número de puntos de observación:

Se consigue eliminar la mitad de puntos de los que se observa en la actualizad, por lo tanto el tiempo se reduce en la misma proporción, 50%.

4.- Reducir el número de series por estación:

Se consigue una reducción de tiempo del 30%.

Efecto negativo:

1.- Pasar de placas a clavos:

En este caso no se puede realizar una cuantificación numérica, puesto que el análisis arroja unos resultados muy parecidos en tiempo de observación para ambas señalizaciones y el elemento que se tiene en cuenta, a la hora de deducir el efecto que produce sobre el factor señalado, es simplemente, que la localización de los puntos sobre la fachada del elemento es más difícil si estos se encuentran solos, es decir, sin ningún tipo de señalización anexa que nos indique su posición.



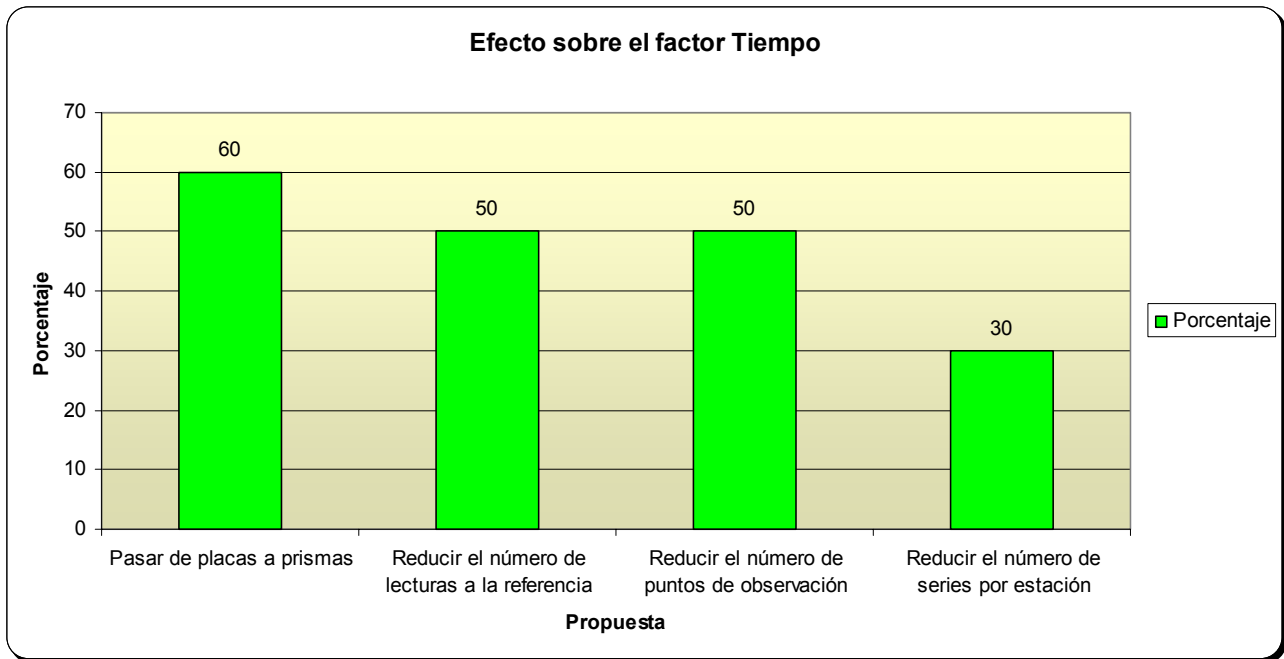


Figura 167. Gráfico que representa el efecto de las diferentes propuestas, en porcentaje, sobre el factor tiempo. Los porcentajes indican la reducción del tiempo de observación.

### **6.2.5. Complejidad**

La complejidad no es un factor que puede ser cuantificado fácilmente, puesto que se como se define en el apartado 4.1, hace referencia a la dificultad o sencillez del modelo de cálculo utilizado, atendiendo a las correcciones que se deben realizar a priori, a la formulación empleada y a la facilidad con la que se consiguen los resultados esperados.

Partiendo de esta definición, en la mayoría de las propuestas analizadas, la complejidad no presenta variación respecto al modelo de cálculo utilizado en el proyecto de estudio, salvo en tres casos

#### 1.- Reducir el número de lecturas a la referencia:

Aquí la complejidad aumenta, puesto que como se desprende del análisis, el modelo matemático cambia, introduciendo una matriz de pesos para ponderar las observaciones, puesto que en este caso no son iguales (existe una dependencia lineal entre observaciones de ángulos).

#### 2.- Reducir el número de series:

En esta propuesta se observo que al reducir el número de series por estación a dos, en algunos casos, el ajuste no se conseguía resolver, por tanto el efecto queda como negativo.

### 3.- Medida de distancias:

Se introduce un nuevo observable, la distancia. En este caso se deben realizar correcciones a las medidas antes de comenzar el ajuste (correcciones atmosféricas) y además el modelo de cálculo se hace más complejo, puesto que se deben introducir ecuaciones de observación de distancias y una matriz de pesos, puesto que no todas las medidas de distancias poseen las mismas características (unas se observan mediante sistema de infrarrojo con prisma de reflexión y otras mediante láser sin prisma).

#### **6.3. Tabla de resultados cuantificada en %.**

	<b>Resultado</b>	<b>Precisión</b>	<b>Fiabilidad</b>	<b>Coste</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Complejidad</b>	
		Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	Efecto	
<b>Instrumentación</b>	Instrumentación geodésica	=	=	-5,6%	=	=	
	Pilares de observación	50%	10%	-33%	=	=	
<b>Señalización</b>	Pasar de placas a clavos	=	=	31%	-	=	
	Pasar de placas a prismas	100%	=	-11,9%	60%	=	
<b>Observaciones</b>	Reducir nº de lecturas a referencia	=	-	16,6%	50%	-	
	Reducir puntos de observación	=	=	33%	50%	=	
	Reducir nº de series	-3%	-1%	9,9%	30%	-	
	Medida de distancias	41%	33%	-11,6%	=	-	

Figura 168. Tabla de resultados obtenidos derivada de los análisis efectuados de los efectos sobre los factores. En este caso cuantificada con valores en tanto por ciento en aquellas propuestas en las que ha sido posible.

**6.4. Conclusión: Simulación de la optimización de una auscultación geodésica:**

**“SIMULADOR DE LA OPTIMIZACIÓN “**

El simulador de la optimización, es una metáfora que se va a emplear para hacer una recapitulación de todos los estudios que se han realizado a lo largo de este proyecto.

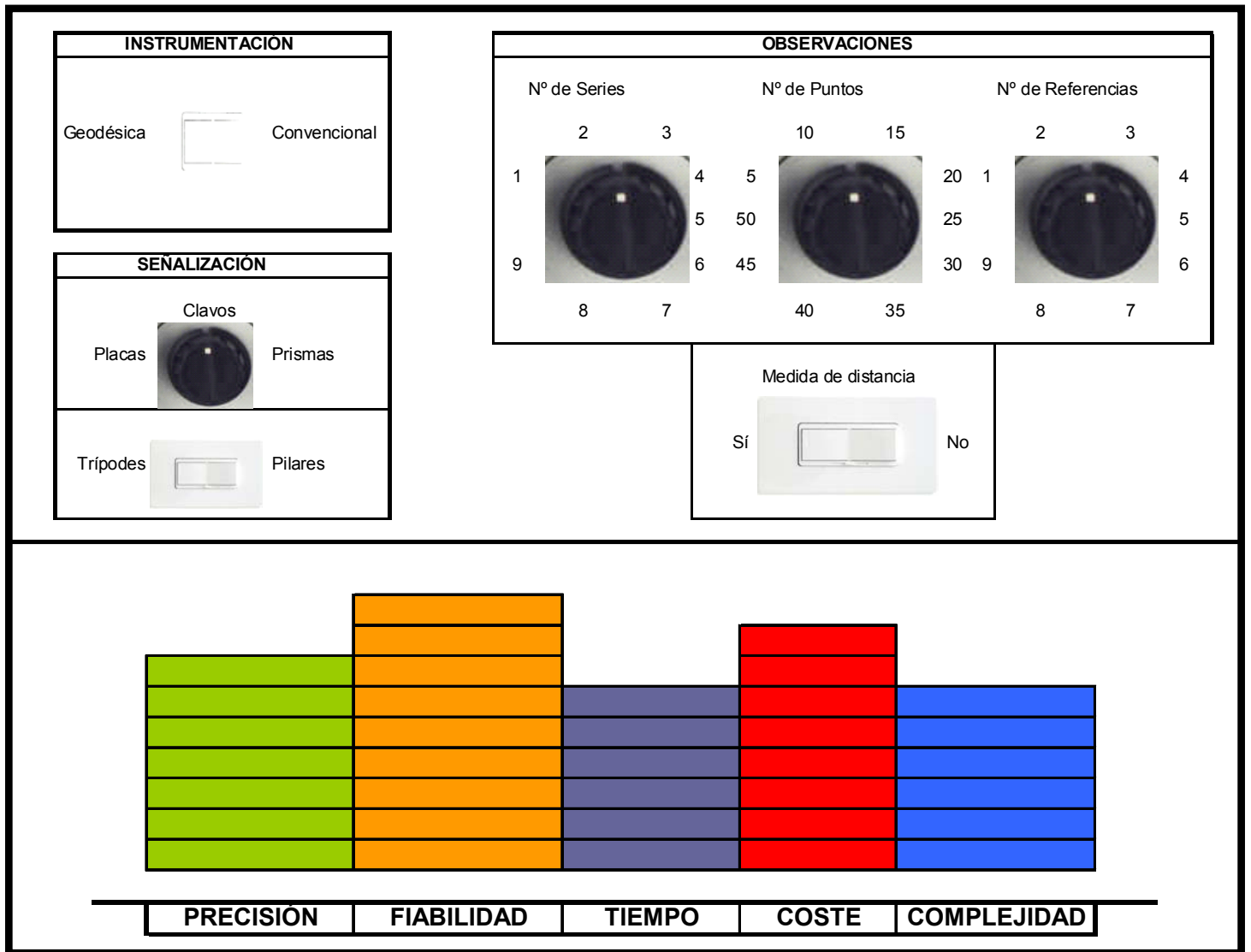


Figura 169. Pantalla principal del simulador para la optimización.

Se trata de una máquina formada por una serie de interruptores y mandos selectivos, distribuidos en tres subpaneles (Instrumentación, Señalización y Observaciones que representan cada una de las categorías en las que se ha dividido el estudio en este proyecto) dentro de los cuales existen distintos interruptores y mandos de selección que corresponden con cada uno de las propuestas de optimización que se han analizado dentro de cada categoría (Instrumentación, Señalización y Observaciones) con una pantalla "led" en la cuál aparece representado el efecto de cualquier variación procedente del encendido y apagado de los interruptores así como del cambio de posición de los distintos mandos selectivos sobre los cinco factores a estudio y ya comentados en el apartado 4.1 (precisión, fiabilidad, tiempo, coste y complejidad).

Debido a la complejidad de realizar una recapitulación conjunta de todos los análisis, se procede a la utilización de método simulado, que representa en esencia el objetivo que se pretende lograr con este estudio, es decir, conseguir establecer una tabla en la cual se representen todas las relaciones entre las modificaciones realizadas en cada propuesta y los factores que intervienen en el conjunto de una auscultación geodésica, pero para ello existe un problema y es que los factores no son independientes entre si, en ocasiones como en el caso del tiempo y el coste, la modificación de uno sólo de ellos lleva aparejada la modificación del otro, sin necesidad de cambio de propuesta.

Este instrumento puede resultar muy útil, puesto que su manejo es bastante simple.

Vamos a empezar por lo esencial; cualquier proyecto de intervención patrimonial que requiera de un estudio de auscultación vendrá determinado por unos factores limitantes, estos factores son los analizados en este proyecto (precisiones, fiabilidad de la red, coste o presupuesto, tiempo y complejidad), que son los que marcan el ¿qué estudio se puede realizar?, ¿cómo se va a realizar?, ¿qué se puede conseguir? ¿En cuanto tiempo se va a realizar o en cuanto tiempo se van a obtener resultados? (dependiendo de la precisión de las medidas, del tipo de movimiento a detectar y de su velocidad).

Estos factores limitantes son los que aparecen en la pantalla principal y pueden ser marcados inicialmente por la persona que va a realizar el proyecto, en la máquina. Quien encarga el proyecto será la persona o institución que marcará los valores de los factores limitantes a introducir.

Una aclaración, cada factor tiene una escala de valores diferente, lo que se representa en cada uno de los mandos con el fin de simplificarlo. Al encender-apagar interruptores o cambiar los mandos de selección de posición, lo que se representa en la pantalla es el efecto que esos cambios provocan sobre los factores limitantes pero no se representan sobre una escala de valores.

Como ejemplo, pongamos el caso del proyecto de Agoncillo, en el cual de partida nos encontramos con varias restricciones:

- No se pueden construir pilares de observación.
- No se puede colocar una señalización que afecte a los sillares de la estructura a estudio y que produzcan el menor impacto visual posible.
- El presupuesto es reducido.

Las dos primeras restricciones impuestas por la administración contratante, afectan a una parte esencial del proyecto de auscultación, a la señalización, por consiguiente, a la hora de introducir dichos datos en la “máquina”, el interruptor de señalización estará fijo en la posición “Trípodes” y el control de mando en de señalización solamente se podrá mover entre placas y clavos, debido a que los prismas tienen gran impacto visual. Estas dos restricciones van a establecer una primera posición de partida en la pantalla.

La tercera restricción, afecta directamente a uno de los factores limitantes, al coste o presupuesto, que deberá permanecer por debajo del tope marcado, limitándonos el movimiento del resto de mandos e interruptores del panel principal.

Lo que se quiere remarcar con este ejemplo, es que existen una serie de restricciones o limitaciones propias del proyecto que se conocen de antemano, unas son simplemente restricciones que afectan a las partes fundamentales del proyecto de auscultación, señalización, instrumentación y observación (que hace referencia a los mandos de la “máquina”) y otras restricciones son directamente factores limitantes, precisión, fiabilidad, coste, tiempo y complejidad (referente a la pantalla de la “máquina”), que marcan una serie de valores de partida o rangos en los que nos podemos mover con cierta libertad.

Por lo tanto, a la hora de realizar un proyecto de auscultación se deben tener en cuenta estas limitaciones impuestas a priori para el propio proyecto, y distinguir cuales afectan a cada una de las partes, de esta forma sabremos el grado de libertad que podemos manejar para desarrollar el trabajo en las mejores condiciones, tanto para nosotros como para la parte contratante. Es fundamental para la buena consecución del proyecto, analizar correctamente estas premisas.

Una vez realizado este proceso e introducido los datos en la “máquina”, se obtienen unas posiciones del “led de factores limitantes de partida”, aquellas premisas que tengan realización directa con las limitaciones, establecerán unos valores que deberán permanecer fijos o estableciendo relaciones conseguir valores por debajo de ellos, nunca por encima, de esta forma conseguiremos obtener todo lo necesario para poder realizar nuestro proyecto de auscultación.

Como se ha comentado, las conclusiones del proyecto (La máquina de optimizar) solamente establece relaciones entre factores y premisas, pero todo lo relacionado con datos teóricos y contrastados en campo (el análisis del proyecto), se encuentra en el punto 4, que es por así decir, el manual de usuario de la “máquina”. En este punto se encuentra toda la información numérica

obtenida del análisis del proyecto de Agoncillo. Por lo tanto, cualquier otro proyecto que se vaya a realizar, estará contrastado con uno ya realizado y las relaciones que se han establecido en las conclusiones son la referentes a este proyecto. Cabe destacar que no todos los proyectos van a ser comparables o se van a adaptar a estas relaciones, pero para un primer análisis de partida y para su utilización como manual de inicio de proyecto, puede ser válido. Eso sí, sería conveniente que una vez puesto en práctica el nuevo proyecto, este sea también optimizado, puesto que todo es susceptible de ser mejorado.

Con todo ello, a continuación sólo nos queda empezar a mover los mandos y encender o apagar interruptores hasta que los “valores” que aparezcan en el “led” se ajusten a las características y premisas que requiera el nuevo proyecto. Con ello obtendremos el tipo de instrumentación, la metodología de observación y el tipo de señalización a utilizar. Todo ello contrastado como se ha explicado con lo utilizado en el proyecto de auscultación desarrollado en la Iglesia de Nuestra Señora de La Blanca de Agoncillo.

## Bibliografía

Azkarate, A.; Cámara, L.; Lasagabaster, J.I.; Latorre, P. (2001). *Catedral de Santa María Vitoria-Gasteiz, Plan Director de Restauración*. Vitoria (Spain): Diputación Foral de Álava y Fundación Catedral Santa María de Vitoria.

Baker, M. C. August 1964. CBD-56. Thermal and moisture deformations in building materials. National Research Council Canada.

Binda, L. Saisi, A. Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. Department of Structural Engineering (D.I.S), Politecnico of Milan, Piazza Leonardo da Vinci 32, Milan, Italy. *Construction and Building Materials*.

Bolshakov, V. Gaidáyev, P. (1977). *Teoría de la Elaboración matemática de mediciones geodésicas*. Editorial MIR, Moscú. Traducción de Dr. Daniel Mendoza Araiza en 1989.

Caspary, W. F. (1988). Concepts of network and deformation analysis. Ediciones Rüegger, J. M. School of Surveying. The University of New South Wales, Kensington, N.S.W., Australia.

Carpinteri A.; Invernizzi S.; Laciogna G. (2005). *In situ damage assessment and nonlinear modelling of a historical masonry tower*. *Engineering Structures* 27 387-395. Elsevier.

Carpio Hernandez, J. P. (2001). *Redes Topométricas*. Editorial Bellisco, Madrid, Biblioteca Técnica Universitaria. Geodesia y Topografía.

Chamorro Rodríguez, M. A. Análisis comparativo aplicado al control de deformaciones en taludes por geodesia clásica y fotogrametría de objeto cercano. Escuela politécnica superior de Jaén. Ingeniería en geodesia y cartografía.

Chueca Pazos, M. Herráez Boquera, J. Berné Valero, J. L. (1996). *Tratado de Topografía 1. Teoría de errores e instrumentación*. Editorial Paraninfo.

Chueca Pazos, M. Herráez Boquera, J. Berné Valero, J. L. (1995). *Ampliación de redes topográficas y locales. Cuestiones de diseño*. Universidad Politécnica de Valencia.

De Arrufat Molina, E. (2006). *Instrumentos topográficos*. Universidad Politécnica de Valencia. UPV. Valencia 2006. Editorial Tirant lo blanch.

De Corral Manuel de Villena, I. (2001). *Topografía de Obras*. Ediciones UPC. Universidad Politécnica de Cataluña.

De la Cruz González, J. L. (2003) *Normas de Calidad, errores accidentales y errores sistemáticos en los medidores de ángulos*. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría Universidad de Jaén.

Dominici, D. Fastellini, G. Radicioni, F. Stoppini, A. (2008). An integrated monitoring system for the monumental walls of AmeliaDAU, University of LÁquila, Italy, DICA, University of Perugia, Italy. 13<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis 12<sup>th</sup> IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering LNEC, Lisbon 2008 May 12-15.

Domingo Preciado, A. (1994). Apuntes de ajuste de observaciones. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Topográfica de Madrid. Noviembre 1994.

Fernández-Martín, J.J. Pérez-Moneo, J. D. Finat, J. Martínez-Rubio. J. Evaluation of structural damages from 3D laser scans. Universidad de Valladolid, Spain. LFA, ETS de Arquitectura, Universidad de Valladolid, Spain. MoBiVAP Group, edificio I+D+I, 47011 Valladolid.

Ferrer Torío, R. Piña Patón, B. Nuñez-García del Pozo, A. Valbuena Durán, J. L. Martínez López, I. (1990-1991). Distanciometría electrónica de alta precisión. Curso del programa de Doctorado impartido en Santander. Universidad de Cantabria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica.

Fondeli. ( 1990). Procedimientos de topografía clásica y sistemas integrados de control para el estudio de movimientos y deformaciones. Revista de Topografía y Cartografía nº 61.

Guarnieri, A. Milan, N. Vettore, A. (2008). CIRGEO Combined techniques for the stability control of historical structures. – Interdepartment Research Center for Geomatics, University of Padua, Italy. 13<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis 12<sup>th</sup> IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering LNEC, Lisbon 2008 May 12-15.

Kuang, S. (1996). Geodetic Network Analysis and Optimal Design. Sams Pubns. ISBN 09668162

Pujol, A. Aguiar, D. Aplicación de controles microgeodésicos a la evaluación de la seguridad de las presas Cabra Corral, Peñas Blancas y El Tunal.

Martín Asín, F. (1990). Geodesia y Cartografía matemática. Editorial Paraninfo. Madrid.

Radulescu Gheorghe M.T. (2006). Monitoring the behaviour of very tall structures under the action of non-uniform sunlight. The case of a 350m high chimneystack from Baia Mare, Romania North University, Baia Mare Technical University Cluj-Napoca. 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006.

Romero, P. Sevilla, M. J. (1990). Análisis estadístico de observaciones geodésicas antes de la compensación. Instituto de Astronomía y Geodesia (U.



C. M. – C. S. I. C.) Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Complutense, Madrid.

Sánchez Caro, F. J. Madrid 2007. Tesis Doctoral. Seguridad de presas: Aportación al análisis y control de deformaciones como elemento de prevención de patologías de origen geotécnico.

Santos Mora, A. (1993). Replanteos y Control de Presas de Embalse. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía. Madrid.

Schofielp, W. (1993). Engineering Surveying.. Kingstom University.

Sevilla M. J. (1993). Teoría de errores de observación. Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Complutense, Madrid.

Sevilla M. J. (1986). Formación de modelos matemáticos en la compensación de redes geodésicas. Geodesia Superior. Instituto Geográfico Nacional. (Madrid). Pág. 1-70.

Taliercio A.; Binda L. (2007). The basilica of San Vitale in Ravenna: investigation on the current structural faults and their mid-term evolution. Journal of Cultural Heritage 8 99-118. Elsevier.

Valle Melón, J. M. (2007). Tesis Doctoral. Documentación Geometría del Patrimonio: Propuesta conceptual y metodológica. Logroño, Junio de 2007.

Valle Melón, J. M. Rodríguez Miranda, A. Pérez Vidiella, P. (2008). Evaluation of the conventional surveying equipment applied to deformation analysis of heritage buildings. a case study: the BELL tower of Santa María la Blanca church in Agoncillo (La Rioja, Spain). Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea (Spain) 13<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis 12<sup>th</sup> IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering LNEC, Lisbon 2008 May 12-15.

Wolf / Brinker. (1999) Topografía.. 9ª edición de Alfaomega.

Características técnicas del escáner láser HDS3000 de Leica. Leica Geosystems AG Heerbrugg, Switzerland [www.leica-geosystems.com/hds](http://www.leica-geosystems.com/hds)  
[http://hds.leicageosystems.com/hds/en/Leica\\_HDS3000.pdf](http://hds.leicageosystems.com/hds/en/Leica_HDS3000.pdf)

Manual del Constructor

Anexo Nº 7 Fórmulas y conceptos de Térmica. Dilatación térmica de sólidos.  
[http://issuu.com/sabravof/docs/manual\\_del\\_constructor\\_polpaico/281](http://issuu.com/sabravof/docs/manual_del_constructor_polpaico/281)

## **ANEXOS**

### **Anexo 1: Noticias relacionadas.**

Las torres inclinadas forman una especie de subgrupo dentro de los edificios históricos, cuyo aspecto inestable ejerce una fascinación especial.

En la actualidad podemos encontrar en las noticias publicadas en cualquier medio de comunicación, referencias a estos emblemáticos edificios históricos que al parecer se están moviendo o se han colapsado. A continuación se presentan algunos de esos ejemplos encontrados en la red.

## La torre inclinada de Colonia

LA ALEMANIA INCREÍBLE | 02.10.2004



¿Cuál estará más inclinada, la de Pisa o la de Colonia?

**Colonia tiene ahora también su torre inclinada. En la noche del 28 al 29 de septiembre, la torre de la iglesia de San Juan Bautista, en uno de los barrios centrales de la ciudad, se inclinó un metro.**

La torre, de 40 metros de altura, amenazaba caerse, por lo que los vecinos de las casas circundantes fueron evacuados rápidamente por los bomberos. Algunos fueron transportados a albergues de emergencia todavía en pijama, ya que la torre se inclinó a medianoche.

La causa de la inclinación de la torre parecen ser trabajos subterráneos cerca de la iglesia, que se llevan a cabo para ampliar la red de metro de la ciudad. Parece que los ingenieros responsables no han prestado la suficiente atención. No sería de extrañar que tuvieran que responsabilizarse ante los juzgados competentes.

### **Corsé de vigas de acero**

En el ínterin, a la torre se le ha puesto un corsé de vigas de acero, para impedir su vuelco definitivo, lo que sería una catástrofe, no sólo para la torre, sino también para las casas de los alrededores. Por suerte, nadie ha sido herido ni lesionado por el curioso hecho.

La iglesia de San Juan Bautista tiene más de mil años de antigüedad y fue construida en estilo románico. La torre, sin embargo, fue erigida hace sólo unos cincuenta años, después de la Segunda Guerra Mundial, en cuyo transcurso la iglesia sufrió graves daños.

[www.deutsche-welle.de/.../0,,1345774,00.html](http://www.deutsche-welle.de/.../0,,1345774,00.html)

## La torre inclinada de Salares (Málaga) Desde hace años, el bello alminar mudéjar se deja caer levemente hacia la Casa Consistorial

TEXTO: GEMA MARTÍNEZ / FOTOS: ANTONIO SALAS / MÁLAGA/

¿QUE para dónde se inclina la torre? Para la Alcaldía. «La torre se cae para la Alcaldía». Jorge Luis Fernández, alcalde de Salares, quiere ser hoy prudente, porque hace sólo unas semanas y después de una larga espera, técnicos de la Delegación de Cultura de la Junta de Andalucía se presentaron por fin en el pequeño pueblo axárquico con la manifiesta intención de iniciar los pasos necesarios para la esperada rehabilitación del bello alminar de arquitectura mudéjar, que no se ha tocado desde su construcción, hace ya ochocientos años.

Así que hoy, este alcalde del PP confía en que la Administración autonómica acometa el estudio que determine qué es lo que pasa con el monumento, si se trata de un deslizamiento del suelo o si es que el pilar central, tan deteriorado, no aguanta la estructura. Eso hoy, porque hace apenas un mes barajaba seriamente no volver a presentarse a las elecciones y que otro ocupara el sillón poco seguro si bien se mira sobre el que pende la sombra alargada del que es sin duda uno de los emblemas del pueblo, declarado monumento nacional en el 79.

«A mí me dijo el arquitecto que hizo la ficha diagnóstico en 2003 que si él fuera yo no trabajaría aquí», dice tranquila María del Carmen Crespillo, secretaria del Ayuntamiento. Entonces también se aconsejó apuntalar, pero el alcalde se negó: «Si se apuntalaba corríamos el riesgo de que se quedara así durante años y no se rehabilitara». Como anécdota, cuenta el alcalde que este arquitecto italiano, contratado por el Ayuntamiento para que hiciera el estudio, dijo incluso que podía ir a comparar el caso con la torre inclinada de Pisa, para ver si había semejanza con lo que ocurría aquí.

Desde que se hizo el diagnóstico, en el que se aconsejaban técnicas «para establecer el ángulo de vuelco y su progresión en el tiempo», algunas tejas se han caído de un campanario tomado, por dentro y por fuera, por las palomas, y también ha caído al pavimento del pueblo algún que otro ladrillo del alminar, pero la cosa no ha ido a más, y, al menos aparentemente, tampoco ha sido tan drástica como se presagiaba la evolución de la caía.

No obstante, que el alminar se ha inclinado es cierto, y de eso da fe la grieta que hay entre la torre y una de las paredes de la iglesia que posteriormente se construyó junto a ella. Desde donde mejor se aprecia el vuelco es desde el patio interior, antesala de la que pudo ser en tiempos musulmanes una mezquita, uno de cuyos arcos asoma por la pared exterior de una casa de nueva construcción. «En una ocasión se propuso tirar toda la planta alta de la casa, pero lo desaconsejaron, porque no se sabía si la misma sujetaba la torre», explica Crespillo.

La recuperación de todo el conjunto aportaría algo de luz sobre lo que fue Salares en Al-Andalus: «Si aquí, como parece, había una mezquita de dimensiones importantes, significaría que la población también lo fue», dice la secretaria municipal, aunque el alcalde se apresura a matizar: «Yo me conformo con que arreglen la torre. De momento no pido más»

[.http://www.diariosur.es/prensa/20061026/malaga/torre-inclinada-salares\\_20061026.html](http://www.diariosur.es/prensa/20061026/malaga/torre-inclinada-salares_20061026.html)



CAÍDA. La inclinación es leve, pero se aprecia claramente desde el patio interior.

## Iglesia de San Pedro el Viejo

Publicado por Matritensis, Miércoles, Diciembre 12, 2007. Edificios religiosos

La iglesia de San Pedro el Viejo, es, junto a la de San Ginés y **San Nicolás** una de las iglesias más viejas de Madrid, ya en el Fuero de 1202 se cita a esta iglesia.

La iglesia está bastante reformada con el paso de los siglos, predomina en ella el estilo renacentista y barroco. Como en San Nicolás, la parte más antigua corresponde a la torre, construida en ladrillo y de estilo mudéjar.



Precisamente la torre es, a mi juicio, uno de los elementos que corren más peligro de desaparecer. Desde hace años he visto como se inclinaba la torre, evidentemente no soy un técnico y esa apreciación es simplemente a ojo.



La semana pasada pude tomar unas fotos que confirman mi teoría, la torre no sólo está algo más inclinada, además, tiene una gran grieta justo en la parte donde empieza a inclinarse como la que se puede ver en la foto.

Espero que la torre no caiga, no sólo por la gran pérdida que supondría, además, justo al lado hay casas en las que vive gente.

No es por asustar pero alguien debería tomar medidas urgentes.

**Iglesia de San Pedro el Viejo** Calle del Nuncio, 14 Madrid

<http://images.google.es/imgres?imgurl=http://2.bp.blogspot.com/>

## BERCIANOS DEL REAL CAMINO



ACACIO

**El fin de un emblema.** La torre de la iglesia de Bercianos de derrumbó «como si la tragara la tierra». Así describían los vecinos el desplome de uno de los emblemas del pueblo. La torre era una imagen carismática del Camino de Santiago y ya no volverá a verse. La tristeza dominaba ayer el pueblo por el fin del edificio que había durado siglos y en el que habían sido bautizados muchas generaciones. Las administraciones han prometido ayuda para construir una nueva iglesia.

No hubo heridos ya que el acceso al templo estaba prohibido desde febrero

## Se derrumba la torre de la iglesia parroquial sin provocar ningún herido

La torre de la iglesia parroquial San Salvador de Bercianos del Real Camino se desplomó el pasado lunes sin que ningún habitante del pueblo resultara herido. El edificio, de 1430, presentaba un avanzado estado de deterioro y desde el pasado mes de febrero

el acceso al templo estaba prohibido por el peligro de derrumbe. Los vecinos se encontraban ayer sumidos en la tristeza por la pérdida de uno de los emblemas del pueblo y las administraciones han prometido ayudas para construir una nueva iglesia.

Acacio Díaz/P.C.

«Cayó como si se la tragara la tierra». Así describían ayer unas vecinas de Bercianos del Real Camino el desplome de la torre de la iglesia parroquial.

El derrumbe se produjo sobre las once y media de la mañana. La caída de la torre astró consigo parte del templo, incluido el coro, que quedaron transformados en un amasijo de ladrillos, piedras y lajas de pizarra.

La torre presentaba un avanzado estado de deterioro y desde el mes de febrero, el alcalde había prohibido el acceso al templo por el peligro que podía representar para los vecinos.

Se da la circunstancia de que hace pocos días, el alcalde de Bercianos, Nicolás Rivero, aprovechó la visita del presidente de la Diputación, José Antonio Díez, para pedirle una subvención urgente para arreglar la torre, amenazada ya con grandes grietas. Díez con-

testó al alcalde que «ya era tarde».

Los vecinos de Bercianos estaban ayer sumidos en la tristeza por la pérdida de uno de los emblemas del pueblo. Fueron ellos los encargados de retirar el retablo y las imágenes para que no se dañaran y presiden ahora sus actos religiosos en la antigua Cámara Agraria.

María Amor González y su hija Jessica Pérez resumían así el estado de ánimo: «Nunca se nos olvidará el momento en que la torre se vino abajo».

# LA CRONICA

DE LEÓN

© PROPELESA  
DEPOSITO LEGAL: LE-100-1986  
DIFUSION CONTROLADA POB OJD  
<http://www.la-cronica.com>

Director General: Oscar Campillo. Dirección: Jesús M<sup>o</sup> Fernández (Administración), José Antonio Domínguez (Publicidad y Marketing), Ángel Rodríguez (Técnica).  
e-mail: la-cronica@dvnet.es

Redacción, Publicidad, Administración y Talleres. Paseo de la Facultad, 53. 24001 LEÓN. Teléfono (987) 21 25 12 (exto. direct). Fax (987) 21 31 50. Administración y Publicidad Fax (987) 30 06 91.

Delegación de La Crónica de León en El Bierzo. Plaza de Las Casas, 2. Pórtico. 776. 24070-40100-24070-40-42. Fax: 987-40-41. Rta. Valladolid. Avda. de la Españita, 36. 41011 Agnón de Duero. Teléfono y Fax: 0359-540623.

## Réquiem por la torre de Bercianos

Los habitantes de esta población lloran la pérdida del símbolo arquitectónico que se vino al suelo

F. LABARGA / C.J.D.  
Bercianos del Real Camino

María Cruz Quintana es una vecina de Bercianos del Real Camino que el pasado lunes contempló junto a su marido como la torre de la iglesia parroquial de San Salvador, con sus más de 30 metros de altura, se derrumbaba estrepitosamente. Cuando lo cuenta no puede evitar que se le salten las lágrimas. "Diez minutos antes del desplome salió una gran nube de polvo que indicaba que algo se había hundido en el interior de la iglesia. Al poco tiempo un gran bloque de ladrillos situado sobre la puerta de la torre se desprendió. La torre tembló en dos ocasiones consecutivas y se cuarteó enteramente. La parte de arriba se inclinó y, sin hacer casi ruido, se desplomó muy lentamente, pero en cuestión de segundos. Una polvareda inmensa impidió ver el resto".

El relato del derrumbamiento de la torre es confirmado por otros vecinos que lo vieron, como Emidio Antón. Todo el pueblo se halla consternado y, por lo bajo, no dejan de culpar a la pasividad de las autoridades políticas y eclesiásticas, que se han desentendido de un problema que se venía venía.

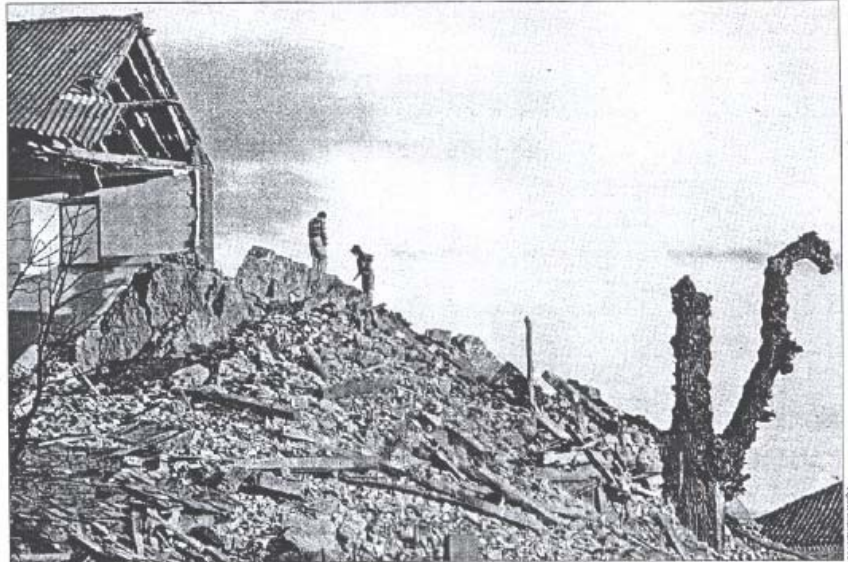
Varios obreros se afanaban ayer para colocar vi-

gas metálicas sobre las que fijar unos paneles de chapa que impidían la entrada al templo, no sólo para evitar el posible pillaje, sino para impedir también posibles daños de un futuro y nuevo hundimiento.

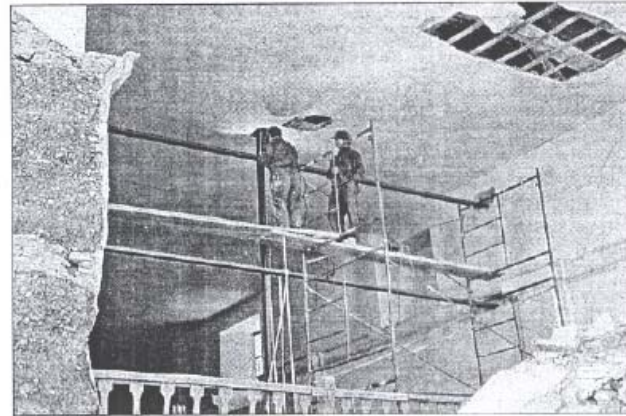
Para Seve Mencia, una vecina nacida en Bercianos pero que reside en Valladolid, afirma que "es como si me hubieran cortado una de las raíces que me unían a mi pueblo. Esa misma opinión es compartida por Crescencio Pastraña, aunque confiesa que "no llegamos a creer que se iba a hundir".

Toda la gente del pueblo está como acobardada y no se hacen a la idea de no volver a ver en la lejanía, recortada sobre el horizonte, la emotiva silueta de la torre de su pueblo. Todos lloran su irreparable pérdida y, aunque ahora las misas se celebran en la parroquia de San Roque, personas como María Cruz no olvidarán nunca la imagen de la torre, el edificio más alto del pueblo, desplomándose, mientras las cigüeñas que anidaban en ella perdían también en el derrumbe a sus polluelos.

Los cigüeñatos de Bercianos, al igual que los recuerdos y emociones de los habitantes de Bercianos, quedaron enterrados bajo un enorme montón de escombros. Algún perro se acerca a olisquear entre los restos.



ESCOMBROS Bajo los restos de Bercianos del Real Camino quedaron las campanas, las crías de las cigüeñas y un montón de recuerdos.



PRECAUCIONES Varios obreros se afanaban ayer en apuntalar el templo en previsión de nuevos derrumbamientos.

### Se aproximan más derrumbes

El Obispado de León no solo está preocupado por este suceso porque cree muy posible que no sea aislado. "Como no se ponga remedio a la situación de muchas de las actuales iglesias de los pueblos, se avecinan más derrumbamientos, y sobre todo en la zona de Campos", expresaba ayer mismo un responsable en materia de Patrimonio de la diócesis.

La amenaza se cierne especialmente sobre las torres, que soportan el peso del tiempo y la ausencia casi total de obras de restauración que refuerzan sus envejecidas estructuras.

### La Junta tenía preparado un proyecto de iluminación de la iglesia

La Consejería de Fomento, a través de un programa que pretendía sacar más partido a iglesias del Camino de Santiago, tenía incluido el templo de Bercianos entre los que próximamente pretendía iluminar. Fuentes del Obispado de León aseguraban ayer que, muy recientemente, la diócesis había concedido el permiso para estos trabajos.

Por su parte, el Servicio Territorial de Educación y Cultura de la Junta en León reconocía ayer que la protección que ampara a la Ruta Jacobea no podía haber salvado a la iglesia, porque el reconocimiento de Patrimonio de la Humanidad se refiere al recorrido y no a los bienes inmuebles de las localidades por las que pasa.

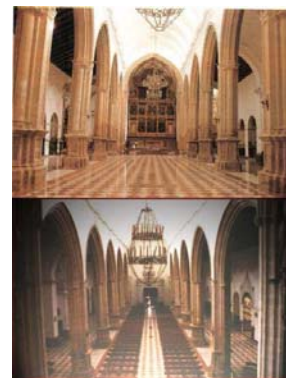
## Parroquia de Ntra. Sra. de la Asunción (Bujalance)

### De Cordobapedia



Torre inclinada de la Asunción "El espárrago" (Catedral de la Campiña)

También conocida como *la Catedral de la Campiña*, el origen de esta parroquia de Bujalance puede estar en la iglesia que se levantara junto al castillo tras la conquista cristiana de la ciudad por Fernando III sobre la antigua mezquita. De estilo gótico-renacentista, sus bóvedas, pilares y arcos son de estilo ojival y se atribuyen a Hernán Ruiz *el Viejo*, a Hernán Ruiz *el Joven* (1556) y Hernán Ruiz III. Está formada por tres naves sin crucero separadas por arcos apuntados y posee amplísimas dimensiones: 53 metros de longitud y 22 de ancho. Las cabeceras de las naves son cuadradas y con bóvedas de crucería. A los lados de las naves se extienden sendas hileras de capillas que podrían formar otras dos naves más, de ahí que se diga que tiene dimensiones de Catedral. El impresionante retablo mayor "uno de los mejores y más antiguos de la provincia", renacentista, data del siglo XVI y está atribuido a Guillermo de Orta y a Andrés de Castillejo, con pinturas de Leonardo Enríquez de Navarra. Destaca también el retablo y camarín hexagonal barroco de la Virgen del Rosario (de principios del siglo XVIII), actualmente Capilla del Sagrario, "uno de los más hermosos del barroco cordobés", a juicio del profesor J. Rivas. Por último cabe mencionar la custodia Rococó (siglo XVIII) del orfebre cordobés Damián de Castro, la puerta lateral barroca del siglo XVIII y la torre, cuyas obras empezaron en 1611 y terminaron en 1788.



Entrada, torre e interior de la *Catedral de la Campiña*, Bujalance

Esta torre es una construcción de 55 metros de altura, toda de ladrillo excepto el basamento, de piedra molinaza roja. Se trata de uno de los más conocidos símbolos de la ciudad, pues su silueta se puede apreciar entre los cerros de olivos desde varios kilómetros de distancia. Es la torre más alta de la provincia y tiene alrededor de metro y medio de inclinación emulando a la Torre de Pisa.

[http://wikanda.cordobapedia.es/wiki/Parroquia\\_de\\_Ntra.\\_Sra\\_de\\_la\\_Asunci%C3%B3n\\_\(Bujalance\)](http://wikanda.cordobapedia.es/wiki/Parroquia_de_Ntra._Sra_de_la_Asunci%C3%B3n_(Bujalance))



AGONCILLO

## **La hermana riojana de Pisa**

Un estudio trata de determinar las causas de la inclinación de la torre de la iglesia  
P. HIDALGO | AGONCILLO



Entre la iglesia y la torre se abre una grieta de 40 centímetros. /P. H.

### **OBSERVACIÓN**

Quiénes: el Gobierno riojano y el Ayuntamiento han encargado un estudio a un laboratorio de la Universidad del País Vasco.

Para qué: para que establezca las causas del desplazamiento y constate si el movimiento prosigue. La torre inclinada de Pisa tiene una hermana en La Rioja. Concretamente, en Agoncillo, en la parroquia de Nuestra Señora la Blanca. Algunas imágenes que datan de los años cincuenta del pasado siglo ya documentaban que la torre que se eleva anexa al cuerpo del templo sufría una desviación, que, en la actualidad, ronda los 40 centímetros de separación.

Preocupados por el escoramiento que presenta la iglesia agoncillana, el Gobierno de La Rioja y el Ayuntamiento de la localidad han encargado al Laboratorio de Documentación Geométrica de Patrimonio de la Universidad del País Vasco un estudio que determine las causas del desplazamiento y si éste continúa progresando. «Llevamos varios años buscando una solución para este monumento, que se alza en un marco espléndido como el de la plaza que rodea al castillo de Aguas Mansas», comenta el director general de Cultura, Javier García Turza.

Así, Ejecutivo regional y Consistorio están a la espera de que las mediciones finalicen el próximo octubre y que los especialistas determinen las medidas que se deben implantar para asegurar su preservación. Las observaciones, que comenzaron con la toma de datos en campo en julio del 2007, están aplicando una metodología novedosa, basada en técnicas de observación topográfica de alta precisión, para comprobar si el desplazamiento prosigue con su avance o si esa inclinación se debe a un movimiento de asentamiento anterior, que ya se ha estabilizado.

Para ello, los expertos han colocado unas placas y unos clavos en la fachada de la torre y de la iglesia, que sitúan los puntos en que se realizan las mediciones. Esta recogida de datos se lleva a cabo cada tres meses para seguir los procesos de dilatación correspondientes a cada estación.

El próximo octubre, cuando se recopilen los datos de la tercera campaña de auscultación podrá concluirse si, respecto a observaciones previas, se ha agudizado la oscilación y en qué grado.

<http://www.larioja.com/20090612/rioja-comarcas/hermana-riojana-pisa-20090612.html>

## Anexo 2. Características de la instrumentación utilizada.

### Certificado de Verificación y Control

Nº de Certificado 300478361  
Fecha 07.01.2008

Leica Geosystems, s.l.  
Ibarrekolanda, 36  
48015 Bilbao - Deusto  
Teléfono +34 94 447 3104  
Fax +34 94 447 3393  
www.leica-geosystems.com

UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO  
E.U.I.T. Ind. e Ing.Tec.Topog.  
NIEVES CANO, 12

01006 VITORIA

Número de cliente 50198  
Instrumento TCR1205 R300, taquímetro + EDM sin ref.  
Nº de Serie 213379  
Técnico 110336

#### Proceso de Verificación y Control:

El instrumento ha sido verificado y controlado conforme a los procedimientos establecidos por Leica Geosystems, S.L. según el manual del instrumento en cuestión.

#### Resultados:

Temperatura durante la verificación (°C): 24

	Entrada	Tolerancia	Salida	Incertidumbre
Desviación Hz (Gon)	0.0003	0.0015	0.0001	0.0004
Desviación Vt (Gon)	0.0008	0.0015	0.0002	0.0002
Desviación distancia (mm) (Distanciómetro infrarrojo)	0.1	2mm + 2ppm	0.1	0.1
Desviación distancia (mm) (Distanciómetro láser)	0.1	3mm + 2ppm	0.1	0.1

#### Patrones empleados:

##### Angulos:

Colimador de ejes: Wild nº 9694 (Incertidumbre asociado con el patrón: 0.0005 gon)

##### Distancia:

Leica DI2002 nº 181130 (incertidumbre asociada con el patrón: 0.7 mm)

#### Comentarios:

Los resultados se refieren al momento y condiciones en que se efectuaron las mediciones y poseen trazabilidad a patrones nacionales o a patrones extranjeros

No se permite la reproducción parcial de este certificado sin la aprobación por escrito de Leica Geosystems, s.l.

### **Anexo 3. Datos y gráficas de los análisis llevados a cabo.**

Se incluye en el CD, una carpeta llamada “Datos\_Análisis”, en la que se encuentran todos los datos, brutos y elaborados que se han utilizado para la realización de los análisis durante este proyecto.

Descripción del contenido de la carpeta “Datos\_Análisis”:

- Carpeta “Ajustes Campañas”: Contiene los ficheros con extensión \*.txt, obtenidos del ajuste de las campañas de auscultación que se han utilizado.
- Carpeta “Análisis”: Contiene una serie de archivos Excel con la información referente a cada uno de los análisis realizados:
  - Ficheros:
    - “Análisis\_fiabilidad\_red”: hoja de cálculo confeccionada para realizar el análisis sobre la fiabilidad de la red, en función del número de puntos fijos (análisis referente a la construcción de pilares de observación), utilizando la campaña de Julio de 2008.
    - “Análisis\_fiabilidad\_red\_conjuntos”: confeccionado para analizar la construcción de pilares de observación, esta vez realizando el análisis mediante el estudio del ajuste conjunto de las campañas de Enero 2008 y Enero 2009.
    - “Análisis\_fiabilidad\_red\_conjuntos\_c31\_c35”: análisis de la red en el ajuste conjunto de las campañas Enero 2008 y Enero 2009, introduciendo en el cálculo las distancias entre estaciones.
    - “Clasificación\_puntos”: hoja de cálculo relacionada con la clasificación de los puntos para el análisis de la propuesta “reducir el número de puntos de observación”.
    - “Clavos\_Dianas\_Julio\_2007”: precisiones del sistema de señalización formada por placas y por clavos en la campaña de Julio de 2007.
    - “Clavos\_Dianas\_Julio\_2008”: precisiones del sistema de señalización formada por placas y por clavos en la campaña de Julio de 2008.
    - “Comparativa\_precisiones\_clavos\_dianas\_07\_08”: comparativa de precisiones entre el sistema de señalización formada por placas y por clavos en la campaña de Julio de 2007 y Julio 2008.

- “Estudio\_distancias”: estudio de las correcciones que se deben realizar a la hora de ajustar las observaciones. (correcciones meteorológicas).
- “Estudio\_precisión\_Distancias\_angulos\_octubre2008”: estudio de la precisión en el ajuste de la campaña de octubre de 2008 realizado con distancias y con ángulos.
- “fiabilidad\_2\_series\_por\_estacion”: análisis de la fiabilidad de la red en el ajuste de todas las campañas, en las cuales solamente se realizan dos series por estación.
- “Fiabilidad\_Dianas\_Clavos\_2007\_2008”: estudio de la fiabilidad de la red en el ajuste de las campañas de Julio 2007 y Julio 2008, estudiando clavos y dianas.
- “fiabilidad\_Octubre\_2008\_Distancias”: estudio de la fiabilidad de la red en el ajuste de la campaña de octubre de 2008 en la cual se incorporan las observaciones de distancias.
- “fiabilidad\_Octubre\_2008\_solo\_angulos”: estudio de la fiabilidad de la red en la campaña de octubre de 2008, en la cual solamente se realizan ajustes de observaciones angulares.
- “Grafica\_errores\_instrumentos\_pilares”: composición de los errores angulares que se producen en diferentes ejemplos de observaciones.
- “Julio\_2008\_2\_series\_por\_estacion”: ajuste de la campaña de Julio 2008 en la cuál solamente se ajustan dos series de observaciones por estación.
- “Julio\_2008\_2\_series\_por\_estacion\_fiabilidad”: estudio de la fiabilidad en el ajuste de la campaña de Julio de 2008 con dos series de observaciones por cada estación.
- “Julio\_2008\_2\_series\_por\_estacion\_precisión”: estudio de la precisión en el ajuste de la campaña de Julio de 2008 con dos series de observaciones por cada estación.
- “Precio\_ATR\_placas\_Clavos”: comparativa de precios entre prismas para sistema ATR y clavos.
- “Precio\_instrumental\_alquiler”: cálculo y gráfica del coste ocasionado del alquiler de la instrumentación convencional y geodésica.
- “Precision\_2fijos\_todosfijos”: comparativa de precisión en el ajuste de la campaña de Enero de 2008, para la cuál se realiza un

ajuste con dos puntos fijos y otro ajuste con las estaciones de control como puntos fijos.

- “Precision\_ajuste\_2\_series\_por\_estacion”: análisis de la precisión de la red en el ajuste de todas las campañas, en las cuales solamente se realizan dos series por estación.
  - “Tiempo de Observaciones” análisis de los tiempos de observación en campo de todas las campañas.
- Carpeta “Campañas\_Analizadas”: esta carpeta contiene otras seis carpetas con el nombre de cada una de las campañas analizadas, y dentro de las cuales se encuentran los ficheros con extensión \*.txt brutos, generados por los ajustes.

Los ficheros obs\_”fecha” corresponden con los fichero brutos de observaciones.

Los ficheros res\_”fecha” correspondes con los ficheros de los resultados de los ajustes realizados, en el caso que ponga 2\_series, corresponden al ajuste realizado con dos series por cada estación de observación.

Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas

#### **Anexo 4. Artículos**



**LABORATORIO DE DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DEL PATRIMONIO**  
Grupo de Investigación en Patrimonio Construido -GPAC- (UPV-EHU)



UPV EHU

Aulario de las Nieves, edificio de Institutos Universitarias  
C/ Nieves Cano 33, 01006 Vitoria-Gasteiz (España-Spain).  
Tfno: +34 945 013222 / 013264  
e-mail: [jm.valle@ehu.es](mailto:jm.valle@ehu.es) web: <http://www.ldgp.es>

---