



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA

PROYECTO FINAL DE GRADO

DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN ÓPTIMA DE LAS SEÑALES DE REFERENCIA EN LA AUSCULTACIÓN.

Projectistas: Redaño Torres, Eduard
González Jaenes, Marta

Directoras: Núñez Andrés, María Amparo
Lantada Zarzosa, María de las Nieves

Convocatoria: noviembre 2013

ABSTRACT

Over the last few decades have been built a large number of infrastructures, each with a different function and purpose. These include high-speed lines, which improve the communication between different zones and the metropolitan FFCC. This kind of projects includes in many cases the construction of subterranean works, which are associated with several precision tracking control routine for good execution. In addition, these tracking control are increased at the time that the work through villages, because the bad execution of these controls could have serious consequences.

In order to evaluate the continuity of a work is necessary to obtain data of the same, with this objective there are more than enough precision equipment such as inclinometers, for measuring angles of slope, piezometers, which measures the pressure of groundwater at a specific point, extensometers, used to measure changes in the length of an object, etc... The control, monitoring and subsequent interpretation of the whole collection of measurements taken, it could be named auscultation.

This project focuses in one of the latest building auscultation equipment that has started to use over the last decade: the Automatic Monitored Total Station. Specifically it aims to verify, quantify and identify the influence of the different position, number, height, overture and distance of the reference targets on construction, in case it is necessary to execute an auscultation by AMTS that requires doing systematic readings for calculation of coordinates.

The first phase of the project consisted in developing a program tool, which allows knowing the influence of the distribution of reference targets, in any working area, on the accuracy in coordinate calculation of the control station.

From here there have been a large number of repeatability test, which modify number, distribution, horizon overture, height and distance of the targets in relation to station. For each variation have been studied the discrepancies between obtained and theoretical coordinates, and the errors obtained on the coordinate position of the station. We also studied the irregularities detection on theoretical position of reference targets, by entering gross errors in coordinates.

Once repeatability testing was completed, has been executed the study of an actual structure monitoring case, making an analysis of the position of reference targets by the program tool developed. This tool is designed through the software *Visual Studio* in C++ language. In addition to implement the influence of the factors listed above, this program can

enter, if you wish, data errors every time that program is executed, which allows to study of different gross errors.

Having completed the relevant test and analyze the obtained data, it is concluded that in auscultation by AMTS, should never be used less than 8 reference targets. So neither should be used $\leq 280^{\text{g}}$ of horizon overtures, $\leq 80^{\text{g}}$ of target distribution and ≥ 70 m in distance, because all of them exceed the usual limits set as red alert.

ÍNDICE

1. INTRODUCTION	6
1.1. Objectives.....	6
2. AUSCULTATION PRINCIPLES	7
2.1. Structure auscultation.....	7
2.2. Surveying monitoring with robotic total stations.....	7
3. PROGRAM DESIGN.....	11
3.1. Functions.....	11
3.1.1. Random file creation	12
3.1.2. Open random file.....	12
3.1.4. Approximate coordinate calculation	13
3.1.5. Least Square Adjustment.....	13
3.1.6. Result analyze.....	16
3.1.7. Error analyze	16
3.1.8. Gross error insert.....	19
3.2. Executed tests.....	19
3.3. Gross errors	21
4. RESULTADOS OBTENIDOS.....	21
4.1. Pruebas realizadas sin errores groseros.....	22
4.2. Análisis de los observables	28
5. ANALISIS CASO REAL	38
5.1. Análisis de los resultados.....	39
6. CONCLUSIONES.....	41
7. REFERENCIAS	44
8. OTRA BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	45
AGRADECIMIENTOS	46
CONTENIDO DEL CD.....	48

1. INTRODUCTION

Due to the increasing need for tunnelling, excavations, demolitions and field treatment in urban zones, is essential to check if there is any structure nearby, considering that is probably be affected and will be establish a monitoring and control protocol to guarantee the balance of the structure during the execution of the work, and subsequently during settlement.

In the unlikely event to detect any movement out of tolerances, according to construction typology, will take the necessary measures to ensure the structure safety in question, even being able to stop the work.

These controls go through with monitoring the structure subject to study. There is great variety of monitoring systems which allows controlling any kind of movement, whether it is geotechnical (tensions, deformations or field level) or structural movement control (superficial or subterranean).

In this project studies structural monitoring by Automatic Monitored Total Station or AMTS. This method requires of control targets settle down in the auscultation building (monitoring) and a number of reference targets to place the AMTS. The project focuses in the study of the influence of different position of reference targets to estimate the place of the station. To do this, it was developed a program.

1.1. Objectives

The main objective of this project is the study of the influence of different position, changing number, distance, height and overture of the reference targets, placing total station. Based on study results and after analyzed, one of the main objectives is to optimize, as far as possible, the position of reference target on each case (structure auscultation).

From this objective is developed a useful computer tool for achieve any structure auscultation, which quantify the placement AMTS errors and optimize the location of reference targets to minimize these errors.

Also assesses, if that tool, is able to detecting the influence of the displacement of a reference target, rudely in our case, of the original position.

2. AUSCULTATION PRINCIPLES

Auscultation implies regular measurements automatic or semiautomatic, of reference/control targets on influence areas to determinate the deformations. The changes in condition areas may be natural or caused direct or indirect by human. The control of these movements can be applied both to the movement of a slope as that caused by the settling of a building structure. Period of time that causes these movements are varied.

Considering auscultation nowadays tend to be more importance, in all kind of works are taken action: industry, edification and mining (slopes, bridges, buildings...). In constructions such a tunnel, demolitions, field treatment, excavations... is essential to consider the influence of that that has on the nearby environment (influence zone).

2.1. Structure auscultation

Auscultation, considering all the above and referring to surveying area, due to the different acceptance in others science, could be determined as: the set of activities destined to know the real structure behaviour or affected area, by installing a series of instruments and with the aim of studying the movement happens. When all these activities go through a monitor, is named monitoring.

Monitoring, therefore, is an important part of urban works as a preventive measure and control, both the work itself and its environment, to avoid serious consequences. There is great variety of monitoring systems which can get parameters whether it is geotechnical (tensions, deformations or field level) or structural movement control (superficial or subterranean).

2.2. Surveying monitoring with robotic total stations

Thought AMTS, instrument use to measure horizontal angles, vertical and distances automatically, the placement of control targets on the structure subject being auscultation (see figure 1) and subsequent data analysis, is obtained the displacement suffered by the whole structure, and specifically of the targets, repeatedly executing readings from time to time and calculating the variations of coordinates X, Y and Z (X and Y for planimetry and Z for altimetry). Due to the necessity of constant repeating of these readings, is using the AMTS, specials models, designed for these works.



Figure 1: Structure control with AMTS (Lantada *et al* 2012)

The prism that are used in this control, are reduced dimensions, these are placed directly on the building front with a support piece L shaped (see figure 2).



Figure 2: Example of target used in buildings

An automatic monitoring system allows measurement, acquisition, transmission and display data barely in real time. This system can be form by one or more than one AMTS able to measuring angles and distances automatically with a previous programming. In addition includes power supply, control and reference targets that receive and return the beam send by the station, a wireless communication (WiFi/3G network, radio or modem) to transmit the obtained data and a computer responsible for sending readings orders to the station and which in turn receives and analyzes data (see figure 3), can be incorporate an alarm system that produce prevention messages when registered movements cross the risk boundaries previously defined.

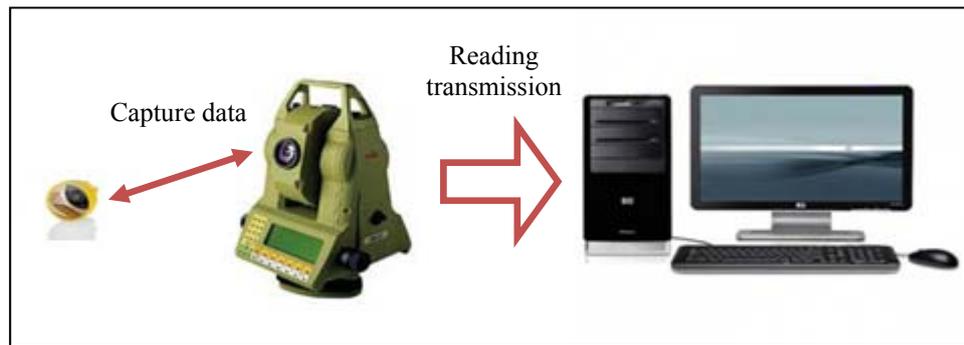


Figure 3: System reading transmissions

AMTS are capable of measuring angles and distances on different control targets, during a certain period of time cyclic and automatically, being previously programmed by computer.

This kind of system, therefore, requires a human crew; on the one hand employees responsible for the definition and design of the installation, design and maintenance of the data transmission system and processing and analysis of that and on the other hand field employees responsible for the installation, operating and doing preventive and corrective functions in monitoring system. For example, in case of failure, incidence or losing the reference or control target visual must be quickly fixed for avoid gross errors on the calculation of certain variables.

One of the most interesting features of the AMTS is the automatic recognition system, named ATR (Automatic Target Recognition), which track until find the target. There is no need to be a special target, must be approximately directed the lens to the target and pull the measure button and the station aim to target centre and measure, even thought in the dark. To aim to the centre of the target the ATR sensor emits a laser beam that it is reflected on the target, and is received by a high-resolution internal camera CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) light detection. With the intensity and position of light reflected, the instrument calculates the target optical centre, measuring the distance to it, and its coordinates. If the target is no longer available in the station visual, the station initiates a track in a predefined window until find it.

It should be in mind that the specifications given by manufacturers are the result of quality control and industrial process certification. The accuracy is determinate in ideal conditions, and because of that the accuracy that can be achieve on the field or real situations is, in general, slightly lower than that obtained in the laboratory (factory accuracy). The technical features of lower accuracy for angle measures range between 1'' (0,3 mgon) 0,5''

(0,15 mgon), and for distance to the targets 1 mm + 1 ppm. System accuracy does not depend exclusively on the instrumentation quality; also are determinative use circumstances and final data calculations method. Repeating measurements and statistical-topographic calculations, can improve the value of the final accuracy.

The accuracy of monitored point readings is a function of the various system components. Major items to be considered when determining likely system accuracies are:

- Instrument performance (both angular and distance measurements).
- Stability/location accuracy of reference prisms.
- Number and geometric orientation of reference and common prisms.
- Number of AMTS within a group, necessary for the group to operate.
- Sighting distances AMTS to prisms. (Cook, 2006)

An automatic monitoring system is able to guarantee an accuracy of one millimetre at a maximum distance of 100 – 200 metres. To achieve maximum distance, normally AMTS be installed in the influence area of the work. This is possible to the placement of a series of stable reference targets, outside of influence area and direct visual to station allowing recalculations and if necessary, correct the placement in case that suffer movements because of the work or any other reason, like the structure movement itself where is installed.

In each cycle the station make two reading for each target, with readings in Direct Circle and Reverse Circle, applying Bessel process and checking the difference between both readings falls outside the previously established tolerance for each target. The system checks that the targets are not moved over bounded minimum, if a target is moved the station dismiss the targets moved. Later, will be necessary check the target, to verify the problem and probably replace it or reinstalled. The reading quality depends on the reference targets are well distributed and located at different distances for maximum reliability. If the area and work characteristics does not possible achieve that conditions, to get to reference points outside the influence zone would be essential create a traverse to cover a stable area and the auscultation area. In automatized system this is achieved by an AMTS network, sharing the same coordinate system, where each one add constrictions and environmental conditions for calculating the position of three station points (Valdemarin *et al*, 2010). The automatic monitoring system normally has a weather station near AMTS. The data are needed to effectuate several atmospheric corrections, used to offset the temperature effect, the pressure and the relative humidity on data obtained. The weather station automatically notifies the constant atmospheric to AMTS applying immediately corrections.

Summarising, AMTS have established a successful track record on major construction projects around the world with choice and functionality increasing with time. The accuracies which can be achieved depend on system design and not just on instrument specification. Care needs to be taken when researching specifications as accuracies given are likely to be the very best expected and achievable only in ideal conditions. Even if readings are consistently achieved, the instrument may lack the sensitivity to pick up development of trends at an early stage, but providing the limitations of an AMTS system are understood they can be used successfully for many monitoring purposes. (Cook, 2006)

3. PROGRAM DESIGN

As previous discussed the calculation process for the position of AMTS is made from observations of a series of reference targets. To achieve this calculation, and control the reliability of the same, it is design by program language C++ (Deitel & Deitel 1999) and *Visual Studio* setting, a program able to create and analyze the obtained data randomly, within a set of parameters established by the user and the technical characteristics of the station.

3.1. Functions

The program develops various functions (see figure 4), which are described below. Once created or introduced the reading of the different targets, proceeds to study.

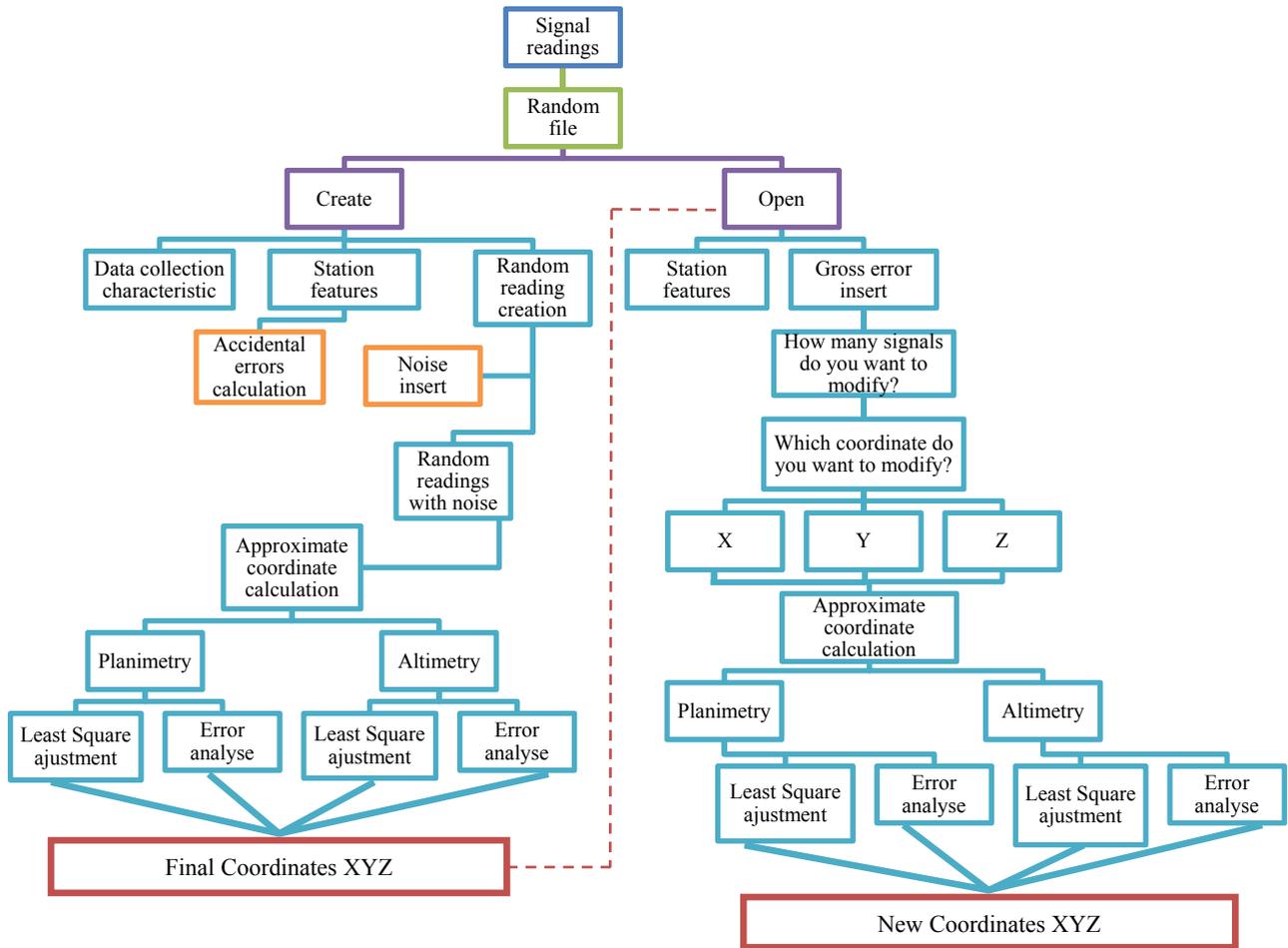


Figure 4: Program scheme

3.1.1. Random file creation

It creates an entirely new random file following the instructions of the program, which provide the coordinates (X/Y/Z) of the station according to the entered parameters, such as target number, distribution, maximum horizon overture, height and distance in relation to station, also are introduced reading deviations (horizontal, vertical and distance) and the used station features. At the same time, the program introduces noise to data, providing reading errors through previously established criterion.

3.1.2. Open random file

From random file created, the program allows the introduction of several data modifications, such as some target coordinate to introduce gross errors, finally calculating new coordinates (X/Y/Z) of the station, according to introduced modifications, also network analysis recalculation.

This option also allows from a new file got of a previous monitoring in real situation, calculate the coordinates (X/Y/Z) of the station, and all subsequent data analysis.

3.1.4. Approximate coordinate calculation

To obtain the final coordinates of the station, firstly is solves an inverse resection calculating the approximate coordinate. As we know more than three target coordinates, allowing having a check of field data, we apply the Pothenet method. Through this process we obtain the approximate coordinate for several set of references, as final value the average of the result is considered. Resulting coordinates are used to the rest of calculations and are considered correct.

3.1.5. Least Square Adjustment

Applying least squares method to determinate the final coordinates of the station. The resection will be adjusted using the indirect observation method by orientation and distance equations.

Matrix definition:

- Matrix A (observation equations)
 - Azimuth equations

$$a_i \cdot dx_i + a_{i+1} \cdot dx_{i+1} + b_i \cdot dy_i + b_{i+1} \cdot dy_{i+1} - \partial \Sigma_O = U + R_\alpha \quad (1)$$

Therefore:

$$a_i = -\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{(D_i^{i+1})^2}\right) ; \quad a_{i+1} = \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{(D_i^{i+1})^2}\right) \quad (2)$$

$$b_i = \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{(D_i^{i+1})^2}\right) ; \quad b_{i+1} = -\left(\frac{x_{i+1} - x_i}{(D_i^{i+1})^2}\right) \quad (3)$$

- Distance equations

$$a_i \cdot dy_j + a_j \cdot dy_i + b_i \cdot dx_j + b_j \cdot dx_i = U + r_l \quad (4)$$

Therefore:

$$a_i = \left(\frac{y_j - y_i}{l_i^j} \right) \quad ; \quad a_j = - \left(\frac{y_j - y_i}{l_i^j} \right) \quad (5)$$

$$b_i = \left(\frac{x_j - x_i}{l_i^j} \right) \quad ; \quad b_j = - \left(\frac{x_j - x_i}{l_i^j} \right) \quad (6)$$

- Height equation

$$H_i - H_j = h_i^j \quad (7)$$

```
//Creacion de la matriz_A
CvMat *Mat_A = cvCreateMat(num_prismas_num*2,3,CV_32F);
cont=0;
for (int i=0; i<(num_prismas_num); i++ ){
double valor0=0.0;
//Ecuaciones de angulos
double valor1=((matriz_coordenadas_aleatorias[(cont*3)+2]-
Y_orig_aprox_media)/pow(matriz_distancia_origen[cont+1],2))*r;
double valor2=-((matriz_coordenadas_aleatorias[(cont*3)+1]-
X_orig_aprox_media)/pow(matriz_distancia_origen[cont+1],2))*r;
double valor3=-1.0;
cvmSet(Mat_A,i,0,valor1);
cvmSet(Mat_A,i,1,valor2);
cvmSet(Mat_A,i,2,valor3);
//Ecuaciones de distancias
double valor4=sin(matriz_Az_Observado[cont+1]);
double valor5=cos(matriz_Az_Observado[cont+1]);
cvmSet(Mat_A,i+num_prismas_num,0,valor4);
cvmSet(Mat_A,i+num_prismas_num,1,valor5);
cvmSet(Mat_A,i+num_prismas_num,2,valor0);
cont++;}
```

Figure 5: Example of matrix calculation with OpenCV

- Weight matrix

- Azimuth equations

$$P(Az) = \frac{1}{e_a^2} \quad (8)$$

Therefore:

$$e_a = \sqrt{e_p^2 + e_l^2 + e_v^2 + e_d^2} \quad (9)$$

Where:

term e_a angular error of visual

term e_p aim error

term e_l longitudinal error

term e_v verticality error

term e_d direction error

○ Distance equation

$$P(D) = \frac{1}{(\sqrt{(yD)^2 + x^2 + e_{ip}^2 + e_s^2})^2} \quad (10)$$

Where:

x and y distance measuring accuracy ($x \pm y$ ppm)

term e_s uncertainty in the position on the observed point of the target

term e_{ip} uncertainty in the position of station

D la average distance

○ Height equation

$$P(Z) = \frac{1}{(\sqrt{e_{zD}^2 + e_{zV}^2 + e_v^2 + e_i^2})^2} \quad (11)$$

Therefore:

$$\begin{aligned} e_{zD} &\leq (D + e_d) \cdot \cotg V - D \cdot \cotg V \\ e_{zV} &\leq D \cdot \cotg (V + e_v) - D \cdot \cotg V \end{aligned} \quad (12)$$

(13)

Where:

term e_{zD} generate error in distance

term e_{zV} generate error in the vertical

term e_V generate error in verticality

term e_i el error instrumental

- Independent Terms Matrix

- Azimuths equation

$$\Delta\vartheta = \vartheta_i^j(obs) - \vartheta_i^j(calc) \quad (14)$$

- Distance equation

$$\Delta D = D_i^j(obs) - D_i^j(calc) \quad (15)$$

- Height equation

$$\Delta Z = Z \pm Z_i(obs) \quad (16)$$

Once the least square adjustment finished, are obtained the compensate coordinates of the station, as well as the unbiased estimation. Then it proceeds to analyze these.

3.1.6. Result analyze

Completed main diagonal adjustment of variance-covariance matrix ($\sigma_{xx} = \sigma_o^2 Q = \sigma_o^2 \cdot N^{-1}$), get the associate variance of each of the unknowns, from which we can estimate the standard deviation that indicates the error with a reliability of 68%. At the same time, is calculated the error with reliability of 95%. For this we multiply by distribution T-Student factor in function of freedom degrees (see Annexed II).

3.1.7. Error analyze

Error analysis is based on verify adapted mathematical models, especially statistics, adapted to the adjustment and existence of gross errors on the observation. (Rodríguez Jordana, J. 1998)

I. Error figures

From unknown values of variance and covariance, is calculated the error ellipse in each vertex with the following expressions:

$$a^2 = \frac{1}{2} \left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2} \right] \quad (17)$$

$$b^2 = \frac{1}{2} \left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2} \right] \quad (18)$$

$$tg2\omega = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_y^2 - \sigma_x^2} \quad (19)$$

Where:

a: semi-major axis of ellipse

b: semi-minor axis of ellipse

ω : semi-axes angle of the ellipse with respect to the coordinate x axe

II. Network reliability

The main objective is analyze, simulation, design, control and optimization of high-precision networks. Getting criterion information that allows suggests decisions to improve the network adjustment.

❖ Internal reliability

The tests made have the ability to detect and control the existence of gross errors in the observables. Furthermore estimates the quality of the observable and enables the sensitivity of observations if there are gross errors. The following tests are made:

- Observation redundancy

It will be the main diagonal elements of the resultant matrix: $Q = (P \cdot Q_{rr})$ Being the redundancy of each observable $r_i = Q(i, i) = P_i \cdot Q_{ri}$. Tolerances in table 1 are determine for the observable control.

perfectly controlled if:	$r_i = 1$
right controlled if:	$1 \geq r_i \leq 0,4$
weakly controlled if:	$0,4 \geq r_i \leq 0,1$
poorly controlled if:	$0,1 \geq r_i \leq 0$
not controlled if:	$r_i = 0$

Table 1: Determinate tolerance for the observable control (r_i)

- Gross errors control: W-test of Baarda and minimum error detectable

Assuming a level of signification $\alpha = 0,001$ and test power $\beta = 0,80$, from these parameters Baarda residue must achieve:

$$W_i = \frac{R_i}{\sigma_i} \leq 3,29 \quad (20)$$

Following the same parameters for the minimum detectable error it follows:

$$V_{oi} = 4,12 \left(\frac{\sigma_i}{\sqrt{r_i}} \right) \leq 2^c \quad (21)$$

- Internal reliability parameters

$$\mu_{INi} = \delta_o \sqrt{\frac{1 - r_i}{r_i}} \quad (22)$$

For this test is determined that the observable must have homogeneous values.

❖ External reliability

The tests did have the ability to determine the influence of the errors on the observables on the settled values of parameters or variables. The following tests are made:

- External reliability parameters

$$\mu_{EXi} = \delta_o \sqrt{\frac{1 - r_i}{r_i}} \quad (23)$$

- External reliability vectors

$$V_{fei} = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot e_i \cdot V_{oi} \quad (24)$$

3.1.8. Gross error insert

The program allows movement simulation of some reference targets, to pretend real situations on which the target change the position, when it suffers a hit or lack of stability on the surface where it is placed.

That allows modifying the coordinate X, Y or Z of different reference target. It wants to study if the program would detect this error in the calculation analyzes of the position of the total station and being able to eliminate the observables of the influenced target.

3.2. Executed tests

The following theoretical coordinates of the station are determinate: X= 1000 m; Y= 5000 m; Z= 100 m. To check the reliability of the reference targets different tests have been done. In each test has been modified the distribution of the targets in relation to station to analyze the effects on the calculation of the coordinates of the station.

On these test are modify the number of targets, distribution, maximum horizon overture, height and distance in relation to station. Being determinate the values of table 2 as default.

Number of target	12
Distribution of the targets	100°
Maximum horizon overture	400°
Height of targets in relation to station	0 m
Distance of targets in relation to station	50 m

Table 2: Default values of the test.

In Figure 6 is shown schematically, the distribution of the targets according to default values aforementioned.



Figure 6: Default distribution of the targets

It has been applied different distance deviations (see table 3) for the tests that change the distance of the targets in relation to station, a priori is committed more error when the greatest is the distance.

Test	Dist. Dev.
40	0,002 m
41	0,002 m
42	0,002 m
43	0,002 m
44	0,004 m
45	0,004 m
46	0,004 m
47	0,004 m
48	0,004 m
49	0,004 m
50	0,003 m

Table 3: Applied values in the variation of distance of the targets

Testing was made assuming that observations are made by an AMTS Leica TCA2003, with technical features shown in table 4.

Aumentos	30 X		
Sensibilidad Nivel Tórico	30''		
Sensibilidad Nivel Prisma	60''		
Apreciación Angular	3 ^{cc}		
Desviación Horizontal	0,001 ^g		
Desviación Vertical	0,001 ^g		
Desviación Distancia	0,002 m		
Precisión	x±e ppm	1 mm	1 ppm

Table 4: Leica Geosystems AG. (2004)

In order to keep control of the variations (see table 6) were determined acceptance and rejection levels of observations. These, as it shows in table 5, are divided in three levels and were used on the Sagrada Familia control during the AVE works (Muñoz, 2010).

	Horizontal	Vertical
Green (acceptable)	0 - 2,5 mm	0 - 3 mm
Yellow (level acceptable)	2,5 - 4,5 mm	3 - 6 mm
Red (alert)	4,5 - 10 mm	6 - 9 mm

Table 5: Control values for reference targets

3.3. Gross errors

It has been executed two simulations for the different tests (see table7). On the one hand, modify the coordinate (X) of fifth target moved 5 cm of the original position and on the second hand, modify again the fifth target but moved 5 cm of the original position the coordinates (X, Y).

With that, wants to check if the program is able to detecting those movements in the calculation analyze, in order to eliminate the affected signal.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, sin errores groseros, y el análisis de los observables, de las cuales se muestra algún gráfico. El resto de los resultados se pueden consultar en el Anejo III.

4.1. Pruebas realizadas sin errores groseros

A partir de las observaciones a los prismas se han calculado las coordenadas de estos, y mediante la realización de una intersección inversa se han calculado las coordenadas de la estación. Siendo estas comparadas con las coordenadas previamente establecidas ($X= 1000$, $Y= 5000$, $Z= 100$).

Una vez obtenidos los resultados, se ha calculado la dispersión de coordenadas para cada una de las variaciones (véase tabla 6). En los gráficos, que se muestran en cada una de las variaciones, se observa que en la mayoría de las pruebas se ha obtenido poca dispersión de las coordenadas, obteniendo un mínimo de 0 mm y un máximo de 3 mm, respecto a la posición de la estación impuesta de inicio.

Prueba	Núm. Prismas	Distribución Prismas	Obertura de Horizonte	Altura Prismas	Distancia Prismas
1	4	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
2	5	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
3	6	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
4	7	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
5	8	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
6	9	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
7	10	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
8	11	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
9	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
10	13	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
11	12	20,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
12	12	30,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
13	12	40,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
14	12	50,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
15	12	60,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
16	12	70,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
17	12	80,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
18	12	90,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
19	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
20	12	110,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
21	12	100,000 ^g	130,000 ^g	0 m	50 m
22	12	100,000 ^g	160,000 ^g	0 m	50 m
23	12	100,000 ^g	190,000 ^g	0 m	50 m
24	12	100,000 ^g	220,000 ^g	0 m	50 m
25	12	100,000 ^g	250,000 ^g	0 m	50 m
26	12	100,000 ^g	280,000 ^g	0 m	50 m
27	12	100,000 ^g	310,000 ^g	0 m	50 m
28	12	100,000 ^g	340,000 ^g	0 m	50 m
29	12	100,000 ^g	370,000 ^g	0 m	50 m
30	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
31	12	100,000 ^g	400,000 ^g	-40 m	50 m
32	12	100,000 ^g	400,000 ^g	-30 m	50 m
33	12	100,000 ^g	400,000 ^g	-20 m	50 m
34	12	100,000 ^g	400,000 ^g	-10 m	50 m
35	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
36	12	100,000 ^g	400,000 ^g	10 m	50 m
37	12	100,000 ^g	400,000 ^g	20 m	50 m
38	12	100,000 ^g	400,000 ^g	30 m	50 m
39	12	100,000 ^g	400,000 ^g	40 m	50 m
40	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	10 m
41	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	20 m

42	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	30 m
43	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	40 m
44	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
45	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	60 m
46	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	70 m
47	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	80 m
48	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	90 m
49	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	100 m
50	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	150 m

Tabla 6: Variaciones de la disposición de los prismas.

- Variación del número de prismas

Se destacan los resultados obtenidos para las lecturas a 4 prismas, dado que ninguna de las observaciones angulares pasa el análisis de errores. En cuanto a las otras variaciones, las diferencias entre las coordenadas reales y el resultado de las mismas, no llega a superar los ± 3 mm de error en planimetría.

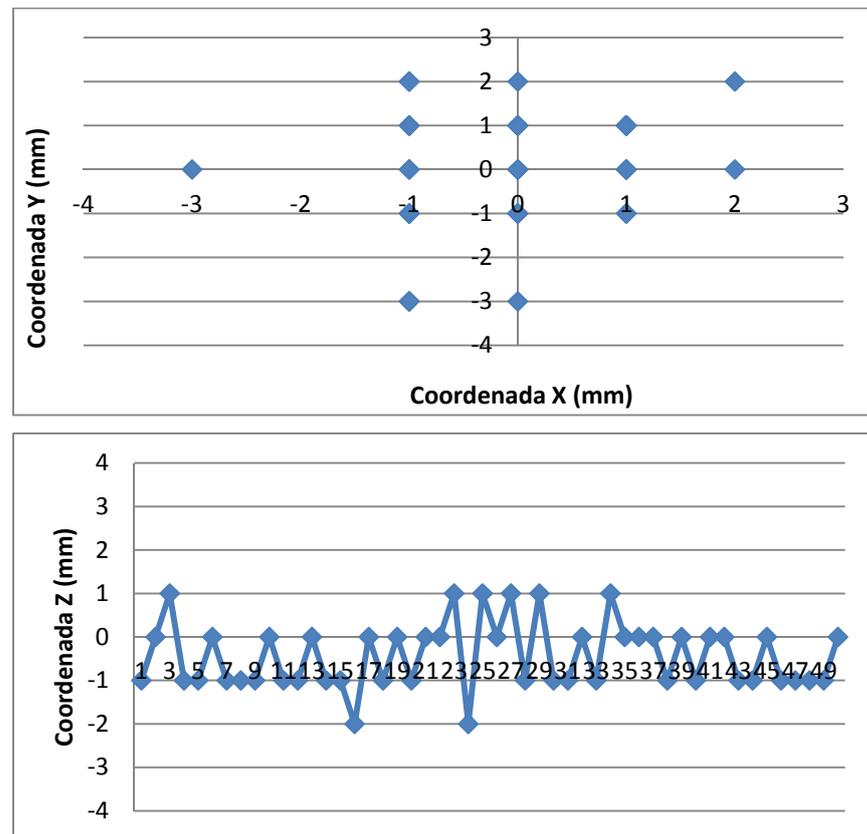


Figura 7: Resultado coordenadas XY (figura superior) y coordenada Z (inferior) para 5 prismas de referencia

- Variación de la distribución de los prismas

Se destacaran las siguientes pruebas: prueba nº 11, 12, 13 y 14 las cuales originan una variación de hasta ± 40 mm, ± 20 mm, ± 11 mm, ± 5 mm de error respectivamente. Esta tendencia se normaliza en las restantes pruebas donde el error no llega a superar los ± 3 mm de error.

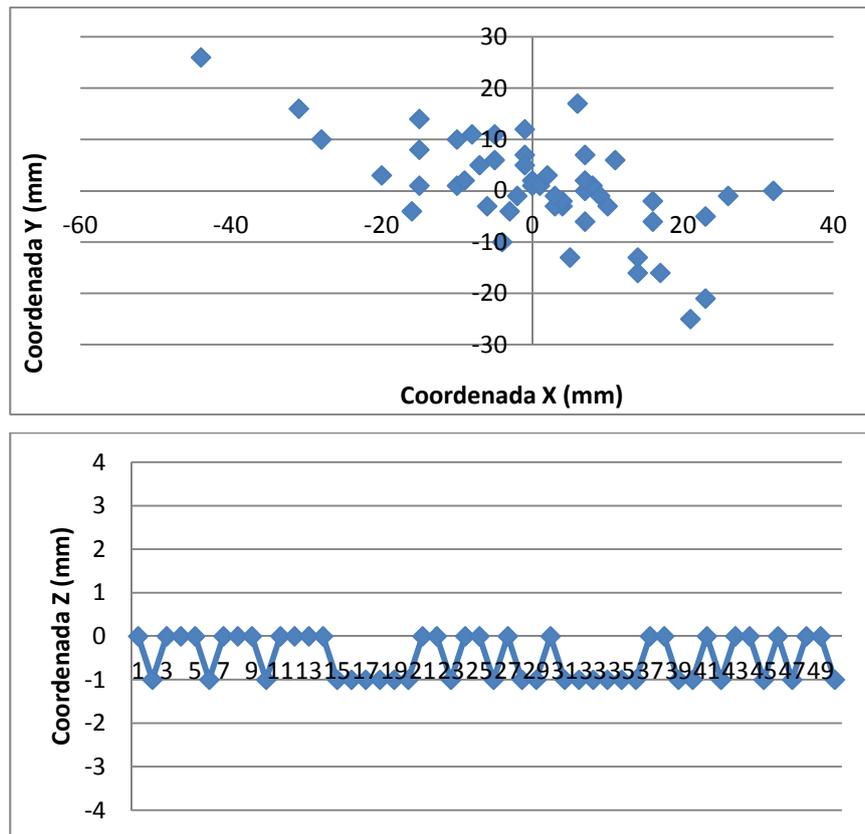


Figura 8: Resultado coordenadas XY (figura superior) y coordenada Z (inferior) para una distribución de 20^º entre prismas

- Variación de la obertura de horizonte

Se destacaran las siguientes pruebas: prueba nº 21, 22 y 23 las cuales originan una variación de hasta -260 mm (X) y 397 mm (Y), ± 270 mm, 700 mm de error respectivamente. Esta tendencia se normaliza en las 4 últimas pruebas donde el error no supera los ± 3 mm.

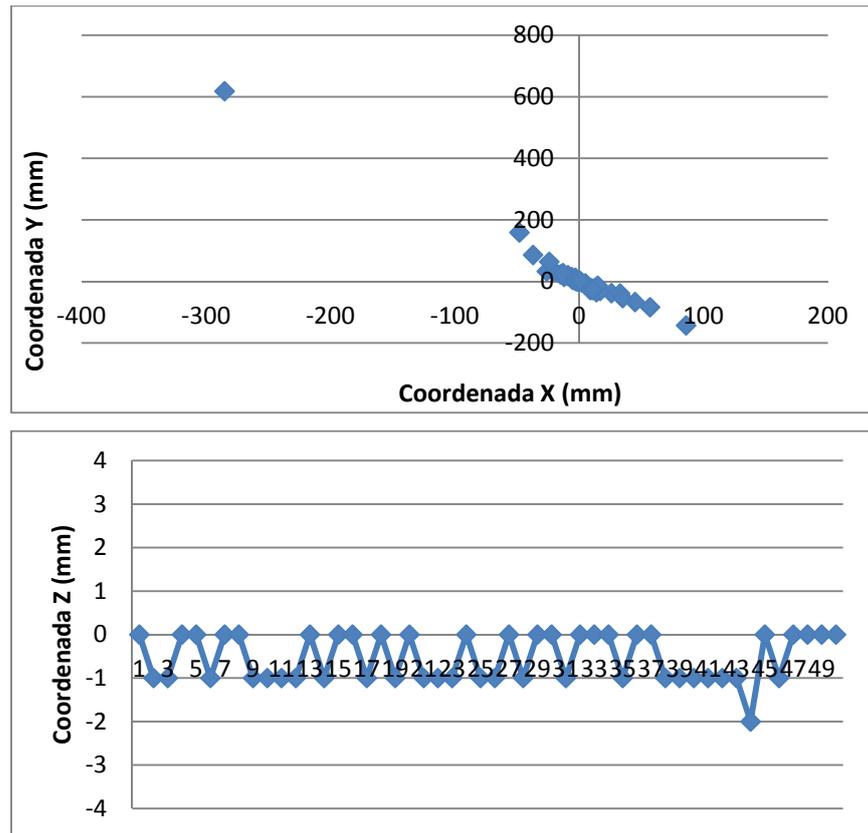
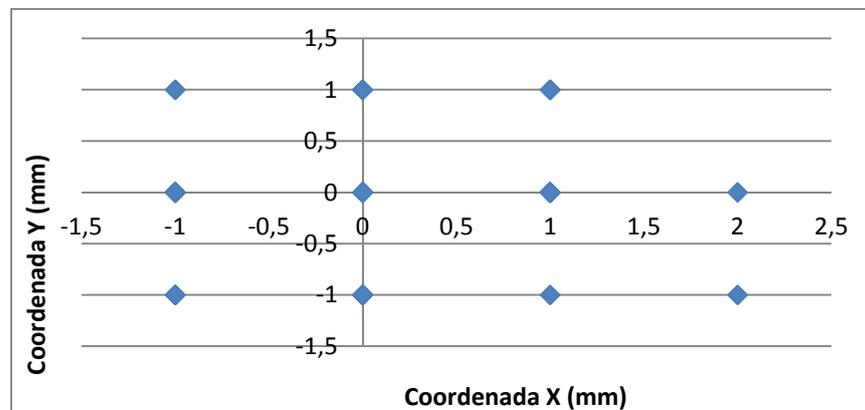


Figura 9: Resultado coordenadas XY (figura superior) y coordenada Z (inferior) para una abertura de horizonte de 220°

- Variación altura de los prismas respecto la estación

Como se observa en la tabla 6, las variaciones de altura de los prismas oscilan entre los -40 m por debajo y los 40 m por encima de la estación.

Las variaciones no llegan a superar los ± 3 mm de error.



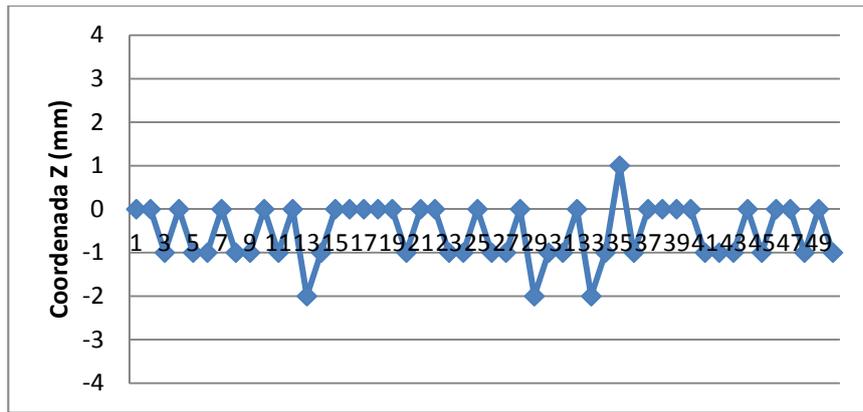


Figura 10: Resultado coordenadas XY (figura superior) y coordenada Z (inferior) para una altura de prismas de 30 m por encima de ETMA

- Variación de la distancia de los prismas

La variación no llega a superar los ± 4 mm de error. Se destacan los 2 primeros casos en los cuales el error no sobrepasa ± 1 mm, siendo estos los que más se aproximan a las coordenadas origen preestablecidas.

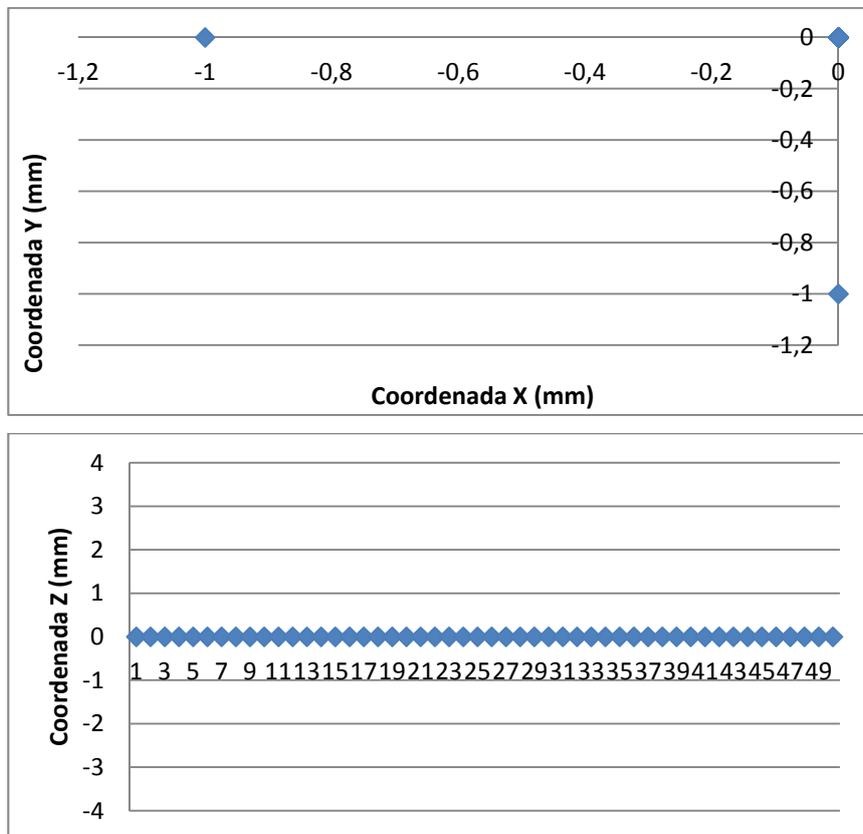


Figura 11: Resultado coordenadas XY (figura superior) y coordenada Z (inferior) para una distancia de 10 m de los prismas

En cuanto a los errores que se producen en altimetría, en todos los casos siguen un comportamiento uniforme, no llegando a superar los ± 2 mm de error. Se pueden destacar diferentes pruebas realizadas dentro de la variación de la distancia de los prismas respecto la estación. La primera de ellas es la prueba n° 40, en la cual no se obtiene ninguna variación respecto a la coordenada original. La segunda prueba destacable es la n° 41, la variación que existente es mínima, originándose un error de -1 mm para un par de casos. También son destacables las 3 últimas pruebas, la n° 48, 49 y 50, donde los errores alcanzan valores de hasta ± 4 mm. Esto es debido a la gran diferencia en distancia que se ha establecido.

En todas las variaciones realizadas, existe una que repite los mismos valores, siendo estos los predeterminados en la tabla 2. En esta se observa que la diferencia entre ellas es mínima (véase figura 12). En la variación de las coordenadas (X, Y) vemos que en todas sigue la misma tendencia sin llegar a sobrepasar los ± 3 mm de error, vemos también que existe poca dispersión entre coordenadas ya que el error ha sido mínimo. Existe un pico para la variación de la coordenada (Z) que alcanza los -2 mm de error, pero este oscila entre 0 mm y -1 mm.

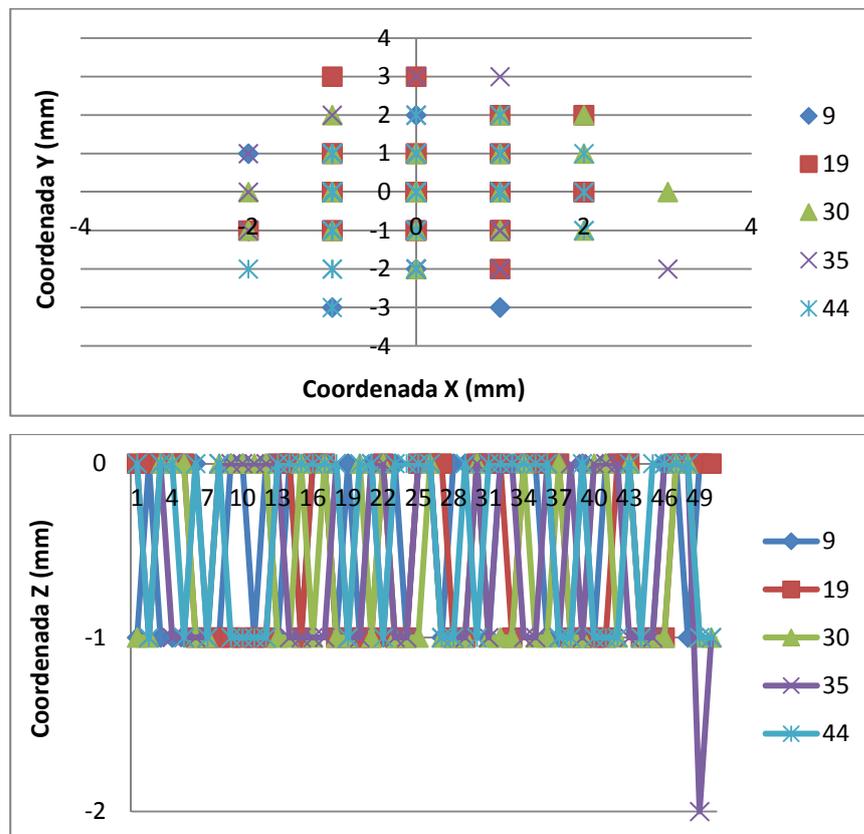


Figura 12: Resultado coordenadas XY (figura superior) y coordenada Z (inferior) de la variación repetida

Según los resultados obtenidos y los niveles de control expuestos en la tabla 5, serían totalmente descartables las pruebas con una variación de la distribución de prismas $\leq 80^g$. También se descartarían las pruebas con una obertura de horizonte $\leq 280^g$ y para distancias ≥ 70 m

4.2. Análisis de los observables

Como se ha desarrollado en el apartado anterior, se han realizado la misma serie de pruebas, pero esta vez centrándonos en valores más concretos (véase tabla 7), de los cuales se analizarán los resultados obtenidos para las coordenadas, las redundancias de cada observable (R_i), el test de Baarda (W_i), el mínimo error detectable (V_{oi}) y la homogeneidad interna (μ_{in}).

Se compararan las dos simulaciones descritas en el apartado 3.3 con los resultados de la misma prueba sin la influencia de errores groseros.

Prueba	Núm. Prismas	Distribución Prismas	Obertura de Horizonte	Altura Prismas	Distancia Prismas
2	5	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
5	8	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
9	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
51	5	20,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
52	5	40,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
53	5	60,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
54	5	80,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
55	5	100,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
56	8	20,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
57	8	40,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
58	8	60,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
59	8	80,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
60	8	100,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
11	12	20,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
13	12	40,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
15	12	60,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
17	12	80,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
19	12	100,000^g	400,000 ^g	0 m	50 m
65	12	20,000 ^g	80,000^g	0 m	50 m
66	12	20,000 ^g	100,000^g	0 m	50 m
67	12	20,000 ^g	110,000^g	0 m	50 m
68	8	20,000 ^g	80,000^g	0 m	50 m
69	8	20,000 ^g	100,000^g	0 m	50 m
70	8	20,000 ^g	110,000^g	0 m	50 m
71	5	20,000 ^g	80,000^g	0 m	50 m
72	5	20,000 ^g	100,000^g	0 m	50 m
73	5	20,000 ^g	110,000^g	0 m	50 m
34	12	100,000 ^g	400,000 ^g	-10 m	50 m
36	12	100,000 ^g	400,000 ^g	10 m	50 m
76	12	100,000 ^g	400,000 ^g	15 m	50 m
77	8	100,000 ^g	400,000 ^g	-10 m	50 m
78	8	100,000 ^g	400,000 ^g	10 m	50 m
79	8	100,000 ^g	400,000 ^g	15 m	50 m

80	5	100,000 ^g	400,000 ^g	-10 m	50 m
81	5	100,000 ^g	400,000 ^g	10 m	50 m
82	5	100,000 ^g	400,000 ^g	15 m	50 m
40	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	10 m
44	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
49	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	100 m
50	12	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	150 m
61	5	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
62	5	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	100 m
74	5	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	150 m
63	8	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	50 m
64	8	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	100 m
75	8	100,000 ^g	400,000 ^g	0 m	150 m

Tabla 7: Pruebas realizadas para los errores groseros

A continuación se comentan los resultados obtenidos según el aspecto estudiado o variación que se ha introducido a la disposición de los prismas.

Las tablas y graficas de los resultados obtenidos para cada una de las variaciones pueden consultarse en el Anejo IV.

- Aspecto estudiado: variación del número de prismas

En las pruebas n° 2, 5 y 9, como se observa en los resultados obtenidos tanto para coordenadas compensadas como para los análisis realizados, el aumento del error es proporcional al número de prismas. Se destaca el mínimo error detectable (V_{oi}) para las tres pruebas, ya que en ninguno de los tres casos en la segunda simulación entra en tolerancia. Llegando a superar los 8° de error en la prueba n° 2. Se destacan también los análisis de errores realizados en la prueba n° 2, donde existen observaciones angulares que no pasan el test de redundancias (R_i) ni el test de homogeneidad interna (μ_{in}). Por ello serán observables sujetos a revisión.

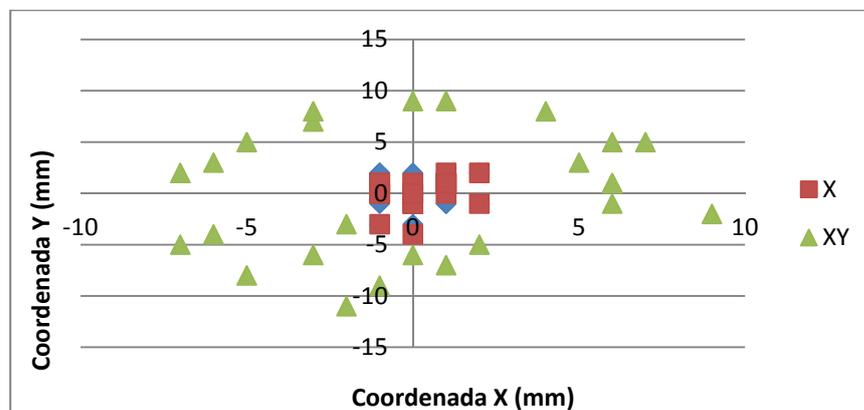


Figura 13: Resultado coordenadas XY para 5 prismas

- Aspecto estudiado: variación de la distribución de los prismas

En las pruebas nº 11, 13, 15, 17 y 19, de la primera simulación, existen cambios significativos en los resultados. Como se puede observar en los datos, el cambio más significativo es en el mínimo error detectable (V_{oi}). La mayoría de las veces este no entra en tolerancia.

Además se observa que el error en distancia del prisma afectado en el test de Baarda (W_i), no entra dentro de la tolerancia establecida. Este hecho parece estar relacionado con la variación de la distribución de los prismas, ya que como se observa, el aumento es más significativo cuanto menor es la distribución. Destacan los resultados para la segunda simulación ya que estos tienden a aumentar el índice de error. En cuanto a los resultados de las coordenadas compensadas, el análisis muestra que a menor distribución mayor es el error que se obtiene.

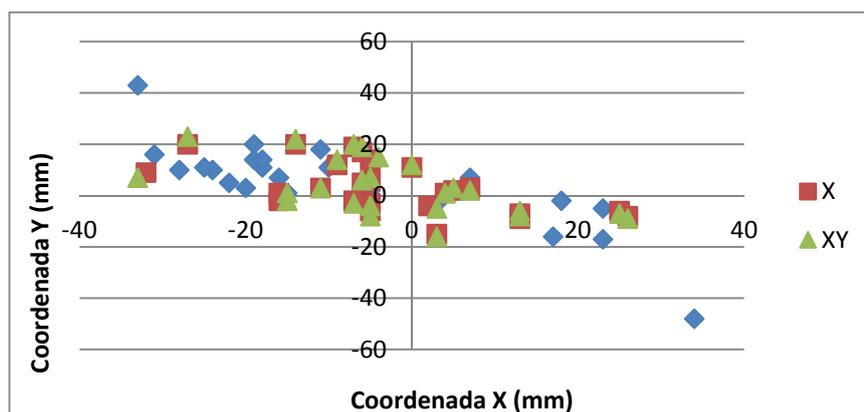


Figura 14: Resultado coordenadas XY para una distribución de prismas de 20^g para 12 prismas

En las pruebas nº 56, 57, 58, 59 y 60 se ha realizado el mismo estudio que en las pruebas anteriores, pero en este caso se ha disminuido el número de prismas a 8. En estas pruebas se puede destacar que el aumento de los errores obtenidos es debido a la menor distribución de los prismas, tanto en los análisis como en las coordenadas, siendo estos más evidentes en el mínimo error detectable (V_{oi}). A diferencia de las pruebas anteriores, en estas cabe destacar que existen observaciones angulares que no pasan el test de redundancias (R_i) ni el test de homogeneidad interna (μ_{in}). Por ello serán observables sujetos a revisión.

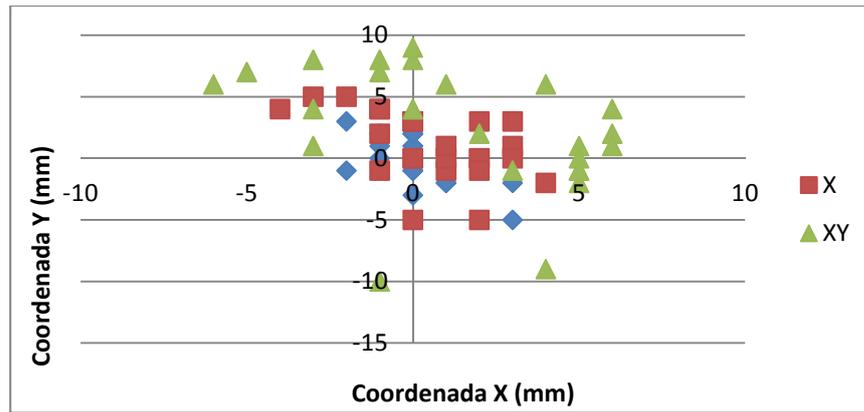


Figura 15: Resultado coordenadas XY para una distribución de prismas de 60° para 8 prismas

En las pruebas n° 51, 52, 53, 54 y 55, en términos generales, se pueden describir los mismos resultados que en las pruebas anteriores. Aunque como se observa en los resultados obtenidos, aumentan los errores de manera proporcional a la disminución de prismas

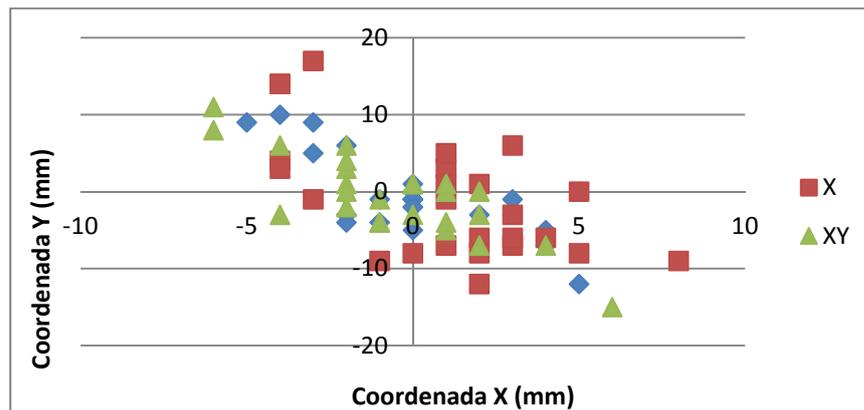


Figura 16: Resultado coordenadas XY para una distribución de prismas de 40° para 5 prismas

- Aspecto estudiado: variación de la obertura de los prismas

En las pruebas n° 65, 66 y 67, durante la primera simulación, el cambio de resultados no es demasiado significativo. En las tres pruebas realizadas se aprecia que el mínimo error detectable (V_{oi}) muchas veces no entra en tolerancia, agravándose a medida que disminuimos el número de prismas. Este hecho no parece estar correlacionado con la variación de obertura de horizonte que se aplica en estas pruebas. Es importante destacar que en las simulaciones donde aplicamos errores groseros, en ambos ejes de coordenadas, los datos de análisis tienden a mostrar mayor índice de error. En cuanto a los resultados obtenidos de coordenadas compensadas, el análisis nos muestra que a mayor obertura de horizonte se obtienen menos errores.

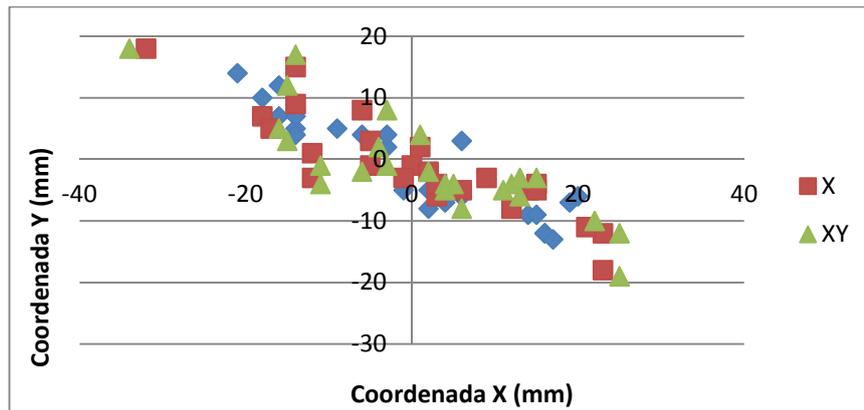


Figura 17: Resultado coordenadas XY para una abertura de horizonte de 100° para 12 prismas

En las pruebas n° 68, 69 y 70 se han estudiado los mismos casos que en las anteriores pruebas, pero disminuyendo el número de prismas a 8. En términos generales se puede apreciar, igual que en las pruebas anteriores, que a menor grado de abertura de horizonte obtenemos mayores errores, tanto en coordenadas como en datos de análisis, siendo estos más evidentes en el mínimo error detectable (V_{oi}). En algún caso incluso situándose por encima de los 8°. También es destacable el hecho de que así como en las anteriores pruebas a mayor abertura de horizonte reflejaba menores errores en coordenadas de manera evidente, en este caso lo hace de una manera más suave, siempre mejorando a medida que este se amplía.

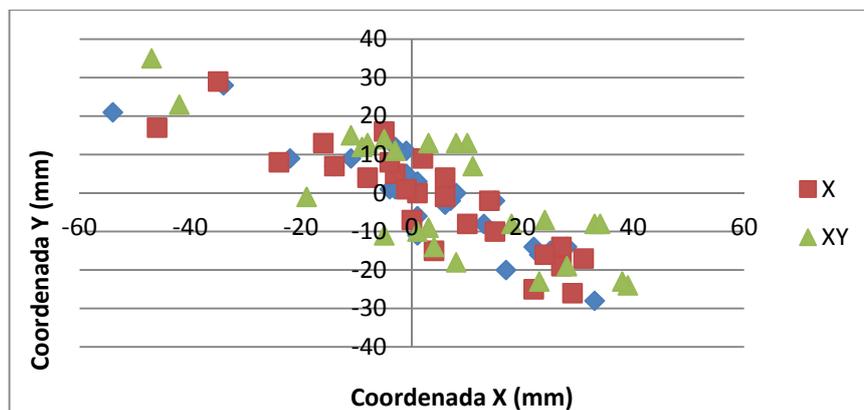


Figura 18: Resultado coordenadas XY para una abertura de horizonte de 80° para 8 prismas

En las pruebas n° 71, 72 y 73 se podrían describir resultados parecidos a pruebas anteriores, aunque aumentando los errores prácticamente de manera proporcional a la disminución de prismas.

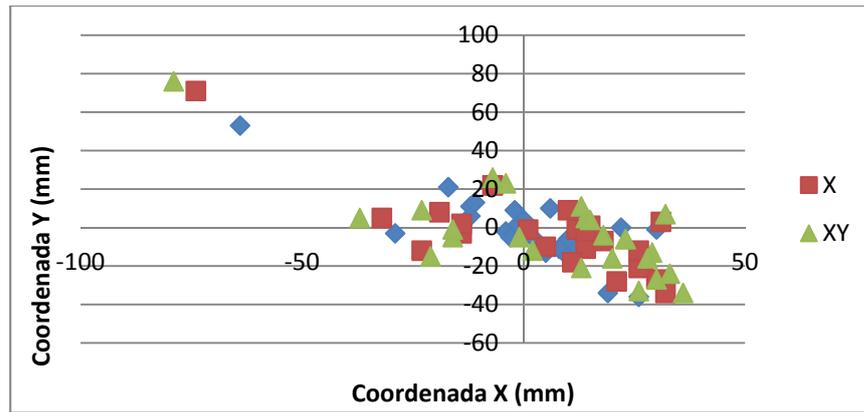


Figura 19: Resultado coordenadas XY para una abertura de horizonte de 110° para 5 prismas

- Aspecto estudiado: variación de la altura entre prismas

En las pruebas nº 34, 36 y 76, durante la primera simulación, la diferencia de resultados no es demasiado significativo. El cambio más destacable sucede cuando en alguna ocasión se observa que el error en distancia, del prisma afectado, no entra dentro de la tolerancia establecida en el test de Baarda (W_i). En cambio, durante la segunda simulación, el aumento en los análisis tiende a mostrar mayor índice de error, el más destacable es en el mínimo error detectable (V_{oi}). Aunque en ninguno de los casos entra en tolerancia. En referencia a los resultados obtenidos en las coordenadas compensadas de la ETMA, el análisis muestra errores parecidos en los tres casos estudiados.

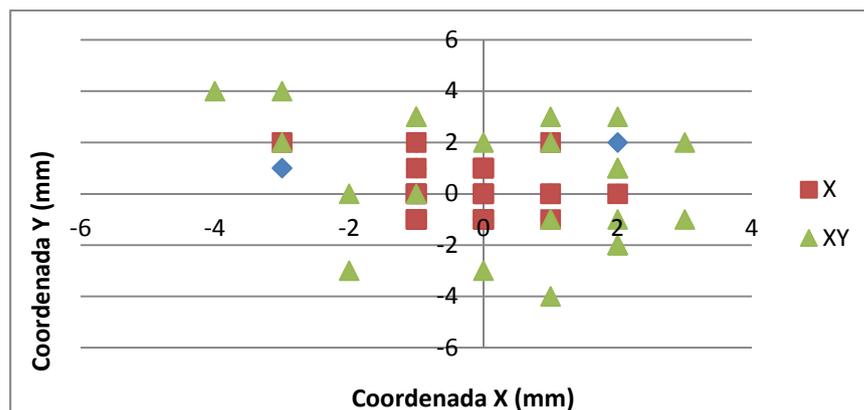


Figura 20: Resultado coordenadas XY para una altura de -10 m por debajo de la estación para 12 prismas

En las pruebas nº 77, 78 y 79 se ha realizado el mismo estudio que en diferentes pruebas anteriores, sin embargo esta vez se ha reducido el número de prismas. Como se puede observar en los resultados obtenidos, el cambio más destacable es que los errores aumentan

proporcionalmente a la disminución de prismas. En estas pruebas los errores son mayores tanto en las coordenadas como en los análisis de errores.

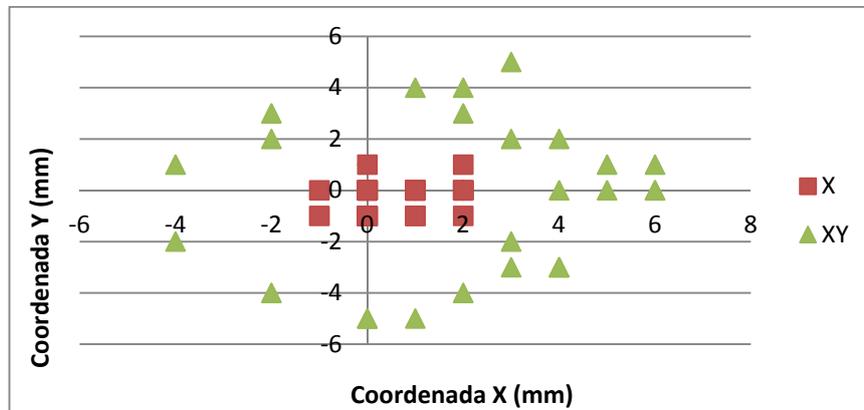


Figura 21: Resultado coordenadas XY para una altura de 10 m por encima de la estación para 8 prismas

En las pruebas nº 80, 81 y 82 se describe la misma variación que en el caso anterior, siendo mayores los errores detectables. Cabe destacar el mínimo error detectable (V_{oi}) en la segunda simulación, ya que en la mayoría de los casos supera los 8° de error. En estas pruebas se observa que existe una observación angular que no pasa el test de redundancias (R_i) ni el test de homogeneidad interna (μ_{in}), aunque pasa los otros test, será un observable sujeto a revisión.

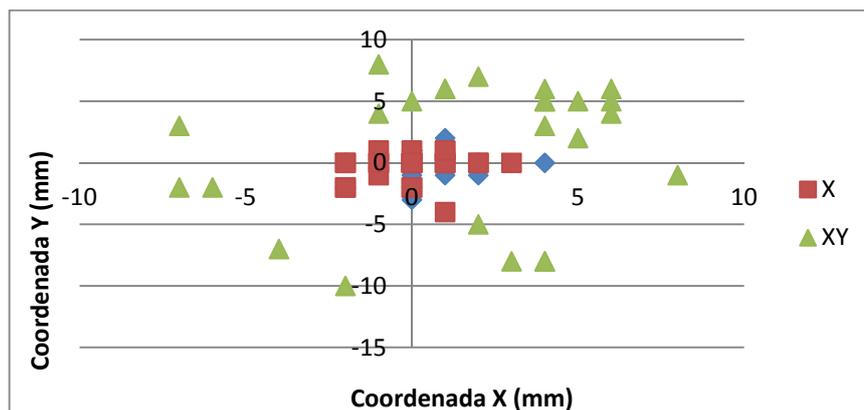


Figura 22: Resultado coordenadas XY para una altura de 15 m por encima de la estación para 5 prismas

- Aspecto estudiado: variación de la distancia entre prismas

En la prueba nº 40, como se puede observar en los resultados obtenidos, las dos simulaciones realizadas tienen cambios significativos. Estos cambios se agravan en la

segunda simulación, donde el mínimo error detectable (V_{oi}) supera los 10° de error. Como se ha observado en pruebas anteriores, también se detecta en ambas simulaciones que un observable en el test de Baarda (W_i) no entra en tolerancia. En cuanto a las coordenadas, el aumento es significativo en la segunda simulación, llegando a los ± 3 mm de error.

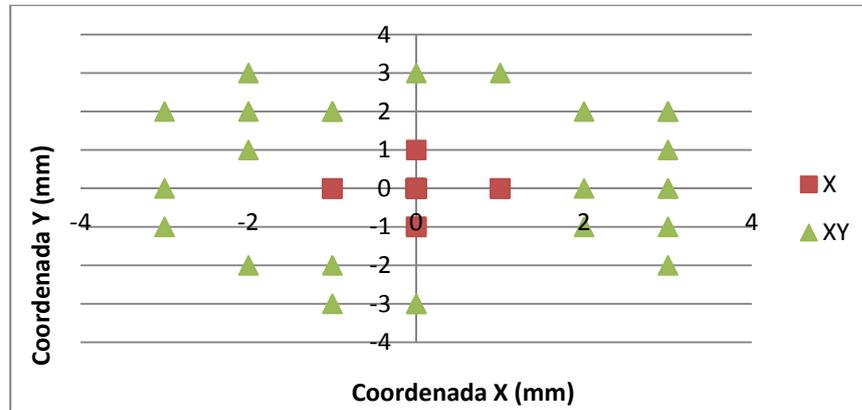


Figura 23: Resultado coordenadas XY para una distancia de 10 m para 12 prismas

En la prueba n° 44, durante la primera simulación, el cambio en los resultados no es significativo tanto en coordenadas como en análisis de errores. Únicamente se detecta que un observable en el test de Baarda (W_i) no entra en tolerancia. En cambio, en la segunda simulación, donde aplicamos errores groseros a ambos ejes de coordenadas, los datos de análisis tienden a aumentar, llegando a superar los 2° de error en el mínimo error detectable (V_{oi}) de observables angulares. Se detecta también que un observable en el test de Baarda (W_i) no entra en tolerancia. En cuanto a los errores en coordenadas, en este caso llegan a superar los ± 3 mm de error.

En las pruebas n° 49 y 50, al igual que en la prueba anterior, no se detectan cambios en los resultados en la primera simulación de análisis de errores. Únicamente se detectan en el test de Baarda (W_i). Sí son destacables los errores en coordenadas de la segunda simulación, ya que superan los ± 3 mm de error en ambas pruebas. Es importante destacar también que durante la prueba n° 50 se han sobrepasado los ± 3 mm de error en coordenadas en las dos simulaciones. Es por ello que esta prueba ha sido descartada y se ha comprobado que este hecho guarda relación con el aumento de la distancia entre prismas.

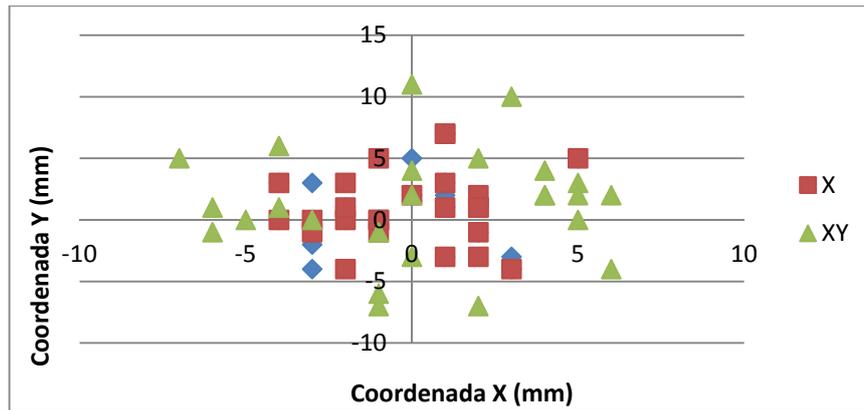


Figura 24: Resultado coordenadas XY para una distancia de 150 m para 12 prismas

En las pruebas n° 61, 62 y 74 el cambio en los resultados continúa sin ser demasiado significativo. En las tres pruebas realizadas se aprecia que un observable angular en el test de redundancias (R_i) y el test de homogeneidad interna (μ_{in}), no entra en tolerancia. Este hecho no parece estar relacionado con la variación de la distancia entre prismas, sino con el hecho de disminuir el número de estos. Es importante destacar que en las simulaciones donde aplicamos errores groseros en ambos ejes de coordenadas, los datos de análisis tienden a mostrar mayor índice de error, sobretodo en el mínimo error detectable (V_{oi}), ya que en ninguna de las pruebas entra en tolerancia, llegando a superar los 5° de error en la prueba n° 61. En cuanto a los resultados en coordenadas compensadas, el análisis muestra que a mayor distancia entre prismas se obtienen mayores errores, siendo descartada por completo la prueba n° 74.

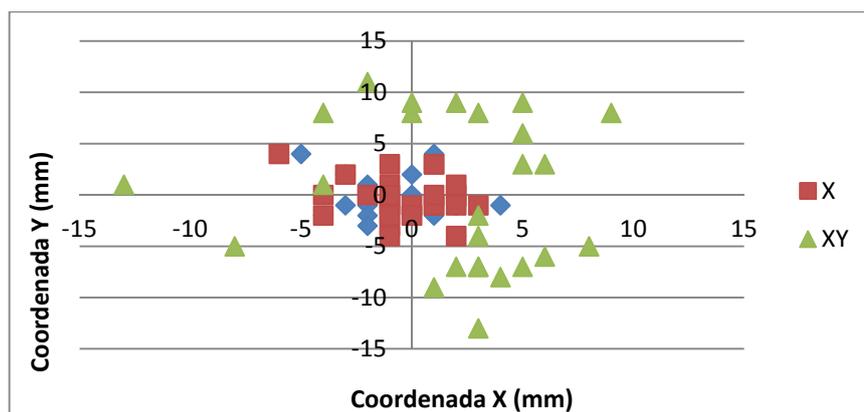


Figura 25: Resultado coordenadas XY para una distancia de 100 m para 5 prismas

En las pruebas n° 63, 64 y 75 se ha realizado el mismo estudio que en las pruebas anteriores. Como se puede observar en los resultados obtenidos el cambio más destacable es

que los errores en coordenadas compensadas aumentan conforme aumentamos la distancia entre prismas.

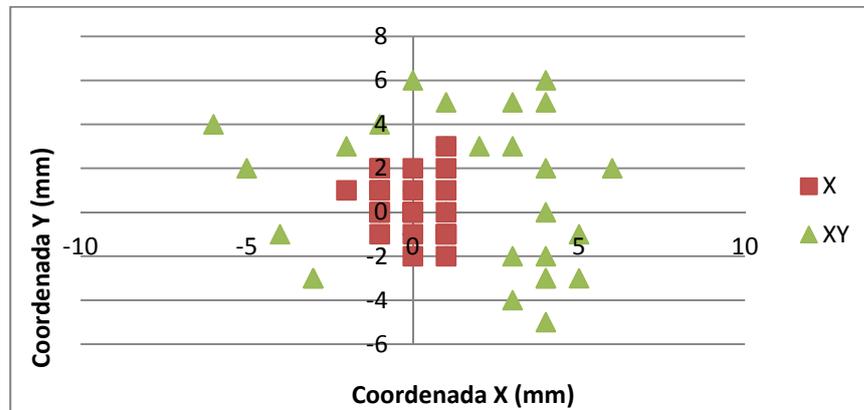


Figura 26: Resultado coordenadas XY para una distancia de 50 m para 8 prismas

Como se puede observar en los resultados obtenidos, normalmente el programa detecta que existen errores groseros en alguna de las señales. Habitualmente ese error se encuentra en el test de Baarda (W_i) dentro de los observables de distancia en la señal afectada. Sin embargo, para un menor número de prismas, se detectarían más errores en las señales de referencia y no se detectaría dicho error.

5. ANALISIS CASO REAL

Como se ha comentado al inicio de este trabajo, se ha realizado el estudio de los datos de un caso real de monitorización de estructuras situadas en la zona de afectación de la excavación de una obra subterránea, siendo objeto de estudio la disposición de los doce prismas de referencia proporcionados. Según se observa en la figura 27, dichos prismas se encuentran distribuidos alrededor de la ETMA (denominada C03) con una obertura de horizonte de 400^g y una distribución irregular.

En base a dicha disposición de prismas de referencia y a las pruebas realizadas con el programa desarrollado en este trabajo, podría predecirse a priori que es una distribución cercana a la ideal, es decir, es una distribución en la cual no se deberían encontrar errores. Esta distribución se asemeja a la que hemos realizado en la prueba n° 40.



Figura 27: Disposición de prismas de referencia (R), de control (P) y ETMA (C03) en el caso real

Disponemos de siete días de observaciones, de los cuales hemos estudiado dos de ellos, siendo objeto de estudio los días 04/03/2013 y 08/03/2013.

Una vez desfragmentados los archivos por cada uno de los ciclos de barrido, se ha comprobado que en cierto número de pasadas el número de prismas de referencia no era

suficiente, debido a falta de lecturas, por consiguiente estos ciclos han sido descartados del análisis. Únicamente se han descartado los ciclos donde faltan lecturas hacia los prismas necesarios para el cálculo de Pothenet. Cabe decir que el número de pasadas descartado es lo suficientemente bajo como para no entrar en consideración: 36 el primer día y 6 el segundo, de 129 y 131 pasadas respectivamente.

5.1. Análisis de los resultados

Para el análisis de este caso, se ha utilizado la opción *Abrir archivo estación* (descrita en el apartado 3.1.2.) del programa desarrollado.

Como se observa en los resultados obtenidos (véase Anejo V), tanto en coordenadas compensadas como en el análisis de errores, no existen errores destacables.

A continuación, a modo de ejemplo, se muestran en la tabla 8 los resultados de la primera pasada del primer día.

	r_i	W_i	V_{oi}	μ_{in}
1	0,7555	-0,1226	2,4268	2,3440
	0,7514	-0,5653	2,4535	2,3697
	0,8696	0,0552	1,6516	1,5953
	0,8643	0,0886	1,6905	1,6328
	0,8021	0,3629	2,1185	2,0463
	0,8021	0,3631	2,1187	2,0464
	0,8951	-0,0654	1,4602	1,4104
	0,8808	-0,1076	1,5690	1,5155
	0,7951	-0,1286	2,1651	2,0912
	0,7423	-0,3365	2,5131	2,4274
	0,8098	0,2368	2,0675	1,9969
	0,8291	0,1833	1,9368	1,8707
	0,9116	2,7070	0,0003	1,2830
	0,9451	0,0671	0,0002	0,9934
	0,9274	-1,3592	0,0003	1,1530
	0,9402	-0,2774	0,0002	1,0389
	0,9401	0,8366	0,0002	1,0397
	0,9401	-1,2825	0,0002	1,0397
	0,9456	-0,6861	0,0002	0,9882
	0,9224	-1,2494	0,0003	1,1951
	0,9217	-0,2640	0,0003	1,2008
	0,9223	-2,5719	0,0003	1,1962
	0,9435	0,6646	0,0002	1,0086
	0,9428	-1,1292	0,0002	1,0143

Tabla 8: Resultados del análisis de errores de la primera pasada del día 04/03/2013
Fiabilidad interna para observables angulares (sombreado gris) y de distancia.

Observando los valores obtenidos en la tabla anterior y, ateniéndonos a las tolerancias establecidas en la tabla 1 para el control de los observables, se puede afirmar que las redundancias de cada observable (r_i) están bien controladas.

Todos los observables cumplen el test de Baarda (W_i) al estar por debajo de 3,29 (ecuación nº 18).

Como se puede apreciar en los resultados del mínimo error detectable (V_{oi}), todos están por debajo de 2° (ecuación nº 19).

Como último aspecto a controlar, el parámetro de homogeneidad interna (μ_{in}) en todos los observables entra dentro de lo esperado.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado el estudio de la influencia de las diferentes disposiciones de los prismas de referencia sobre una construcción, en el caso de la necesidad de llevar a cabo una auscultación mediante estación total, y esta requiera la realización de lecturas de manera sistemática para el cálculo de sus coordenadas.

A continuación se comentan las principales conclusiones obtenidas en relación a la influencia de las diferentes disposiciones (número, distancia, altura y obertura de prismas), obtenidas mediante la herramienta desarrollada:

- A partir de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se ha podido comprobar que el número de prismas que se utiliza influye de forma importante en el resultado de la posición de la estación, ya que se obtiene mayor fiabilidad cuanto mayor es el número de prismas. Se recomienda no ejecutar trabajos de auscultación con menos de 8 prismas, siempre y cuando se realice con una adecuada distribución y obertura de horizonte. Es por ello, y para evitar errores con este origen, que en todas las pruebas, excepto en la de comprobación de número de prismas, se han utilizado doce prismas.
- Teniendo en cuenta los parámetros de control expuestos en la tabla 5 y habiendo realizado un análisis de resultados, se concluye que las auscultaciones con una variación de la distribución de prismas $\leq 80^\circ$, son totalmente descartables ya que corresponderían a un nivel de alerta rojo.

	Horizontal	Vertical
Verde (aceptable)	0 - 2,5 mm	0 - 3 mm
Amarillo (nivel aceptable)	2,5 - 4,5 mm	3 - 6 mm
Rojo (alerta)	4,5 - 10 mm	6 - 9 mm

Tabla 5: Valores establecidos para el control de los prismas de referencia.

- Del mismo modo también serían descartables las pruebas con una obertura de horizonte $\leq 280^\circ$ y/o una distancia ≥ 70 m.

Para la realización de este estudio se ha creado una herramienta informática útil a la hora de realizar una auscultación para cualquier tipo de estructura, que cuantifique los errores que

puedan producirse a la hora de posicionar la ETMA y que optimice la posición de las señales de referencia para minimizar estos errores. En relación a dicha herramienta se debe destacar que:

- El programa desarrollado en este trabajo permite:
 - Crear un modelo de posicionamiento de prismas, con estación de control, en función de los siguientes parámetros introducidos por el usuario:
 - Número** de prismas
 - Distribución** de los prismas
 - Máxima obertura** de horizonte
 - Altura** de prismas respecto a la estación
 - Distancia** de los prismas respecto a la estación
 - Realizar todos cálculos mínimo-cuadráticos necesarios para realizar los análisis mostrados en este trabajo.
 - Introducir errores groseros y su posterior estudio estadístico.
- Para el cálculo de mínimos cuadrado se ha empleado la distancia reducida ya que en un principio esto debía ser suficiente. Después de haber realizado todos los cálculos y tras haber implementado el sistema de programación, se ha comprobado que una posible mejora sería la realización de los cálculos con las distancias geométricas. Hecho que desviaría mínimamente los resultados obtenidos.
- El software detecta la existencia de errores groseros en alguna de las señales. Habitualmente ese error se encuentra en el test de Baarda (W_i), dentro de los observables de distancia en la señal afectada. Sin embargo, para un menor número de prismas se detectarían más errores en las señales de referencia.

7. REFERENCIAS

Cook, D. (2006), *Robotic Total Stations and Remote Data Capture. Challenges in Construction*. Geotechnical Instrumentation News, Diciembre 2006.

Deitel & Deitel. (1999), *C++ Cómo programar*. Ed. Prentice-Hall.

Lantada N., Núñez A., Gili J.A., Buill F., Puig C., Zabaleta I., Rodríguez J.J. (2012), *Ensayo a escala real de varias técnicas geomáticas de monitorización de movimientos de edificios*. Congreso Topcart 2012, Madrid.

Leica Geosystems AG. (2004), *High-performance total station for precision measurements – with quality certificate*. Heerbrugg, Switzerland.

Muñoz, Ó. (2010, 16 de septiembre). *Templo hipervigilado*. La vanguardia, p. 1.

Rodríguez Jordana, J. (1998), *Ajust d'observacions. El mètode dels mínims quadrats amb aplicacions a la topografía*. Edicions UPC, Barcelona.

Valdemarin F., Monneret J-C., Schwarz H. (2010), *Una red de estaciones totales robotizadas para auscultar la construcción de la línea 9 del metro de barcelona: El caso del doble túnel de la Sagrera*. Jornada Técnica. Aula PAYMAcotas. Barcelona, 21-10-2010.

8. OTRA BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Abad, V. (2013), *Anàlisi retrospectiu de dades de monitorització d'edificis a prop del túnel de la L9 a l'Hospitalet de Llobregat*. Projecte Final de Grau, Gener 2013. Grau en Enginyeria de la construcció, UPC.

Corral, I. (1996), *Topografía de obras*. Ediciones UPC, Barcelona. Ferrer, A. (1996), *Fonaments d'estadística aplicada*. Els Autors, Barcelona.

OpenCV 2.0 C Reference (2009). (en Inglés). Disponible en:

<<http://opencv.willowgarage.com/documentation/index.html>> [último acceso febrero 2013]

Microsoft Visual Studio (2013). *C++ Language and Standard Libraries*. (en Inglés).

Disponible en: <<http://msdn.microsoft.com/library/vstudio/hh875057.aspx>> [último acceso febrero 2013]

Zabaleta, I. (2013), *Proyecto de monitorización de los edificios del Campus Nord UPC (Barcelona) durante la excavación del túnel de la Línea 9 de Metro*. Proyecto Final de Carrera, Septiembre 2013. Ingeniería Técnica en Topografía, EHU.

AGRADECIMIENTOS

Cuando se emprende un proyecto de este tipo, es difícil entender la importancia que van a tener ciertas personas durante el desarrollo del mismo, hasta que éste ha terminado. Es por ello, porque son personas que han formado parte del trabajo realizado durante estos años, que a través de estas breves líneas quisiéramos agradecerles el apoyo otorgado, la paciencia bien dispuesta y los consejos necesarios que en muchos momentos de este largo camino nos han dado las fuerzas necesarias como para seguir adelante, y llegar hasta el final.

A la Dra. Amparo Núñez Andrés, directora del trabajo, y a la Dra. Nieves Lantada Zarzosa por toda su generosa ayuda, disponibilidad, visión investigadora, docente y profesional del terreno donde este proyecto tiene cabida.

Nos gustaría agradecer al Grupo Soldata-Iberica los datos e información proporcionados que han sido un gran aporte a este trabajo, tanto para los diferentes cálculos del *Caso real* como para los conocimientos necesarios en temas de auscultación de última generación.

Por último, nuestro más sincero agradecimiento por el apoyo incondicional de la familia y amigos, y por ayudarnos en todo lo que hiciera falta, aunque no os lo pidiéramos explícitamente.

Sin todos vosotros este trabajo no hubiese sido posible.

Muchas gracias.

CONTENIDO DEL CD

- Resumen en formato .pdf
- Abstract en formato .pdf
- Memoria en formato .pdf
- Anejos en formato .pdf
- Carpeta con archivos de cálculo

Contiene las carpetas y subcarpetas con los archivos, en formato .txt y .xlsx de todas las pruebas realizadas

